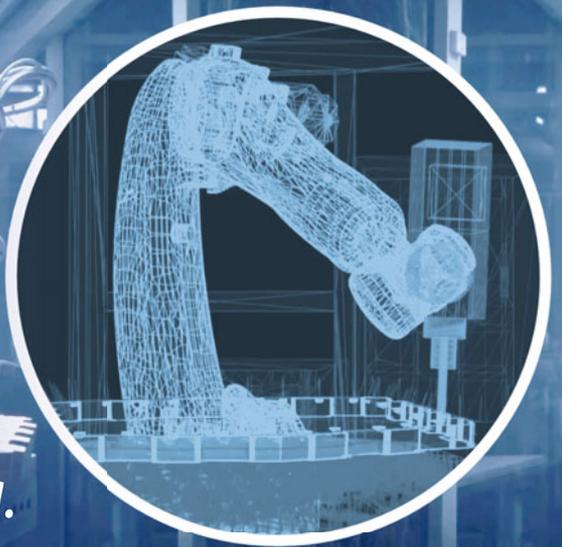


A photograph of a white industrial robotic arm in a factory setting, positioned over a workbench. The background is slightly blurred, showing other parts of the factory.

Alexander Verl
Sascha Röck
Christian Scheifele *Hrsg.*



Echtzeitsimulation in der Produktions- automatisierung

Beiträge zu
Virtueller Inbetriebnahme,
Digitalem Engineering und
Digitalen Zwillingen

OPEN ACCESS

 Springer Vieweg

Echtzeitsimulation in der Produktionsautomatisierung

Alexander Verl · Sascha Röck ·
Christian Scheifele
(Hrsg.)

Echtzeitsimulation in der Produktionsautomatisierung

Beiträge zu Virtueller Inbetriebnahme,
Digitalem Engineering und Digitalen
Zwillingen

Hrsg.

Alexander Verl 
Institut für Steuerungstechnik der
Werkzeugmaschinen und
Fertigungseinrichtungen
Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Sascha Röck 
Virtual Automation Lab
Hochschule Esslingen
Esslingen, Deutschland

Christian Scheifele
ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH
Stuttgart, Deutschland



ISBN 978-3-662-66216-8 ISBN 978-3-662-66217-5 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-66217-5>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en) 2024. Dieses Buch ist eine Open-Access-Publikation.

Open Access Dieses Buch wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Buch enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Alexander Grün
Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Als letzte Verneigung aus seinem früheren Institut haben wir, die Herausgeber, beschlossen, dieses Buch unserem verehrten Lehrer, Doktorvater, Vordenker und Ratgeber Günter Pritschow zu widmen.

Wir sind sehr traurig darüber, dass Günter Pritschow während der Entstehung dieses Buches am 14. Juni 2021 verstorben ist und daher kein eigenes Geleitwort für uns verfassen konnte. In seinen letzten Jahren als Institutsleiter am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart hatte das Thema Echtzeitsimulation für den Steuerungstest angefangen, Fahrt aufzunehmen und ist heute zu einem wichtigen Eckpfeiler der Automatisierungstechnik geworden. Zur Erinnerung an die damalige Sicht auf unser Thema eröffnen wir dieses Buch mit Auszügen aus einer frühen Veröffentlichung von Günter Pritschow zur virtuellen Werkzeugmaschine aus dem Jahre 2003. Er war einer der ersten Gestalter und Förderer dieses Themengebiets und hat es bis zu seinem Ableben auch in seiner Funktion als Gründer und Gesellschafter der ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH mit großem Interesse aktiv begleitet.

An unserer Universität hatte Günter Pritschow praktisch alle relevanten Ämter begleitet: Neben seiner Professur war er unter anderem auch Studiendekan, Dekan der damaligen Fakultät für Maschinenbau, Prorektor für Lehre und Rektor. Er war uns ein großes Vorbild als Wissenschaftler, als Mensch und als Freund. Mit Albert Schweitzers Worten: „Das schönste Denkmal, das ein Mensch bekommen kann, steht im Herzen seiner Mitmenschen“. Günter Pritschow hat ohne Zweifel viele Denkmäler in unseren Herzen hinterlassen.

Three handwritten signatures in blue ink are arranged horizontally. From left to right: a stylized signature 'A. Verl', a signature 'S. Röck', and a signature 'C. Scheifele'.

A. Verl/S. Röck/C. Scheifele

Danksagung

Die Echtzeitsimulation in der Produktionsautomatisierung ist nun seit mehr als 20 Jahren Gegenstand der Forschung und Entwicklung in zahlreichen Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen weltweit. Das Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart war eines der ersten Institute in Deutschland, an dem Methoden und Anwendungen der Echtzeitsimulation von Maschinen und Anlagen im Kontext der industriellen Steuerungstechnik erforscht und entwickelt wurden. Dieses Buch soll einen Überblick über relevante Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der letzten 20 Jahre geben sowie als Basis und Impuls in weiteren zukünftigen Forschungsarbeiten dienen.

Der Sammelband befasst sich in 22 Einzelbeiträgen mit den technologischen Entwicklungen, die zum heutigen Stand der Technik und den beschriebenen praktischen Anwendungen geführt haben und gibt einen Überblick über derzeit laufende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Echtzeitsimulation. Das Buch ist an Studierende der Ingenieurwissenschaften und praktizierende Ingenieure in den Bereichen Engineering, Automatisierung und Inbetriebnahme im Maschinen- und Anlagenbau adressiert.

Für das Korrekturlesen und die Unterstützung bei der Bucherstellung danken wir dem Redaktionsteam (in alphabetischer Reihenfolge):

Fettahoglu, Thomas	Virtual Automation Lab (VAL), Hochschule Esslingen
Fur, Shan	Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart
Hadorn, Alexander	ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH
Hönig, Jana	Virtual Automation Lab (VAL), Hochschule Esslingen
Jaensch, Florian	Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart
Kienzlen, Annika	Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart
Kubelke, Anna-Maria	Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart
Pfeifer, Denis	ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH
Schnierle, Marc	Virtual Automation Lab (VAL), Hochschule Esslingen

Unser besonderer Dank geht an Frau Jana Hönig für die Gesamtkoordination und Frau Anna-Maria Kubelke für die rechtliche Beratung. Wir danken auch den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern im Springer Verlag für die Unterstützung.

Zudem danken die Autoren für die Förderung der Forschungsergebnisse den nachfolgenden Mittelgebern (alphabetische Reihenfolge):

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg (WM)

Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg (MWK)

VDMA e. V. und dem angeschlossenen Industriebeirat

Dieses Buch wurde finanziell unterstützt von:



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
im Rahmen des Projekts „Hybrides Interaktionskonzept
für Schulungen mittels Mixed Reality in the Loop
Simulation – MRiLS“ (Förderkennzeichen: 16SV8344
bis 16SV8348)



Universität Stuttgart



Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen
und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität
Stuttgart



Virtual Automation Lab (VAL), Hochschule Esslingen



ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH

A. Verl
S. Röck
C. Scheifele

Inhalt des Buches

In diesem Sammelband wird in 22 Einzelbeiträgen die Technologie der Echtzeitsimulation von ihren Anfängen in zahlreichen Forschungsprojekten bis hin zu etablierten Lösungen in vielen Entwicklungsbereichen des Maschinen- und Anlagenbaus beleuchtet. Im ersten Beitrag wird ein Blick in die Vergangenheit geworfen und ein Überblick über die damaligen Anwendungen der Simulationstechnik im Produktionsmaschinenbau gegeben. Anschließend folgen im Teil I **„Echtzeitsimulation für die Virtuelle Inbetriebnahme“** Beiträge zu den speziellen Anforderungen und methodischen Ansätzen sowie dem Nutzen einer Hardware-in-the-Loop Simulation zur Virtuellen Inbetriebnahme von Produktionssystemen und -prozessen. Es werden sowohl numerische Aspekte der Echtzeitsimulation beleuchtet als auch Architekturen und Realisierungen von Simulationsumgebungen für verschiedene Anwendungen vorgestellt. Die Beiträge in Teil II **„Echtzeitsimulation und Modellgenerierung im Entwicklungsprozess“** befassen sich mit der wirtschaftlichen Integration der Virtuellen Inbetriebnahme in den Entwicklungsprozess im Maschinen- und Anlagenbau. Dabei geht es unter anderem um Themen zur automatischen Modellgenerierung, zur Online-Verfügarmachung von Modellen und zum Einsatz für Lernumgebungen für das Reinforcement Learning. In Teil III **„Echtzeitsimulation in der Betriebsphase“** werden neue Trends zur Anwendung Digitaler Zwillinge in der Betriebsphase von Maschinen und Anlagen im Kontext der digitalen Transformation und Industrie 4.0 vorgestellt. Beiträge zum Digital Twin as a Service Konzept und zur Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation zeigen, wie die Echtzeitsimulation standort- und endgeräteunabhängig genutzt und wie der Mensch in den Simulationskreislauf nahezu vollständig integriert werden kann. Darüber hinaus werden Forschungsarbeiten vorgestellt, die auf Basis echtzeitfähiger Maschinen- oder Prozessmodelle neue Steuerungsfunktionen ermöglichen, um Maschinen- und Prozesse effizienter und genauer zu machen.

Inhaltsverzeichnis

1	Die simulierte Werkzeugmaschine, ein Rückblick	1
	Günter Pritschow†, Alexander Verl, Sascha Röck und Christian Scheifele	
Teil I Echtzeitsimulation für die Virtuelle Inbetriebnahme		
2	Anforderungen und Methoden für die Hardware-in-the-Loop Simulation zur Virtuellen Inbetriebnahme von Produktionssystemen	19
	Sascha Röck und Günter Pritschow†	
3	Echtzeit-Co-Simulation von Produktionsanlagen	43
	Christian Scheifele und Alexander Verl	
4	ISG-virtuos – der Digitale Zwilling für die Praxis	61
	Christian Scheifele, Dieter Scheifele, Ulrich Eger, Christian Daniel, Edmund Buchal und Sascha Röck	
5	Echtzeitsimulation der Prozess-Maschinen-Interaktion zur Prognose der Prozessstabilität mit realer CNC am Beispiel eines Fräsprozesses	75
	Sascha Röck	
6	Herausforderungen bei der Abbildung der Prozess-Maschine Interaktion am Beispiel der Umformsimulation	91
	Christer Schenke, Lars Penter, Stefan Heiland und Steffen Ihlenfeldt	
7	Materialflusssimulation für die Virtuelle Inbetriebnahme in Steuerungsechtzeit	121
	Simone Göttlich, Simon Hoher, Alexander Verl, Jennifer Weißen und Annika Kienzlen	
8	Nutzen von Digitalen Zwillingen und Virtueller Inbetriebnahme für den Maschinen- und Anlagenbau	141
	Karl Kübler, Florian Jaensch, Christian Daniel und Alexander Verl	

Teil II Echtzeitsimulation und Modellgenerierung im Entwicklungsprozess

- 9 Automatische Modellgenerierung aus Engineering-Daten** 157
Stefan Scheifele und Alexander Verl
- 10 Automatische Modellgenerierung für die Virtuelle Inbetriebnahme bei HOMAG** 169
Ludwig Albrecht, Patrick Seeger und Lukas Kübler
- 11 TwinStore – Online-Plattform für Simulationsmodelle** 181
Christian Scheifele
- 12 Testautomatisierung am Digitalen Zwilling** 193
Karl Kübler, Gerhard Krebsler und Alexander Verl
- 13 Simulationsmodelle der Virtuellen Inbetriebnahme als Lernumgebung für Reinforcement Learning** 213
Florian Jaensch und Alexander Verl
- 14 Konzept für die automatisierte Planung von Montagesystemen** 229
Daniella Brovkina und Oliver Riedel

Teil III Echtzeitsimulation in der Betriebsphase

- 15 Digital Twin as a Service** 251
Timm von Bergen, Marc Schnierle und Sascha Röck
- 16 Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation** 271
Marc Schnierle, Jana Hönig und Sascha Röck
- 17 Anwendungsberichte über den industriellen Einsatz der Mixed Reality im Maschinen- und Anlagenbau** 305
Ulf Sprung, Thomas Celofiga, Dario Goller, Jana Hönig, Marc Schnierle, Timm von Bergen und Sascha Röck
- 18 Anwendungsberichte über den Einsatz der Mixed Reality in der Aus- und Weiterbildung technischer Fachkräfte** 323
Mathias Liewald, Jana Hönig, Jochen Schade, Angelika Weber, Philipp Clauß, Timm von Bergen, Marc Schnierle und Sascha Röck
- 19 Lernpotenziale und -herausforderungen Digitaler Zwillinge in der Betriebsphase** 349
Julia Franz und Camilla Wehnert
- 20 Online-Berechnung des Digitalen Zwillings für CNC am Beispiel der additiven Fertigung** 361
Frederik Wulle, Christian Scheifele und Alexander Verl

21	Strukturmodellbasierte Korrektur thermisch bedingter Fehler	373
	Steffen Ihlenfeldt, Xaver Thiem und Jens Müller	
22	Räumliche Kraftmessung und -regelung mit strukturintegrierter Sensorik in Hexapoden	389
	Christian Friedrich, Jens Müller und Steffen Ihlenfeldt	

Herausgeber- und Autorenverzeichnis

Über die Herausgeber



Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl, geb. 1966, studierte von 1986–1991 Elektrotechnik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg und schloss als Dipl.-Ing. ab. 1992–1994 arbeitete er als Entwicklungsingenieur bei der Siemens AG am Forschungszentrum Erlangen. Er promovierte von 1994–1997 zur Gelenkregelung des DLR-Leichtbauroboters am Institut für Robotik und Mechatronik (DLR) in Oberpfaffenhofen. 1997–2005 war er Gründer und Geschäftsführer der AMATEC Robotics GmbH (ab 2005 Teil der KUKA Roboter GmbH). Seit 2005 ist Alexander Verl ordentlicher Professor und Leiter des Instituts für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) an der Universität Stuttgart. Seine fachlichen Schwerpunkte liegen in den Bereichen industrielle Steuerungstechnik, Bewegungssteuerungen für Roboter und Werkzeugmaschinen, Echtzeitsimulation und Software-defined Manufacturing.



Prof. Dr.-Ing. Sascha Röck, geb. 1970, studierte 1995–2000 nach mehrjähriger Berufserfahrung als gelernter Kraftfahrzeugmechaniker Maschinenbau an der Hochschule Esslingen. Anschließend war er als Entwicklungsingenieur tätig, bevor er von 2003–2007 am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) an der Universität Stuttgart auf dem Gebiet der Echtzeitsimulation von Produktionsanlagen mit realen Steuerungssystemen promovierte. 2008 wurde er zum Juniorprofessor im Exzellenzcluster Simulation Technology auf die Professur Application of Simulation Technology in Production Engineering an die

Universität Stuttgart berufen und leitete die Forschungsgruppe Echtzeitsimulation und Prozessdynamik am ISW. Seit 2014 ist er Professor an der Hochschule Esslingen und seit 2017 Gründer und Leiter des Forschungsinstituts Virtual Automation Lab (VAL) an der Fakultät Maschinen und Systeme. Seine fachlichen Schwerpunkte liegen in den Bereichen Echtzeitsimulation, Digitaler Zwilling, Mixed Reality Methoden in der industriellen Produktion und autonome Indoor-Flugrobotik.



Dr.-Ing. Christian Scheifele, geb. 1989, studierte von 2009–2015 Mechatronik an der Universität Stuttgart und schloss als M.Sc. ab. Er promovierte von 2015–2019 am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) an der Universität Stuttgart mit seiner wissenschaftlichen Arbeit „Plattform zur Echtzeit-Co-Simulation für die virtuelle Inbetriebnahme“. Von 2016–2019 leitete er am ISW die Forschungsgruppe Virtuelle Methoden in der Produktionstechnik. Von 2019–2021 übernahm Christian Scheifele die Leitung des Bereichs Forschung und Entwicklung Simulationstechnik bei der ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH (ISG) und verantwortete die Produktentwicklung von ISG-virtuos sowie begleitende Forschungs- und Innovationsprojekte. Seit 2021 ist er Geschäftsführender Gesellschafter der ISG und wurde zudem in 2021 mit Gründung der TwinStore GmbH zu deren Geschäftsführer bestellt.

Autorenverzeichnis

Ludwig Albrecht Senior Manager und Leiter der Vorentwicklung, HOMAG Group, Schopfloch, Deutschland

Daniella Brovkina Promotionsstipendiatin, Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME), Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

Edmund Buchal Softwareentwickler Simulationstechnik, ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH, Stuttgart, Deutschland

Thomas Celofiga Senior Solution Architect, Schuler Pressen GmbH, Göppingen, Deutschland

Philipp Clauß Betriebsleiter, Institut für Umformtechnik (IFU), Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

Christian Daniel Business Manager Simulation Technology, ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH, Stuttgart, Deutschland

Ulrich Eger Abteilungsleiter Simulationstechnik und Prokurist, ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH, Stuttgart, Deutschland

Julia Franz Professorin und Inhaberin der Professur für Erwachsenenbildung und Weiterbildung, Otto-Friedrich-Universität Bamberg, Bamberg, Deutschland

Christian Friedrich Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Professur für Werkzeugmaschinenentwicklung und adaptive Steuerungen, Technische Universität Dresden, Dresden, Deutschland

Dario Goller Automatisierungstechniker, topex GmbH, Erkenbrechtsweiler, Deutschland

Simone Göttlich Professorin und Leiterin des Lehrstuhls für wissenschaftliches Rechnen, Universität Mannheim, Mannheim, Deutschland

Stefan Heiland Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Professur für Werkzeugmaschinenentwicklung und adaptive Steuerungen, Technische Universität Dresden, Dresden, Deutschland

Simon Hoher Professor und Fachbereichsleiter, Fachbereich Mechatronik & Robotik, Fachhochschule Salzburg, Salzburg, Österreich

Jana Hönig Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Virtual Automation Lab (VAL), Hochschule Esslingen, Esslingen, Deutschland

Steffen Ihlenfeldt Professor und Inhaber der Professur für Werkzeugmaschinenentwicklung und adaptive Steuerungen, Technische Universität Dresden, Dresden, Deutschland

Florian Jaensch Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

Annika Kienzlen Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

Gerhard Krebser Abteilungsleiter Testautomatisierung, ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH, Stuttgart, Deutschland

Karl Kübler Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

Lukas Kübler Entwicklungsingenieur, HOMAG Group, Schopfloch, Deutschland

Mathias Liewald Professor und Institutsleiter, Institut für Umformtechnik (IFU), Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

Jens Müller Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Professur für Werkzeugmaschinenentwicklung und adaptive Steuerungen, Technische Universität Dresden, Dresden, Deutschland

Lars Penter Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Professur für Werkzeugmaschinenentwicklung und adaptive Steuerungen, Technische Universität Dresden, Dresden, Deutschland

Günter Pritschow † Professor und Institutsleiter, Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

Oliver Riedel Professor und Institutsleiter, Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

Sascha Röck Professor und Institutsleiter des Virtual Automation Lab (VAL), Hochschule Esslingen, Esslingen, Deutschland

Jochen Schade Schulleiter, Max-Eyth-Schule Kirchheim unter Teck, Kirchheim unter Teck, Deutschland

Christian Scheifele Geschäftsführender Gesellschafter, ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH, Stuttgart, Deutschland, Geschäftsführer TwinStore GmbH, Stuttgart, Deutschland

Dieter Scheifele Geschäftsführender Gesellschafter, ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH, Stuttgart, Deutschland

Stefan Scheifele Geschäftsführender Gesellschafter, ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH, Stuttgart, Deutschland

Christer Schenke Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz, Deutschland

Marc Schnierle Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Virtual Automation Lab (VAL), Hochschule Esslingen, Esslingen, Deutschland

Patrick Seeger Entwicklungsingenieur, HOMAG Group, Schopfloch, Deutschland

Ulf Sprung Technischer Leiter, topex GmbH, Erkenbrechtsweiler, Deutschland

Xaver Thiem Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Professur für Werkzeugmaschinenentwicklung und adaptive Steuerungen, Technische Universität Dresden, Dresden, Deutschland

Alexander Verl Professor und Institutsleiter, Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

Angelika Weber Leiterin Elektroabteilung, Max-Eyth-Schule Kirchheim unter Teck, Kirchheim unter Teck, Deutschland

Camilla Wehnert Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Professur für Erwachsenenbildung und Weiterbildung, Otto-Friedrich-Universität Bamberg, Bamberg, Deutschland

Jennifer Weißen Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Lehrstuhl für wissenschaftliches Rechnen, Universität Mannheim, Mannheim, Deutschland

Frederik Wulle Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

Timm von Bergen Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Virtual Automation Lab (VAL), Hochschule Esslingen, Esslingen, Deutschland

Abkürzungsverzeichnis

AB	Adams-Bashforth
ABM	Adams-Bashforth-Moulton Prädiktor-Korrektor-Verfahren
ADS	Automation Device Specification
AM	Adams-Moulton
AR	Augmented Reality
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computerized Numerical Control
CPU	Central Processing Unit
DOF	Degrees of freedom
DTaaS	Digital Twin as a Service
DZ	Digitaler Zwilling
EZF	Echtzeitfaktor
FDM	Fused Deposition Modeling
FE	Finite Elemente
FLE	Flanscheinzug
FLOP	Floating Point Operations
HiL	Hardware-in-the-Loop
HiLS	Hardware-in-the-Loop Simulation
HLI	High Level Interface
HMI	Human Machine Interface
IBN	Inbetriebnahme
IPO	Interpolation
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
MiLS	Model-in-the-Loop Simulation
MKS	Mehrkörpersimulation
ML	Maschinelles Lernen
MOR	Modellordnungsreduktion
MR	Mixed Reality
MRiLS	Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation
MSV	Mehrschrittverfahren

NC	Numerical Control
NH	Niederhalter
PC	Personal Computer
PECE	Predict-Evaluate-Correct-Evaluate
PLC	Programmable logic controller
RTF	Real-Time-Factor
SiLS	Software-in-the-Loop Simulation
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TCP	Tool Center Point
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.
VIBN	Virtuelle Inbetriebnahme
VR	Virtual Reality
XiLS	X-in-the-Loop Simulation



Die simulierte Werkzeugmaschine, ein Rückblick

1

Günter Pritschow†, Alexander Verl, Sascha Röck
und Christian Scheifele

Zusammenfassung

Dieser Beitrag zitiert in Teilen eine Veröffentlichung, die im Jahre 2003 auf dem Fertigungstechnischen Kolloquium (FTK) der Gesellschaft für Fertigungstechnik in Stuttgart von Prof. Dr.-Ing. Günter Pritschow et al. präsentiert wurde [1]. Zu dieser Zeit war die durchgängige Simulation von Maschinen und Anlagen eines der Trendthemen im modernen Maschinenbau mit der sich die gesamte Branche auseinandersetzte. Was heute als etablierte Technologie in vielen Entwicklungsbereichen nicht mehr wegzudenken ist, steckte damals noch in den Anfängen und war thematischer Bestandteil in zahlreichen Forschungsprojekten an den produktionstechnischen Instituten deutscher Universitäten.

Dieser Beitrag soll einen Blick in die Vergangenheit werfen und einen Überblick über die Anforderungen an die Simulationstechnik im Produktionsmaschinenbau jener Zeit geben.

G. Pritschow† · A. Verl (✉)
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW),
Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland
E-Mail: alexander.verl@isw.uni-stuttgart.de

S. Röck
Virtual Automation Lab (VAL), Hochschule Esslingen, Esslingen, Deutschland

C. Scheifele
ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH, Stuttgart, Deutschland

1.1 Einführung (anno 2003)

Die virtuelle Welt nimmt aufgrund immer leistungsfähigerer Rechnersysteme und neuer Softwaretechnologien in unserem alltäglichen Leben einen ständig wachsenden Raum ein. Was in der Welt der Computerspiele und Schulungssysteme (z. B. Fahr- und Flugsimulatoren) oder in Bereichen des Fahrzeugbaus bereits eine Selbstverständlichkeit ist, wird mehr und mehr auch in der Produktionstechnik als Hilfsmittel für alle Phasen des Maschinenlebenszyklus und der Produktionsabläufe eingesetzt.

Die unterschiedlichen Anforderungen dieser Phasen, welche die Planung, Herstellung, Anwendung und den Einsatz der Werkzeugmaschinen umfassen, führen zu einem zentralen Ziel für die virtuelle Produktion: Die durchgängige Simulation der Werkzeugmaschine!

Grundvoraussetzung für die durchgängige Simulation ist eine ganzheitliche Modellierung von Maschine und Prozess. Ohne eine vollständige mathematische und softwaretechnische Modellierung vom Antrieb über die Maschinenkinematik und -dynamik bis hin zum Produktionsprozess ist diese Durchgängigkeit nicht erreichbar.

Um der globalen Anforderung nach Wirtschaftlichkeit gerecht zu werden, der sich auch die virtuelle Produktion stellen muss, sind neben einer durchgängigen Modellierung auch die Themen Wiederverwendung von Software und einheitliche Schnittstellen von zentraler Bedeutung. Gelingt es beispielsweise, durch den Einsatz einheitlicher Schnittstellen beliebige Systemkonfigurationen aus realen und virtuellen Komponenten zusammenzustellen, so können beginnend mit dem Maschinenhersteller über Inbetriebnehmer bis hin zum Maschinenanwender alle vom Prinzip der virtuellen Produktion profitieren.

Dieser Beitrag soll einen kurzen Überblick über die bisherige Entwicklung der unterschiedlichen Simulationsdisziplinen im Werkzeugmaschinenbau geben sowie die Möglichkeiten der gekoppelten Simulation aufzeigen. Aktuelle Forschungsergebnisse unterschiedlicher Hochschulen beschreiben darüber hinaus den bereits zurückgelegten und noch zu überwindenden Weg zur „virtuellen Werkzeugmaschine“!

1.2 Entwicklung der Simulationstechnik im Werkzeugmaschinenbau (anno 2003)

Motivation – warum simulieren?

Die Motivation für die Modellbildung und Simulation im Bereich der spanenden Werkzeugmaschinen beruhen im Wesentlichen auf Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen. Neben den direkten wirtschaftlichen Aspekten, wie kürzer werdende Lieferzeiten, Parallelisierung von Entwicklungsabläufen und steigende Variantenvielfalt, können auch die technischen Aspekte durch Wirtschaftlichkeitsanforderungen begründet werden. So führen

das analytische Vorgehen beim Verwenden von Simulationssystemen, die damit verbundene bessere Systemkenntnis sowie die simulationsbasierten Schulungsmöglichkeiten unmittelbar zu monetären Vorteilen.

Vor diesem Hintergrund lassen sich für die unterschiedlichen Phasen des Maschinenlebenszyklus und der Produktionsabläufe für den jeweiligen Personenkreis (Entwickler, Konstrukteur, Inbetriebnehmer, Benutzer) individuelle Gründe für die Anwendung von Simulationstechniken finden. Während der Konstrukteur einer Werkzeugmaschine mithilfe einer Simulation beispielsweise das Ziel der Erhöhung der Maschinendynamik verfolgt, so benötigt der Benutzer einer Werkzeugmaschine vielmehr eine Hilfestellung durch das simulierte Einfahren von Teileprogrammen.

Grundlage für alle Anwendungen ist zunächst die Abbildung der real existierenden Komponenten einer Werkzeugmaschine in einem Modell (Abb. 1.1). Diese virtuelle Werkzeugmaschine kann unter Verwendung geeigneter Simulationswerkzeuge zur Unterstützung der Beteiligten in den einzelnen Phasen des Maschinenlebenszyklus verwendet werden. Zur Überprüfung der Gültigkeit und Qualität des Modells und der Simulationsergebnisse ist ein Abgleich mit realen Ergebnissen (Validierung/Verifikation) unerlässlich.

Simulationsdisziplinen – was simulieren?

Das mechatronische System Werkzeugmaschine ist gekennzeichnet durch das Zusammenwirken verschiedener technischer Fachdisziplinen. Angefangen bei der Informationstechnik über die Elektrotechnik, Hydraulik, Mechanik bis hin zur Werkstofftechnik

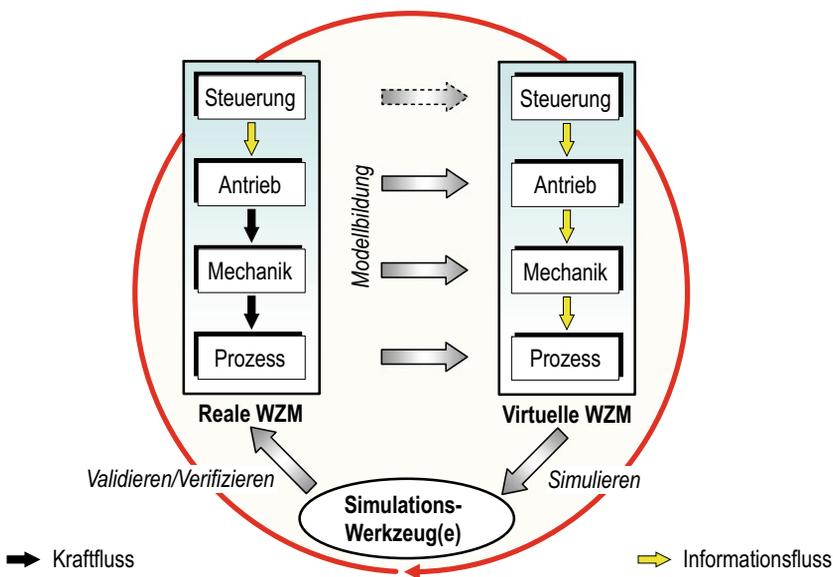


Abb. 1.1 Zusammenhang zwischen realer und virtueller Werkzeugmaschine

bei Fertigungsprozessen. Für die Simulation gibt es für jede dieser Fachdisziplinen spezialisierte Werkzeuge, die üblicherweise getrennt voneinander zum Einsatz kommen:

- Simulation von Steuerungssystemen
- Simulation von Antriebssystemen
- Simulation der Maschinenmechanik
- Simulation des Fertigungsprozesses

Für jede dieser Simulationsdisziplinen sind bereits unterschiedliche Simulationswerkzeuge kommerziell erhältlich. Die Simulationswerkzeuge und die darin verwendeten Methoden sind speziell an die Probleme der jeweiligen Disziplin angepasst. Ein Auszug gängiger Methoden und deren Anwendungen in den einzelnen Simulationsdisziplinen ist in Tab. 1.1 dargestellt.

Mit Hilfe der dargestellten Simulationmethoden können die Teilprobleme der jeweiligen Fachdisziplin sehr gut untersucht werden. Fachdisziplinübergreifende Fragestellungen können jedoch nur unzureichend betrachtet werden. Hier findet die sogenannte gekoppelte (multidisziplinäre) Simulation ihren Einsatz.

1.3 Gekoppelte Simulationen (anno 2003)

Das Ziel der Kopplung von Simulationswerkzeugen ist es, eine durchgängige Beschreibung und Berechnung des Maschinenverhaltens durch Zusammenführen der beschriebenen Fachdisziplinen zu ermöglichen.

Wurden bisher die unterschiedlichsten proprietär entwickelten und kommerziellen Simulationswerkzeuge als einzelstehende Anwendungen betrachtet, so bewegt sich der Trend in den vergangenen Jahren verstärkt hin zu so genannten „gekoppelten Simulationen“. Durch softwaretechnisches Verknüpfen der disziplinspezifischen Simulationswerkzeuge kann das von einer Simulation berechnete Systemverhalten als Eingang für die nachgeschaltete Simulation verwendet werden, deren Ergebnis wiederum auf die vorgegeschaltete Simulation zurückwirkt (Wechselwirkung) und ggf. für weitere nachgeschaltete Simulationen verwendet wird, wodurch in der Summe eine disziplinübergreifende Gesamtsimulation ermöglicht wird.

Unter Betrachtung der Definition der virtuellen Produktion [2] umfasst die Simulation der Werkzeugmaschine die Abstraktionsebene der Anlage und Technologie. Diese beinhaltet die Teilsysteme der Steuerung, des Antriebs, der Mechanik und des Prozesses. In Abb. 1.2 werden durch Kopplung von Teildisziplinen die Systemgrenzen innerhalb einer Werkzeugmaschine bis hin zum Gesamtsystem Werkzeugmaschine zur Klassifizierung stückweise erweitert.

Tab. 1.1 Mögliche Simulationsmethoden sowie deren Anwendungen in spezifischen Simulationsdisziplinen

Simulationsdisziplin	Modell / Methode	Anwendung
Simulation von Steuerungssystemen	Virtuelle Steuerung (Steuerungssoftware)	<ul style="list-style-type: none"> • Steuerungstest • Sollwertanalysen
	Emulierte Steuerung (Steuerungsmodell)	<ul style="list-style-type: none"> • Verifikation von NC-Teileprogrammen • Bearbeitungssimulation
Simulation von Antriebssystemen	Blockschaltbilder	<ul style="list-style-type: none"> • Abstrahierte Systemanalyse und –auslegung (z.B.: Reglermodelle)
	Netzwerkdarstellung	<ul style="list-style-type: none"> • Schaltungsanalyse und –auslegung (z.B.: elektrisch, pneumatisch, hydraulisch)
	Zustandsautomat	<ul style="list-style-type: none"> • Logik und ereignisorientiertes Verhalten
Simulation der Maschinenmechanik	Finite-Elemente-Methode (FEM)	<ul style="list-style-type: none"> • Berechnung strukturmehchanischer Eigenschaften
	Mehrkörpersimulation (MKS)	<ul style="list-style-type: none"> • Dynamischen Analysen bei großen Verfahrbewegungen & Nichtlinearitäten
	3D-Kinematik-Simulation	<ul style="list-style-type: none"> • Kollisionskontrolle • Arbeitsraumuntersuchungen • Bewegungssimulation • Visualisierung
Prozesssimulation	Simulation der Spanbildung	<ul style="list-style-type: none"> • Oberflächenoptimierung des Werkstücks
	Geometrische Volumenmodelle	<ul style="list-style-type: none"> • Abtrags-/Bearbeitungssimulation • Prozesskraftrekonstruktion
	Prozessstabilität	<ul style="list-style-type: none"> • Erkennung von regenerativem Rattern • Werkzeugbruch und –verschleiß

Entsprechend dieser Kombinatorik ergeben sich für die gekoppelte Simulation eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten. Einen exemplarischen Überblick möglicher Anwendungen ist in Tab. 1.2 zusammengefasst.

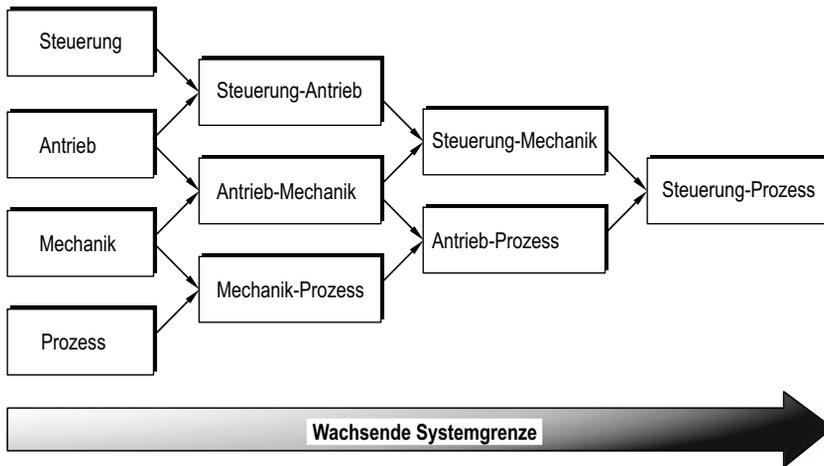


Abb. 1.2 Klassifizierung der Systemgrenzen einer Werkzeugmaschine

1.4 Aktuelle Anwendungsbeispiele der simulierten Werkzeugmaschinen (anno 2003)

Im Folgenden werden auf der Basis der aufgeführten Anwendungsmöglichkeiten einige Beispiele vorgestellt. Es handelt sich dabei um eine Sammlung interessanter Anwendungen anno 2003, die das Potential der Simulationstechnik auf dem Weg zur durchgängig simulierten Werkzeugmaschine zeigen.

Gekoppelte Simulation von Maschinendynamik und Antriebsregelung unter Verwendung der Finiten-Elemente-Methode (FEM)

Die Strukturnachgiebigkeit einer Werkzeugmaschine hat entscheidende Auswirkungen auf die Regeldynamik und das Bearbeitungsergebnis. Somit ist das genaue Erfassen auch hochfrequenter Schwingformen notwendig, die nur durch eine hinreichend detaillierte Modellierung der flexiblen Strukturbaugruppen errechnet werden können. Dies ermöglicht der Einsatz der FEM. Durch die Kopplung der Antriebs- und Mechaniksimulation ist eine Integration des FEM-Modells in die Regelkreisanalyse möglich (Abb. 1.3).

In [3] wird gezeigt, dass die erreichbaren Regelparameter K_v , K_p und T_n der Servoantriebe mit Hilfe der gekoppelten Simulation ermittelt werden können. Es wird eine eindeutige Zuordnung von Resonanzstellen der Regelstrecke und den zugehörigen Schwingformen nachgewiesen. Durch die gekoppelte Simulation im Zeitbereich, beispielsweise eines Kreisformtests, wird das Verhalten des Gesamtsystems auch unter Einwirkung von Störkräften (z. B. nichtlineare Reibungskräfte) bis hin zur Bearbeitungsstelle am Tool Center Point (TCP) und Werkstück berechnet.

Tab. 1.2 Anwendungsmöglichkeiten der gekoppelten Simulationen

Betrachtete Systemgrenzen	Anwendungsmöglichkeit
Steuerung bis Antrieb	<ul style="list-style-type: none"> • Virtueller Antriebsprüfstand für die Steuerungs- und Regelerprobung und Auslegung • Konformitätstests von Steuerungen
Antrieb bis Mechanik	<ul style="list-style-type: none"> • Antriebs- und Regelungsauslegung unter Berücksichtigung dynamischer Eigenschaften der Maschinenmechanik • Optimierung der mechanischen Konstruktion unter Berücksichtigung der Antriebs- und Regeldynamik
Mechanik bis Prozess	<ul style="list-style-type: none"> • Prozessstabilität unter Berücksichtigung der Maschinenmechanik • Optimierung der mechanischen Konstruktion unter Berücksichtigung der Prozessdynamik
Steuerung bis Mechanik	<ul style="list-style-type: none"> • Steuerungserprobung und Vorabinbetriebnahme unter Berücksichtigung der Maschinendynamik von der Antriebsregelung bis zur Maschinenmechanik • Antriebs- und Regelungsauslegung unter Berücksichtigung der Maschinenmechanik und Sollwerten aus der Steuerung • Optimierung der Maschinentopologie und Bauteilstruktur unter Berücksichtigung von Sollwerten aus der Steuerung
Antrieb bis Prozess	<ul style="list-style-type: none"> • Untersuchung dynamischer Eigenschaften der Gesamtmaschine unter Berücksichtigung des kompletten Kraftflusses von der Krafterzeugung (Antrieb + Regelung) bis zur Kraftumsetzung (Mechanik + Prozess)
Steuerung bis Prozess	<ul style="list-style-type: none"> • Untersuchung der dynamischen Eigenschaften der Gesamtmaschine (wie oben) unter Berücksichtigung von Sollwerten aus der Steuerung • Steuerungserprobung, Antriebs-, Regler-, Struktur-, Topologie- und Prozessoptimierung sowie Vorabinbetriebnahme und Schulung an der „virtuellen Werkzeugmaschine“

Eine weitere Anwendung der gekoppelten Simulation von Antriebsregelung und Mechanik ist in [4 und 5] beschrieben. Dabei wird der Einfluss der Messsystemposition auf die erreichbare Dynamik untersucht. Mit Hilfe der Simulation wird gezeigt, dass durch verbessertes Anordnen des Messsystems der Phasenverlust minimiert werden kann (Abb. 1.4).

Software-in-the-Loop Simulation (SiLS)

Die sogenannte „virtuelle Steuerung“ oder „simulierte Steuerung“ wird häufig als Synonym für eine auf dem Simulations-PC lauffähige Steuerungssoftware (d.h. PC Hardware und Standardbetriebssystem z. B. Windows) verwendet. Aus diesem Grund reduziert sich die Modellierung der Steuerung im Allgemeinen auf das Portieren der Steuerungssoftware auf eine entsprechende PC Hardware inkl. Betriebssystem. Die Kopplung der virtuellen

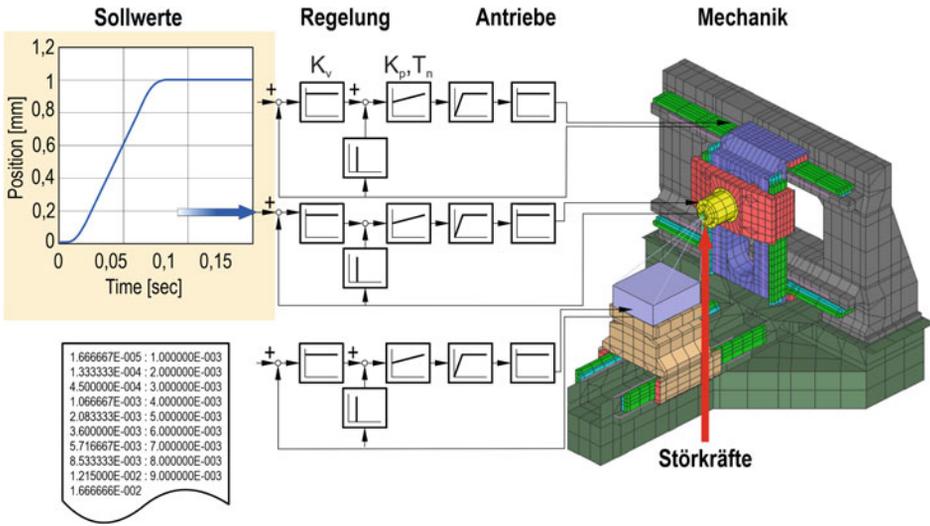


Abb. 1.3 Integration der FEM in die Regelkreisanalyse (Siemens Linear Motor Systems GmbH & Co.KG)

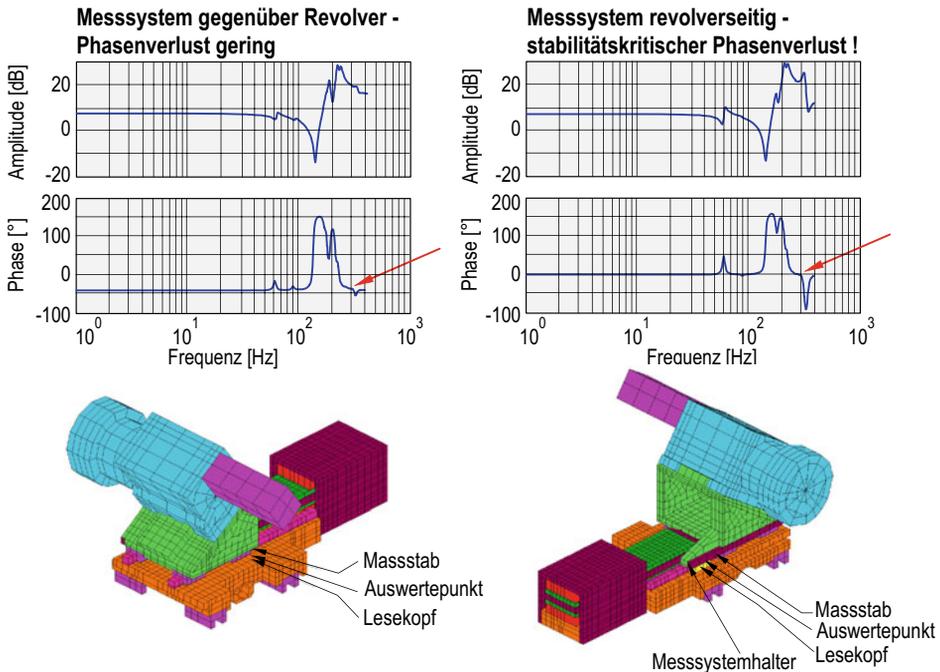


Abb. 1.4 Optimierung des Messortes (GILDEMEISTER Drehmaschinen GmbH/Siemens Linear Motor Systems GmbH & Co.KG/WZL, RWTH Aachen)

Steuerung mit einem Simulationssystem wird im Folgenden als Software-in-the-Loop-Simulation (SiLS) bezeichnet.

Die SiLS findet bei der Antriebs- und Reglerauslegung sowie bei der Konstruktion und Optimierung der Maschinenstruktur Anwendung. Für Antriebshersteller bietet sich eine umfangreiche Entwicklungsplattform. Die Sollwerte aus der virtuellen Steuerung sowie die Störkräfte aus der Mechaniksimulation, die durch Maschinendynamik und Reibung entstehen, werden als Eingangsgrößen für die Antriebsregelung verwendet. Der Maschinenhersteller hingegen kann bei der Konstruktion der Maschinenstruktur die Antriebs- und Reglerdynamik mitberücksichtigen. Vor allem bei Maschinenkinematiken, deren Zusammenhang zwischen Werkzeugkoordinaten und den Achskoordinaten nichtlinear ist, gewinnt der Einsatz der gekoppelten Simulation zwischen Steuerung, Antriebsregelung und Mechanik immer mehr an Bedeutung.

Übergeordnetes Ziel des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projektes iViP [6] durchgeführten Teilprojektes „Simulation mechatronischer Systeme“ war die Entwicklung von Softwaremodulen zur Abbildung und Simulation mechatronischer Systeme. Dabei wurde am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (IWB) der TU München eine virtuelle NC-Steuerung (VNC) zur Ankopplung an die Anlagensimulation mit AnySIM und an die Mechatronik-Simulation (Maschinenmechanik und Antriebsregelung) mit SimPACK und Matlab/Simulink eingesetzt. Die VNC ist eine Nachbildung der numerischen Steuerung SINUMERIK 840 D der Fa. Siemens unter Verwendung der original Steuerungssoftware. Die VNC arbeitet im Gegensatz zu einer realen Steuerung nicht im Echtzeitmaßstab sondern in einem virtuellen Zeitmaßstab, auf den das Verhalten der realen Steuerung zeitgenau abgebildet wird und somit AnySIM und SimPACK genügend Rechenzeit für Visualisierungs- und Berechnungsoperationen zwischen den Steuerungstakten zur Verfügung steht. In Abb. 1.5 ist der Aufbau der integrierten Simulationsumgebung dargestellt.

Die Anlagensimulation dient dabei als Plattform zur 3D-Visualisierung von Bewegungsabläufen, zur automatischen Kollisionskontrolle und zur automatischen Aktualisierung der Werkstückgeometrie während der Bearbeitungssimulation. Darüber hinaus übernimmt AnySIM die Synchronisation der einzelnen Komponenten der integrierten Simulationsumgebung. Die Mechatronik-Simulation besteht aus einer Kopplung zwischen dem Mehrkörpersimulationswerkzeug SimPACK mit Matlab/Simulink, wobei Matlab/Simulink die Berechnung der Antriebsregelung und die Kopplung zwischen der VNC und der Mechatronik-Simulation auf Basis der COM/DCOM-Technologie übernimmt.

Am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart wurde ebenfalls eine SiLS realisiert. Für diese gekoppelte Simulationsumgebung kam eine PC-basierte Steuerungssoftware der Fa. Industrielle Steuerungstechnik GmbH (ISG) als virtuelle Steuerung zum Einsatz. Die Antriebsregelung wurde mit Matlab/Simulink, und die Maschinenmechanik als Mehrkörpermodell mit ADAMS realisiert (Abb. 1.6). Dabei wird die Steuerung über Matlab/

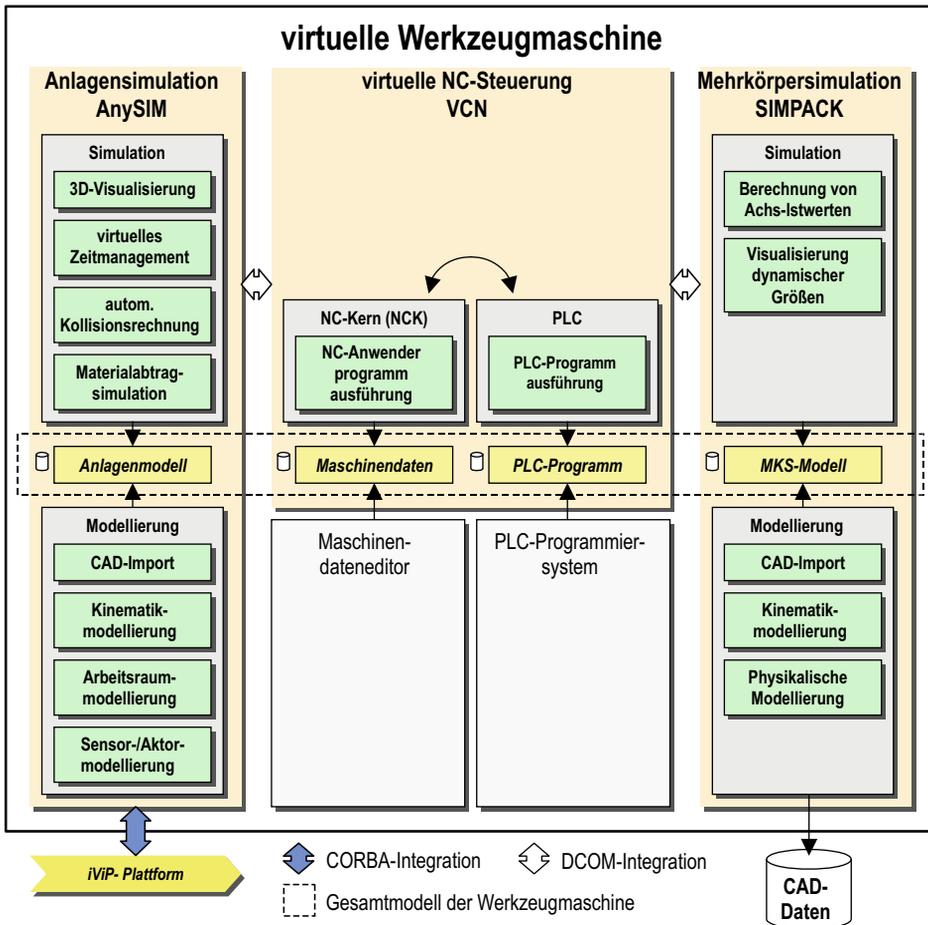


Abb. 1.5 Architektur der integrierten Simulationsumgebung (IWB, TU München)

Simulink an das Mehrkörpermodell über die Lage-Soll- und Istwerte und die Antriebskräfte der Linearmotoren gekoppelt. Ein Vorteil dieser Ausprägung ist die Skalierbarkeit der Modellierungskomplexität. Konstruktionsbegleitend können somit Maschinenmodell wie Regelungsmodell dem jeweiligen Simulationsziel angepasst werden. Gerade das Einbringen von diskreten Steifigkeiten/Dämpfungen in das Mehrkörpermodell erlaubt neben der Analyse der Starrkörperdynamik auch die Untersuchung von Gelenknachgiebigkeiten und den daraus resultierenden Schwingungseffekten. Durch Integration flexibler Körper in die Mehrkörpermodelle sind auch strukturdynamische Betrachtungen möglich [7].

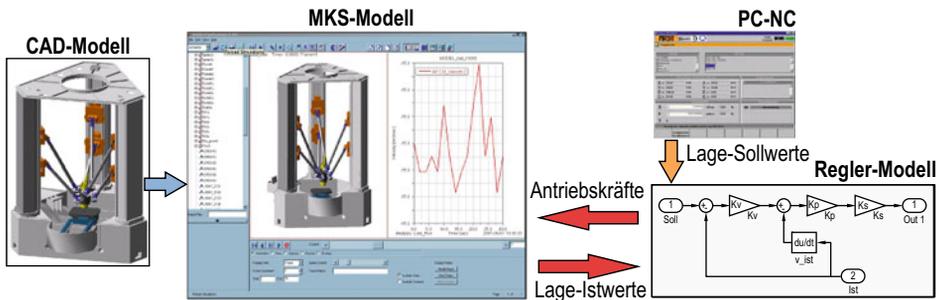


Abb. 1.6 Gekoppelte Simulationsumgebung (ISW, Universität Stuttgart)

Hardware-in-the-Loop Simulation (HiLS)

Im Gegensatz zur SiLS kommt bei der HiLS das reale Steuerungssystem einschließlich Hardware und Buskommunikation zum Einsatz. Dies setzt allerdings voraus, dass die Simulationsumgebung zeitsynchron zur Steuerung läuft und damit echtzeitfähig sein muss. Primäres Einsatzgebiet ist die simulationsbasierte Vorabinbetriebnahme des realen Steuerungssystems unter Berücksichtigung aller Laufzeiteffekte, um Entwicklungs- und Inbetriebnahmezeiten zu verkürzen. Neben dieser sogenannten Virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) ergeben sich durch den Einsatz echtzeitfähiger HiL-Prototypen weitere Anwendungsfelder für die Schulung, Training, Aus- und Weiterbildung des Bedienpersonals.

Die damals am Markt verfügbaren Simulationssysteme boten keine Funktionalität, die neben einer einfachen Ankopplung an gängigen NC/PLC-Hardwarekomponenten unter Einbeziehung der jeweiligen Buskonfiguration auch die Modellierung des Systemverhaltens und die 3D-Visualisierung von Bewegungsfunktionen gleichermaßen berücksichtigten. So wurden an verschiedenen Instituten Prototypen für die HiLS entwickelt.

Am IWB der TU München wurde ein Prototyp einer Simulationsumgebung zur Simulation und Verifikation von Maschinenabläufen an virtuellen Maschinenmodellen erstellt. Das Maschinenmodell besteht aus zwei Komponenten: Einem Verhaltensmodell und einem Kinematikmodell. Über das Verhaltensmodell wird das Systemverhalten der Maschine nachgebildet und die Kopplung mit der Maschinensteuerung realisiert. Das Kinematikmodell ermöglicht eine anschauliche dreidimensionale Visualisierung der Bewegungsabläufe [8] (Abb. 1.7).

Ziel dieser Anwendung war das frühzeitige Testen von Steuerungssoftwarefunktionalitäten, um steuerungstechnische sowie konstruktive Fehler frühzeitig zu erkennen und zu beseitigen. Tests von Störungssituationen, die an der realen Maschine nur schwierig nachzustellen sind, steigern die Softwarequalität zusätzlich.

Der Schwerpunkt der Arbeiten am ISW der Universität Stuttgart lag auf der Methodik, effiziente und zeitdeterministische Modelle zur Berechnung der Maschinendynamik in Echtzeit für die HiLS bereitzustellen. Dabei wurden neue Algorithmen auf der Basis von

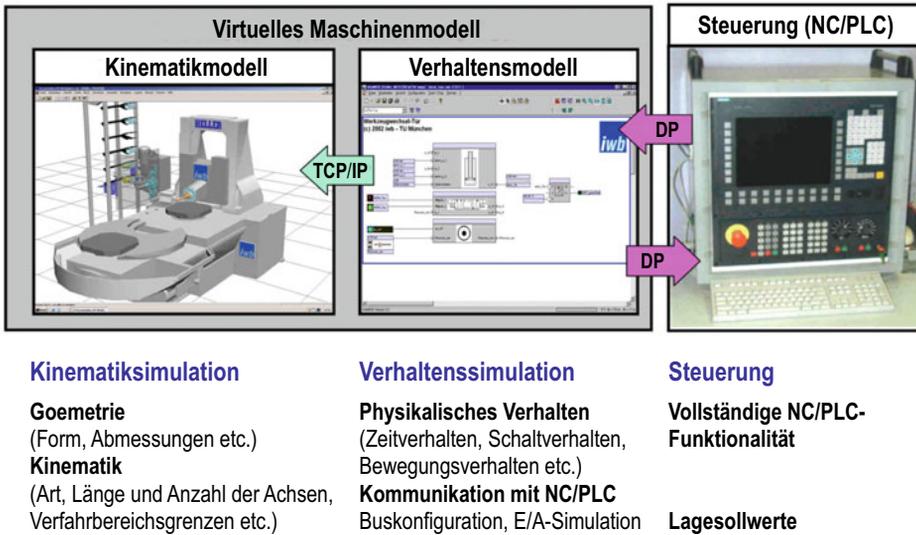


Abb. 1.7 Verhaltens- und Kinematikmodell inkl. 3D-Visualisierung gekoppelt mit der realen Steuerung (IWB, TU München)

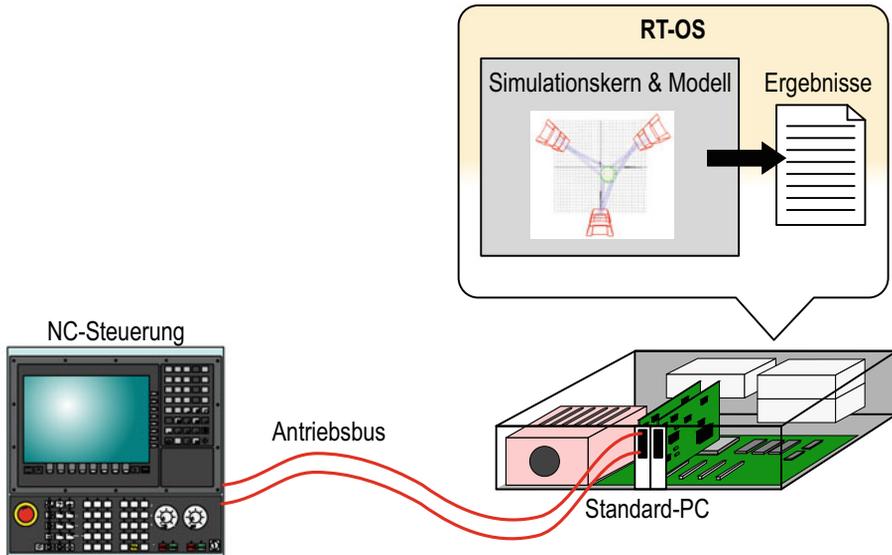


Abb. 1.8 Prototyp für die HiLS einer Werkzeugmaschine mit Parallelkinematik auf Basis eines echtzeitfähigen Mehrkörpermodells (ISW, Universität Stuttgart)

Mehrkörpermodellen entworfen. Diesbezüglich wurde ein HiL-Prototyp einer Werkzeugmaschine mit Parallelkinematik für die Fünffachsbearbeitung erstellt. In Abb. 1.8 ist der Aufbau des HiL-Prototyps dargestellt. Die NC-Steuerung der Fa. Industrielle Steuerungstechnik GmbH (ISG), ist über den Sercos-Interface Antriebsbus mit einem Standard-PC verbunden. Über eine I/O-Einsteckkarte und dem entsprechenden Antriebsbus-Treiber werden die Sollwerte der Steuerung einmal pro Taktzyklus (2 ms) vom Antriebsbus eingelesen und die Istwerte des Modells auf diesen zurückgeschrieben. Der Simulationskern ist über eine Echtzeitschnittstelle mit dem Antriebsbus-Treiber verbunden und wird darüber auch getaktet. Der Simulationskern und das Modell laufen auf einem Windows RTX-Echtzeitbetriebssystem (RT-OS) [9].

Während der Laufzeit der HiLS können sämtliche Zustandsgrößen des Modells aufgezeichnet werden, um daran nach Abschluss der Simulation Analysen durchzuführen. Die Ergebnisse des HiL-Prototypen deckten sich mit den Messungen, die zur Verifikation des Modells an der realen Maschine durchgeführt wurden. In Abb. 1.9 (links) sind die Aufzeichnungen der berechneten Stromverläufe im Vergleich mit den Stromverläufen eines Antriebes der realen Maschine dargestellt.

Wird die HiL-Simulation nicht auf einem Echtzeitbetriebssystem ausgeführt, führt dies zu variierenden Antwortzeiten der HiL-Simulation. Echtzeitmessungen zeigten, dass bei dem HiL-Prototypen ein Echtzeitfaktor (EZF) von 1 auf dem Echtzeitbetriebssystem Windows-RTX im Gegensatz zur Simulation auf Windows NT (Win32) erzielt wurde (Abb. 1.9 rechts). Die Rechnerauslastung bei der Simulation des HiL-Prototypen auf einem Standard-PC mit Pentium IV Prozessor (1.7 GHz) von im Mittel 11 % (ohne

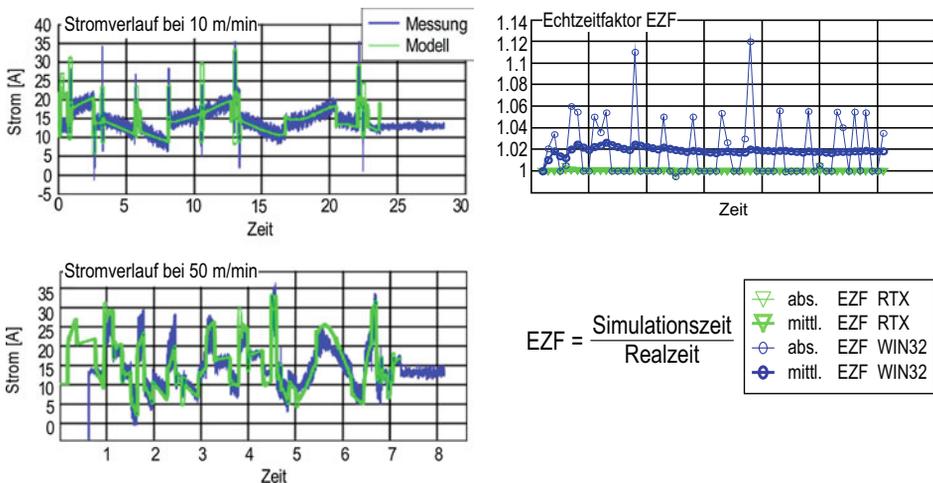


Abb. 1.9 Auszug der Ergebnisse einer HiL-Simulation (ISW, Universität Stuttgart)

Visualisierung) zeigte zudem, dass mit den am ISW entwickelten Methoden noch deutlich Potential für eine Steigerung der Modellkomplexität oder eine Verringerung des NC-Taktes möglich war.

Ziel dieser Anwendung war es, dem Inbetriebnehmer die Möglichkeit zu geben, NC-Dynamikparameter sowie Reglerparameter unter Berücksichtigung der Maschinendynamik voreinzustellen. Zudem konnten unter Verwendung der realen Steuerung NC/PLC-Programme vorab eingefahren werden, ohne der Gefahr einer Maschinenkollision ausgesetzt zu sein. Die Ermittlung von Bearbeitungszeiten konnte realitätsnah durch den Einsatz des HiLS ermittelt werden.

Zur Analyse wurden von der HiLS berechnete Zustandsgrößen in farblichen Abstufungen über dem zu fertigenden Werkstück aufgetragen. Dies ermöglichte beispielsweise die Identifikation kritischer Zonen auf der Werkstückoberfläche (Abb. 1.10).

Integration von Maschinenmodellen in eine NC-Steuerung

Ein weiteres Anwendungsgebiet war die Integration von Maschinenmodellen in eine Steuerung, um die dynamischen Eigenschaften der Maschine bei der Erzeugung von Sollwerten zu berücksichtigen (Abb. 1.11). Das noch zur Verfügung stehende Lastpotential der Antriebe konnte somit in der Steuerung vorausberechnet werden, um durch Optimierung der Sollwerte ein Überlasten der Antriebe zu vermeiden und dabei die Antriebe optimal auszunutzen mit dem Ziel eine maschinengerechte Sollwertgenerierung [10] zu ermöglichen.

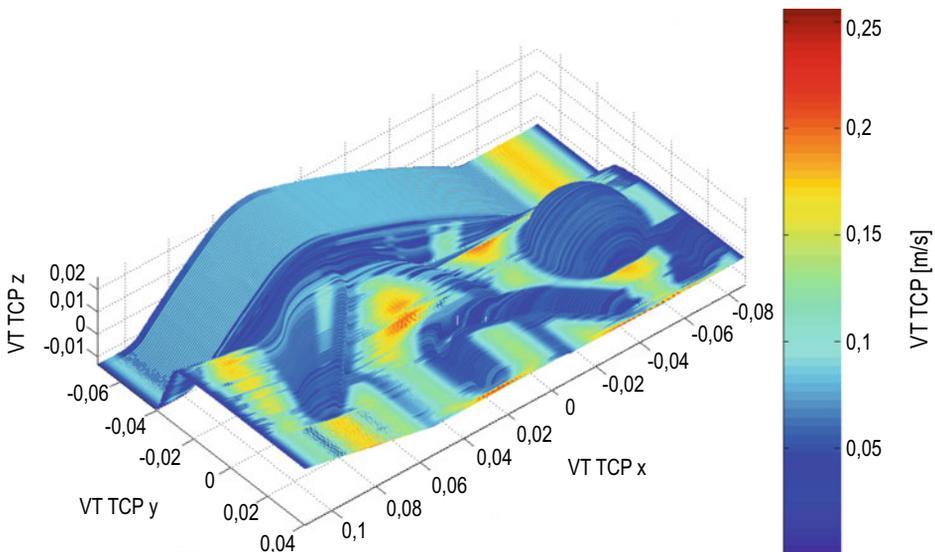


Abb. 1.10 Visualisierung der berechneten TCP-Bahngeschwindigkeit (VT TCP) über dem Werkstück zur Analyse der Bearbeitungsgeschwindigkeit (ISW, Universität Stuttgart)

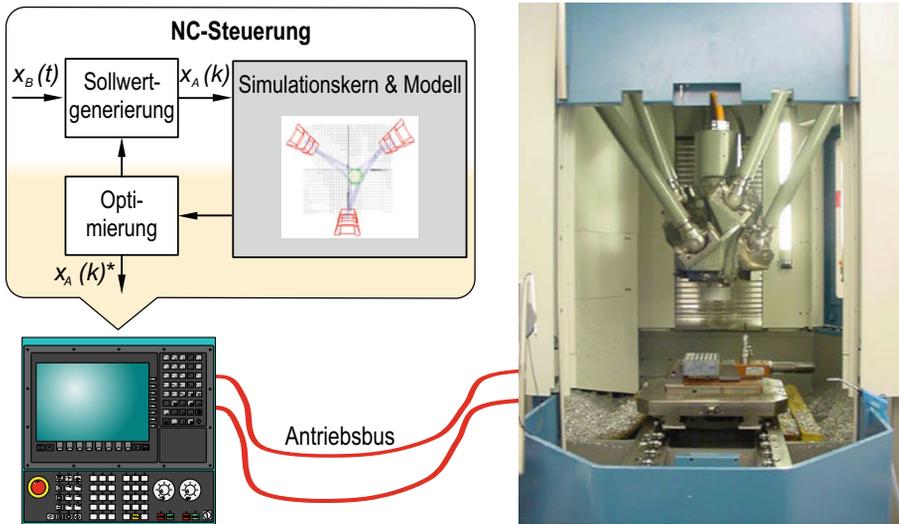


Abb. 1.11 Modellbasierte Steuerungserweiterung zur Erzeugung maschinengerechter Sollwerte (ISW, Universität Stuttgart)

1.5 Zusammenfassung (anno 2003)

Auch wenn nur die reale Werkzeugmaschine tatsächlich produzieren kann, so konnte durch die in diesem Beitrag dargestellten Beispiele doch gezeigt werden, dass die Entwicklung und die Anwendung von Werkzeugmaschinen durch „virtuelle Werkzeugmaschinen“ optimiert werden können. Die zahlreichen Diskussionen, die im Umfeld der „virtuellen Werkzeugmaschine“ im Gange sind, zeigen, dass die Nachfrage der Industrie zu diesem Thema noch lange nicht befriedigend beantwortet ist. Die Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet zeigen aber auch, dass Industrie und Wissenschaft gemeinsam auf dem richtigen Weg sind: Auf dem Weg zur virtuellen Produktion mit virtuellen Werkzeugmaschinen!

Literatur

1. Pritschow G, Berkemer J, Bürger T, Croon N, Korajda B, Röck S (2003) Die simulierte Werkzeugmaschine. Fertigungstechnisches Kolloquium Stuttgart (FtK 2003). Die Modellierte Fabrik. Tagungsband, Gesellschaft für Fertigungstechnik, S 219–246
2. Reinhard G (2003) Mit der Digitalen Fabrik zur Virtuellen Produktion. Tagungsband zum Münchener Kolloquium. Herbert Utz Verlag, München, S 137–158
3. Berkemer J, Knorr M (2002) Gekoppelte Simulation von Maschinendynamik und Antriebsregelung bei linearangetriebenen Werkzeugmaschinen. wt Werkstatttechnik online, Jahrgang 92 (2002) H.5. Springer-VDI, Düsseldorf, S 226–235

4. Brecher C, Denkena B, Giesler M, Gölzer P, Hamann J, Kelichhaus T, Prier M, Prust D, Reinhart G, Queins M, Weck M (2002) Effiziente Entwicklung von Werkzeugmaschinen – Mit virtuellen Prototypen direkt zum marktfähigen Produkt. AWK Aachner Werkzeugmaschinen-Kolloquium, S 157–190
5. Berkemer J, Knorr M (1997) Integrierte Simulation von Strukturmechanik und Regelkreis an direktangetriebenen Bearbeitungszentren. In: FTK'97 Fertigungstechnisches Kolloquium. Springer, Berlin, S 579–582
6. Baudisch T, Denkena B, Gose H, Landwehr R, Liu Z, Volkwein G (2001) Simulation mechatronischer Systeme. In: Krause F.-L. u.a. (Hrsg) Leitprojekt integrierte Virtuelle Produktentstehung (iViP). Fortschrittsbericht April, S 135–140
7. Pritschow G, Croon N (2002) Wege zur virtuellen Werkzeugmaschine. wt Werkstatttechnik online 92 (2002) H.5. Springer, Düsseldorf, S 194–199
8. Ehrenstraßer M, Pörnbacher C, Wunsch G (2002) Virtuelle Werkzeugmaschine für die Simulation. wt Werkstatttechnik online 92 H. 5. Springer-VDI, Düsseldorf, S 205–209
9. Pritschow G, Röck S (2002) Echtzeitfähige Maschinendynamik-Modelle in der Steuerungstechnik. In: Adam W, Pritschow G, Uhlmann E, Weck M (Hrsg) Datenmodelle in der Produktion. VDI-Verlag, Düsseldorf, S 124–138. (VDI Fortschritt-Berichte Reihe 2 Nr. 633)
10. Pritschow G, Rogers G, Röck S (2002) Echtzeitfähige Maschinenmodelle – Abbildung von Antriebsstörkräften bei Parallelkinematiken. wt Werkstatttechnik online 92 (2002) H. 5. Springer-VDI, Düsseldorf, S 187–193

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.



Teil I

**Echtzeitsimulation für die Virtuelle
Inbetriebnahme**



Anforderungen und Methoden für die Hardware-in-the-Loop Simulation zur Virtuellen Inbetriebnahme von Produktionssystemen

Sascha Röck und Günter Pritschow†

Zusammenfassung

Hoher Wettbewerbsdruck und kurze Produktentwicklungszyklen erfordern den Einsatz hochgradig automatisierter und dadurch komplexer Produktionsanlagen. Zur Beherrschbarkeit dieser Komplexität kommen moderne Steuerungssysteme zum Einsatz, deren Funktionalität häufig erst an der realen Anlage getestet werden kann. Eine gängige Methode um frühzeitig Steuerungsfunktionen virtuell testen und in Betrieb nehmen zu können, ist die Hardware-in-the-Loop Simulation (HiLS). Dabei wird die reale Steuerung (Hardware) mit einer echtzeitfähigen Anlagensimulation gekoppelt und gegen das virtuelle Anlagenverhalten getestet. Dieser Beitrag erläutert einige Grundlagen und Herausforderungen für den Einsatz einer HiLS zur Virtuellen Inbetriebnahme von realen Steuerungssystemen.

2.1 Virtuelle Inbetriebnahme und Hardware-in-the-Loop Simulation

Heutige Produktionsanlagen sind hochkomplexe mechatronische Systeme. Die Wirkzusammenhänge zwischen den Anlagenkomponenten sind aufgrund des hohen Automatisierungsgrades derart komplex, dass deren Test und Inbetriebnahme eine technische

S. Röck (✉)

Virtual Automation Lab (VAL), Hochschule Esslingen, Esslingen, Deutschland

E-Mail: Sascha.Roeck@hs-esslingen.de

G. Pritschow†

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW),
Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

Herausforderung darstellt. Zudem wird ein hohes Maß an Zuverlässigkeit und Fehler-sicherheit vorausgesetzt. Daraus folgt ein hoher Qualitätsanspruch an die eingesetzte Steuerungssoftware und den Softwareentwicklungsprozess. Diesem kann nur durch den Einsatz moderner Entwicklungs- und Testmethoden Folge geleistet werden. Ohne solche modernen Methoden liegt die Gewissheit über die Funktion und das Zusammenspiel aller Automatisierungskomponenten erst bei der Inbetriebnahme der Anlage vor. Treten dann technische Probleme auf, bleiben zeitaufwendige und kostspielige Nacharbeiten meist nicht aus, insbesondere wenn die Anlage bereits beim Kunden steht. Dieses Risiko kann durch frühzeitiges Testen mit Hilfe moderner Simulationsmethoden minimiert werden.

Die Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) ist eine Simulationsmethode, bei der die reale Anlage ganz oder teilweise durch eine simulierte Anlage ersetzt und mit der realen Steuerungstechnik gekoppelt wird, mit dem Ziel das Steuerungssystem frühzeitig gegen das simulierte Verhalten der Produktionsanlage zu testen.

Anlagen- und Steuerungshersteller sehen in der VIBN das Potenzial die Entwicklungszeiten durch frühzeitige Tests zu reduzieren und das Risiko bei der realen Inbetriebnahme zu minimieren. Im Fokus stehen dabei die Einsparung von Kosten sowie die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit. Die VIBN hat folgende Vorteile:

- Verkürzung der Inbetriebnahme- und Entwicklungszeiten,
- bessere Planbarkeit des Entwicklungsprozesses,
- Erhöhung der Testtiefe und Steigerung der Softwarequalität,
- Steigerung der Systemkenntnis sowie
- Ermöglichung risikoloser Tests von Stör- und Gefahrensituationen.

Für die VIBN mit realen Steuerungssystemen eignet sich die aus dem mechatronischen Entwicklungsprozess bekannte Hardware-in-the-Loop Simulation (HiLS). Im Gegensatz zur Software-in-the-Loop Simulation (SiLS), bei der sowohl die Steuerung als auch die Anlage simuliert wird [1], wird bei der HiLS das reale Steuerungssystem inkl. Steuerungshardware verwendet. Dieses wird über den realen Feld- oder Antriebsbus mit einem Simulationsrechner verbunden, auf dem das Anlagenverhalten simuliert wird [2]. Der Vorteil dabei ist, dass aus Sicht der Steuerung exakt die gleichen Bedingungen wie im realen Betrieb gelten, was bildlich gesprochen einem „Umschalten“ von der realen Anlage auf eine virtuelle Anlage gleichkommt (Abb. 2.1).

Die HiLS stellt hohe Anforderungen an die Simulationsumgebung. Im Folgenden sind einige wichtige Anforderungen zusammengestellt.

Anforderungen an die Feld- bzw. Antriebsbusankopplung

Um das reale Bussystem einsetzen zu können, muss eine Hardwareschnittstelle am Simulationsrechner für die entsprechende Bushardware zur Verfügung stehen. Das Kommunikationsverhalten der Antriebs- bzw. Feldbus-Teilnehmers muss vollständig in der

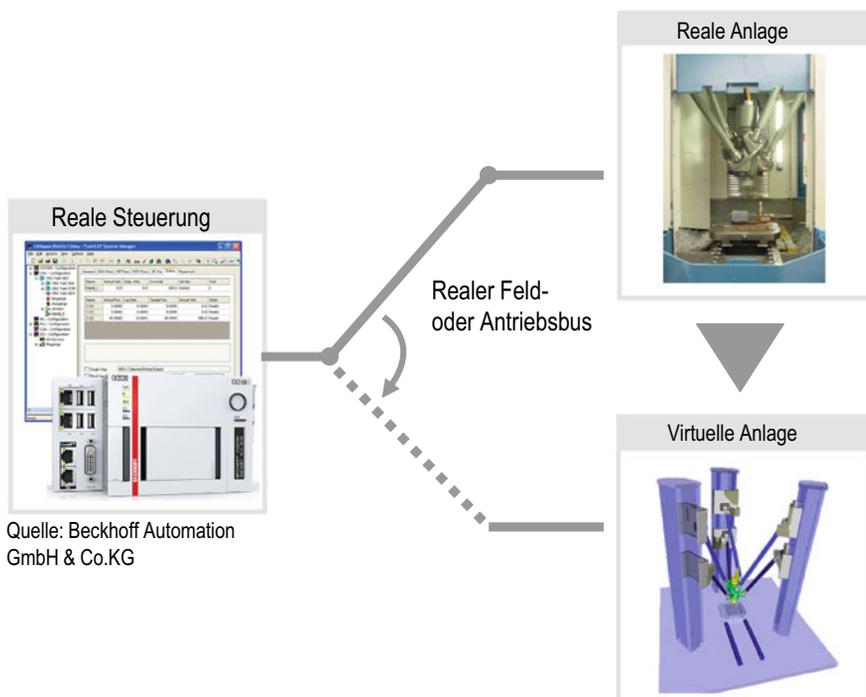


Abb. 2.1 Prinzip einer HiLS für die Virtuelle Inbetriebnahme von Produktionssystemen

Simulation abgebildet sein, um einen störungsfreien Betrieb der Steuerung zu ermöglichen. Um die Daten der Steuerung vom Bussystem abgreifen zu können, muss die Simulationsumgebung über einen Bustreiber verfügen, der den Zugriff auf diese Daten in Echtzeit ermöglicht. Die Simulation mehrerer Feldbus- bzw. Antriebsbuskomponenten erfordert zudem, dass sowohl der Bustreiber als auch die Hardwareschnittstelle am Simulationsrechner den gleichzeitigen Betrieb mehrerer Busteilnehmer unterstützen.

Anforderungen an die zeitsynchrone Kommunikation und Echtzeitfähigkeit

Eine verlustfreie und zeitsynchrone Kommunikation zwischen Steuerung und den Feldbusteilnehmern ist im realen Betrieb zwingend notwendig. Dies muss auch für die Kommunikation zwischen Steuerung und Simulation gelten, da sonst das Zeitverhalten der virtuellen Anlage im Vergleich zur realen Anlage verzerrt wird und damit keinem realistischen Verhalten entspricht. Es muss stets gewährleistet sein, dass nach jedem Steuerungstakt ein Berechnungstakt der Simulation erfolgt. Die berechneten Ausgabewerte der Simulation müssen rechtzeitig an der Busschnittstelle zur Verfügung stehen. Um den geforderten Zeitdeterminismus zu gewährleisten, muss die Simulation echtzeitfähig sein. In der Simulationstechnik ist es üblich, die Echtzeitfähigkeit einer Simulation

durch den Echtzeitfaktor (EZF) anzugeben. Der EZF gibt das Verhältnis zwischen der tatsächlich verbrauchten Verarbeitungszeit eines Simulationsschritts T_V (Modellrechenzeit und Verarbeitungszeit des Betriebs- und Kommunikationssystems) und einer fest vorgegebenen Simulationszeitschrittweite h_{SIM} an. Eine Simulation ist echtzeitfähig, wenn für jeden Simulationszeitschritt folgende Bedingung eingehalten wird:

$$\text{EZF} = \frac{T_V}{h_{SIM}} \leq 1 \quad (2.1)$$

Anforderungen an die Modellberechnung

Um das Systemverhalten von Produktionsmaschinen und -anlagen realistisch abbilden zu können, sind Simulationsmodelle erforderlich, die das dynamische Prozess- und Bewegungsverhalten der Anlage wiedergeben. Dieses wird im Wesentlichen durch den Produktionsprozess, die Maschinenmechanik und die Antriebsregelung bestimmt. Die daraus resultierenden Differentialgleichungen [3] müssen numerisch gelöst werden. Das Lösen von Differentialgleichungen in einer HiLS unter der Echtzeitbedingung ($\text{EZF} \leq 1$) erfordert numerische Rechenverfahren mit hoher Recheneffizienz und Robustheit. Dabei dürfen die durch das Rechenverfahren unumgänglichen numerischen Fehler unter keinen Umständen zu Fehlurteilen bei der Inbetriebnahme führen.

2.2 Aufbau eines Hardware-in-the-Loop Simulators

Abb. 2.2 zeigt beispielhaft den Aufbau eines Hardware-in-the-Loop Simulators.

In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Komponenten und Funktionalitäten aus Abb. 2.2 erläutert.

Echtzeit-Rechenkern

Der *Echtzeit-Rechenkern* ist mit numerischen Lösungsverfahren zur Lösung der Modellgleichungen ausgestattet. Für eine HiLS ist eine zeitdeterministische und effiziente Berechnung erforderlich, um stets $\text{EZF} \leq 1$ zu erreichen, was hohe Anforderungen an die Lösungsverfahren stellt. Um den Zeitdeterminismus gewährleisten zu können, muss der Rechenkern zudem auf einem echtzeitfähigen Simulationsrechner mit einem *Echtzeit-Betriebssystem* ausgeführt werden. *Echtzeit-Betriebssysteme* ermöglichen ein echtzeitfähiges Taskscheduling sowie eine echtzeitfähige Speicherverwaltung und sind für den Einsatz auf heutigen Standard-Rechnerarchitekturen (*Standard-PC*) auf dem Markt verfügbar.

Schnittstellen zum Austausch von Daten

Der *Echtzeit-Rechenkern* stellt Schnittstellen zum Austausch von Daten zur Verfügung. Ein zentraler *Modellspeicher* im globalen Adressraum (Shared Memory) ermöglicht

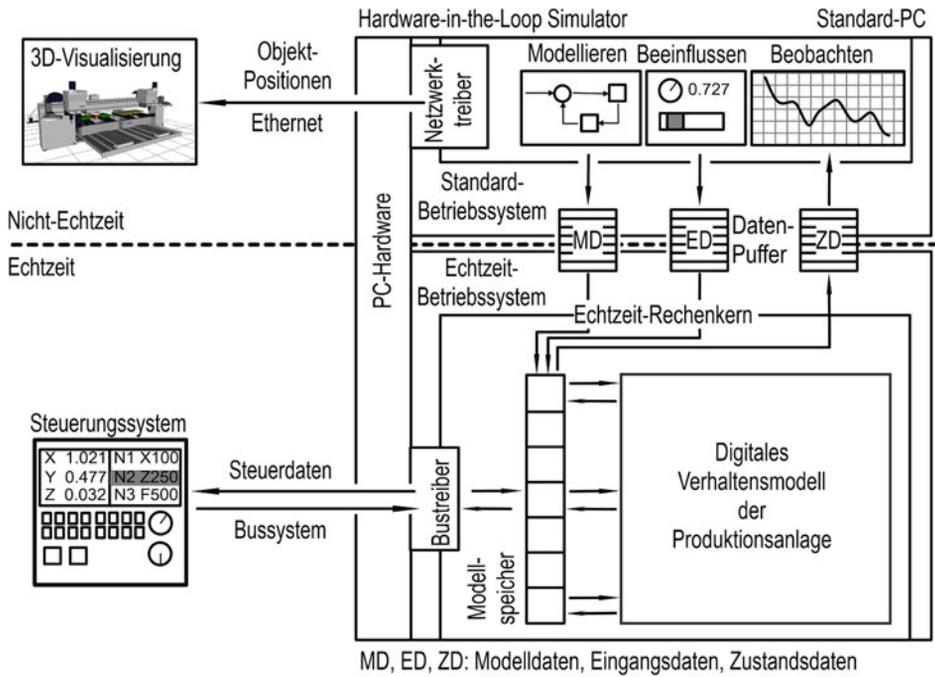


Abb. 2.2 Beispielhafter Aufbau eines Hardware-in-the-Loop Simulators [4]

den Datenaustausch zwischen Modell, Bustreiber im *Echtzeit-Betriebssystem* (Kernel-Space) und Benutzungsoberflächen im *Standard-Betriebssystem* (User-Space). Während im Kernel-Space die Synchronität der Zugriffe überwacht wird und eine maximale Zugriffszeit nicht überschritten werden darf, findet der Datenzugriff im User-Space komplett asynchron statt. Aufgrund der Asynchronität müssen die Daten zwischen dem Modellspeicher und den Anwendungen in *FIFO-Datenpuffern* (FIFO: First In First Out) zwischengespeichert werden, um einen Datenverlust zu vermeiden. So werden die berechneten *Zustandsdaten* (ZD: *Innere Zustandsgrößen und modellierte Ausgangsgrößen zur Modellbeobachtung*) im Kernel-Space nach jedem Simulatortakt aus dem *Modellspeicher* in die *Datenpuffer* zur Weiterverarbeitung im User-Space geschrieben. Umgekehrt werden die in den *Datenpuffern* zwischengespeicherten *Eingangsdaten* (ED: *Modellierte Eingangsgroßen zur Modellbeeinflussung*) aus dem User-Space vor jedem Simulatortakt auf den *Modellspeicher* im Kernel-Space geschrieben. Die *Modell-daten* (MD: *Daten der Modellbeschreibung und -parametrierung*) werden nur einmalig vor Beginn der Simulation zur Initialisierung des Modells und des *Modellspeichers* in den Kernel-Space übertragen.

Schnittstellen für den Benutzer

Benutzungsschnittstellen (User-Interfaces) ermöglichen das *Modellieren*, *Beeinflussen* und *Beobachten* des Simulationsszenarios. Wie bereits erwähnt, können Daten aus dem *Echtzeit-Rechenkern* im Kernel-Space mit Anwendungen im User-Space ausgetauscht werden. Dies ermöglicht das Ankoppeln von Anwendungen zur Beeinflussung und Beobachtung der Simulation während der Laufzeit. Die Online-Beobachtung erlaubt dabei die Überwachung und Aufzeichnung aller berechneten *Zustandsdaten (ZD)* bspw. mit Hilfe von Zeitschrieben. Mittels Online-Beeinflussung können die *Eingangsdaten (ED)* ins Modell vom Benutzer manuell geschrieben werden. Dies ermöglicht die Einbindung von Bedieneingriffen, wie das Lösen einer Schutzeinrichtung oder das Betätigen eines Not-Aus-Schalters. Zudem können Störgrößen in das System eingebracht werden, wie Parameterschwankungen, Temperatureinflüsse oder Systemausfälle. Auf Basis der Benutzungsschnittstellen können externe Benutzungsoberflächen an den Simulator angeschlossen werden (bspw. über Ethernet mittels TCP/IP-Sockets), um einen individualisierten virtuellen Anlagenprüfstand für die Virtuelle Inbetriebnahme zu realisieren. Dies ermöglicht bspw. das Anbinden von 3D-Visualisierungswerkzeugen.

2.3 Kopplung zwischen Steuerung und Simulation

Bei einer HiLS werden zwischen Steuerung und Simulation Daten in Echtzeit über die realen Feld- und Antriebsbussysteme übertragen. Für einen verlustfreien Datenaustausch zwischen Steuerungs- und Simulationsrechner ist die Taktung und Zeitsynchronität des Simulators von Bedeutung. Im Folgenden wird zwischen zwei Arten der Simulatorkopplung unterschieden: der selbstgetakteten asynchronen Simulatorkopplung und der fremdgetakteten synchronen Simulatorkopplung.

Selbstgetaktete asynchrone Simulatorkopplung

Bei dieser Kopplungsart wird der Simulator über die eigene Systemuhr synchron zur realen Zeit getaktet. Dabei ist die Zeitbasis der Steuerung physikalisch unabhängig von der Zeitbasis des Simulators. Die Daten der Steuerung werden über das Bussystem an den Bustreiber übertragen (vgl. Abb. 2.2). Der Simulator tastet den Speicher des Bustreibers im Simulatortakt ab (Polling). Da der Bustreiber auf die Systemuhr der Steuerung synchronisiert ist und der Simulator auf die Systemuhr des Simulationsrechners, kommt es aufgrund der Asynchronität zwischen den beiden Systemuhren zu Zeitverschiebungen in der Datenübertragung. Solche Zeitverschiebungen können zu Fehlern in der Datenübertragung und somit im Modellverhalten führen, was Fehleinschätzungen bei der Virtuellen Inbetriebnahme zur Folge haben kann.

Der Vorteil dieser Kopplungsart ist die softwaretechnisch einfache Realisierbarkeit, da der Datenaustausch nur ein einfaches Abtasten von Speicherbereichen erforderlich

macht. Viele HiL-Simulatoren mit geringen Anforderungen an die Synchronität zwischen Steuerung und Simulation beruhen auf diesem Prinzip.

Fremdgetaktete synchrone Simulatorkopplung

Das Prinzip der fremdgetakteten Simulatorkopplung basiert darauf, dass Steuerung und Simulation auf Basis einer gemeinsamen Systemuhr auf die reale Zeit synchronisiert werden. Grundsätzlich wäre eine Synchronisierung zwischen Steuerung und Simulation gemäß den Prinzipien, die beim Network Time Protocol (NTP) oder beim Precision Time Protocol (PTP) in Computernetzwerken zum Einsatz kommen, möglich. Diese Protokolle verwenden als Transportprotokoll UDP (NTP auch TCP) und stellen spezifische Anforderungen an das eingesetzte Kommunikationssystem. Um zusätzliche Kommunikationsschnittstellen für die Synchronisierung der Rechner und einen daraus resultierenden Eingriff in das Steuerungssystem zu vermeiden, wird im Folgenden eine Methode vorgeschlagen, die zur Synchronisation den Bus-Interrupt ausnützt.

Ausgehend vom Busmaster in der Steuerung wird ein Bus-Interrupt auf dem Simulationsrechner ausgelöst, der wiederum den Bustreiber aufruft (vgl. Abb. 2.3). Der Bustreiber stellt die Kommunikation zwischen Bus und Simulation sicher und beauftragt das Betriebssystem die bereits wartende Simulationstask mittels Mechanismen der Interprozesssynchronisation (bspw. Semaphore) zu starten. In der Simulationstask wird das Anlagenmodell im Simulationsintervall $[\sigma_{n-1}, \sigma_n]$ berechnet und die neu berechneten Zustandsdaten aktualisiert. Danach gibt die Simulationstask die Rechenzeit an das Betriebssystem bis zum nächsten Simulationsintervall $[\sigma_n, \sigma_{n+1}]$ zurück.

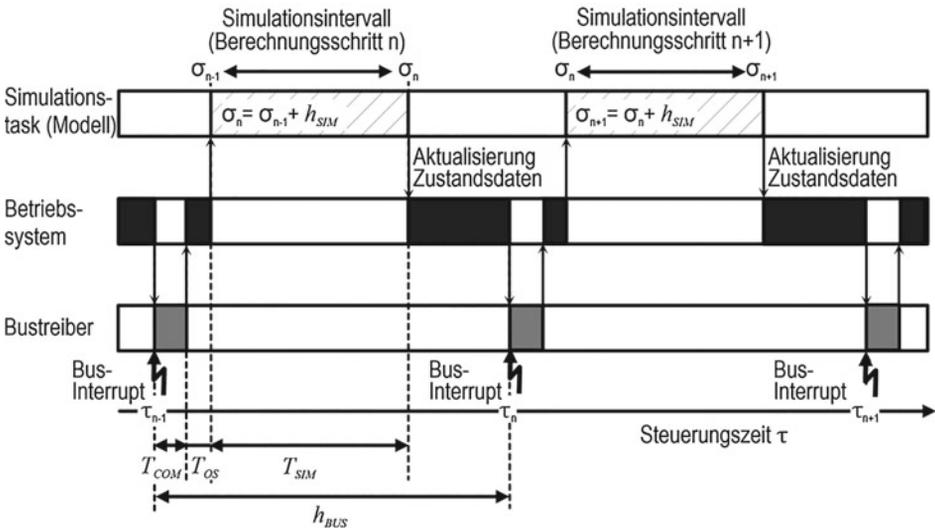


Abb. 2.3 Zeitlicher Ablauf zwischen Bussystem und Echtzeitsimulation [4]

Die Reaktionszeit zwischen Bus-Interrupt und Aktualisierung der Zustandsdaten setzt sich aus der Kommunikationsdauer T_{COM} , der Reaktionsdauer des Betriebssystems T_{OS} und der Simulationsdauer T_{SIM} zusammen. T_{COM} beinhaltet dabei die Bearbeitungszeit des Bustreibers, T_{OS} ist der Zeitraum, den das Betriebssystem benötigt, um die Simulationstask aufzurufen und T_{SIM} ist die benötigte Rechenzeit eines Simulationsintervalls. Um eine synchrone und verlustfreie Kommunikation sicherstellen zu können, muss die Dauer vom Bus-Interrupt bis zur Aktualisierung der Zustandsdaten immer kleiner oder gleich dem Bustakt h_{BUS} sein.

Da bei der fremdgetakteten Simulatorkopplung Steuerung und Simulation immer absolut synchron laufen, kann der Simulatortakt h_{SIM} gleich dem Steuerungs- bzw. Bustakt h_{BUS} gewählt werden. Somit kann die Bedingung aus Gl. (2.1) erweitert werden:

$$EZF = \frac{T_V}{h_{SIM}} = \frac{T_{COM} + T_{OS} + T_{SIM}}{h_{BUS}} \leq 1 \quad (2.2)$$

Bei Antriebsschnittstellen einer numerischen Bahnsteuerung (CNC) sind Bustakte von $h_{BUS} = [1 \dots 5] ms$ üblich, während Ablaufsteuerung (PLC) mit Bustakten $h_{BUS} = [1 \dots 200] ms$ betrieben werden. Die Einhaltung der Echtzeitbedingung nach Gl. (2.2) kann nur durch einen echtzeitfähigen Bustreiber, ein echtzeitfähiges Betriebssystem und eine echtzeitfähige Berechnung des Anlagenmodells erfüllt werden.

Diese Art der Simulatorkopplung kommt bei HiLS-Anwendung mit sehr hohen Anforderungen an die Synchronität zwischen Steuerung und Simulation zum Einsatz, wie bspw. bei der HiLS von NC-gesteuerten Servoantrieben.

2.4 Echtzeitsimulation linearer Finite Elemente Modelle mit Antriebsregelung

Bei der Inbetriebnahme von hochdynamischen und stark belasteten Maschinenachsen, wie sie in einer modernen Produktion heute üblich sind, spielen die mechanischen Struktureigenschaften der Maschine in Kombination mit den Antriebsregelungen eine große Rolle. Nachgiebigkeiten und Eigenschwingungen steifer Strukturen lassen sich in guter Näherung durch lineare Modelle approximieren. Dabei kommen häufig lineare Finite-Elemente-Modelle (FE-Modelle) gekoppelt mit linearen Antriebs-Regler-Modellen zum Einsatz. Die schwachgedämpften und steifen metallischen Maschinenstrukturen weisen mehrere sehr unterschiedliche und zugleich sehr große Eigenschwingfrequenzen auf, während die angekoppelten Antriebs-Regler-Modelle oft sehr kleine elektrische Zeitkonstanten einbringen. Diese sogenannten steifen Systeme sind für die numerische Berechnung im Zeitbereich ungünstig, da große Eigenschwingfrequenzen und kleine Zeitkonstanten sehr kleine Zeitschrittweiten für eine robuste und ausreichend genaue Lösung erfordern und dies wiederum die Recheneffizienz vermindert.

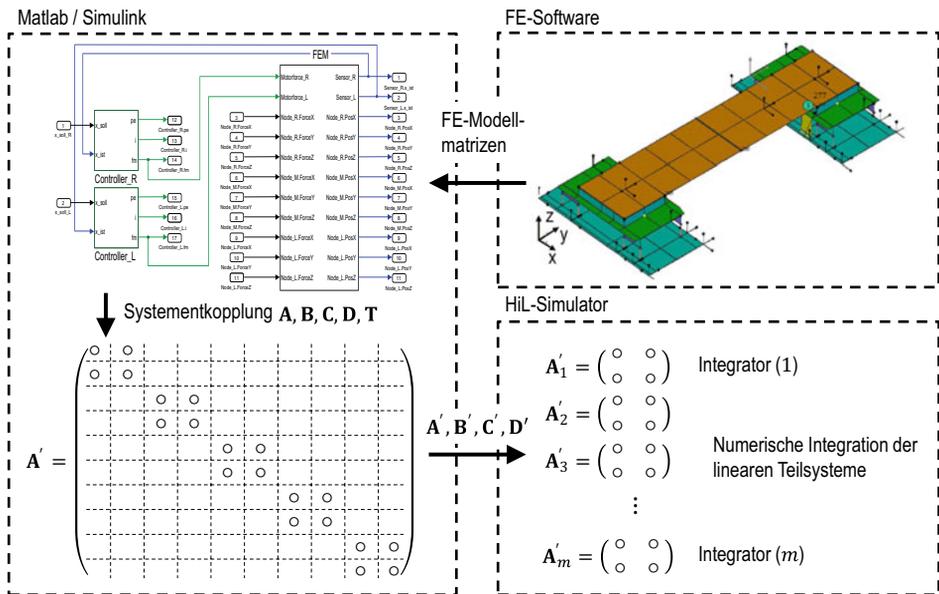


Abb. 2.4 Systementkopplung eines linearen FE-Modells für eine HiL-Simulation am Beispiel eines Gantry-Direktantriebs mit Lageregelung

Die Grundidee für die effiziente echtzeitfähige Berechnung linearer Systeme ist das Gesamtsystem in kleinere unabhängige Teilsysteme zu zerlegen, um jedes Teilsystem für sich einzeln lösen zu können. Dies ermöglicht neben einer höheren Recheneffizienz auch eine unabhängige numerische Betrachtung jedes Teilsystems, sodass Systemteile mit großen Eigenschwingfrequenzen numerisch anders behandelt werden können, wie die Systemteile mit kleinen Eigenschwingfrequenzen. Diesen Vorgang nennt man Systementkopplung. Abb. 2.4 zeigt beispielhaft die Systementkopplung eines FE-Modells von einem Gantry-Direktantrieb zur Vorbereitung für eine Echtzeitsimulation in einem HiL-Simulator.

Die Systemmatrizen des linearen FE-Modells werden aus der FE-Software exportiert und bspw. in Matlab/Simulink eingelesen und dort um lineare Antriebs-Regler-Modelle ergänzt. Nach Berechnung der Systementkopplung in Matlab werden die Matrizen des entkoppelten Systems dem HiL-Simulator zur Echtzeitsimulation (mittels numerischer Integration der linearen Teilsysteme) zur Verfügung gestellt [4, 5]. Im Folgenden wird die Systementkopplung linearer Systeme näher erläutert.

Systementkopplung linearer Systeme

Die Modellfunktion eines linearen Systems mit konstanten Koeffizienten kann allgemein durch die lineare Zustandsraumdarstellung

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= \mathbf{A}x(t) + \mathbf{B}u(t) \\ y(t) &= \mathbf{C}x(t) + \mathbf{D}u(t)\end{aligned}\tag{2.3}$$

mit den konstanten Matrizen $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{w \times w}$ (Systemmatrix), $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{w \times v}$ (Eingangsmatrix), $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{r \times w}$ (Ausgangsmatrix) und $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{r \times v}$ (Durchgangsmatrix) angegeben werden. Dabei ist $x \in \mathbb{R}^{w \times 1}$ der Vektor der Zustandsgrößen, $y \in \mathbb{R}^{r \times 1}$ der Vektor der Ausgangsgrößen und $u \in \mathbb{R}^{v \times 1}$ der Vektor der Eingangsgrößen.

Das Eigenschwingverhalten eines linearen Systems ist vollständig durch die Eigenwerte und Eigenvektoren (Moden) der Systemmatrix \mathbf{A} beschrieben. Die Systemmatrix \mathbf{A} ist eine quadratische Matrix, die mittels Ähnlichkeitstransformation in eine andere Darstellungsform transformiert werden kann, ohne dass sich deren Eigenwerte ändert. Geht man davon aus, dass eine reguläre zeitinvariante Transformationsmatrix \mathbf{T} existiert und transformiert man damit die Zustandsgrößen und deren zeitliche Ableitungen

$$x = \mathbf{T}\kappa, \quad \dot{x} = \mathbf{T}\dot{\kappa},\tag{2.4}$$

erhält man durch Einsetzen in Gl. (2.3)

$$\begin{aligned}\mathbf{T}\dot{\kappa} &= \mathbf{A}\mathbf{T}\kappa + \mathbf{B}u \\ \dot{\kappa} &= \mathbf{T}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{T}\kappa + \mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}u \\ y &= \mathbf{C}\mathbf{T}\kappa + \mathbf{D}u\end{aligned}\tag{2.5}$$

eine neue Systemdarstellung mit

$$\begin{aligned}\dot{\kappa} &= \mathbf{A}'\kappa + \mathbf{B}'u \\ y &= \mathbf{C}'\kappa + \mathbf{D}'u \\ \mathbf{A}' &= \mathbf{T}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{T}, \mathbf{B}' = \mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}, \mathbf{C}' = \mathbf{C}\mathbf{T}, \mathbf{D}' = \mathbf{D}\end{aligned}\tag{2.6}$$

Je nach Wahl der Transformationsmatrix \mathbf{T} kann das System in verschiedene Darstellungsformen, in denen das System in unabhängige Teilsysteme entkoppelt ist, transformiert werden.

Der höchste Grad der Entkopplung ist erreicht, wenn die transformierte Systemmatrix \mathbf{A}' Diagonalf orm besitzt. Dabei entsprechen die Diagonalelemente den Eigenwerten λ_i der ursprünglichen Systemmatrix \mathbf{A} . Die dazu notwendige Transformationsmatrix ist die Matrix der Eigenvektoren e_i von \mathbf{A} (Modalmatrix) [6, 7]:

$$\mathbf{T}_1 = (e_1, \dots, e_i, \dots, e_w).\tag{2.7}$$

Nach Transformation mit der Modalmatrix \mathbf{T}_1 erhält man eine diagonalisierte Systemmatrix, unter der Voraussetzung, dass die Systemmatrix \mathbf{A} ausschließlich einfache Eigenwerte $\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \dots \neq \lambda_w$ besitzt:

$$\mathbf{A}' = \mathbf{T}_1^{-1} \mathbf{A} \mathbf{T}_1 = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \lambda_w \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Treten komplexe Eigenwerte auf, ist eine weitere Transformation erforderlich, um die imaginären Anteile zu eliminieren. Die dazu notwendige Transformationsmatrix \mathbf{T}_2 kann je nach Auftreten der komplexen Eigenwerte, wie in Abb. 2.5 beispielhaft illustriert, konstruiert werden.

Durch erneute Transformation der Diagonalmatrix mit der Transformationsmatrix \mathbf{T}_2 erhält man die reelle Blockdiagonalmatrix des entkoppelten Systems:

$$\mathbf{A}' = \mathbf{T}_2^{-1} \mathbf{T}_1^{-1} \mathbf{A} \mathbf{T}_1 \mathbf{T}_2 = \begin{pmatrix} -\delta_1 & -\omega_1 & 0 & \cdots & 0 \\ \omega_1 & -\delta_1 & 0 & & \vdots \\ 0 & 0 & -\delta_2 & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & -\delta_m \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{matrix} \mathbf{A}'_1 = \begin{pmatrix} -\delta_1 & -\omega_1 \\ \omega_1 & -\delta_1 \end{pmatrix} \\ \mathbf{A}'_2 = (-\delta_2) \\ \vdots \\ \mathbf{A}'_m = \cdots \end{matrix} \quad (2.9)$$

Dabei ist ω_i die gedämpfte Eigenkreisfrequenz und δ_i die Abklingkonstante des Teilsystems \mathbf{A}'_i . Die transformierte Systemmatrix \mathbf{A}' ist vollständig entkoppelt und kann in unabhängige Teilsysteme \mathbf{A}'_i zerlegt werden. Die maximale Größe eines Teilsystems ist dabei $w_i = 2$.

Bei Systemen mit mehrfachen Eigenwerten $\lambda_1 = \lambda_2 = \cdots = \lambda_\mu$ ist die Systemmatrix nicht zwingend vollständig diagonalisierbar. Es können sogenannte Jordanblöcke \mathbf{J}_i mit der Dimension $\mu > 1$ auftreten, die nicht entkoppelt werden können. Die daraus resultierende Jordanmatrix hat die Blockdiagonalform:

$$\mathbf{A}' = \begin{pmatrix} [\mathbf{J}_1] & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & [\mathbf{J}_i] \end{pmatrix} \text{ mit } \mathbf{J}_i = \begin{bmatrix} \ddots & 1 \\ & \lambda_i & \ddots \\ & & \lambda_i & 1 \\ & & & \ddots \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{\mu \times \mu}. \quad (2.10)$$

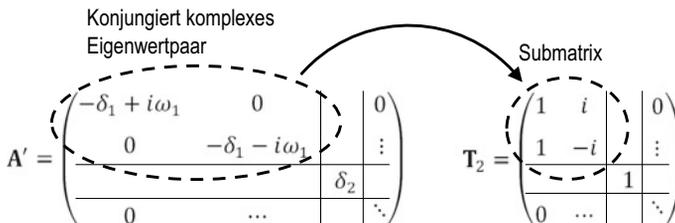


Abb. 2.5 Konstruktionsprinzip einer Transformationsmatrix zur Transformation von komplexen Diagonalmatrizen in reelle Blockdiagonalform

Die Koppellemente (1-en) auf der Nebendiagonale, auch als Jordanbrücken bezeichnet, verhindern die weitere Zerlegung der Jordanblöcke. Treten mehrfache komplexe Eigenwerte auf, erfolgt die Transformation in eine reelle Jordanmatrix durch Konstruktion einer entsprechenden weiteren Transformationsmatrix, analog zur Vorgehensweise bei den einfachen Eigenwerten.

Die oben beschriebene Systementkopplung ermöglicht die Zerlegung des Systems in m kleinere Teilsysteme, die unabhängig numerisch gelöst werden können:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} [\dot{\kappa}_1(t)] \\ \vdots \\ [\dot{\kappa}_i(t)] \\ \vdots \\ [\dot{\kappa}_m(t)] \end{pmatrix}}_{\dot{\kappa}(t)} = \underbrace{\begin{pmatrix} [\mathbf{A}'_1] & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ & & [\mathbf{A}'_i] & \\ \vdots & & & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & & 0 & [\mathbf{A}'_m] \end{pmatrix}}_{\mathbf{A}'}}_{\kappa(t)} \begin{pmatrix} [\kappa_1(t)] \\ \vdots \\ [\kappa_i(t)] \\ \vdots \\ [\kappa_m(t)] \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} [\mathbf{B}'_1] \\ \vdots \\ [\mathbf{B}'_i] \\ \vdots \\ [\mathbf{B}'_m] \end{pmatrix}}_{\mathbf{B}'} [u(t)] \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} [\dot{\kappa}_1(t)] &= [\mathbf{A}'_1][\kappa_1(t)] + [\mathbf{B}'_1][u(t)] \\ &\vdots \\ \Rightarrow [\dot{\kappa}_i(t)] &= [\mathbf{A}'_i][\kappa_i(t)] + [\mathbf{B}'_i][u(t)] \\ &\vdots \\ [\dot{\kappa}_m(t)] &= [\mathbf{A}'_m][\kappa_m(t)] + [\mathbf{B}'_m][u(t)] \end{aligned}$$

Numerische Lösung der linearen Teilsysteme

Zur Lösung der linearen Teilsysteme kann die zeitdiskrete Exponentiallösung herangezogen werden. Diese Methode ermöglicht ein äußerst robustes und sehr genaues numerisches Lösen der Teilsysteme. Die Differentialgleichung eines Teilsystems besitzt die Exponentiallösung

$$\kappa_i(t) = e^{\mathbf{A}'_i(t-t_0)}\kappa_{i,0} + \int_{t_0}^t e^{\mathbf{A}'_i(t-\tau)}\mathbf{B}'_i u(\tau)d\tau, \quad (2.12)$$

mit den Anfangswerten $\kappa_{i,0}$ zum Zeitpunkt t_0 . Das Integral in Gl. (2.12) lässt sich für beliebige Eingangsgrößen $u(t)$ nicht analytisch lösen und muss durch eine numerische Näherungslösung ersetzt werden. Dazu werden die Eingangsgrößen über ein Abtast-Halteglied 0-ter Ordnung approximiert. So kann das Integral für stückweise konstante Eingangsgrößen $u(t_n)$ im Zeitintervall $[t_n, t_{n+1}]$ gelöst werden und man erhält die Näherungslösung

$$\int_{t_n}^{t_{n+1}} e^{\mathbf{A}'_i(t_{n+1}-\tau)}\mathbf{B}'_i u(t_n)d\tau = \mathbf{A}'_i^{-1} \left(e^{\mathbf{A}'_i(t_{n+1}-t_n)} - \mathbf{I} \right) \mathbf{B}'_i u(t_n), \quad (2.13)$$

wobei \mathbf{I} die Einheitsmatrix darstellt [6]. Durch Einsetzen in Gl. (2.12) erhält man schließlich die Lösung des Teilsystems in diesem Zeitintervall:

$$\kappa_i(t_{n+1}) = e^{\mathbf{A}'_i(t_{n+1}-t_n)}\kappa_i(t_n) + \mathbf{A}'_i^{-1} \left(e^{\mathbf{A}'_i(t_{n+1}-t_n)} - \mathbf{I} \right) \mathbf{B}'_i u(t_n). \quad (2.14)$$

Aufgrund der Echtzeitanforderung und des damit verbundenen Zeitdeterminismus erfolgt die Diskretisierung in äquidistanten Zeitabständen mit der konstanten Zeitschrittweite $h = t_{n+1} - t_n$, die gleich oder ein ganzzahliger Teiler vom Simulatortakt h_{SIM} sein muss.

Zusammenfassend lautet die Berechnungsvorschrift für die Berechnung eines linearen Teilsystems aus Gl. (2.11):

$$\kappa_i(t_{n+1}) = \Phi \kappa_i(t_n) + \Omega u(t_n) \quad (2.15)$$

mit den Verfahrensmatrizen

$$\begin{aligned} \Phi &= e^{\mathbf{A}'_i h} \\ \Omega &= \mathbf{A}'_i^{-1} (\Phi - \mathbf{I}) \mathbf{B}'_i. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Diese Lösungsformel konvergiert immer unabhängig von der gewählten Schrittweite und der Steifigkeit des Systems. Der numerische Fehler resultiert lediglich aus der diskreten Abtastung der Eingangsgrößen.

Nach Lösen aller Teilsysteme für ein Zeitintervall, können die Ausgangsgrößen entsprechend Gl. (2.17) anhand der Zustandsgrößen für den aktuellen Zeitschritt berechnet werden:

$$y(t_{n+1}) = \mathbf{C}' \begin{pmatrix} \kappa_1(t_{n+1}) \\ \vdots \\ \kappa_i(t_{n+1}) \\ \vdots \\ \kappa_m(t_{n+1}) \end{pmatrix} + \mathbf{D}' u(t_n) \quad (2.17)$$

Berechnungsaufwand

Zum Vergleich soll der Berechnungsaufwand eines entkoppelten Systems mit dem zugrundeliegenden nicht entkoppelten System gegenübergestellt werden. Die Verfahrensmatrizen Φ und Ω der einzelnen Teilsysteme in Gl. (2.16) sind aufgrund der konstanten Matrizen \mathbf{A}'_i und \mathbf{B}'_i sowie der konstanten Zeitschrittweite h ebenfalls konstant und müssen nur einmalig in der Initialisierungsphase der Simulation berechnet werden. Somit beschränkt sich der Berechnungsaufwand in einem Simulationsschritt im Wesentlichen auf das Auswerten der Matrix-Vektor-Produkte in Gl. (2.15) und (2.17). Zur Quantifizierung werden die Additionen und Multiplikationen als Gleitpunktoperationen in FLOP (Floating Point Operations) gezählt. Anhand des folgenden vereinfachten Pseudocodes wird die erforderliche Anzahl an Gleitpunktoperationen für eine Matrix-Vektor-Multiplikation $x = \mathbf{A} \cdot b$ mit $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $b \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ abgeschätzt:

```

x = 0
for j = 1, n
  for k = 1, m
    x_j = x_j + A_jk · b_k {2 FLOP}
  end {2 · m FLOP}
end {2 · m · n FLOP}

```

Für das Auswerten der Matrix-Vektor-Multiplikation sind demnach $2mn$ FLOP erforderlich, wobei darauf hinzuweisen ist, dass aus Gründen der besseren Verständlichkeit auf mögliche Optimierung des Codes, um bspw. Additionen und Multiplikationen mit Null einzusparen, verzichtet wird. Überträgt man die Auswertung der Matrix-Vektor-Produkte entsprechend Gl. (2.15) und (2.17) auf das nichtentkoppelte System mit den Matrizen $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{w \times w}$, $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{w \times v}$, $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{r \times w}$ und $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{r \times v}$ werden pro Simulationsschritt

$$N(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}) = 2w^2 + 2wv + 2rw + 2rv \text{ FLOP} \quad (2.18)$$

benötigt. Für die Bewertung des Rechenaufwands des entkoppelten Systems ist die Größe der Teilsysteme, die aus der Systementkopplung hervorgehen, ausschlaggebend. Die Dimension der Teilsysteme sei angegeben mit:

$$p(\vartheta, \mu) = \vartheta \cdot \mu \text{ FLOP}, \quad (2.19)$$

wobei ϑ festlegt, ob es sich um einen reellen ($\vartheta = 1$) oder einen komplexen ($\vartheta = 2$) Eigenwert handelt und μ die Dimension des entstehenden Jordanblockes bei einem mehrfachen Eigenwert angibt.

Die Anzahl der Rechenoperationen für das entkoppelte System ist die Summe der Matrix-Vektor-Produkte aller m Teilsysteme mit der Größe $w_i = p(\vartheta_i, \mu_i)$. Die Auswertung der Berechnungsvorschrift nach Gl. (2.15) und (2.17) für alle Teilsysteme des entkoppelten Systems benötigt somit

$$N(\mathbf{A}', \mathbf{B}', \mathbf{C}', \mathbf{D}') = 2 \sum_{i=1}^m (p(\vartheta_i, \mu_i))^2 + 2wv + 2rw + 2rv \text{ FLOP}. \quad (2.20)$$

Die Matrix-Vektor-Produkte für die Eingangs- und Ausgangsgrößen werden dabei analog zu dem nichtentkoppelten System berechnet, da die Eingangs-, Ausgangs- und Durchgangsmatrizen auch nach der Entkopplung i.A. vollbesetzte Matrizen sind.

Zur Veranschaulichung soll der Rechenaufwand eines nicht entkoppelten Systems mit einem entkoppelten System am Beispiel des FE-Modells in Abb. 2.4 betrachtet werden. Das Beispielmmodell besitzt $v = 11$ Eingangsgrößen und $r = 17$ Ausgangsgrößen und keinen direkten Durchgriff der Eingangsgrößen auf die Ausgangsgrößen, wodurch $\mathbf{D} = \mathbf{0}$

Tab. 2.1 Anzahl der Gleitpunktoperationen (FLOP) für die numerische Integration linearer entkoppelter Systeme am Beispiel eines FE-Modells

w	Nicht entkoppelt $N = 2w^2 + 56w$ FLOP	Entkoppelt $N = 60w$ FLOP	Performancesteigerung x-fach
50	7.800	3.000	2,6
100	25.600	6.000	4,27
500	528.000	30.000	17,6
1000	2.056.000	60.000	34,27

eine Nullmatrix wird und demzufolge nicht berücksichtigt werden muss. Damit ergibt sich für das nicht entkoppelte FE-Modell aus Gl. (2.18) in Abhängigkeit der w Zustandsgrößen

$$N(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{0}) = 2w^2 + 2w \cdot 11 + 2 \cdot 17w = 2w^2 + 56w \text{ FLOP.} \quad (2.21)$$

Zur Gegenüberstellung des Berechnungsaufwands soll das Gesamtmodell in verschiedenen Detaillierungsstufen mit $w = \{50, 100, 500, 1000\}$ Zustandsgrößen betrachtet werden. Das System besitzt ausschließlich einfache komplexe Polstellen und kann somit in gleich große Teilsysteme mit der Dimension $w_i = p(2,1) = 2$ zerlegt werden. Damit ergibt sich für das entkoppelte FE-Modell aus Gl. (2.20)

$$N(\mathbf{A}', \mathbf{B}', \mathbf{C}', \mathbf{0}) = 2 \sum_{i=1}^{m=\frac{w}{2}} 2^2 + 56w = 2 \cdot \frac{w}{2} \cdot 2^2 + 56w = 60w \text{ FLOP.} \quad (2.22)$$

Eine Gegenüberstellung der erforderlichen Gleitpunktoperationen für das nicht entkoppelte FE-Modell mit dem entkoppelten FE-Modell für verschiedene Systemgrößen ist in Tab. 2.1 zusammengefasst.

Die Anzahl der Zustandsgrößen w ist im Wesentlichen abhängig von der Detaillierung des FE-Modells. Zur Reduzierung der Modellgröße können Modellreduktionsverfahren zum Einsatz kommen, auf die jedoch in diesem Beitrag nicht weiter eingegangen werden soll. Eine Übersicht über gängige Modellreduktionsverfahren wird in [14] beschrieben.

Anhand des Beispiels ist gut zu erkennen, dass die Entkopplung und Zerlegung eines linearen dynamischen Systems in unabhängige Teilsysteme eine deutliche Reduzierung der Rechenoperationen pro Zeitschritt ermöglicht. Vor allem bei Systemen mit vielen Zustandsgrößen und vergleichsweise wenigen Ein- und Ausgangsgrößen macht sich ein hoher Entkopplungsgrad deutlich bemerkbar und ist häufig die Grundvoraussetzung für eine effiziente Simulation in Echtzeit. Zudem ist eine Entkopplung zwischen Systemteilen mit großen Eigenwerten und Systemteilen mit kleinen Eigenwerten gewährleistet und die Problematik bei der numerischen Behandlung steifer Systeme einfacher beherrschbar, da jedes Teilsystem unabhängig numerisch integriert werden kann.

2.5 Echtzeitsimulation nichtlinearer Systeme

Die Modellierung des dynamischen Prozess- und Bewegungsverhaltens von Produktionsmaschinen führt im Allgemeinen auf nichtlineare Differentialgleichungen für die keine allgemeine Methode zur Systementkopplung, wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, existiert. Zur Lösung nichtlinearer Differentialgleichungen wird üblicherweise auf klassische numerische Integrationsverfahren zurückgegriffen.

Numerische Integrationsverfahren

Jedes explizite gewöhnliche Differentialgleichungssystem kann in ein System von Differentialgleichungen 1. Ordnung überführt werden (Zustandsraumdarstellung):

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t). \quad (2.23)$$

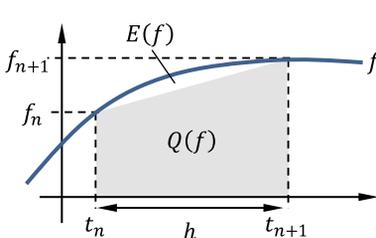
Dabei ist $x(t)$ der Vektor der Zustandsgrößen, $u(t)$ der Vektor der Eingangsgrößen und f die Vektorfunktion der Modellgleichungen. Dieses Differentialgleichungssystem kann intervallweise im Zeitintervall $[t_n, t_{n+1}]$ numerisch gelöst werden mit

$$x(t_{n+1}) = x(t_n) + \int_{t_n}^{t_{n+1}} f(x(\tau), u(\tau), \tau) d\tau \quad (2.24)$$

wobei das Integral durch eine Näherungsformel approximiert wird:

$$\int_{t_n}^{t_{n+1}} f(x(\tau), u(\tau), \tau) d\tau = Q(f) + E(f). \quad (2.25)$$

Dabei ist $Q(f)$ die approximierte Integralfäche von f (auch Quadraturformel genannt) und $E(f)$ der Verfahrensfehler im Integrationsintervall $[t_n, t_{n+1}]$. Das Zeitintervall legt einen Integrationszeitschritt mit der Zeitschrittweite $h = t_{n+1} - t_n$ fest. Zur Veranschaulichung sei das implizite Trapezverfahren angegeben mit



$$\begin{aligned} Q(f) &= \frac{h}{2}(f_n + f_{n+1}), \\ x_{n+1} &= x_n + \frac{h}{2}(f_n + f_{n+1}). \end{aligned} \quad (2.26)$$

Einen soliden Überblick über weitere Verfahren gibt [6] und eine sehr ausführliche theoretische Beschreibung wird in [8, 9, 10] gegeben.

Problemstellung bei einer Echtzeitsimulation

Die Genauigkeit und Stabilität des numerischen Integrationsverfahrens sind vom Verfahren selbst und von den Eigenschaften des Systems, sprich von der Modellfunktion f , abhängig. Um den Zusammenhang zwischen den Systemeigenschaften und der numerischen Integration herzustellen, wird die nichtlineare Modellfunktion f in einem beliebigen Betriebspunkt $[x_B, u_B]$ linearisiert. Man erhält die lineare Modellfunktion

$$f(x(t), u(t)) \approx f(x_B, u_B) + \left(\frac{\partial f}{\partial x} \bigg|_{x_B; u_B} \right) (x(t) - x_B) + \left(\frac{\partial f}{\partial u} \bigg|_{x_B; u_B} \right) (u(t) - u_B), \quad (2.27)$$

wobei die Jacobi-Matrix

$$\frac{\partial f}{\partial x} \bigg|_{x_B; u_B} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \bigg|_{x_1; u_B} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_w} \bigg|_{x_w; u_B} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_w}{\partial x_1} \bigg|_{x_1; u_B} & \dots & \frac{\partial f_w}{\partial x_w} \bigg|_{x_w; u_B} \end{pmatrix} \quad (2.28)$$

die Systemmatrix des linearisierten Systems im Betriebspunkt $[x_B, u_B]$ darstellt. Die Eigenwerte dieser Systemmatrix λ_i beschreiben die dynamischen Eigenschaften im Betriebspunkt des Systems und bilden multipliziert mit der Zeitschrittweite h der numerischen Integration die Stabilitätsvariablen des Systems [8]

$$z_i = h \cdot \lambda_i. \quad (2.29)$$

Abb. 2.6 zeigt exemplarisch den Einfluss einer Stabilitätsvariablen z auf die Genauigkeit und Stabilität numerischer Integrationsverfahren. In Abb. 2.6 (links) ist der Verlauf des numerischen Fehlers doppellogarithmisch über die Stabilitätsvariable z aufgetragen. Der numerische Fehler setzt sich aus dem Rundungsfehler des Rechensystems und dem Verfahrensfehler zusammen. Der Rundungsfehler dominiert bei sehr kleinen z nahe der Maschinenpräzision. Aufgrund der hohen Zahlendarstellungsgenauigkeit heutiger 64Bit-Rechensysteme ist dieser Fehlereinfluss vernachlässigbar klein und wird daher hier nicht weiter vertieft. Viel größeren Einfluss hat der Verfahrensfehler. Dieser hängt direkt von der Konsistenzordnung r des Integrationsverfahrens ab. Dabei gilt vereinfacht ausgedrückt: Je höher die Konsistenzordnung des Verfahrens, desto genauer die numerische Lösung.

Abb. 2.6 (rechts) zeigt, welchen Einfluss die Stabilitätsvariable z auf die Stabilität der numerischen Integration hat. Jedes numerische Integrationsverfahren definiert ein Stabilitätsgebiet G in der komplexen Zahlenebene. Schließt das Stabilitätsgebiet G des Verfahrens alle Stabilitätsvariablen $z_i = h\lambda_i$ des Systems ein, konvergiert die Lösung der numerischen Integration. Die Form des Stabilitätsgebietes G hängt von der Wahl des Integrationsverfahrens ab.

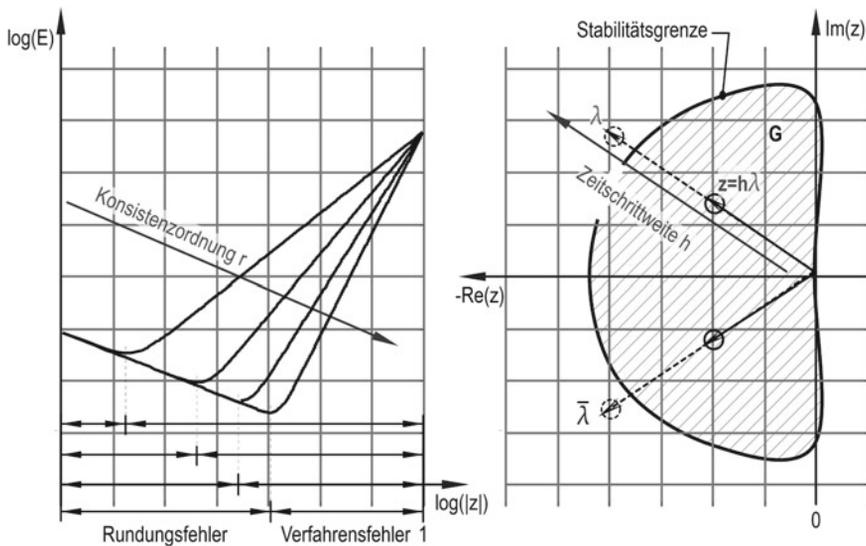


Abb. 2.6 Genauigkeits- und Stabilitätseigenschaften numerischer Integrationsverfahren [4]

Da die Eigenwerte und damit auch die Stabilitätsvariablen nur für lineare Systeme definiert sind, lassen sich daraus resultierende Genauigkeits- und Stabilitätsaussagen nur begrenzt auf nichtlineare Systeme übertragen. Jedoch kann es für ein besseres qualitatives Verständnis der Zusammenhänge zwischen den Systemeigenschaften und dem numerischen Verfahren beitragen, wie folgende Überlegung zeigt. Linearisiert man ein nichtlineares System in jedem Zeitschritt, erzeugen die daraus hervorgehenden Stabilitätsvariablen jeweils eine zeitvariante Ortskurve $z_i(t_n)$ in der komplexen Zahlenebene. Bei konstanter Zeitschrittweite h bedeutet dies, dass eine stabile Lösung nichtlinearer Differentialgleichungen nicht garantiert werden kann, da die Ortskurven aus dem Stabilitätsgebiet des numerischen Integrationsverfahrens heraus laufen können.

Es existieren zwar numerische Integrationsverfahren, deren Stabilitätsgebiete die komplette linke Hälfte der komplexen Zahlenebene abdecken und somit unabhängig von der Lage der Stabilitätsvariablen eine absolut stabile Integration ermöglichen (A-Stabilität), die Dahlquist-Barriere besagt jedoch, dass diese Eigenschaft nur implizite Verfahren haben können [10]. Bei impliziten Verfahren treten unbekannte Lösungen x_{n+1} und Funktionswert f_{n+1} in der Quadraturformel $Q(f)$ auf (vgl. Gl. 2.26), was dazu führt, dass diese Verfahren, insbesondere bei großen Systemen, sehr rechenaufwendig und in einer Echtzeitsimulation nur begrenzt einsetzbar sind.

Um eine effiziente und dennoch robuste Integration zu ermöglichen, werden häufig die deutlich recheneffizienteren expliziten Verfahren, bei denen nur bekannte Lösungen x_{n-i} und Funktionswerte f_{n-i} in die Quadraturformel $Q(f)$ eingehen (vgl. Gl.

2.26), mit einer Zeitschrittweitensteuerung ausgestattet. Je nach Genauigkeitsanforderungen wird die Zeitschrittweite h zur Laufzeit der Berechnung angepasst. Dabei wird die Zeitschrittweite h derart variiert, dass ein ausreichend geringer Verfahrensfehler bei gleichzeitig effizienter Berechnung erzielt wird. Dadurch wird auch erreicht, dass alle Ortskurven $z_i(t_n)$ des Modells in dem Stabilitätsgebiet G des numerischen Verfahrens verlaufen, da die Zeitschrittweite h den Abstand der Stabilitätsvariablen zum Ursprung $|z_i(t_n)| = h|\lambda_i(t_n)|$ beeinflusst, und somit durch Verkleinerung von h die Ortskurven an den Ursprung herangezogen werden. Nachteil der Zeitschrittweitensteuerung ist, dass die Anzahl der erforderlichen Integrations Schritte innerhalb eines festen Zeitintervalls variiert, wodurch eine zeitdeterministische Berechnung in einer Echtzeitsimulation nicht mehr gewährleistet werden kann.

Echtzeitsimulation mit Mehrschrittverfahren und PECE-Methode

Die vorangegangenen Überlegungen zeigen, dass es sehr sinnvoll und häufig auch notwendig sein kann, das Integrationsverfahren für den Einsatz in einer Echtzeitsimulation gezielt auszuwählen. Somit sind Integrationsverfahren mit möglichst hoher Recheneffizienz bei ausreichender Stabilität (große Stabilitätsgebiete) und Genauigkeit (hohe Konsistenzordnung) gesucht. Als sehr recheneffiziente Integrationsverfahren sind die sogenannten linearen Mehrschrittverfahren (MSV) bekannt. Diese Verfahren nutzen für die Berechnung der Integralfläche $Q(f)$ zusätzliche zurückliegende (bereits berechnete) Lösungsschritte x_{n-1}, x_{n-2}, \dots und Funktionswerte f_{n-1}, f_{n-2}, \dots , um eine höhere Konsistenzordnung zu erreichen, und benötigen dadurch weniger Auswertungen der meist rechenaufwendigen Modellfunktion f pro Integrations schritt im Vergleich zu anderen Verfahrensklassen mit gleicher Konsistenzordnung. Da bei komplexen Modellen der Rechenaufwand für die Auswertung der Modellfunktion f den Gesamtrechenaufwand für das Verfahren dominiert, ist es erforderlich die Anzahl der Auswertungen der Modellfunktionen möglichst gering zu halten. Die allgemeine Berechnungsvorschrift der MSV lautet:

$$x_{n+1} = \sum_{j=1}^k \alpha_j x_{n+1-j} + h \sum_{j=0}^k \beta_j f_{n+1-j}. \quad (2.30)$$

Durch die Wahl der Koeffizienten α_j und β_j sowie der Schrittzahl k können verschiedene Typen von MSV mit unterschiedlichen Eigenschaften konstruiert werden. Bekannte Vertreter der MSV sind die Adams-Verfahren und die BDF-Verfahren (BDF: Backward Differentiation Formulas). Abb. 2.7 zeigt beispielhaft die Stabilitätsgebiete der expliziten Adams-Bashforth-Verfahren $AB(k)$ und der impliziten Adams-Moulton-Verfahren $AM(k)$ für $k = 1 - 5$.

Vereinfacht kann man sagen, dass die Konsistenzordnung mit der Schrittzahl steigt und somit Verfahren mit hoher Schrittzahl genauer sind als Verfahren mit kleiner Schrittzahl. Die AB -Verfahren sind explizite MSV ($\beta_0 = 0$) und dadurch sehr recheneffizient, da die Modellfunktion f_n zum Zeitpunkt t_n explizit ausgewertet werden kann und nur

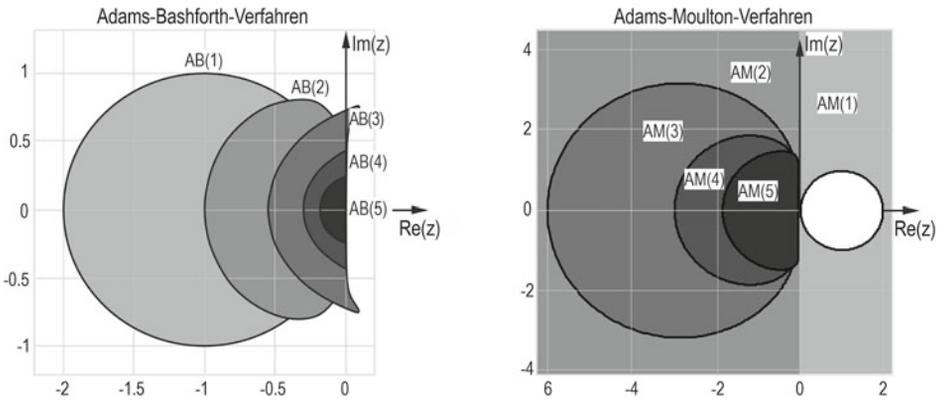


Abb. 2.7 Stabilitätsgebiete der expliziten Adams-Bashforth-Verfahren $AB(k)$ (links) und der impliziten Adams-Moulton-Verfahren $AM(k)$ (rechts), mit jeweils $k = 1-5$ [4, 10]

einmal pro Integrationsschritt berechnet werden muss, unabhängig von der Schrittzahl des Verfahrens. Allerdings weisen diese Verfahren nur kleine Stabilitätsgebiete auf. Die AM-Verfahren sind implizite MSV ($\beta_0 \neq 0$) und besitzen sehr große Stabilitätsgebiete, sind jedoch sehr viel rechenaufwendiger als die AB-Verfahren. Dies liegt daran, dass die Modellfunktion f_{n+1} zum Zeitpunkt t_n noch nicht bekannt sein kann und eine explizite Auswertung nicht möglich ist. Die implizite Auswertung erfordert die numerische Lösung eines nichtlinearen algebraischen Gleichungssystems, was zahlreiche Aufrufe der Modellfunktion mit sich bringt.

Um eine bessere numerische Stabilität und Genauigkeit bei gleichzeitig hoher Recheneffizienz zu erzielen, kann eine Kombination beider Verfahren anhand der sogenannten Prädiktor-Korrektor-Methode (PECE) eingesetzt werden. Dabei wird durch einen vorgeschalteten expliziten Integrationszeitschritt mit einem AB-Verfahren der Zustandsvektor \tilde{x}_{n+1} prädiziert (Predict), der zur Auswertung der Modellfunktion (Evaluate) $f(\tilde{x}_{n+1})$ für den nachgeschalteten impliziten Integrationsschritt mit einem AM-Verfahren zur Korrektur genutzt werden kann (Correct). Eine erneute Auswertung der Modellfunktion (Evaluate) mit dem korrigierten Zustandsvektor x_{n+1} liefert eine gute Näherung von f_{n+1} . Die Berechnungsvorschrift eines Adams-Bashforth-Moulton-PECE-Integrationsschritts lautet somit:

$$\begin{aligned}
 \text{Predict mit } AB(k): \quad & \tilde{x}_{n+1} = x_n + h \sum_{j=1}^k \beta_j^{AB} f_{n+1-j} \\
 \text{Evaluate:} \quad & \tilde{f}_{n+1} = f(\tilde{x}_{n+1}) \\
 \text{Correct mit } AM(k): \quad & x_{n+1} = x_n + h\beta_0^{AM} \tilde{f}_{n+1} + h \sum_{j=1}^k \beta_j^{AM} f_{n+1-j} \\
 \text{Evaluate:} \quad & f_{n+1} = f(x_{n+1})
 \end{aligned} \tag{2.31}$$

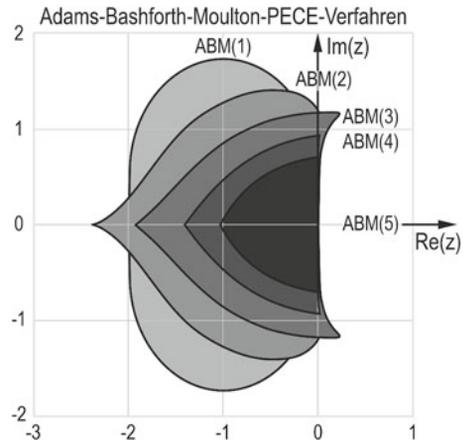
Dadurch wird die explizite Auswertung einer impliziten Berechnungsvorschrift möglich, wodurch eine Verbesserung der numerischen Stabilität und Genauigkeit gegenüber einem gewöhnlichen expliziten MSV erzielt wird [8, 10]. Allerdings wird die Stabilität des ursprünglichen impliziten MSV nicht erreicht. Abb. 2.8 zeigt die Stabilitätsgebiete des Adams-Bashforth-Moulton-PECE-Verfahrens (kurz ABM-Verfahren).

Um nun die Verbesserung gegenüber den AB-Verfahren einordnen zu können, sollte beachtet werden, dass die Konsistenzordnung bei den ABM-Verfahren $r = k + 1$ entspricht. D. h., neben der um eins höheren Konsistenzordnung und der damit verbundenen höheren Genauigkeit gegenüber den $AB(k)$ -Verfahren, zeigen die $ABM(k)$ -Verfahren auch bessere Stabilitätseigenschaften. Stellt man nämlich die Verfahren mit gleicher Konsistenzordnung r gegenüber, d. h. $AB(r)$ jeweils mit $ABM(r - 1)$ für $r \geq 2$, so fallen die Stabilitätsgebiete bei den ABM-Verfahren und die damit verbundene höhere Robustheit deutlich größer aus (vgl. Abb. 2.7 links und Abb. 2.8).

Die ABM-Verfahren benötigen zwei Auswertungen der Modellfunktion f pro PECE-Integrationsschritt, unabhängig von der Konsistenzordnung. Das heißt, der Rechenaufwand ist in etwa doppelt so hoch wie bei den AB-Verfahren, jedoch um ein Vielfaches geringer wie bei den impliziten AM-Verfahren.

Durch mehrfaches Iterieren über den Evaluate-Correct-Schritt kann die Genauigkeit zusätzlich verbessert werden, jedoch kostet jeder Schritt eine weitere Auswertung der Modellfunktion. Diese Verfahren heißen dann $P(EC)^M$ E-Verfahren mit M zusätzlichen Evaluate-Correct-Schritten.

Abb. 2.8 Stabilitätsgebiete der Adams-Bashforth-Moulton-PECE Verfahrens $ABM(k)$ mit jeweils $k = 1-5$



2.6 Realisierung einer HiL-Simulationsplattform

Auf Basis der in diesem Beitrag beschriebenen Methoden wurde in den Jahren 2002–2005 im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) an der Universität Stuttgart ein HiL-Simulator realisiert. Der Simulator basierte auf der in Abb. 2.2 beschriebenen Architektur. Der Echtzeit-Rechenkern wurde in einer ersten Version für die Windows Echtzeiterweiterung RTX entwickelt und später auf das TwinCAT Echtzeitsystem der Fa. Beckhoff Automation GmbH & Co.KG portiert. Der Simulator konnte selbstgetaktet asynchron und fremdgetaktet synchron mit Steuerungssystemen über den Feldbus gekoppelt werden. Als Busschnittstellen wurde Sercos-Interface und Profibus realisiert. Damit konnten HiL-Simulationen für Servoantriebe mit Bustakten unter 1 ms durchgeführt werden. In den Echtzeit-Rechenkern wurden die in diesem Beitrag beschriebenen Systementkopplung für lineare FE-Modelle implementiert. Für nichtlineare Modelle wurden Integrationsverfahren auf Basis der Adams-Mehrschrittverfahren mit PECE-Methode umgesetzt.

Die erste VIBN auf Basis einer HiLS am ISW wurde an einer real verfügbaren Forschungsmaschine mit neuartiger Hexapod-Parallelkinematik durchgeführt (Abb. 2.9). Das Modell umfasste ein nichtlineares Mehrkörpermodell der Maschinenkinematik gekoppelt mit 6 linearen Antriebs- und Reglermodellen.

Die Buskommunikation für die Antriebe erfolgte über Sercos-Interface. Als NC-Steuerung kam Beckhoff TwinCAT CNC zum Einsatz.

Die Verifizierung des Modells erfolgte anhand der gemessenen Stromverläufe aller 6 Antriebe an der realen Maschine. Zur Analyse und Optimierung wurde ein Testprogramm auf der realen Steuerung abgefahren und die dabei berechneten Zustandsgrößen der virtuellen Maschine farblich über den Bahnverlauf visualisiert. Damit konnten Problemzonen hinsichtlich der Vorschubgeschwindigkeit oder auftretender Antriebsstörkräfte auf dem Werkstück einfach lokalisiert, gezielt analysiert und durch Parameteranpassungen und Programmänderungen in der Steuerung optimiert werden [11].

Auf Basis des Prototypen wurde im Jahr 2005 damit begonnen die kommerzielle HiLS-Plattform ISG-virtuos von der Industriellen Steuerungstechnik GmbH in enger Kooperation mit dem ISW zu entwickeln. ISG-virtuos kam in zahlreiche Forschungs- und Industrieprojekten zum Einsatz [4, 12, 13]. Heute ist ISG-virtuos ein etabliertes Werkzeug für die VIBN von komplexen Steuerungssystemen.

2.7 Zusammenfassung

Hoher Wettbewerbsdruck und kurze Produktentwicklungszyklen erfordern den Einsatz immer leistungsfähigerer Produktionsanlagen. Mit wachsenden Anforderungen an die Produktivität steigt die Komplexität dieser Anlagen. Die Beherrschbarkeit dieser Komplexität

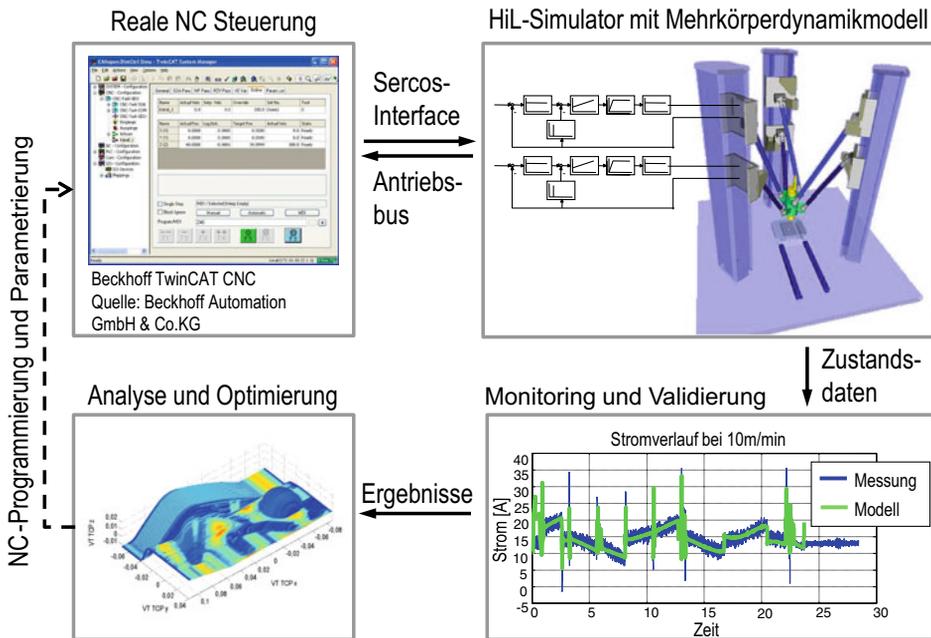


Abb. 2.9 Aufbau der ersten Virtuellen Inbetriebnahme auf Basis einer HiLS am ISW 2004 [11]

kann nur durch den Einsatz moderner Entwicklungs- und Testmethoden erreicht werden. Treten zu einem späten Zeitpunkt in der Entwicklung oder erst bei der Inbetriebnahme einer Anlage Fehler auf, bleiben zeitaufwendige und kostspielige Nacharbeiten meist nicht aus.

Das Ersetzen der realen Anlage durch eine virtuelle Anlage ermöglicht das Testen und Inbetriebnehmen von Steuerungssystemen bereits in einer frühen Phase des Entwicklungsprozesses einer Produktionsanlage. Dieser Beitrag stellt Methoden für die Virtuelle Inbetriebnahme mithilfe einer HiLS vor. Dabei wird beschrieben, wie eine verlustfreie und zeitsynchrone Ankopplung der Simulation an ein reales Steuerungssystem über den realen Feld-/Antriebsbus möglich ist. Zudem werden in diesem Beitrag Methoden für die Echtzeitberechnung von linearen und nichtlinearen Modellen mit Blick auf die numerischen Lösungsverfahren vorgestellt.

Literatur

1. VDI/VDE-Fachbereich Engineering & Betrieb (08.2016) VDI/VDE-Richtlinie 3693 Blatt1 Virtuelle Inbetriebnahme, Modellarten und Glossar; VDI/VDE-Handbuch Automatisierungstechnik, (Hsg) VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik

2. Ehrenstraßer M, Pörnbacher C, Wunsch G (2002) Virtuelle Werkzeugmaschine für die Simulation. *Wt Werkstatttechnik online* 92(5):205–209. VDI Fachmedien, Düsseldorf
3. Schiehlen W, Eberhard P (2004) Technische Dynamik, Modelle für Regelung und Simulation, 2. Auflage. Vieweg+Teubner, Wiesbaden
4. Röck S (2007) Echtzeitsimulation von Produktionsanlagen mit realen Steuerungssystemen, Dissertation. Jost-Jetter Verlag, Heimsheim
5. Pritschow G, Röck S (2007) Real-time capable finite element models with closed-loop control – a method for hardware-in-the-Loop Simulation of flexible Systems. *WGP Annals*, Bd. XIV/1, *Journal of Production Engineering Research & Development* 1(1):37–43. Springer
6. Gipser M (1999) Systemdynamik und Simulation. Teubner-Verlag, Stuttgart
7. Föllinger O (1994) Regelungstechnik. Einführung in die Methoden und ihre Anwendung. Hüthig Buch, Heidelberg
8. Shampine LF, Gordon MK (1984) Computer-Lösung gewöhnlicher Differentialgleichungen. Das Anfangswertproblem. Vieweg, Wiesbaden
9. Dekker K, Verwer JG (1984) Stability of Runge-Kutta methods for stiff non-linear differential equations. North-Holland Publishers
10. Hairer E, Wanner G (1996) Solving ordinary differential equations II. Springer, Berlin
11. Pritschow G, Röck S (2004) Hardware in the loop. Simulation of machine tools. *Annals of the CIRP* 53(1):295–298. Elsevier
12. Rüdeler H, Röck S, Eger U (2006) Virtual machines on a physical bus. S 20–22. *Industrial Ethernet – Vogel Druck & Medienservice GmbH & Co. KG*
13. Röck S (2011) Hardware in the loop simulation of production systems dynamics. *Journal of Production Engineering Research & Development* 5(3):329–337. Springer
14. Besselink B, Tabak U, Lutowska A, van de Wouw N, Nijmeijer H, Rixen DJ, Hochstenbach HE, Schilders WHA (2013) A comparison of model reduction techniques from structural dynamics, numerical mathematics and systems and control. *Journal of Sound and Vibration* 332(19):4403–4422. Elsevier

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Echtzeit-Co-Simulation von Produktionsanlagen

3

Christian Scheifele und Alexander Verl

Zusammenfassung

Bei der virtuellen Planung, Auslegung und Inbetriebnahme steigen die Anforderungen an die Aussagekraft Digitaler Zwillinge, um eine umfassende Absicherung und Auslegung im digitalen Entwicklungsprozess zu erreichen. Die Zunahme der Modellkomplexität eines Digitalen Zwillings stellt die Echtzeitsimulation durch den steigenden Berechnungsaufwand vor neue Herausforderungen. Dieser Beitrag stellt eine Plattform zur Echtzeit-Co-Simulation von Digitalen Zwillingen für die Virtuelle Inbetriebnahme vor. Die im Beitrag vorgestellte parallelisierte Modellberechnung auf Basis einer Co-Simulationsarchitektur beabsichtigt die zur Modellberechnung nutzbare Rechenleistung zu steigern. Der Beitrag führt (i) in die Integration leistungsfähiger technologiespezifischer Simulationslösungen durch Integrationsschnittstellen und (ii) die Echtzeit-Co-Simulation von Produktionsanlagen auf Basis von Partitionierungs-, Parallelisierungs-, Synchronisations- und Datenaustauschmechanismen ein.

C. Scheifele (✉)

ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH, Stuttgart, Deutschland

E-Mail: christian.scheifele@isg-stuttgart.de

A. Verl

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW),

Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

© Der/die Autor(en) 2024

A. Verl, S. Röck und C. Scheifele (Hrsg.),

Echtzeitsimulation in der Produktionsautomatisierung,

https://doi.org/10.1007/978-3-662-66217-5_3

3.1 Einleitung

Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für „[...] ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen [...]“ [1], welche sich in die Lebenszyklusphasen einer Produktionsanlage integrieren. Im Kontext der Digitalen Fabrik sind in den letzten Jahren eine Vielzahl von hochspezialisierten und technologiespezifischen Simulationslösungen entstanden. Mit diesen Entwicklungen können verschiedene Aspekte einer Produktionsanlage präzise virtuell abgebildet werden. Vor allem in Entwicklungsprozessen im Maschinen- und Anlagenbau kommen heute Simulationslösungen, beruhend auf digitalen Modellen und Methoden, zum Einsatz. Abb. 3.1 zeigt anhand des V-Modells als etablierte Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme die Verortung der Virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) im Entwicklungsprozess von Produktionsanlagen.

Während in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses auf eine Simulationsdisziplin spezialisierte hochauflösende Simulationsmodelle zum Einsatz kommen, gewinnt im Verlauf des Entwicklungsprozesses bis hin zur Systemintegration die Betrachtung des

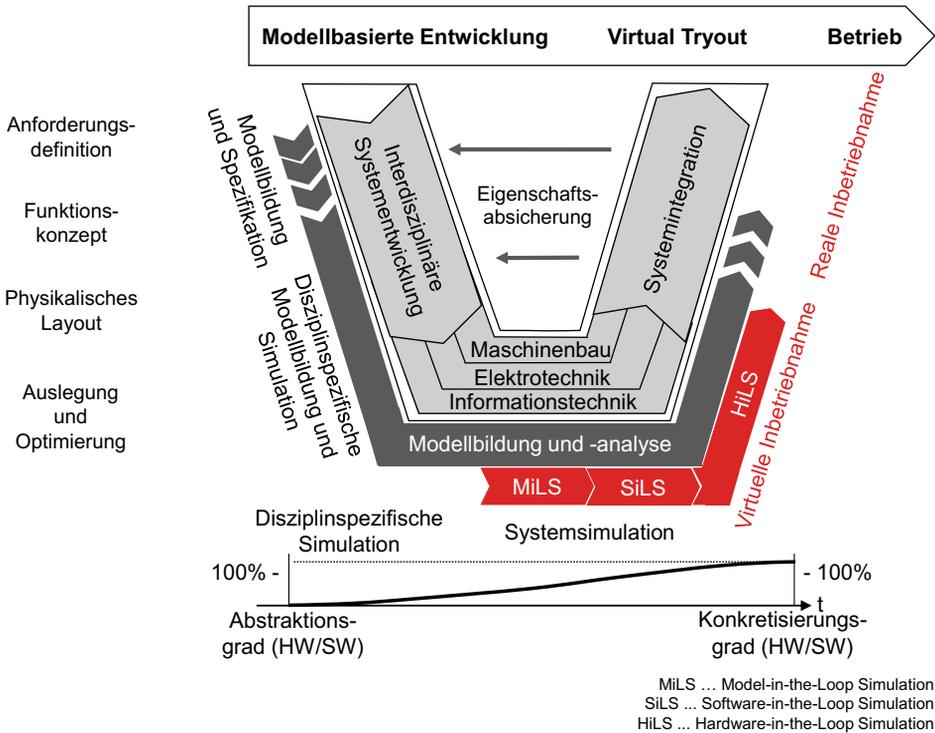


Abb. 3.1 V-Modell erweitert um digitale Modelle und Methoden, insbesondere der Virtuellen Inbetriebnahme

mechatronischen Gesamtsystems an Bedeutung. In den späten Phasen des Entwicklungsprozesses liegt der Fokus auf der virtuellen Absicherung der Interaktionen und Wechselwirkungen der Disziplinen eines mechatronischen Systems. Zur virtuellen Abbildung des Gesamtverhaltens der Maschine oder Anlage wird daher eine Systemsimulation – auch als gekoppelte Simulation oder Multidomain-Simulation bezeichnet – notwendig. Hierbei werden Modelle aus unterschiedlichsten Simulationsdisziplinen zu einem Gesamtmodell des Systems gekoppelt. Dies führt zu einem Simulationsmodell, welches das Zusammenspiel der mechatronischen Disziplinen und damit die Korrelationen abbilden kann. In diesem Beitrag wird hierfür der Begriff des Digitalen Zwillings verwendet. Ein solcher Digitaler Zwilling kommt beispielsweise in der Automatisierungstechnik bei einer VIBN zum Einsatz. Die VIBN ermöglicht es, die Inbetriebnahme der Automatisierungstechnik bereits vor der Verfügbarkeit der realen Lösung am Digitalen Zwilling durchzuführen.

Die VIBN unterscheidet zwischen verschiedenen Testkonfigurationen. Die Software-in-the-Loop Simulation (SiLS) bildet die Komponenten eines mechatronischen Systems vollständig virtuell mit Softwarekomponenten ab. Durch die Anbindung einer virtuellen/emulierten Steuerung kommen die originalen Steuerungsalgorithmen des Steuerungssystems zum Einsatz. Die Simulationszeit kann frei vom Simulator gesteuert werden.

In einer Hardware-in-the-Loop Simulation (HiLS) wird dagegen die reale Steuerungshardware über den industriellen Feldbus mit dem Digitalen Zwilling verbunden. Der Simulator bildet das Verhalten der Feldbuskomponenten am Feldbus ab, damit die Steuerung ohne aufwendige Änderung der Feldbuskonfiguration zum Einsatz kommen kann. Die Steuerung erkennt keinen Unterschied zwischen dem Feldbusverhalten der realen und virtuellen Feldbuskomponenten, wenn diese im Sinne einer Emulation das reale Verhalten korrekt nachbilden. Für den verlustfreien Signalaustausch mit dem Steuerungssystem muss die Simulation im Takt des realen Steuerungssystems laufen, was eine Simulation des Systemverhaltens mit harten Echtzeitkriterien (dies bedeutet, dass Simulationsergebnisse zuverlässig innerhalb einer festen Zeitschranke vorliegen müssen) notwendig macht.

Im Rahmen von komplexen Szenarien, bei denen mehrere Steuerungen gleichzeitig an den Digitalen Zwilling angeschlossen sind, treten auch kombinierte Formen der SiLS und HiLS auf. So können die einzelnen Steuerungssysteme entweder als reale Hardwarekomponenten (HiLS) oder als emulierte bzw. virtuelle Steuerungen (SiLS) gekoppelt werden. Sobald allerdings eine reale Hardwarekomponente im Einsatz ist, bestimmt diese die Taktung des Simulators, was zu harten Echtzeitanforderungen an die eingesetzten Simulationsmodelle führt.

Zur umfassenden virtuellen Absicherung und Auslegung müssen die Interaktionen zwischen Prozess, Maschine, Steuerungssystem und Bediener durch den Digitalen Zwilling abgebildet werden. Es besteht eine direkte Korrelation zwischen dem im Rahmen einer VIBN erreichbaren Konkretisierungsgrad von Hardware- (HW) und Softwarekomponenten (SW) der Produktionsanlage und der Modellgenauigkeit (siehe Abb. 3.2). Die Einhaltung der harten Echtzeitkriterien im Rahmen der HiLS trotz steigender

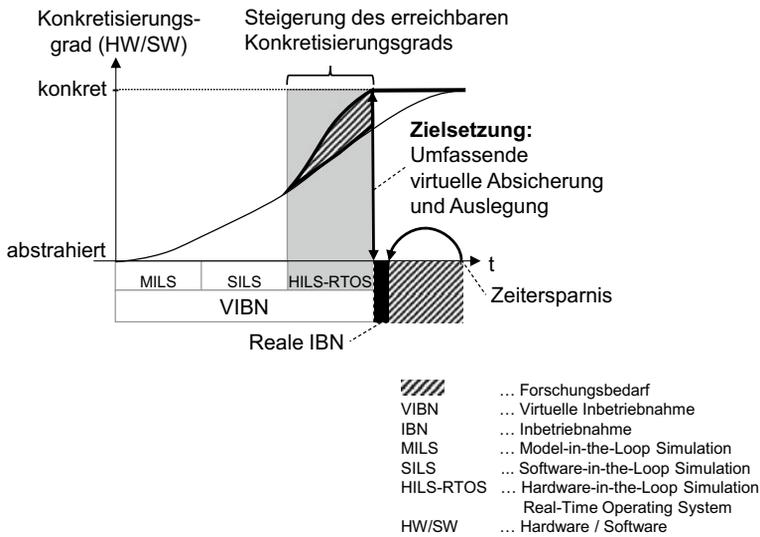


Abb. 3.2 Zielsetzung einer umfassenden virtuellen Absicherung und Auslegung im Rahmen der Virtuellen Inbetriebnahme

Modellgenauigkeit stellt eine große Herausforderung und aktuell ein Defizit der VIBN dar.

Laut einer Studie des VDMA in 2017 [2] erwartet die Mehrheit der Maschinen- und Anlagenbauer eine steigende Nachfrage nach einer VIBN im Entwicklungsprozess ihrer Produktionsanlagen (57 % der befragten Unternehmen). Handlungsbedarf sieht der VDMA unter anderem im Bereich der Abbildung physikalischer Effekte durch bestehende Technologien (21 % der befragten Unternehmen). Daraus lässt sich die Anforderung an eine höhere Modelltiefe von Digitalen Zwillingen ableiten [3]. Hierzu sind neue Ansätze zur Steigerung der in der HiLS nutzbaren Rechenleistung gefragt. Um hochauflösende Modelle zu erhalten, wird die Integration von disziplinspezifischen, leistungsfähigen und performanten Modellen der Digitalen Fabrik in den Digitalen Zwilling vorgeschlagen.

Dieser Beitrag stellt eine Plattform zur Echtzeit-Co-Simulation für die VIBN vor. Die vorgestellte parallelisierte Modellberechnung auf Basis einer Co-Simulationsarchitektur beabsichtigt die zur Modellberechnung nutzbare Rechenleistung zu steigern. Um die nutzbare Rechenleistung und damit die mögliche Modellkomplexität zu erhöhen, werden Partitionierungs-, Parallelisierungs-, Synchronisierungs- und Datenaustauschmechanismen vorgeschlagen. Für die Integration leistungsfähiger technologiespezifischer Simulationslösungen werden Integrationsschnittstellen für eine blockbasierte Modellierung vorgestellt.

3.2 Stand der Technik

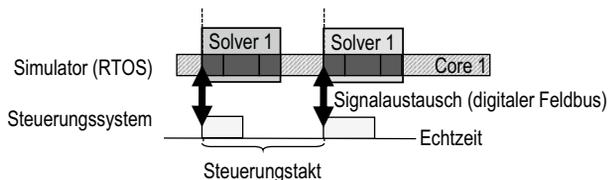
Um die Jahrtausendwende wurden in verschiedenen wissenschaftlichen Arbeiten die Architektur von Simulatoren für die HiLS untersucht. *Wünsch* teilt in [4] wissenschaftliche Ansätze für die HiLS unter anderem anhand der Simulationszeitbasen für Steuerungstakte von hundert, zehn und einer Millisekunde (ms) ein. Untersuchte Echtzeitansätze für zehn und hundert Millisekunden basieren dabei meist auf einem Windows-Betriebssystem. Um Simulationszeiten bis in den Bereich unter einer Millisekunde zu erreichen, ist die Verwendung eines Echtzeitbetriebssystems (RTOS) notwendig [5]. Während *Zäh* [6] und *Mewes* [7] Windows-basierte HiLS für Steuerungstakte im Bereich zwischen zehn und hundert Millisekunden vertreten, formulieren *Pritschow* und *Röck* [5] für CNC-Maschinen die Notwendigkeit einer zeitdeterministischen Simulation auf einem Echtzeitbetriebssystem für Steuerungstakte bis in den Bereich unter einer Millisekunde. Eine ausführliche Darstellung wissenschaftlicher Ansätze zeigt [4].

Nach *Pritschow* und *Röck* [5] muss eine HiLS das Maschinenverhalten innerhalb eines Steuerungstakts (heute im Bereich bis unter einer ms bei CNC-Werkzeugmaschinen) berechnen, um den Anforderungen an eine zeitsynchronen und verlustfreien Datenaustausch zwischen Steuerung und Simulation über den Feldbus gerecht zu werden (siehe Abb. 3.3).

Wenn die Simulationsarchitektur auf einem einzigen Rechenkern (Solver), wie in Abb. 3.3 gezeigt, basiert, spricht man von einer geschlossenen Simulationsarchitektur [8]. Der Rechenkern unterwirft das Gesamtmodell einem einheitlichen Simulationstakt, der mit der Steuerung und dem digitalen Feldbus synchronisiert ist. Nach *Pritschow* und *Röck* wird das Gesamtmodell sequenziell auf einem Prozessorkern berechnet. Hierdurch ist die verfügbare Rechenleistung begrenzt.

Dieser Nachteil begrenzt die Modelltiefe der Verhaltensmodelle und den Modellumfang des Gesamtsystems [3, 9, 10]. Als Modelltiefe wird in diesem Beitrag die Abbildungsgenauigkeit eines Verhaltensmodells bezeichnet, während der Modellumfang die Größe eines Simulationsmodells beschreibt. Trotz bekannter Verfahren zur Modellreduktion, effizienten numerischen Methoden und optimierten Simulationsansätzen können detaillierte Modelle der Strukturmechanik (z. B. Finite-Elemente-Methode, flexible Mehrkörpersysteme), zur hochgenauen Prozesssimulationen (z. B. Materialabtrag, Spanbildung, Materialfluss) und für die präzise 3D-Kinematiksimulation mit

Abb. 3.3 Zeitsynchrone und verlustfreie Kommunikation zwischen industriellem Steuerungssystem und Systemsimulation (Digitaler Zwilling)



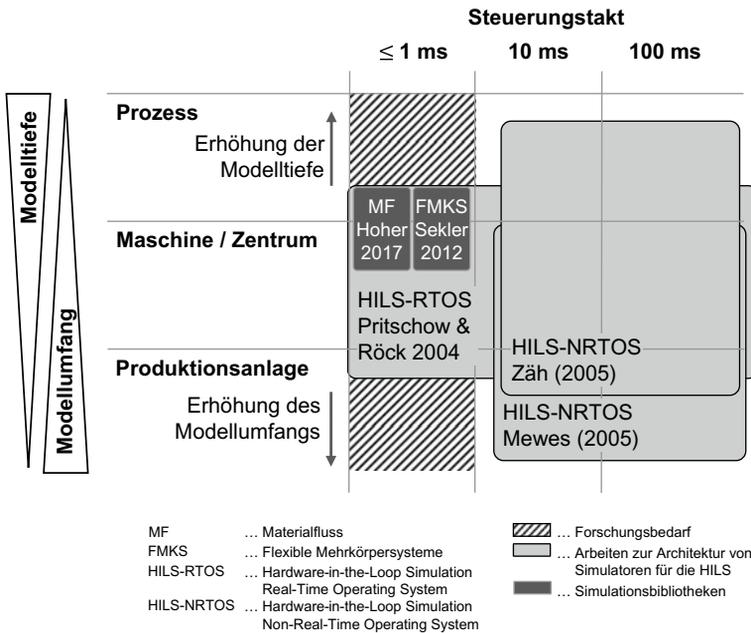


Abb. 3.4 Forschungsbedarf und Betrachtungsfokus im Kontext ausgewählter wissenschaftlicher Arbeiten im Bereich der Hardware-in-the-Loop Simulation

Kollisionserkennung aktuell nur mit starken Vereinfachungen und Anpassungen berücksichtigt werden. Abb. 3.4 stellt den Forschungsbedarf und Betrachtungsfokus des Beitrags in Anlehnung an ausgewählte wissenschaftliche Arbeiten im Bereich der HiLS mit industriellen Steuerungssystemen [5, 6, 7] sowie Simulationsdisziplin-spezifische Untersuchung von Simulationsbibliotheken zur Materialflusssimulation [8] und zur flexiblen Mehrkörpersimulation [11] dar.

Während bei der Berechnung auf einem einzelnen Prozessorkern die Berechnung sequentiell durchgeführt wird, kann bei Mehrkernprozessoren eine parallelisierte Berechnung durchgeführt werden [12]. Durch Modellpartitionierung und parallelisierte Simulation in einer Co-Simulationsarchitektur können Rechenzeiten signifikant reduziert werden [13]. In verschiedensten Simulationsdomänen wurden daher in den vergangenen Jahren Co-Simulationsarchitekturen wissenschaftlich untersucht [14].

In Vorarbeiten wird zur Behebung der aktuellen Einschränkungen der geschlossenen Simulationsarchitektur bei der HiLS mit industriellen Steuerungssystemen eine Partitionierung des Gesamtmodells in unabhängig lösbare Teilmodelle zur parallelen Modellberechnung auf Mehrkernprozessoren durch Kopplung und Synchronisation von Teilmodell-Berechnungen in einer Co-Simulation vorgeschlagen [3, 9, 10]. Um die Notwendigkeit einer Einhaltung der harten Echtzeitbedingungen bei der HiLS zu verdeutlichen, wird dieser Ansatz als Echtzeit-Co-Simulation bezeichnet und in aktuellen

Arbeiten am ISW wissenschaftlich für die HiLS mit industriellen Steuerungssystemen untersucht.

Bisherige Arbeiten auf dem Gebiet der Co-Simulation (z. B. [13, 15]) lassen sich weitestgehend der Offline-Co-Simulation mechanischer Systeme zuordnen. Offline-Co-Simulationsansätze gehen von einer virtuellen Zeitachse für die Simulationszeit aus. In einer Offline-Co-Simulation werden daher die einzelnen Teilmodelle in der Regel sequentiell berechnet und dabei Echtzeitanforderungen vernachlässigt. Für die HiLS mit realer Steuerungshardware werden jedoch steuerungsspezifische Echtzeitanforderungen an den Simulator gestellt. In diesem Beitrag wird daher ein Echtzeit-Co-Simulationsansatz mit parallelisierter Berechnung untersucht.

In Vorarbeiten [3] wurde eine erste Realisierung der Echtzeit-Co-Simulation am Beispiel der physikbasierten Materialflusssimulation vorgestellt. Die eingesetzte Co-Simulation basiert auf zwei miteinander gekoppelten Rechenkernen. Jeder Rechenkern hat einen anderen Zeitkontext (z. B. realer Steuerungstakt, ein Vielfaches des Steuerungstakts) und ein anderes Betriebssystem (z. B. Windows, RTOS). Die Simulation der einzelnen Teilmodelle erfolgt parallel. Zur Steigerung der Modellgenauigkeit werden über eine Multi-Rate Methode fehlende Koppelsignale im schnelleren Rechenkern extrapoliert. Multi-Rate Methoden sind seit langem Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen [16].

In verschiedenen Beiträgen [9, 10] wird auf die Notwendigkeit einer Integrationschnittstelle für Systemsimulationswerkzeuge zur Integration technologiespezifischer Simulationslösungen hingewiesen. Dies wird damit begründet, dass hochspezialisierte, technologiespezifische Simulationslösungen für eine hochauflösende Abbildung des Systemverhaltens benötigt werden. Derzeit werden für jedes Simulationstool für die VIBN eigenständige Simulationsbibliotheken neu entwickelt. Im Bereich der VIBN existieren derzeit keine oder nur rudimentär definierte Werkzeugketten und Modellaustauschstandards. Durch eine Integrationschnittstelle können Teilmodelle von den entsprechenden Technologieexperten einfach integriert werden, um den steigenden Anforderungen an Genauigkeit und Funktionalität eingesetzter Modelle gerecht zu werden. Ein möglicher Standard für die Integration disziplinspezifischer Modelle in eine Systemsimulation ist das Konzept des Functional Mock-up Interface (FMI) [17].

3.3 Konzept einer Plattform zur Echtzeit-Co-Simulation

Zur Erweiterung der Simulationsarchitektur von einer geschlossenen Architektur zu einer Co-Simulationsarchitektur ist eine Betrachtung der Modellierung des Gesamtmodells, der Modellpartitionierung und Initialisierung sowie der Echtzeitberechnung und Echtzeit-Synchronisation der Co-Simulation notwendig (siehe Abb. 3.5).

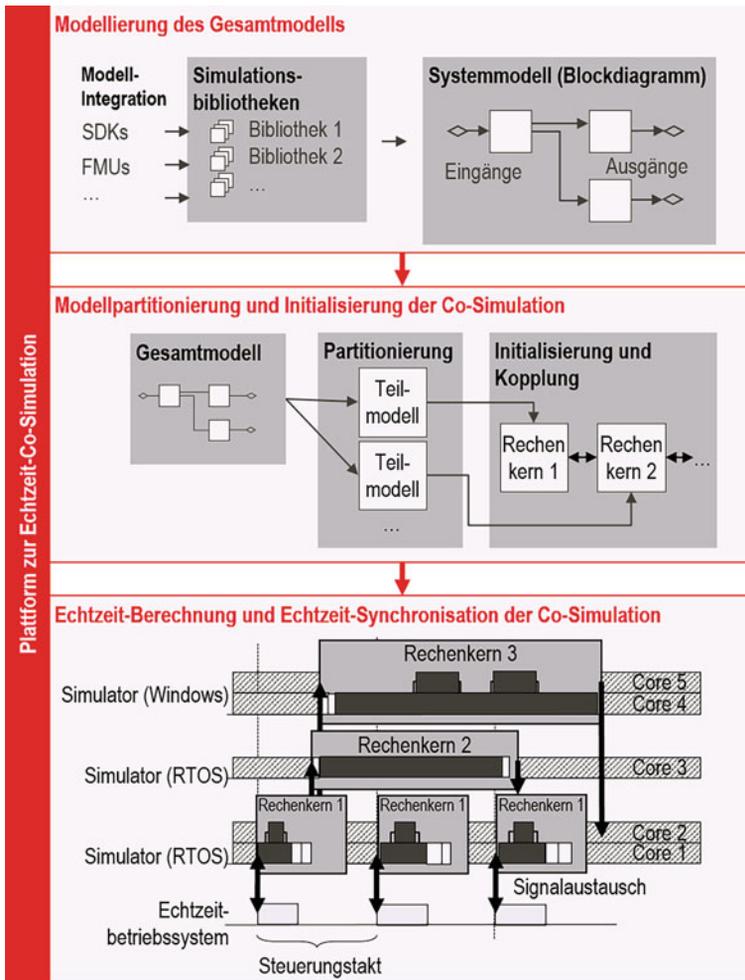


Abb. 3.5 Konzept der Plattform zur Echtzeit-Co-Simulation für die Virtuelle Inbetriebnahme industrieller Steuerungssysteme

3.4 Modellierung und Modellpartitionierung

Nach *Gipser* [18] wird ein dynamisches System definiert, indem seine Objekte, die Kopplungen zwischen den Objekten, deren Eingangsgrößen und deren Ausgangsgrößen spezifiziert und beschrieben werden. *Gipser* unterscheidet zwischen internen Kopplungen (Verbindungen zwischen Objekten) und externen Kopplungen (Eingangs- und Ausgangsgrößen). Für eine ganzheitliche Beschreibung von Produktionsanlagen sind

unterschiedlichste Simulationsdisziplinen in einer Systemsimulation miteinander zu koppeln. Neben der Beschreibung des Prozesses ist das Verhalten der Maschine (z. B. Logik, Kinematik, Dynamik) einschließlich des Verhaltens der industriellen Steuerungskomponenten am industriellen Feldbus mit entsprechender Sensorik und Aktorik zu simulieren. Bei der Simulation von Produktionsanlagen wird die Abbildung des dynamischen Verhaltens des Materialflusses zwischen den einzelnen Maschinen notwendig. Je nach gewünschter Modelltiefe wird für jede Simulationsdisziplin der passende Simulationsansatz ausgewählt. Bei der Zusammensetzung des Simulationsmodells entsteht eine Simulationskonfiguration (siehe Abb. 3.6). Der Übergang zwischen Simulationskonfigurationen kann als Skalierung der Modelltiefe des Simulationsmodells bezeichnet werden.

Zur Modellierung des Systemverhaltens können unterschiedliche Modellierungsansätze verwendet werden. Modellierungsansätze verwenden mathematische Gleichungen die entweder direkt verwendet oder durch eine grafische Darstellung repräsentiert werden [18]. Ein gängiger grafischer Modellierungsansatz ist das Blockschaltbild (oder Signalfussdiagramm) zur Abbildung der Wirkstruktur eines dynamischen Systems. Diese Modellierungsmethode ist im Maschinen- und Anlagenbau weit verbreitet.

Bei der Echtzeit-Co-Simulation soll analog zur geschlossenen Simulationsarchitektur die Modellierung und Konfiguration des Digitalen Zwillings weiterhin in einer einzigen, integrierenden Modellierungsoberfläche auf Basis eines Blockschaltbilds erfolgen. Um die von der Plattform bereitgestellten Simulationsbibliotheken um technologiespezifische

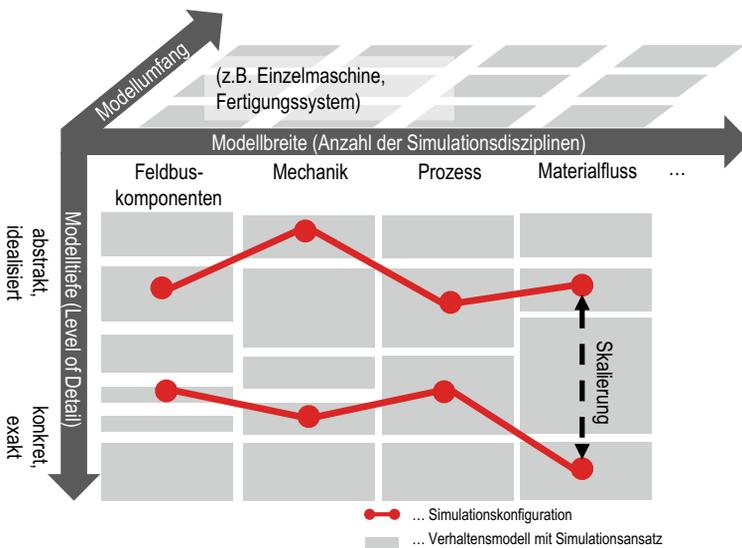


Abb. 3.6 Simulationskonfigurationen eines Digitalen Zwillings und der Übergang zwischen Simulationskonfigurationen (Skalierung)

Simulationslösungen zu erweitern, müssen Integrationsschnittstellen bereitgestellt werden. Die Modellierung der technologiespezifischen Simulationsmodelle kann entweder direkt im Blockschaltbild der Plattform oder im disziplinspezifischen Simulationswerkzeug mit einem individuellen Modellierungsansatz erfolgen. Bei externer Modellierung wird das Simulationsmodell als abgeschlossene Black-Box im Blockschaltbild integriert.

Bei den bisherigen Anwendungen der Co-Simulation bestand die Idee darin, einzelne Teilmodelle von Komponenten zu einem ganzheitlichen Systemmodell zusammenzuführen. Eine Komponente wird hier bereits als Partition gesehen. Bei der Echtzeit-Co-Simulation von Produktionsanlagen wird dagegen die Partitionierung des Block-basierten Systemmodells in mehrere Teilmodelle zur Parallelisierung der Echtzeit-Berechnung notwendig. Die dabei erzeugten Partitionen bilden Teilmodelle über die Komponentengrenzen hinweg.

Zur Modellpartitionierung ist eine Partitionierungsstrategie erforderlich, die das Gesamtmodell in geeignete Teilmodelle aufteilt. Zur Erfüllung der Echtzeit-Anforderungen einer HiLS ist die Definition von Simulationsebenen erforderlich, die die erforderliche Zykluszeit und Echtzeiteigenschaften eingesetzter Modelle definieren (z. B. im Takt des Steuerungssystems oder in einem Vielfachen des Steuerungstakts). Ein Vielfaches des Steuerungstakts ist nur möglich, wenn nicht in jedem Steuerungstakt eine Simulationsantwort vorhanden sein muss. Zustandsmodelle für die Feldbuskommunikation von Antrieben können beispielsweise nicht ausgelagert werden, da das Steuerungssystem eine Rückmeldung der Simulation in jedem Steuerungstakt benötigt. Multi-Rate Methoden bieten in manchen Anwendungsfällen die Möglichkeit durch die Prädiktion der Koppelsignale, Modelle in einem Vielfachen des Steuerungstakts zu berechnen und trotzdem die verlustfreie Kommunikation mit dem Steuerungssystem herzustellen [3]. Für einen wirtschaftlichen Einsatz sind automatisierte Partitionierungsmechanismen erforderlich, um eine Erhöhung der Modellierungszeiten zu verhindern. Zur Automatisierung der Partitionierung müssen die Simulationsbibliotheken um Konfigurations- und Parametrierungsparameter für die Echtzeit-Co-Simulation erweitert werden.

In der Modellierungsumgebung muss für den Anwender ersichtlich sein, wie das Gesamtmodell auf die einzelnen Rechenkerne verteilt wird. Dabei müssen Anpassungen und Umkonfigurationen durch den Benutzer ermöglicht werden. Zusätzlich sind Mechanismen zur Überprüfung der Partitionierung durch den Anwender oder durch die automatische Modellpartitionierung notwendig.

3.5 Initialisierung, Echtzeit-Berechnung und Echtzeit-Synchronisation

Das Gesamtmodell wird basierend auf einer Partitionierungsstrategie in Partitionen aufgeteilt, um die Berechnung auf mehrere Rechenkern mit unterschiedlicher Taktung und Ausführungsplattform zu verteilen bzw. zu parallelisieren. Bei der Initialisierung werden die Koppelsignale aus dem Gesamtmodell automatisch abgeleitet und entsprechende Kommunikationskanäle zwischen den Rechenkernen automatisch konfiguriert. Auch über die Grenzen der Ausführungsplattformen (z. B. Windows, RTOS) muss eine performante Kommunikation ermöglicht werden. Zur Prädiktion von fehlenden Koppelsignalen zwischen Rechenkernen mit unterschiedlichster Taktung kann die Anwendung von Multi-Rate Methoden im schnelleren Rechenkern notwendig sein.

Im Rahmen der Echtzeitberechnung müssen die einzelnen Rechenkern entsprechend den Anforderungen einer HiLS synchronisiert werden. Die Anforderungen einer HiLS sind:

- die Aufrechterhaltung der verlustfreien und taktsynchronen Kommunikation mit den industriellen Steuerungssystemen
- die Gewährleistung des Zeitdeterminismus und der Reproduzierbarkeit von Simulationsläufen

Aufgrund der Parallelisierung und der Einbindung von Windows-Rechenkernen kann die vollständige zur Verfügung stehende Rechenleistung für die Echtzeitberechnung ausgenutzt werden. Durch die Verfügbarkeit Windows-basierter Rechenkern können auch technologiespezifische, Windows-basierte Simulationsbibliotheken in den Digitalen Zwilling integriert werden.

3.6 Integration technologiespezifischer Simulationslösungen

Die Kopplung von Simulationsmodellen aus verschiedenen Simulationsdisziplinen über Toolgrenzen hinweg ist seit langem ein Thema wissenschaftlicher Arbeiten. *Pritschow* sieht beispielsweise in [19] ein zentrales Problem in der Zusammenführung von Modellen aus verschiedenen Simulationsdisziplinen und formuliert zwei Handlungsfelder für zukünftige wissenschaftliche Untersuchungen:

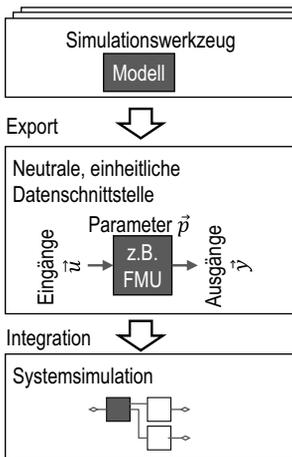
- Modelldaten werden über eine neutrale, einheitliche Datenschnittstelle mit einem einheitlichen Datenformat zur Beschreibung der Modelle verschiedener Disziplinen zu einer Systemsimulation zusammengeführt. Das Gesamtsystem wird dann in einem einzigen, integrierenden Simulationswerkzeug berechnet.

- Direkte Kopplung von Simulationswerkzeugen aus verschiedenen Simulationsdisziplinen zu einer Systemsimulation. Die Simulation läuft verteilt auf mehreren Simulationswerkzeugen.

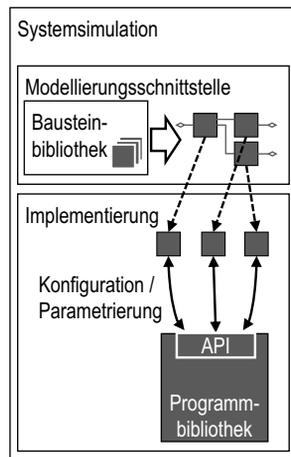
Im Kontext der Digitalen Fabrik sind in der Zwischenzeit technologiespezifische simulationsbasierte Lösungen entstanden. Zur umfassenden Simulation komplexer Prozesse müssen bestehende Lösungen in den Digitalen Zwilling integriert werden. Abb. 3.7 stellt drei grundlegende Ansätze für Blockschaltbilder zur Integration technologiespezifischer Simulationslösungen dar.

Black-Box-Integration abgeschlossener Modelle: Für die Integration von Simulationsmodellen, die in einem technologiespezifischen Simulationswerkzeug mit einem werkzeugabhängigen Modellierungsansatz modelliert wurden, wird mittels eines Modelaustauschstandards (z. B. FMI) die Modellintegration ermöglicht. Das Systemsimulationswerkzeug stellt eine Integrationschnittstelle über einen Black-Box Ansatz zur Verfügung.

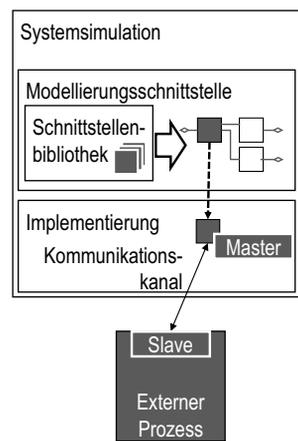
a) Black-Box Integration abgeschlossener Modelle



b) Bausteinbibliothek zur Modellierung und Konfiguration von Programmbibliotheken



c) Anbindung von eigenständigen Simulationslösungen (Tool-Kopplung)



FMU: Functional-MockupUnit
API: Application-Programming-Interface

Abb. 3.7 Grundlegende Ansätze für Blockschaltbilder zur Integration technologiespezifischer Simulationslösungen (a) Black-Box Integration abgeschlossener Modelle; (b) Bausteinbibliothek zur Modellierung und Konfiguration von Programmbibliotheken; (c) Anbindung von eigenständigen Simulationslösungen (Tool-Kopplung)

Bausteinbibliothek zur Modellierung und Konfiguration von Programmbibliotheken: Steht eine technologiespezifische Simulationslösung als konfigurierbare und parametrierbare Programmbibliothek (z. B. Physik-Engine) zur Verfügung, kann über die Anwendungsprogrammierschnittstelle (API) im Systemsimulationswerkzeug eine Bausteinbibliothek zur Modellierung und Konfiguration entwickelt werden.

Anbindung von eigenständigen Simulationslösungen (Tool-Kopplung): Zur Anbindung einer eigenständigen Simulationslösung als externer Prozess ist eine Kommunikationsschnittstelle erforderlich. Im Idealfall stellt das Systemsimulationswerkzeug den Kommunikations-Master dar, der die externe Simulation taktet und den Signalaustausch steuert.

3.7 Realisierung der Integrationsschnittstellen

Bei der Realisierung der Plattform zur Echtzeit-Co-Simulation wurden drei beispielhafte technologiespezifische Simulationslösungen anhand der zuvor eingeführten Integrations-schnittstellen in die Echtzeit-Co-Simulation integriert. Diese werden im Folgenden näher betrachten:

- *Black-Box-Integration abgeschlossener Modelle:* Integration eines abgeschlossenen Teilmodells in die Systemsimulation am Beispiel einer Functional Mock-up Unit (FMU).
- *Integration von Programmbibliotheken am Beispiel der Abbildung physikalischer Effekte:* Für die Integration hochauflösender physikalischer Effekte wurde eine Bausteinbibliothek zur benutzerfreundlichen Modellierung und Konfiguration der leistungsfähigen Funktionalitäten einer Physik-Engine (in diesem Fall mit AgX Dynamics und NVIDIA PhysX) erstellt.
- *Integration von Steuerungsalgorithmen:* Im Rahmen eines komplexen Szenarios kann die Anbindung mehrerer Steuerungen an den Digitalen Zwilling notwendig sein. Konzentriert sich die virtuelle Validierung auf ein einziges Steuerungssystem oder sind die industriellen Steuerungssysteme nur teilweise als reale Hardwarekomponenten verfügbar, bietet es sich an, einzelne Steuerungssysteme durch eine emulierte bzw. virtuelle Steuerung zu ersetzen. Am Beispiel einer virtuellen CNC wurde eine

Bausteinbibliothek erstellt, welche die Konfiguration und Einbindung der Programm-bibliothek „kernelv“ (die Simulations-DLL des ISG-kernels) in Verbindung mit der Echtzeitberechnung ermöglicht.

Anwendungsbeispiel „Functional Mock-Up Unit“

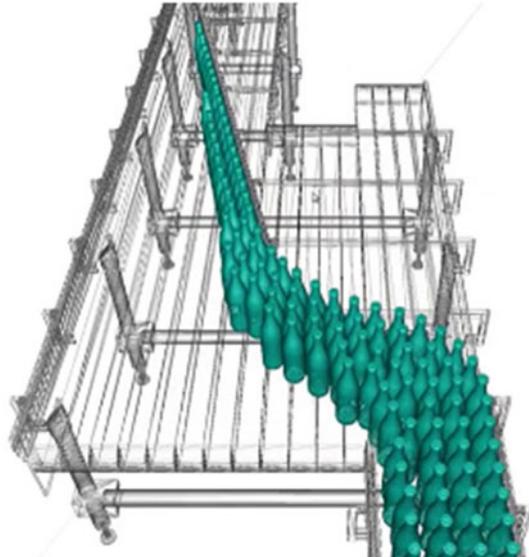
Zur hochauflösenden Abbildung spezifischer Effekte bietet sich die Integration abgeschlossener Modellen aus technologiespezifischen Simulationswerkzeugen in den Digitalen Zwilling an. FMI ist eine standardisierte Schnittstelle zum Austausch von Modellen über Tool-Grenzen hinweg. Mittlerweile wird FMI von einigen führenden Simulationswerkzeugen unterstützt (z. B. MATLAB/Simulink, MapleSim, Altair Activate). Zur Untersuchung der Anforderungen an eine FMU bei der Integration in die Echtzeitberechnung im Rahmen einer VIBN wurde eine FMI-Integrationschnittstelle in der Echtzeit-Co-Simulations Plattform realisiert.

Anwendungsbeispiel „kinetisches Prozessverhalten“

Abb. 3.8 und 3.9 zeigen zwei Anwendungsbeispiele, die eine hochauflösende Abbildung des dynamischen Materialflusses notwendig machen. Zum einen wurde der Materialfluss in der Getränketechnik am Beispiel eines Glide-Liners dargestellt. Für jeden Simulationsschritt werden die Kollisionen zwischen den einzelnen Materialien anhand der geometrischen Beschreibungen mit einem Windows-basierten Rechenkern (physikalische Simulation, Zykluszeit ~16 ms) erkannt und aufgelöst. Der Windows-basierte Rechenkern ist mit einem Rechenkern basierend auf RTOS verbunden (Antriebsmodelle, Kinematik

Abb. 3.8

Anwendungsbeispiel
„Glide-Liner“



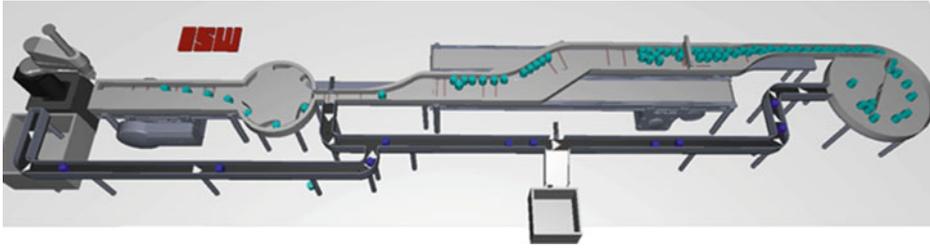


Abb. 3.9 Anwendungsbeispiel „Mehrskaliges Materialflussmodell am Beispiel der Verpackungstechnik“

etc., Zykluszeit~1 ms). Im zweiten Anwendungsfall wurde an einem Beispiel aus der Verpackungstechnik ein mehrskaliges Materialflussmodell integriert, bestehend aus einem physikalischen Windows-basierten Materialfluss (Zykluszeit~16 ms, Windows-basierte Physik-Engine) und einer kinematischen Rückführung im Takt des Steuerungssystems (Zykluszeit~1 ms).

Die Modellierung der physikalischen Effekte erfolgt auf Basis einer Bausteinbibliothek im Blockschaltbild des Digitalen Zwillings. Abb. 3.10 zeigt ein Blockschaltbild eines Materialflussmodells.

Anwendungsbeispiel „elastostatisches Prozessverhalten“

Bei der CNC-Bearbeitung mit Robotersystemen ist das Schlauchpaket zur Kabelführung oft massiven Kräften ausgesetzt. Um die Belastungen des Schlauchpakets abbilden zu können, müssen die Wechselwirkungen zwischen Prozess, Schlauchpaket, Robotersystem, Steuerung und Bediener in einer einzigen integrierenden Simulation dargestellt

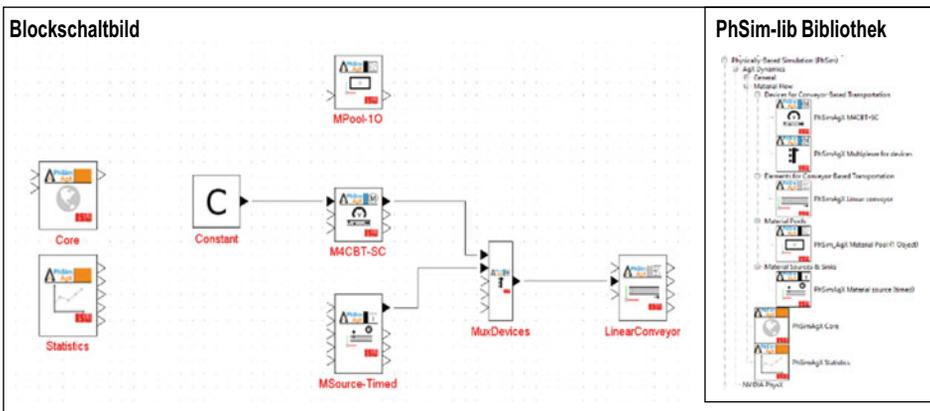


Abb. 3.10 Physik-Bibliothek für Materialflusssysteme

werden. Durch die Abbildung des flexiblen Verhaltens können Spannungen und Beschädigungen des Schlauchpakets aufgrund einer ungünstigen Bahnplanung simuliert und im Rahmen einer VIBN bereits simulativ erkannt werden. Im Rahmen der prototypischen Umsetzung der Echtzeit-Co-Simulation wurde eine Simulationsbibliothek erstellt, die das elastostatische Verhalten von Schlauchpaketen in der Echtzeitberechnung abbilden kann.

Anwendungsbeispiel „blockbasierte virtuelle CNC“

Im konkreten Anwendungsbeispiel wurden einzelne CNC-Steuerungssysteme durch emulierte bzw. virtuelle Steuerungen ersetzt. Die in Abb. 3.11 dargestellte virtuelle CNC-Bibliothek im Blockschaltbild modelliert und übernimmt die Konfigurationsdaten direkt aus dem Digitalen Zwilling. Beispielsweise sind kinematische Parameter im Digitalen Zwilling bereits bekannt und können für die Konfiguration der virtuellen CNC ohne weitere Benutzereingaben verwendet werden.

Ist keine reale Steuerung an die Simulation gekoppelt, liegt eine reine SiLS mit virtueller Zeitachse vor. Selbst sehr rechenaufwändige Simulationsmodelle können dabei in den Digitalen Zwilling integriert werden, da durch die virtuelle Zeitachse keine Echtzeitanforderungen an die Simulation gestellt werden. Sobald ein reales Steuerungssystem mit der Simulation gekoppelt wird bestimmt diese die Taktung des Simulators, wodurch Echtzeitanforderungen erfüllt werden müssen.

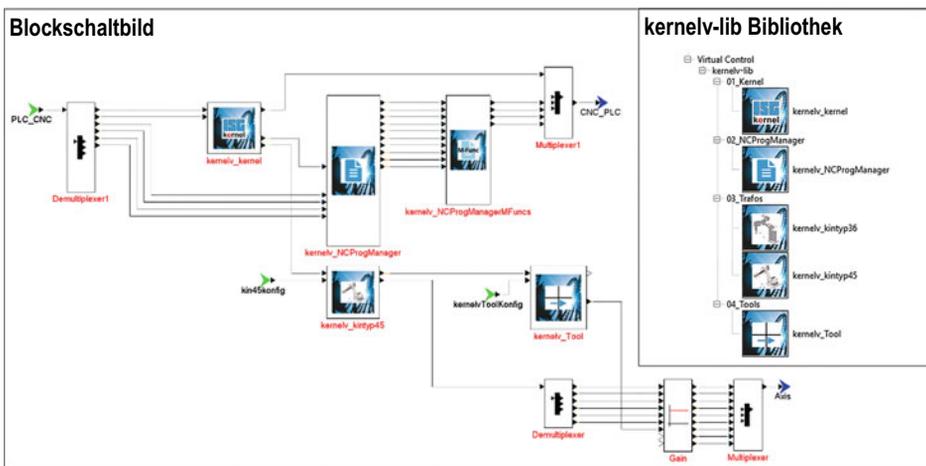


Abb. 3.11 Bausteinbibliothek einer virtuellen CNC zur Integration in den Digitalen Zwilling

3.8 Zusammenfassung und Ausblick

Das in diesem Beitrag vorgestellte Konzept einer Plattform zur Echtzeit-Co-Simulation ermöglicht die Steigerung der Aussagekraft Digitaler Zwillinge bei der virtuellen Planung und Auslegung von Produktionsanlagen im Rahmen einer VIBN. Durch Integrationschnittstellen können hochspezialisierte Simulationslösungen in die Systemsimulation integriert werden. Durch die Echtzeit-Co-Simulation und die damit verbundenen Ansätze zur Parallelisierung der Berechnungen kann die bei der Echtzeitberechnung zur Verfügung stehende Rechenkapazität massiv gesteigert werden. Ziel ist es, die Wechselwirkungen zwischen Prozess, Maschine, Steuerung und Bediener im Rahmen einer HiLS (Zykluszeiten ~ 1 ms) mit einer hohen Modelltiefe, Modellumfang und Modellbreite (vgl. Abb. 3.6) in einem einzigen integrierten Simulationsmodell der Produktionsanlage abzubilden.

Der Beitrag betrachtet neben der Vorstellung eines Konzepts für eine Plattform zur Echtzeit-Co-Simulation die Integration leistungsfähiger technologiespezifischer Simulationslösungen durch Integrationschnittstellen. Zukünftige Arbeiten fokussieren sich auf die wissenschaftliche Betrachtung von Partitionierungs-, Parallelisierungs-, Synchronisations- und Datenaustauschmechanismen.

Literatur

1. VDI 4499: Digitale Fabrik – Grundlagen (2008) <http://www.beuth.de>
2. VDMA: IT-Report Simulation + Visualisierung (2017) Einsatz von Simulationswerkzeugen, Einbindung in die Organisation und Entwicklungstendenzen. <http://www.vdma.org>
3. Scheifele C, Verl A (2016) Hardware-in-the-Loop simulation for machines based on a multi-rate approach. In: Proceedings of The 9th Eurosim Congress on Modeling and Simulation, EUROSIM, S 715–720
4. Wünsch G (2007) Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme. TU München, Dissertation
5. Pritschow G, Röck S (2004) “Hardware in the Loop” simulation of machine tools. CIRP Annals 53(1):295–298
6. Zäh M, Schack R, Carnevale M, Müller S (2005) Ansatz zur Projektierung der Digitalen Fabrik. ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 5:286–290
7. Mewes J (2005) Virtuelle Inbetriebnahme mit realen Automatisierungssystemen und virtuellen Maschinen. Deutsch-Niederländische Automatisierungstage
8. Hoher S (2017) Ein gekoppeltes Materialflussmodell zur durchgängigen Entwicklungsunterstützung von Materialflusssteuerungen. Universität Stuttgart, Dissertation
9. Scheifele C, Riedel O, Verl A (2017) Virtuelle Inbetriebnahme komplexer Produktionsanlagen mittels echtzeitfähiger Co-Simulation. In: AUTOMATION 2017: 18. Leitkongress der Mess- und Automatisierungstechnik, S 45–46
10. Scheifele C, Verl A (2017) Von der Virtuellen Maschine zur Virtuellen Produktion mit Ansätzen der Echtzeit-Co-Simulation. In: Industrie 4.0. Vision und Realität. Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 2, Fertigungstechnik. 696:81–90
11. Sekler P (2012) Modellbasierte Berechnung der Systemeigenschaften von Maschinenstrukturen auf der Steuerung. Universität Stuttgart, Dissertation

12. Dronka S (2004) Die Simulation gekoppelter Mehrkörper- und Hydraulik-Modelle mit Erweiterung für Echtzeitsimulation. TU Dresden, Dissertation
13. Günther F (2017) Beitrag zur Co-Simulation in der Gesamtsystementwicklung des Kraftfahrzeugs. TU München, Dissertation
14. Gomes C, Thule C, Broman D, Larsen P, Vangheluwe H (2018) Co-Simulation: A survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 51(3) Article No. 49:1–33
15. Benedikt M, Watzenig D, Hofer A (2013) Modelling and analysis of the non-iterative coupling process for co-simulation. *Math Comput Model Dyn Syst* 19(5):451–70
16. Gear C, Wells D (1984) Multirate linear multistep methods. *BIT Numerical Mathematics*, S 484–502
17. Blochwitz T, Otter M, Akesson J. et al (2012) Functional mockup interface 2.0: The standard for tool independent exchange of simulation models. In: *Proceedings of the 9th International MODELICA Conference*, S 173–184
18. Gipser M (1999) *Systemdynamik und Simulation*. Vieweg+Teuber Verlag
19. Pirtschow G, Berkemer T, Bürger T, Croon N, Korajda B, Röck S (2003) Die simulierte Werkzeugmaschine. In: *Fertigungstechnisches Kolloquium. FtK, Stuttgart*, S 219–246

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





ISG-virtuos – der Digitale Zwilling für die Praxis

4

Christian Scheifele, Dieter Scheifele, Ulrich Eger, Christian Daniel,
Edmund Buchal und Sascha Röck

Zusammenfassung

Das in verschiedenen Forschungsarbeiten am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW, Universität Stuttgart) entwickelte Konzept einer Softwarelösung zur Hardware-in-the-Loop Simulation für die Virtuelle Inbetriebnahme von industriellen Steuerungssystemen stellt die wissenschaftliche Grundlage für das kommerzielle Simulationswerkzeug ISG-virtuos der Firma ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH dar. Dieser Beitrag stellt die Simulationsplattform ISG-virtuos und deren praktische Anwendung im Maschinen- und Anlagenbau vor. ISG-virtuos deckt die Erstellung und den Einsatz von Simulationsmodellen entlang des gesamten Lebenszyklus einer Automatisierungslösung vom digitalen Engineering über die Virtuelle Inbetriebnahme bis in den Vertrieb und in die Betriebsphase, beispielsweise zur Schulung und Qualifizierung des Betreiberpersonals, für die Produktionsoptimierung, für innovative Service-Anwendungen oder das Retrofit, ab. Der Funktionsumfang dieser Simulationsplattform resultiert aus Anforderungen, die aus der Schlüsseldisziplin der Automatisierung von Maschinen und Anlagen – der Steuerungsentwicklung – kommen.

C. Scheifele (✉) · D. Scheifele · U. Eger · C. Daniel · E. Buchal
ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH, Stuttgart, Deutschland
E-Mail: christian.scheifele@isg-stuttgart.de

S. Röck
Virtual Automation Lab, Hochschule Esslingen, Esslingen, Deutschland

4.1 Digitale Zwillinge für den Steuerungstest

Von zentraler Bedeutung für den Maschinen- und Anlagenbau ist die Methode der Virtuellen Inbetriebnahme (VIBN), welche in den letzten Jahren vermehrt zur Anwendung kommt [1]. Die VIBN bezeichnet „den der realen Inbetriebnahme (IBN) vorgelagerten Gesamttest des Automatisierungssystems mithilfe eines Simulationsmodells der Anlage“ [2]. In einer vom VDMA im Jahr 2017 durchgeführten Studie sehen 57 % der befragten Maschinen- und Anlagenbauer zukünftig eine steigende bis stark steigende Nachfrage nach Lösungen zur VIBN im Entwicklungsprozess neuer Produktionsanlagen [3]. Die VIBN unterscheidet zwischen drei Konfigurationen, welche sich „in der Repräsentation der Steuerung sowie in der Implementierungsform des Steuerungscode“ [2] unterscheiden:

- Die Model-in-the-Loop Simulation (MiLS) für den Test von modellierten Steuerungsfunktionen,
- die Software-in-the-Loop Simulation (SiLS) für den Test einer virtuellen Steuerung (rein softwarebasiert) und
- die Hardware-in-the-Loop Simulation (HiLS) für den Test einer realen Steuerung (inkl. Hardware und Feldbus).

Während MiLS und SiLS im frühen Entwicklungsprozess zum Einsatz kommen, ermöglicht die HiLS am Ende des Entwicklungsprozesses die Durchführung einer realitätsnahen IBN des industriellen Steuerungssystems [4]. Dabei wird das reale Steuerungssystem über die reale Kommunikationsperipherie ohne Anpassungen am Steuerungsprogramm oder der Steuerungskonfiguration mit einem digitalen Modell (Simulationsmodell) der Produktionsanlage zu einem Digitalen Zwilling gekoppelt. Für den Test und die Optimierung der eingesetzten Steuerungstechnik (Steuerungskonfiguration, -logik und -algorithmen) bildet der Digitale Zwilling das logische Feldbusverhalten ab, damit die eingesetzte Steuerungstechnik keinen Unterschied zwischen dem echten Verhalten einer Produktionsanlage und dem Verhalten seines Digitalen Zwillings am digitalen Feldbus erkennt. Abb. 4.1 stellt die MiLS, SiLS und HiLS mit ISG-virtuos dar.

Praxiserfahrungen im Maschinen- und Anlagenbau bestätigen, dass Digitale Zwillinge, eingesetzt in MiLS, SiLS und HiLS, die Entwicklungsprozesse und Inbetriebnahmen optimieren [4]. Bei einer VIBN wird im Wesentlichen die Steuerungssoftware samt ihren logischen Abläufen und den bewegungserzeugenden Funktionen an digitalen Modellen einer Maschine bzw. einer komplexen Produktionsanlage getestet und somit die reale Inbetriebnahme an der Anlage vorbereitet und abgesichert. Das Modell der Anlage wird zur Verkürzung der Modellierungszeiten aus Komponenten- oder Baugruppen-Modellbibliotheken manuell oder über Ansätze der automatischen Modellgenerierung aufgebaut. Die Modelle bilden ihre realen Ebenbilder in den für die Steuerungstechnik

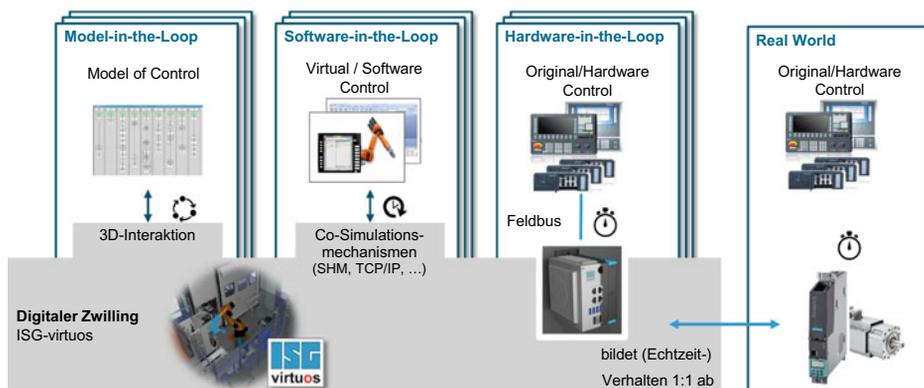


Abb. 4.1 MiLS, SiLS und HiLS mit ISG-virtuos

notwendigen Aspekten 1:1 ab – von den Parametern bis hin zu dem Komponentenverhalten an ihren Schnittstellen. Diese realitätsnahe Abbildung ermöglicht die Kopplung eines unveränderten realen Steuerungssystems mit einer virtuellen Produktionsanlage im Rahmen einer HiLS.

Das in [5] vorgestellte und im Rahmen verschiedener Forschungsarbeiten am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW, Universität Stuttgart) entwickelte Konzept einer Softwarelösung zur HiLS mit realen Steuerungssystemen stellt die wissenschaftliche Grundlage für das kommerzielle Simulationswerkzeug ISG-virtuos [6] der Firma ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH dar. Auf der Grundlage dieser wissenschaftlichen Vorarbeiten wurde eine innovative Simulationslösung entwickelt, welche den eingehenden Test von Steuerungsapplikationen, insbesondere für den entscheidenden Systemtest, in HiLS ermöglicht. Die Idee, Steuerungsalgorithmen mithilfe einer virtuellen Maschine bzw. Anlage zu testen, wurde zunächst nur für den internen Gebrauch im Entwicklungsprozess von ISG-kernel, einer Softwarelösung zur Steuerung von Maschinen und Anlagen in den Bereichen CNC, Robotik und Motion Control, eingesetzt. Seit 2005 wird ISG-virtuos als Softwarelösung für die Virtuelle Inbetriebnahme von Maschinen und Anlagen kommerziell angeboten. In partnerschaftlicher Zusammenarbeit mit Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus aus unterschiedlichsten Branchen wurde seitdem der Funktionsumfang von ISG-virtuos stetig ausgebaut.

Zu den wichtigsten Anforderungen bei der Entwicklung von ISG-virtuos gehörte die Realisierung der nachfolgenden Aspekte, deren Notwendigkeit sich aus der Echtzeit-Kopplung mit realen Steuerungssystemen über digitale Feldbussysteme in Form einer HiLS ergeben:

- **Echtzeitfähigkeit im Steuerungstakt**

Der Simulator muss bei der Kopplung mit Steuerungs- und Regelungsalgorithmen über den Feldbus takt synchron auf die eingehenden Steuerungssignale reagieren. Dies erfordert Echtzeitfähigkeit im Steuerungstakt, was bspw. bei der Kopplung mit einer NC-Steuerung mit Steuerungstaktzeiten von wenigen Millisekunden sehr hohe Anforderungen an den Simulator stellt.

- **Reproduzierbarkeit**

Die Simulationsergebnisse müssen nachweislich „auf den Takt genau“ reproduzierbar sein, um Fehlerfälle wiederholt nachzustellen.

- **Modularität/Wiederverwendbarkeit**

Zur Reduzierung des Modellierungsaufwands bei der Entwicklung eines Digitalen Zwillings muss durch Modularität des Simulationsmodells die Möglichkeit zur Wiederverwendung geschaffen werden. Die hohen Qualitätsansprüche an (Teil-)Modelle kann nur gewährleistet werden, wenn das Simulationsmodell in wiederverwendbare Module unterteilt und diese eingehenden Tests (Unit-Test) unterzogen werden können.

- **Offenheit/Erweiterbarkeit**

Der Einsatz einer Entwicklungsplattform für Digitale Zwillinge von diversen Automatisierungslösungen erfordert, dass die Softwarearchitektur über offene standardisierte Schnittstellen verfügt und damit eine einfache Erweiterbarkeit unterstützt.

- **Abbildbarkeit der Feldbuskopplung**

Für den Integrationstest der Steuerungssoftware müssen die eingesetzten Aktoren und Sensoren einer Produktionsanlage vollständig abgebildet werden. Neben Tests hinsichtlich der Erfüllung der funktionalen Anforderungen umfasst dies auch das Laufzeitverhalten der Feldbussysteme als Schnittstelle zwischen Steuerung und den Maschinen- bzw. Anlagenkomponenten.

- **Abbildbarkeit des Maschinen- und Anlagenverhaltens**

Der Systemtest eines komplexen Steuerungssystems kann nur unter Berücksichtigung des für die Steuerung relevanten Anlagenverhaltens vorgenommen werden. Dies erfordert eine hohe Modellierungsbandbreite, da je nach Anwendung sowohl logisches, kinematisches als auch dynamisches Verhalten relevant sein kann.

Erste Anwendungen von ISG-virtuos ab dem Jahr 2005 adressierten die Modellierung und Echtzeitsimulation von virtuellen Maschinen für den NC-Steuerungstest. Die Besonderheit von ISG-virtuos war die Berechnung des Simulationsmodells im Kommunikationstakt des Feld- und Antriebsbusses (bei NC-Steuerungen ≤ 1 ms), um die Steuerung ohne Anpassung anhand der virtuellen Maschine testen zu können.



Abb. 4.2 ISG-virtuos Simulationsarbeitsplatz

Der steigenden Nachfrage im Bereich der Digitalen Fabrik sowie den Erwartungen an das virtuelle Engineering im Maschinen- und Anlagenbau konnte nur mit einer innovativen Softwarelösung und einer offenen Softwarearchitektur begegnet werden. Diese ermöglichte die Weiterentwicklung von ISG-virtuos zu einer Simulationsplattform für ein breites Spektrum von Produktionsmaschinen und – anlagen sowie den durchgängigen Einsatz in allen Phasen des Herstellungsprozesses.

Abb. 4.2 zeigt einen ISG-virtuos Simulationsarbeitsplatz nach heutigem Stand der Technik. Ein handelsüblicher Windows Engineering-PC wird zur Modellbildung und 3D-Visualisierung verwendet. Auf dem ISG-virtuos Realtime Target wird das Simulationsmodell unter Echtzeit-Bedingungen simuliert und über den digitalen Feldbus mit einem realen Steuerungssystem zur HiLS angebunden.

4.2 Technologische Weiterentwicklung der Simulationsplattform

Die Architektur eines Simulators zur HiLS mit industriellen Steuerungssystemen geht zurück auf die wissenschaftlichen Arbeiten nach [5, 7]. In enger Zusammenarbeit mit Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus als Technologiepartner und dem ISW als Forschungspartner konnte der Funktionsumfang von ISG-virtuos in den vergangenen Jahren kontinuierlich weiterentwickelt werden. Abgeleitet aus Anforderungen aus dem praktischen Einsatz der Plattform im Maschinen- und Anlagenbau entstanden zahlreiche technologische Weiterentwicklungen. Nachfolgend soll auf eine Auswahl der wichtigsten Innovationen eingegangen werden.

Echtzeitsimulation von Produktionslinien mit Materialfluss [8]: Während die Virtuelle Inbetriebnahme mit ISG-virtuos anfänglich vorwiegend nur zum Test eines Steuerungssystems zur Anwendung kam, stellte sich schnell die Frage der Erweiterbarkeit und des Nutzens für ganze Produktionslinien oder Fabriken. Neben der Anwendung von ISG-virtuos im Bereich der NC-gesteuerten Maschinen, konnte mit der Entwicklung der Echtzeit-Materialflussbibliothek „MFPhys“ die Möglichkeit geschaffen werden, umfangreiche Materialflussszenarien zu simulieren (siehe Abb. 4.3). Die Echtzeitsimulation von Materialflüssen bei der HiLS stellt hohe Anforderungen an die eingesetzten Algorithmen und numerischen Methoden. Als wissenschaftliche Grundlage für die Entwicklung der Echtzeit-Materialflussbibliothek „MFPhys“ wird in [8] die Integration eines physikbasierten Materialflussmodells in die Echtzeit-Simulationstask vorgestellt und zur Verbesserung der Recheneffizienz die Reduzierung von Freiheitsgraden z. B. durch teilweise geführte Bewegungen und die Verwendung von primitiven Kollisionskörpern für die Kollisionsberechnung vorgeschlagen.

Automatisierte Modellerstellung [9]: Die Modularisierung und Wiederverwendung von (Teil-)Modellen in Simulationsprojekten wurde mit einer technologischen Lösung zur automatischen Modellgenerierung weitergeführt. Aufbauend auf der modularen und skalierbaren Architektur der Modellbibliotheken wurde ein Konzept für die automatisierte Modellerstellung entwickelt. Durch konsequente Anwendung des Baukastenprinzips können virtuelle Fabriken aus einzelnen Anlagenbereichen inklusive der Anbindung an übergeordnete Leitsysteme automatisiert konfiguriert werden. Beispielsweise konnte das in Abb. 4.4 dargestellte Anlagenmodell nach der Erstellung eines Baugruppen-Baukastens

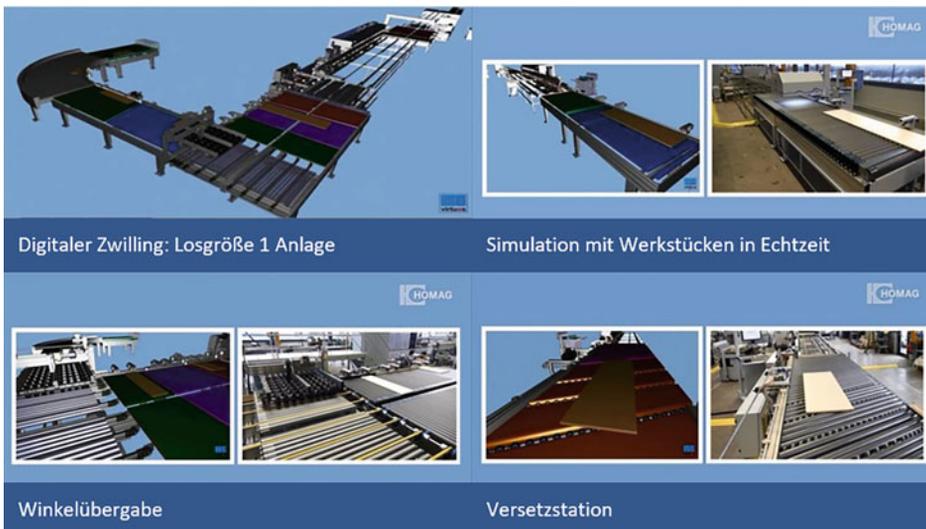


Abb. 4.3 Applikationsbeispiel einer Materialflusssimulation (Quelle: HOMAG Group)

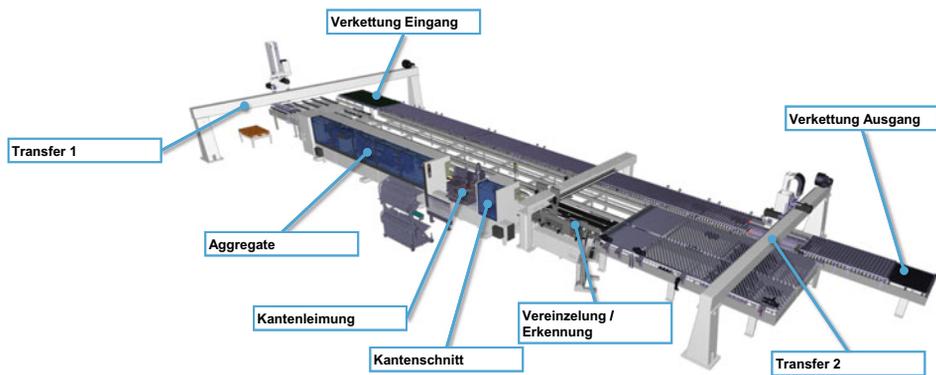


Abb. 4.4 Applikationsbeispiele zur automatisierten Modellgenerierung

innerhalb von wenigen Minuten automatisiert erzeugt werden. Dabei wurden 246 Baugruppen in 53 Funktionsbaugruppen erstellt, 3242 E/A für die Kopplung über mehrere Feldbussysteme erzeugt, 143 Querverbindungen abgebildet und die HiLS mit zwei verschiedenen Steuerungssystemen ermöglicht. Grundlage dieser Technologie ist ein komponentenbasierter Aufbau des Modells mit ISG-virtuos.

Hybride Simulationsszenarien mittels Co-Simulation [10]: Bei der Virtuellen Inbetriebnahme von großen Anlagen kommen in der Praxis hybride Simulationsszenarien durch die Kombination einer HiLS und SiLS zum Einsatz, wodurch komplexe Co-Simulationsszenarien entstehen. Ein Beispiel hierfür zeigt Abb. 4.5. Dabei werden mehrere reale SPS (hier S. 7, Fa. Siemens) über das reale Feldbussystem (hier Profinet) an eine HiLS angeschlossen, um einen Teil des Systems inklusive der funktionalen Sicherheit (safety) sowie der Anbindung an übergeordnete Leitsysteme anhand echter Produktionsdaten testen zu können. Ein weiterer Teil des Systems, hier bestehend aus mehreren Robotersystemen, kann über virtuelle Steuerungen (hier KUKA OfficeLite) in Form einer SiLS in das Simulationsszenario eingebunden werden.

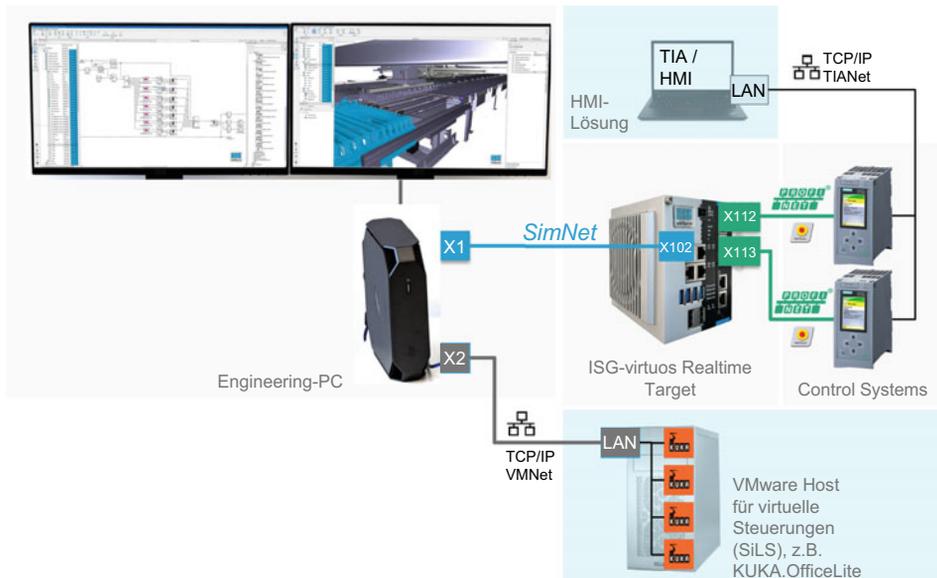


Abb. 4.5 Hybride Simulationsszenarien (HiLS- und SiLS) mittels Co-Simulation

Multi-Core Simulation mittels Echtzeit-Co-Simulation [10]: Für eine umfassende virtuelle Absicherung und Auslegung großer Produktionsanlagen im Rahmen einer virtuellen Inbetriebnahme muss die zur Modellberechnung nutzbare Rechenleistung erweitert werden. In [10] wird ein Ansatz zur Echtzeit-Co-Simulation für die Hardware-in-the-Loop Simulation vorgestellt. Dieser Ansatz ermöglicht eine parallelisierte Echtzeitberechnung in einer Co-Simulationsarchitektur. Dabei wird die Echtzeit-Berechnung auf mehrere Simulationstasks unter Berücksichtigung der Einbindung industrieller Steuerungssysteme für eine Virtuelle Inbetriebnahme aufgeteilt (Abb. 4.6). Neben der Aufteilung des Gesamtmodells auf die einzelnen Simulationstasks über Partitionierungsmechanismen, werden zur Echtzeit-Simulation sowohl Kopplungs- als auch Synchronisierungsmechanismen benötigt. Der Kopplungsmechanismus realisiert den Datenaustausch zwischen den einzelnen Simulationstasks. Für den Datenaustausch zwischen den Simulationstasks wird ein Synchronisationsmechanismus notwendig, um eine taktgenaue Reproduzierbarkeit von Simulationsläufen zu gewährleisten.

Testautomatisierung [11]: Durch die fortschreitende Digitalisierung von Fertigung und Produktion steigen Umfang und Komplexität sowohl der Steuerungssoftware als auch der für eine Virtuelle Inbetriebnahme eingesetzten Simulationsmodelle stetig an. Der daraus resultierende zunehmend höhere Aufwand für die bisher noch ausschließlich manuell durchgeführten Softwaretests lässt sich heute nicht mehr wirtschaftlich

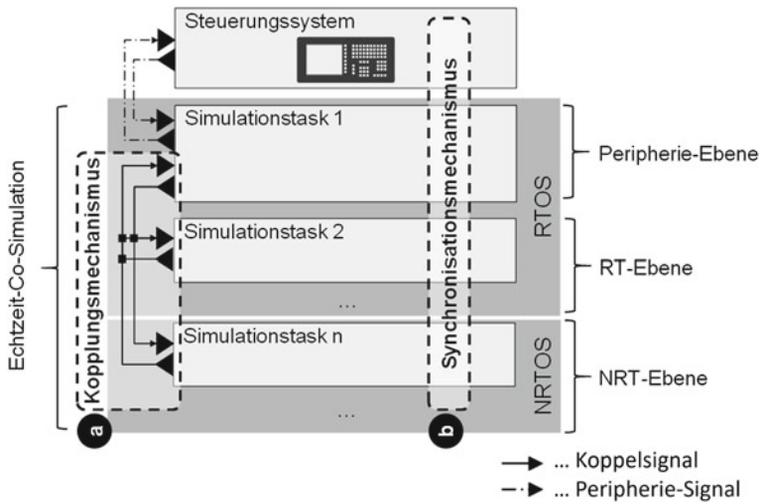


Abb. 4.6 Echtzeit-Co-Simulationsarchitektur

darstellen. Beim automatisierten Test von Simulationsmodellen können einzelne Modellteile (Komponenten- und Baugruppenmodelle) oder auch vollständige Maschinen- und Anlagenmodelle automatisiert, qualitativ abgesichert und hinsichtlich unterschiedlichster Kriterien überprüft werden. Beim automatisierten Test der Steuerungssoftware wird das Verhalten sowohl in normalen als auch in den üblicherweise in sehr viel größerer Anzahl auftretenden irregulären Betriebsfällen getestet. In [11] wird das Testautomatisierungswerkzeug ISG-dirigent vorgestellt, welches die Tests am Digitalen Zwilling mit ISG-virtuos automatisiert.

Online-Plattform für Digitale Modelle [12]: Zunehmend suchen Komponentenhersteller nach Lösungen zur Bereitstellung von digitalen Modellen ihrer realen Komponenten mit dem Ziel, dass deren Kunden neue Automatisierungskonzepte schnell und möglichst vollständig virtuell validieren und Steuerungssysteme im Entwicklungsprozess anhand einer Virtuellen Inbetriebnahme eingehend testen und optimieren können. Dabei spielt die Verfügbarkeit von Komponentenmodellen verschiedener Hersteller eine entscheidende Rolle. Dies kann mithilfe einer digitalen Modellaustauschplattform für Komponenten- und Anlagenlieferanten sowie Anlagenbetreiber erzielt werden. Die über das Internet zugängliche Online-Plattform „TwinStore“ ermöglicht die Bereitstellung und den Austausch von Simulationsmodellen zur Virtuellen Inbetriebnahme. TwinStore bildet damit eine digitale Wertschöpfungskette zwischen Komponentenherstellern, Systemlieferanten (Maschinen- und Anlagenbauer) sowie Betreibern der Anlagen.

Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation [13, 14]: In dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Forschungsprojekt „Hybrides Interaktionskonzept für



Abb. 4.7 VIBN mittels Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation (Projekt MRiLS)

Schulungen mittels Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation (MRiLS)“ wird von einem Konsortium aus wissenschaftlichen und industriellen Partnern die Erweiterung der VIBN um moderne Visualisierungs- und Interaktionsmethoden der Mixed Reality für die Schulung technischer Fachkräfte im Maschinen- und Anlagenbau erforscht. Statt der bislang bei der VIBN eingesetzten exozentrischen (benutzerunabhängigen) auf einen 2D-Monitor projizierten Visualisierung kommt bei der MRiLS mittels Mixed Reality-Brille eine egozentrische (benutzerabhängige) Visualisierung sowie eine intuitive und multimodale Interaktion zwischen Mensch und Digitalem Zwilling zum Einsatz. Dazu wurde ISG-virtuos mit einer von der Hochschule Esslingen im Virtual Automation Lab (VAL) entwickelten Digital Twin as a Service Plattform gekoppelt. Diese Plattform ermöglicht eine standortunabhängige Visualisierung und Interaktion mit der virtuellen Szene. Die dadurch realisierte MRiLS integriert sowohl den Menschen und dessen Verhalten als auch die reale Umgebung vollständig in den Simulationskreislauf (Abb. 4.7).

4.3 Einführung der Virtuellen Inbetriebnahme im Unternehmen

Neben der technologischen Weiterentwicklung von ISG-virtuos wurden in den vergangenen Jahren Anwendungsszenarien für eine wirtschaftliche Einführung der Virtuellen Inbetriebnahme in einen digitalen Engineeringprozess im Maschinen- und Anlagenbau entwickelt. Aus Nutzersicht ergaben sich folgende Anwendungsszenarien für den Digitalen Zwilling:

- Test der Steuerungsapplikation ohne die Notwendigkeit einer testbedingten Änderung der Steuerung oder des Steuerungsprogramms in Analogie zu den Tests an einer realen Maschine bzw. Anlage,

- Test des Gesamtsystems unter Berücksichtigung aller an der Automatisierungslösung beteiligten Komponenten und der echten Produktionsdaten/Leitsysteme im Sinne eines Systemtests. Hierbei wird die kostenintensive Vorabinbetriebnahme in Produktionshallen des Anlagenherstellers durch die VIBN bei gleicher oder teilweise sogar besserer Testtiefe abgelöst,
- Test von irregulären Szenarien, wie die Reaktion der Steuerung auf Fehlersituationen, sowie der funktionalen Sicherheit (safety),
- Nutzung des Simulationssystems während des Produktionshochlaufs und begleitend während der Produktion zur Überwachung und Optimierung,
- Nutzung als Schulungssystem für die Fortbildung und Qualifizierung des Personals beim Betreiber ohne Kosten und Risiken, die aus der Verwendung einer realen Anlage resultieren würden,
- Nutzung des Simulationssystems für innovative Servicekonzepte parallel zur Betriebsphase.

Die o. g. Anwendungsszenarien zeigen, dass die erforderliche Simulationsplattform hohe Anforderungen hinsichtlich der realistischen Abbildung des Anlagenverhaltens an der Schnittstelle zwischen Anlage und Steuerung erfüllen muss.

Die meisten Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus nutzen zunächst die VIBN als Werkzeug, um die operativen Kosten der realen Inbetriebnahme zu reduzieren. Hierzu zählen im Wesentlichen Personal-, Material- und Transportkosten. Betrachtet man jedoch weitere von der Inbetriebnahme abhängige Kostenpositionen, wird deutlich, dass spät erkannte Fehler bei der Inbetriebnahme auch Gemeinkosten verursachen, die durch Kulanz, Gewährleistungen, Vertragsstrafen usw. zustande kommen können. Neben den unmittelbaren kurzfristig Kosteneinsparungen ergeben sich zudem weitere wertschöpfende Potentiale im Betrieb einer Anlage wie bspw. die Einsparung von Stillstands- und Umrüstkosten sowie die Möglichkeit Schulungen und innovative Serviceangebote auf Basis des Digitalen Zwillings anbieten zu können. Die praktischen Erfahrungen bei der Einführung der VIBN in zahlreichen Unternehmen sind u. a. im Leitfaden „Virtuelle Inbetriebnahme“ des VDMA als Handlungsempfehlungen zum wirtschaftlichen Einstieg aufgenommen worden [15].

Abb. 4.8 zeigt den Einsatz eines Digitalen Zwillings über den Lebenszyklus einer Automatisierungslösung.

Unter Verwendung originaler Engineeringdaten können mithilfe des Digitalen Zwillings bereits im frühen Entwicklungsstadium Automatisierungslösungen entworfen, überprüft und optimiert werden. Bereits vorhandene CAD-Daten und Elektrokonfigurationen können direkt in ISG-virtuos importiert werden. Um einen möglichst effizienten Nutzen zu erzielen, ist der Einsatz des Simulationswerkzeugs bereits in einer sehr frühen Phase der Entwicklung empfehlenswert, da frühzeitig alternative Konzepte unter Beteiligung der mechanischen Konstruktion, der Elektrokonstruktion und der Softwareentwicklung im Sinne der mechatronischen Systementwicklung untersucht und die optimale Lösung für

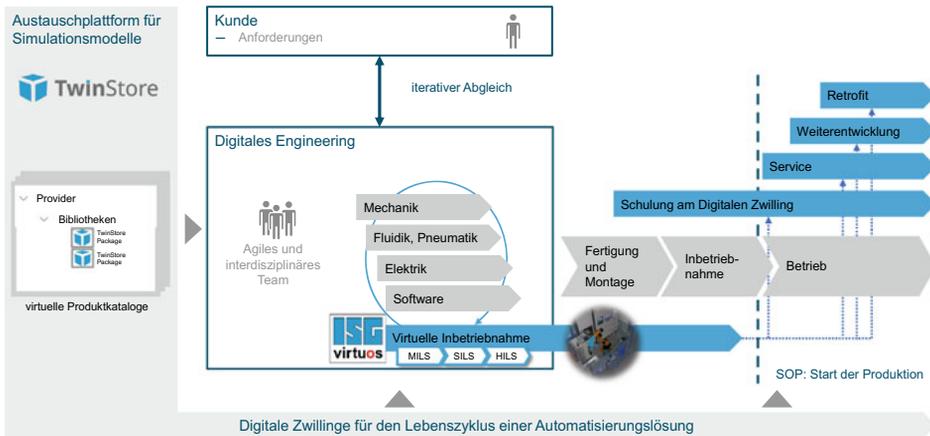


Abb. 4.8 Einsatz Digitaler Zwillinge über den Lebenszyklus einer Automatisierungslösung

die Kundenanforderung hinsichtlich Funktionalität und Performance entwickelt werden kann.

Durch die Etablierung der Virtuellen Inbetriebnahme und die Verwendung von Digitalen Zwillingen im Unternehmen kann ein messbarer Nutzen generiert werden. Zu den qualitativen Nutzen gehören Verkürzung des „time to market“ und „time to produce“ resp. SOP, Imagesteigerung aufgrund der hohen Qualität der Anlagen sowie neue Geschäftsmodelle wie Dienstleistungen im After Sales. In der nachfolgenden Aufzählung werden die Nutzenpotentiale für Systemlieferanten zusammengefasst (nach [15]).

- Verkürzung der Projekt-Durchlaufzeit (Zeit)
 - Effiziente und parallelisierte Engineeringprozesse (Simultaneous Engineering)
 - Frühzeitige Erprobung der Steuerungssoftware
 - Vermeidung des Aufbaus kompletter Anlagenteile zur Vorabnahme
 - Verkürzung der realen Inbetriebnahme und der Anlaufphase
- Steigerung der Produktqualität (Qualität)
 - Höhere Softwarereife durch gesteigerte Testabdeckung
 - Evaluation der Kommunikation zwischen Steuerung und Hardwarekomponenten
 - Vermeidung von fehlenden Komponenten oder fehlender Software
 - Virtuelle Tests kritischer und riskanter Anlagenzustände
 - Vermeidung von Unfall- und Gefahrensituationen für Personen
 - Optimierung von Steuer- und Regelstrategien in frühen Engineeringphasen
- Höhere Effizienz in der Projektabwicklung (Kosten)
 - Vermeidung von nachträglichen Änderungen im Engineering
 - Reduzierung von Hardwarekosten und Aufbauarbeiten für Testzwecke
 - Automatisierte Testausführungen

- Reduzierte Reisekosten für die Inbetriebnahme
- Vermeidung von Vertragsstrafen
- Verbessertes Maschinen- und Prozessabbild (Transparenz)
 - Höhere Transparenz der Anlagen (-funktionalität) für Engineering und Management
 - Testläufe mittels Simulation, Reproduzierbarkeit von Testszenarien
 - Abstimmung und Anpassung mit Betreiber im Engineering
- Kurzzyklische Regelkreise (Reaktionsfähigkeit)
 - Frühzeitiges Feedback
 - Interdisziplinäre Projektteams und kurzzyklische Meilensteine zur Synchronisierung
 - Dezentrale, virtuelle Durchführung von Inbetriebnahmeprozessen

4.4 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurden die Innovationsschritte bei der Entwicklung von ISG-virtuos von einem Simulationswerkzeug für die Steuerungsentwicklung hin zu einer umfassenden Entwicklungsplattform zum Aufbau von Digitalen Zwillingen für alle entscheidenden Phasen des Engineerings im Maschinen- und Anlagenbau beleuchtet. Es wurden die maßgebenden Anforderungen an die Simulationsplattform aufgezeigt und daraus die erforderlichen Technologien und Funktionen abgeleitet sowie Weiterentwicklungen beschrieben. Neben den technologischen Aspekten wurde auch die Einführung der Virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) in Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus auf Basis dieser Simulationsplattform anhand praktischer Erfahrungen dargestellt. Die VIBN ist heute in führenden Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus entweder bereits etabliert oder als Teil der digitalen Wertschöpfung strategisch geplant. Sie kann als Keimzelle für die Einführung und Umsetzung von Digitalen Zwillingen in Maschinenbau-Unternehmen dienen und hat das Potenzial auf alle Phasen der Wertschöpfung ausgerollt zu werden. In enger Kooperation mit Forschungseinrichtungen werden fortlaufend die zukünftigen Technologieentwicklungen untersucht und in die Weiterentwicklung der Simulationsplattform einfließen.

Literatur

1. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA) (2018) Wege zum Digitalen Zwilling: Simulation und Visualisierung im Produktlebenszyklus; Anwendungs- und Nutzenbeispiele aus dem Maschinen- und Anlagenbau: VDMA Verlag. <https://www.vdmashop.de/executive-briefings/unternehmensfuehrung/310/wege-zum-digitalen-zwilling?number=Doc.webview.122590>. Zugegriffen: 12. Jan 2019
2. Verein Deutscher Ingenieure (2015) Virtuelle Inbetriebnahme – Modellarten und Glossar. Beuth, Berlin
3. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA), 2017. IT-Report Simulation + Visualisierung 2017: Einsatz von Simulationswerkzeugen, Einbindung in die Organisation

- und Entwicklungstendenzen. <https://www.vdma.org/viewer/-/v2article/render/1103493>. Zugegriffen: 12. Jan 2019
4. Daniel C (2020) Ganze Fabriken simulieren. AUTOCAD & Investor Magazin 5:2020. WIN-Verlag GmbH & Co. KG
 5. Röck S (2007) Echtzeitsimulation von Produktionsanlagen mit realen Steuerungssystemen, Dissertation. Jost-Jetter Verlag, Heimsheim
 6. Scheifele D, Eger U, Röck S, Sekler P (2007) Potentiale der Hardware-in-the-Loop Simulation für Maschinen und Anlagen. In: Verl A, Bender K (Hrsg) Elektrische Automatisierung – Systeme und Komponenten: SPS/IPC/Drives 2007, Fachmesse & Kongress, 27.–29. Nov. 2007. ISBN 9783800730698. VDE-Verlag, Nürnberg
 7. Pritschow G, Röck S (2004) Hardware in the loop. Simulation of machine tools. Annals of the CIRP 53(1):295–298. Elsevier
 8. Hoher S (2017) Ein gekoppeltes Materialflussmodell zur durchgängigen Entwicklungsunterstützung von Materialflusssteuerungen. Fraunhofer, ISBN 978–3–8396–1197–5
 9. Scheifele S (2019) Generierung des Digitalen Zwillings für den Sondermaschinenbau mit Losgröße 1. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung 107. Stuttgart, Univ., Diss., ISBN 978–3–8396–1618–5. Fraunhofer Verlag, Stuttgart
 10. Scheifele C (2019). Plattform zur Echtzeit-Co-Simulation für die virtuelle Inbetriebnahme. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung 95. Stuttgart, Univ., Diss., 2019. ISBN 978–3–8396–1534–8. Fraunhofer, Stuttgart
 11. Kübler K, Krebser G (2018) Steuerungssoftware automatisiert prüfen. MM Maschinenmarkt „Der Fokus“ 4. Vogel Communications Group
 12. Scheifele C, Verl A, Tekouo W, Belgharda S, Mauderer T (2020) Eine Online-Plattform für Digitale Zwillinge. Austausch, Pflege und Bereitstellung von Simulationsmodellen zur virtuellen Inbetriebnahme. atp magazin 62:11–12. Vulkan
 13. Schnierle M, Röck S (2018) Plattform für die Mixed-Reality-in-the-Loop-Simulation – Ein Beitrag zur Mixed-Reality-in-the-Loop-Simulation als Erweiterung der X-in-the-Loop-Methodenreihe. wt-online. Springer-VDI
 14. Hönig J, Schnierle M, Scheifele C, Spielmann T, Münster C, Roth A, Röck S, Verl A (2021) Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation von Produktionssystemen zur Aus- und Weiterbildung. atp magazin, atp 63 (6–7), Vulkan-Verlag
 15. VDMA (2020) Leitfaden Virtuelle Inbetriebnahme – Handlungsempfehlungen zum wirtschaftlichen Einstieg. VDMA Verlag. <https://www.vdma.org/viewer/-/v2article/render/4751305>

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Echtzeitsimulation der Prozess-Maschinen-Interaktion zur Prognose der Prozessstabilität mit realer CNC am Beispiel eines Fräsprozesses

Sascha Röck

Zusammenfassung

In diesem Artikel wird ein Ansatz für die Echtzeitsimulation von Wechselwirkungen zwischen Zerspanungsprozess und Werkzeugmaschine am Beispiel eines Fräsprozesses vorgestellt. Ziel des Ansatzes ist die Kopplung eines echtzeitfähigen Zerspanungsmodells mit einer realen CNC, um durch regeneratives Rattern bedingte Schwingungen bereits bei der Virtuellen Inbetriebnahme prognostizieren zu können. Dabei wird ein dixel-basiertes Modell des Werkstücks für die Berechnung der Spandicke und der Schnittkräfte unter Berücksichtigung von Werkzeugposition und Materialabtrag eingesetzt. Anhand simulativer Experimente wird der Ansatz auf Prognose- und Echtzeitfähigkeit für den Einsatz in einer CNC-gekoppelten Echtzeitsimulation untersucht.

5.1 Einführung

Die Prognose des Maschinenverhaltens unter Berücksichtigung des Zerspanungsprozesses mithilfe der Simulation ist seit Jahrzehnten ein wichtiges Forschungsfeld innerhalb der Produktionstechnik. Insbesondere die Prozesssimulation stellt hohe Ansprüche an die verwendeten Simulationswerkzeuge.

Die Vorhersage der dynamischen Stabilität von Zerspanungsprozessen wird seit den 1950er-Jahren beispielsweise von Thusty [1], Tobias [2] und Merrit [3] untersucht. Analytische Ansätze wurden in zahlreichen Publikationen von Altintas [4, 5] veröffentlicht.

S. Röck (✉)

Virtual Automation Lab (VAL), Hochschule Esslingen, Esslingen, Deutschland
E-Mail: Sascha.Roeck@hs-esslingen.de

Henninger [6] und Chanda [7] wenden numerische Methoden auf diese Problemstellung an.

Die Verwendung von Simulationsmodellen in Verbindung mit realen CNC-Steuerungssystemen hat in den letzten zwei Jahrzehnten eine große Verbreitung in vielen Bereichen der Forschung und Entwicklung erfahren. Angefangen bei der Hardware-in-the-Loop Simulation (HiLS) für die Virtuelle Inbetriebnahme von CNC-Steuerungssystemen [8] bis hin zu simulationsbasierten Methoden für die Zustandsüberwachung oder der modellprädiktiven Bahnplanung [9].

Aufgrund der üblicherweise sehr kleinen CNC-Steuerungstakte von ca. 1 ms ist eine hocheffiziente Simulation des Maschinenverhaltens erforderlich. Die Wechselwirkungen zwischen Zerspanungsprozess und Werkzeugmaschine haben dabei einen maßgeblichen Einfluss auf das Fertigungsergebnis und können in einer Simulation zur prozessorientierten Inbetriebnahme nicht vernachlässigt werden. Die tatsächlich auftretenden Prozesskräfte hängen von den Bewegungs- und Geschwindigkeitsprofilen der CNC ab und variieren stark in Abhängigkeit des CNC-Programms, aufgrund der eingestellten Steuerungsparametern sowie der implementierten CNC-Algorithmik für Bahnplanung, Bahninterpolation und Look-Ahead. Dies führt zu unterschiedlichen mechanischen Anregungen der Werkzeugmaschine und damit auch zu unterschiedlichen Bearbeitungsergebnissen, welche ausschließlich mithilfe einer steuerungsgekoppelten Echtzeitsimulation prognostiziert werden können. Abb. 5.1 zeigt das Strukturbild eines simulationsbasierten Inbetriebnahmeprozesses realer CNC-Steuerungssysteme mithilfe der HiLS (Virtuelle Inbetriebnahme).

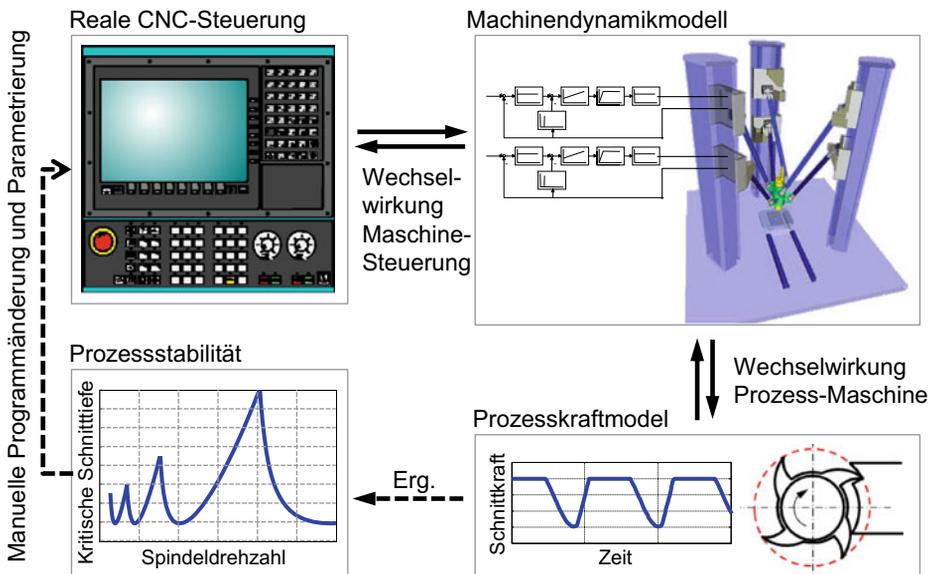


Abb. 5.1 Virtuelle Inbetriebnahme realer CNC-Steuerungssysteme mithilfe der Hardware-in-the-Loop Simulation unter Berücksichtigung der Prozessstabilität (bspw. Fräsprozess)

In diesem Beitrag wird ein Ansatz zur Modellierung und Echtzeitsimulation von Zerspanungsprozessen vorgestellt, um Prozesskräfte und Prozessinstabilitäten in einer HiLS für die Virtuelle Inbetriebnahme von Steuerungssystemen berücksichtigen zu können. Dieser Beitrag stellt eine gekürzte Fassung des in [10] veröffentlichten Ansatzes dar.

5.2 Dixelbasiertes Zerspanungsmodell zur Berechnung der Spandicke

Die Geometrie des Werkstücks wird durch eine definierte Anordnung sogenannter Dixel approximiert. Ein einzelnes Dixel stellt einen (begrenzten) geometrischen Strahl dar, welcher das Werkstück durchdringt und durch das Geradensegment.

$$\vec{r}_i = \vec{r}_{b,i} + \lambda(\vec{r}_{e,i} - \vec{r}_{b,i}) \quad (5.1)$$

mit dem Anfangspunkt $\vec{r}_{b,i}$ sowie dem Endpunkt $\vec{r}_{e,i}$ mathematisch beschrieben wird. Abhängig von der Platzierung und Länge der einzelnen Dixel können Werkstücke unterschiedlicher Form abgebildet werden.

Spandickenberechnung

Abb. 5.2 zeigt das Prinzip der Spandickenberechnung auf Basis eines ebenen Dixelmodells.

Das durch die Spindelrotation bedingte Schneidenpfadsegment \vec{p}_j der j -ten Schneidkante wird durch Linearinterpolation zwischen aktueller Schneidenposition $\vec{e}_{j,n}$ zum Zeitpunkt t_n und vorangegangener Position $\vec{e}_{j,n-1}$ zum Zeitpunkt $t_n - \Delta t$ mit der konstanten Zeitschrittweite Δt approximiert. Aus dem Kreuzungspunkt \vec{c}_{ij} zwischen Schnittdixel \vec{r}_i und dem Schneidenpfadsegment \vec{p}_j wird die partielle Spandicke h_{ij} berechnet.

Die partielle Spandicke h_{ij} eines jeden Dixel \vec{r}_i ist die skalare Projektion des gekappten Dixelsegments $\vec{c}_{ij} - \vec{r}_{b,i}$ auf die Verbindungslinie $\vec{c}_{ij} - \vec{r}_{TCP}$ zwischen dem Kreuzungspunkt \vec{c}_{ij} und dem Werkzeugmittelpunkt (TCP) \vec{r}_{TCP} . Die resultierende Spandicke h_j der j -ten Schneidkante kann somit als arithmetisches Mittel aller partiellen Spandicken h_{ij} eines Schneidenpfadsegments \vec{p}_j mit den Indices $i_b \leq i \leq i_e$ bestimmt werden.

$$h_{ij} = \frac{\left| \left(\vec{c}_{ij} - \vec{r}_{TCP} \right)^T \cdot \left(\vec{c}_{ij} - \vec{r}_{b,i} \right) \right|}{\left| \vec{c}_{ij} - \vec{r}_{TCP} \right|} \Rightarrow h_j = \frac{1}{i_e - i_b} \sum_{i=i_b}^{i_e} h_{ij} \quad (5.2)$$

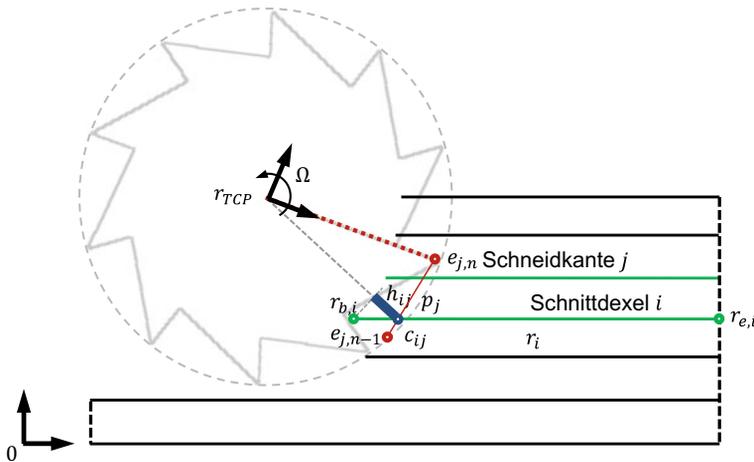


Abb. 5.2 Berechnung der Spandicke auf Basis eines Dexelmodells

Bei kleinen Spindeldrehzahlen Ω sowie bei kleinen Zeitschrittweiten Δt kann es vorkommen, dass das Schneidenpfadsegment \vec{p}_j zwischen zwei Dexeln liegt und ein Kreuzungspunkt \vec{c}_{ij} nicht direkt berechnet werden kann. In diesem Fall wird exakt an der Position \vec{e}_j ein neues Dexel eingefügt, was zu einer problemangepassten Verteilung von Dexeln innerhalb des Werkstücks und zu einer höheren Genauigkeit bei der Spandickenberechnung führt. Abb. 5.3 zeigt die Entwicklung der Dexelanzahl, während ein Fräser in ein rechteckiges Werkstück mit anfangs $N_D = 20$ Dexeln eindringt. Die Anzahl der Dexel nimmt dabei nur solange zu, bis der Fräser vollständig in das Werkstück eingedrungen ist.

Schnittkraftberechnung

Die auf jede Schneidkante wirkenden radialen und tangentialen Schnittkräfte hängen von der Spandicke $h_{j,n}$ zum Zeitpunkt t_n ab und können durch

$$\begin{aligned} F_{rj,n} &= k_r a h_{j,n} \\ F_{tj,n} &= k_t a h_{j,n} \end{aligned} \quad (5.3)$$

mit den radialen und tangentialen Schnittkoeffizienten k_r und k_t sowie der Schnitttiefe a bestimmt werden [4]. Durch Transformation der radialen und tangentialen Schnittkräfte in xy -Koordinaten mithilfe der Rotationsmatrix $\Phi(\phi_{j,n})$ in Abhängigkeit des Drehwinkels $\phi_{j,n} = \Omega t_n + \frac{2\pi}{N} j$ der j -ten Schneidkante und Summation aller im Eingriff befindlichen Schneidkanten kann die am Fräser angreifende Gesamtkraft

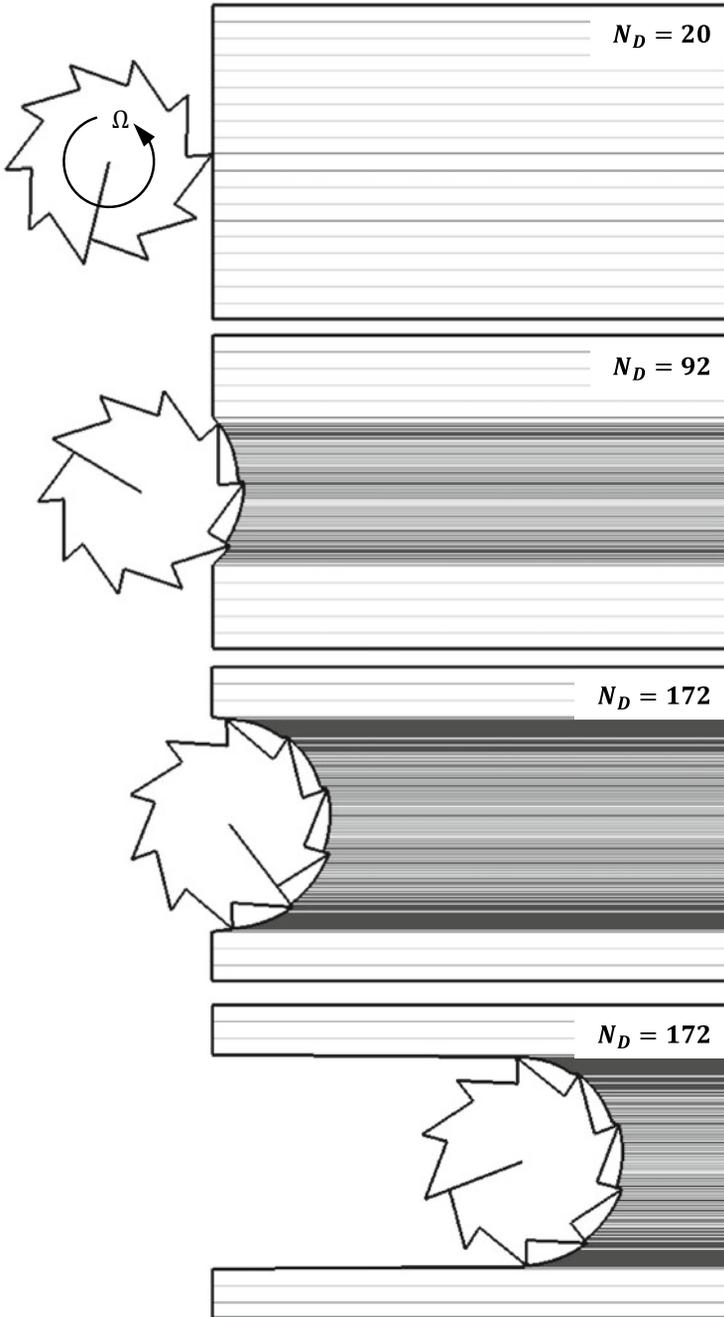


Abb. 5.3 Entwicklung der Dexelanzahl (dunkle Bereiche stellen eine hohe Dexeldichte dar)

$$\begin{pmatrix} F_{x,n} \\ F_{y,n} \end{pmatrix} = \sum_{j=0}^{N-1} \left[\Phi \left(\Omega t_n + \frac{2\pi}{N} j \right) \right] \begin{pmatrix} F_{rj,n} \\ F_{tj,n} \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

sowie das resultierende Axialmoment

$$T_n = r_T \sum_{j=0}^{N-1} F_{tj,n} \quad (5.5)$$

mit dem Fräserradius r_T berechnet werden.

5.3 Simulationsergebnisse und Validierung

Zur Validierung der Prognosefähigkeit des Ansatzes für dynamische Kräfte und Prozessstabilität (Rattern), wurde ein schwingfähiges Modell mit einem Freiheitsgrad in Vorschubrichtung mit dem Schnittkraftmodell gekoppelt. Mit diesem einfachen Schwingungsmodell können analytische Ergebnisse zur Validierung herangezogen werden.

Schwingungsmodell mit einem Freiheitsgrad

Das Schwingungsmodell kann als ein durch die Schnittkräfte angeregter Einmassenschwinger mit einem Feder-Dämpfer-Element zwischen Werkzeugmittelpunkt und Werkzeugaufnahme aufgefasst werden (Abb. 5.4), dessen Bewegungsgleichung durch

$$\ddot{x} + 2D\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = \omega_0^2u + \frac{\omega_0^2}{k_0}F_x(\Omega, a) \quad (5.6)$$

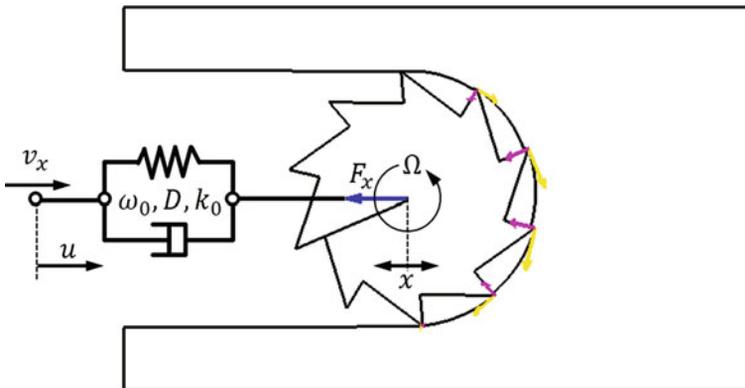


Abb. 5.4 Schwingungsmodell mit einem Freiheitsgrad

gegeben ist, wobei x die Werkzeug-Istposition und F_x die durch das Dixelmodell berechnete Schnittkraft in Vorschubrichtung in Abhängigkeit der Spindeldrehzahl Ω und der Schnitttiefe a darstellen. Des Weiteren ist u die Werkzeug-Sollposition, ω_0 eine natürliche Eigenfrequenz der Spindel, D der Dämpfungsgrad und k_0 die Gesamtsteifigkeit von Spindel und Werkzeug.

Aufgrund der harten Echtzeitbedingungen einer CNC-gekoppelten HiLS wird zur Lösung von Gl. (5.6) eine äußerst recheneffiziente Methode für die numerische Zeitintegration, das sogenannte symplektische Eulerverfahren (Semi-implizites Eulerverfahren), herangezogen. Dabei werden für jeden Zeitschritt $t_{n+1} = t_n + \Delta t$ die nachfolgend aufgeführten Integrationssschritte mit den Anfangsbedingungen $x_n = x_0$ und $v_n = \dot{x}_0$ ausgeführt:

$$\begin{aligned}
 \alpha_n &= -2D\omega_0 v_n - \omega_0^2 x_n + \omega_0^2 u_n + \frac{\omega_0^2}{k_0} F_{x,n} \\
 v_{n+\frac{1}{2}} &= v_n + \frac{\Delta t}{2} \alpha_n \\
 x_{n+\frac{1}{2}} &= x_n + \frac{\Delta t}{2} v_{n+\frac{1}{2}} \\
 \alpha_{n+\frac{1}{2}} &= -2D\omega_0 v_{n+\frac{1}{2}} - \omega_0^2 x_{n+\frac{1}{2}} + \omega_0^2 u_n + \frac{\omega_0^2}{k_0} F_{x,n} \\
 v_{n+1} &= v_{n+\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{2} \alpha_{n+\frac{1}{2}} \\
 x_{n+1} &= x_{n+\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{2} v_{n+1}
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

Die explizite Berechnungsabfolge in Gl. (5.7) erfordert dabei lediglich eine einmalige Berechnung der Schnittkraft F_x anhand des Dixelmodells pro Zeitschritt, was den rechenintensivsten Teil der Berechnung darstellt.

Transiente Analyse – Eindringen des Werkzeugs

Aus der transienten Simulation gehen die dynamischen Prozesskräfte hervor, welche beim Eindringen in das Werkstück entstehen. Es wird dabei die in Tab. 5.1 aufgeführte Parametrierung verwendet.

Die Ergebnisse der Simulation sind für die Schnitttiefe $a = 0.01$ [m] (Prozess stabil) in Abb. 5.5 und für $a = 0.03$ [m] (Prozess instabil) in Abb. 5.6 dargestellt. Im stabilen Fall stellt sich eine stationäre Kraft F_x ein, sobald das Werkzeug vollständig in das Werkstück eingedrungen ist, da sich im Idealfall immer die gleiche Anzahl an Schneiden im Eingriff befinden und sich somit ein symmetrisches Kräftegleichgewicht einstellt (Abb. 5.5).

Tab. 5.1 Parametrierung des Modells

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Fräserradius	r_T	0.01	[m]
Schnitttiefe	a	0.01/ 0.03	[m]
Tangentialer Schnittkoeffizient	k_t	10^8	[N/m ²]
Radialer Schnittkoeffizient	k_r	$0.6 \cdot k_t$	[N/m ²]
Anzahl der Schneiden	N	10	[-]
Vorschubgeschwindigkeit	v_x	0.02	[m/s]
Spindeldrehzahl	Ω	600	[rev/min]
Dämpfungsgrad	D	0.1	[-]
Natürliche Eigenfrequenz	ω_0	500	[rad/s]
Steifigkeit	k_0	10^7	[N/m]
Zeitschrittweite der Simulation	Δt	0.0002	[s]

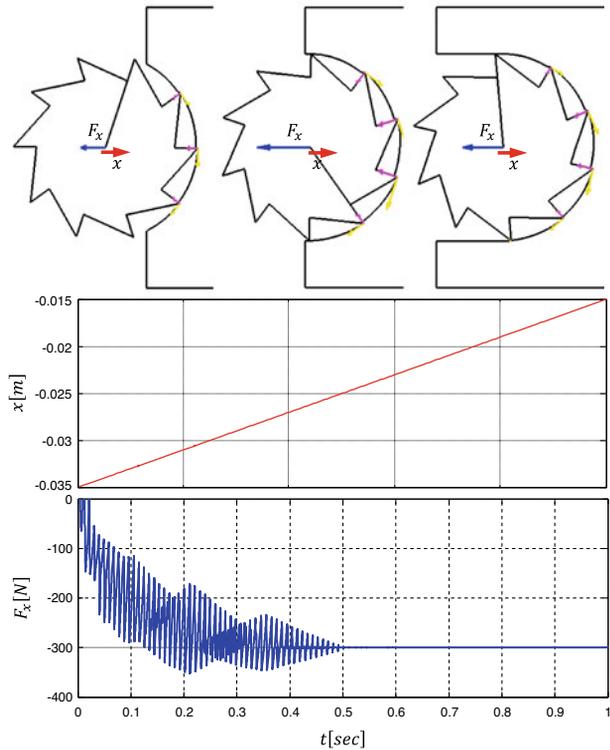
Im Falle einer Prozessinstabilität beginnt die Kraft F_x , und damit auch die Werkzeugposition x , mit der Ratterfrequenz $\omega_c \approx 530$ [rad/s], welche nahe der natürlichen Eigenfrequenz $\omega_0 = 500$ [rad/s] der Spindel liegt, zu oszillieren. Das Werkzeug kann dabei den Kontakt zum Werkstück verlieren („zero cut“). Bei bestimmten Schnitttiefe-Spindeldrehzahl-Kombinationen verursacht die angeregte Eigenschwingung des Systems einen periodischen Spandickenverlauf und somit eine Welligkeit auf der Oberfläche des Werkstücks. Beim erneuten Eingriff des Werkzeugs führt die Welligkeit zur Selbstanregung des Systems, welche ein Aufschaukeln und damit eine Prozessinstabilität hervorrufen kann (Abb. 5.6).

Dieser Regenerativeneffekt wird auch als regeneratives Rattern bezeichnet. Die transiente Analyse zeigt, dass dieser Effekt durch das Modell gut abgebildet wird.

Validierung anhand von analytischen Stabilitätsdiagrammen

Eine verlässliche Prognose von Ratterschwingungen ist essenziell für die Virtuelle Inbetriebnahme von Fräsprozessen. Zur Validierung der Prognosefähigkeit wurden mehrere Simulationsläufe nach Abb. 5.5, 5.6 und Tab. 5.1 mit unterschiedlichen Spindeldrehzahlen durchgeführt und solange die Schnitttiefe variiert, bis die Prozesskraft Instabilität anzeigt. Die Ergebnisse wurden anschließend mit den nach Altintas und Budak in [4] analytisch ermittelten Stabilitätsdiagrammen (Stability Lobes) verglichen. Im Diagramm in Abb. 5.7 ist die Schnitttiefe a über der Spindeldrehzahl Ω dargestellt, wobei die analytisch berechnete kritische Schnitttiefe a_{lim} den auf Basis des Dixelmodells ermittelten

Abb. 5.5 Transiente Simulation mit Schnitttiefe $a = 0.01 [m]$. Der Prozess ist stabil



stabilen und instabilen Simulationsergebnissen gegenübergestellt wird. Aus Abb. 5.7 wird eine sehr gute Übereinstimmung des dexelbasierten Ansatzes mit der analytischen Lösung für Spindeldrehzahlen zwischen $\Omega = 200 [1/min]$ und $\Omega = 600 [1/min]$ deutlich. Die Prozesskraftverläufe F_x bei einer Spindeldrehzahl $\Omega = 600 [1/min]$ für Schnitttiefen an der Stabilitätsgrenze ($a = 16, 17, 18 mm$) sind beispielhaft in Abb. 5.8 dargestellt.

Echtzeitfähigkeit

Die Echtzeitfähigkeit wird mithilfe des Echtzeitfaktors (engl. „real-time factor“, RTF)

$$RTF = \frac{t_{cpu}}{t_{sim}} \quad (5.8)$$

angegeben, wobei t_{sim} das Simulationszeitintervall und t_{cpu} die für die Ausführung der Simulation im Zeitintervall benötigte CPU-Zeit darstellt. Der RTF muss bei Echtzeitsimulationen unter 1 liegen. In Abb. 5.9 ist der Zeitverlauf des RTF für die Simulation des Frässzenarios aus Abb. 5.4 mit $\Omega = 2000 [rev/min]$ und $\Delta t = 0.001 [s]$ dargestellt. Der RTF verläuft dabei annähernd konstant. Lediglich zu Simulationsbeginn variiert der Rechenaufwand aufgrund der Adaption der Dexelanzahl, während das Werkzeug in das Werkstück eindringt.

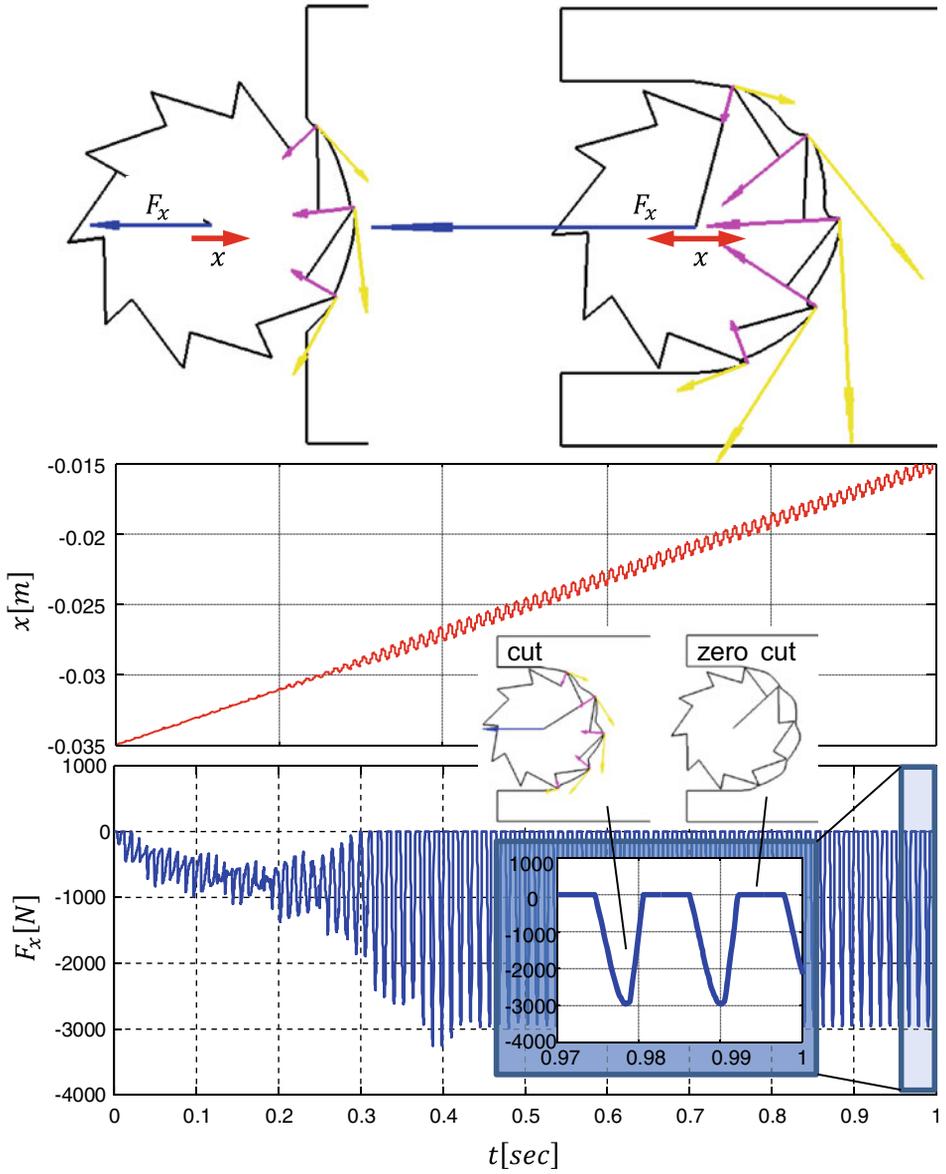


Abb. 5.6 Transiente Simulation mit Schnitttiefe $a = 0.03$ [m]. Der Prozess ist instabil

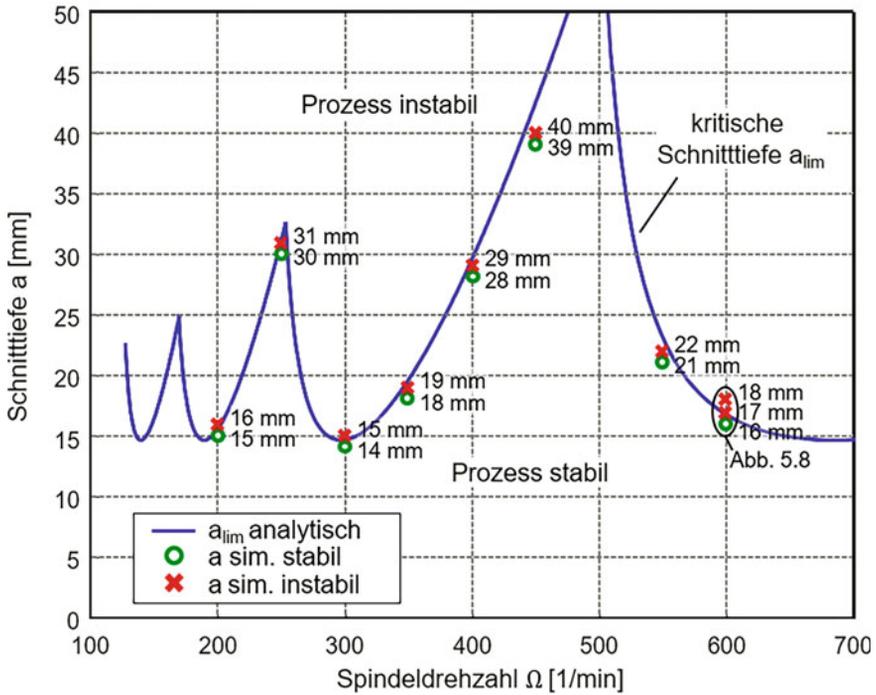


Abb. 5.7 Validierung der Prognosefähigkeit für die Prozessstabilität

Insbesondere die Parameter Spindeldrehzahl Ω , Zeitschrittweite der Simulation Δt und die Anzahl der Schneiden N nehmen Einfluss auf die Rechenzeit und damit auf den RTF . Sowohl bei steigender Spindeldrehzahl als auch bei einer größeren Schneidenanzahl erhöht sich die Rechenzeit. Bei sehr kleiner Spindeldrehzahl und sehr kleiner Simulationszeitschrittweite dominiert die hohe Anzahl adaptierter Dixel den Gesamtrechenaufwand und der RTF steigt ebenfalls. Tab. 5.2 zeigt den RTF und die Dixelanzahl N_D für verschiedene Parametrierungen.

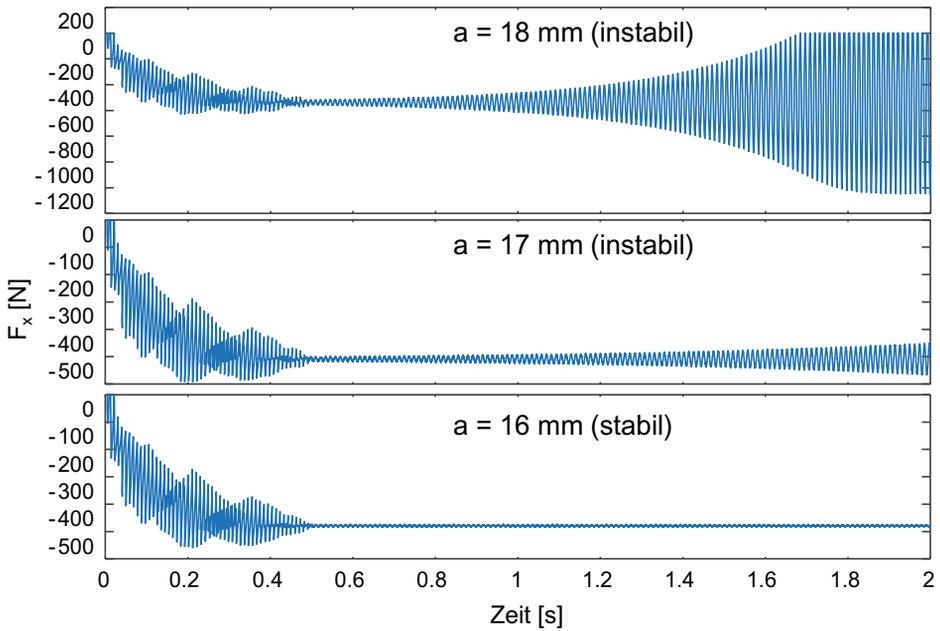


Abb. 5.8 Simulierte Prozesskraftverläufe an der Stabilitätsgrenze mit dem Dixelmodell

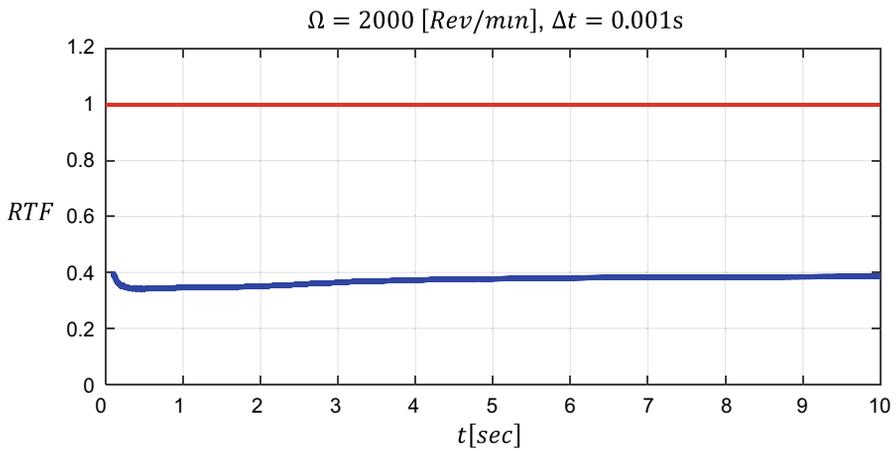


Abb. 5.9 Echtzeitfaktor (RTF) einer exemplarischen Frässimulation

Tab. 5.2 Echtzeitfaktor (RTF) und Dexelanzahl N_D in Abhängigkeit der Spindeldrehzahl Ω , der Zeitschrittweite der Simulation Δt und der Schneidenanzahl N (Simulationsrechner: Intel Core i7-8750 H, 2.20 GHz, 16 GB RAM, Windows 10, 64 bit)

Δt		0.001 [s]						
$\Omega [\frac{rev}{min}]$		100	200	500	1000	2000	5000	10.000
$N = 2$	RTF	0.1	0.08	0.08	0.1	0.14	0.3	0.53
	N_D	505	319	218	205	202	200	200
$N = 10$	RTF	0.24	0.2	0.2	0.27	0.39	0.82	1.46
	N_D	487	316	217	205	202	201	200
Δt		0.0002 [s]						
$\Omega [\frac{rev}{min}]$		100	200	500	1000	2000	5000	10.000
$N = 2$	RTF	1.02	0.63	0.41	0.33	0.32	0.43	0.63
	N_D	1826	984	488	315	228	205	202
$N = 10$	RTF	2.77	1.84	1.26	1.04	0.89	1.21	1.96
	N_D	1725	957	484	323	228	205	202

5.4 Erweiterbarkeit auf komplexe Zerspanungsprozesse

Ein signifikanter Vorteil des dexelbasierten Modellansatzes ist die Erweiterbarkeit auf komplexe Anwendungen mit beliebigen Werkstückgeometrien und sich ändernden Zerspanungsbedingungen. Abb. 5.10 zeigt beispielhaft einen Unrundrehprozess, der sich mit dem vorgestellten Ansatz für eine Echtzeitsimulation modellieren lässt. Die Dexel des Drehwerkstücks verlaufen dabei von der Drehachse zum Werkstückrand. Das Drehwerkzeug wird periodisch dem rotierenden Werkstück zugestellt, wodurch die Schneide pro Umlauf mehrfach den Eingriff verliert und unstetige Kraftverläufe die Folge sind.

Derartige Kraftverläufe lassen sich analytisch nur schwer, und in der Regel nur für idealisierte Sonderfälle berechnen, insbesondere unter Berücksichtigung der Prozessstabilität. Der dexelbasierte Modellansatz hingegen ermöglicht einen vergleichswisen einfachen numerischen Zugang mit zugleich hoher Recheneffizienz.

Zukünftige Forschungsarbeiten am Virtual Automation Lab der Hochschule Esslingen sollen den Modellansatz auf weitere Zerspanungsprozesse, insbesondere dreidimensionale Prozesse, erweitern. Dazu wird der Ansatz verfolgt, die dexelbasierten Werkstückmodelle in mehreren Schichten übereinander zu legen und für die Spandickenberechnung anstatt Schneidenpfadsegmente räumliche Flächensegmente heranzuziehen.

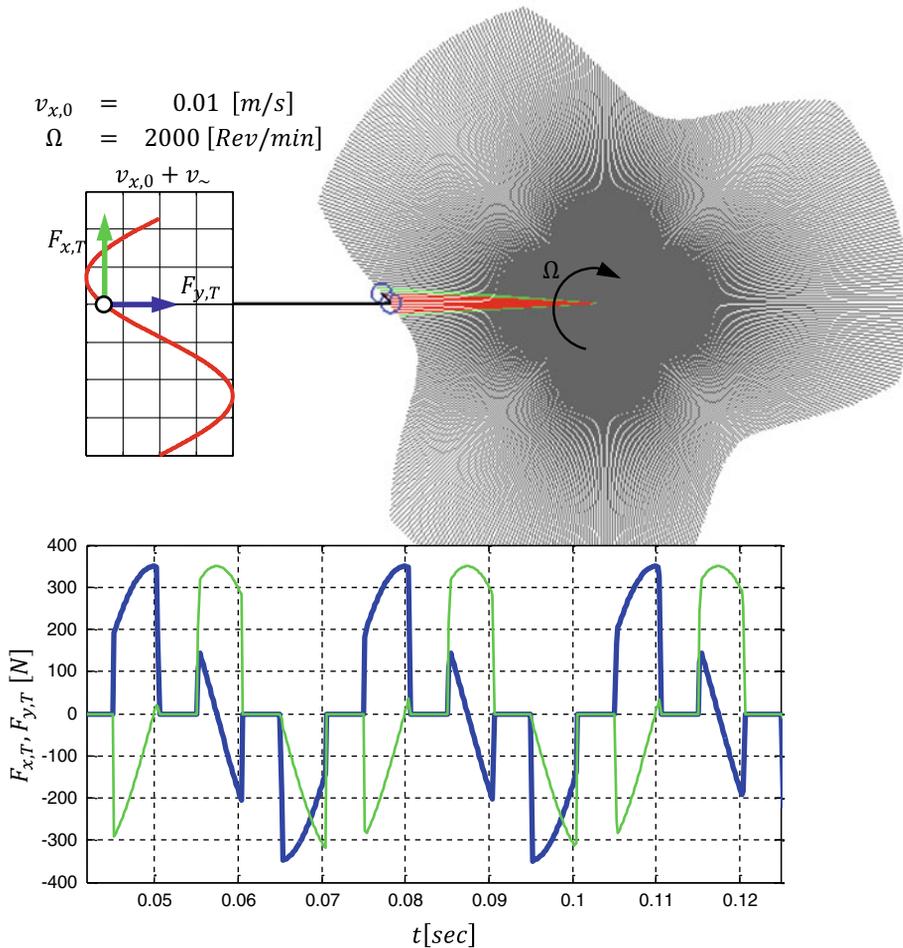


Abb. 5.10 Simulation der Prozesskräfte beim Unrunddrehen

Literatur

1. Tlustý J (1954) Selbsterregte Schwingungen bei der Bearbeitung der Metalle. Acta Technica Academiae Scientiarum Hungaricae, 8(3–4):320–360
2. Tobias S, Fishwick W (1958) Theory of regenerative machine tool chatter. The Engineer 205:199–203
3. Merritt HE (1965) Theory of self-excited machine-tool chatter: Contribution to machine-tool chatter research, Journal of Engineering for Industry 87(4):447–454

4. Altintas Y, Budak E (1995) Analytical prediction of stability lobes in milling. *Annals of the CIRP* 44(1):357–362. Elsevier
5. Altintas Y (2001) Analytical prediction of three dimensional chatter stability in milling. *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing* 44(3):717–723
6. Henninger C, Eberhard P (2008) Improving the computational efficiency and accuracy of the semi-discretization method for periodic delay-differential equations. *European Journal of Mechanics – A/Solids* 27(6):975–985. Elsevier
7. Chanda A, Fischer A, Eberhard P, Dwivedy SK (2014) Stability analysis of a thin-walled cylinder in turning operation using the semi-discretization method. *Acta Mechanica Sinica* 30(2):214–222. Springer
8. Pritschow G, Röck S (2004) Hardware in the loop. Simulation of machine tools. *Annals of the CIRP* 53(1):295–298. Elsevier
9. Sekler P, Verl A (2009) Real-time computation of the system behaviour of lightweight machines. 2009 First International Conference on Advances in System Simulation, S 144–147, IEEE
10. Röck S. (2021) Predicting regenerative chatter in milling with hardware-in-the-loop simulation using a dixel-based cutting model. *Journal of Production Engineering Research & Development* 15(5):605–617. Springer. <https://doi.org/10.1007/s11740-021-01040-8>. CC BY 4.0 Lizenz: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Herausforderungen bei der Abbildung der Prozess-Maschine Interaktion am Beispiel der Umformsimulation

6

Christer Schenke, Lars Penter, Stefan Heiland und Steffen Ihlenfeldt

Zusammenfassung

Dieser Beitrag weist die Notwendigkeit der numerischen Abbildung von Prozess-Maschine Interaktionen in der Umformtechnik nach und stellt aktuelle Ansätze zu deren Modellierung und Berechnung vor. Dabei werden sowohl steigende Anforderungen hinsichtlich Modellkomplexität und -genauigkeit adressiert als auch auf die wachsenden Herausforderungen an eine Echtzeitfähigkeit ausgehend von virtuellen Werkzeuginbetriebnahmen hin zu modellbasierten Regelungsansätzen eingegangen. Abschließend werden beispielhafte Umsetzungen vorgestellt.

6.1 Ausgangssituation

Während bei der spanenden Fertigung die Komplexität des gefertigten Bauteils durch das umfangreiche Bewegungsvermögen der Werkzeugmaschine erzeugt wird, führt die Umformmaschine bei der Blechumformung nur einfache, in der Regel einachsige Bewegungsabläufe zur Zustellung der Werkzeugkomponenten zueinander aus. Die komplexe Geometrie des herzustellenden Werkstückes ist dabei im Umformwerkzeug gespeichert und wird beim Ziehvorgang auf das Blech übertragen. Genau in diesem Zusammenwirken von Maschine und Werkzeug liegt die hohe Produktivität des Tiefziehverfahrens bei der

C. Schenke

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz, Deutschland

L. Penter · S. Heiland · S. Ihlenfeldt (✉)

Professur für Werkzeugmaschinenentwicklung und adaptive Steuerungen, Technische Universität Dresden, Dresden, Deutschland

E-Mail: Steffen.Ihlenfeldt@tu-dresden.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Verl, S. Röck und C. Scheifele (Hrsg.),

Echtzeitsimulation in der Produktionsautomatisierung,

https://doi.org/10.1007/978-3-662-66217-5_6

Produktion mittlerer und großer Stückzahlen von Serienbauteilen begründet. Tiefziehteile für die Konsumgüter- und Automobilindustrie werden in der Regel im Dreischichtbetrieb hergestellt. Auf einer Anlage zur Herstellung von Blechumformteilen können so bei Hubzahlen von 15 min^{-1} bis zu 21.000 Teile pro Tag umgeformt werden. Jedoch sinken heute in der Folge der zunehmenden Individualisierung von Produkten die Losgrößen bei gleichzeitig steigender Variantenvielfalt und wachsenden Produktivitätsanforderungen. Dadurch steigt der Aufwand für die Umrüstung und Wiederinbetriebnahme der Anlagentechnik, wodurch die erreichbaren Stückzahlen sinken.

Eine Vielzahl der durch Umformen produzierten Bauteile, wird durch eine Abfolge verschiedener Tiefzieh- und Schneidoperationen auf Folgeverbund-, Transfer- oder Stufenwerkzeugen hergestellt. Diese Werkzeuge werden auf Pressen mit einem oder mehreren Stößeln betrieben [1]. Für die Ziehstufe, in der Regel die erste Umformoperation, werden dabei Niederhalterkräfte benötigt, die durch ein Ziehkissen als Gegenantrieb zum Stößel oder durch Gasdruckfedern im Werkzeug realisiert werden können.

Der Einsatz neuer elektromechanischer Antriebssysteme, erweitert die Möglichkeiten der Bewegungsführung bei der Durchführung von Umformprozessen. So hat die Verwendung von Servomotoren in den Hauptantrieben von Pressen in jüngerer Zeit das Bewegungsvermögen von Umformmaschinen deutlich gesteigert. Neben einem hohen Beschleunigungsvermögen kann die Kinematik von Servopressen weitgehend frei programmiert werden. Die Servopressentechnik stellt damit bislang nicht vorhandene Freiheitsgrade zur Bewegungssteuerung bei der Herstellung von Tiefziehteilen bereit [2]. Stößelgeschwindigkeit und Ziehkissenkräfte können über den Pressenhub verändert und an die Anforderungen des Werkstoffes und der Bauteilgeometrie angepasst werden [3]. Entgegen dem Vorgehen bei der Werkzeugauslegung für den Einsatz auf konventionellen Maschinen, bei denen oberer und unterer Totpunkt als auch das Bewegungsprofil durch die Kinematik der Presse definiert sind, erfordert die Einarbeitung neuer Werkzeuge auf Servopressen eine Bewegungs- und Kollisionsplanung [4].

Neue Materialien sowie immer komplexere Bauteile bezüglich der Form und Funktion reizen die Prozessgrenzen zunehmend aus. Die Berücksichtigung der Schwankungen der Eigenschaften des umzuformenden Werkstoffes [5], dynamischer Effekte aus dem Zusammenwirken von Maschine und Prozess [6], Regelabweichungen der Antriebssysteme [7] aber auch verschleißbedingte Änderungen der genauigkeitsbeeinflussenden Eigenschaften der Maschine und des Werkzeuges erschweren die Gestaltung, die Einarbeitung und den Betrieb von Umformwerkzeugen und machen die erfahrungsbasierte Vorhersage der Fertigungsparameter heute nahezu unmöglich. Damit ergeben sich vielfältige Anforderungen an die Planung des Prozesses, die Gestaltung der Werkzeuge und die Bewegungsführung der Maschine. Neben den zu berücksichtigenden Eigenschaften des Werkstoffes gibt es Abhängigkeiten von den Umgebungsbedingungen, dem Maschinen- und Werkzeugzustand sowie den verschiedenen Kontaktstellen zwischen Maschine, Werkzeug und Werkstück [8, 9]. Für komplexe Tiefziehteile können bereits geringe Schwankungen wie beispielsweise der Blechdicke oder der mechanischen Werkstoffeigenschaften dazu führen, dass

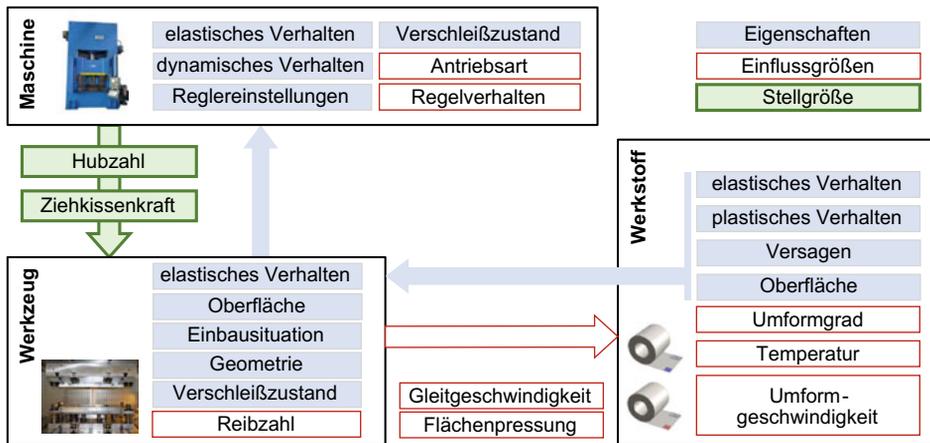


Abb. 6.1 Wesentliche Wechselwirkungen beim Umformprozess nach [9, 11]

Prozessparameter ihre Gültigkeit verlieren und es zu Tiefziehfehlern im Bauteil kommt [10]. Das Verhalten des Werkstoffes beeinflusst also direkt das Verhalten des Werkzeuges und der Umformmaschine und umgekehrt. Abb. 6.1 zeigt die wesentlichen Größen, die den Umformprozess beeinflussen und bei der Bestimmung der Stellgrößen (Hubzahl und Ziehkissenkraft) berücksichtigt werden müssen.

Derartige Abhängigkeiten können beispielsweise durch bauteilgeometrieabhängige Reglereinstellungen oder werkstoffabhängige Ziehkissensollwerte bei der Prozessführung berücksichtigt werden [8].

6.2 Echtzeitanforderungen bei der Umformsimulation

Bei der Herstellung von Blechumformteilen wird die Umformsimulation heute vor allem zur Vorhersage der Geometrie der Werkzeugaktivelemente eingesetzt. Die Erweiterung des Betrachtungsspektrums zeigt aber verschiedene weitere mögliche Einsatzgebiete mit ganz unterschiedlichen Anforderungen an die Berechnungszeit der eingesetzten Modelle auf.

Werkzeugherstellungsprozess und -inbetriebnahme

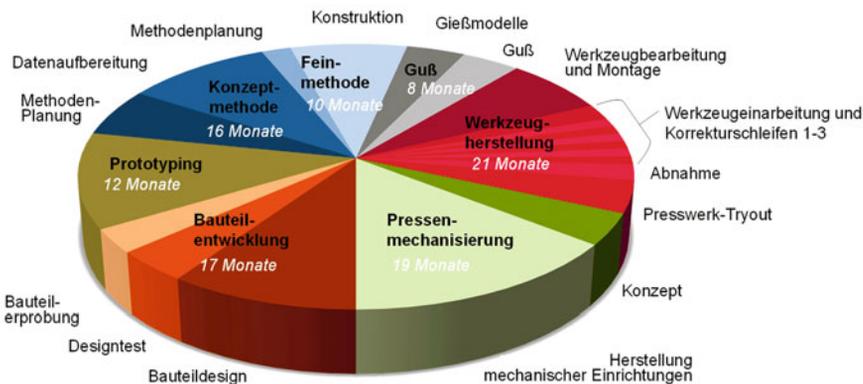
Bei der Fertigung von Karosserieblechteilen hat sich die Vorgehensweise der Methodenplanung für die Festlegung der durchzuführenden Verfahren und deren Reihenfolge etabliert. Der Methodenplan dient dem Entwurf der einzelnen Werkzeuge zur Herstellung der Bauteilgeometrie. Dazu werden die notwendigen Arbeitsschritte auf Operationsstufen verteilt und einzeln ausgelegt, wobei die Finite-Elemente (FE)-Simulation ein fester

Bestandteil bei der Gestaltung der Werkzeugoberflächen ist. Damit hat der Methodenplaner einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität und die Kosten des Umformteils, der Betriebsmittel und insbesondere auf das Umformwerkzeug [1].

Abb. 6.2 veranschaulicht den zeitlichen und finanziellen Bedarf für die Auslegung und Gestaltung sowie den Herstellungs- und Inbetriebnahmeprozess eines Tiefziehwerkzeuges zur Produktion eines Fahrzeugseitenwandrahmens.

Etwa die Hälfte der Zeit wird für die Methodenplanung und die Herstellung des Werkzeuges benötigt, die andere Hälfte ist durch die Umsetzung und Einarbeitung des Werkzeuges auf die Randbedingungen während des Betriebs bedingt. Die Eigenschaften des Gesamtsystems, bestehend aus Werkstoff, Werkzeug und Umformmaschine, die in den Simulationsrechnungen in der Methodenplanung nicht berücksichtigt wurden, müssen in einem aufwendigen Einarbeitungsprozess in das Werkzeug eingebracht werden. Dazu wird das Werkzeug zunächst auf einer Tryoutpresse eingearbeitet, bis damit Gutteile gefertigt werden können. Die Tryoutpresse soll dabei die Eigenschaften der Produktionspresse bestmöglich nachbilden, um die Werkzeugeinarbeitung parallel zur laufenden Produktion durchführen zu können. Anschließend erfolgt ein weiterer Tryout auf der Produktionspresse, bei dem auch die Abweichungen im Verhalten zwischen Produktions-

Arbeitszeitverteilung bei der Herstellung von Karosseriewerkzeugen



Prozentuale Verteilung der Herstellungskosten bei Ziehwerkzeugen



Abb. 6.2 Arbeitszeitverteilung und Herstellungskosten eines Ziehwerkzeuges am Beispiel eines Fahrzeugseitenwandrahmens [12]

und Tryoutpresse in das Werkzeug eingearbeitet werden. Die dafür notwendigen Tryout-Schleifen bis zur Fertigstellung des Werkzeuges benötigen im dargestellten Beispiel etwa ein Viertel der Herstellungszeit und verursachen ungefähr ein Drittel der dabei entstehenden Kosten. Die Verbesserung der Simulationsergebnisse durch die Berücksichtigung der heute weitgehend vernachlässigten Eigenschaften der Maschine während der Methodenplanung, führt zu einer Steigerung der Genauigkeit der Werkzeugaktivflächen. Dadurch kann der Einarbeitungsprozess verkürzt und eine deutliche Reduzierung der Herstellungszeit des Umformwerkzeuges und den damit verbundenen Kosten erreicht werden.

Da die Zeiträume für die Werkzeugeinarbeitung im Bereich von Monaten liegen, steht für Simulationsrechnungen zur Vorhersage der Werkzeugaktivflächen ausreichend Zeit zur Verfügung. Dennoch besteht der Wunsch nach möglichst kurzen Simulationszeiten, da diese die Durchführung von Variantenrechnungen und damit die automatisierte Optimierung der Werkzeuggeometrie ermöglichen. Weiterführende Ansätze für den Einsatz von Simulationsmodellen finden sich in der Hub-zu-Hub Regelung und der Inprozessregelung. Beide Ansätze setzen neben einer hohen Genauigkeit der eingesetzten Modelle deren Echtzeitfähigkeit voraus.

Sollen die Anforderungen an die Echtzeit betrachtet werden, ist zunächst zu klären, was Echtzeit im Sinne der Umformtechnik bedeutet. Dabei kann auf den Begriff der Rechtzeitigkeit zurückgegriffen werden. Rechtzeitigkeit bedeutet, dass alle notwendigen Informationen für eine Entscheidung genau dann wiederholbar und zeitlich genau zur Verfügung stehen, wenn sie benötigt werden [13].

Die Echtzeitanforderungen an die Simulation zur Unterstützung von Umformprozessen können so aus verschiedenen zeitlichen Ebenen bei der Betrachtung des Prozesses und den sich daraus ergebenden Zielstellungen abgeleitet werden. Während der Prozessplanung, der Gestaltung der Werkzeuge, bei deren Inbetriebnahme oder auch bei der Durchführung des Prozesses in der Produktion ergeben sich damit ganz unterschiedliche Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit der genutzten Modelle, die im Folgenden näher für die Chargenschwankungen, die Hub-zu-Hub Regelung sowie die Inprozessregelung erläutert werden.

Chargenschwankungen

In den Presswerken der Automobilhersteller und -zulieferer wird das Blech für die Herstellung von Tiefziehteilen in Bandform auf sogenannten Coils aufgerollt angeliefert. Fertigungsbedingt variiert dabei die Blechstärke sowohl von Coil zu Coil als auch über der Coilbreite infolge des Walzprozesses in definierten Toleranzen (vgl. Abb. 6.3). Da die gelieferte Coilbreite nicht immer der für die Herstellung eines Bauteils notwendigen Blechbreite entspricht, kommt häufig Spaltband zum Einsatz. Spaltband bedeutet, dass das Coil vor der Verarbeitung auf der Presse längs geteilt wird. Dadurch entstehen Blechbänder mit unterschiedlichen geometrischen Eigenschaften, die bei der weiteren Verarbeitung durch eine Anpassung der Prozessparameter auf das jeweilige Blechband berücksichtigt

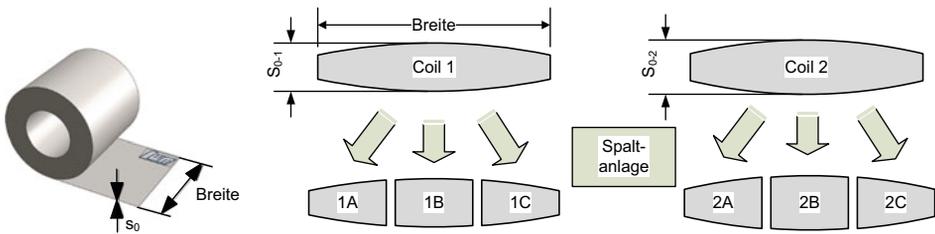


Abb. 6.3 Variierende Blechstärke unterschiedlicher Coils und die sich ergebenden Spaltbandgeometrien

werden müssen. Abb. 6.3 illustriert die unterschiedlichen Eigenschaften am Beispiel der Schwankung der Ausgangsblechstärke s_0 für zwei verschiedene Coils und der sich daraus ergebenden Spaltbandgeometrien (A, B und C).

Die Verarbeitung dieser in ihrer geometrischen Gestalt variierenden Blechbänder setzt entweder sehr robust ausgelegte Prozesse voraus oder erfordert die aktive Anpassung der Maschinenparameter beim Bandwechsel. Beispielhaft für die aktive Anpassung kann die Reduzierung der Hubzahl bei der Verarbeitung der Außenbänder (A und C) im Vergleich zum mittleren Abschnitt (B) genannt werden. Dieses Vorgehen verringert aber die Produktivität maßgeblich, weshalb eine simulationsbasierte Anpassung der optimalen Hubzahl oder auch differenzierter Zylinderkräfte zu einer Verbesserung des Prozessverlaufes beitragen kann. Die Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit bei der simulationsgestützten Prognose der Prozessparameter sind vergleichsweise gering, da bei der Verarbeitung eines Bandes in der Regel ausreichend Zeit zur Verfügung steht, um eine entsprechende Simulationsrechnung durchzuführen.

Hub-zu-Hub Regelung

Der Wunsch nach Verminderung von Lagerhaltungskosten führt zur Produktion nach Bedarf und damit zu häufigen Werkzeugwechseln in den Presswerken. Abb. 6.4 zeigt die Leistungskennzahlen eines großen Presswerksverbunds für verschiedene Pressentypen. In diesen Diagrammen zeigt sich, dass sich die mittlere Laufzeit der Aufträge auf den verschiedenen Produktionssystemen deutlich unterscheidet.

Während Pressenstraßen im Mittel mehr als 10 h das gleiche Teil fertigen, beträgt die mittlere Auftragslaufzeit auf einer modernen Servopresse gerade einmal zwei Stunden. Für den Werkzeugwechsel auf einer Servopresse werden in diesem Beispiel nur fünf Minuten benötigt, auf der Pressenstraße sind es hingegen über 20 min [14].

Während des Produktionsanlaufs kommt es durch die Erwärmung des Werkzeuges zu sich ändernden Reibverhältnissen zwischen Werkzeug und der umzuformenden Platine [15]. Daraus resultiert im Vergleich zum eingefahrenen Prozess eine erhöhte Anzahl an Fehlteilen, was nur durch eine zielgerichtete Anpassung der Hubzahl und der Niederhalterkraft verhindert werden kann. In [16] kann die Entwicklung der Bauteiltemperatur in

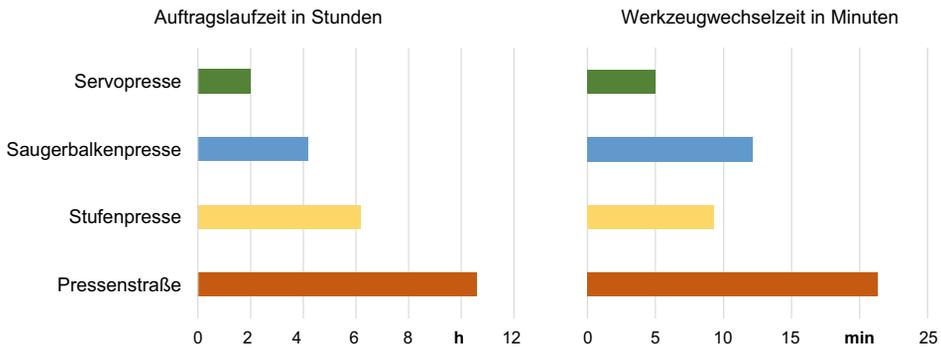


Abb. 6.4 Leistungskennzahlen nach Pressentypen [14]

der Warmlaufphase eines Werkzeuges für die Herstellung einer Fahrzeugheckklappe im Vergleich zur Temperatur außerhalb und innerhalb der Produktionspresse nachvollzogen werden. Die Temperaturänderung im Werkzeug führt zu einer Änderung des Reibwertes zwischen Werkzeug und Werkstück und macht eine Anpassung der Prozessparameter erforderlich.

Die Bestimmung der optimalen Hubzahl als auch der dabei notwendigen Niederhalterkraft in Abhängigkeit vom Maschinenzustand und der Temperatur im Werkzeug kann nur modellgestützt unter Berücksichtigung der Maschineneigenschaften erfolgen. Bei Annahme einer mittleren Hubzahl von 12 min^{-1} , also der Fertigung von 12 Teilen pro Minute, ergibt sich damit eine notwendige Modellberechnungszeit von 5 s.

Inprozessregelung

Bei der Prozessführung von Tiefziehprozessen können im Wesentlichen zwei Arten von Fehlern auftreten, die das Blechbauteil für die weitere Nutzung unbrauchbar machen. Beide hängen letztlich von der Höhe der resultierenden Flächenpressungen zwischen Matrize, Blech und Niederhalter ab und werden maßgeblich durch die Niederhalterkraft beeinflusst. Während bei einer zu hohen Flächenpressung Risse entstehen, führt eine zu niedrige Flächenpressung zu Falten im Flanschbereich, die schlimmstenfalls in die Zarge hineingezogen werden. Zwischen diesen beiden Fehlerbereichen liegt das sogenannte Gutteilfenster oder der Gutteilbereich [17]. Komplexe Tiefziehteile und schwer umformbare Materialien erlauben bei konventioneller Prozessführung mit konstanten Niederhalterkräften und Hubzahlen nur sehr eingeschränkte Prozessschwankungen. Um dieser Problemstellung zu begegnen, kann nun entweder der Parameterbereich stark eingeschränkt werden oder es kann auf eine Prozessführung durch Regelung zurückgegriffen werden. Durch eine Prozessregelung können die Stellgrößen bei der Durchführung des Tiefziehprozesses in Abhängigkeit vom Fortschreiten des Prozessablaufes auf die Anforderungen des Materials angepasst werden. Damit kann auch bei einem größeren Schwankungsbereich der Materialparameter sichergestellt werden, dass der Gutteilbereich

nicht verlassen wird. Die Generierung der notwendigen Datengrundlage für die Regelung kann dabei entweder durch Messung direkt im Werkzeug oder aber simulativ auf der Basis von Prozessmodellen erfolgen. Die Erfassung geeigneter Messgrößen stellt aber aufgrund der schlechten Zugänglichkeit des Umformteils im Werkzeug bis heute noch immer eine große Herausforderung dar. Daher kann eine Prozesssimulation als virtueller Sensor einen deutlichen Mehrwert liefern. Die Onlineregulation der Stellgrößen stellt dabei sehr hohe Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit der generierten Messgrößen, da der eigentliche Prozess innerhalb weniger Sekunden stattfindet. Soll die Prozessregelung also modellgestützt erfolgen, müssen die dafür eingesetzten Modelle in Steuerungszeit berechnet werden, um die notwendigen Informationen rechtzeitig bereitstellen zu können.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die rechtzeitige Bestimmung der Produktionsparameter auf der Basis eines dem Anwendungsfall angepassten, prozessaktuellen Systemmodells in den verschiedenen dargestellten Einsatzbereichen zur Vermeidung von Tiefziehfehlern führen kann. Damit kann sowohl der produzierte Ausschuss beim Coilwechsel und in der Warmlaufphase von Umformwerkzeugen verringert werden als auch die Anpassung der Prozessparameter während der Durchführung des Umformprozesses vorgenommen werden. Dies führt zur Steigerung der Ressourceneffizienz und kann auch zur wirtschaftlichen Fertigung kleiner Losgrößen im Presswerk beitragen.

6.3 Physikalisch basierte Modellierungsmethoden

Simulationsmodelle kommen heute im Bereich der Umformtechnik bereits für die Analyse von Prozessen [11], Maschinen [18] und deren Interaktion [9] zum Einsatz. Für jedes am Prozess beteiligte Subsystem ist eine domänenspezifische Modellbildung in einer den Anforderungen entsprechenden Modellierungsumgebung notwendig. Für die im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Anwendungsfälle ist die simulationsgestützte Vorhersage der Prozessparameter für den Tiefziehprozess ohne Kenntnis des genauen Maschinen- und Werkzeugzustandes nicht möglich. Sowohl das elasto-statische Nachgiebigkeitsverhalten von Werkzeugen und Maschinen als auch das dynamische Verhalten der Umformmaschine beeinflussen das Umformergebnis signifikant. Nur durch die umfassende Abbildung der Interaktionen zwischen den einzelnen Subsystemen kann bei Einsatz eines ganzheitlichen Systemsimulationsmodells z. B. eine Verbesserung des Fertigungsergebnisses oder der Maschinenstandzeiten erreicht werden. Die Gesellschaft für Informatik adressiert genau an dieser Stelle, also bei der Integration einzelner Simulationsmodelle in einem Gesamtsystemmodell zur Abbildung der Wechselwirkungen aller Subsysteme, die wesentliche Herausforderung für die Realisierung Digitaler Zwillinge [23].

Zur Erreichung einer hohen Übereinstimmung des Prozessmodells mit der Realität sind neben den Vorgängen im Werkzeug auch das Verhalten der Maschine zu berücksichtigen. Das Maschinenverhalten kann bei der Prozesssimulation in unterschiedlichen Detaillierungsstufen berücksichtigt werden. Abb. 6.5 zeigt Möglichkeiten der

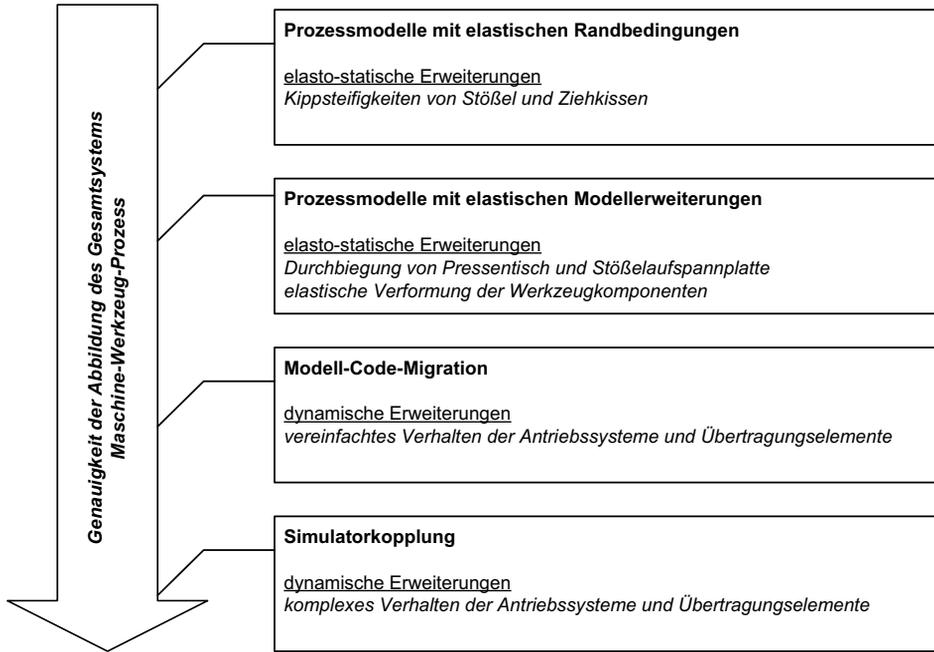


Abb. 6.5 Möglichkeiten zur Erweiterung der FE-Prozesssimulation des Umformprozesses

Erhöhung des Detaillierungsgrades des Gesamtsystemmodells durch Erweiterung der FE-Prozesssimulation.

Zur Abbildung des elasto-statischen Maschinenverhaltens werden in Prozessmodellen mit elastischen Randbedingungen die Kippsteifigkeiten des Pressenstößels, des Ziehkis-sendruckkastens oder auch die Nachgiebigkeit der Antriebssysteme durch ein System aus Feder-Dämpfer-Elementen integriert. Bei Einsatz elastischer Modellerweiterungen werden zusätzlich zu den elastischen Randbedingungen Maschinenelemente, die beim Umformprozess starke Verformungen aufweisen, elastisch modelliert, wodurch beispielsweise die Durchbiegung von Stößelaufspannplatte oder Pressentisch im Modell Berücksichtigung finden. Anwendung findet diese Methode beispielsweise in [6] zur Analyse des Zusammenwirkens der Nachgiebigkeiten von Werkzeug und Maschine am Beispiel von Werkzeugstempel und Pressentisch.

Abb. 6.6 zeigt ein FE-Prozessmodell, bei dem die Methoden der elastischen Randbedingungen und der elastischen Modellerweiterungen für die Simulation des Umformprozesses einer Rechteckwanne auf einer hydraulischen Tiefziehpresse umgesetzt wurden.

Das Modell beinhaltet als elastische Randbedingungen einen entsprechend der Kippsteifigkeiten des Stößels über Ersatzfedern kippelastisch gelagertem Stößel. Als elastische Modellerweiterungen kommt eine elastisch modellierter Aufspannplatte am Stößel und

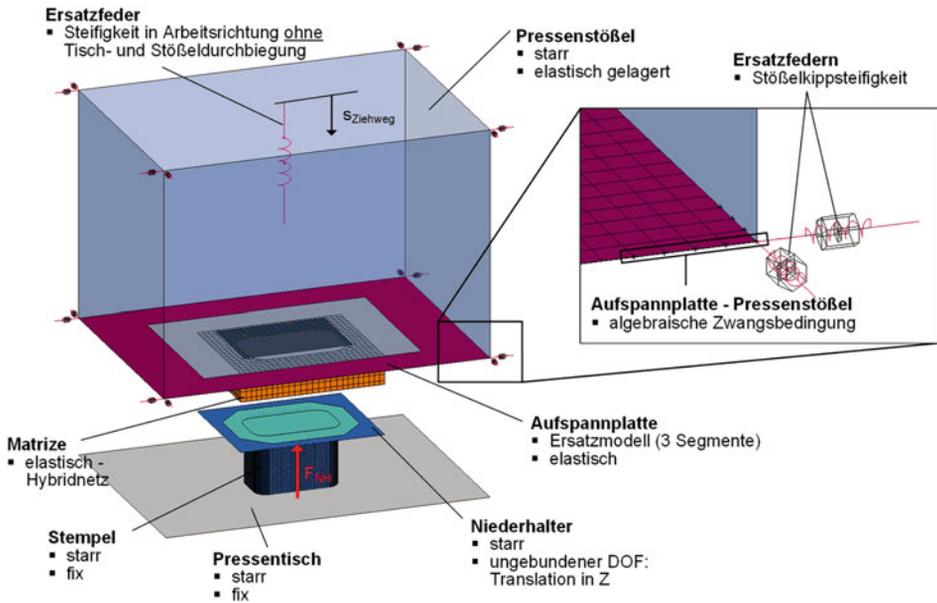


Abb. 6.6 Prozessmodell mit elastischen Randbedingungen und Modellerweiterungen [11]

eine elastische Matrize zur Simulation der Werkzeugdurchbiegung zum Einsatz. Zur Steigerung der Genauigkeit bei der Abbildung des elasto-statischen Verhaltens der Matrize ist diese mit einem hybriden Netz modelliert. Das hybride Netz verknüpft fein vernetzte Schalenelemente an der Werkzeugoberfläche mit einem grob mit Volumenelementen vernetzten Grundkörper. Dadurch kann das Durchbiegungsverhalten der Matrize mit hoher Genauigkeit bei gleichzeitig minimierter Rechenzeit abgebildet werden. Der Pressentisch und der Stempel des Werkzeuges sind starr modelliert. Der Stößel stützt sich über eine dem Auffederungsverhalten der Maschine entsprechende Ersatzsteifigkeit ab. Als Eingangsgrößen für die Modellberechnung werden der Stößelwegverlauf $s_{Ziehweg}$ und die Niederhalterkraft F_{NH} vorgegeben.

Sollen auch die Auswirkungen des dynamischen Maschinenverhaltens, das sich aus dem Verhalten der Antriebe und Regelungssysteme ergibt, auf den Prozess analysiert werden, kann die Modell-Code-Migration zum Einsatz kommen (Abb. 6.7). Die Modell-Code-Migration vereint die Modelle verschiedener Domänen in einer Simulationsumgebung. Die Differentialgleichungen des Maschinenmodells werden in Differenzgleichungen überführt, in das Prozessmodell integriert und in jedem Rechenschritt ausgewertet [12].

Das Modell in Abb. 6.7 zeigt die Umsetzung der Model-Code-Migration am Beispiel des Tiefziehprozesses für einen Rundnapf auf einer servo-mechanischen Spindelpresse [19]. In der Mitte der Abbildung sind die vernetzten Komponenten des Werkzeuges im

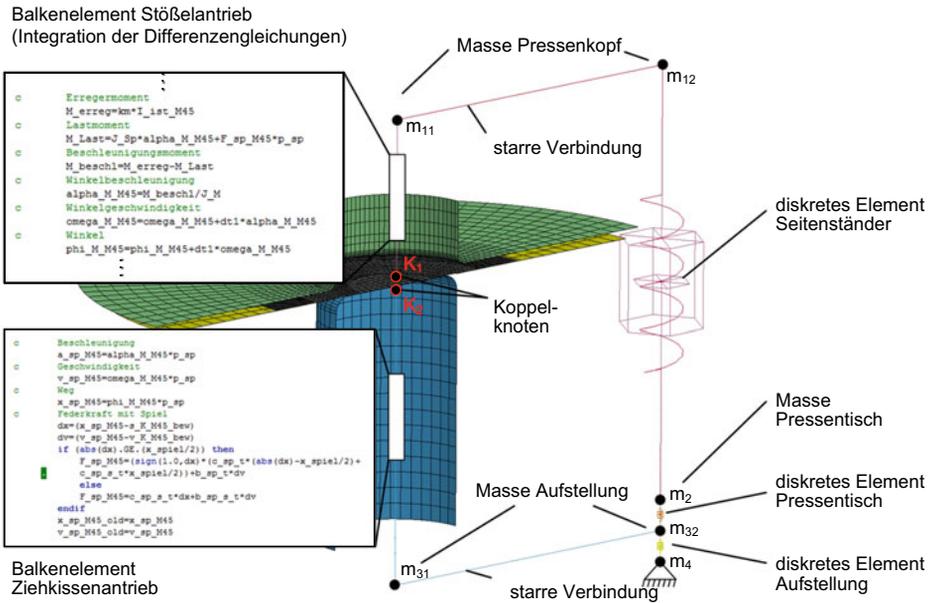


Abb. 6.7 Modell-Code-Migration am Beispiel eines Rundnapfmodells mit integriertem Modellgleichungen für die Abbildung des dynamischen Antriebsverhaltens [12]

FE-Modell zu sehen. Auf der rechten Seite der Abbildung ist das Pressengestell in Form eines Mehrmassenschwingers, ebenfalls in der FE-Umgebung modelliert. Das Verhalten der Antriebe wird über Differenzenmodelle, links in der Abbildung zu sehen, berechnet. Die Differenzenmodelle werden unter Nutzung von Balkenelementen im FE-Modell eingebunden. Die Balkenelemente werden dazu mit einem nutzerdefinierten Materialmodell verknüpft und über die Koppelknoten K_1 und K_2 an die FE-Netze des Stempels und der Matrize des Werkzeuges angebunden. So ist es möglich den Tiefziehprozess unter Berücksichtigung des dynamischen Einflusses der Antriebssysteme zu simulieren.

Der Nachteil dieser Simulationemethode besteht in der Berechnung des Antriebsverhaltens durch den Solver des Prozessmodells. Dadurch erfolgt die Berechnung nicht mit einer auf die Erfordernisse der Maschinensimulation angepassten Schrittweite, wodurch es zu Abweichungen zum realen Verhalten der Antriebe kommen kann. Auch das im Antriebsmodell verwendete Integrationsverfahren hat einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit bei der Berechnung des Bewegungsverhaltens.

Im Gegensatz zu dieser gemeinsamen Berechnung von Maschine und Prozess in einem Modell und durch einen Solver, berechnet die Simulatorkopplung die Modelle getrennt voneinander, in der für die jeweilige Domäne spezifischen Modellierungsumgebung. Innerhalb einer Koppelschleife werden definierte Zustandsgrößen zyklisch ausgetauscht und so während jedes Koppelzeitschrittes die Randbedingungen für die Berechnung der

Modelle neu definiert [20]. Die Kopplung der Modelle des Prozesses in der FE-Simulation und der Maschine in der Systemsimulation wird genutzt, um das Gesamtsystem und damit die Wechselwirkungen zwischen Maschine-Werkzeug-Werkstück virtuell abzubilden und zu untersuchen.

Abb. 6.8 zeigt das Modell für eine Simulatorkopplung von Maschine und Prozess am Beispiel des Umformprozesses einer Rechteckwanne auf einer hydraulischen Presse mit Mehrpunktziehkissen. Im Fokus des Modells steht die Untersuchung der Auswirkungen des Verhaltens des Ziehkissens auf den Prozess. Das Umformwerkzeug ist starr in der FE-Umgebung modelliert, wobei die Matrize an einen über elastische Randbedingungen abgestützten Stößel angebunden ist. Dadurch kann der Stößel im Raum kippen und auf die Kräfte, die durch das angebundene Mehrpunktziehkissen auf ihn einwirken, reagieren. Die Ziehkissenzyylinder, das Verhalten des Stößelantriebes und das Pressengestell sind bei diesem Modell in einer Umgebung der Systemsimulation abgebildet. Bei dieser Art der Simulation können verschiedene physikalische Domänen, wie die Mechanik, die Elektrik oder auch die Hydraulik, in einem Systemmodell abgebildet werden [21].

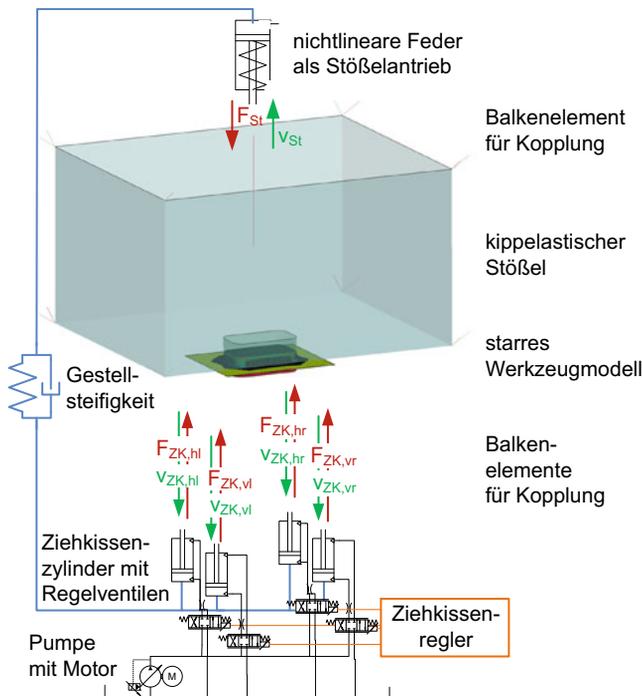


Abb. 6.8 Simulator-Kopplung am Beispiel einer Rechteckwanne mit elastischen Randbedingungen am Pressenstößel und gekoppeltem Verhalten der Ziehkissenantriebe [8]

Der Stößelantrieb als auch das Pressengestell sind dabei stark vereinfacht modelliert. Das Pressengestell ist als Feder-Dämpfer-Element mit den Parametern der Seitenständer der Presse abgebildet. Für den Stößelantrieb kommt eine nichtlineare Feder zum Einsatz die entsprechend des Verhaltens des hydraulischen Einpunktantriebes der Umformmaschine parametrisiert ist.

Die Kopplung zwischen den Modellen der Maschine und des Prozesses erfolgt bei dieser Art der Modellierung über Balkenelemente, in denen eine Kommunikationsschnittstelle hinterlegt ist. Über das TCP/IP Protokoll werden so die Koppelgrößen der Ziehkissenzyylinderkräfte F_{ZK} und der Ziehkissenzylingergeschwindigkeiten v_{ZK} zyklisch zwischen den beiden Simulationsumgebungen ausgetauscht.

Mit dieser Co-Simulation ist es möglich sowohl das Verhalten der Antriebe als auch das Prozessverhalten mit sehr hoher Genauigkeit zu simulieren, da beide Modelle in der eigenen Modellierungsumgebung durch einen eigenen Solver mit einer der Simulationsrechnung entsprechenden Schrittweite berechnet werden. Nachteil bei dieser Art der Berechnung ist die gegenüber der reinen FE-Simulation als auch der Model-Code-Migration gesteigerte Simulationszeit durch die verteilte Berechnung und die Kommunikation zwischen den Simulatoren.

6.4 Rechenzeitoptimierung der FE-Prozesssimulation

Die Echtzeitfähigkeit der im Bereich der Umformtechnik eingesetzten physikalisch basierten Simulationsmethoden wird vor allem durch die hohe Rechenzeit bei der Berechnung der FE-Modelle des Prozesses beschränkt. Die Modelle rechnen je nach Detaillierungsgrad über mehrere Stunden wohingegen der Zeitbedarf für einen realen Umformprozess in der Regel nur im Bereich von Sekunden liegt. Die Berücksichtigung von Materialschwankungen und Umgebungsbedingungen im laufenden Prozess setzt aber die Echtzeitfähigkeit der eingesetzten Modelle und eine Berechnungsumgebung auf der Steuerung voraus. Nur so können die Modelle rechtzeitig die notwendigen Daten für eine Prozesssteuerung oder -regelung bereitstellen, auf der Steuerung der Presse implementiert werden und während der Produktion verlässliche Daten über den Maschinen- und Prozesszustand liefern, um Vorhersagen für die bei der Umformung notwendigen Parameter bereitzustellen. Es ist folglich notwendig, die Berechnungszeit bei der Auswertung der FE-Modelle deutlich zu reduzieren.

Als Methoden für die Rechenzeitoptimierung von FE-Prozessmodellen stehen heute die Methoden der modalen Reduktion, der statischen Kondensation sowie der Einsatz hybrider Netze zur Verfügung [22]. Das Verfahren der modalen Reduktion schränkt den Frequenzbereich des Modells ein, indem nur bestimmte, bei der Modellbildung auszuwählende und für die Untersuchungen im Gesamtsystem relevante Eigenformen im Modell berücksichtigt werden [23]. Bei der statischen Kondensation wird das Nachgiebigkeitsverhalten der dreidimensionalen Werkzeugteile auf die Wirkflächen übertragen.

Dadurch werden die Elementfreiheitsgrade reduziert und somit das Modell in eine einfacher zu berechnende Struktur überführt [24]. Diese Methode findet in verschiedenen Bereichen der Blechumformung Anwendung. So nutzt [25] die statische Kondensation, um die Rechenzeit für einen inkrementellen Blechumformprozess zu reduzieren, indem nur der aktiv bearbeitete Bereich elastisch-plastisch gerechnet wird. [18] wendet diese Methode an, um die elasto-statischen Eigenschaften der Maschine im Prozessmodell zu berücksichtigen. [11] reduziert die Rechenzeit bei der FE-Umformsimulation durch die Anwendung von hybriden Netzen im Bereich der Umformwerkzeuge. Dabei wird eine fein vernetzte Schalenstruktur über einen Kontakt auf einen grob vernetzten, elastisch modellierten Werkzeuggrundkörper aufgebracht.

Durch die konsequente Reduzierung des FE-Modells einer Rechteckwanne konnte in [26] eine Berechnungszeit für den Prozess erreicht werden, die nur das 3,5 fache der realen Prozesszeit von zwei Sekunden beträgt. Die Berechnungszeit des Referenzmodells ohne Rechenzeitoptimierung beträgt in diesem Beispiel 23 min. Ein Vergleich des Flanscheinzugs an ausgewählten Knoten im Modell zeigt dabei eine gute Übereinstimmung zwischen Referenz und optimiertem Modell.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass es aktuell noch an handhabbaren Methoden für die Erstellung und Berechnung ganzheitlicher Systemsimulationsmodelle fehlt, die den Prozess und alle daran beteiligten Fertigungsmittel analysierbar machen. Zudem liegen die Rechenzeiten für eine ganzheitliche Systemsimulation aufgrund der hohen Modellkomplexität selbst auf leistungsfähiger Hardware noch weit über der Zeit für die Herstellung eines Tiefziehteils.

6.5 Datengetriebene Modellierungsmethoden

Moderne Produktionsanlagen müssen aufgrund von Wettbewerbs- und Kostendruck immer höhere Anforderungen an die Bauteilqualität, Effizienz und Flexibilität erfüllen. Nach [27] können die daraus resultierenden Herausforderungen nicht mehr allein auf der physischen Seite des Produktionsprozesses bewältigt werden. Es ergibt sich die Notwendigkeit des Einsatzes cyber-physischer Produktionssysteme, die eine Verknüpfung zwischen der realen Welt und der rechnerbasierten virtuellen Welt darstellen [28]. Mit diesen Systemen können in der Simulation gewonnene Erkenntnisse direkt in den Produktionsprozess einfließen und dieser damit auf Basis virtueller Prognosen gesteuert oder geregelt werden. Eine wesentliche Voraussetzung dieser Symbiose ist die permanente Generierung und Analyse von Prozessdaten, die in cyber-physischen Produktionssystemen in Form von datenbasierten Modellen zur Prozessoptimierung und Regelung bereitgestellt werden können. Mit diesen datenbasierten Modellen können Zusammenhänge zwischen Prozesseingangs- und Ausgangsgrößen identifiziert werden, um auf Basis des damit

generierten Prozesswissens Sollwertvorgaben in Abhängigkeit vom Zustand der zu verarbeitenden Halbzeuge, der Fertigungsmittel und auch der Umgebungsbedingungen zu ermitteln.

In der Umformtechnik werden datengetriebene Modelle hauptsächlich zur Vorhersage und Vermeidung von Produktionsfehlern eingesetzt. Nach [29] können datengetriebene Methoden grundsätzlich in zwei Klassen unterteilt werden:

- **Parametrische Methoden:** Die Modellstruktur ist von Beginn an festgelegt. Die Anpassung des Modells an den realen Prozess geschieht über die Identifikation von Modellparametern. Ein einfaches Beispiel für diese Methoden sind lineare Regressionsmodelle.
- **Parameterfreie Methoden:** Die Modellstruktur ist nicht von Anfang an festgelegt, sondern entsteht während der Analyse der Daten des Anwendungsfalles. Methoden des Machine Learnings (ML) wie z. B. neuronale Netze sind in der Regel parameterfreie Methoden. Das Netz entsteht erst bei der Analyse der Daten und dem Erkennen von Zusammenhängen in diesen.

An den Beispielen eines U-Profiles und eines quadratischen Napfes werden in [29] Verfahren aus beiden Klassen in Bezug auf ihre Prognosegenauigkeit bei der Vorhersage der Rückfederung, der Blechdurchdünnung und der maximalen plastischen Dehnung für drei verschiedenen Materialien verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Vorhersagegenauigkeit der Modelle vom Anwendungsfall abhängig ist. Interessant ist die Schlussfolgerung, dass die Genauigkeit der Vorhersage steigt, wenn das Training der Modelle für einen der Anwendungsfälle (U-Profil oder Napf) mit den Datensätzen aller drei Materialien durchgeführt wird. Es ist also nicht notwendig für jedes Material ein einzelnes Modell zu trainieren, sondern es ist möglich alle Daten materialübergreifend in ein Modell einfließen zu lassen. In [30] werden verschiedene Methoden beider Klassen verglichen, um einen mathematischen Zusammenhang zwischen Prozessgrößen, Materialkennwerten und Qualitätskenngrößen zu identifizieren. Das Ziel ist es dabei den optimalen Wert für die Ziehkissensollkraft zu bestimmen. Die verschiedenen Methoden führen jedoch alle zu einer sehr ungenauen Vorhersage und erscheinen folglich für den dargestellten Anwendungsfall als nicht geeignet. In [31] findet sich eine Zusammenstellung von Arbeiten, die sich mit ML-Methoden in der Blechumformung beschäftigen. Für einen Großteil der Anwendungsfälle werden künstliche neuronale Netze eingesetzt. Als Trainingsdaten werden überwiegend Material- und Prozessparameter verwendet, um die Blechdehnung und die Rückfederung bei Entnahme des Bauteils aus dem Werkzeug vorherzusagen.

Entscheidend für die Qualität eines datengetriebenen Modells ist die Qualität der verwendeten Datensätze für dessen Training. Da sich die experimentelle Ermittlung von mechanischen Messgrößen während des Umformvorgangs aufgrund der schlechten Zugänglichkeit im Umformwerkzeug in der Regel schwierig gestaltet, können die notwendigen Datensätze auch durch Simulationsrechnungen unter Einsatz von FE-Modellen

generiert werden. Diese Methode kommt beispielsweise in [29, 32] zur Anwendung. Auf diese Weise können umfangreiche Parameterstudien durchgeführt und damit beliebig große Datensätze erstellt werden. Voraussetzung dabei ist allerdings eine ausreichend hohe Modellqualität, da alle wesentlichen Einflüsse und Zusammenhänge während des Umformvorganges erfasst werden müssen, um auch sinnvolle Daten für das Training datenbasierter Modelle zu generieren.

6.6 Anwendungen von Simulationsmodellen mit Prozess-Maschine Interaktion

Die Anwendung der verschiedenen dargelegten Ansätze und Methoden der Modellbildung und Simulation des Umformprozesses unter Berücksichtigung der Prozess-Maschine Interaktion, erfolgt für die in Abschnitt 6.2 dargestellten Einsatzbereiche bei der Blechumformung.

Inbetriebnahme von Tiefziehwerkzeugen

Aufgrund des hohen Automatisierungsgrades, des komplexen Prozessverhaltens in der geschlossenen Werkzeugform und der großen Stückzahlen werden Tiefziehwerkzeuge auf Try-Out-Pressen in Betrieb genommen, um den Stillstand auf der eigentlichen Produktionspresse so kurz wie möglich zu gestalten (Abb. 6.9).

Durch die zuvor erklärten Simulationsansätze kann die Inbetriebnahme Schritt für Schritt in die virtuelle Welt überführt werden. Im Folgenden wird die Inbetriebnahme eines Tiefziehwerkzeuges in die Teilschritte mechanische Einarbeitung (Anpassung der Werkzeugaktivflächen) und Sollwerteneinstellung (Ziehkissenzyylinderkräfte) unterteilt.

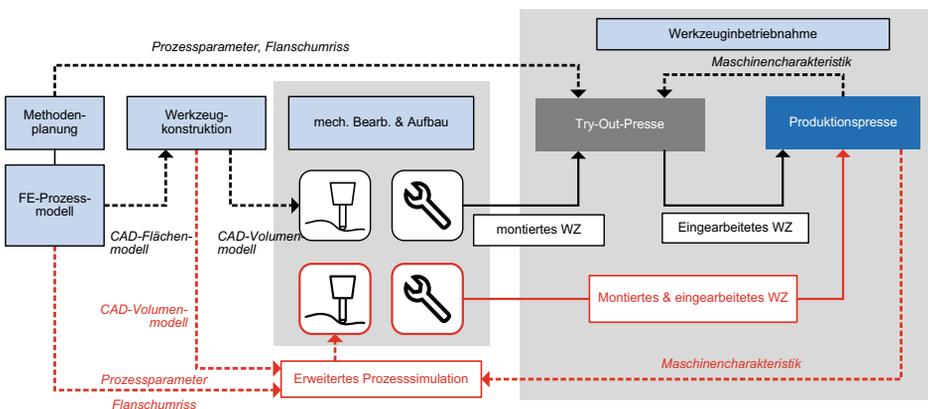


Abb. 6.9 Verlagerung der Inbetriebnahme von der Try-Out-Presse in die virtuelle Welt

Mechanische Einarbeitung

Aufgrund der Tatsache, dass in realen Tiefziehprozessen, entgegen der Definition, Blechdickenänderungen nicht verhindert werden können und Werkzeuge beziehungsweise Pressen herstellungsbedingte Ungenauigkeiten und nachgiebigkeitsbedingte Verlagerungen unter Last aufweisen, ergibt sich die Notwendigkeit Bauteil, Werkzeug und Maschine aufeinander abzustimmen. Dieser Schritt der Werkzeuginbetriebnahme wird als Einarbeitung bezeichnet und besteht wiederum aus mehreren Arbeitsschritten. Zur Einarbeitung von Tiefziehwerkzeugen gibt es verschiedene Strategien und Stellgrößen. Zunächst muss der Niederhalter eingearbeitet werden, um die Herstellung von falten- und rissfreien Bauteilen zu erreichen. In einem zweiten Hauptschritt wird ein gleichmäßiges Druckbild bei geschlossenem Werkzeug zwischen Stempel, Bauteil und Matrize herausgearbeitet. Dies garantiert ein vollständiges Ausformen aller Radien im Bauteil.

Da ein wesentlicher Teil der Einarbeitung der Werkzeuge auf die Wechselwirkung zwischen Prozess, Werkzeug und Maschinen zurückzuführen ist, muss auch eine Virtuelle Inbetriebnahme Modelle nutzen, welche diese Wechselwirkungen abbilden.

Das Tuschieren des Niederhalters erfolgt in drei Stufen [1]. Zunächst wird in Stufe Eins ein gleichmäßiges Tuschierbild zwischen Niederhalter und ebenen Blech im geklemmten Zustand eingearbeitet. Tuschierbilder werden durch einen einseitigen Farbauftrag auf eine Werkzeughälfte und dessen Übertragung auf den Kontaktpartner bei geklemmten oder geschlossenem Werkzeug erstellt und anschließend hinsichtlich Homogenität bewertet. In Stufe Zwei erfolgt die Berücksichtigung der Blechaufdickung als Folge der Umformung. In Bereichen großer Blechdickenzunahme zeigt das Tuschierbild eine dunkle Farbe, was einem hohen Normaldruck entspricht. An diesen Stellen wird manuell Material von der Niederhalteroberfläche abgetragen. Dies kann im Virtuellen durch Morphing-Werkzeuge nachgestellt werden (Abb. 6.10). Im Beispiel ist die exakt modellierte Werkzeugoberfläche durch algebraische Zwangsbedingungen an die elastische Werkzeugstruktur angebunden. Durch Verschieben der Knotenkoordinaten im losgelösten Zustand lässt sich die Oberfläche leicht anpassen und ins Prozessmodell zurückspeisen.

In Stufe Drei wird der Werkstofffluss aktiv beeinflusst, um zunächst Gutteile zu produzieren und im Anschluss die Umriss der hergestellten Bauteile an die Simulation

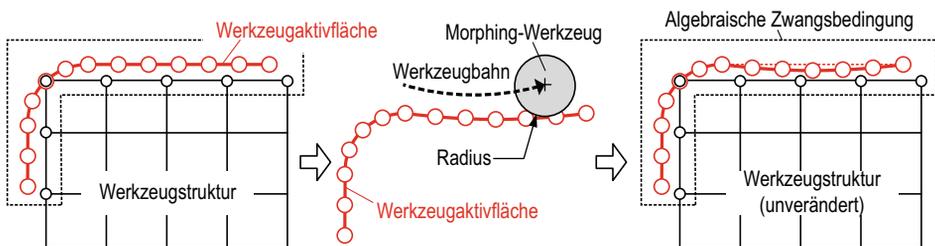


Abb. 6.10 Änderung der Werkzeuggeometrie durch Morphen des Oberflächennetzes

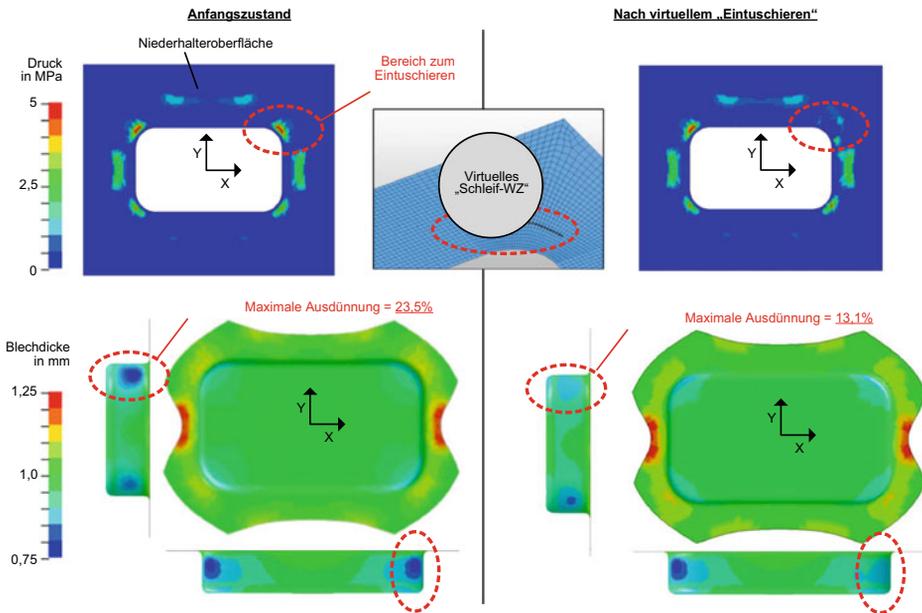


Abb. 6.11 Virtuelles Einarbeiten (Tuschieren) des Niederhalters

anzupassen. Man geht davon aus, dass sich bei identischen Flanschmrisen ein ähnliches Rückfederungsverhalten einstellt und damit dessen numerische Kompensation korrekt reproduziert wurde.

Angewandt auf ein Rechteckwanenwerkzeug zeigt die Simulation in Bereichen mit starker Blechdickenzunahme einen höheren Normaldruck im Vergleich zu umliegenden Bereichen (Abb. 6.11 links).

Im Beispiel wird an der rechten oberen Ecke des Niederhalters Material abgetragen. Dies führt zum einen zu einer gleichmäßigeren Normaldruckverteilung, auf der anderen Seite wird hier gleichzeitig auch der Werkstofffluss in die Matrize verbessert (Schritt Drei des Niederhaltertuschierens, das so genannte Hart-Weich-Tuschieren). Die Blechausdünnung verringert sich im kritischen Eckbereich (Abb. 6.11 rechts).

Eine wesentliche Randbedingung zur korrekten Abbildung des Niederhalterdrucks stellt die korrekte Nachbildung des Pinolenträgbildes dar. Dazu muss die Ziehkissenstruktur ebenfalls elastisch modelliert werden. Da dem Maschinenbetreiber und dessen Prozessingenieuren oft keine CAD-Daten des Ziehkissens vorliegen und zudem dessen aufwendige FE-Modellierung und Integration in die Prozesssimulation lange Rechenzeiten mit sich bringt, werden effiziente Ersatzmodelle des Ziehkissens benötigt [33]. Dabei können abhängig vom Ziehkissen und Belastungsfall unterschiedliche Modelltieffen notwendig sein (Abb. 6.12). Aufgrund der schwierigen Zugänglichkeit der Ziehkissen

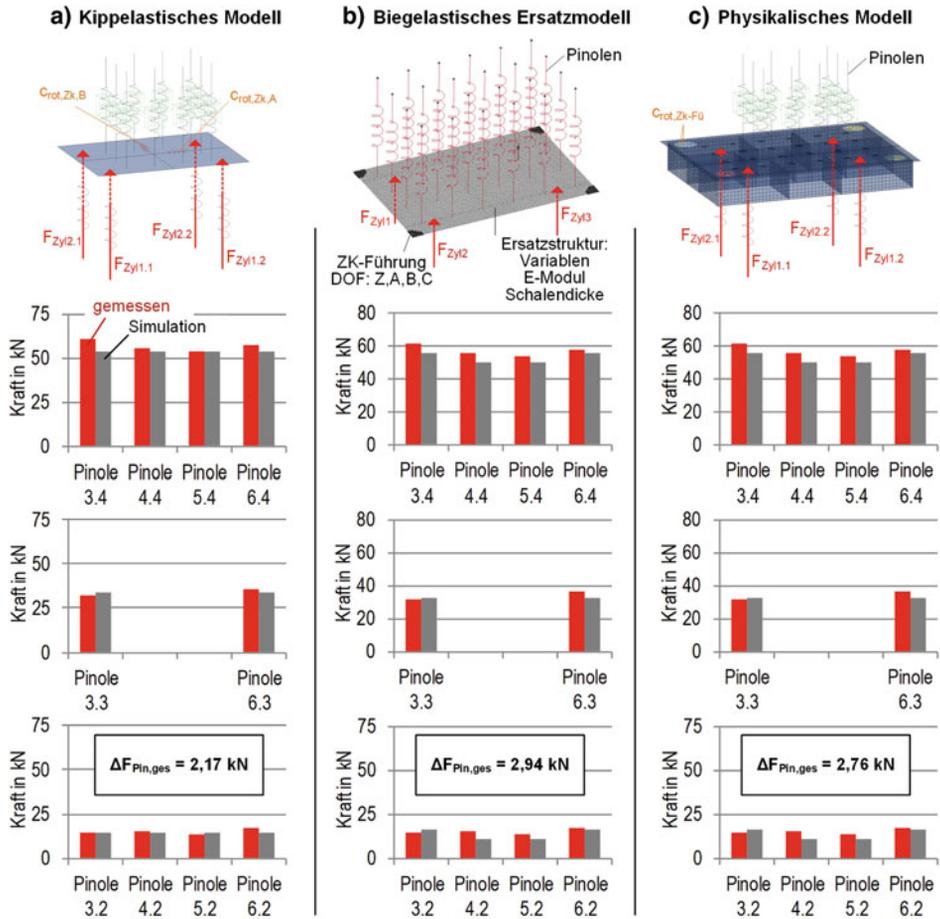


Abb. 6.12 Abstraktionsstufen zur Abbildung eines Ziehkissens [33]

(ZK) sind oft einfachere Modelle sinnvoll, da diese durch wenige Messwerte parametrieren werden können.

Regelabweichung hydraulischer Ziehkissen

Ziehkissen werden meist als hydraulische Systeme ausgeführt, welche durch ein stark nichtlineares und vom Arbeitspunkt abhängiges Verhalten gekennzeichnet sind. In der Literatur sind signifikante Einflüsse der Geschwindigkeit und der Sollkrafteinstellung auf die Istkraftverläufe nachgewiesen [11]. Abb. 6.13 zeigt den Vergleich zwischen Soll- ($F_{ZK,soll}$) und Istkraftverläufen ($F_{ZK,ist}$) eines hydraulischen Ziehkissens für verschiedene Stößelgeschwindigkeiten (v_{St}). Es ist ebenfalls davon auszugehen, dass sich Ziehkissen von unterschiedlichen Pressen nicht identisch verhalten [34].

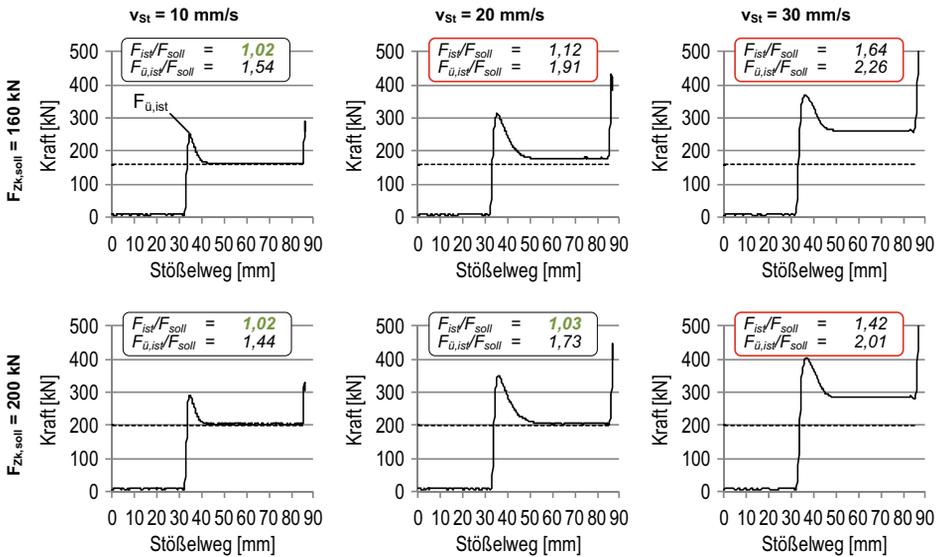


Abb. 6.13 Abweichungen der Istkraftverläufe (F_{ist}) von der Sollkraft (F_{soll}) in Abhängigkeit der Stößelgeschwindigkeit (v_{St})

Aufgrund des dominanten Einflusses der Ziehkissenistkraft auf den Werkstofffluss, ist deren Abweichung vom Sollwert eine der wesentlichen Ursachen der verbleibenden Unterschiede zwischen dem real hergestellten und dem simulierten Bauteil.

In [11] wird eine Vorgehensweise zur vorrausschauenden Berechnung der Ziehkissenzyklindersollkräfte unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen von Prozess und Maschine vorgeschlagen und demonstriert. Ausgehend von der idealen Niederhalterkraft wird eine Ziehkissenzyylinderkraft abgeleitet. Diese wird als Startwert in eine Prozesssimulation mit Prozess-Maschine Interaktion übergeben. Anhand eines klassischen Optimierungsproblems wird die Abweichung der Flanschumrisse an definierten Messpunkten durch Variation der Ziehkissenzyylinderkraft minimiert. Unterschreitet die Quadratwurzel des mittleren quadratischen Fehlers \sqrt{MSE} den vorgegebenen Grenzwert Z , wird die Zylinderkraft F_{Zyl} übernommen. Abb. 6.14 illustriert diese Vorgehensweise.

In Abb. 6.15 ist das Ergebnis dieser Optimierung anhand des Beispiels einer Rechteckwanne dargestellt. Die Fertigung erfolgt unter Nutzung eines Vierpunktziehkissens, wobei die Kräfte der vier antreibenden Zylinder (F_{Zyl}), variiert werden mit dem Ziel die Sollwerteinstellung für die Fertigung eines symmetrischen Bauteils zu bestimmen. Auf diese Art und Weise konnte z. B. der dominierende Einfluss der Stößelkipfung auf den Flanscheinzug (FLE) vorab simuliert und korrigiert werden. Das mit Maschineneigenschaften erweiterte FE-Prozessmodell wurde anhand von Experimenten verifiziert und das Vorgehen zur Identifikation der Ziehkissenzyylinderkräfte anhand realer Bauteile validiert (Abb. 6.15).

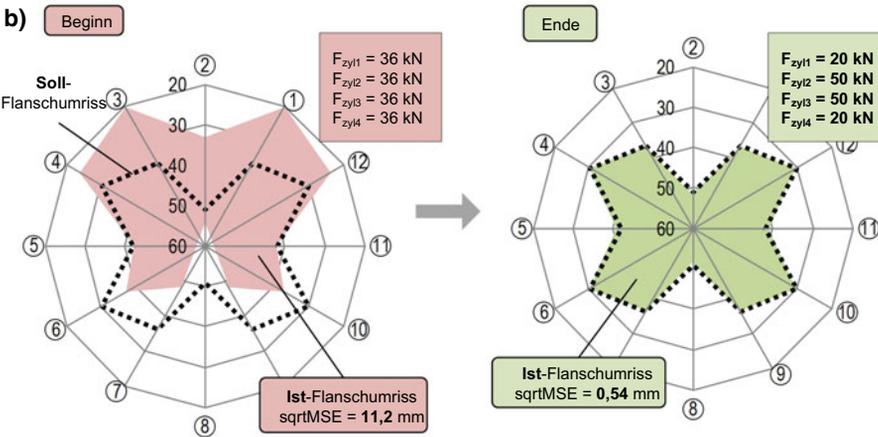
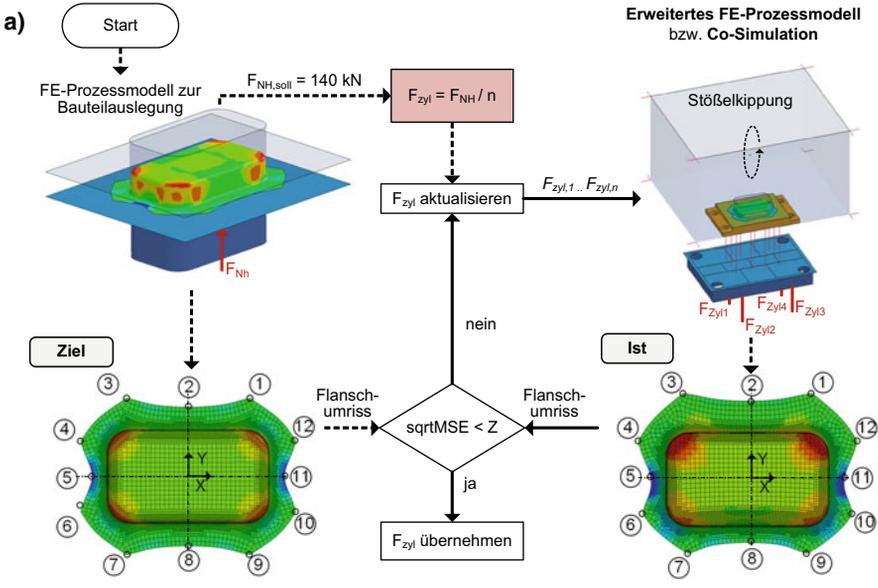


Abb. 6.14 a) Vorgehensweise zur Identifikation der Ziehkissenzyylinder-Sollkräfte auf Basis erweiterter FE-Prozessmodelle, b) Exemplarische Minimierung der Abweichung zwischen Ist- und Sollflanschumriss

Anpassung von Sollwerteinstellungen bei Chargenwechsel

Trotz enger Toleranzen weisen Blechchargen der gleichen Werkstoffsorte prozessrelevante Unterschiede auf. Durch vorherige Simulation der entsprechenden Werkstoffparameterbereiche lassen sich Kennfelder ermitteln, welche in der Produktion eine schnelle Anpassung

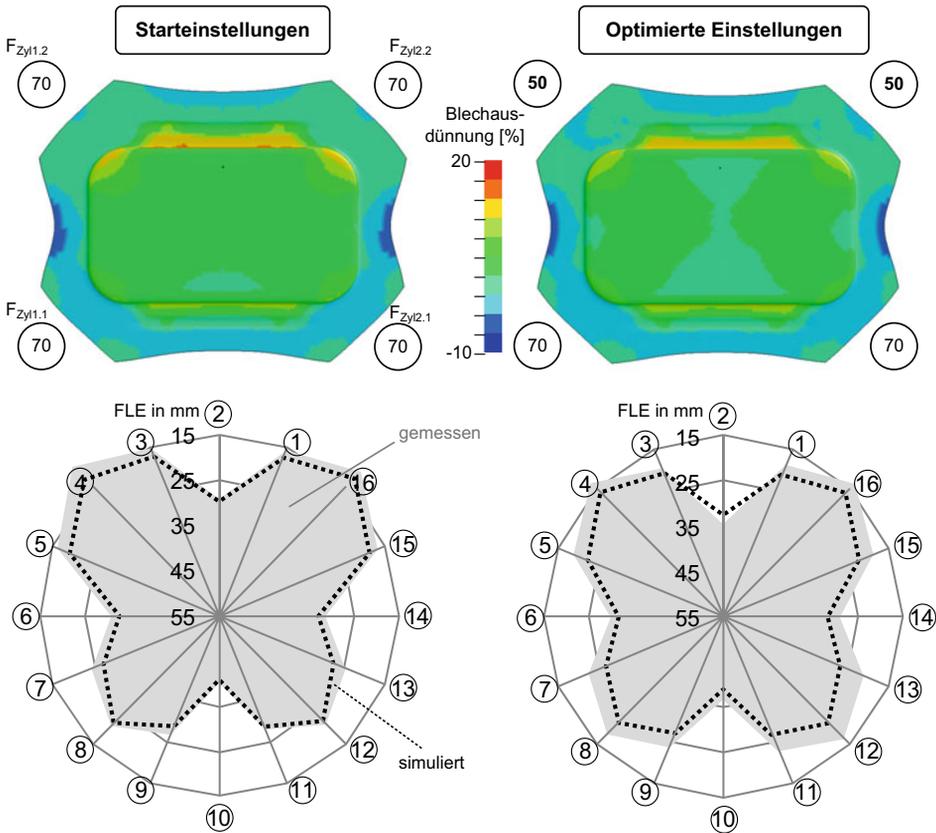


Abb. 6.15 Anpassung des Bauteilumrisses an die Simulation

der Maschineneinstellungen ermöglichen. Notwendige Voraussetzung ist eine entsprechende Messtechnik zur Ermittlung der aktuellen Werkstoffkennwerte. In Abb. 6.16 ist die Reaktion auf Parameterschwankungen des Eingangsmaterials am Beispiel der Ausgangsblechdicke s_0 dargestellt. Mit Hilfe der Simulation und Optimierung der Ziehkissenzyllindersollkräfte können die für die jeweilige Blechcharge notwendigen Fertigungsparameter bestimmt werden. Im Beispiel werden ausgehend von den Sollwerten der Ziehkissenzyllinder für das Coil 1 in grün die Parameter in der Simulation soweit optimiert, dass auch mit der Coil 2 in schwarz, Teile in der gleichen Qualität produziert werden können.

Anpassung von Sollwerteinstellungen bei Werkstoffwechsel

Wird geplant mit dem gleichen Werkzeug ein Bauteil aus einem anderen Werkstoff herzustellen, bringt dies wesentliche Herausforderungen mit sich. Wechselnde Werkstoffe führen nicht nur zu unterschiedlichem plastischen Werkstoffverhalten und somit zu Veränderungen im Prozessverhalten, sondern bedingen auch andere Prozesskräfte und damit

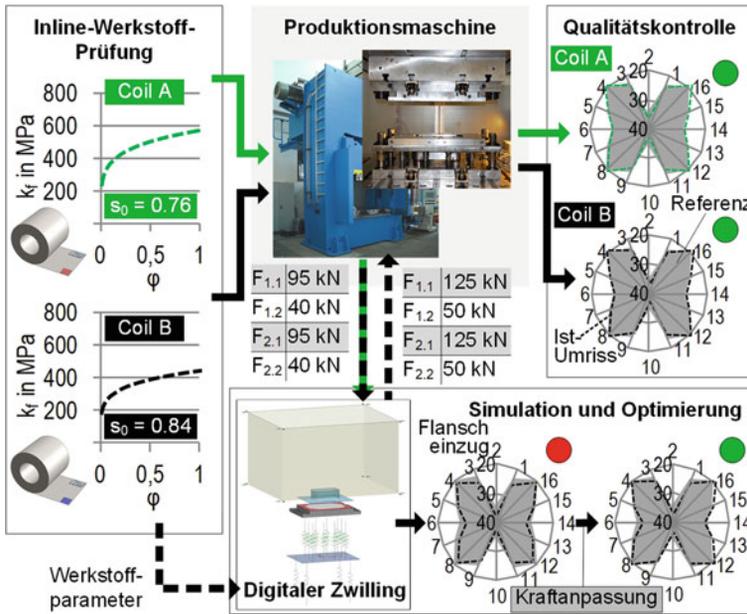


Abb. 6.16 Materialabhängige Bestimmung der Ziehkissenzyklersollwerte einer Presse mit Mehrpunktziehkissen [35]

ein verändertes Maschinenverhalten. In [36] wird gezeigt, dass der Einsatz von Werkstoffen mit höherer Festigkeit zu größeren Stößel- und Ziehkissenkippen und damit zu Bauteilen mit unterschiedlichen Fehlern führen. Die verschiedenen Bauteilfehler können virtuell vorhergesagt und korrigiert werden. Ist eine Korrektur durch Anpassung der Maschinenparameter nicht möglich, kann über die Wirtschaftlichkeit der Überarbeitung des Werkzeuges entschieden werden. Abb. 6.17 zeigt die Auswirkungen der Festigkeitssteigerungen anhand der Werkstoffe DC04, HC340, DP600 und TRIP780 und die Zuordnung der in der Simulation erkannten Bauteilfehler.

Anpassung der Sollwerteinstellungen von Hub zu Hub

Aufgrund der kurzen Prozesszeiten ist eine Anpassung der Stellgrößen, d. h. der Niederhalterkraft und der Pressenhubzahl, zwischen zwei Pressenhüben durch den Bediener nicht möglich und muss in Echtzeit durch die Pressensteuerung erfolgen.

Für einen Biegeprozess von Blechteilen entwickelt [37] ein Online-Modell zur Korrektur der Rückfederung. Anhand eines Regressionsmodells, das den Biegewinkel in Abhängigkeit vom Stößelweg beschreibt, werden die Sollwerte auf der Basis einer prozessintegrierten Messung des Halbzeugzustandes generiert. [38] stellt Möglichkeiten zur Prozessregelung des Tiefziehprozesses auf Basis von Flansch einzugssensoren im Werkzeug

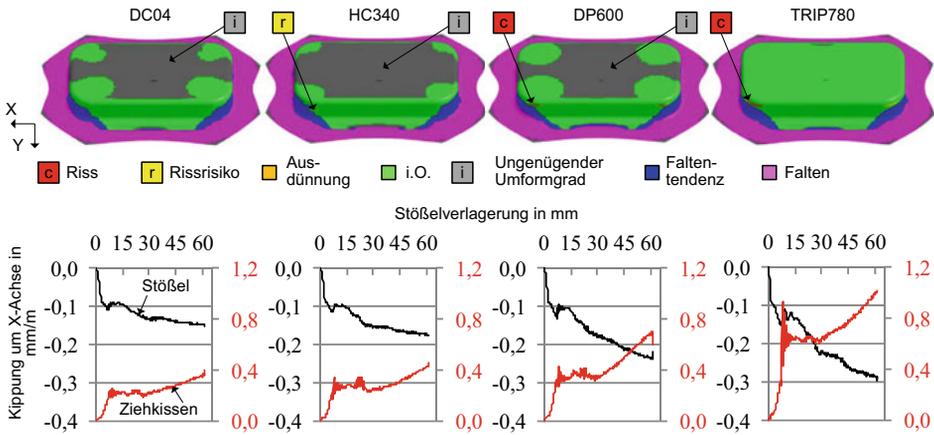


Abb. 6.17 Einfluss des Kippungsverhaltens der Maschine auf die Bauteilqualität für unterschiedliche Werkstoffe

im Labormaßstab vor und formuliert die Anforderung, schnellere Prozessmodelle zu entwickeln, um Steuerungssysteme zu entwickeln, die sowohl sensorische als auch aktorische Aufgaben zur Prozessregelung übernehmen können.

Ziel für die Realisierung einer Hub-zu-Hub Regelung muss es sein, die virtuellen Abbilder von Maschine und Prozess sowie deren Interaktionsverhalten in einer ganzheitlichen Systemsimulation echtzeitfähig berechenbar zu gestalten und auf der Maschinensteuerung als mitlaufenden Digitalen Zwilling zu implementieren. So können innerhalb weniger Hübe Vorhersagen zu Prozessparametern getroffen und eine Prozessregelung implementiert werden. Mit Hilfe derer wird die Maschine in die Lage versetzt, selbstständig auf sich ändernde Eingangsgrößen wie beispielsweise die Blechdicke oder den Beölungszustand zu reagieren und den Prozess aktiv zu steuern. Abb. 6.18 zeigt den schematischen Entwurf eines solchen steuerungsintegrierten Digitalen Zwillings, mit dem eine modellbasierte Vorhersage der Prozessparameter auf Basis des aktuellen Material- und Maschinenzustandes erfolgen kann.

Anpassung der Sollwerte über dem Pressenhub

Datengetriebene Methoden ermöglichen völlig neue Ansätze zur Prozessregelung im Bereich der Umformtechnik. In [39] werden in einem mehrstufigen Umformprozess die Fertigungsdaten der ersten Umformstufe für die Regelung der folgenden Umformschritte genutzt. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, den kompletten Umformprozess robuster, flexibler und effizienter zu gestalten. In [40] wird ein Prozessmodell auf Basis experimenteller Datensätze erstellt, mit dem qualitative Aussagen über den Einfluss der Niederhalterkraft auf den Prozessverlauf getroffen werden können. Die Umsetzung einer Prozessregelung auf Basis dieser Daten zeigt dabei gute Ergebnisse, sofern sich andere

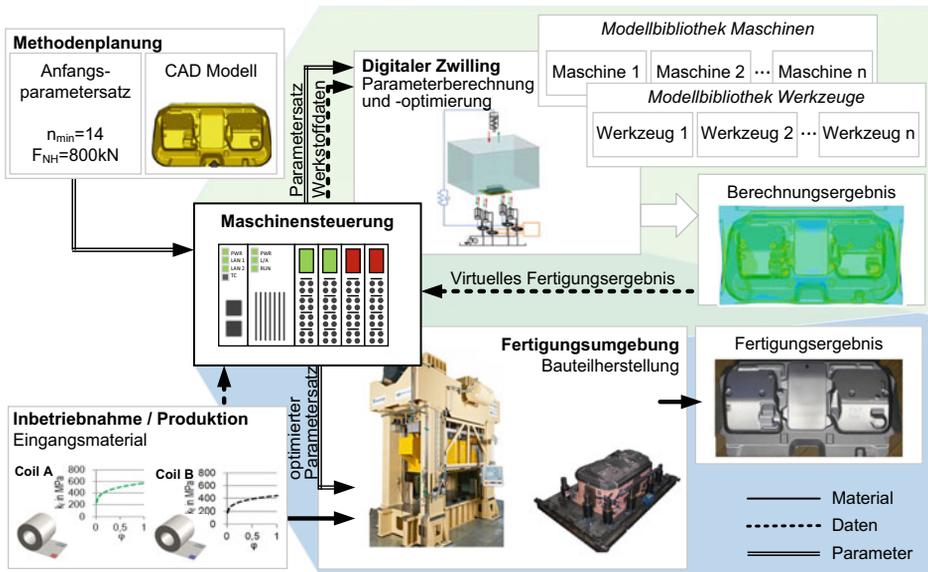


Abb. 6.18 Schema eines steuerungsintegrierten digitalen Zwillings zur Bestimmung prozessaktueller Sollwerte für die Maschinensteuerung

Prozessparameter nicht ändern. In [10] werden Metamodelle für die Berechnung der Stellgrößen beim Tiefziehen entwickelt. Dazu wird die Korrelation zwischen markanten Fehlerbildern und Einfluss- beziehungsweise Einstellgrößen im Prozessmodell untersucht und ein Prozessfenster abgeleitet, in dem keine Fehler im Bauteil auftreten. Das Prozessfenster wird über eine weitere Korrelation mit dem Flanscheinzug in Beziehung gebracht. Die Möglichkeit der Prozessregelung mit den erarbeiteten Methoden wird zwar beschrieben, jedoch nicht mit Messergebnissen unterlegt. Eine weitere datengetriebene Methode zur Bestimmung der Sollwerte auf der Grundlage großer Datenmengen stellt [30] vor. Es werden verschiedene Ansätze (support vector machines, lineare und polynomiale Regressionsmodelle und neuronale Netze) für die mathematische Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Einstellgrößen, Materialkennwerten und Qualitätskenngrößen untersucht und die Ergebnisse für einen nicht genannten Ansatz den Versuchsdaten gegenübergestellt. Die Methode führt dabei jedoch nur zu einer sehr ungenauen Vorhersage der Ziehkissen Sollkräfte.

Die aktuellen Ergebnisse datengetriebener Ansätze zur Prozessregelung lassen zwar Potenziale erkennen, eine endgültige Aussage zu deren Praktikabilität lässt sich allerdings noch nicht treffen.

6.7 Zusammenfassung und Ausblick

Die große Variantenvielfalt, hohe Komplexität und enorme Kosten der modernen Blechumformung erfordern Simulationsunterstützung entlang des gesamten Lebenszyklus eines Umformwerkzeuges. Heutige Simulationswerkzeuge ermöglichen Prognosen zur Machbarkeit von Bauteilen, deren detaillierte Prozessplanung und die Berechnung von Prozess-Maschine Interaktionen. Letzteres wird allerdings meist akademisch betrieben. Um die Modelle in die industrielle Praxis zu etablieren, müssen Modellierungs- und Parametrierungsaufwände gesenkt sowie die Unsicherheit der Modellaussagen reduziert werden. Dies und die explizite Abstimmung von Rechentechnik auf Modellierungsansätzen wird in Zukunft zur vollständigen Virtuellen Inbetriebnahme führen. Prozessregelungen sind derzeit nur von Hub-zu-Hub realistisch und ausschließlich durch datengetriebene Methoden durchführbar. Einschränkend wirkt hier die mangelhafte Übertragbarkeit der Methoden auf neue Werkzeuge. Aus Sicht der Autoren werden zukünftig hybride Verfahren aus physikalisch basierten und datengetriebenen Modellen das Feld der modelbasierten Prozessregelung erobern.

Literatur

1. Birkert A, Haage S, Straub M (2013) Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile. Springer, Berlin
2. Nguyen Q, Behrens BA, Krimm R (2017) Untersuchung der Eignung von Interpolationsmethoden zur Erstellung energieeffizienter Stößelkinematik von Servopressen. *utf-science I*
3. Danel A, Maillard A, Kaufmann J (2016) Influence of servo-press kinematics on the formability of drawing parts. *Challenges in Forming High-Strength Sheets*
4. Gruner MP, Wunderlich S, Hoher S, Höhr S, Birkhold M, Verl A (2016) Vorteile von Servospindelpressen in der intelligenten Vernetzung der Produktion im Zeitalter von Industrie 4.0. *Prozesstechnik in der Blechverarbeitung Interaktion Maschine | Werkzeug*. EFB-Kolloquium Blechverarbeitung, T 42. Hannover
5. Purr S, Moelzl K, Meinhardt J, Merklein M (2016) Das Presswerk 4.0 – Data Mining zur Vermeidung von Qualitätsproblemen bei der Herstellung von Karosseriebauteilen. *Prozesstechnik in der Blechverarbeitung Interaktion Maschine | Werkzeug*. EFB-Kolloquium Blechverarbeitung, T 42. Hannover
6. Canti R (2016) Analyse für eine belastungsgerechte Auslegung von Presswerkzeugen am Beispiel Niederhalter und Schiebersystem, Dissertation, TU München
7. Helmke M, Majer H, Thanassakis A (2016) Improvement of hydraulic control quality for deep drawing presses through retrofit. *International Fluid Power Conference*
8. Schulze T, Weber J, Großmann K, Penter L, Schenke C (2015) Hydraulic die cushions in deep drawing presses – analysis and optimization using coupled simulation. *ASME/BATH Symposium on Fluid Power and Motion Control*
9. Großmann K, Penter L, Hardtmann A, Weber J, Lohse H (2012) FEA of deep drawing with dynamic interactions between die cushion and process enables realistic blank holder force predictions. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 3

10. Harsch D, Heingärtner J, Hortig D, Hora P (2017) Observability of quality features of sheet metal parts based on metamodels. International Conference on Computational Plasticity. Fundamentals and Applications. COMPLAS, XIV
11. Penter L (2016) Qualifizierung von FE-Prozessmodellen zur Inbetriebnahme von Karosserieziehwerkzeugen, TU Dresden Dissertation, Dresden
12. Schenke, C, Knut G (2014) Modellierungsansätze und Simulationsmethoden zur Berücksichtigung dynamischer Maschineneigenschaften bei der Blechumformsimulation. 13. LS-Dyna Anwenderforum. Bamberg
13. Wörn H, Brinkschulte U (2005) Echtzeitsysteme. Springer, Berlin
14. Hummelsberger R, Meinhardt J, Grossenbacher K, Kreissl S (2016) Strategische Ausrichtung der Presswerke der BMW Group. Prozesstechnik in der Blechverarbeitung Interaktion Maschine | Werkzeug. EFB-Kolloquium Blechverarbeitung, T 42. Hannover
15. Filzek J, Schröder H, Keil D, Aha B, Zimmermann R (2018) Grundlagen für die Reibungsberücksichtigung in der Prozessauslegung und -regelung mit Prelube der zweiten Generation. Weiterführende Funktionsintegration in der Prozesskette Maschinen – Werkzeuge – Systeme. EFB-Kolloquium Blechverarbeitung, T 46. Hannover
16. Dietrich F, Filzek J, Lorenz D (2017) Berücksichtigung temperaturinduzierter Effekte auf die Reibung in der Blechumformung. ESI DACH Forum
17. Bäume T (2020) Prozessregelungen durch piezoelektrisch erweiterte Umformwerkzeuge, TU Chemnitz Dissertation. Chemnitz
18. Brost A, Roll K, Volk W (2013) Berücksichtigung der elastischen Eigenschaften von Umformmaschine und Umformwerkzeug. Umformen, Schneiden, Verbinden im Leichtbau | Machbarkeit – Produktivität – Qualität. EFB-Kolloquium Blechverarbeitung, T 36. Hannover
19. Schenke C, Großmann K (2014) Modellierungsansätze und Simulationsmethoden zur Berücksichtigung dynamischer Maschineneigenschaften bei der Blechumformsimulation. 13. LS-Dyna Anwenderforum
20. Behrens BA, Marthiens O, Matthias T, Helduser S, Lohse H (2008) Antriebs- und Prozessoptimierung hydraulischer Tiefziehpressen mit Hilfe der gekoppelten Simulation Nr. 291
21. Großmann K (1998) Die Realität im Virtuellen. Dresden: Schriftenreihe des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen: Lehre Forschung Praxis
22. Haufe A, Lorenz D, Roll K, Bogon P (2008) Concepts to take elastic tool deformations in sheet metal forming into account. 10th International LS-DYNA Conference. Detroit
23. Sekeler P (2012) Modellbasierte Berechnung der Systemeigenschaften von Maschinenstrukturen auf der Steuerung, Universität Stuttgart
24. Roll K, Hoffmann J (2005) Ein Möglichkeit zur Berücksichtigung der elastischen Werkzeugeigenschaften bei der Blechumformsimulation. 4. LS-DYNA Anwenderforum. Bamberg
25. Sebastiani G, Stoyanova I, Güzel A, Güner, A, Brosius A, Tekkaya AE (2009) Effiziente Simulation inkrementeller Blechumformprozesse mittels statischer Kondensation. 10. Roundtable Simulation in der Massivumformung
26. Heiland S, Klingel L, Penter L, Jaensch F, Schenke C, Ihlenfeldt S, Verl A (2021) Virtual Tool Commissioning using LS-DYNA Functional Mock-up Interface. 13. Europäische LS-DYNA Konferenz
27. Hagenah H, Schulte R, Vogel M, Hermann J, Scharer H, Lechner M, Merklein M. (2019) 4.0 in metal forming – questions and challenges. Procedia CIRP 79:649–654
28. Kirchen I, Vogel-Heuser B, Hildenbrand P, Schulte R, Vogel M, Lechner M, Merklein M (2017) Data-driven model development for quality prediction in forming technology. IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). University of Applied Science Emden/Leer, Emden, Germany, 24–26 July 2017: proceedings. Piscataway, NJ: IEEE, S 775–780

29. Marques AE, Prates PA, Pereira AFG, Oliveira MC, Fernandes JV, Ribeiro BM (2020) Performance comparison of parametric and non-parametric regression models for uncertainty analysis of sheet metal forming processes. *Metals* 10(4):457
30. Purr S, Wendt A, Meinhardt J, Moelzl K, Werner A, Hagenah H, Merklein M (2016) Data-driven inline optimization of the manufacturing process of car body parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 159:12002
31. Dib MA, Oliveira NJ, Marques AE, Oliveira MC, Fernandes JV, Ribeiro BM, Prates PA (2020) Single and ensemble classifiers for defect prediction in sheet metal forming under variability. *Neural Comput App* 32(16):12335–12349
32. Maier D, Hartmann C, Till M, Büdenbender C, Behrens BA, Volk W (2019) Data-driven compensation for bulk formed parts based on material point tracking. *Key Eng Materials* 794:277–284
33. Penter L, Ihlenfeldt S, Schenke C, Schulze T, Weber J (2016) Modelltiefe zur Inbetriebnahme von Umformwerkzeugen auf Pressen mit hydraulischen Mehrpunktziehkissen. *EFB Kolloquium Blechverarbeitung*, T 42. Fellbach
34. Braedel M (2009) Optimierung des Werkzeugeinarbeitungsprozess für Karosserieaußenhautteile. Technische Universität München Dissertation
35. Ihlenfeldt S, Drossel WG, Hellmich A, Löser M, Ettrichrätz M, Zorn W, Bucht A, Penter L (2016) Optimal situationally adapted production systems based on an active state machine process-model. *Wiener Produktionstechnik Kongress*
36. Penter L, Ihlenfeldt S (2016) Advanced process models address challenges of forming a variety of steel grades on one machine press. *AutoMetForm*
37. Groche P, Calmano S, Felber T, Schmitt SO (2014) Statistical analysis of a model based product property control for sheet bending. *Production Engineering – Research and Development*
38. Allwood JM, Duncan SR, Cao J, Groche P, Hirt G, Kinsey B, Kuboki T, Liewald M, Sterzing A, Tekkaya AE (2016) Closed-loop control of product properties in metal forming. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 65:573–596
39. Schulte R, Frey P, Hildenbrand P, Vogel M, Betz C, Lechner M, Merklein M (2017) Data-based control of a multi-step forming process. *Journal of Physics: Conference Series* 896(1):12037
40. Fischer P, Heingärtner J, Aichholzer W, Hortig D, Hora P (2017) Feedback control in deep drawing based on experimental datasets. *Journal of Physics: Conference Series* 896:12035

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Materialflusssimulation für die Virtuelle Inbetriebnahme in Steuerungsechtzeit

7

Simone Göttlich, Simon Hoher, Alexander Verl, Jennifer Weißen und Annika Kienzlen

Zusammenfassung

Materialflusssysteme innerhalb von Anlagen spielen eine wichtige Rolle für die Produktivität eines Unternehmens. Mit steigendem Durchsatz steigt auch die Komplexität des Materialflusses. Um den Materialfluss zu planen und abzusichern, werden zunehmend Materialflusssimulationen eingesetzt. Je nach Anwendung und Zielsetzung sind verschiedene Materialflusssimulationsarten sinnvoll: logisch, ereignisbasiert, kinematisch, physikbasiert oder flussbasiert. Dem Modellerstellungsaufwand im Laufe des Entwicklungsprozesses kann durch Kopplung unterschiedlicher Materialflussmodellarten begegnet werden. Im Bereich der Steuerungstechnik werden insbesondere kinematische und physikbasierte Modelle für Steuerungstests bspw. im Rahmen der Virtuellen Inbetriebnahme oder Taktzeitoptimierungen eingesetzt. Die Berechnung über das physikbasierte Modell ist bei einer großen Anzahl von Stückgütern jedoch sehr rechenaufwendig und dadurch nur begrenzt für die Virtuelle Inbetriebnahme der Steuerungstechnik geeignet. Aus diesem Grund wurde das Flussmodell für große Stückzahlen entwickelt, das Stückgüter als Dichteverteilung darstellt. Es ist sowohl für

S. Göttlich (✉) · J. Weißen

Lehrstuhl für wissenschaftliches Rechnen, Universität Mannheim, Mannheim, Deutschland

E-Mail: goettlich@uni-mannheim.de

S. Hoher

Fachbereich Mechatronik & Robotik, FH Salzburg, Salzburg, Österreich

A. Verl · A. Kienzlen

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW),

Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

© Der/die Autor(en) 2024

A. Verl, S. Röck und C. Scheifele (Hrsg.),

Echtzeitsimulation in der Produktionsautomatisierung,

https://doi.org/10.1007/978-3-662-66217-5_7

121

die Analyse und Validierungen als auch für die Optimierung von Steuerungssystemen und des Materialflusslayouts geeignet.

7.1 Materialfluss in der Produktion

Das Ziel jedes Produktionsprozesses ist ein Produkt, unabhängig vom Herstellungsprozess. Das Produkt entsteht aus verschiedenen Rohstoffen und Zwischenprodukten durch Arbeitsprozesse. Alle Produkte, Einzelteile, Zwischenprodukte und Baugruppen sowie Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe (zusammengefasst als Güter) werden durch die Produktionsanlage bewegt. Die Bewegung der Güter wird durch Maschinen oder durch Arbeitskräfte vorgenommen und als Materialfluss bezeichnet. Für die Produktionsprozesse ist es entscheidend, dass die Güter zur richtigen Zeit am richtigen Ort sind. Je nach Produktionsprozess variieren Produktionstaktzeit, Anlagenlayout und Produktionstoleranzen. Die Toleranzen zur Positionierung in automatisierten Produktionsprozessen können räumlich in sehr engen Grenzen liegen. Ist die Güterbewegung ungenau, so kann dies zu Qualitätsmängeln und Fehlern in der Produktion führen. Mithilfe der Virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) werden die Entwicklungen verschiedener Disziplinen wie Mechanik, Elektro- und Steuerungstechnik getestet, sowie deren Zusammenspiel. Der Materialfluss als verbindendes Element zwischen den Bearbeitungsstationen wird jedoch von den verschiedenen Disziplinen häufig nur am Rande behandelt. Der Transport und die Lagerung innerhalb einer Fertigungseinrichtung verursachen „[...] einen erheblichen Anteil an den Materialfluß- und Logistikkosten und damit an den Selbstkosten eines Produktes“ [1]. Aggteleky schätzt die Materialflusskosten auf rund 20–40 % der Selbstkosten eines Produktes [2]. Innerbetriebliche Materialflusssysteme beeinflussen damit unmittelbar die „Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens“ [1].

Im Kontext des Digitalen Zwilling in der Produktion ist der Materialfluss in der Regel auf die innerbetriebliche Güterbewegung beschränkt. Diese wird auch als Intralogistik bezeichnet. Die innerbetriebliche Güterbewegung kann wiederum unterteilt werden in die betriebsinterne, die gebäudeinterne und die arbeitsplatzbezogene Ebene [3]. Der Materialfluss wird in unterschiedlichen Disziplinen betrachtet. Beim Supply Chain Management liegt der Fokus auf der Koordination der Mengen und Zeiten [4]. Diese Betrachtung liegt auf einer hohen Abstraktionsebene, sodass Stückgüter nicht als einzelne Objekte, sondern als abstrakte Einheiten angesehen werden. In der Anlagenplanung werden die Geometrie der Stationen und Förderwege der Produktion entwickelt. Bei der Steuerungsauslegung wird die genaue Bewegung einzelner Stückgüter in Interaktion mit den Bearbeitungsstationen betrachtet. Hierbei liegt die Abstraktionsebene deutlich tiefer, da sogar die Geometrien der einzelnen Stückgüter berücksichtigt werden müssen.

Güter lassen sich unterteilen in Flüssigkeiten, Schüttgüter und Stückgüter. In diesem Beitrag wird nur der Materialfluss von Stückgütern, d. h. diskreten Gütern betrachtet.

Dabei kann es sich um Bauteile, einzelne Produkte oder Gebinde aus mehreren Produkten handeln.

In der Steuerungstechnik umfasst der Materialfluss die Lagerung, den Transport, die Bearbeitung und die Handhabung manuell durch den Menschen oder automatisiert durch Handhabungssysteme. Während bei der Bearbeitung und der Handhabung häufig einzelne Stückgüter bewegt (und teilweise bearbeitet) werden, ist für die Lagerung und den Transport auch die Interaktion der Stückgüter untereinander entscheidend. In der VDI 2689 wird noch genauer unterschieden in Bearbeitung, Prüfen, Handhaben, Fördern, Aufenthalt und Lagern [5].

7.2 Materialfluss für die Virtuelle Inbetriebnahme

Die Anforderungen an die Materialflussssteuerung haben heute ein hohes Ausmaß an Komplexität erreicht. In Abb. 7.1 wird deutlich, dass Ausfälle der Steuerungstechnik durch Softwarefehler schon heute ein dominierendes Problem bezüglich der Eintrittswahrscheinlichkeit und des Schadensausmaßes im innerbetrieblichen Materialfluss darstellen.

Eine effiziente Steuerungstechnik beeinflusst also die Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens unmittelbar. Auf Basis geeigneter Entwicklungsphasen und Simulationen wird deshalb die Entwicklung und Validierung der Steuerungssysteme schon heute formalisiert und frühzeitig durch Materialflusssimulationen abgesichert. Wird vor Testläufen an der realen Anlage eine Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) durchgeführt, so können Fehler und deren meist zeitaufwendige Korrekturen an der realen Anlage verringert werden [7]. Für die VIBN wird ein präzises Simulationsmodell benötigt, um

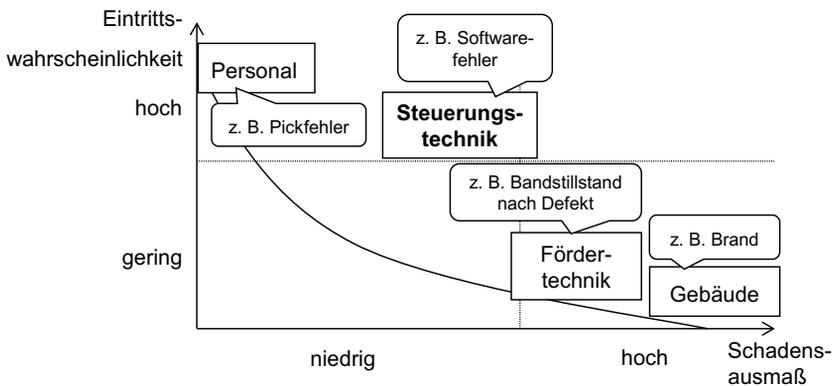


Abb. 7.1 Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß durch Fehler in der Materialflusssimulation im Vergleich zu Personal, Fördertechnik und Gebäude (nach [6])

möglichst viele Fehler im Voraus zu detektieren [8]. Da der Materialfluss für die Produktivität der Fertigungsanlage eine entscheidende Rolle spielt [9], sollte dieser auch im Simulationsmodell für die VIBN berücksichtigt werden. In der Simulation wird der Materialfluss meist getrennt von der klassischen Maschinensimulation betrachtet. Während Maschinen serielle oder parallele kinematische Strukturen haben, deren Achsen durch die Steuerung bewegt werden, sind Stückgüter häufig frei beweglich. Sie werden oft nur indirekt (ohne starre Bindung) über Bandfördersysteme durch die Maschinensteuerung bewegt. Dadurch kann es zu komplexen und nicht unmittelbar vorhersehbaren Bewegungen der Stückgüter kommen. Die Bewegung der einzelnen Stückgüter wird durch auftretende Kräfte und Zwangsbedingungen aus dem unmittelbaren Umfeld und deren geometrischen und physikalischen Eigenschaften beeinflusst.

Je nach Anwendungsfall der VIBN müssen die Materialflussmodelle bestimmte Anforderungen erfüllen. Die wichtigsten Anforderungen sind im Folgenden erläutert [10]:

Ein- und Ausgangssignale: Die VIBN einer Steuerung beruht auf Tests der Aktor- und Sensorsignale. Folglich muss eine Simulation die gleichen Aktorsignale verarbeiten und die gleichen Sensorsignale zur Verfügung stellen wie eine reale Maschine oder Anlage.

Modellgenauigkeit: Die Anforderungen an die Genauigkeit sind keine absoluten Anforderungen, sondern abhängig von dem jeweiligen Anwendungsfall. Allgemein steigt der Rechenaufwand mit zunehmender Genauigkeit, wodurch die Genauigkeit begrenzt ist [11]. Die Modellierungstiefen für Maschinenmodelle [12] können auf Materialflussmodelle übertragen werden. Die Genauigkeit der Modellarten lässt sich nach den Modellierungstiefen in Tab. 7.1 unterscheiden. Auf Modellierungstiefe I wird nur ein logisches Abbild des Materialflusses modelliert, während auf Modellierungstiefe V die physikalischen Zusammenhänge des Materialflusses inklusive möglicher Störgrößen modelliert werden. Die Modellierungstiefen II bis IV sind Zwischenstufen möglicher Modellierungstiefen.

Determinismus/Reproduzierbarkeit: Eine Simulation sollte immer eindeutige und zuverlässige Ergebnisse liefern. Wenn mehrere Simulationsläufe auf Basis desselben Modells und gleicher Parametrisierung durchgeführt werden, sollten die gleichen Ergebnisse erzielt werden. Dies schließt stochastische Bestandteile in der Simulation aus. Um

Tab. 7.1 Modellarten für die Materialflusssimulation entsprechend den Modellierungstiefen nach [12]

Modellierungstiefe		Modellart für Materialflusssimulation
I	Logisches Abbild	Logisch
II	Logisches Abbild mit Zeitverhalten	Ereignisbasiert (Stochastisch)
III	Physikalisches Prinzipabbild	Kinematisch
IV	Physikalisches Konstruktionsabbild	Flussbasiert
V	Physikalisches Zustandsabbild	Physikbasiert (kinetisch)

dies zu erreichen, müssen alle Rechenschritte stets zeitlich in der gleichen Reihenfolge durchgeführt werden. Ähnlich wie bei der Genauigkeit können die Anforderungen an den Determinismus eingeschränkt werden, sodass etwa aufwendige parallelisierbare Berechnungen beispielsweise auf einer Grafikkarte möglich werden, wodurch die Reihenfolge von Rechenschritten variieren kann.

Robustheit: Eine robuste Simulation liefert zu jedem Zeitpunkt ein gültiges Simulationsergebnis. Dazu sollten bspw. Berechnungen, die zu Endlositerationen und Simulationsabbruch führen können, vermieden werden. Diese Anforderung besagt nicht, dass alle Simulationsergebnisse korrekt sind, sondern lediglich, dass die Simulation nicht abgebrochen wird und evtl. verbundene Systeme invalide Werte erhalten [10].

Zeitdeterminismus: Der Zeitdeterminismus legt die maximale Rechendauer für einen Simulationstakt fest. Für die VIBN wird der Simulationstakt durch den Steuerungstakt festgelegt. Läuft eine Simulation in weicher Echtzeit, so wird die vorgegebene Dauer des Simulationstaktes im Mittel eingehalten. Bei der festen Echtzeit droht kein unmittelbarer Schaden durch eine Zeitüberschreitung, jedoch ist nach Ablauf der Zeitanforderungen das Ergebnis der Berechnung nutzlos und kann verworfen werden [13]. In harter Echtzeit darf dagegen kein Simulationstakt die vorgegebene Dauer überschreiten. Die harte Echtzeitfähigkeit ist in der Regel nur bei Hardware-in-the-Loop (HiL) Simulationen erforderlich. HiL-Simulationen mit numerischen Steuerungen von Robotern oder Werkzeugmaschinen bspw. können Taktzeiten von wenigen Millisekunden haben und fordern zudem den entsprechenden Zeitdeterminismus auch hinsichtlich des Materialflusses [14].

7.3 Materialflussmodelle

Es existieren verschiedene Modellarten für die Materialflusssimulation, die sich in den Anwendungsgebieten unterscheiden [10, 15]. Die wichtigsten Auswahlkriterien sind die benötigten Modelldaten und die erforderlichen Genauigkeiten des Modells für die jeweilige Anwendung. Weitere Auswahlkriterien ergeben sich aus den oben beschriebenen Anforderungen. Das physikbasierte Modell und das Flussmodell können je nach Ausgestaltung sowohl auf Modellierungstiefe IV als auch auf Modellierungstiefe V modelliert werden. Für die Virtuelle Inbetriebnahme in der Steuerungstechnik ist in der Regel mindestens die Modellierungstiefe III notwendig (vgl. Tab. 7.1). Im Folgenden wird eine Einteilung basierend auf [10, 15, 16] beschrieben mit verschiedenen Ausprägungen der Modellarten und Detaillierungsgraden, die in Abb. 7.2 schematisch dargestellt sind.

Logische Materialflussmodelle bilden die Reihenfolge der Produktionsstationen für Güter in einer Anlage ab [17]. Es können Bedingungen für den Wechsel von einer Station zur nächsten definiert werden. Logische Materialflussmodelle können beispielsweise auf Petri-Netzen oder auf SysML-Diagrammen [18] basieren. Es werden nur logische Aktorsignale als Bedingungen berücksichtigt und es können Sensorsignale nur durch

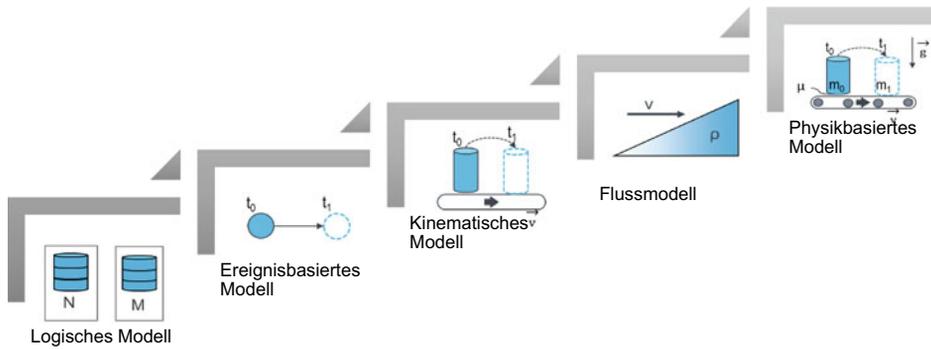


Abb. 7.2 Materialflussmodellarten aufsteigend nach Detaillierungsgrad in Anlehnung an [15]

Abstraktion gewonnen werden. Logische Materialflussmodelle werden häufig in Simulationen zu Analysezwecken (meist schneller als Echtzeit) eingesetzt, um einen ersten Überblick zu erhalten. Eine besonders recheneffiziente Simulation wird möglich, da nur der Zustand bei bestimmten Ereignissen berechnet wird. Dabei wird weder die Dauer noch der Zeitpunkt des Ereignisses berücksichtigt. Die Stückgüter werden nicht als einzelne Objekte, sondern als Mengen von Elementen modelliert [19]. In der Regel werden komplette Arbeitsvorgänge in einem Schritt betrachtet. Häufig wird der Transport zwischen den Arbeitsstationen vernachlässigt. Logische Materialflussmodelle eignen sich für eine erste Ablaufplanung im Anlagenbau oder in der Logistik.

Ereignisbasierte Materialflussmodelle basieren auf logischen Modellen. Diese werden um zeitliche Zusammenhänge und stochastische Verteilungen ergänzt [20]. Zwischen den Ereignissen liegt jeweils ein Simulationsschritt. Die Zeitpunkte der Ereignisse können beliebig gewählt werden und synchronisieren sich nicht auf einen Steuerungstakt. Wie bei den logischen Materialflussmodellen werden Mengen von Elementen analysiert und keine einzelnen Stückgüter. Es handelt sich geometrisch um eine eindimensionale Modellierung. Ereignisbasierte Flussmodelle werden beispielsweise im Supply Chain Management eingesetzt. Es können Durchsätze und Engstellen erkannt werden. Teils werden ereignisbasierte Materialflussmodelle auch als ereignisdiskrete Modelle bezeichnet [21].

Kinematische Materialflussmodelle bilden die Pfade respektive Bahnkurven von Stückgütern innerhalb einer Anlage ab. Es werden keine Kräfte berücksichtigt, aber Geschwindigkeitsprofile und Gelenkbedingungen. Dadurch können Interaktionen und Kollisionen mit Maschinen erfasst werden, ohne die genauen physikalischen Wirkzusammenhänge zu berechnen. Die Stückgüter bewegen sich kontinuierlich als Punktelemente. Die Bewegungsachsen und Freiheitsgrade werden definiert, sowie die Trajektorien und die Ausgangspositionen. Kinematische Modelle sind für die VIBN in der Steuerungstechnik geeignet. Sie sind insbesondere nützlich, um einzelne Stückgüter zu betrachten und werden beispielsweise in der Roboterprogrammierung eingesetzt [22]. Sie können

außerdem genutzt werden, um Bewegungsbahnen und Steuerungsabläufe zu überprüfen [23]. In der Regel sind die Modelle echtzeitfähig, da die vorgegebenen Trajektorien die benötigte Rechenzeit geringhalten. Die Position \mathbf{x} des Stückguts i berechnet sich aus dem Geschwindigkeitsprofil $\mathbf{v}_i(t)$ zwischen dem Startzeitpunkt t_0 und dem gesuchten Zeitpunkt t_1 [24].

Das Flussmodell wurde für Anwendungen mit sehr großen Stückzahlen entwickelt. Dieses bildet keine einzelnen Stückgüter ab, sondern abstrahiert diese als kontinuierliche Dichteverteilung. Dadurch ist das Flussmodell geeignet, Anlagen mit einer sehr hohen Anzahl an Stückgütern abzubilden, wie sie bspw. in der Verpackungstechnik oder bei der Getränkeproduktion vorkommen [15]. Aufgrund der Abstraktion können keine Aussagen über einzelne oder gar spezifische Stückgüter getroffen werden. Mengen oder Mengenteile können dagegen einfach bestimmt werden [25].

Physikbasierte Materialflussmodelle mit physikbasierter Kollisionsberechnung haben den höchsten Detailgrad. In der Regel basieren sie auf Starrkörpersimulationen; Verformungen, thermische und chemische Prozesse werden meist nicht miteinbezogen. Bei der Kollisionsberechnung werden die CAD-Geometrien der Stückgüter und der Umgebung berücksichtigt [26]. Die Bewegung der Stückgüter basiert auf den resultierenden Kräften und Momenten der Kollisionsberechnung, wobei weitere physikalische Parameter wie Massen und Reibungskoeffizienten berücksichtigt werden. Hier sind verschiedene Detaillierungsstufen möglich, die sich im Umfang der Parametrierung stark unterscheiden. Das physikbasierte Modell ist für eine detaillierte VIBN in der Steuerungstechnik geeignet, bei der allerdings die Anzahl der betrachteten kollidierenden Stückgüter aus Gründen des erforderlichen Rechenaufwands begrenzt ist. Die Berechnung der Bewegungstrajektorie eines einzelnen Stückguts erfolgt über die Newton-Eulersche Bewegungsgleichung. Die Kollisionsberechnung kann sowohl kraftbasiert, als auch impulsbasiert sowie mittels Zwangsbedingung erfolgen. Alle drei Methoden basieren auf iterativen Algorithmen, bei denen insbesondere die Kollisionsauflösung mehrmals berechnet wird bis ein stationärer Zustand erreicht wird (vgl. [27]). Je mehr Stückgüter in einer Szene vorhanden sind, desto mehr mögliche Kollisionen müssen berücksichtigt werden, sodass die Rechenzeit entsprechend zunimmt [28].

In Tab. 7.2 sind die berücksichtigten Materialflusseigenschaften, zeitliche Abfolge, Rechenzeit, Anlagenlayout und Steuerungsanbindung der verschiedenen Modellarten bewertet und gegenübergestellt.

Neben den fünf Modellarten können außerdem gekoppelte Varianten wie etwa die Kombination eines ereignisdiskreten Modells mit einem physikbasierten Modell [29] oder die Kombination eines kinematischen Modells mit einem physikbasierten Modell zum Einsatz kommen [24]. Auch können Materialflussmodelle segmentweise in Bereiche mit unterschiedlichen Modellarten aufgebaut werden [23].

Tab. 7.2 Eigenschaften verschiedener Materialflussmodellarten. (in Anlehnung an [16])

Modellart	Berücksichtigte Materialflusseigenschaften				Rechenzeit		Layout	Steuerungs- anbindung
	Zeitl. Abfolge	Umge- bungs- geo.	Güter- geo.	Physik. Eigen- schaften	Unabh. Güter- anzahl	Echtzeit- fähig		
Logisch	○	○	○	○	●	●	1D-2D	○
Ereignis- diskret	◐	○	○	○	●	●	1D-2D	◐
Kinema- tisch	●	●	●	◐	○	●	3D	●
Fluss- modell	●	●	○	○	●	○*	2D	○*
Physik- basiert	●	●	●	●	○	○	3D	●

○ nicht erfüllt ◐ teilweise erfüllt ● erfüllt *aktueller Forschungsgegenstand

7.4 Idee und Stand der Technik der Modellkopplung

Je nach Entwicklungsphase und Zielsetzung der Materialflusssimulation eignen sich unterschiedliche Modellarten für die simulationsbasierte Entwicklung einer Materialflusssteuerung. Dies führt dazu, dass für die einzelnen Entwicklungsphasen neue problemspezifische Materialflusssimulationen entworfen werden müssen. Die Kosten durch den zusätzlichen Zeitaufwand für die Erstellung der Modelle und ggf. die Anpassung der Simulationssoftware können sich jedoch schon nach dem einmaligen Einsatz amortisieren [30].

Für jede Modellerstellung wird speziell ausgebildetes Fachpersonal benötigt. Ferner können die jeweiligen Modelle nicht direkt für die Entwicklungsunterstützung von Materialflussteuerungen verwendet werden. Die Modellvalidität – also die Richtigkeit der Simulation für den Einsatzzweck – geht zwischen den jeweiligen Entwicklungsphasen wegen der neu erstellten Modelle verloren und muss deshalb immer wieder erneut nachgewiesen werden.

Reinhart und Wünsch [31] stellen fest, dass beim getrennten Einsatz mehrerer unterschiedlicher Materialflussmodelle während des Entwicklungsprozesses die Kohärenz zwischen den jeweiligen Modellen verloren gehen kann. Min et al. [32] stellen außerdem einen erheblichen, unnötigen Mehraufwand durch die doppelte Modellierung und Validierung der Materialflussmodelle fest. Gekoppelte Materialflussmodelle stellen hier einen neuen Ansatz dar. Ein gekoppeltes Materialflussmodell ermöglicht es, ohne komplette Neumodellierung zwischen den verschiedenen Materialflussmodellen zu wechseln bzw. Teilmodelle über geeignete Mechanismen zu koppeln. Dadurch wird bedarfsgerechter modelliert und der Modellerstellungsaufwand reduziert. Dopplungen bei der Modellerstellung können vermieden werden. Außerdem bleibt bei einer Modelländerung die Modellvalidität des bestehenden Modells erhalten, weil nicht das Gesamtmodell neu erstellt wird und nur die neuen Modellteile validiert werden müssen.

Prinzipiell existieren für die Kopplung von unterschiedlichen Materialflussmodellarten zwei Möglichkeiten [33, 34]:

- **Integrative Kopplung der mathematischen Materialflussmodelle**
Die unterschiedlichen Materialflussmodelle werden in einem mathematischen Gesamtmodell vereint und in einer Simulationsumgebung ausgeführt. Dafür muss eine gemeinsame Basis mit einem einheitlichen Parametersatz für die mathematischen Modelle gegeben sein. Es kann an definierten Stellen zwischen Berechnungsmethoden gewechselt werden, wobei das gemeinsame Simulationsmodell, in dem das Szenario beschrieben wird, erhalten bleibt. Ein Überblick über integrativ gekoppelte Modelle für unterschiedliche Industrieanwendungen wird in [35, 36] gegeben.
- **Separative Kopplung der Simulationsmodelle**
Bei der separativen Kopplung werden die unterschiedlichen Materialflussmodelle getrennt voneinander in eigenständigen Simulationsumgebungen berechnet. Für die Berechnung werden jeweils auf die Modellart optimierte Berechnungsalgorithmen eingesetzt und gleichzeitig ausgeführt. Während des Simulationslaufs findet zwischen den Simulationsmodellen zu definierten Zeitpunkten ein Datenaustausch statt. Dafür müssen insbesondere geeignete Schnittstellen für Datentransfer und Synchronisation der Simulationsmodelle geschaffen werden. Bei einem Wechsel zwischen den Modellarten

muss nur das betroffene Teilmodell neu modelliert werden. Ein Überblick über die separative Kopplung ist in [37] ausgeführt.

In [24] wird ein kinematisches und physikbasiertes Materialflussmodell mit einer separativen Kopplung beschrieben. Aufgrund des Berechnungsaufwands des physikbasierten Materialflussmodells und der dafür eingesetzten iterativen Berechnungsverfahren kann nur eine weiche Echtzeit ermöglicht werden. Dadurch kann das gekoppelte Materialflussmodell für Einsatzszenarien wie die VIBN nur sehr bedingt eingesetzt werden.

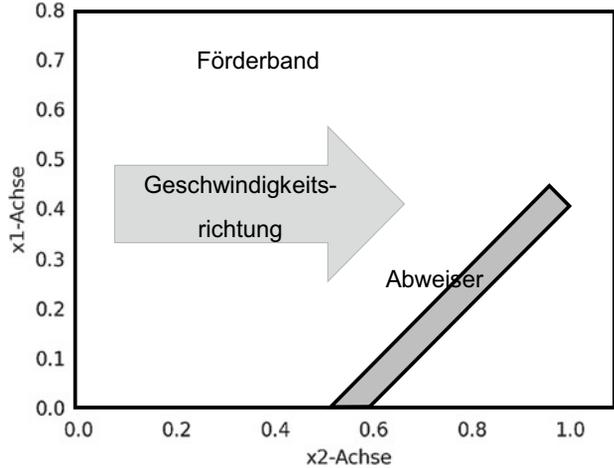
Ein gekoppeltes kinematisches und physikbasiertes Materialflussmodell mit einer integrativen Modellkopplung wird in [38] beschrieben. Allerdings wird hier nur ein ausgewählter physikalischer Effekt in das mathematische Modell integriert, nämlich das Rutschen von Stückgut von einer Rampe. Durch dieses Vorgehen konnte zwar punktuell die Genauigkeit des Simulationslaufs gesteigert werden, allerdings reichte die Genauigkeit nicht aus, um dieses Materialflussmodell für die VIBN einzusetzen, da es nur für vereinfachte ideale Bedingungen mit Stückgütern geeignet ist, die sich entlang definierter Bahnen bewegen.

Eine weitere integrative Modellkopplung mit einer gemeinsamen mathematischen Modellbasis und einem Gleichungslöser wird von [10] beschrieben. Es wird eine vollständige Integration in ein Gesamtmodell angestrebt, das nur einmal modelliert werden muss und jederzeit detailliert werden kann. Das Gesamtmodell basiert auf einem physikbasierten Modell, von dem die Geschwindigkeitsberechnung und die Kollisionserkennung erhalten bleiben. In der Kollisionsauflösung, dem rechenaufwendigsten Teil, wird es integrativ mit einem kinematischen Modell gekoppelt, womit Steuerungszeit erreicht werden soll. Dieser Ansatz ermöglicht es, vor jedem Simulationslauf zwischen einer hohen Simulationsgenauigkeit mittels der physikbasierten Kollisionsauflösung oder einer echtzeitfähigen Berechnung mittels der kinematischen Kollisionsauflösung auszuwählen, bei der keine Iterationen benötigt werden. Das gekoppelte Materialflussmodell ist daher für die VIBN geeignet.

7.5 Materialflussmodelle für große Teilstückzahlen

Für die detaillierte Virtuelle Inbetriebnahme von Steuerungssystemen sind drei verschiedene Materialflussmodelle relevant: das kinematische Modell, das physikbasierte Modell und das Flussmodell [25, 39, 40], sowie eine mögliche Modellkopplung. Sollen komplette Fertigungsanlagen mit einer großen Anzahl an Stückgütern betrachtet werden, so scheidet das kinematische Modell aus, da Kollisionen nicht vollständig berechnet werden. Für das physikbasierte Modell kann der Rechenaufwand für eine VIBN bei großen Stückzahlen schnell zu hoch werden. Aus diesem Grund ist die Idee des makroskopischen Flussmodells entstanden [25, 39]. Im Flussmodell werden keine einzelnen Stückgüter, sondern die Gesamtheit der Güter als eine Dichteverteilung analog zur Flüssigkeitsberechnung nach

Abb. 7.3 Beispiel eines Förderbands mit einem Abweiser



Euler berechnet. Die Betrachtungsebene wechselt folglich von der stückgüterbasierten Sichtweise (mikroskopische Skale) auf eine Betrachtung der Stückgüterdichte (makroskopische Skale). Das Modell basiert auf der Erhaltung der Dichte $\rho = \rho(\mathbf{x}, t)$, die abhängig von Ort \mathbf{x} und Zeit $t \geq 0$ modelliert wird. Der Ort wird hierbei auf einen zweidimensionalen Raum $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ beschränkt (siehe Abb. 7.3 als Beispiel) und der Vektor $\rho(\cdot, t)$ beschreibt die Dichteverhältnisse zur Zeit t im gesamten Gebiet.

Die Modellgleichungen sind gegeben durch die partielle Differentialgleichung:

$$\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho \cdot (v^T(\mathbf{x}) + v^{\text{dyn}}(\rho))) = 0. \quad (7.1)$$

Die Dichteverteilung $\rho(\mathbf{x}, 0) = \rho_0(\mathbf{x})$ zum Zeitpunkt $t = 0$ kann direkt aus den initialen Positionen der Stückgüter berechnet werden.

Die Umgebung wird als ein statisches Geschwindigkeitsfeld $v^T(\mathbf{x})$ modelliert, das auf die Dichteverteilung einwirkt. In dem Geschwindigkeitsfeld müssen sowohl bewegte Elemente wie bspw. Bandförderer, als auch statische Elemente wie Hindernisse abgebildet werden. Statische Elemente werden als Geschwindigkeiten modelliert, die entgegen den bewegten Elementen wirken. Die Größe der Geschwindigkeit wird in Abhängigkeit der bewegten Elemente festgelegt (siehe Abb. 7.4 zur beispielhaften Darstellung eines Geschwindigkeitsfelds).

Befindet sich ein Stückgut an der Stelle \mathbf{x} , so bewegt es sich mit der Geschwindigkeit $v^T(\mathbf{x})$. Dies ist allerdings nur der Fall, wenn sich nicht mehrere Stückgüter in diesem Bereich befinden. Kollidieren Stückgüter miteinander, so erreicht die Dichte $\rho(\mathbf{x}, t)$ die maximale Dichte ρ_{max} (maximal mögliche Anzahl an Stückgütern pro Flächeneinheit). Dies führt zur Aktivierung eines zusätzlichen dynamischen Geschwindigkeitsfelds $v^{\text{dyn}}(\rho)$. Die Veränderung der Dichteverteilung entsteht somit aus einer Kombination des statischen Geschwindigkeitsfelds, das die Umgebung abbildet, und des dynamischen

Geschwindigkeitsfelds, das die Interaktion der Stückgüter untereinander abbildet:

$$\mathbf{v}^{\text{dyn}}(\boldsymbol{\rho}) = H(\rho - \rho_{\max}) \cdot I(\boldsymbol{\rho}). \quad (7.2)$$

Für die Aktivierung des dynamischen Geschwindigkeitsfelds wird eine Einheitssprungfunktion (Heavisidefunktion) H eingesetzt, die einschaltet, sobald die maximale Dichte erreicht wird:

$$H(\rho - \rho_{\max}) = \begin{cases} 0, & \rho < \rho_{\max} \\ 1, & \rho \geq \rho_{\max}. \end{cases} \quad (7.3)$$

Das dynamische Geschwindigkeitsfeld wird durch die Interaktionskraft $I(\boldsymbol{\rho})$ bestimmt, die eine Umverteilung der Dichte beschreibt. Wenn die Dichte zu hoch wird, sorgt sie für eine neue Verteilung in ein größeres Gebiet, sodass keine Überlappungen der Stückgüter auftreten. Die Interaktionskraft wird durch den Parameter $\epsilon(\mathbf{v}^T) > 0$ gewichtet:

$$I(\boldsymbol{\rho}) = -\epsilon(\mathbf{v}^T) \frac{\nabla(\boldsymbol{\eta} * \boldsymbol{\rho})}{\sqrt{1 + \|\nabla(\boldsymbol{\eta} * \boldsymbol{\rho})\|^2}}. \quad (7.4)$$

Die Umverteilung wird über eine Faltung ($\boldsymbol{\eta} * \boldsymbol{\rho}$) realisiert, die eine Glättung der Dichtefunktion vornimmt. Als Glättungskern $\boldsymbol{\eta}$ wird ein zweidimensionaler Gauß Filter eingesetzt, dessen Breite über den Parameter σ festgelegt wird. Sowohl ϵ als auch σ sind empirisch ermittelte Parameter. Je größer der Wert des Parameters σ , desto weniger wird

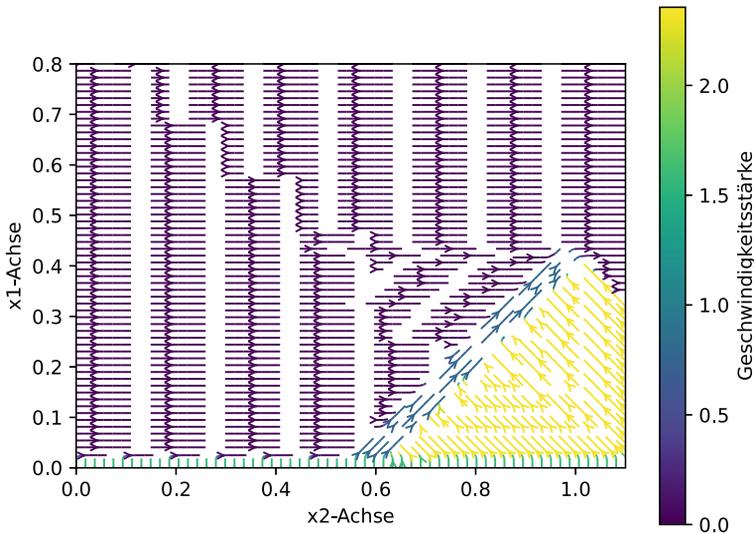


Abb. 7.4 Beispielhaftes Geschwindigkeitsfeld von Förderband mit Abweiser

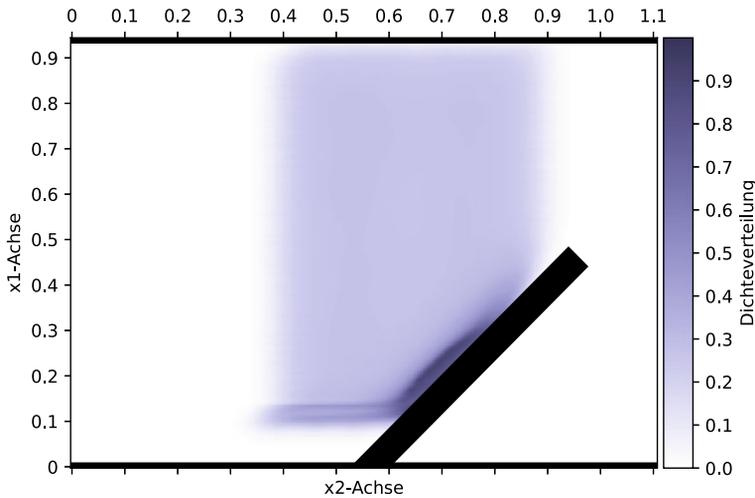


Abb. 7.5 Beispielhafte Dichteverteilung vor einem Hindernis ($\rho_{\max} = 1$)

die Dichte gemittelt:

$$\eta(\mathbf{x}) = \frac{\sigma}{2\pi} \exp\left(-\frac{1}{2}\sigma(x_1^2 + x_2^2)\right). \quad (7.5)$$

Die Lösung der partiellen Differentialgleichung (1) der Dichteverteilung (vgl. Abb. 7.5 für ein Beispiel einer Dichteverteilung) erfolgt über eine Diskretisierung des Gebiets Ω durch ein zweidimensionales Gitter mit den Schrittweiten Δx_1 und Δx_2 . Des Weiteren wird über die Zeit mit der Schrittweite Δt diskretisiert. Diese Schrittweite sollte idealerweise der Taktrate des Steuerungssystems entsprechen, um einen Datenaustausch in Echtzeit zwischen Steuerung und Simulation zu ermöglichen. In Abb. 7.5 ist eine numerische Lösung dargestellt. Anhand der Dichteverteilung wird erkennbar, dass sich die Stückgüter vor dem Abweiser anstauen (größte Dichte). Oben und unten ist das Förderband durch eine Bande begrenzt.

7.6 Anwendung des Flussmodells

Die Anwendung des Flussmodells ist beschränkt auf Situationen, in denen sich Stückgüter gleicher Art in einer Ebene bewegen. Dies ist in der Regel der Fall auf Bandförderern. Die Stückgüter können dabei aufgrund der Symmetrie einen kreisförmigen oder quadratischen Querschnitt haben, für andere Geometrien liegt noch keine Validierung vor

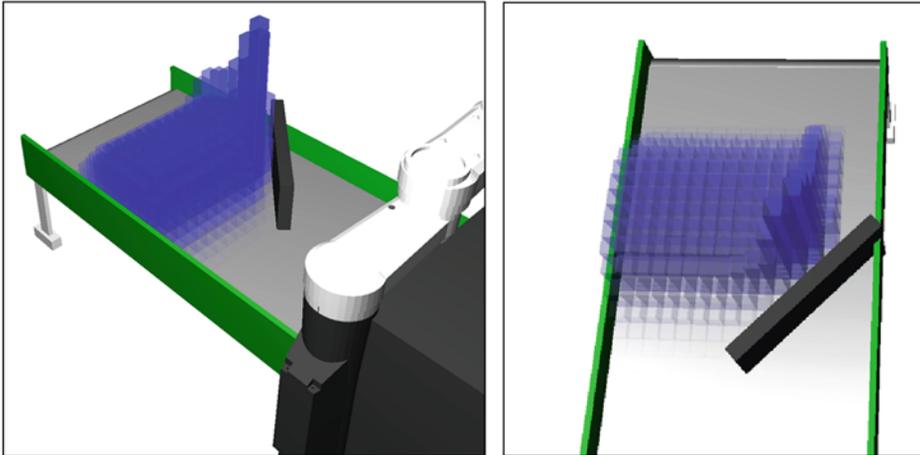


Abb. 7.6 Dreidimensionale Visualisierung einer Anwendung des Flussmodells

[41]. Der Vorteil des Flussmodells liegt in der Simulation großer Mengen an Stückgütern. Das Flussmodell kann sowohl für die VIBN als auch für die Optimierung des Materialflusslayouts und der Systemparameter eingesetzt werden.

In Abb. 7.6 ist das eingangs beschriebene Szenario aus Abb. 7.3 dreidimensional dargestellt. Die Quader zeigen die Diskretisierung der Dichteverteilung. Die Höhe und Farbintensität der Quader stellen die Größe der Dichte am jeweiligen Ort dar. Anhand dieses Szenarios wurden beispielhaft Optimierungen der Bandgeschwindigkeit durchgeführt [42]. Die Ergebnisse sind im folgenden Kapitel dargestellt. Diese zeigen, dass mithilfe des Flussmodells schnell Optimierungsparameter festgelegt werden können, die sehr gute Ergebnisse liefern. Bei einer großen Anzahl an Stückgütern ist dies entweder mit anderen Simulationsmethoden sehr rechenaufwendig oder erfolgt nur durch ungenaues Ausprobieren.

7.7 Optimierung mithilfe des Flussmodells und dessen Validierung

Nach der Entwicklung eines Materialflusssystemes muss dieses bei der Inbetriebnahme noch hinsichtlich der optimalen Steuerungsparameter eingestellt werden. Bis heute basiert die Auslegung von Materialflusssystemen auf Stückgüterebene häufig auf Erfahrungswerten einzelner Mitarbeiter [43]. Dies führt zu Abhängigkeiten der Unternehmen von einzelnen Personen, die sich dieses Erfahrungswissen über Jahre aufgebaut haben. Bei Personalwechseln besteht die Gefahr, dass dieses Wissen zumindest teilweise verloren

geht. Darüber hinaus lässt sich die Erfahrung nur in geringem Maße auf andere Unternehmen übertragen. Neben den Erfahrungswerten ist die Auslegung in der Regel auf Tests an der realen Anlage angewiesen. Diese Testläufe sind zeitaufwendig und kostenintensiv und trotzdem werden nicht zwangsläufig die optimalen Parametrierungen gefunden. Hier kommt die flussbasierte Materialflusssimulation zur Anwendung. Der mathematische Vorteil des makroskopischen Flussmodells basiert darauf, dass der Rechenaufwand nicht abhängig von der Anzahl der Stückgüter und der Kollisionen ist. Der Aufwand wird durch die Diskretisierung in Ort und Zeit festgelegt und ist dadurch während einer Simulation unabhängig von den Bewegungen der Stückgüter. Dieser Vorteil kann für die Optimierung von Materialflusssystemen mit hoher Stückgutanzahl ausgenutzt werden. Optimierungen sind häufig besonders rechenaufwendig, da viele Simulationsläufe durchgeführt werden müssen. Die Optimierung ist mit einer physikbasierten Simulation bereits bei einfachen Simulationsszenarien zu rechenintensiv und daher kaum durchführbar [44]. Aus diesem Grund werden bisher kaum mathematische Optimierungen von Materialflusssystemen auf der Basis von Simulationen durchgeführt. Es gibt Ansätze im Logistikbereich mit ereignisdiskreten Simulationen [45], dabei wird jedoch auf höherer Abstraktionsebene optimiert, da die explizite Stückgutbewegung nicht betrachtet wird. Wenn der detaillierte Materialfluss optimiert werden soll, können die Vorteile des Flussmodells genutzt werden. Dazu wird das mathematische Kontrollproblem zunächst diskretisiert (entsprechend eines first-discretize-then-optimize Ansatzes) und anschließend das diskrete Kontrollproblem gelöst [46]. Damit können Materialflusslayouts, die eine große Anzahl an Stückgütern transportieren, bewertet und verbessert werden. Als Szenario wird jeweils ein Materialflusslayout mit einem oder mehreren Bandförderern betrachtet, auf denen viele Stückgüter der gleichen Art transportiert werden. Von den benötigten Arbeitsstationen sind die Reihenfolge und die jeweiligen Bearbeitungszeiten und möglichen Kapazitäten bekannt.

Für die Optimierung werden zunächst das geplante Materialflusslayout und die Eingangsgrößen festgelegt. Als Nächstes wird das Optimierungsziel definiert. Optimierte werden kann die genaue Konfiguration des Layouts oder die Parametrierung des Steuerungssystems [42]. Dies entspricht der Verwendung einer Zielfunktion, die das Kontrollproblem beschreibt. Um die Zielfunktion aufzustellen, müssen zusätzlich die Optimierungsparameter festgesetzt werden. Für die Planung eines neuen Materialflusssystems können Konfigurationseigenschaften des Layouts wie beispielsweise Bandgrößen, Abstände und Winkel oder Steuerungsparameter wie die Bandgeschwindigkeiten als Optimierungsparameter dienen. Bei der Optimierung eines bereits bestehenden Materialflusssystems sind die Konfigurationseigenschaften in der Regel bereits durch die vorhandenen Transportelemente vorgegeben.

Am Flussmodell kann beispielsweise die Anordnung der Stückgüter in einem vorgegebenen Bereich optimiert werden, um einen zeitlich definierten Zielzustand zu erreichen. Dazu werden die Bandgeschwindigkeiten fest vorgegeben und es wird eine Anfangsverteilung definiert, die möglichst optimal in einem Ausgangsbereich platziert werden soll.

Optimal kann bedeuten, dass möglichst wenige Kollisionen mit einem Hindernis auftreten sollen oder dass die Güter möglichst schnell das Hindernis passieren sollen [44].

Alternativ kann die Bandgeschwindigkeit optimiert werden. Als Zielfunktion kann dabei nicht nur eine maximale oder minimale Menge an Stückgütern hinter einem Hindernis gesetzt werden, sondern es kann auch auf eine exakte Anzahl optimiert werden. Konkret kann zum Beispiel bei gegebener Anfangsverteilung eine Bandgeschwindigkeit gesucht werden, bei der nach der Zeit t exakt n Stückgüter die Stelle x_2 passiert haben [42]. Ein Szenario mit $N = 192$ zylindrischen Stückgütern basierend auf [25], die nach $T = 1s$ zu einem Viertel (bzw. zur Hälfte) hinter einem Abweiser angekommen sein sollten, wurde in [42] mit einem Abweiserwinkel von $\alpha = 45^\circ$ beschrieben. Nach der Optimierung waren zum gewünschten Zeitpunkt 24,88% (bzw. 48,44% für die Hälfte) der Stückgüter hinter dem Abweiser.

Die Bewertung der Optimierungsergebnisse kann anschließend anhand eines mikroskopischen Modells wie dem physikbasierten Modell erfolgen (Verifizierung). Dazu wird das Szenario im physikbasierten Modell abgebildet und die optimierten Parameter übergeben. Zunächst wird mit den Optimierungsparametern simuliert und überprüft, wie nah die Ergebnisse an den Zielgrößen liegen. Sollten die Ergebnisse nicht den Anforderungen entsprechen, können die Randbedingungen für die Optimierung mit dem Flussmodell angepasst werden. Falls dies nicht ausreicht, müssen möglicherweise Veränderungen am vorgegebenen Materialflusslayout vorgenommen werden. Anhand des veränderten Materialflusslayouts kann eine erneute Optimierung durchgeführt werden. Zusätzlich können weitere Bewertungsparameter definiert werden, um die Leistung des Materialflusssystems zu bestimmen (Leistungserbringung). Dabei werden insbesondere Werte untersucht, die aus der Simulation mit dem Flussmodell nicht hervorgehen, beispielsweise ein ungewolltes Umkippen der Stückgüter. Auch in diesem Fall sollten die Randbedingungen angepasst und die Optimierung wiederholt werden. Es kann auch notwendig werden zusätzliche Stellgrößen einzuführen, um das gewünschte Verhalten zu erreichen. Nach der Verifizierung und Leistungserbringung kann eine Feinjustierung anhand des physikbasierten Modells durchgeführt werden. Dazu werden leichte Variationen der Optimierungsparameter untersucht, um festzustellen, ob die optimierten Werte tatsächlich den optimalen Ergebnissen entsprechen. Dieser Schritt ist vor allem dann relevant, wenn es um konkrete Positionen einzelner Stückgüter geht, die im Flussmodell nicht abgebildet werden können. Der Gesamtprozess ist in Abb. 7.7 dargestellt.

Es existieren Szenarien, in denen die Zielgrößen im Flussmodell erreicht werden, im physikbasierten Modell jedoch Abweichungen auftreten. Dies ist in Effekten begründet, die vom Flussmodell nicht abgebildet werden. Beispielsweise werden dadurch, dass im Flussmodell die dritte Ortsdimension nicht berücksichtigt wird, nicht alle Effekte abgebildet, die in Realität auftreten können. Im physikbasierten Modell werden die Szenarien dreidimensional untersucht und es wird zusätzlich die Orientierung der Stückgüter sowie deren Kollisionen und Starrkörperdynamiken berücksichtigt. Dadurch können Effekte

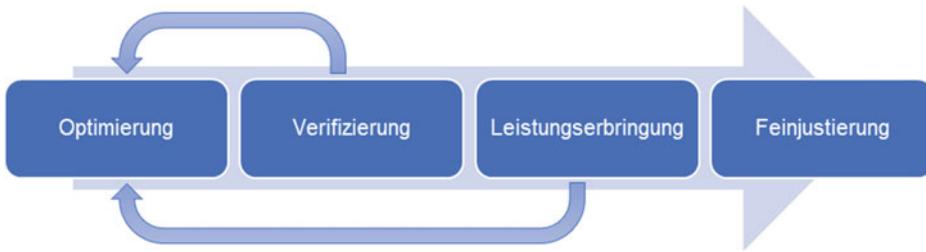


Abb. 7.7 Validierungsprozess im Zuge der Optimierung nach [42]

erfasst werden, die im zweidimensionalen Flussmodell nicht erkennbar sind, wie beispielsweise das Kippen von Stückgütern. Darüber hinaus werden im Flussmodell keine einzelnen Stückgüter modelliert. Es kann daher beispielsweise nicht erkannt werden, ob ein Stückgut ein Hindernis passiert hat oder ob zwei Stückgüter das Hindernis zur Hälfte passiert haben. Im physikbasierten Modell kann dies genauer analysiert werden.

7.8 Zusammenfassung und Ausblick

Um den Materialfluss zu planen und abzusichern, werden zunehmend Materialflusssimulationen eingesetzt. Es existieren logische, ereignisbasierte, kinematische, physikbasierte oder flussbasierte Materialflussmodelle, die je nach Anwendung und Zielsetzung eingesetzt werden. Für die Virtuelle Inbetriebnahme müssen die Materialflussmodelle Anforderungen an die Ein- und Ausgangssignale, Modellgenauigkeit, Determinismus, Robustheit und den Zeitdeterminismus erfüllen.

Während bei einer kinematischen Kollisionsauflösung die Genauigkeit begrenzt ist, erfüllt diese zu jedem Zeitpunkt alle Anforderungen für eine Echtzeitsimulation. Die physikbasierte Kollisionsauflösung liefert dagegen hochgenaue Simulationsergebnisse, allerdings ist sie für eine Echtzeitsimulation zu rechenaufwendig. Daher können die Modelle in einem gekoppelten Materialflussmodell mit kinematischer und physikbasierter Kollisionsauflösung kombiniert werden.

Das Flussmodell soll die Simulation großer Mengen an Stückgütern für die Virtuelle Inbetriebnahme ermöglichen. Dabei werden die Stückgüter als zweidimensionale Dichteverteilung beschrieben. Die Bewegung wird durch das statische Geschwindigkeitsfeld der Umgebung und das dynamische Geschwindigkeitsfeld der Interaktionen umgesetzt. Ideen für den Einsatz des Flussmodells sind beispielsweise in Getränkeabfüllanlagen, wo große Mengen gleicher Flaschen in kurzer Zeit verarbeitet werden.

Ein neues Konzept ist das Multiskalen-Netzwerk-Modell, welches die Kopplung zwischen physikbasiertem und flussbasiertem Modell beschreibt [15, 39]. Dieses Konzept soll eine situationsbasierte Simulation ermöglichen. Je nachdem welche Signale für die

Steuerung benötigt werden oder welche Informationen betrachtet werden sollen, kann zwischen physikbasiertem und Flussmodell gewählt werden. Mithilfe des kontinuierlichen Flussmodells kann eine große Anzahl an Stückgütern simuliert werden. An Stellen, an denen Aussagen über exakte Positionen oder spezifische Stückgüter benötigt werden, kann das physikbasierte Modell eingesetzt werden. Die direkte Kopplung beider Modelle kann die Validierung und Leistungserbringung nach einer Optimierung vereinfachen.

Literatur

1. Fischer W, Dittrich L (2003) Materialfluß und Logistik: Potentiale vom Konzept bis zur Detailauslegung. Berlin, Springer
2. Aggteleky B (1990) Fabrikplanung: Werkentwicklung und Betriebsrationalisierung. Hanser, Wien
3. Kudlich T (2000) Optimierung von Materialflußsystemen mit Hilfe der Ablaufsimulation, Dissertation, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München
4. Weigert D, Reggelin T, Tolujew J (2017) Material Flow Simulation of Logistics Processes – An Approach of Online Analysis, Planning and Control of Logistics Processes of Supply Chains. in The publications of the XXXI. MicroCAD International Scientific Conference
5. Leitfaden für Materialflußuntersuchungen (2010) 2689, VDI Verein Deutscher Ingenieure, Berlin u. a.,
6. Arnold D (2006) Intralogistik: Potentiale, Perspektiven, Prognosen. Springer, Heidelberg
7. Puntel Schmidt P (2017) Methoden zur simulationsbasierten Absicherung von Steuerungscode fertigungstechnischer Anlagen. Dissertation, Automatisierungstechnik, Helmut Schmidt Universität, Hamburg
8. Zäh MF, Wünsch G, Hensel T, Lindworsky A (2006) Nutzen der virtuellen Inbetriebnahme: Ein Experiment. ZWF 101(10):595–599. <https://doi.org/10.3139/104.101070>
9. Arnold D, Furmans K (Hrsg) (2019) Materialfluss in Logistiksystemen. Springer, Heidelberg
10. Hoher S (2017) Ein gekoppeltes Materialflussmodell zur durchgängigen Entwicklungsunterstützung von Materialflussteuerungen: Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart
11. Pritschow G, Röck S, Rüdele H (2005) Echtzeitfähige Simulation von Werkzeugmaschinen: Anforderungen und Eigenschaften einer Hardware-in-the-Loop-Simulationsumgebung für Werkzeugmaschinen. wt Werkstattstechnik online, 5:302–308
12. Kufner A (2011) Automatisierte Erstellung von Maschinenmodellen für die Hardware-in-the-Loop-Simulation von Montagemaschinen. Universität Stuttgart, Diss., Heimsheim: Jost-Jetter. <https://www.nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:93-opus-72958>
13. Kopetz H (2011) Real-time systems: Design principles for distributed embedded applications, 2. Aufl. <https://www.nbn-resolving.de/urn:nbn:de:1111-201104152153>. Springer, New York
14. Pritschow G, Röck S (2004) Hardware in the Loop. Simulation of machine tools. CIRP Annals – Manufactur Technol 53(1):295–298. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60701-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60701-X)
15. Scheifele C, Lechler A, Verl A (2016) Materialflussmodelle für die HiL-Simulation. wt Werkstattstechnik online 106(3):119–124
16. Kienzlen A, Verl A (2020) Comparison of material flow models and acceleration of the macroscopic flow model for virtual commissioning. The European Simulation and Modelling conference ESM (2020) Toulouse. Frankreich, S 168–175

17. Bodner DA, Wang K, Xu S (2005) Advanced decision logic in simulation of material flow processing networks. Proceedings of the Winter Simulation Conference (WSC), Orlando, FL, USA, S 1359–1366
18. Steimer C, Fischer J, Aurich JC (2017) Model-based design process for the early phases of manufacturing system planning using SysML. *Procedia CIRP Design*, S 163–168
19. Kuo SS, Chen EJ, Selikson PL, Lee YM (2001) Modeling continuous flow with discrete-event simulation. Proceedings of the Winter Simulation Conference (WSC), Arlington, VA, USA, S 1099–1103
20. Rybicka J (2017) Modelling flexible manufacturing systems through discrete event simulation. School of Aerospace, Transport and Manufacturing, Cranfield University, Cranfield, Großbritannien, PhD
21. Jahangirian M, Eldabi T, Naseer A, Stergioulas LK, Young T (2010) Simulation in manufacturing and business: A review. *European Journal of Operational Research* 203(1):1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.06.004>
22. Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen: Begriffe (2018), 3633. VDI Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf
23. Virtuelle Inbetriebnahme – Modellarten und Glossar (2016) 3693 – Blatt 1, VDI Verein Deutscher Ingenieure, Berlin
24. Hoher S, Verl A (2012) Multi-Simulator-Materialflusssimulation für die virtuelle Inbetriebnahme. G. Frey, W. Schumacher, A. Verl, SPSIPCDRIVES, S 387–396
25. Göttlich S, Hoher S, Schindler P, Schleper V, Verl A (2014) Modeling, simulation and validation of material flow on conveyor belts. *Applied Mathematical Modelling* 38(13):3295–3313. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.11.039>
26. Spitzweg M (2009) Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen. Dissertation, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München, München
27. Bender J (2007) Impulsbasierte Dynamiksimulation von Mehrkörpersystemen in der virtuellen Realität. Dissertation, Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe
28. Neher P, Lechler A (2015) Using game physics engines for hardware-in-the-loop material flow simulations: benefits, requirements and experiences. 2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Busan, South Korea, S 1002–1007
29. Glatt M, Kasakow G, Aurich JC (2018) Combining physical simulation and discrete-event material flow simulation. *Procedia CIRP* 72:420–425. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.054>
30. Chance F, Robinson J, Fowler J (1996) Supporting manufacturing with simulation: Model design, development, and deployment. Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, S 1–8
31. Reinhart G, Wünsch G (2007) Economic application of virtual commissioning to mechatronic production systems. *Production Engineering* 1(4):371–379. <https://doi.org/10.1007/s11740-007-0066-0>
32. Min B-K, Huang Z, Pasek ZJ, Yip-Hoi D, Husted F, Marker S (2002) Integration of real-time control simulation to a virtual manufacturing environment. *Journal of Advanced Manufacturing Systems* 1(1):67–87
33. Kübler R, Schiehlen W (2000) Two methods of simulator coupling. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems* 6(2):93–113. [https://doi.org/10.1076/1387-3954\(200006\)6:2;1-M;FT093](https://doi.org/10.1076/1387-3954(200006)6:2;1-M;FT093)
34. Hoher S, Röck S (2011) A contribution to the real-time simulation of coupled finite element models of machine tools – a numerical comparison. *Simulation Modelling Practice and Theory* 19:1627–1639

35. Boer CA (2005) Distributed simulation in industry. Dissertation. Niederlande: Erasmus University Rotterdam
36. Balogun OS, Jolayemi ET, Akingbade TJ, Muazu HG (2012) Use of linear programming for optimal production in a production line in Coca-Cola bottling company, Ilorin. *International Journal of Engineering Research and Applications* 2(5):2004–2007
37. Felippa CA, Park KC, Farhat C (2001) Partitioned analysis of coupled mechanical systems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 190(24–25):3247–3270. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(00\)00391-1](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(00)00391-1)
38. Wischnewski R, Rossmann J (2010) A new hybrid time-based/event-based simulation method for transport systems considering physical effects. *IEEE Conference on Robotics Automation and Mechatronics (RAM)*, S 470–475
39. Hoher S, Schindler P, Göttlich S, Schleper V, Röck S (2012) System dynamic models and real-time simulation of complex material flow systems. In: ElMaraghy HA (Hrsg) *Enabling manufacturing competitiveness and economic sustainability*. Springer, Berlin, S 316–321
40. Pflrsching M (2018) A multi-scale model for material flow problems based on a non-local conservation law: simulation and optimization. Dissertation, Lehrstuhl für wissenschaftliches Rechnen, Universität Mannheim, München
41. Prims D, Kötz J, Göttlich S, Katterfeld A (2019) Validation of flow models as new simulation approach for parcel handling in bulk mode. *Logistics Journal* 6. https://doi.org/10.2195/lj_Rev_prims_en_201906_01
42. Kienzlen A, Weißen J, Verl A, Göttlich S (2020) Simulative Optimierung der Steuerungsparameter eines Materialflusslayouts mit Bandförderern. *Forschung im Ingenieurwesen* <https://doi.org/10.1007/s10010-020-00420-3>
43. Günthner W, Kadachi M (2001) Simulationsgestützte Planung und Nutzung von Getränke-Abfüllanlagen: Forschungsbericht des IGF-Vorhabens 12265N der Bundesvereinigung Logistik (BVL) e. V. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, Abschlussbericht
44. Erbrich M, Göttlich S, Pflrsching M (2018) Optimal packing of material flow on conveyor belts. *Optimization and Engineering* 19(1):71–96. <https://doi.org/10.1007/s11081-017-9362-5>
45. Krug W, Rose O (2011) Optimierung. In: März L, Krug W, Rose O, Weigert G (Hrsg) *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*. Springer, Heidelberg, S 21–28
46. Betts JT, Campbell SL (2005) Discretize then optimize. *Mathematics for industry: challenges and frontiers*. Ontario, Toronto, S 140–157

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Nutzen von Digitalen Zwillingen und Virtueller Inbetriebnahme für den Maschinen- und Anlagenbau

8

Karl Kübler, Florian Jaensch, Christian Daniel und Alexander Verl

Zusammenfassung

Noch vor der technischen Realisierung der Virtuellen Inbetriebnahme und von Digitalen Zwillingen ist die Betrachtung von deren Nutzen für den industriellen Einsatz im Maschinen- und Anlagenbau von hoher Relevanz. Sobald eine vorausgehende Investition getätigt werden muss, sollte vorab geklärt werden können, wie sich diese bezahlt machen kann. In diesem Beitrag werden dazu die Nutzenpotenziale der Virtuellen Inbetriebnahme und Digitaler Zwillinge für die verschiedenen Rollen entlang der Wertschöpfungsketten im Maschinen- und Anlagenbau dargelegt. Basierend auf dem „Leitfaden Virtuelle Inbetriebnahme“ des VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.) wird zusammengefasst, welche Rollen in den Wertschöpfungsketten beteiligt sind und wie deren qualitative und quantitative Nutzen durch Einführung der Virtuellen Inbetriebnahme aussehen. Im letzten Abschnitt dieses Beitrages werden Praxisbeispiele eines Anlagenbetreibers für die Automobilfertigung und eines Anlagenbauers für die Holzbearbeitung aus den „Best Practices zur Virtuellen Inbetriebnahme“ des VDMA rezipiert und die Nutzung einer digitalen Austauschplattform betrachtet.

K. Kübler · F. Jaensch · A. Verl (✉)

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW),
Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

E-Mail: alexander.verl@isw.uni-stuttgart.de

C. Daniel

ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH, Stuttgart, Deutschland

© Der/die Autor(en) 2024

A. Verl, S. Röck und C. Scheifele (Hrsg.),

Echtzeitsimulation in der Produktionsautomatisierung,

https://doi.org/10.1007/978-3-662-66217-5_8

141

8.1 Einleitung

Die Entwicklung des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus wird besonders stark durch die vierte industrielle Revolution (Industrie 4.0) geprägt. Die intelligente Vernetzung von Maschinen und Abläufen in der Fabrik auf Basis innovativer Informations- und Kommunikationstechnologien soll helfen, die internationale Spitzenposition Deutschlands in der produzierenden Industrie abzusichern und auszubauen [1].

Der Erfolg der Industrie 4.0 hängt maßgebend davon ab, wie effizient neue Technologien und digitale Wertschöpfungsketten als Basis für erfolgreiche Geschäftsmodelle nicht nur in großen Unternehmen, sondern auch in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) etabliert werden können. Die Basis für zahlreiche zukünftige Lösungen stellen Digitale Zwillinge dar, die Informationen und Simulationsmodelle von Komponenten, Maschinen und Anlagen enthalten und deren Prozessen entlang der digitalen Wertschöpfungskette zur Verfügung stellen [2, 3]. Bereits heute sind in der Industrie digitale Plattformen verfügbar, die auf gesammelten Daten und Informationen (Digitaler Schatten) Methoden der Predictive Analytics nutzen [4]. Als digitale Modelle für den Digitalen Zwilling stehen eine Vielzahl von Simulationsmodellen, welche die Entwicklung einer Maschine oder Anlage ermöglichen und absichern, zur Verfügung. Die Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) wird in vielen Unternehmen als Einstieg in die Digitalisierung und Simulationstechnologien genutzt, da hier bereits eingehende Erfahrungen und ein konkreter Nutzen vorliegen, welche signifikant Kosten im Engineering reduzieren und die Qualität erhöhen [5, 6]. Werden die Simulationsmodelle für die VIBN so aufgebaut, dass diese auch begleitend zum Betrieb der Maschine oder Anlage für Produktionsoptimierungen und Qualifizierung des Personals eingesetzt werden können, entsprechen sie eher der Idee eines Digitalen Zwillings. Im Bereich des Digitalen Zwillings, besonders des simulativen Anteils, besteht noch ein großes Entwicklungspotenzial.

Eine Umfrage des VDMA Arbeitskreis „Simulation und Visualisierung im Maschinenbau“ aus dem Jahre 2017 zeigt, dass die befragten Unternehmen den größten Bedarf und das höchste Entwicklungspotenzial von Simulationstechnologien in der VIBN sehen [7] (vgl. Abb. 8.1).

Aufgrund der großen Resonanz auf Veranstaltungen und Veröffentlichungen zur VIBN wurde durch den VDMA im Jahre 2020 der „Leitfaden Virtuelle Inbetriebnahme“ [8] unter aktiver Mitwirkung der Autoren erarbeitet. Mit diesem praxisorientierten Leitfaden wurde ein weiterer Baustein zur praktischen Umsetzung von Industrie 4.0 und dem Digitalen Zwilling realisiert. Ein besonderer Fokus des Leitfadens liegt auf den Kosten und Nutzen bei der Einführung der VIBN in Unternehmen.

Komplettiert wird der Leitfaden durch die begleitende Publikation „Best Practices zur Virtuellen Inbetriebnahme“ [9], in der die Einführung und Etablierung der VIBN in Unternehmen des Anlagen- und Maschinenbaus aufgezeigt werden.

VIBN – Entwicklungspotenzial und zukünftiger Bedarf

Anteil der Unternehmen mit wachsendem und stark wachsendem Bedarf an...

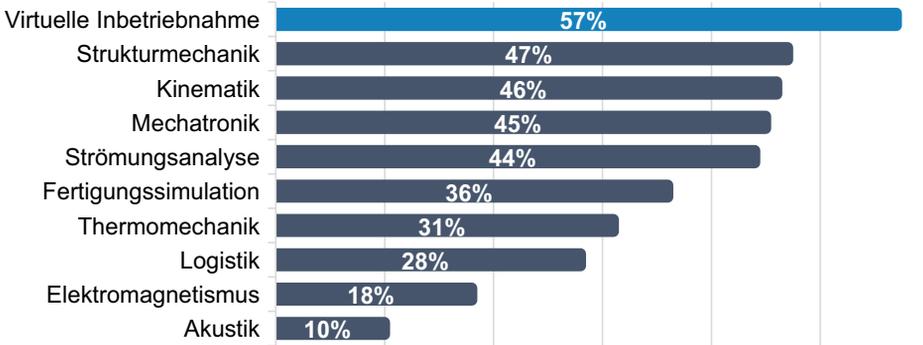


Abb. 8.1 Entwicklungspotenzial der Virtuellen Inbetriebnahme aus [7]

Die wichtigsten Aspekte aus Leitfaden und Best Practices sind Inhalt dieses Beitrages. Ergänzt werden diese durch ein Praxisbeispiel zum Nutzen des Einsatzes von Simulationsplattformen für Digitale Zwillinge und die Virtuelle Inbetriebnahme.

8.2 Nutzen entlang der Zulieferkette im Maschinen- und Anlagenbau

Um den Nutzen von VIBN und Digitalen Zwillingen eingehend analysieren und bewerten zu können, ist es entscheidend, die gesamte Wertschöpfungskette des Maschinen- und Anlagenbaus zu betrachten. Es reicht nicht mehr nur aus, den einzelnen Anwender der VIBN als Akteur oder alleinigen Nutzer zu betrachten. Daher werden zunächst die an der Wertschöpfung des Maschinen- und Anlagenbaus beteiligten Rollen, die in Abb. 8.2 dargestellt sind, erläutert. Direkt beteiligte Rollen sind der Komponentenlieferant, der Systemlieferant (Systemintegrator, Maschinen- und Anlagenlieferant) sowie der Betreiber des Produktionssystems. Die gesamte Zulieferkette wird durch den Anbieter der Simulationsplattform als Softwareanbieter begleitet, der dadurch den generierbaren Nutzen der jeweiligen Rollen maßgeblich beeinflusst. Da in der Praxis nicht immer alle potenziellen Nutzen der VIBN und des Digitalen Zwillings in einem Unternehmen ausgeschöpft werden können, wird im Folgenden in diesem Zusammenhang von Nutzenpotenzialen gesprochen.

Neben der Betrachtung von Nutzenpotenzialen der einzelnen Rollen muss auch der zusätzliche Nutzen, der sich aus den nahtlosen Prozessen entlang der neu entstehenden digitalen Wertschöpfungskette vom Komponentenlieferant bis zum Betreiber der digitalen Komponente ergibt, herangezogen werden (vgl. Abb. 8.3).

Abb. 8.2 Die Zulieferkette für den Maschinen- und Anlagenbau [8]

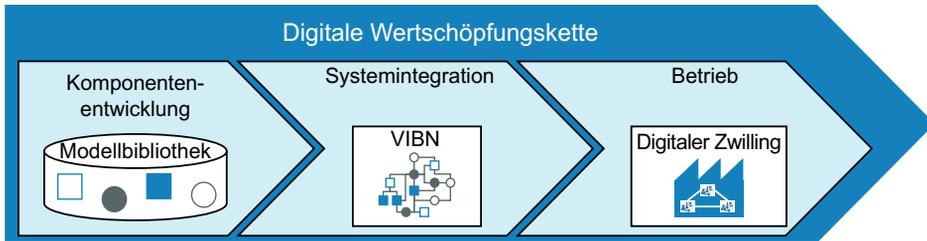
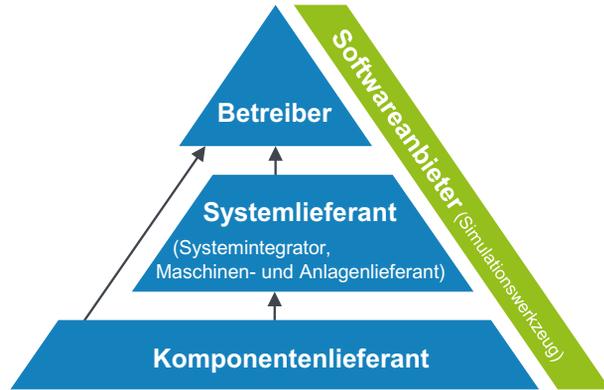


Abb. 8.3 Die neue, digitale Wertschöpfungskette für den Maschinen- und Anlagenbau von der Komponententwicklung bis in den Betrieb [8]

Die Bestellung, Fertigung und Auslieferung physischer Komponenten, Maschinen und Anlagen ist mit Beschränkungen bezüglich deren zeitlichen Verfügbarkeit verbunden. Während für die Betriebsphase nur physisches Equipment eingesetzt werden kann, sind schnell verfügbare Digitale Zwillinge von Komponenten, Maschinen und Anlagen in früheren Phasen des Lebenszyklus von Vorteil. Bereits in der Angebotsphase von Produktionssystemen (Greenfieldplanung) entsteht zwischen Kunde und Auftragnehmer ein besseres gegenseitiges Verständnis, wenn an einem allgemein verständlichen Digitalen Zwilling Lösungsideen exploriert werden können. Der Auftragnehmer selbst bezieht Komponenten von Zulieferern, die über das größere Know-how hinsichtlich der bereitgestellten Funktionalität, der genutzten Betriebsarten und der Ausprägung der Schnittstellen inklusive Parametrierung verfügen. Dadurch wird die Komponententwicklung nahtlos in die Systemintegration eingebunden, wodurch neue Nutzenpotenziale sowohl beim Komponentenhersteller als auch in der gesamten Wertschöpfungskette generiert werden.

In der Entwicklungsphase des Gesamtsystems und einer durch VIBN begleitenden Verifikation und Validierung ermöglicht die digitale Wertschöpfungskette eine höhere Entwicklungsgeschwindigkeit und die Betrachtung einer größeren Anzahl von Varianten bei der Erarbeitung einer optimalen Lösung. Iterationen am digitalen Modell sind

dabei deutlich günstiger und schneller durchführbar, als diese am realen Prototyp möglich wären. Als Ergebnis der beschriebenen digitalen Wertschöpfungskette steht für die Betriebsphase neben dem realen Produktionssystem direkt dessen Digitaler Zwilling zur Verfügung. Der Digitale Zwilling wird anschließend über die VIBN hinaus, begleitend zum Produktionsbetrieb für Serviceeinsätze, Predictive Maintenance, Absicherung von Retrofit-Maßnahmen, aber auch für die Rückmeldung an den Komponentenhersteller, wie beispielsweise über die Performance und Zuverlässigkeit seiner Komponenten, genutzt. Abb. 8.4 zeigt den resultierenden Lebenszyklus einer Maschine oder Anlage mit den beschriebenen Einflüssen einer digitalen Wertschöpfungskette.

Die beschriebene digitale Wertschöpfungskette kann ihren Nutzen erst entfalten, wenn alle beteiligten Rollen ihre zu erbringenden Leistungen optimal integrieren. Dazu bedarf es aufeinander abgestimmte Engineeringprozesse, sodass der Digitale Zwilling frühzeitig, beziehungsweise zusammen mit dem realen Produktionssystem, entstehen und genutzt werden kann. Ebenso müssen effiziente Iterationsprozesse etabliert sein, da die digitale Wertschöpfung kleinere Iterationsschleifen fördert und nutzt. Um die Durchgängigkeit der digitalen Wertschöpfungskette zu gewährleisten, sind maßgeblich folgende Mechanismen zu etablieren:

- Einheitliche Datenformate zur werkzeugübergreifenden Integration
- Bedarfsgerechte Detaillierungsstufen je Anwendungsfall
- Know-how Schutz bei Bereitstellung und Weitergabe
- Nachverfolgbarkeit von Versionen und Änderungen

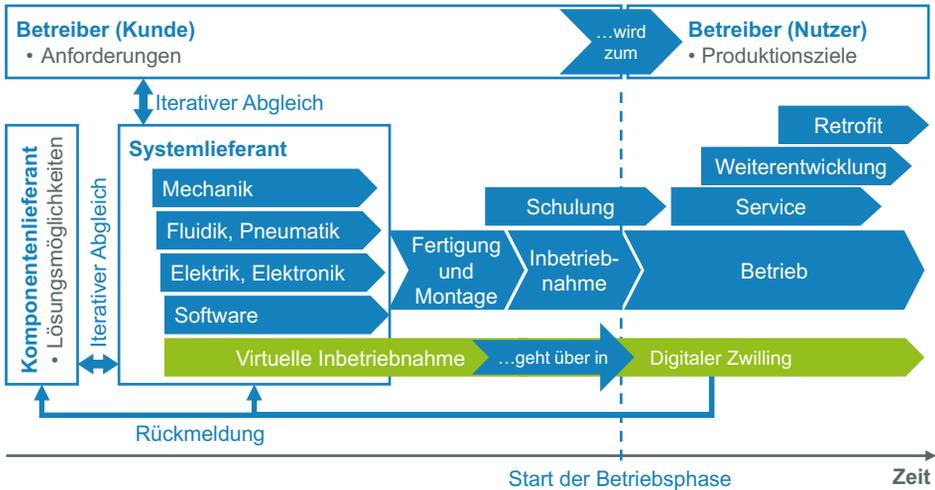


Abb. 8.4 Lebenszyklus einer Maschine oder Anlage – die Virtuelle Inbetriebnahme ist eine integrierte Disziplin im Engineering und bildet die Grundlage für den Digitalen Zwilling in der Betriebsphase (weiter entwickelt aus [8])

Die eingehende Untersuchung und Konzeption von Prozessen und Werkzeugen, die entlang einer digitalen Wertschöpfungskette eingesetzt werden können, sind aktueller Gegenstand von Forschung und Entwicklung [10, 11].

8.3 Exemplarische Betrachtung konkreter Nutzen entlang der Lieferkette

Die durch den Einsatz von VIBN und Digitalen Zwillingen vorhandenen Nutzenpotenziale lassen sich allgemein in qualitative und quantitative Nutzenpotenziale unterteilen. Dabei sind die qualitativen Nutzenpotenziale häufig ohne die Einführung zusätzlicher Kennzahlen, wie z. B. bei einer präzisen Prozessanalyse, nicht eindeutig messbar. Bei den quantitativen Nutzenpotenzialen steht die Messbarkeit sowohl absolut als auch relativ in einem Vorher-Nachher-Vergleich im Fokus.

Nach dem „Leitfaden Virtuelle Inbetriebnahme“ [8] können die **qualitativen Nutzenpotenziale** aller an der Zulieferkette beteiligten Rollen in fünf Zieldimensionen unterteilt werden: Kosten, Zeit, Qualität, Transparenz und Reaktionsfähigkeit. Die Ergänzung von Transparenz und Reaktionsfähigkeit zum bekannten Optimierungsdreieck (Zeit, Kosten, Qualität) aus [12] beschreibt die perfekte Produktion (vgl. Abb. 8.5). Transparenz bedeutet, dass Abläufe verständlich und nachvollziehbar gestaltet sind, sodass Abweichungen von Soll-Zuständen schnell erkannt werden. Reaktionsfähigkeit wird mit schnell reagierenden Abläufen in der Produktion beschrieben, wobei dies verstärkt für irreguläre Ereignisse, wie beispielsweise Störungen, Ausfälle oder Eilaufträge gilt [12].

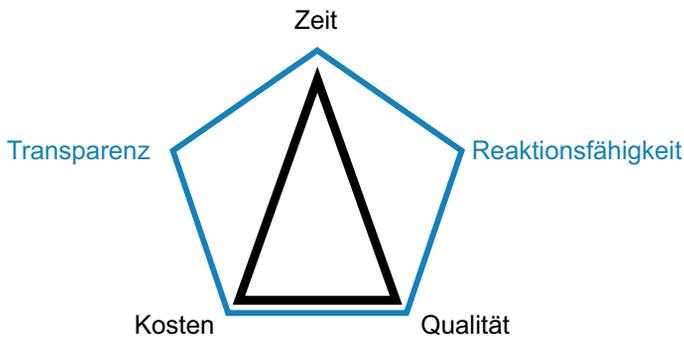


Abb. 8.5 Neben Kosten, Zeit und Qualität gehören Transparenz und Reaktionsfähigkeit zur perfekten Produktion, angelehnt an [12]

Qualitative Nutzenpotenziale müssen für jede Rolle und jedes Unternehmen individuell identifiziert werden. Eine Sammlung der qualitativen Nutzenpotenziale kann anschließend genutzt werden, um eine strategische Ausrichtung des Unternehmens für den Einsatz von Digitalen Zwillingen vorzunehmen. Dabei unterstützen die Nutzenpotenziale bei der Argumentation, warum ein VIBN-Prozess in der Entwicklung eingeführt werden sollte, warum die Teilnahme an einer digitalen Wertschöpfungskette sinnvoll ist und ob die Entwicklung von Digitalen Zwillingen für die Betriebsphase Vorteile bringt. Beispiele für qualitative Nutzenpotenziale aus [8] für die beteiligten Rollen im Maschinen- und Anlagenbau sind:

Nutzenpotenziale für den Komponentenlieferanten

- Zeit: Früherer Markteintritt durch virtuelle Demonstrationsszenarien
- Qualität: Sicherstellung der Funktionsfähigkeit in virtuellen Integrationstests
- Kosten: Virtuelle Erprobung statt kostenintensiver physischer Prototypen
- Transparenz: Nutzung von Simulationsmodellen in Vertrieb und Support
- Reaktionsfähigkeit: Gezielte Abstimmung an Simulationsmodellen

Nutzenpotenziale für den Systemlieferanten

- Zeit: Parallelisierte Prozesse von Entwicklung und virtueller Absicherung
- Qualität: Erhöhter Systemreifegrad durch gesteigerte Testabdeckung
- Kosten: Vermeidung von später kostenintensiver Fehlerbehebung
- Transparenz: Abstimmungsrunden mit dem Betreiber in der Entwicklungsphase
- Reaktionsfähigkeit: Nachvollziehen von Fehlerfällen an der Simulation

Nutzenpotenziale für den Betreiber

- Zeit: Zeitgerechte Lieferung der Maschine oder Anlage
- Qualität: Erhöhter Reifegrad, dadurch schnelles Erreichen des Betriebspunkts
- Kosten: Reduzierung von Verlusten in der Anlaufphase
- Transparenz: Abgleich zwischen realer und virtueller Welt
- Reaktionsfähigkeit: Verbesserter Support durch den Lieferanten

Der Leitfaden bietet für die Bezifferung der Potenziale der **quantitativen Nutzenpotenziale** eine Unterstützung zur Kosten-Nutzen-Abschätzung. Bei diesem dreistufigen Verfahren (siehe Abb. 8.6 rechts) werden zunächst die Kosten in den jeweiligen Wertschöpfungsbereichen und den zugehörigen Prozessen ermittelt. Im nächsten Schritt werden prozentuale Einsparungspotenziale abgeschätzt und abschließend die Einsparungspotenziale als Differenz von Kosten und Einsparungen quantitativ ausgewertet. Die Auswertung gibt einen Richtwert, welche Kostenersparnis mit VIBN im Unternehmen zu

Nutzenpotenziale		
Einteilung	qualitativ	quantitativ
Umsetzung	<u>Prozessbetrachtung</u> ...im Hinblick auf Kosten, Zeit, Qualität, Transparenz und Reaktionsfähigkeit	<u>Kosten-Nutzen-Abschätzung</u> 1. Kosten analysieren 2. Einsparungspotenziale erfassen 3. Ergebnisauswertung
Einsatz	Ziele für die Strategische Planung	Budgetplanung

Abb. 8.6 Überblick zur Einteilung, Umsetzung und dem Einsatz von ermittelten Nutzenpotenzialen der VIBN und dem Digitalen Zwilling

erwarten ist und dient gleichzeitig als Grundlage einer Budgetplanung bei der Einführung von VIBN [8].

Abb. 8.6 fasst die Einteilung, Umsetzung und den Einsatz der Nutzenpotenzialabschätzungen zusammen. Anzuwenden sind die Abschätzungen noch vor der Einführung von Digitalen Zwillingen oder der Teilnahme an einer digitalen Wertschöpfungskette. Im weiteren Verlauf können die erhobenen Daten genutzt werden, um den Fortschritt bei der Umsetzung zu messen.

Die Betrachtung der unternehmensspezifischen Nutzenpotenzialen anhand dieser dreistufigen Vorgehensweise führt zur ersten fundierten Planungsgrundlage hinsichtlich der Einführung von Digitalen Zwillingen und VIBN im Unternehmen. Die endgültige Entscheidungsgrundlage unter Berücksichtigung der technischen und organisatorischen Herausforderungen bekommt man oft erst, wenn die theoretische Nutzenpotenzialbetrachtung mit praktischen Erfahrungen im Rahmen eines Pilotprojekts überprüft und bestätigt wird.

Das Pilotprojekt hat dabei mehrere Vorteile. Im Rahmen der ersten Schritte wird ein unternehmensspezifischer VIBN-Prozess konzipiert und entwickelt sowie neue organisatorische Strukturen vorbereitet. Ein gut durchgeführtes Pilotprojekt kann zudem nachweislich den ersten transparenten Nutzen für das Unternehmen generieren. Ferner können weitere Nutzenpotenziale durch die Praxiserfahrung identifiziert und die Zielvorstellung konkretisiert werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass durch das Pilotprojekt auch die Kosten der VIBN sehr viel besser abgeschätzt werden und in Relation zu dem generierbaren Nutzen gesetzt werden können.

Für die Durchführung eines Pilotprojekts und die dafür notwendigen vorbereitenden Schritte liefert der „Leitfaden Virtuelle Inbetriebnahme“ eine praxisorientierte Anleitung

[8]. Eine detailliertere Darstellung der in einem Pilotprojekt notwendigen Schritte liefert die VDI/VDE-Richtlinie 3693 Blatt 2 „Einführung der Virtuellen Inbetriebnahme im Unternehmen“ [13].

8.4 Praxisbeispiele für den Nutzen der Virtuellen Inbetriebnahme und Digitalen Zwillingen

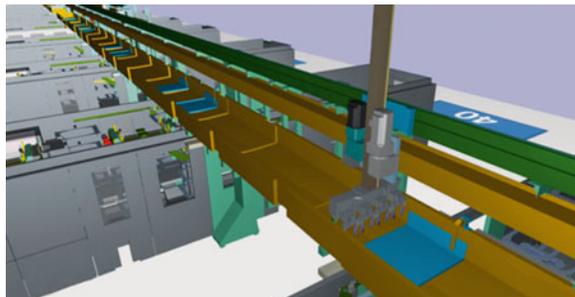
Im ersten Praxisbeispiel wird der Nutzen der VIBN bei einem Anlagenbetreiber aus dem Automobilumfeld betrachtet. Das Best Practice entstammt [9].

Die VIBN kann nicht nur bei der Entwicklung von neuen Anlagen (Greenfield), sondern auch für die Erweiterung bestehender Anlagen (Brownfield) effizient eingesetzt werden. In diesem Fall wird eine Simulationsplattform, die einen Aufbau des Digitalen Zwillinges aus virtuellen mechatronischen Baugruppen ermöglicht, vorausgesetzt. Bei Brownfield-Anlagen werden virtuelle Produktionseinheiten wie bei realen Anlagen gegen neue Produktionseinheiten ausgetauscht beziehungsweise die bestehende Produktion durch neue Technologien erweitert.

Zielsetzung der VIBN in diesem Einsatzbereich ist die Absicherung des Software-Reifegrades vor der eigentlichen Integration. Hierbei wird ein besonderes Augenmerk auf verklemmungsfreie Abläufe, Verhinderung von Kollisionen sowie die Qualität der Schnittstelleninteraktion zwischen Logistikmodul und Bearbeitungszentren gelegt. Der Systemtest erfolgt unter Einbeziehung von realen Auftragsdaten des übergeordneten Systems, siehe Abb. 8.7.

Da virtuelle Modelle für alle Komponenten und Baugruppen vor ihrer realen Umsetzung zur Verfügung standen, konnte die Entwicklung der komplexen Steuerungssoftware daran vorgenommen und das Testen der Integration vorgezogen werden. So wurde bereits vor der Verfügbarkeit der realen Anlage ein hoher Software-Reifegrad erreicht. Als virtuelle Testumgebung kam neben einer offenen Simulationsplattform eine Hardware-in-the-Loop Simulation bestehend aus drei Testtracks für NC-Steuerung, Visualisierung und die Bedienfelder zum Einsatz.

Abb. 8.7 Virtuelles Produktionssystem mit Logistikmodul und Bearbeitungszentren



Bei der Erweiterung von Brownfield-Anlagen konnten folgende Nutzenpotenziale realisiert werden:

- Reduzierung der Produktionsunterbrechung um etwa 75 % auf etwa 2 Tage durch sehr hohen Software-Reifegrad
- Deutliche Reduzierung der Anlaufkosten
- Reduzierung der Integrationszeit als Folge der steilen Anlaufkurve um ca. 66 %
- Reduzierung der gesamten Projektdurchlaufzeit um ca. 10 %
- Frühere Übergabe an den Betreiber gepaart mit erhöhtem OEE (Overall Equipment Effectiveness)

Die Anforderungen an eine Simulationsplattform und Digitale Zwillinge im Maschinen- und Anlagenbau und der resultierende Nutzen werden sehr stark durch die jeweilige Phase in der digitalen Wertschöpfungskette und den Schwerpunkt des Geschäftsmodells bestimmt. Ein Grundprinzip charakterisiert jedoch alle Phasen beziehungsweise Einsatzbereiche: Die Wiederverwendung von Simulationsmodellen im Sinne eines mechatronischen Baukastensystems, mit welchem die Produktstruktur, hier das Produktionssystem, optimal abgebildet wird, sollte sichergestellt sein. Das Produktionssystem besteht in der Regel aus Komponenten, mechatronischen Baugruppen und Produktionsbereichen beziehungsweise -zellen. Der Nutzen einer digitalen Wertschöpfungskette entsteht, wenn die Lieferanten ihre mechatronischen Komponenten direkt als virtuelle Modelle für den Digitalen Zwilling anbieten und der Systemintegrator früh, nach dem Baukastenprinzip, seine Lösungen verifizieren kann, siehe Abb. 8.8.

Baukasten

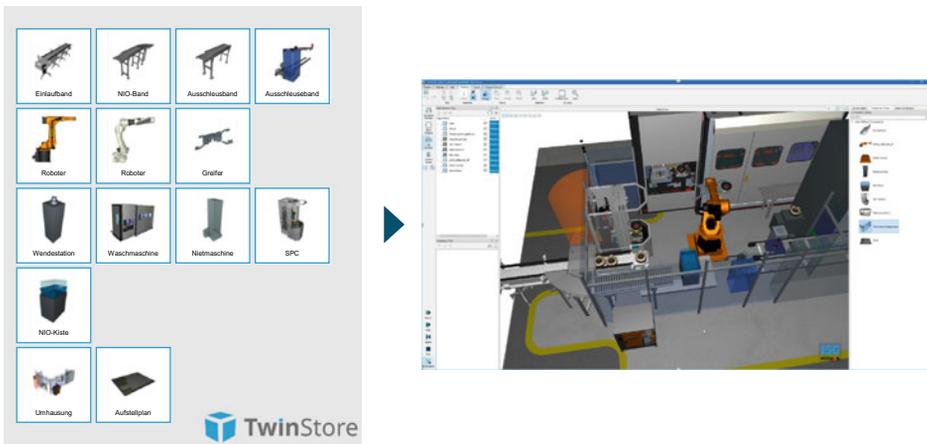
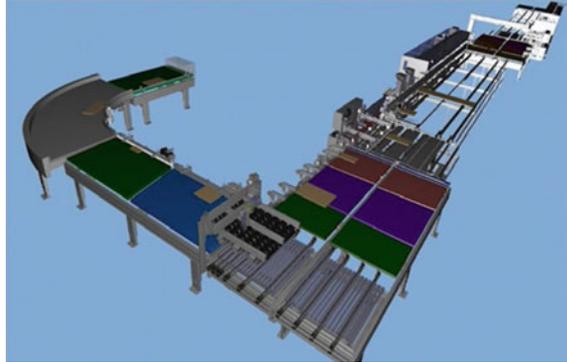


Abb. 8.8 Aufbau eines Simulationsmodells aus einem virtuellen mechatronischen Baukasten

Abb. 8.9 Produktionssystem als virtuelles 3D-Modell für die VIBN



Im Folgenden wird ein Praxisbeispiel einer lieferkettenübergreifenden digitalen Wertschöpfungskette betrachtet (siehe [9]). Bereitsteller des Praxisbeispiels ist ein Systemintegrator (Anlagenbauer), welcher Anlagen für die Holzverarbeitung entwickelt. Das Best Practice zeigt die Bereitstellung und Nutzung von Verhaltensmodellen für die VIBN entlang der gesamten Zulieferkette. Zielsetzung der VIBN beim Anlagenbauer ist die Ablösung der internen Abnahme an realen Anlagen im Werk durch die VIBN. Ferner stellen die Simulationsmodelle, wie zum Beispiel in Abb. 8.9 gezeigt, die Basis für Machbarkeitsstudien und zur Absicherung von Abnahmekriterien am Modell.

Der Reduzierung von Kosten und Projektzeiten sowie der Erhöhung der Qualität der ausgelieferten Anlagen durch die VIBN stehen zunächst jedoch Aufwände für die Erstellung von Simulationsmodellen gegenüber.

In diesem Beispiel werden die Anlagen (Losgröße 1) aus virtuellen Komponenten und Baugruppen in Analogie zu den realen Anlagen konfiguriert. Dabei kommen wiederverwendbare mechatronische Einheiten zum Einsatz, die die Modularität und Struktur 1:1 abbilden.

Die Simulationsmodelle entstehen entlang der realen Wertschöpfungskette und ergänzen diese durch die digitale Wertschöpfung. Im idealen Fall liefern Komponentenhersteller die Modelle der realen Komponenten als Teil des Lieferumfangs aus. Hierzu zählen virtuelle Antriebe, Sensoren und weitere intelligente Feldbusteilnehmer, die für den Systemtest mittels Hardware-in-the-Loop Simulation benötigt werden.

Die Konfiguration als Grundprinzip für die Erstellung eines virtuellen Produktionssystems aus mechatronischen Baugruppen ermöglicht anschließend die Automatisierung des Erstellungsprozesses durch Konfigurationsvorschriften, die durch die Simulationsplattform interpretiert werden.

Zu den Nutzenpotenzialen durch die lieferkettenübergreifende Bereitstellung von Verhaltensmodellen gehören:

- Einsparung von Flächen/Hallenbelegungen für die internen Vorab-Inbetriebnahmen
- Reduzierung von Personal- und Materialkosten für die reale Inbetriebnahme

- Automatische Erstellung der Simulationsmodelle aus einem Baukastensystem
- Kürzere Projektdurchlaufzeiten als Basis für einen frühen Markteintritt
- Vertrauensbasis zwischen Betreiber und Kunde durch frühen Nachweis der Leistungsfähigkeit anhand von Simulationsmodellen

Weitere Best Practices des VDMA [9] zeigen, dass bereits durch die vorgezogene VIBN ein Nutzen in der Phase des Engineerings entsteht. In den meisten Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus stellt die VIBN den Einstieg in die Simulationstechnologie dar. Aufbauend auf den gesammelten Erfahrungen und der etablierten Prozesse werden weitere Potenziale erkannt und der Einsatz im Sinne einer digitalen Wertschöpfung sukzessive ausgebaut.

Voraussetzung hierfür sind Simulationsplattformen, welche das Produktionssystem hinsichtlich der Modularität und Struktur 1:1 abbilden. Die Simulationsmodelle der VIBN können dann bereits während der Akquise durch den Vertrieb genutzt werden. Sie dienen im Projektengineering der Analyse von alternativen Lösungen und der Auswahl derjenigen Lösung, welche die Anforderungen des Kunden am besten erfüllt. Ferner werden die Simulationsmodelle als Digitale Zwillinge zur Optimierung der Produktion, Qualifizierung des Personals und für innovative Servicekonzepte genutzt.

Abb. 8.10 zeigt den quantitativen Nutzen der konsequenten Überführung der Modelle für die VIBN in betriebsbegleitende Digitale Zwillinge. Die Betrachtung konzentriert sich auf den Betreiber einer Maschine oder Anlage. Die Werte sind Erfahrungswerte von Kunden des Simulationswerkzeugs ISG-virtuos.

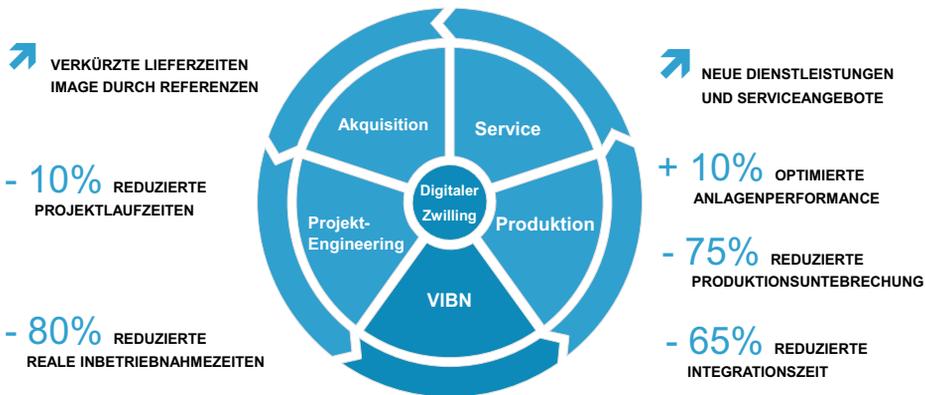


Abb. 8.10 Quantitativer Nutzen der Digitalen Zwillinge

8.5 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurden Nutzenpotenziale der VIBN und Digitaler Zwillinge für verschiedene Rollen in den Wertschöpfungsketten des Maschinen- und Anlagenbaus betrachtet. Dazu wurden zunächst die relevanten Rollen der Wertschöpfungsketten identifiziert. Anschließend wurden qualitative und quantitative Nutzenpotenziale aufgestellt und den beteiligten Rollen zugeordnet. Für jedes Unternehmen sind die umsetzbaren Nutzenpotenziale verschieden und individuell zu ermitteln. Anhand von Beispielen aus der industriellen Praxis wurden konkrete Nutzen eines Anlagenbetreibers für die Automobilfertigung und eines Anlagenbauers für die Holzbearbeitung dargelegt. Die in diesem Beitrag dargelegten theoretischen und praktischen Nutzenpotenziale können als Vorlage bei der Argumentation für die Einführung der VIBN und Digitalen Zwillingen in einem Unternehmen genutzt werden. Darüber hinaus kann die konkrete Budgetplanung mittels der Nutzenpotenziale unterstützt werden.

Für die zukünftige Entwicklung ist vor allem durch die Etablierung von digitalen Wertschöpfungsketten, welche über geeignete Simulationsplattformen verfügen, eine Steigerung der Effizienz beim Einsatz von VIBN und Digitalen Zwillingen zu erwarten. Dafür sind durchgängige Austauschmechanismen von digitalen Modellen, vom Komponentenlieferanten, über den Systemintegrator bis hin zum Betreiber, zu entwickeln.

Literatur

1. Kagermann H (2014) Chancen von Industrie 4.0 nutzen. In: Bauernhansl T, Hompel M ten, Vogel-Heuser B (Hrsg) Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Springer Vieweg, Wiesbaden, S 603–614
2. Drath R (2018) The digital twin: the evolution of a key concept of industry 4.0. In: Beyerer (Hrsg) visIT. Industrial IoT – Digital Twin. 19., Aufl., Karlsruhe, S 6–7
3. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung (WiGeP) (2020) WiGeP-Positionspapier: „Digitaler Zwilling“. http://www.wigep.de/fileadmin/Positions-_und_Impuls_papiere/Positionspapier_Digitaler_Zwilling.pdf. Zugegriffen: 9 März 2021
4. Fuller A, Fan Z, Day C, Barlow C (2020) Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. IEEE Access, S 108952–108971
5. Zäh MF, Wunsch G, Hensel T, Lindworsky A (2006) Feldstudie – Virtuelle Inbetriebnahme. wt Werkstattstechnik online 96(10):767–771
6. Daniel C (2015) Virtuelle Komponenten verkürzen Inbetriebnahme. MaschinenMarkt 41:40–42
7. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA) (2017) IT-Report Simulation + Visualisierung 2017; Einsatz von Simulationswerkzeugen, Einbindung in die Organisation und Entwicklungstendenzen. VDMA Verlag, Frankfurt a. M.
8. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA) (2020) Leitfaden Virtuelle Inbetriebnahme – Handlungsempfehlungen zum wirtschaftlichen Einstieg. VDMA Verlag GmbH, Frankfurt a. M.
9. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA) (2020) Best Practices zur Virtuellen Inbetriebnahme. VDMA Verlag GmbH, Frankfurt a. M.

10. Tinsel EF, Fur S, Lechler A, Riedel O (2020) Durchgängigkeit von Steuerungstests – Konzeption einer durchgängigen simulationsbasierten Steuerungstestplattform. *wt Werkstatttechnik online*, S 277–281
11. Scheifele C, Verl A, Tekouo W, Belgharda S, Mauderer T (2020) Eine Online-Plattform für Digitale Zwillinge. *atp edition*, S 58–65, 11–12
12. Kletti J, Schumacher J (2014) Die perfekte Produktion – Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT), 2. Aufl., Springer Vieweg, Berlin
13. Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI) (2018) Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (VDE), VDI/VDE 3693 Blatt 2 Virtuelle Inbetriebnahme – Einführung der virtuellen Inbetriebnahme in Unternehmen. Beuth, Berlin

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.



Teil II

Echtzeitsimulation und Modellgenerierung im Entwicklungsprozess



Automatische Modellgenerierung aus Engineering-Daten

9

Stefan Scheifele und Alexander Verl

Zusammenfassung

Vom modernen Maschinen – und Anlagenbau wird erwartet individuelle Kundenwünsche hinsichtlich Funktionalität, Qualität und Wirtschaftlichkeit zu erfüllen. Dies gelingt durch ein mechatronisches Engineering, das kundenindividuelle Maschinen und Anlagen auf Basis eines Baukastens aus wiederverwendbaren Komponenten realisieren kann. Dieser Beitrag stellt dar, wie auch der Digitale Zwilling für die Virtuelle Inbetriebnahme ebenso modular und auf denselben Prinzipien beruhend automatisiert generiert werden kann. Durch Integration der Virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) in den mechatronischen Engineeringprozess lässt sich die VIBN wirtschaftlich in der Praxis einsetzen. Dies wird anhand einer modularen Fertigungsanlage für die vollautomatisierte Möbelfertigung gezeigt.

9.1 Einleitung

Als Schlüssel zu einer schnellen kundenspezifischen Maschinen- und Anlagenkonfiguration setzen Werkzeugmaschinenhersteller heute auf ein systembasiertes Engineering, welches verschiedene Funktionsanforderungen mit einem Minimum an Ressourcen erfüllt [1]. Hierbei werden die Produktionsanlagen anhand wiederverwendbarer Baugruppen aus

S. Scheifele (✉)

ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH, Stuttgart, Deutschland

E-Mail: stefan.scheifele@isg-stuttgart.de

A. Verl

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW),
Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

© Der/die Autor(en) 2024

A. Verl, S. Röck und C. Scheifele (Hrsg.),

Echtzeitsimulation in der Produktionsautomatisierung,

https://doi.org/10.1007/978-3-662-66217-5_9

157

einem mechatronischen Baukasten aufgebaut. Sämtliche Entwicklungs- und Projektierungsabläufe und die dafür eingesetzten Softwaretools sind auf diesen Baukasten abgestimmt weshalb dieser nicht einfach ausgetauscht, sondern nur ergänzt und kompatibel weiterentwickelt werden kann.

Durch immer komplexer werdende Fertigungsabläufe in den Maschinen und Anlagen muss die Inbetriebnahme durch virtuelle Engineering-Methoden, wie z. B. die Virtuelle Inbetriebnahme unterstützt werden. Die hierfür notwendigen Modelle sind heute jedoch nicht im mechatronischen Baukasten berücksichtigt und auch nicht standardisiert. Das Konzept der cyber-physischen Systeme (CPS) der „Industrie 4.0“ könnte in reduzierter Form der Schlüssel sein: Eine mechatronische Baugruppe, welche alle notwendigen Informationen und Daten beinhaltet.

Der Beitrag stellt vor, wie unter Nutzung des CPS-Konzepts virtuelle Maschinen (VM) und Anlagen für die Virtuelle Inbetriebnahme im Rahmen des etablierten Engineeringprozesses von mechatronischen Maschinen und Anlagen automatisiert erstellt werden können.

9.2 Stand der Technik

In innovativen Maschinenbauunternehmen werden bereits modulare Konzepte entwickelt, um damit Produktionsanlagen für unterschiedlichste Fertigungsaufgaben wirtschaftlich aufbauen und anbieten zu können. Dabei ist die Modularisierung nicht nur auf den mechanischen Kontext begrenzt, sondern vielmehr als Abbildung mechatronischer Einheiten zu verstehen.

Modularisierung der Hardware

Bereits Ende der 90er Jahre kam die Idee der rekonfigurierbaren Maschinen auf. Ein Prototyp eines rekonfigurierbaren Robotersystems wurde von Pritschow et al. [2] vorgestellt. Ziel der Modularisierung in mechatronische Komponenten war, das Hinzufügen, Entfernen oder Verändern von Modulen an einem Robotersystem in kurzer Zeit zu ermöglichen. Dabei bestimmt die Wahl der Systemgrenzen eines Moduls die Komplexität der Modulschnittstelle sowie die Rekonfigurationseffizienz. Folgende Schnittstellenarten wurden als einheitliche Modulschnittstellen identifiziert [2]:

- Die mechanische Schnittstelle, welche die einzelnen Module physisch miteinander verbindet,
- Die funktionale Schnittstelle, welche die Funktionalität beschreibt, wie z. B. 2-achsiges Robotergelenk mit Differentialgelenk,
- Die energetische Schnittstelle, welche die Module mit Energie versorgt,

- Die kommunikative Schnittstelle, welche die Kommunikation zwischen Modulen und Steuerungssystemen ermöglicht.

Eine mechatronische Komponente ist demnach ein Subsystem, welches so wenig externe Schnittstellen wie möglich besitzt. Das bedeutet allerdings auch, dass mechatronische Komponenten auf eine einzige oder einige gleiche Funktionen beschränkt sind, damit die mechatronische Komponente eine abgeschlossene und autonome Einheit bildet.

Rekonfigurierbare Maschinensysteme bestehen somit aus definiert kombinierbaren mechatronischen Modulen mit einheitlichen Schnittstellen, die sich in ihren kinematischen und dynamischen Eigenschaften parametrisch verändern lassen.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen konnte eine einheitliche Definition von Modulen, unabhängig davon, ob diese einen Roboter, eine Werkzeugmaschine oder ein Produktionssystem aufbauen, gefunden werden.

Modularisierung der Software

Mit der Einführung der integrierten Schaltungstechnik und der Software-Hochsprache C konnten Ende der 1980er Jahre fortschrittliche Steuerungen entwickelt werden, die auf austauschbaren Softwaremodulen beruhen. Dies führte 1992 zu dem von der EU geförderten Projekt OSACA, das die Idee verfolgte eine Steuerung als Softwareplattform mit einheitlichen Schnittstellen für austauschbare Applikationsmodulen zu konzipieren.

Im Jahr 2001 wurde das Projektergebnis in [3] veröffentlicht. Mithilfe einer Bausteinbibliothek aus Softwarebausteinen konnte der Anwender in einfacher Weise eine angepasste Steuerung konfigurieren. In diesem Projekt wurden erstmals objektorientierte Konzepte in der industriellen Steuerungstechnik umgesetzt.

Modularisierung der Software- und Hardwareentwicklung

Die Entwicklungen und Erkenntnisse aus dem Bereich der Modularisierung von Software und Hardware bilden heute die Grundlage für das mechatronische Engineering. Mechatronische Module umfassen und verbinden Mechanik, Elektrik und Softwaretechnik (vgl. VDI-Richtlinie 2206 [4]).

Das erforderliche Vorgehensmodell für das mechatronische funktionale Engineering nach dem Prinzip der Objektorientierung wurden unter anderem in den Forschungsprojekten „Föderal“ [5] und „AQUIMO“ [6] entwickelt. Dabei wird im Engineering-Prozess zwischen „Entwicklung“ und „Projektierung“ unterschieden. Bei der Entwicklung werden projektneutrale, wiederverwendbare, mechatronische Komponenten nach vorgegebenen Standards entwickelt und in einem Baukasten abgelegt. Die so entstehende Baukastenkomponente verfügt über disziplinspezifische Daten (z. B. Stücklisten für die Mechanik, Stromlaufpläne für die Elektrotechnik, Programmbausteine für die Softwaretechnik). Bei der Projektierung wird anschließend aus dem entstandenen Baukasten eine auftragsspezifische Maschine zusammengestellt. Es entsteht eine disziplinübergreifende, mechatronische Gesamtkonfiguration der Maschine, welche alle benötigten Unterlagen

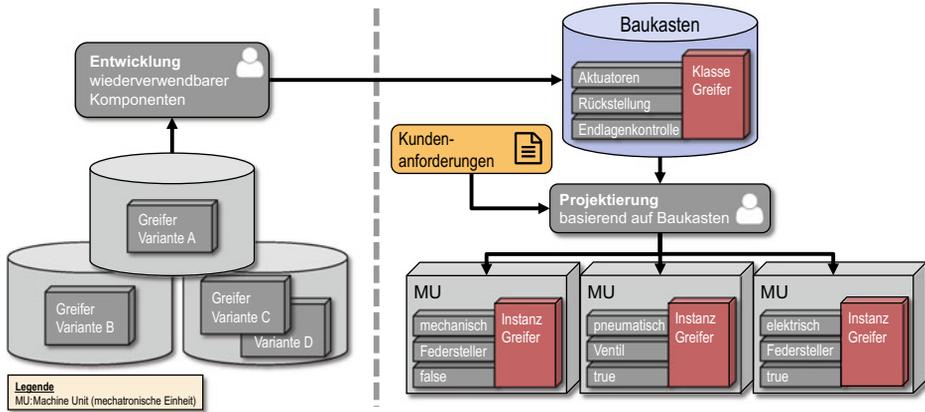


Abb. 9.1 Vorgehensmodell des „Föderal“-Projektes. (nach [5])

für die Fertigung, die Softwaretechnik und die Inbetriebnahme enthält und aus welcher alle Dokumentationen auftragsspezifisch generiert werden (vgl. Abb. 9.1).

Beim idealisierten Ansatz der mechatronischen Module nach Pritschow et al. [2] sind die mechatronischen Module abgeschlossene funktionale Einheiten, welche nicht nur Mechanik, Elektrik und Software umfassen, sondern auch ein eigenes Steuerungsmodul besitzen. Dadurch wird ein schaltschrankloser Aufbau des modularen Systems ermöglicht. Nur durch ein solches Konzept kann eine schnelle Austauschbarkeit einzelner Module praktisch umgesetzt werden. Anwendungsmöglichkeiten findet man überall dort, wo funktional abgeschlossene Einzelmaschinen über einen „Durchlauf der Werkstücke“ miteinander verkettet sind, beispielsweise in der Förder- und Verpackungstechnik sowie bei den Durchlaufmaschinen zur Holzbearbeitung. Ein modulares Robotersystem aus autarken Achsen ist damit jedoch nicht realisierbar, da keine industriell verfügbare Steuerungslösung existiert, die unabhängige Einzelachsen über eine achsübergreifende Bahnsteuerung koppeln kann.

Aus Kostengründen wird im allgemeinen Maschinen- und Anlagenbau auf eine Modularisierung nach dem oben dargestellten Konzept verzichtet, das heißt die Mechanik wird von der Elektrik getrennt aufgebaut: Ein Großteil der E/A (Ein-/Ausgabe)-Schnittstellen ist in einem zentralen Schaltschrank installiert, da nur so die vergleichsweise teuren E/A-Schnittstellen und die Leistungselektronik der Antriebe optimal ausgenutzt werden können.

Doch nicht nur die Mechanik und die Elektrik werden aus den mechatronischen Modulen gelöst, auch die moduleigene Steuerung wird, soweit sinnvoll, auf ein zentrales Steuerungssystem zusammengefasst. Steuerungstechnische Abhängigkeiten der einzelnen Module können so mit wenig Aufwand realisiert werden.

9.3 Konzeption

Die durch das mechatronische Konzept einhergehende hohe Komplexität kann nur durch Engineeringtools für das funktionale Engineering nach „Föderal“ [5] und „AQUIMO“ [6] beherrscht werden. Denn nicht nur der elektrische Aufbau wird deutlich komplexer als beim idealisierten mechatronischen Konzept, sondern auch die Steuerungsprogramme nehmen an Komplexität deutlich zu. Maschinen, welche nach diesem Konzept gebaut wurden, besitzen meist ein zentrales Steuerungssystem. Dieses benötigt Abstraktionsschichten um einen modularen und kostengünstigen Aufbau realisieren zu können.

Die Engineeringtools nutzen die funktionale Sicht auf die zu projektierende Maschine beziehungsweise Anlage. Ein Experte konfiguriert aus einem Baukasten heraus die mechatronische Einheit für eine Fertigungsaufgabe (vgl. Abb. 9.2). Das Projektierungstool kennt sämtliche mechatronischen Baugruppen, sowie deren Querbeziehungen, Abhängigkeiten und Kompatibilitäten. Einer Baugruppe sind disziplinspezifische Daten zugeordnet, wie zum Beispiel ECAD- (Electronic Computer-Aided Design), MCAD- (Mechanical Computer-Aided Design), Dokumentationsdaten, Konfigurationsdaten für die CNC und die SPS, kundenspezifische Bedienoberflächen, Wartungspläne und Fehlerlexte in verschiedenen Sprachen. Unter Berücksichtigung dieser Daten leitet das Projektierungstool den Anwender durch die Zusammenstellung einer neuen Maschinenbeziehungsweise Anlagenkonfiguration und konfiguriert Generatoren für die Erzeugung des SPS-Quellcodes sowie der Konfiguration der CNC.

Treten bei der Generierung der Steuerung logische oder funktionale Fehler auf, bleiben diese aufgrund des Umfangs eines solchen Steuerungsprogramms meist unerkannt. Bei der Inbetriebnahme der Maschine werden aus zeitlichen Gründen und aus Gründen der Maschinenunversehrtheit meist nur die Basisfunktionen des Sicherheitsprogramms, als auch des funktionalen Programms getestet – ein Großteil des Steuerungsprogramms, nach Expertenmeinung ca. 2/3, wird somit nicht überprüft.

Um diese wachsende Komplexität zu beherrschen, findet die Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) zunehmend im Engineeringprozess von Maschinen und Anlagen Einsatz. Dabei

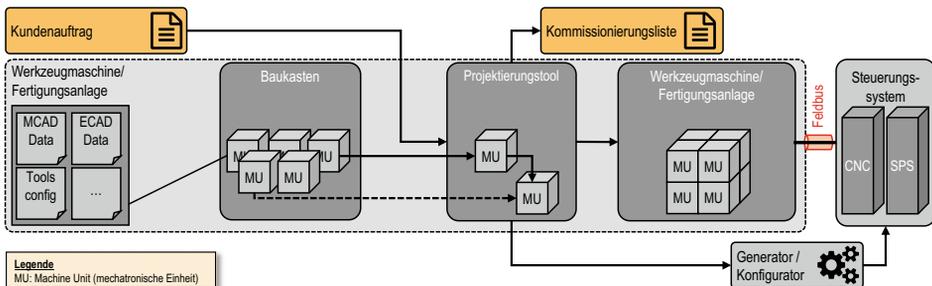


Abb. 9.2 Ablauf einer Projektierung

wird mittels einer an die reale Steuerung angekoppelte Hardware-in-the-Loop Simulation (HiLS) das Verhalten der realen Maschine simuliert [7]. Damit die Steuerung deterministisch mit Felddbusignalen versorgt wird und sichergestellt werden kann, dass jedes Signal auch erfasst und verarbeitet wird, muss der Simulationsrechner die virtuelle Maschine im Steuerungstakt berechnen. Nur so kann sichergestellt werden, dass das Verhalten der virtuellen Maschine am Felddbus auch dem der realen Maschine entspricht.

Unterstützung durch virtuelle Methoden

Seit Anfang der 2000er Jahre wird an der virtuellen Maschine (VM) in Steuerungsechtzeit geforscht. Während zu Beginn noch der Test des Steuerungssystems im Vordergrund [7, 8, 9, 10] stand, hat man sich bald mit der Modularisierung und Wiederverwendbarkeit der VM im Einklang mit den Erkenntnissen und Vorgehensmodellen aus dem Engineering beschäftigt [11, 12].

Je nach Modellierungstiefe und Zweck der VM kommen verschiedene Ansätze zum Einsatz, welche von der Modellierung echtzeitfähiger Verhaltensmodelle für die Virtuelle Inbetriebnahme [13] bis hin zur realitätsgetreuen Abbildung von physikalischen Effekten und Eigenschaften der gesamten Maschine oder Anlage [14] reichen.

Verschiedene Werkzeuge für die HiLS sind auf dem Markt erhältlich. Ein HiLS-Tool, das die hohen Anforderungen einer steuerungsgekoppelten HiLS erfüllt, ist ISG-virtuos der Fima ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH. Bei ISG-virtuos ist die HiLS primär in die Verhaltenseinheit (BU) und die Geometrieinheit (GU) unterteilt (siehe Abb. 9.3). Gemeinsam bauen sie das virtuelle Modul (VU) auf. Die VU ist das virtuelle Äquivalent des mechatronischen Moduls im Baukasten [15].

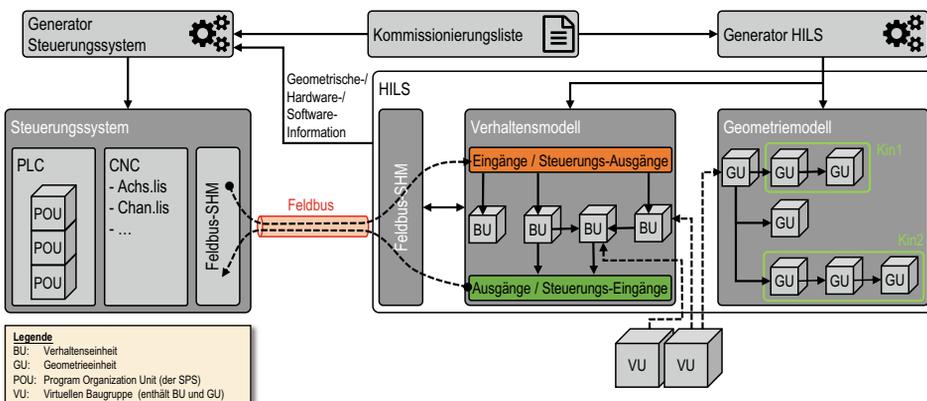


Abb. 9.3 Konzept einer modularen Hardware-in-the-Loop Simulation [15]

Integration der virtuellen Maschine in den mechatronischen Engineeringprozess

Der Engineeringprozess nach „Föderal“ [5] sieht vor, dass sämtliche Baugruppen, welche in einer Maschine oder Anlage verwendet werden können, unabhängig voneinander konstruiert werden. Sind alle benötigten Daten der Baugruppe (MCAD, ECAD, Dokumentation, Steuerungsprogramm, ...) vorhanden, werden diese im mechatronischen Baukasten des Herstellers abgelegt. Hieraus kann eine neue Maschine oder Anlage projiziert werden (vgl. Abb. 9.2).

Erweitert man diesen Ansatz in Analogie zu Abb. 9.2 um die virtuelle Maschine, so entsteht der Ablauf in Abb. 9.4: Das Projektierungstool erzeugt aus der Anforderungsliste des Kunden eine Kommissionierungsliste, welche für den Aufbau der realen, als auch für die virtuelle Maschine genutzt wird. Aus einem Baukasten heraus – bei der virtuellen Maschine sind die virtuellen Baugruppen (VU) in einer Datenbank abgelegt – werden für die Anforderungen passende Baugruppen ausgewählt und zusammengestellt. Während ein Baukastenelement aus sämtlichen Engineeringdaten besteht, umfasst eine virtuelle Baugruppe das Verhaltensmodell (BU) und das Geometriemodell (GU).

Durch die getrennte Modellierung und Verwaltung der mechatronischen Baugruppe (MU) und der virtuellen Baugruppe (VU) ist es nicht auszuschließen, dass sich MU und VU getrennt voneinander entwickeln. Es ist sogar wahrscheinlich, dass die VU aus Zeitmangel, oder weil deren Relevanz nicht hoch genug eingeschätzt wird, hinter der Entwicklung der MU zurückbleibt. Der mechatronische und virtuelle Baukasten wird damit inkonsistent. Eine automatisierte Erstellung der virtuellen Maschine ist dann nicht mehr möglich. Es gilt also eine Lösung zu finden, welche die Entwickler zwingt VU und MU

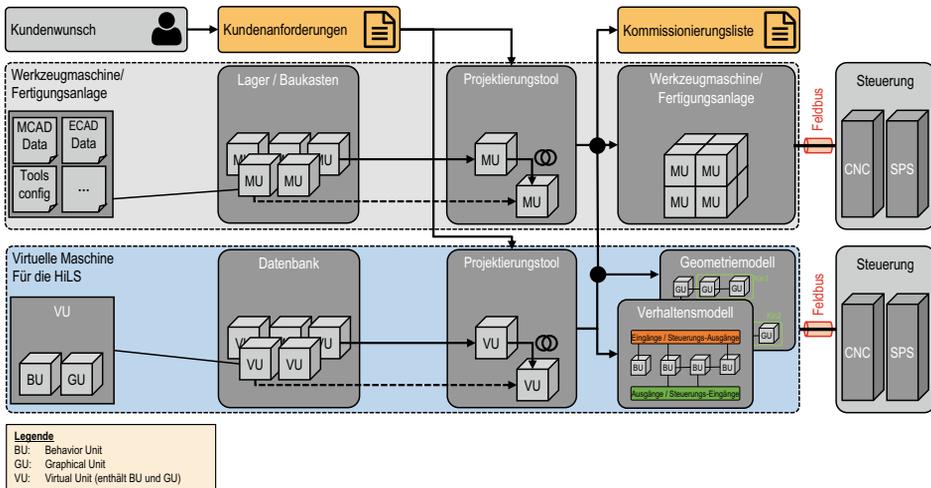


Abb. 9.4 Homogenisierung des Engineerings realer und virtueller Maschinen

zusammen zu entwickeln und somit die virtuelle Baugruppe als Teil des mechatronischen Engineerings zu sehen.

Der objektorientierte Ansatz nach „Föederal“ [5] und „AQUIMO“ [6] legt es nahe, die separate Datenbank für virtuelle Baugruppen aufzulösen und die VU in die MU des mechatronischen Baukastens zu integrieren (vgl. Abb. 9.5). Dies hat zur Folge, dass sie zusammen verwaltet und als Einheit gesehen werden. Eine solche Komponente wird im Folgenden, angelehnt an die internationale Begriffsdefinition [16], als Cyber-physisches System (CPS) bezeichnet.

Neben der internationalen Begriffsdefinition gibt es in der Literatur weitere Ansätze ein CPS zu definieren, welche sich mit zunehmendem Verständnis der Anforderungen stetig weiterentwickeln [16, 17, 18]. Allen diesen Ansätzen ist gemein, dass keine Lösung für

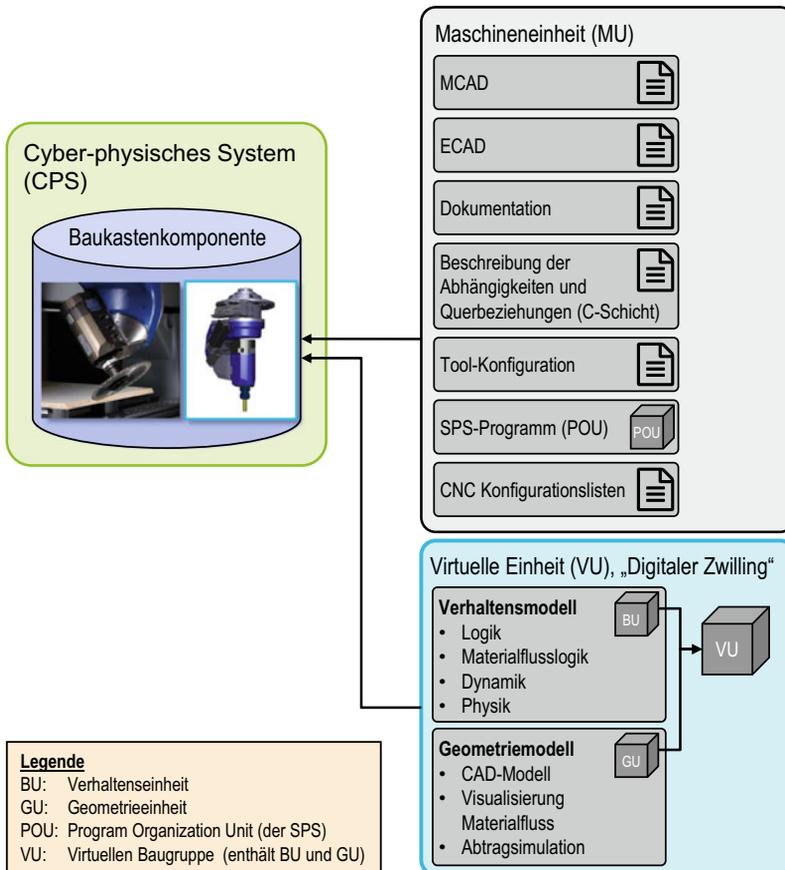


Abb. 9.5 Zusammenführung der Modelle im mechatronischen Baukasten zum cyber-physischen System (CPS)

die Integration einer virtuellen Maschine gefunden wurde. Dies begründet sich darin, dass es zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Buchbeitrags keinen einheitlichen Standard für ein Modell für die (deterministische, echtzeitfähige) Virtuelle Inbetriebnahme gab, da diesen Modellen toolspezifische Bibliotheken zugrunde liegen.

9.4 Verifikation

Zur Verifikation des Konzeptes wurden zwei Maschinen mittlerer und großer Bauform umgesetzt. Der konzipierte und realisierte Ablauf der Generierung eines HiLS-Systems ist in Abb. 9.6 schematisch dargestellt.

Nachdem ein Kundenauftrag eingegangen ist, wird über ein Projektierungstool eine neue Maschine zusammengestellt, die zu den Kundenanforderungen passt. Hieraus entsteht die Kommissionierungsliste (1), welche die Basis für die nächsten Schritte ist.

Aus der Kommissionierungsliste lassen sich alle benötigten Dokumente für den Aufbau der Maschine ableiten. Parallel hierzu wird über einen Generator das Steuerungssystem konfiguriert und parametrisiert (2). Die benötigten Daten lassen sich ebenfalls aus der Kommissionierungsliste ableiten. Im letzten Schritt wird über einen weiteren Generator die virtuelle Maschine erstellt (3). Hierfür werden aus der Kommissionierungsliste die darin definierten Baugruppen und Funktionsbaugruppen extrahiert. Abschließend wird das Steuerungssystem an der virtuellen Maschine in Betrieb genommen. Durch die 1:1-Abbildung der realen Maschine am Feldbus lassen sich die Ergebnisse der VIBN direkt auf die Ansteuerung der realen Maschine übertragen. Sobald diese fertig aufgebaut ist, kann das Steuerungssystem an mit großer Zeiteinsparung „real“ in Betrieb genommen werden.

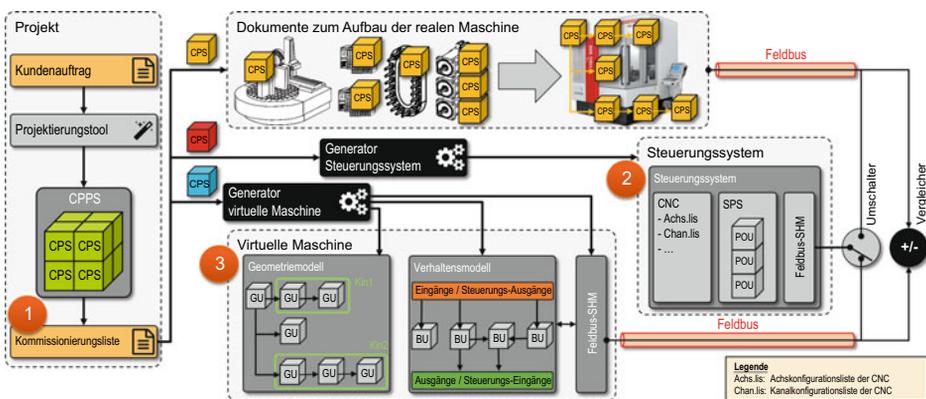


Abb. 9.6 Ablauf der Generierung einer HiLS (schematische Darstellung)

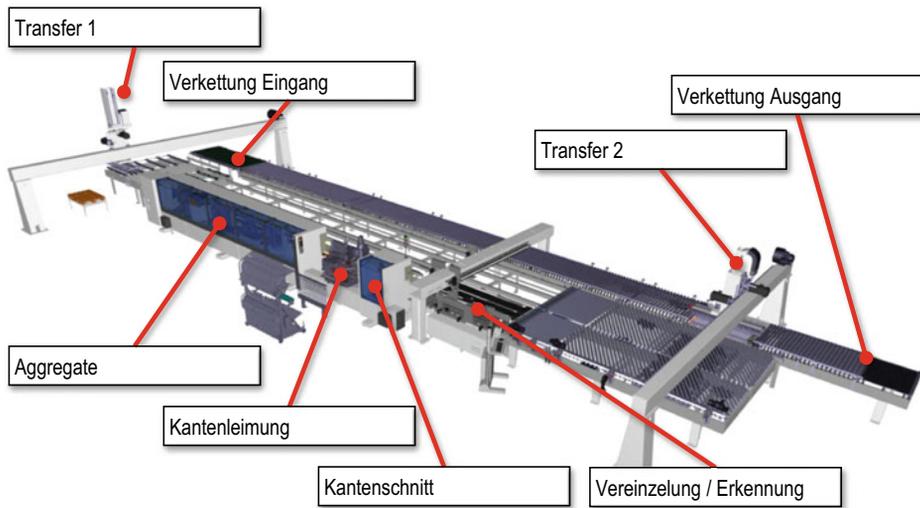


Abb. 9.7 Anlagenteil einer Fertigungsanlage für die vollautomatisierte Möbelfertigung der Firma HOMAG GmbH

Für den abschließenden Test des Modellgenerators wurde ein Anlagenteil einer hochkomplexen Fertigungsanlage (Abb. 9.7) für die vollautomatisierte Möbelfertigung der Firma HOMAG GmbH generiert. Die Anlagenteile sind über Förderstrecken miteinander verbunden. Die Werkstücke werden von einem Transfer-Portal aus der Förderstrecke entnommen und in die Anlage eingebracht. Ein zweites Transfer-Portal führt die bearbeiteten Werkstücke wieder zurück auf die Förderstrecke. In der Anlage sind mehrere Bearbeitungsaggregate als Linie miteinander verbunden, durch die ein Werkstück gefördert wird – möglicherweise auch mehrfach.

Das Verhaltensmodell hat folgende technische Daten:

- 246 Baugruppen in 53 Funktionsbaugruppen
- 3242 E/A (über mehrere Feldbussysteme)
- 143 Querverbindungen
- 2 Steuerungssysteme (Anlage, Transfersysteme)

Der manuelle Aufbau der virtuellen Maschine wurde in 15 Mannwochen (MW) realisiert. Anschließend wurden die einzelnen Baugruppen als Digitale Zwillinge modelliert und in eine Bibliothek wiederverwendbar abgelegt. Die manuelle Modellierung aus dieser Bibliothek heraus betrug anschließend nur noch 4 MW. Durch den Einsatz des Modellgenerators konnte die Erstellung der virtuellen Maschine inklusive Ankopplung an das Steuerungssystem, unter Zuhilfenahme der Bibliothek, auf wenige Minuten reduziert werden.

9.5 Zusammenfassung und Ausblick

Vom modernen Maschinen- und Anlagenbau wird erwartet, individuelle Kundenwünsche hinsichtlich Funktionalität, Qualität und Wirtschaftlichkeit zu erfüllen. Dies gelingt durch ein mechatronisches Engineering, das kundenindividuelle Maschinen und Anlagen auf Basis eines Baukastens aus wiederverwendbaren Komponenten realisieren kann.

Es hat sich gezeigt, dass der Digitale Zwilling der realen Maschine ebenso modular aus wiederverwendbaren Komponenten aufgebaut werden kann wie die reale Maschine. Die etablierten Methoden zur Modularisierung können direkt auf den Digitalen Zwilling übertragen werden und der etablierte Baukasten, aus welchem Maschinen und Anlagen gebaut werden, kann um die Digitalen Zwillinge der Baukastenkomponenten ergänzt werden.

Durch Integration der Virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) als integraler Bestandteil des Engineerings (automatisierte Generierung der virtuellen Maschine aus Kommissionierungslisten), lässt sich die VIBN wirtschaftlich in der Praxis einsetzen. Dies konnte in der Verifikation anhand einer Fertigungsanlage für die vollautomatisierte Möbelfertigung gezeigt werden.

Literatur

1. Reuter A, Kircher C, Verl A (2010) Manufacturer-independent mechatronic information model for control systems. *Production Eng* 4(2-3):165-173
2. Pritschow G, Wurst K-H, Seyfarth M, Bürger T (2003) Requirements for controllers in reconfigurable machining systems, CIRP 2nd international conference on reconfigurable manufacturing. Ann Arbor, USA
3. Pritschow G, Altintas Y, Jovane F, Koren Y, Mitsuishi M, Takata S, Van Brussel H, Weck M, Yamazaki K (2001) Open controller architecture – Past, present and future. *CIRP Annals – Manufactur Technol* 50(2):463–470
4. VDI 2206. 06.2004. Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme
5. Litto M, Korajda I, Mangold C, Angerbauer R, Hils W, Lerche M (2004) Baukastenbasiertes Engineering mit Föederal: Ein Leitfaden für Maschinen- und Anlagenbauer. VDMA, Frankfurt a. M.
6. Angerbauer R, Buck R, Doll U, Hackel M, Eberhardinger S, Kayser K-H, Klebl M, Mack H, Siegler R, Wascher F, Würslin R (2010) Adaptierbares Modellierungswerkzeug und Qualifizierungsprogramm für den Aufbau firmenspezifischer mechatronischer Engineeringprozesse: Ein Leitfaden für Maschinen- und Anlagenbauer. VDMA, Frankfurt a. M.
7. Pritschow G, Röck S (2004) Hardware in the loop. Simulation of machine tools. *CIRP Annals – Manufactur Technol* 53(1):295–298
8. Röck S (2007) Echtzeitsimulation von Produktionsanlagen mit realen Steuerungselementen, Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart
9. Wunsch G (2007) Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme, Dissertation. Technische Universität München, München
10. Pritschow G, Röck S, Rüdele H (2005) Echtzeitfähige Simulation von Werkzeugmaschinen: Anforderungen und Eigenschaften einer Hardware-in-the-Loop-Simulationsumgebung für Werkzeugmaschinen. *wt Werkstatttechnik online* 95(5):302–308

11. Kufner A (2012) Automatisierte Erstellung von Maschinenmodellen für die Hardware-in-the-Loop-Simulation von Montagemaschinen, Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart
12. Voß V (2012) Wiederverwendbare Simulationsmodelle für die domänen- und disziplinübergreifende Produktentwicklung, Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart
13. VDI/VDE 3693–1. 08.2016. Virtuelle Inbetriebnahme
14. VDI 4499–1. 05.2006. Digitale Fabrik – Grundlagen
15. Scheifele S, Verl A (2016) Automatische HiLS-Generierung für komplexe Maschinen: Hardware-in-the-Loop-Simulationslösung für den variantenreichen Sondermaschinenbau. *wt Werkstattstechnik online* 106(7/8):501–505.
16. Lee EA (2008) Cyber physical systems: Design challenges. (UCB/EECS-2008–8)
17. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V., Geisberger E (Mitarb.), Broy M (Mitarb.) (2012) Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems. Springer, Heidelberg
18. VDI Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation (2013) https://www.vdi.de/uploads/media/Stellungnahme_Cyber-Physical_Systems.pdf. Zugegriffen: 28. Nov 2016

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Automatische Modellgenerierung für die Virtuelle Inbetriebnahme bei HOMAG

10

Ludwig Albrecht, Patrick Seeger und Lukas Kübler

Zusammenfassung

Die HOMAG Group verwendet Digitale Zwillinge entlang des Entwicklungs- und Herstellungsprozesses ihrer Produkte. Hierbei werden unter anderem Digitale Zwillinge in Hardware-in-the-Loop Simulationen eingesetzt. Die Simulationsmodelle der HOMAG-Maschinen und -Anlagen werden in einen modularen, mechatronischen Engineering-Baukasten integriert und können aus diesem zur Anwendung gebracht werden. Zur massiven Reduzierung von Modellierungszeiten bei individuellen Kundenmaschinen und -anlagen werden für einen wirtschaftlichen Einsatz der Virtuellen Inbetriebnahme bei HOMAG Digitale Zwillinge von kundenindividuellen Maschinen und Anlagen über einen größtenteils automatisierten Produktionsprozess generiert und sind dadurch unmittelbar für verschiedene Anwendungsfälle einsetzbar.

10.1 HOMAG Group: Historie digitaler Engineering-Ansätze

Die HOMAG Group produziert seit ihrer Gründung im Jahr 1960 Serien- und individuell angepasste Maschinen für die Holzbearbeitung. Als weltweiter Markt- und Technologieführer im Bereich Holzbearbeitungsmaschinen bietet die HOMAG Group dabei in den Absatzmärkten Möbelfertigung, Bauelementefertigung (Fußbodendielen, Türen und Zargen) sowie Holzhausbau ihren Kunden exakt aufeinander abgestimmte Lösungen von der Einzelmaschine bis zur kompletten Fertigungsstraße (beispielsweise in Abb. 10.1).

L. Albrecht (✉) · P. Seeger · L. Kübler
HOMAG Group, Schopfloch, Deutschland
E-Mail: ludwig.albrecht@homag.com



Abb. 10.1 Eine HOMAG EDGETEQ-S-800 profiLine Kantenanleimmaschine zur Losgröße 1 – Produktion von Möbelteilen

Das Produktportfolio der HOMAG Group deckt dabei die gesamte Prozesskette der adressierten Marktsegmente sowohl im Industrie- als auch im Handwerksbereich ab.

Der Lebenszyklus der HOMAG-Maschinen als Investitionsgut des HOMAG-Kunden wird darüber hinaus über den Unternehmensbereich „Life Cycle Services“ betreut. Hierbei werden Dienstleistungen wie Fern-Service, Vor-Ort-Service, Ersatzteil-Service, Modernisierung und Training für Betreiber von HOMAG-Maschinen und -Anlagen angeboten und durchgeführt.

Neben den Maschinen und Anlagen werden Beratung und Softwarelösungen für den gesamten Herstellungsprozess, von der Möbelplanung über die Bearbeitung bis hin zur Konfiguration und dem Verkauf, entwickelt und vertrieben.

Ein weiterer Schwerpunkt bei HOMAG ist die **Digitalisierung der Prozesse und des Produktionsumfelds**. Hierbei werden Lösungen bereitgestellt, wie beispielsweise intelligente Bedienerassistenzsysteme, mobile Hilfesysteme an der Maschine, präventives Qualitätsmonitoring, cloudbasierte Zuschnittoptimierung, cloudbasierte Verwaltung aller servicerelevanten Daten und die präventive Leistungsüberwachung von Maschinen und Anlagen.

Durch die Gründung der *tapio GmbH* und den damit verbundenen Aufbau eines digitalen, cloudbasierten Ökosystems, hat die HOMAG die Basis für die Digitalisierung der Holz- und Möbelindustrie geschaffen. Hier können gemeinsam mit Möbelherstellern, Maschinenproduzenten, Werkzeug- und Materialherstellern neue, digitale Geschäftsmodelle umgesetzt werden. Dabei werden modernste Kommunikationstechniken und -wege benutzt, um Maschinen- und Produktionsinformationen in plakativer Form darzustellen. Maschinen-, Werkzeug- und Materialhersteller nutzen mit *tapio* gemeinsam eine Technologieplattform und bieten auf *tapio* Dienstleistungen und digitale Lösungen an, die den Kunden Mehrwerte bringen.

Seit 2010 setzt die HOMAG Group in verschiedenen Anwendungsfällen Digitale Zwillinge ein. Hierbei sind insbesondere Simulationsmodelle von Maschinen als Digitale Zwillinge (vgl. Abb. 10.2) entwickelt worden, die den Entwurf und die Implementierung

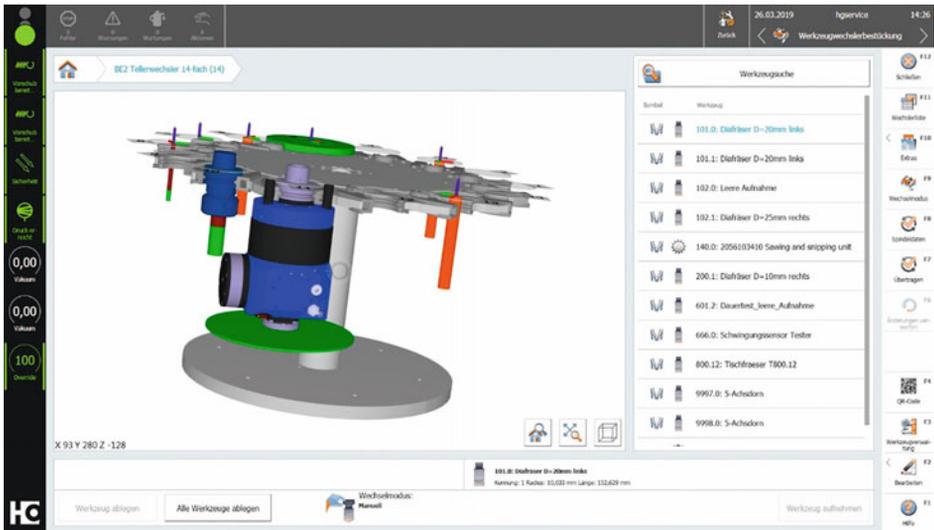


Abb. 10.2 Bediensoftware ToolManager für HOMAG Group CNC-Maschinen

von Qualitätssicherungsprozessen im Bereich der Softwareentwicklung erlauben. Dabei kommt die sogenannte Hardware-in-the-Loop Simulation (HiLS) zur Verwendung, die in der Steuerungs- und Maschinenentwicklung zur Virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) Anwendung findet. Die VIBN trägt dabei zu einem erheblichen Maß in der Verbesserung der Ausliefer- und Termintreue von Möbelproduktionsanlagen bei. Prozessschritte in der Auftragsabwicklung lassen sich durch simultanes Engineering parallelisieren (vgl. Abb. 10.3) und die Liefertermine für die Endkunden werden verlässlicher bei gleichzeitig verbesserter Auslieferungsqualität. Diese Qualitätssicherungsprozesse werden seither standortübergreifend eingesetzt und führen zu berechenbarem Aufwand in der Gewährleistung optimaler Softwarequalität.

Um die Einführung und den Erfolg Digitaler Zwillinge bei HOMAG besser verstehen zu können, muss zuerst auf die Art und Weise der Steuerungs- und Softwarekonstruktion bei HOMAG Bezug genommen werden. Hierbei muss die baukastenorientierte Vorgehensweise in der Modularisierung der Maschinenfunktionen hervorgehoben werden, ohne die die Entwicklung Digitaler Zwillinge als Maschinensimulationsmodelle nicht möglich gewesen wäre.

Die Anfänge der baukastenorientierten Steuerungsentwicklung, -projektierung und -fertigung gehen auf das Jahr 1986 zurück. Hierbei war die ursprüngliche Idee die Herstellung von Maschinenablaufsteuerungen mittels speicherprogrammierbarer Speicher, sogenannter EPROM-ICs. Dabei wurden mittels einer Datenverarbeitungsanlage Steuerungsprogramme für HOMAG Durchlaufmaschinen entwickelt und in EPROM-Bausteine programmiert. Das System wurde zum damaligen Zeitpunkt mit EPEDA

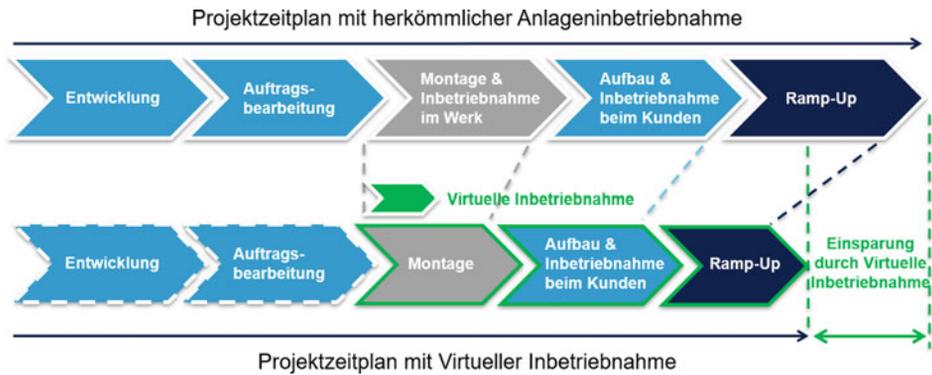


Abb. 10.3 Einsparpotential in der Anlageninbetriebnahme durch VIBN mit einem Digitalen Zwilling

abgekürzt und bedeutete Erzeugung von PC-Maschinensteuerungen in EPROMS mit Datenverarbeitungsanlagen.

Der technische Fortschritt im Software- und Steuerungsbereich entwickelte sich in den darauffolgenden Jahrzehnten rasant und so wurde bei HOMAG auf Grundlage des ursprünglichen EPEDA-Konzepts die Entwicklung einer interdisziplinären Workbench mit dem Ziel einer föderalen Informationsarchitektur vorangetrieben, für die sich im heutigen Sprachgebrauch die Bezeichnung PDM- oder PLM-System. (PDM = Product Data Management, PLM = Product Lifecycle Management) durchgesetzt hat.

Auf Basis der ursprünglichen Konzepte wurden schrittweise in der EPEDA-Workbench Neuerungen realisiert, die den Entwicklungen und Trends der Steuerungstechnik Rechnung getragen haben und vom ursprünglichen „Datenerstellungssystem für EPROM basierte Maschinensteuerungen“ (ca. 1986) über das „Baukastensystem für Maschinensteuerungen vom Typ Homatic“ (ca. 1999) bis hin zum aktuellen „Baukastensystem für Maschinensteuerungen vom Typ powerControl“ (ca. 2010) mit Benutzerverwaltung, Benutzerrollen, Versions- und Dokumentenverwaltung und der föderalen Einbindung externer Engineering-Systeme für Elektrokonstruktion und SPS-Softwareentwicklung führten.

10.2 Paradigmen eines föderalen Engineering-Ansatzes

Die grundlegende Fragestellung, die mittels Engineering-Methoden gelöst werden soll, kann wie folgt formuliert werden: Wie wird die Bestellung des Kunden, spezifiziert im Kundenauftrag, produzierbar? Der gesamte Engineering-Prozess umfasst hierbei die Entwicklung, Projektierung und Produktion eines Produkts – im Maschinenbau also üblicherweise einer Einzelmaschine oder gar einer Anlage.

Die Lösungen, also verschiedene Engineering-Ansätze unterschiedlicher Maschinenbauer, sind hierbei vielfältig. Ziel ist es im Allgemeinen aber immer, den Markt mit kurzen Durchlaufzeiten und trotzdem hoher Qualität zu bedienen. Das vielfältige Produktportfolio von HOMAG, das zudem häufig um kundenspezifische Komponenten angepasst werden muss, macht die Engineering-Prozesse komplex. Aus diesem Grund wird dem Thema schon seit Jahrzehnten eine hohe Priorität zugeordnet. Die Basis für das Engineering bei HOMAG stellt eine föderale Informationsarchitektur dar, durch die sich mechatronische Baukästen auch über vorhandene (Autoren-)Systeme hinweg verwendbar machen lassen. Die Datenbasis für einen Baukasten kann dabei äußerst heterogen sein. Durch die geschickte Zusammenfassung von Teilkomponenten zu mechatronischen Modulen, lässt sich trotzdem ein Großteil des Engineering-Aufwands automatisieren. Die Umsetzung eines derartigen föderalen Engineering-Ansatzes erfordert eine Fokussierung auf einige wesentliche Paradigmen, u. a.: **Modularisierung** im Sinne mechatronischer Baukästen, **automatisierte Generierung** von Konfigurationen und langfristige Reproduzierbarkeit derer (z. B. für Modernisierungen) sowie **Standardisierung**, vor allem in Anbetracht generischer Konfigurationsdateien und der Wiederverwendbarkeit von Komponenten.

Modularisierung – Betrachtet man eine mechanische Konstruktion, stellt man schnell fest, dass diese üblicherweise in Baugruppen unterteilt wird. Die Gründe dafür sind vielfältig: So kann die Produktion oder Beschaffung einfacher werden oder eine kostengünstige Wartbarkeit im Servicefall ist dadurch eher gegeben. Die föderale Informationsarchitektur sieht vor, die Elektrokonstruktion, die Steuerungssoftware (inklusive HMI-Software, HOMAG powerTouch) sowie die Dokumentation ebenso modular zu gestalten. Damit lässt sich beispielsweise eine Maschinendokumentation aus einzelnen Kapiteln, die für sich jeweils eine mechatronische Baugruppe beschreiben, zusammensetzen. Dasselbe gilt für die Schaltpläne, die Mechanik sowie die Software der Maschine. Aus der ursprünglich mechanischen Baugruppe wird damit eine mechatronische Baugruppe, bei HOMAG kurz als MU (engl. **Machine Unit**) bezeichnet, die sich – wie ihr mechanisches Vorbild – ebenfalls in einen Baukasten eingliedern lässt.

Automatisierte Generierung – Aus einem mechatronischen Baukasten heraus können Produkte im Auftragsfall wesentlich performanter hergestellt werden. Dies liegt einerseits an der einfachen Handhabbarkeit eines Baukastens, andererseits bietet ebendieser auch die Möglichkeit, Engineering-Prozesse weitestgehend zu automatisieren. Ein wesentlicher Schlüssel ist hierbei, den Kundenauftrag in einen Betriebsauftrag zu überführen, der lediglich Baukastenkomponenten beinhaltet. Alle nachfolgenden Teilprozesse werden explizit – d. h. frei von impliziten Querverbindungen – und damit für einen Automaten einfach lösbar: „Verbaue für Maschine M die Komponenten A, B und C mit ihren jeweiligen Unterkomponenten $a_{\text{Mech.}}$, $a_{\text{Elek.}}$, a_{Software} , $a_{\text{Doku.}}$, $b_{\text{Mech.}}$, $b_{\text{Elek.}}$, usw.“ (Vgl. Abb. 10.4).

Standardisierung – Damit Module wiederverwendbar werden, ist ein hohes Maß an Standardisierung erforderlich. Einzelne mechatronische Baugruppen werden polymorph (vielgestaltig) und können dann in die unterschiedlichsten Produkte verbaut werden. In

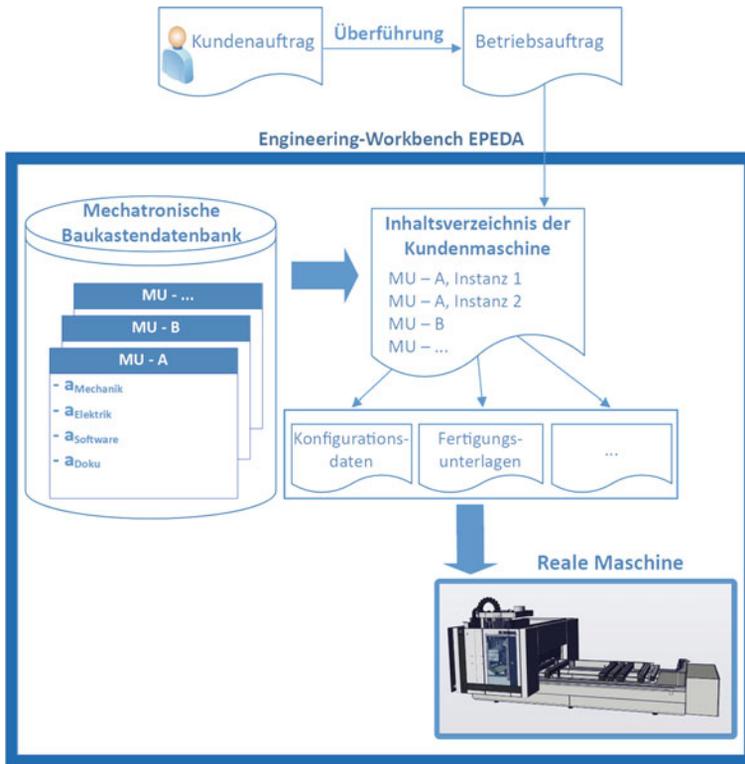


Abb. 10.4 Engineering-Workbench EPEDA bei HOMAG

der Entwicklungsphase der Baugruppe entstehen dadurch zwar höhere Aufwände, da beispielsweise mehrere Schnittstellen und Varianten betrachtet werden müssen, allerdings reduzieren sich die Aufwände bei einem Kundenauftrag auf ein Minimum. Der Fokus der Standardisierung zielt dabei auf einheitliche Konstruktionsrichtlinien (in allen Disziplinen) sowie einheitliche (Konfigurations-)Datenformate ab.

Zur zielgerichteten Umsetzung einer föderalen Informationsarchitektur nutzt HOMAG eine Software-Umgebung, die allen Beteiligten im Engineering-Prozess Unterstützung in Form eines einheitlichen Arbeitsbereiches gibt: die Engineering-Workbench EPEDA. In ihr werden die standardisierten Module (MUs) der einzelnen Entwicklungsabteilungen abgelegt. Eine integrierte Datenbank inklusive Versionsverwaltung erleichtert dabei das kollaborative Arbeiten. Im Auftragsfall lassen sich die meisten Teilprozesse des Engineerings automatisieren, da Automaten die zur Erfüllung des Kundenauftrags notwendigen MUs zusammenbauen und alle für die Produktion relevanten Daten daraus extrahieren und gegebenenfalls noch anreichern können. So können vollautomatisch die mechanischen Baugruppen beschafft, die Schaltpläne zusammengestellt, die Steuerungssoftware kompiliert und die Dokumentation erzeugt werden. Der mögliche Grad der Automatisierung ist

dabei zwar abhängig vom Umfang kundenspezifischer Anpassungen, aber auch diese lassen sich konform einbringen, denn im Normalfall müssen nur wenige MUs ausgetauscht werden und der restliche Anteil bleibt standardisiert und damit generierbar.

10.3 Digitale Zwillinge bei HOMAG

Zur Simulation von Maschinen und deren Prozessen werden bei HOMAG verschiedene Simulationswerkzeuge eingesetzt. Hierzu zählen beispielsweise die klassischen Verfahren der Finite-Elemente-Methode (FEM-Simulation, engl. Finite Elements Method) oder der numerischen Strömungssimulation (CFD-Simulation, engl. Computational Fluid Dynamics). Ebenfalls werden eventbasierte Ablaufsimulation eingesetzt, um verschiedene Fabrik- und Schichtsimulationen durchzuführen. Dies sind alles Verfahren, die während oder vor dem Entwicklungs- und Engineering-Prozess eingesetzt werden.

Die modernste Simulationsform, die bei HOMAG eingesetzt wird, ist die HiLS. Hierbei werden reale Steuerungen mit ihrer jeweiligen Steuerungssoftware und Prozessschnittstelle an ein Simulationsmodell einer Maschine oder Anlage angeschlossen. Die Prozessschnittstelle wird typischerweise über einen Feldbus realisiert.

Die HiLS wurde ursprünglich im Release-Management von Software eingesetzt, um das Zusammenspiel von Software und Hardware realitätsnah testen zu können. Die hier geprüften Qualitätskriterien lassen sich auch auf den Bereich der VIBN übertragen. Bei HOMAG ist die VIBN eine in den Produktionsprozess integrierte Maßnahme, die vor der realen Inbetriebnahme erfolgt. Dies verkürzt den späteren Inbetriebnahmezeitaufwand der realen Maschine oder Anlage, macht den Ramp-Up-Vorgang planbarer und steigert zudem die Auslieferungsqualität der HOMAG-Maschinen und -Anlagen.

Die HiLS ist weiterhin hervorzuheben als die einzige Simulation bei HOMAG, die auch nach dem eigentlichen Produktionsprozess eingesetzt wird. So lassen sich beispielsweise am Digitalen Zwilling Kundenschulungen durchführen. Diese Art der Schulung bietet den Vorteil, dass Kunden realitätsnah und gefahrlos an ihrer virtuellen Maschine geschult werden können – ohne ein Risiko für die reale Maschine und komplett ohne Produktionsausfall. Abb. 10.5 zeigt beispielhaft den Digitalen Zwilling einer Fertigungsstraße für die HiLS.

10.4 Automatisierte Generierung Digitaler Zwillinge

Um Digitale Zwillinge wirtschaftlich sinnvoll einsetzen zu können, ist es unerlässlich die Herstellung dieser Zwillinge in Bezug auf Entstehungskosten und Verwendbarkeit zu optimieren. Die folgenden Betrachtungen beziehen sich hierbei auf die Generierung eines Digitalen Zwillings (HiLS) zur Virtuellen Inbetriebnahme. Für diese sollte der Fokus auf möglichst kurzen Durchlaufzeiten bei einer optimalen Auslieferqualität liegen, damit

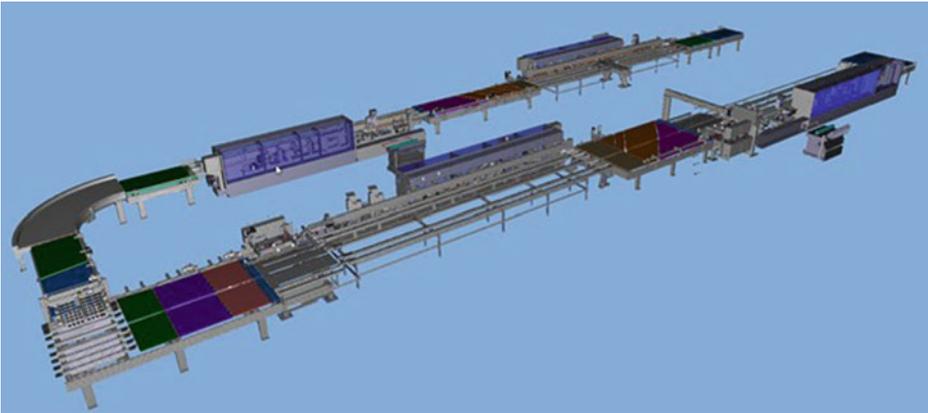


Abb. 10.5 Digitaler Zwilling einer kompletten Fertigungsstraße für die HiLS

der Digitale Zwilling zum richtigen Zeitpunkt in die Entwicklungs- und Produktionsabläufe einfließen kann. Wird eines der beiden Kernkriterien verletzt, reduziert sich der mögliche Nutzen drastisch. Um den wachsenden Einsatzbereichen und der zunehmenden Anzahl an benötigten Digitalen Zwillingen Rechnung zu tragen, ist eine Erhöhung des Automatisierungsgrads bei deren Erstellung daher unerlässlich.

Damit ein Digitaler Zwilling automatisiert erstellt werden kann, ist ein möglicher Lösungsansatz die Modularisierung in Teilmodelle. Eine funktionale Dekomposition (funktionale Untergliederung) einer Maschine in ihre Teilfunktionen bewirkt eine Zerlegung in ihre mechatronischen Funktionsbausteine. Diese Funktionsbausteine der Maschine müssen durch Teilmodelle in der virtuellen Welt nachgebildet werden. Teilmodelle müssen hierbei eine Vielzahl an funktionalen Konstruktionsaspekten beinhalten und die konkrete Maschinenfunktionalität widerspiegeln.

Basierend auf dem aktuellen Engineering-Ansatz bei HOMAG existiert bereits eine funktionale Untergliederung der Maschine in mechatronische Teilbaugruppen. Die dort verwendete Untergliederung muss auch beim Digitalen Zwilling vorgenommen werden, damit dieser sich analog zur realen Maschine projektieren lässt. Die Teilmodelle an sich stehen dann in einer 1:1-Beziehung zu den mechatronischen Baugruppen aus der Engineering-Workbench EPEDA. Somit können die Teilmodelle des Digitalen Zwillings als direkter Bestandteil des mechatronischen Baukastens betrachtet werden und wie dieser verwaltet werden. Dies stellt unter anderem sicher, dass sich keine Versionsinkompatibilitäten zwischen dem virtuellen Teilmodell und der realen Komponente ergeben. Abb. 10.6 zeigt die Erweiterung der Engineering-Workbench EPEDA um die automatische Generierung einer virtuellen Maschine (Digitaler Zwilling) aus dem mechatronischen Baukasten.

Durch die komponentenbasierte Modellierung können aus der Kombination aus Teilmodellen sämtliche Maschinenvarianten realisiert werden. Basis hierfür ist, dass

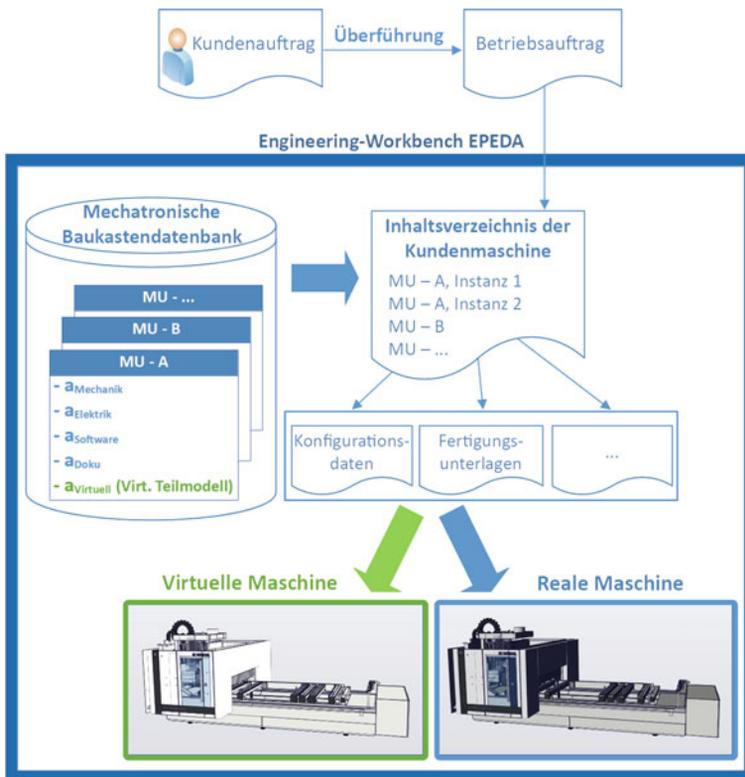


Abb. 10.6 Datengrundlage der EPEDA Engineering-Workbench angereichert um virtuelle Teilmodelle

die Teilmodelle beliebig miteinander kombiniert werden können und durch geeignete Parametrisierung die gewünschte Gesamtfunktion bilden. Hier ist eine Analogie zum objektorientierten Programmierstil zu ziehen, bei dem die Teilmodelle wie Klassen zu verstehen sind, aus denen bei der Verwendung Instanzen gebildet werden. Die Teilmodelle ermöglichen durch ihre Standardisierung und der Möglichkeiten der Parametrisierung eine polymorphe Verwendung, je nach Anwendungsfall.

Das Erzeugen von Teilmodellen setzt ein hohes Maß an Standardisierung innerhalb der Modelle voraus. Dies wird erreicht, indem Modelle immer nach denselben Konstruktionsrichtlinien erstellt werden. Diese beinhalten beispielsweise die bereits beschriebene Vorgabe zur Unterteilung in Teilmodelle. Auch Konventionen zur Implementierung müssen hier getroffen werden, sodass Schnittstellenprobleme oder Abweichungen vom realen Verhalten ausgeschlossen werden können. Beispielsweise müssen eindeutige Betriebsmittelkennzeichen der realen Maschine auch im virtuellen Teilmodell übernommen werden, um eine richtige Zuordnung zu garantieren.

Die automatisierte Generierung kommissionsbezogener Digitaler Zwillinge erfolgt grundsätzlich in mehreren Teilschritten, die analog zur realen Maschinenprojektierung erfolgen. Zunächst ist es notwendig, den Kundenauftrag derart zu verarbeiten, dass die erforderlichen Komponenten aus dem mechatronischen Baukasten angezogen und deren Parametrisierung festgelegt werden kann. Ausgehend von dieser ersten Maschinenspezifikation werden weitere relevante Daten durch Teilgeneratoren der Engineering-Workbench erzeugt, die sich nur indirekt aus dem Zusammenspiel der mechatronischen Komponenten ableiten lassen. Beispielsweise lässt sich erst nach der Festlegung der mechatronischen Komponenten eine Feldbusbeschreibung erzeugen, da diese von den tatsächlich verbauten Feldbus-Komponenten und deren Zusammenspiel abhängig ist.

Analog zur Projektierung innerhalb der Engineering-Workbench erfolgt die Instanziierung der virtuellen Teilmodelle. Die benötigte Parametrisierung der Teilmodelle wird aus den zuvor erzeugten Datensätzen ausgelesen. Es werden beispielsweise aus der erzeugten Feldbusbeschreibung die Adressen der Teilnehmer ausgelesen und im Digitalen Zwilling entsprechend parametrisiert. Nach der Parametrisierung der einzelnen Teilmodelle erfolgt eine Verknüpfung zwischen den Modellen, damit das Zusammenspiel gewährleistet und die Gesamtfunktionalität hergestellt wird. Diese basiert auf festen Regeln und Namenskonventionen.

Die Orchestrierung der einzelnen Teilgeneratoren, die zu den beschriebenen Teilschritten der automatisierten Generierung führen, erfolgt in der Engineering-Workbench von HOMAG. Hier werden zudem die Ergebnisse der einzelnen Schritte archiviert und den nachfolgenden Prozessen bereitgestellt. Auf diese Weise wird ein durchgängig einheitliches Engineering sichergestellt und die Bereitstellung der Digitalen Zwillinge für den Entwicklungs- und Produktionsablauf organisiert.

10.5 Nutzen der automatisierten Generierung

Der Einsatz einer automatisierten Modellgenerierung zur Erzeugung Digitaler Zwillinge bringt eine Vielfalt an Vorteilen in der praktischen Anwendung mit sich. Grundlegend ist ein hohes Maß an Standardisierung innerhalb der Teilmodelle erforderlich, wodurch sich die Konstruktionszeit dieser im ersten Schritt erhöht. Des Weiteren muss der Aufwand für die Entwicklung der Modellgenerator-Software berücksichtigt werden. Diese Aufwendungen müssen sich durch die Wiederverwendbarkeit innerhalb der Modellgenerierung amortisieren.

Vergleicht man die Aufwendungen einer manuellen mit einer automatisierten Modellgenerierung, so zeigt sich eine Amortisationskurve wie in Abb. 10.7 qualitativ dargestellt. Die Bewertung der Aufwände geht hier in beiden Fällen von einer vormodellierten Komponentenbibliothek aus. Abb. 10.7 zeigt, dass der Initialaufwand mit Modellgenerator deutlich höher ist als ohne Modellgenerator, jedoch die Aufwände bei der Erstellung der

einzelnen Digitalen Zwillinge über die Anzahl deutlich geringer ansteigt. Somit amortisiert sich die automatische Modellerstellung frühzeitig und zu vergleichbar geringen Kosten. Diese Betrachtung ist spezifisch für den jeweiligen Anwendungsfall und hängt natürlich stark von der Komplexität und dem Umfang des Digitalen Zwillings ab.

Durch die automatische Modellgenerierung entstehen weitere Vorteile, die in der Amortisationskurve nicht erfasst sind. Beispielsweise werden die Modelle durch den Automatisierungsprozess und die Komponentenbibliothek reproduzierbar in ihrer Herstellung. Besonders im Hinblick auf den Modellaufbau werden Strukturen und Modelllogiken immer gleich abgebildet, was den Umgang mit den Modellen erleichtert und es lässt sich eine Konstruktionsrichtlinie zur Herstellung der Komponentenmodelle ableiten. Bei der Erstellung werden durch die Wiederverwendung von Teilmodellen und der automatisierten Parametrisierung zudem systematisch Modellierungsfehler vermieden.

Innerhalb des Entwicklungs- und Engineering-Prozesses wirkt sich die automatisierte Modellgenerierung ebenfalls positiv aus. Durch den hohen Automatisierungsgrad werden die Aufwände zur Modellerstellung drastisch reduziert, sodass Modelle auf Abruf bereitgestellt werden können. Bei einer vollständigen Abdeckung der Teilmodelle kann auf diese Weise zu jeder realen Maschine ein Digitaler Zwilling in hoher Qualität zur Verfügung gestellt werden. Die daraus resultierende terminsichere Fertigstellung garantiert zudem den Einsatz des Digitalen Zwillings innerhalb des Herstellungsprozesses.

Die automatisierte Modellgenerierung sorgt dafür, dass sich das Einsatzgebiet der Digitalen Zwillinge weiter ausweitet. Mitarbeiter der verschiedenen Unternehmensbereiche müssen sich nicht mit der Erstellung der Modelle beschäftigen, sondern können diese direkt über die Engineering-Workbench EPEDA für ihre Zwecke generieren und einsetzen.

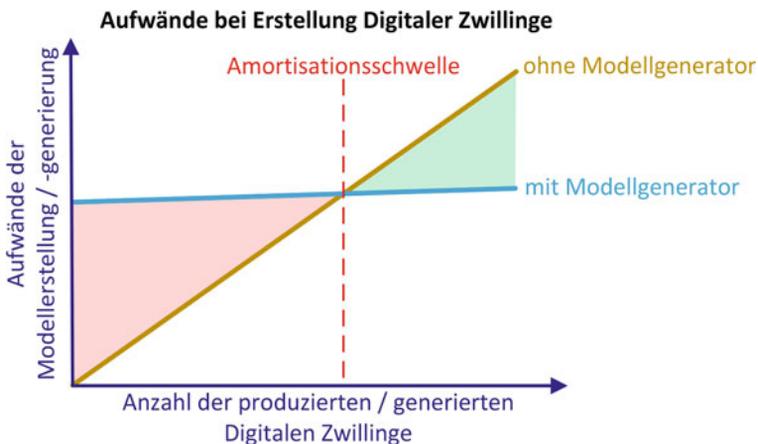


Abb. 10.7 Aufwände bei Erstellung Digitaler Zwillinge

Literatur

1. Röck S (2007) Echtzeitsimulation von Produktionsanlagen mit realen Steuerungssystemen, Dissertation, Jost-Jetter Verlag, Heimsheim
2. Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI) (2016) Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (VDE); VDI/VDE 3693 Blatt 1: Virtuelle Inbetriebnahme; Modellarten und Glossar
3. Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI) (2008) VDI 4499 Blatt 1: Digitale Fabrik – Grundlagen

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Christian Scheifele

Zusammenfassung

Komponentenhersteller suchen zunehmend nach Lösungen zur Bereitstellung Digitaler Zwillinge ihrer Hardwareprodukte, um ihren Kunden eine Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) von Automatisierungskonzepten und -lösungen zu ermöglichen. Die Verfügbarkeit eines Digitalen Zwillings entwickelt sich zum entscheidenden Verkaufsmerkmal eines Komponentenherstellers. Ziel der Verwendung vorgefertigter Komponentenmodelle ist die Reduzierung von Modellierungszeiten bei gleichzeitig sehr realitätsnaher virtueller Abbildung der Hardwareprodukte für die virtuelle Auslegung, den Test und die Optimierung von Steuerungssystemen im digitalen Engineering. In diesem Beitrag wird die Online-Plattform „TwinStore“ für den Austausch von Simulationsmodellen zur Virtuellen Inbetriebnahme vorgestellt. Digitale Zwillinge aus dem TwinStore, die hinsichtlich der Schnittstellen, Parameter und Eigenschaften das Verhalten der realen Hardware abbilden, können nahtlos in ein Simulationswerkzeug für die Virtuelle Inbetriebnahme eingebunden werden. Die Bibliotheken umfassen Roboter- und Greifsysteme, Antriebs- und Fördertechnik bis hin zu Sensorikkomponenten.

11.1 Virtuelle Inbetriebnahme im Maschinen- und Anlagenbau

Im Maschinen- und Anlagenbau entstehen heute zunehmend **Simulationsmodelle von Produktionsanlagen**, um die Produktentwicklung, die Produktionsplanung, den Produktionsanlauf, den Produktionsbetrieb und die Auftragsabwicklung [1] mit auf die

C. Scheifele (✉)

TwinStore GmbH, Stuttgart, Deutschland

E-Mail: christian.scheifele@twinstore.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Verl, S. Röck und C. Scheifele (Hrsg.),

Echtzeitsimulation in der Produktionsautomatisierung,

https://doi.org/10.1007/978-3-662-66217-5_11

181

Anforderungen der jeweiligen Lebenszyklusphase abgestimmten Methoden und Werkzeuge zu unterstützen. Dieses umfassende Netzwerk an simulationsbasierten Methoden und Werkzeugen entlang des Lebenszyklus einer Produktionsanlage wird unter dem Oberbegriff der **Digitalen Fabrik** zusammengefasst [2]. In [3] werden Simulationsmodelle als expliziter Produkt- und Anlagenbestandteil gesehen: „Simulationen werden integraler Bestandteil im gesamten Lebenszyklus, von der Planung über Design und Implementierung bis zum Betrieb und Service und erweitern damit bestehende Wertschöpfungsketten, schaffen neue Wertschöpfungsnetzwerke und ermöglichen neue Geschäftsmodelle“. In diesem Kontext steigt die Notwendigkeit zum **Austausch und zur Wiederverwendung von Simulationsmodellen**.

Zur Erfüllung der hohen und kontinuierlich wachsenden Anforderungen an Leistung, Qualität und Kosten der Automatisierungslösung bei steigendem Automatisierungsgrad ist der Einsatz von virtuellen Methoden und Werkzeugen heute bereits im Entwicklungsprozess („Digital Engineering“) von industriellen Produktionsanlagen unabdingbar. Von zentraler Bedeutung für den Maschinen- und Anlagenbau ist die Methode der **Virtuellen Inbetriebnahme (VIBN)**, welche in den letzten Jahren vermehrt zur Anwendung kommt [4]. Die VIBN bezeichnet den der realen Inbetriebnahme (IBN) vorgelagerten Gesamttest des Automatisierungssystems mithilfe eines Simulationsmodells der Anlage [5]. Ein Simulationsmodell wird in diesem Beitrag als **Digitaler Zwilling** bezeichnet. Der Digitale Zwilling der Anlage ist aus virtuellen Komponenten und Baugruppen aufgebaut, welche die realen Hardwareprodukte mit ihren Schnittstellen und Parametern abbilden. Die Digitalen Zwillinge der eingesetzten Komponenten und Baugruppen enthalten die für eine VIBN wesentlichen Verhaltensmerkmale der realen Systeme. Für eine Hardware-in-the-Loop Simulation (HiLS) wird das Verhalten der Komponenten beispielsweise so nachgebildet, dass am Feldbus kein Unterschied zum Verhalten der realen Komponenten vorliegt. Bei der HiLS kann damit mittels industriellem Feldbus die reale Steuerungshardware in Betrieb genommen werden. Die VIBN ermöglicht es dem Maschinen- und Anlagenbau, die Entwicklungs- und Inbetriebnahmeprozesse signifikant zu beschleunigen, die Qualität zu erhöhen und Inbetriebnahmekosten zu senken. Die Strukturierung eines Simulationsmodells in Komponenten- und Baugruppenmodelle bildet die Basis für den Austausch und die Wiederverwendung von Modellteilen. Die Bereitstellung von Simulationsmodellen verspricht neben der massiven Reduzierung der Modellierungszeiten für die VIBN eine gleichzeitige Qualitätssteigerung aufgrund der Verwendung optimierter und validierter (Teil-) Modelle, beispielsweise direkt vom Komponentenhersteller.

Die Hersteller von Simulationswerkzeugen zur VIBN haben auf Basis der dargestellten Potentiale der komponentenbasierten Strukturierung die Notwendigkeit von **Integrationschnittstellen** zur Einbeziehung von (Teil-)Modellen Dritter erkannt. Integrationschnittstellen bieten die Möglichkeit, spezifische Teilmodelle in das Anlagenmodell zu integrieren. Bei einer Kopplung einzelner Module oder Teilmodelle zu einem Gesamtmodell wird in der Literatur auch der Begriff der Modellkopplung verwendet [6]. Die Aufteilung des Gesamtmodells in mechatronische Module anhand der Komponenten- und

Baugruppengrenzen führt zu validierten Teilmodellen, die sich in einem Baukasten ablegen und in späteren Simulationsprojekten wiederverwenden lassen. Der modulare Aufbau bildet zusätzlich die Basis für eine vollautomatische Generierung von kundenindividuellen Anlagenmodellen im Engineering aus der Kommissionierungsliste [7].

Zur ganzheitlichen Simulation von virtuellen Maschinen und Anlagen müssen Modelle aus unterschiedlichen Fachdisziplinen miteinander gekoppelt und aufeinander abgestimmt werden. Bei der Kopplung von Modellen zu einem interdisziplinären Gesamtmodell spricht man von einer mechatronischen Systemsimulation. Bei der HiLS interagiert das Gesamtmodell mit den über die reale Kommunikationsperipherie ausgetauschten Steuerungssignalen. Das Gesamtmodell des Produktionssystems ist dabei aus unterschiedlichen Modellen zusammengesetzt:

- Steuerungstechnische Modelle (z. B. Feldbuskomponenten, Sensoren und Aktoren)
- Kinematische Modelle (z. B. Maschinen- und Roboterkinematiken)
- Geometrische Modelle (z. B. 3D-Kollisionserkennung und Arbeitsraumanalyse)
- Mechanische Modelle (z. B. Strukturmechanik und Dynamik)
- Prozessmodelle (z. B. Materialabtrag und Zerspanung)
- Materialflußmodelle (z. B. Handlings- und Fördereinrichtungen)

Die Verhaltensmodelle von Feldbuskomponenten, wie beispielsweise von Antrieben, werden heute vom Toolhersteller oder einem Simulationsspezialisten erstellt. Dabei wird das Verhalten abstrahiert und kann nur an das reale, charakteristische Verhalten (Rampen, Betriebsarten, etc.) angenähert werden. Die Bereitstellung von digitalen Abbildern der realen Feldbusteilnehmer direkt vom Komponentenhersteller hat dagegen den Vorteil, dass die einzelnen Komponenten bis hin zur realen Firmware und Parametrierung originalgetreu abgebildet werden können. Zusätzlich werden weitere Möglichkeiten zur vereinfachten Parametrierung der Komponentenmodelle direkt aus den Engineering-Werkzeugen des Komponentenherstellers geschaffen. Anwender können somit bereits in einer frühen Entwicklungsphase die virtuellen Anlagen prüfen, unterschiedliche Komponenten gegeneinander vergleichen sowie das spätere Verhalten der realen Maschine analysieren (z. B. Betriebsarten, Rampen). Weiter stehen erstmals realistische Digitale Zwillinge zur Verfügung, welche für Serviceanwendungen, Vorabprüfung von Firmwareupdates etc. genutzt werden können. Die steigende Aussagekraft des virtuellen Modells der Anlage führt, wie in Abb. 11.1 dargestellt, zur Erhöhung des erreichbaren Konkretisierungsgrads im Rahmen der VIBN und damit zur Reduzierung der Aufwände bei der realen Inbetriebnahme der Anlage.

Zunehmend suchen **Komponentenhersteller** deshalb nach Lösungen zur Bereitstellung Digitaler Zwillinge ihrer Hardwareprodukte, um ihren Kunden eine VIBN von Automatisierungskonzepten und -lösungen zu ermöglichen.

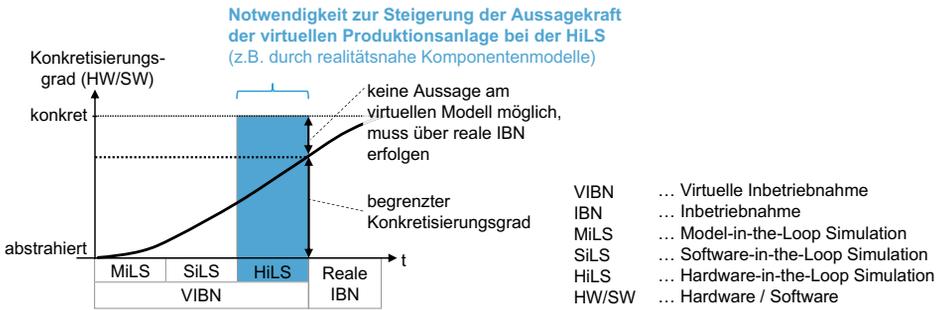


Abb. 11.1 Begrenzter Konkretisierungsgrad bei der HiLS in Anlehnung an [8]

11.2 Plattform für Bereitstellung, Pflege und Austausch von Simulationsmodellen

Das im Folgenden betrachtete und in Abb. 11.2 dargestellte **TwinStore** Konzept [9] beschreibt die plattformbasierte Bereitstellung, die Pflege und den Austausch von Simulationsmodellen. Zielsetzung ist die Bereitstellung von bereits implementierten und validierten Simulationsmodellen direkt vom Komponentenhersteller oder Simulationsspezialisten (Provider) für den Einsatz in Simulationsprojekten des Maschinen- und Anlagenbauers oder Systemintegrators. Abb. 11.2 fasst den Weg des Digitalen Zwillinges von der Bereitstellung von Modellbibliotheken der Provider (in Form von TwinStore Packages) in der TwinStore-Plattform über die Verwendung der Modelle im Rahmen des digitalen Engineerings bis in die Betriebsphase, beispielsweise zur Schulung des Betriebspersonals oder für Servicefälle in der Betriebsphase, zusammen.

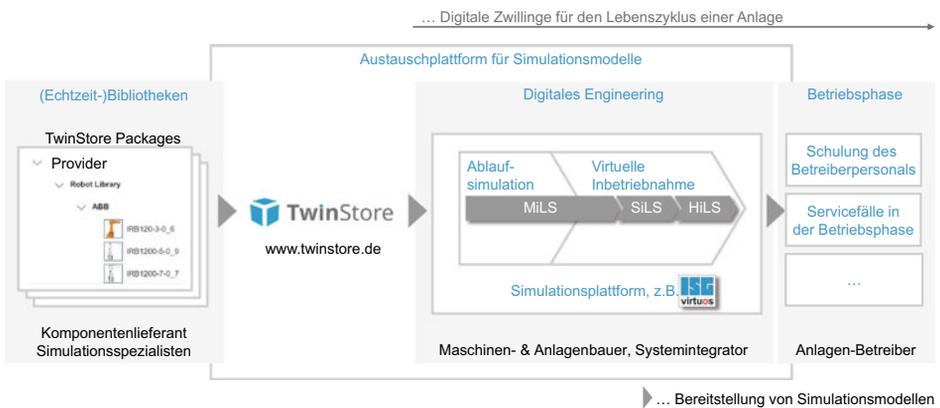


Abb. 11.2 TwinStore Plattform für die Bereitstellung von Simulationsmodellen

Dabei ist die Zielsetzung, dass **Komponentenhersteller** zukünftig neben den realen Komponenten auch deren digitale Abbildungen zur Verfügung stellen [1, 3] (siehe Abb. 11.2). Neben der Reduzierung der Modellierungszeiten und der Steigerung der Modellqualität wird durch die Bereitstellung der Digitalen Zwillinge eine neue Feedback-Möglichkeit zwischen Komponentenherstellern und deren Kunden geschaffen. Aus dem digitalen Produktkatalog kann der kundenspezifische Digitale Zwilling anhand der Bestellnummern der eingesetzten Komponenten zielgerichtet projiziert werden. Der Anwender wird befähigt mit einem Digitalen Zwilling der Komponente gefahrlos zu experimentieren und unterschiedliche Realisierungskonzepte zu prüfen. Aus einer Produktfamilie kann in virtuellen Testläufen die für den kundenspezifischen Anwendungsfall ideale Komponentenvariante identifiziert werden. Die Verfügbarkeit des Digitalen Zwillings entwickelt sich für den Komponentenhersteller zu einem entscheidenden Verkaufsargument seiner realen Hardwarekomponenten.

Ferner bieten **Simulationsspezialisten** zunehmend Bibliotheken zur Abbildung spezifischer, hochspezialisierter (Prozess-)Simulationen.

Dem **Maschinen- und Anlagenbauer sowie Systemintegrator** bieten sich mit dem offenen Bibliothekskonzept und dem Austausch von Simulationsmodellen neue Möglichkeiten, da er dem Anlagenbetreiber ein Simulationsmodell der kundenindividuellen Produktionsanlage für Schulungen des Betreiberpersonals oder betriebsbegleitende Untersuchungen zur Verfügung stellen kann. Die plattformbasierte Bereitstellung Digitaler Zwillinge bildet die Basis für neue Geschäftsprozesse und -modelle auch über den Entwicklungsprozess hinaus.

Abb. 11.3 stellt verschiedene Wege zu einem Komponentenmodell in Form eines TwinStore Package dar.

Zur Erstellung eines Komponentenmodells werden je nach Komponententyp verschiedene digitale Eingangs-Daten und -Informationen herangezogen. Diese digitalen Informationen können CAD-Daten im Dateiformat des eingesetzten CAD-Werkzeugs sowie die Komponentenfirmware, die entweder direkt im Quellcode vorliegt oder im Modellierungsprozess nachgebildet werden muss, sein.

Das Komponentenmodell besteht aus einem Verhaltensmodell und kann durch ein Geometriemodell ergänzt werden. Zur Erstellung des Verhaltensmodells greift der Modellierer auf vorhandene Black-Box-Bausteinbibliotheken (meist bereitgestellte Toolbibliotheken) zurück und bildet im Blockschaltbild das Verhalten der Komponente ab. Darüber hinaus können eigene Black-Box-Bausteine erstellt werden, indem das Black-Box-Verhalten mithilfe einer Programmiersprache beschrieben wird. Hierbei besteht auch die Möglichkeit, vorhandene Teile der originalen Komponentenfirmware in den Digitalen Zwilling zu integrieren. Dieser Ansatz wird von einigen Tools über proprietäre Schnittstellen realisiert, etwa das ISG-virtuos SDK C++. Darüber hinaus verwendet das „Functional Mock-up Interface“ (FMI) [10] einen Blockansatz zur Standardisierung der Architektur von Black-Box-Teilmodellen, die über deren Ein- und Ausgänge (E/A) in ein Gesamtmodell integriert werden können.

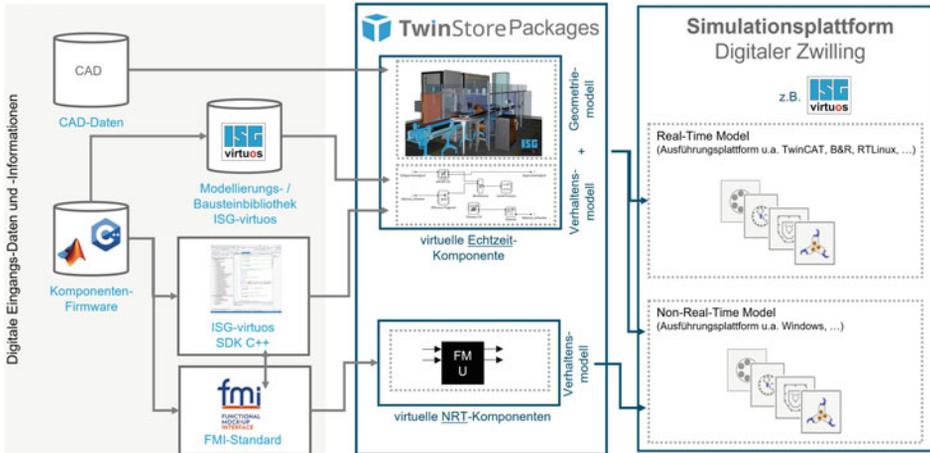


Abb. 11.3 Wege zur Erstellung von TwinStore Packages zum Einsatz in einer Simulationsplattform für das digitale Engineering

Bei der Erstellung eines Verhaltensmodells zum Einsatz bei einer VIBN ist das Komponentenverhalten so abzubilden, dass die diskreten Ein-/Ausgabewerte der Steuerung über den digitalen Feldbus im Modell erzeugt werden, um die Steuerungstechnik auf das richtige Verhalten zu prüfen (siehe Abb. 11.4). Daran bemisst sich die bei der Modellbildung zu wählende Modellkomplexität respektive Modelltiefe (Level of Detail). Das Hauptinteresse bei der VIBN von Maschinen und Anlagen ist im Besonderen nicht auf eine optimierte Gesamtauslegung, sondern auf die eingesetzte Steuerungstechnik gerichtet. Industrielle Steuerungssysteme sind mit der Sensorik und Aktorik der Maschinen über einen digitalen Feldbus verbunden und enthalten, insbesondere in den maschinenspezifischen Softwareteilen, unvermeidbare Programmier- und Parametrierfehler im Steuerungsprogramm, die mittels der VIBN identifiziert und behoben werden sollen.

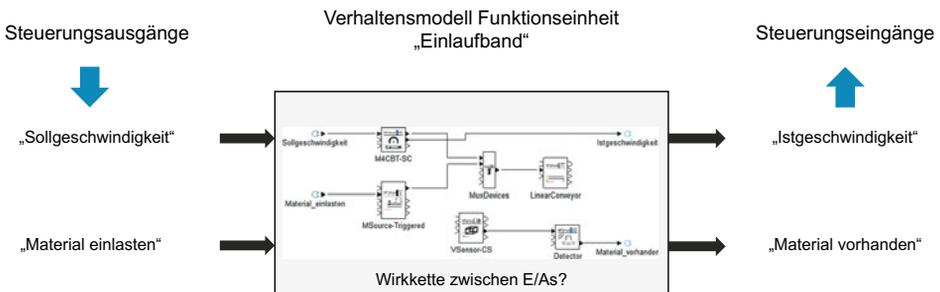


Abb. 11.4 Verhaltensmodellierung einer Komponente

Für einen durchgängigen Einsatz von Komponentenmodellen über den vollständigen digitalen Entwicklungsprozess und die Schulung des Betreiberpersonals bis in die Betriebsphase müssen die Verhaltensmodelle in unterschiedlichen **Detaillierungsstufen**, vom einfachen Model-in-the-Loop Modell bis hin zum echtzeitfähigen Hardware-in-the-Loop Modell, bereitgestellt werden. Die Herausforderung ist die Gestaltung eines optimalen Simulationsmodells für die einzelnen Teststufen, in der passenden Ausprägung, Modellgenauigkeit und Modelltiefe.

11.3 Packages und Bibliotheken

TwinStore Packages

Vom Provider von Simulationsmodellen werden Modellbibliotheken in Form von **TwinStore Packages (TSP)** bereitgestellt. Ein TSP trägt die Dateierweiterung `.tsp` und ist ein gewöhnlicher ZIP-Container.

Der Container enthält zum einen eine Meta-Datei im JSON (JavaScript Object Notation) Format mit allgemeinen Informationen zum TSP. Zum anderen finden sich im Container die Dokumentation zum Funktionsumfang und zum Einsatz des Modells in Simulationsprojekten, das Verhaltensmodell in Form einer Black-Box Beschreibung anhand von Ein-, Ausgängen und Parametriermöglichkeiten, die Geometrieinformationen mit der Kopplung ans Verhaltensmodell sowie dem eigentlichen Modellcode in Form einer DLL (Dynamic Link Library) für die Simulation unter Windows oder `.sys` für die Simulation unter Echtzeitbedingungen in der Beckhoff TwinCAT Echtzeiterweiterung. Modellcodes für weitere (Echtzeit-)Plattformen, wie beispielsweise B&R Automation Runtime und RTLinux, sind ebenfalls realisierbar.

Nach Erstellung der Komponentenmodelle werden **Schutz- und Verschlüsselungsmechanismen** verwendet, um das Know-how des Komponentenherstellers oder Simulationsspezialisten zu schützen. Der Anwender sieht im bereitgestellten (Teil-)Modell ausschließlich das Black-Box-Modell und damit dessen Ein- und Ausgangssignale sowie die Parametrierung des Komponentenmodells. Der schützenswerte Modellaufbau und Modellcode bleiben dem Anwender verborgen.

Im TwinStore Package Manager kann der Provider das TSP auf die Plattform laden und seine Bibliotheken verwalten. Neben Änderungen an bestehenden TSP enthält der **TwinStore Package Manager** eine Versionsverwaltung sowie Möglichkeiten zur individuellen Rechte- und Lizenzvergabe. Mit diesem Rechtemanagement ist gewährleistet, dass ein einzelnes TSP individuell zum Download freigeschaltet werden kann und die Regeln und Richtlinien für eine Nutzung über eine Lizenz durch den Provider festgelegt werden können.

Zur nahtlosen Einbindung von TSPs in Simulationsprojekte ist eine **Integrationschnittstelle** im jeweiligen Simulationswerkzeug zur VIBN notwendig. Die Projektierung des Maschinen- oder Anlagenmodells erfolgt dann vollständig komponentenbasiert. Der

Digitale Zwilling steht somit direkt zur Verwendung im Rahmen einer VIBN zur Verfügung.

Für den Provider von Simulationsmodellen entstehen neue **digitale Geschäftsmodelle** bei der Bereitstellung der digitalen Abbildungen seiner realen Hardwarekomponenten in Form von TSPs im TwinStore. Es ist abzusehen, dass die Verfügbarkeit eines Digitalen Zwillings zukünftig ein zentrales Verkaufsargument beim Vertrieb von Hardwarekomponenten darstellen wird.

Für den Anwender reduzieren sich die Modellierungszeiten durch die Einbindung vorgefertigter Simulationsmodelle. Einen Mehrwert stellt die detailliertere Simulation durch die Verwendung realitätsnaher Modelle zur Abbildung z. B. irregulärer Betriebsarten, dynamischer Parametrierung und des originalen Echtzeitverhaltens dar. Der Digitale Zwilling einer realen Hardwarekomponente soll sich exakt wie das reale System am Feldbus verhalten.

TwinStore Bibliotheken

Aus den digitalen Produktkatalogen der anbietenden Unternehmen kann ein Kunde den Digitalen Zwilling seiner kundenspezifischen Anlage zusammenstellen. Für jedes Simulationsmodell ist eine umfangreiche Dokumentation hinterlegt, über die sich der Kunde über die im Modell abgebildete Funktionalität informieren kann. Der TwinStore agiert als ein digitaler Marktplatz, über den der Digitale Zwilling bezogen werden kann. Die nahtlose Integration in Tools zur VIBN ermöglicht eine direkte Verwendung des zusammengestellten Simulationsmodells. Grundsätzlich unterscheidet der TwinStore zwischen drei Bibliotheksarten (Behaviour-Lib, Component-Lib und Platform-Lib), die im Weiteren mit exemplarischen Beispielen aus dem TwinStore erläutert werden:

In der **Behaviour-Lib** werden Simulationsbibliotheken zur Modellbildung im Blockschaltbild-Editor zur Verfügung gestellt. Diese Art von Bibliotheken enthalten ausschließlich Modellblöcke für den Blockschaltbild-basierten Modellierungsansatz. Unter anderem umfasst diese Bibliotheksart Modelle von Feldbuskomponenten ohne grafische Repräsentanz.

Im TwinStore stehen zahlreiche Antriebsmodelle zur Verwendung in einer HiLS zur Verfügung. Im Simulationsmodell werden die üblichen Steuer- und Statusbits für die Steuerung der abgebildeten State-Machine verwendet. Mit dem Simulationsmodell können gängige Funktionen wie u. a. das Positionieren (Fahrauftrag), Positionieren mit Reversieren, Schleifenfahrt, Handfahrt, usw. abgebildet werden. Dabei werden die einzelnen Phasen, wie z. B. Bremse öffnen, Startverzögerung, Beschleunigen, Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit, Bremsen, Stoppverzögerung und Bremse schließen, abgebildet und können über eine Parametermaske konfiguriert werden.

Ein Beispiel ist das von der ISG bereitgestellte Modell eines Siemens Motorstarters SIRIUS 3RM1x. Der Digitale Zwilling bildet den Funktionsumfang des realen Geräts vollständig ab. Abb. 11.5 zeigt ein Einsatzbeispiel. Die Ein- und Ausgänge des Bausteins sind mit Signalen der Steuerung über Peripherie-E/As (Peripheral Ports) verbunden.

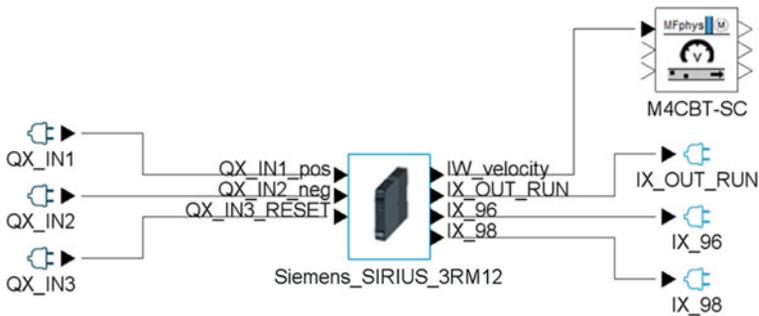


Abb. 11.5 Konfigurationsbeispiel eines Digitalen Zwillings aus der Behaviour-Lib

Der Motorstarter gibt über den Ausgang `IW_velocity` die Geschwindigkeit an einen Physikbaustein, der einen Motor für ein Förderband simuliert.

In der **Component-Lib** werden virtuelle Komponentenmodelle bestehend aus einem Blockschaltbild- und einem Geometriemodell zur Verfügung gestellt. Diese Art von Bibliotheken enthalten damit neben einem Black-Box Bausteinmodell im Blockschaltbild zusätzlich ein verknüpftes Geometriemodell.

Der TwinStore enthält bereits Bibliotheken mit verschiedenen virtuellen Baugruppen, beispielsweise für Robotersysteme, Antriebstechnik, Fördertechnik, Greifsysteme und Sensorik. In unterschiedlichen Baugruppen-Bibliotheken wurden einzelne Baugruppen abgebildet, die sich zu einem individuellen Anlagenkonzept per Drag-and-drop im 3D projektieren lassen. Bei der 3D-Projektierung entsteht das Simulationsmodell, welches ohne weiteren Modellierungsaufwand zur VIBN eingesetzt werden kann.

Beispiele der Component-Lib sind die in Abb. 11.6 dargestellten 3D-Komponentenmodelle zur Projektierung einer Roboterzelle. Robotermodelle bestehen dabei aus einer 3D-Visualisierung und einem hinterlegten Kinematikmodell, welches auf Basis der im Datenblatt des Roboterherstellers zur Verfügung gestellten Informationen parametrisiert ist. Das Komponentenmodell bietet Schnittstellen wie z. B. zur Kopplung mit einem Greifermodell. Hierfür ist im TwinStore beispielsweise das Simulationsmodell des Zimmer Greifers GEH6000IL-Gripper inklusive der Feldbusschnittstellen der Komponentenfirmware (Logik-Modell) und dem Physikmodell hinterlegt. Das Physikmodell ermöglicht eine Anbindung an individuelle Kinematiken sowie an ein Materialflussmodell zur Simulation von Handhabungsaufgaben.

Ein Beispiel für das Simulationsmodell eines photoelektrischen Sensors ist der Digitale Zwilling der Komponente WTB4SC-3P2262A00 von SICK. Dieses besteht aus den Kommunikationsschnittstellen, der Komponentenfirmware (Logikmodell) und dem Physikmodell. Für die Simulation der Komponentenfirmware wurde ein besonderer Wert auf die Möglichkeit zur Übernahme der Komponentenparametrierung aus den Engineering-Tools des Komponentenherstellers gelegt. Das Physikmodell berücksichtigt Sensor-relevante Einflussgrößen wie z. B. Glanzgrad, Winkellage, Farbe, Transparenz, der

Baukasten



Abb. 11.6 Projektierung der virtuellen Anlage aus TwinStore Packages

Detektions- und Hintergrundobjekte und bietet eine Schnittstelle zur Kopplung mit einem Materialflussmodell.

Die **Platform-Lib** stellt Online-Schnittstellen für die Anbindung und Kopplung weiterer Softwarewerkzeuge zur Verfügung. Beispiele sind vorgefertigte Schnittstellenlösungen zur Anbindung von virtuellen Steuerungen, z. B. Software-in-the-Loop Simulation (SiLS), und von spezialisierten Simulationswerkzeugen.

Im TwinStore sind mittlerweile eine Vielzahl von Schnittstellen, beispielsweise zur Anbindung von Siemens PLCSimAdvanced, Siemens Sinumerik One, KUKA OfficeLite und Fanuc RoboGuide, verfügbar.

Die im TwinStore verfügbaren Bibliotheken in der Behaviour-Lib, Component-Lib und Platform-Lib werden sukzessive weiter ausgebaut. Die erläuterten Komponentenmodelle liegen als TSP vor und wurden im Simulationswerkzeug ISG-virtuos umgesetzt. Für die Erstellung der Modelle ist sowohl der Blockschaltbild-Ansatz als auch die Programmierung von Black-Box Bausteinen möglich. Im Blockschaltbild kommen verfügbare ISG-virtuos Toolbibliotheken zum Einsatz. Für die Integration der Komponentenfirmware wird die ISG-virtuos C++ SDK Schnittstelle zur Erstellung eigener Echtzeitmodelle eingesetzt.

11.4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Digitale Fabrik verfolgt die Vision der Verfügbarkeit eines Digitalen Zwillings der realen Maschine oder Anlage samt maßgeschneiderten digitalen Werkzeugen und Methoden über den gesamten Lebenszyklus. Der in diesem Beitrag vorgestellte TwinStore bildet

eine digitale Austauschplattform für Simulationsmodelle, auf der Komponentenhersteller Digitale Zwillinge direkt zur Verfügung stellen und vertreiben können.

Die weitere Ausgestaltung der Austauschplattform TwinStore erfolgt im Rahmen der TwinStore Community. In der TwinStore Community engagieren sich Komponentenhersteller, Simulationsspezialisten, Maschinen- und Anlagenbauer, Systemintegratoren und Anwender einer VIBN. Neben der Ausgestaltung der TwinStore Plattform wird der Umfang der verfügbaren Bibliotheken sukzessive weiter ausgebaut. Im Rahmen der Zusammenarbeit erfolgt die Normierung und Standardisierung von Simulationsmodellen in TwinStore Packages. Derzeit wird in der Community an „Best Practice“ Anwendungen gearbeitet, die einen Einsatz validierter Komponentenmodelle aus dem TwinStore in komplexen VIBN aufzeigen. Zudem wird die Erarbeitung eines Zertifizierungsvorgehens und damit einer Qualitätssicherung für geprüfte Simulationsmodelle vorangetrieben. Hierbei wird die Identifikation von Qualitätskriterien sowie die systematische, automatisierte Bewertung der Qualität von TSP untersucht [4]. Daneben wird ein digitales Geschäftsmodell für den Austausch von TSP erarbeitet.

Literatur

1. BITKOM e. V., VDMA e.V. und ZVEI e. v. (2015) Umsetzungsstrategie Industrie 4.0: Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0
2. VDI 4499 Blatt 1:2008–02: Verein Deutscher Ingenieure (2008) Digitale Fabrik – Grundlagen. <http://www.beuth.de>
3. VDI/VDE (2020) VDI-Statusreport Februar 2020: Simulation und digitaler Zwilling im Anlagenlebenszyklus: Standpunkte und Thesen
4. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA) (2018) Wege zum Digitalen Zwilling: Simulation und Visualisierung im Produktlebenszyklus, Anwendungs- und Nutzenbeispiele aus dem Maschinen- und Anlagenbau. VDMA Verlag, Frankfurt
5. VDI/VDE 3693 Blatt 1:2016–08: Verein Deutscher Ingenieure, 2015 Virtuelle Inbetriebnahme – Modellarten und Glossar. <http://www.beuth.de>
6. Günther FC (2017) Beitrag zur Co-Simulation in der Gesamtsystementwicklung des Kraftfahrzeugs. TU München. München, Univ., Diss, München, S 2017
7. Scheifele S (2019) Generierung des Digitalen Zwillings für den Sondermaschinenbau mit Losgröße 1. Stuttgart, Fraunhofer Verlag. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung 107. Stuttgart, Univ., Diss., 2019. ISBN 978-3-8396-1618-5
8. Scheifele C (2019) Plattform zur Echtzeit-Co-Simulation für die virtuelle Inbetriebnahme. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung 95. Stuttgart, Univ., Diss., 2019. ISBN 978-3-8396-1534-8. Fraunhofer, Stuttgart
9. TwinStore – Online Plattform für digitale Zwillinge. <http://www.twinstore.de>
10. Blochwitz T et al (2012) Functional mockup interface 2.0: The standard for tool independent exchange of simulation models. Proceedings of the 9th International MODELICA Conference; September 3–5; 2012; Munich; Germany. No. 076. Linköping University Electronic Press

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Karl Kübler, Gerhard Krebser und Alexander Verl

Zusammenfassung

Um hochwertige Automatisierungslösungen mit kontinuierlich steigendem Softwareanteil anzubieten, sieht sich der Maschinen- und Anlagenbau der Herausforderung von steigendem Testaufwand und steigender Testkomplexität gegenüber. Der in einer Virtuellen Inbetriebnahme eingesetzte Digitale Zwilling bildet in diesem Beitrag die Basis für die Entwicklung einer Effizienzmethode, um den Testaufwand durch Automatisierung zu reduzieren und die Testkomplexität beherrschbar zu machen. Dieser Beitrag erarbeitet die aktuellen Defizite der Virtuellen Inbetriebnahme im Softwaretest des Maschinen- und Anlagenbaus und präsentiert eine Lösung zur Testautomatisierung. Das entworfene Testautomatisierungswerkzeug ermöglicht mit einer methodischen Testplanung und -durchführung die frühzeitige Behebung etwaiger Softwarefehler. Damit steigt die Qualität der Software deutlich und gleichzeitig wird der Aufwand der Testabläufe reduziert. Der Umfang der Testlösung wird beispielhaft an einem Bearbeitungszentrum aufgezeigt.

K. Kübler · A. Verl (✉)

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

E-Mail: alexander.verl@isw.uni-stuttgart.de

G. Krebser

ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH, Stuttgart, Deutschland

© Der/die Autor(en) 2024

A. Verl, S. Röck und C. Scheifele (Hrsg.),

Echtzeitsimulation in der Produktionsautomatisierung,

https://doi.org/10.1007/978-3-662-66217-5_12

12.1 Einleitung

Im Engineering wird der Digitale Zwilling einer Maschine oder Anlage im Rahmen der Virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) verwendet, um das Gesamtsystem schrittweise in Betrieb zu nehmen. Ziel bei der VIBN ist es, eine vorgezogene Validierung, Fehlerfindung und -behebung, sowie Optimierung durchzuführen [1], damit die Inbetriebnahme der realen Maschine oder Anlage schneller und reibungsfrei durchgeführt werden kann.

Bei der Fehlerfindung und -behebung konzentriert sich die VIBN im derzeitigen Einsatz im Maschinen- und Anlagenbau meist auf das Steuerungssystem und die dort ablaufenden Steuerungsprogramme. Dabei erkannte Fehler können in der VIBN-Phase im Vergleich zu einer realen Inbetriebnahme weitaus aufwandsarmer behoben werden. Die VIBN ist ein im Engineering integrierter Prozess, welcher mit der Erstellung eines Simulationsmodells des realen Zwillings beginnt. Mit dem Aufkommen der VIBN-Simulationstechnik für den Maschinen- und Anlagenbau, konnte der sequentielle Ablauf, nach dem 9-Phasen-Modell [2] (später auch Wasserfall-Modell), im Engineering aufgebrochen und ein teilweise parallelisierter Entwicklungsprozess erreicht werden. Die Teil-Parallelisierung des Entwicklungsprozesses mittels VIBN gehört heute, bei immer mehr Unternehmen aus dem Maschinen- und Anlagenbau zum Stand der Technik [3, 4]. Dabei werden häufig sogenannte Hardware-in-the-Loop Simulationen (HiLS) [5] benutzt, um Tests an realen Steuerungen in Verbindung mit einem virtuellen Modell der Maschine beziehungsweise Anlage durchführen zu können.

Die Steuerungsprogramme von Maschinen und Anlagen mittels Simulation bereits vor der Inbetriebnahme zu testen und Fehler zu korrigieren, wird zunehmend als ein maßgeblicher Wettbewerbsvorteil zwischen Unternehmen, welche in einem Konkurrenzverhältnis stehen, gesehen. Nicht zuletzt aufgrund von Maschinenführern, die, dank Technologien wie Smartphones, immer offener gegenüber intuitiven Bedienkonzepten und anpassbaren Oberflächen in ihren Anlagen sind, wird die Systemarchitektur der Steuerungssoftware moderner Anlagen zunehmend komplexer und heterogener. Sie besteht häufig aus verschiedenen Kernbestandteilen: HMI (Human Machine Interface, Benutzerschnittstelle), SPS (speicherprogrammierbare Steuerung) und NC-Kern (numerischer Steuerungskern). Da es zwischen den verschiedenen Kernbestandteilen, sowie der Anlage und der Leitebene im Unternehmen unterschiedliche Schnittstellen gibt, steigt die Komplexität der Steuerungssysteme weiter an.

Bei steigender Funktionalität und Komplexität von Maschinen und Anlagen, und damit auch von SPS-Programmcode, sind heutzutage mehr als zwei Drittel des Programmcodes nur zur Gewährleistung der Funktionsfähigkeit und Sicherheit notwendig [6]. Werden diese Mechanismen nicht ausreichend vor dem produktiven Einsatz der Anlage getestet, kann es zu unvorhersehbaren und oft teuren Folgeschäden oder Verzögerungen in der laufenden Produktion kommen. Die stetig zunehmenden Testumfänge steigern kontinuierlich die Kosten in der Qualitätssicherung und binden Personal.

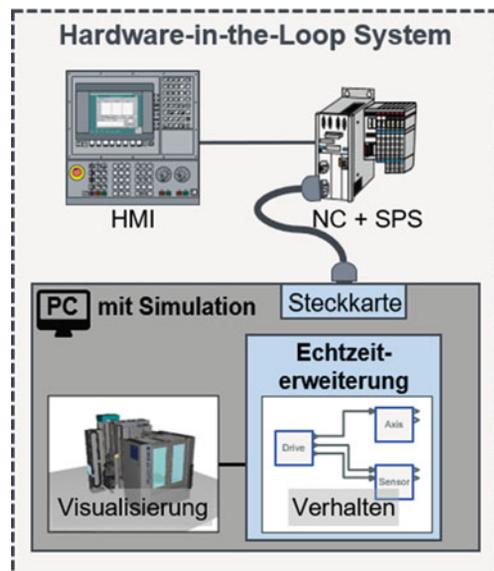
Die folgenden Kapitel zeigen exemplarisch für Werkzeugmaschinen, wie der Test im Rahmen der VIBN verbessert werden kann. Die dabei identifizierten Problemstellungen, sowie die präsentierte Lösung können auch auf andere automatisierte Produktionssysteme übertragen werden.

12.2 Stand der Technik

Um zu überprüfen, ob ein Steuerungsprogramm tatsächlich im gewünschten Sinne funktioniert, sind Tests notwendig. Der wichtigste Teil der Testaktivitäten findet auch heute noch vielfach erst während der Integration und Inbetriebnahme an der realen Maschine statt. Es geht dabei darum, die Reaktion der Steuerungsprogramme zu bewerten. Viele Unternehmen wünschen sich jedoch, früher mit der Testphase beginnen zu können. Um das zu ermöglichen, setzen immer mehr Firmen auf die VIBN [7, 8]. Im Rahmen der VIBN wird der Test entwicklungsbegleitend und damit früher durch die Nutzung einer virtuellen Umgebung ermöglicht [9]. Abb. 12.1 zeigt eine für die VIBN verwendete HiLS. Das System besteht aus einer realen Steuerung, einem realen Kommunikationssystem und einem Simulationsrechner [9]. In dem speziell betrachteten Fall handelt es sich um eine Computerized Numerical Control (CNC) als Steuerung, oben rechts in der Abbildung, und um eine Simulation einer Werkzeugmaschine, unten in der Abbildung. Ein CNC-System wird weiter unterteilt in: einen NC-Kern zur Geometriedatenverarbeitung für die einzelnen Achsen und eine weitere Steuerung, die SPS, zur Verarbeitung von logischen Schaltfunktionen. Als dritter Teil wird die Schnittstelle zum Benutzer gesehen, das Human Machine

Abb. 12.1

Hardware-in-the-Loop System bestehend aus Steuerung, Antriebsbus und virtueller Werkzeugmaschine, angelehnt an [3]



Interface (HMI) [10]. Das CNC-System und die simulierte Maschine bilden zusammen mit dem Antriebsbus eine komplette Werkzeugmaschine ab, wie sie in Realität in der Produktion steht.

Der PC benötigt zunächst zur Anbindung an einen industriellen Feldbus eine Steckkarte, welche mit einem speziellen Bustreiber ausgestattet ist, um eine Kommunikation in Steuerungsechtzeit zu ermöglichen. Das Betriebssystem des PCs muss ebenfalls echtzeitfähig sein, sodass die Simulation deterministisch Ergebnisse an die Steuerung liefern kann. Die großen Vorteile einer HiLS sind [9]:

- Eine saubere Trennung zwischen Simulation und Automatisierung, da die Steuerung mit unverändertem Steuerungscode und -konfiguration zum Einsatz kommt
- Umfangreiche Testmöglichkeiten (Integrationstests) mitsamt Peripherie der Steuerung zur Durchführung auch von komplexen Testfällen mit hoher Übertragbarkeit auf den realen Zwilling

Zum Testen von SPS-Programmcode von Werkzeugmaschinen sind HiLS besonders geeignet, da andere Architekturen, bspw. Software-in-the-Loop, Einrechner-Simulation und auch Simulation auf der Steuerung, siehe [9], keine Abbildung des Bussystems ermöglichen. Damit geht im Vergleich zur realen Werkzeugmaschine Realitätsnähe verloren was zu eingeschränkten Testmöglichkeiten führt.

Unter Verwendung einer HiLS ist es möglich, das Gesamtsystem im Entwicklungsprozess schon deutlich früher als bei Tests an der realen Werkzeugmaschine sowohl einem Gut- als auch einem Schlechtfalltest zu unterziehen [11]. Unabdingbare Abnahmetests an der realen Anlage beim Hersteller (Factory Acceptance Test) beziehungsweise beim Kunden (Site Acceptance Test) lassen sich nach einer VIBN wesentlich schneller abschließen [8]. Während die Gutfalltests darauf abzielen, die vom Kunden gewünschte Performance und Funktionalität zu überprüfen, werden bei den Schlechtfalltests Zuverlässigkeit und Robustheit der Software getestet, indem die Reaktion der Steuerungsprogramme in expliziten Gefahren- und Störsituationen überprüft wird. Die gewonnene Zeit nach Durchführung einer VIBN kann für Optimierungen oder zum früheren Ausliefern der Maschine genutzt werden.

12.3 Befragung von Maschinenherstellern

Eine eigens durchgeführte Befragung von vier führenden Werkzeugmaschinenherstellern aus Deutschland zeigt die vorherrschenden Mängel beim manuellen Test unter Einsatz einer HiLS auf. Alle befragten Unternehmen haben die VIBN in ihren Entwicklungsprozessen im Einsatz.

Insgesamt wurden sechs Abteilungen aus vier Unternehmen gebeten, einen Fragebogen zum Ist-Stand der VIBN und Tests auszufüllen. Dabei wurden 13 Fragen zu den Bereichen Testablauf, Testmanagement (Definition [13]) und Testauswertung gestellt. Im Nachgang zu den Fragebögen wurden Interviews mit den Abteilungen geführt, um die Antworten zu vertiefen. Durch die Befragungen wurden folgende Defizite sichtbar:

1. Ein Testmanagement fehlt
2. Die Testdauer ist sehr hoch, bis zu mehreren Tagen
3. Die VIBN ist eine aufwändige, manuelle Tätigkeit
4. Die Frequenz und Anzahl an Testabläufen steigen

Zu 1.: Die Befragten gaben an, dass Tests weder umfassend geplant noch umfassend dokumentiert würden. Zum einen sei das auf eine knapp bemessene Anzahl an Testern zurückzuführen, zum anderen darauf, dass viele Tests in Eigenregie durchgeführt würden und Rückmeldungen nicht einheitlich erfolgten. Weiterhin würden erstellte Testfälle nicht für eine Wiederverwendung konzipiert, sondern spezifisch auf den aktuellen Testablauf ausgelegt. Eine Einplanung von Zeitfenstern für den Test von Funktionalitäten erfolge nicht, es würde die übrige Zeit in der Entwicklungsphase für Tests genutzt, gaben über 60 % der Befragten an.

Zu 2.: Tests von Steuerungsprogrammen, welche früher erst bei der realen Inbetriebnahme (IBN) gemacht werden konnten, werden durch die VIBN vorgezogen. Die Zeitdauer der IBN selbst habe sich im Gegensatz dazu aber nicht verändert, so die Hersteller. Im Gegenteil, nun stünde als zusätzlicher Arbeitsaufwand die Erstellung des virtuellen Modells für die Simulation an. Da die Zeit für die Erstellung immer noch gering im Vergleich zur gesparten Zeit am Ende des Projekts sei, würden virtuelle Werkzeugmaschinen überhaupt modelliert und bei der VIBN eingesetzt. Die Testdauer, welche für die VIBN benötigt wird, sei aber weiterhin sehr lang, im Kontext der gesamten Projektdauer. Besonders hervorgehoben wurde von den befragten Personen, dass die Testschritte, welche in einem Testfall auszuführen seien, nicht den Hauptteil an der Zeitdauer ausmachten. Zum Testablauf gehöre auch immer, das System in einen definierten Ausgangszustand zu bringen, wie die befragten Personen erklärten. Diese Tätigkeit sei zum Teil zeitaufwändiger als der eigentliche Test einer Funktionalität. Einfache Testabläufe, gemessen ohne die Testvorbereitung, seien nach zwei Minuten, komplexere Testabläufe nach mehreren Tagen beendet.

Zu 3.: Fünf von sechs Abteilungen gaben an, ihre Tests manuell durchzuführen. Auch die VIBN binde Tester als Ressource während des gesamten Testablaufs. Dazu gehöre die Testerstellung, der Testablauf und die Testprotokollierung sowie -auswertung. Bei der Testerstellung würde sehr häufig nicht auf bestehende Testfälle zurückgegriffen, sondern neue erstellt, so die befragten Personen. Es existierten keinerlei Systeme in den Abteilungen, welche eine Wiederverwendbarkeit unterstützten, gaben vier von sechs Abteilungen an. Bei der Testprotokollierung und -auswertung würden unzureichende Aufschriebe erstellt. Die Hersteller testen nach Gefühl und notierten teilweise nur „i. O.“ (in Ordnung) oder „n. i. O.“ (nicht in Ordnung) am Ende des Testablaufs.

Zu 4.: Zu einem Anstieg an Testaufkommen für die Werkzeugmaschinenhersteller würden auch die Softwareupdates der Steuerungshersteller führen. Dies konnten alle Maschinenhersteller berichten, welche ihre Steuerung nicht selbst entwickeln. Nach Updates an der Steuerung müssten alle SPS-Programme für die neue zugrundeliegende Steuerungssoftware, in sogenannten **Regressionstests**, freigegeben werden. Insbesondere von den Maschinenbauern programmierte (Mess-)Zyklen seien davon betroffen. Nach Aussage eines Werkzeugmaschinenherstellers kommt es im Zuge einer neuen Politik bei den Releases von Softwareständen zur Erhöhung der Frequenz an Softwaretests. Dabei geht dieser Hersteller den Weg eines Softwareunternehmens und stellt regelmäßige und verbesserte Versionen seiner Steuerungsprogramme zur Verfügung. Jedes neue Release müsse im Zuge der Qualitätssicherung alle definierten Tests zur Abnahme bestehen. Dies erhöhe den Aufwand enorm und führe auch zu wenig herausfordernden Testabläufen, da immer wieder die gleichen Testabläufe ausgeführt würden.

12.4 Probleme der VIBN und abgeleiteter Handlungsbedarf

Es lässt sich aus den Befragungen feststellen, dass die Firmen einen Nachholbedarf im **Softwaretesting** haben. Zu diesem Schluss kam auch eine frühere Befragung im deutschen Maschinen- und Anlagenbau [14]. Aus der Entwicklung von Anwendersoftware in höheren Programmiersprachen bekannte Konzepte wie Wiederverwendbarkeit, Testprotokollierung, Testabdeckung, Testautomatisierung, beschrieben in [13], finden bei der Entwicklung von Steuerungsprogrammen kaum bis keine Anwendung [14]. Hinzu kommt, dass sich in der aktuellen Struktur der VIBN viel Potenzial zum Einsparen von Zeit- und Personalkosten findet. Weiterhin bleibt die VIBN:

- **Zeitaufwändig**, ein Tester muss die HiLS manuell bedienen
- **Fehleranfällig**, die Tests werden manuell ausgeführt
- **Unzureichend**, der Tester kann nur testen, was er auch sieht
- **Kostenintensiv**, durch hohen Personal- und Zeitaufwand

Ausführlicher beschrieben heißt das: Aus den Interviews ging hervor, dass der Prozess der VIBN mit anschließender IBN im Vergleich zur rein realen IBN keine absolute Zeitersparnis bewirkt. Die benötigte Zeitdauer einer Testausführung bleibt gleich hoch und bindet das Personal. Die zeitliche Entzerrung auf dem kritischen Entwicklungspfad entsteht durch die Parallelisierung der Tätigkeiten. Darüber hinaus lässt es sich nicht vermeiden, dass aufgrund der Modularität und der Konfigurierbarkeit der Werkzeugmaschinen hohe Wiederholungsraten einzelner Tests entstehen.

In einer HiLS, welche in harter Echtzeit arbeitet, können beim manuellen Test nicht alle Signale erfasst und ausgewertet werden. Solange die Tests manuell ausgeführt werden, kann es zudem zu Fehlern aufgrund menschlichen Versagens kommen. Beispielsweise kann eine manuelle Testausführung keine zeitlich deterministische Reproduzierbarkeit gewährleistet werden. Durch falsche Interpretation eines Testablaufs und Unachtsamkeit bei der Beobachtung von Zuständen können ebenfalls falsche Testergebnisse entstehen. Diese Sachverhalte führen im besten Fall nur zu einer Wiederholung des Tests (Mehraufwand), in anderen Fällen zu einem abgenommenen falschen Testergebnis.

Nicht zuletzt ergibt sich eine weitere Komplikation: Unternehmen müssen baugleiche Maschinen mit Steuerungen verschiedener Hersteller anbieten. Dementsprechend sind vorab jegliche Kombinationen aus Maschine und Steuerung zu testen.

Das nachfolgende Kapitel beschäftigt sich mit einem Lösungsansatz, welcher die oben genannten Probleme löst. Das Hauptaugenmerk liegt darauf, ein automatisiertes Testsystem zu schaffen, welches manuelles Testen weitgehend ersetzt.

12.5 Anforderungen und Lösungsansatz

Um die in Abschn. 12.4 dargestellten Probleme zu lösen, wurde am ISW der Universität Stuttgart in Zusammenarbeit mit der ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH ein Konzept erarbeitet, welches erlaubt, Testabläufe, wie sie bei der VIBN auftreten, zu automatisieren. Das Konzept trägt den Namen **Virtuelle Steuerungstestbench** und ist in Abb. 12.2 abgebildet. Im Jahr 2018 ist daraus das kommerziell verfügbare Testautomatisierungswerkzeug **ISG-dirigent** entstanden. Als Testumgebung wird die aus der VIBN bekannte HiLS genutzt, um die Werkzeugmaschine virtuell abzubilden. Mit der HiLS ist ein Testautomatisierungswerkzeug (TAW) verbunden, welches die Aufgaben des Testers übernimmt. Insbesondere die Testausführung und Testauswertung werden aufgrund der Befragung bei den Werkzeugmaschinenherstellern für die Automatisierung vorgesehen. Die drei Schnittstellen zwischen TAW und HiLS werden im nächsten Kapitel beschrieben.

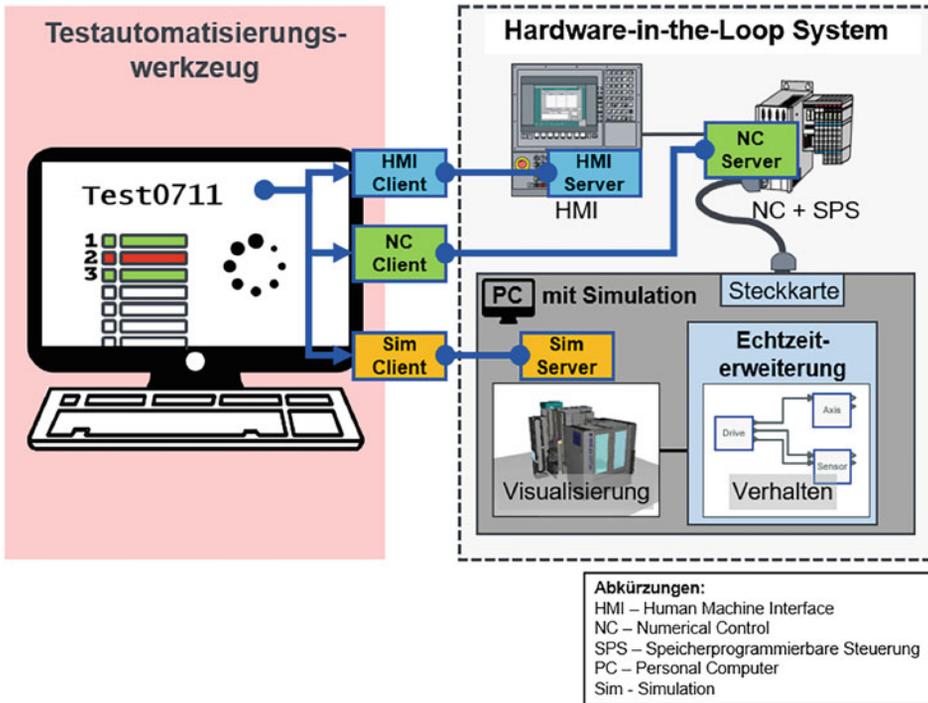


Abb. 12.2 Schema der Virtuellen Steuerungstestbench aus Testautomatisierungswerkzeug und HiLS

Für den erfolgreichen Einsatz der Virtuellen Steuerungstestbench für die VIBN werden die folgenden Anforderungen definiert:

- Damit die erstellten Testabläufe in verschiedenen Phasen der Entwicklung einer Anlage wiederverwendet werden können, muss das Testautomatisierungswerkzeug (TAW) die Definition von wiederverwendbaren Tests unterstützen.
- Die Interaktion mit dem TAW darf kein Expertenwissen hinsichtlich der Kommunikationsprotokolle o. Ä. der HiLS voraussetzen.
- Damit möglichst viele Beteiligte aus der Entwicklung unmittelbar an der Erstellung der Tests mitwirken können, dürfen für deren Erstellung keine Programmierkenntnisse notwendig sein. Die Darstellung der Testabläufe muss leicht verständlich sein. Das Werkzeug muss einfach bedienbar sein.
- Um komplexe Abläufe realitätsnah testen zu können, muss das TAW parallele Abläufe, Verzweigungen und Schleifen ermöglichen.
- Komplexe Anlagen enthalten oft mehrere Maschinen und Steuerungen. Das TAW muss daher in der Lage sein, mehrere Steuerungen in einer HiLS testen zu können.

- Um Fehlerursachen schnell und sicher lokalisieren zu können, muss der Testablauf detailliert protokolliert werden können.
- Testreports müssen eine reversionssichere Testdokumentation ermöglichen.
- Maschinen sind i. d. R. modular aufgebaut und ermöglichen dadurch eine hohe Varianz im Hinblick auf die jeweilige kundenspezifische Ausführung. Adressen von Komponenten, Parametern, Ein-/Ausgängen etc. ändern sich damit häufig abhängig von der jeweiligen Ausführung. Damit Tests diesbezüglich einfach, sicher und schnell an die jeweilige Ausführung der Maschine angepasst werden können, müssen diese symbolisch adressiert werden können.

Im Folgenden soll detaillierter auf das TAW und dessen Realisierung als Testframework eingegangen werden. Das TAW, als Kernkomponente der automatisierten VIBN, wird wie folgt spezifiziert: Eine **grafische Benutzerschnittstelle (GUI)** ermöglicht es Tätigkeiten aus dem Testmanagement auszuführen, z. B. Tests zu erstellen, Testabläufe zu starten und zu beobachten, sowie historische Testabläufe zu betrachten. In der **Testausführung** werden die grafisch definierten Tests in ausführbare Befehle übersetzt. Die Befehle beinhalten hauptsächlich Schritte für den automatisierten Zugriff auf die Schnittstellen der HiLS. Gleichzeitig protokolliert die Testausführung den Testablauf. In einer **Datenhaltung** werden wiederverwendbare Tests, sowie Testprotokolle und weitere relevante Framework-Daten abgelegt.

In Abb. 12.3 wird eine mögliche Realisierung des Testframeworks spezifiziert. Das Testframework ist primär für die Testausführung zuständig und muss dazu sekundär die Kommunikation und den Datenaustausch mit der GUI und der Datenhaltung realisieren.

Wie in Abb. 12.3 dargestellt, erzeugt der Tester durch Konfigurieren von neuen Tests die drei Dateiartern **Test-Fall**, **Test-Szenario** und **Test-Konfiguration**. Logisch besteht eine Test-Konfiguration aus Test-Schritten, welche konkrete an einer HiLS ausführbare Aktionen beinhalten. Test-Schritte werden als atomare Bestandteile durch das Testframework mitgeliefert und können je nach Anwendungsfall neu hinzugefügt werden. Beispielsweise kann ein Test-Schritt enthalten: *Auslesen eines Steuerungsparameters aus der NC-Parametrierung*, oder *Überschreiben eines Signals im Simulationsmodell zur gewollten Fehlererzeugung*. Mehrere Test-Schritte werden zu einem Test-Fall verknüpft, welcher mehrere Test-Schritte miteinander verknüpft und auch die Schritte beinhaltet, um eine HiLS in einen definierten Ausgangszustand vor dem Ausführen der eigentlichen Test-Schritte zu bringen. Mehrere Test-Fälle werden zu Test-Szenarien gebündelt. Diese Bündelung findet z. B. funktionsweise statt, so können einzelne funktionale Einheiten einer Werkzeugmaschine bei der VIBN schrittweise separat getestet werden. Wobei das Szenario wiederum für andere Modelle des Werkzeugmaschinentyps benutzt werden kann, welche im Sinne einer modularen Maschine diese funktionale Einheit verbaut haben. Die Test-Konfiguration enthält neben mehreren Test-Szenarien zusätzliche Informationen zur HiLS. Die Beschreibungen dazu entnimmt das Framework den Dateien

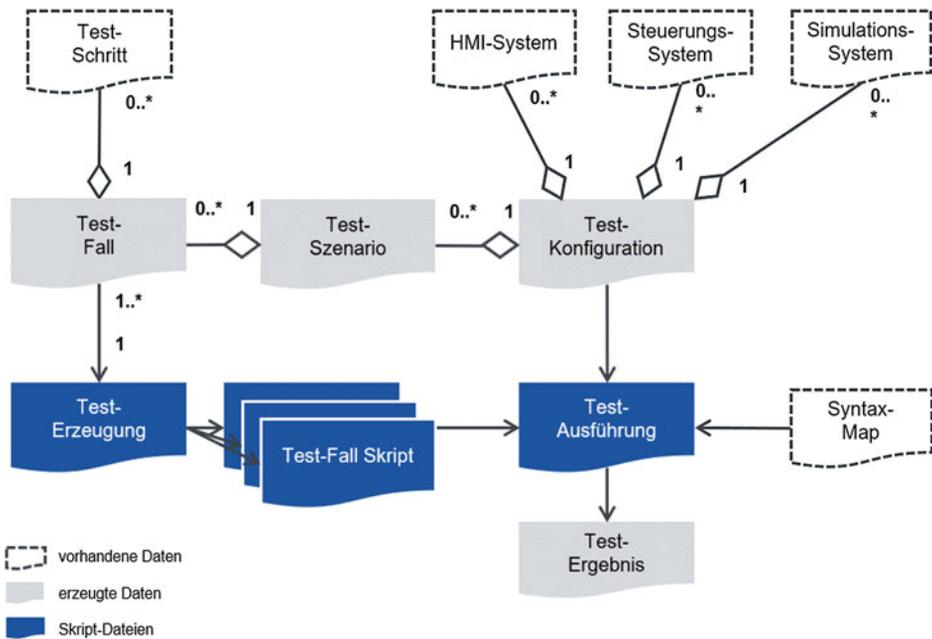


Abb. 12.3 Komponentendiagramm des Testframeworks im TAW

HMI-System, Steuerungssystem, Simulationssystem. Vor der Testausführung generiert die **Test-Erzeugung** aus den einzelnen Beschreibungen der Test-Fälle ausführbare Befehle, z. B. in Form von Skripten. Zur Laufzeit des Tests werden beim Ausführen der einzelnen Test-Fälle, durch die **Test-Ausführung**, generische Befehle der Testfälle in konkrete Syntax für das aktuelle CNC-System in der HiLS übersetzt. Als Testergebnisse werden die Resultate aus jedem Test-Schritt in eine **Test-Ergebnis** Datei abgespeichert.

12.6 Schnittstellen des Testframeworks

In diesem Kapitel wird vertieft auf die Schnittstellen zwischen TAW und der HiLS eingegangen. Zwischen TAW und HiLS sind drei Schnittstellen zu betrachten, um die Ausführung eines Tests automatisierbar zu machen. Zwei Schnittstellen bestehen zum CNC-System, wobei eine der Schnittstellen zwischen der Steuerung (NC und SPS) und TAW besteht und die zweite zwischen HMI und TAW. Die dritte Schnittstelle besteht zur Simulation der Werkzeugmaschine.

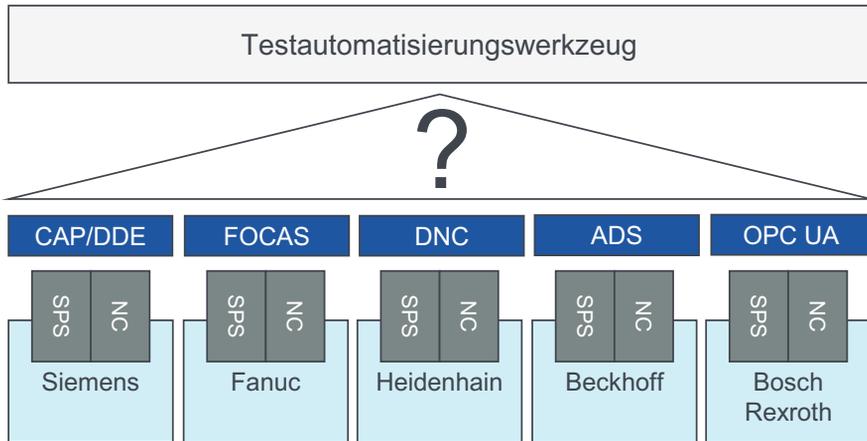


Abb. 12.4 Diversität proprietärer Schnittstellen von CNC-Steuerungen verschiedener Hersteller

Die **HMI-Schnittstelle** wird beim automatisierten Testen für zwei Dinge benötigt: Erstens, zum Auslösen von Bedienhandlungen, welche vormals von einem Tester ausgeführt wurden. Zweitens, um zu überprüfen, ob das HMI im Fehlerfall richtige Fehlermeldungen an den Benutzer weitergibt.

Über die **Steuerungsschnittstelle** werden Parameter und Variablen der SPS beziehungsweise der NC ausgelesen. Das gleiche Werkzeugmaschinenmodell wird häufig je nach Kundenwunsch mit einer unterschiedlichen Steuerung ausgestattet. Die Steuerungsschnittstelle muss deshalb herstellerunabhängig ausgeführt sein. Damit soll es ermöglicht werden, dass dieselben Tests unabhängig vom jeweiligen Steuerungssystem verwendet werden können. Abb. 12.4 zeigt die Diversität der Schnittstellen (z. B. ADS, OPC UA) anhand der gängigsten CNC-Systeme.

Zur Definition von herstellerunabhängigen Tests muss zusätzlich zur Verbindung eine herstellerunabhängige Adressierung von Parametern und Variablen in der Steuerung möglich sein. Mit einer sogenannten Syntax-Map werden die Adressen der Parameter und Variablen in einer Steuerung über mehrere Hersteller hinweg, für jeweils einen bestimmten Parameter oder eine bestimmte Variable mit einem generischen Befehl verknüpft. Abb. 12.5 zeigt die schematische Darstellung der umgesetzten Lösung.

Beim Konfigurieren von Testfällen benutzt der Tester den generischen Befehl und gibt in der Test-Konfiguration das Zielsystem an. Somit bleibt der einzelne Testfall generisch und kann ohne Anpassung in einer weiteren Test-Konfiguration auf einem weiteren Zielsystem ausgeführt werden. Abb. 12.5 zeigt exemplarisch den Aufruf für den Befehl „Aktueller Status NC-Kanal 1“. Dabei wird der generische Befehl „MachineInterface.CncChannelList.1.ActStatus“ benutzt. Als Zielsteuerung ist eine Fanuc CNC im Einsatz. Durch Nachsehen in der Syntax-Map wird aus dem generischen Befehl die Syntax von Fanuc ermittelt „cnc_statinfo“. Bei der Ausführung des Testfalls wird dann

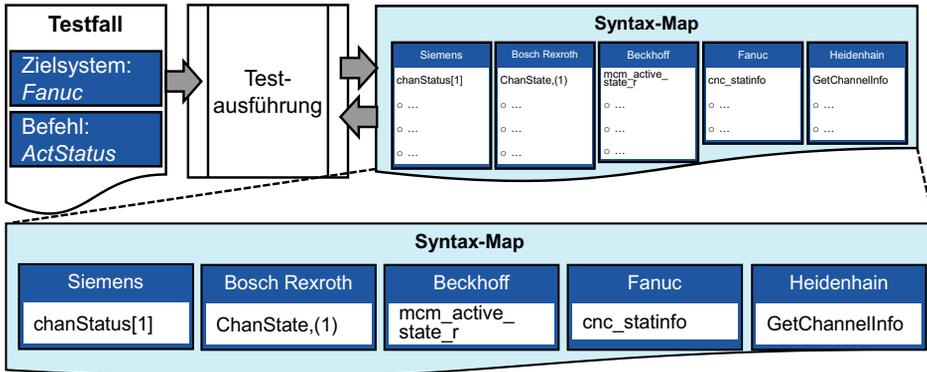


Abb. 12.5 Schema und Funktionsweise der Syntax-Map im Testframework

die Syntax von Fanuc anstatt des generischen Ausdrucks verwendet. Die Syntax-Map kann jederzeit um einen Hersteller oder eine Adressierung für Parameter und Variablen erweitert werden.

Die dritte Schnittstelle ist die **Simulationsschnittstelle** zur virtuellen Werkzeugmaschine. Mithilfe der Simulationsschnittstelle können Werte in der virtuellen Maschine gelesen und geschrieben werden. Durch das Lesen kann der Zustand von Komponenten der virtuellen Werkzeugmaschine bestimmt werden und mit dem Zustand in der Steuerung verglichen werden. Abfolgen wie „Setzen an der Steuerung und anschließendes Überprüfen an der Maschine“ dienen vornehmlich der Überprüfung des Gut-Falls, wie er z. B. im Pflichtenheft definiert wurde. Ein weitaus wichtigerer Bestandteil der VIBN ist es aber den Schlecht-Fall, sprich den Fall von auftretenden Fehlern und Störungen an der Maschine zu testen. Dazu besitzt die Simulationsschnittstelle die Möglichkeit, Werte des virtuellen Modells der Werkzeugmaschine zu beeinflussen – durch sogenanntes „Forcen“, bzw. „Erzwingen“, der Werte im Modell, beschrieben in [9]. Dieses dauerhafte Überschreiben funktioniert sowohl für Ein- und Ausgangssignale als auch für interne Zustandssignale des Modells. Somit kann beliebig oft während eines Testablaufs das Simulationsmodell der Werkzeugmaschine automatisiert beeinflusst und wieder in seinen Ursprungszustand gebracht werden.

Durch die Automatisierung des Zugriffs auf die drei Schnittstellen und die Wiederverwendung von angelegten Testabläufen wird es möglich, die VIBN schneller und fehlerfreier durchführen zu können. Zusätzlich hat der Tester am Ende des Testablaufs einen detaillierten Einblick in die getätigten Aktionen des Testframeworks durch das Protokoll.

12.7 Praxisanwendung

Aus den Überlegungen in den vorangegangenen Kapiteln ist für den industriellen Einsatz ein TAW für den automatisierten Test bei der VIBN entstanden. Als Basis wurde das bestehende Softwaretestwerkzeug *expecco* für den Einsatz bei der VIBN an Werkzeugmaschinen um Schnittstellen und Funktionen erweitert. Das entstandene TAW *ISG-dirigent* bietet damit die folgenden Funktionen:

- Grafische oder textuelle Erstellung von Tests
- Nutzen einer Bibliothek für den Test an von gängigen Steuerungssystemen
- Simultane Erstellung von Testprotokoll und (zertifizierungsfähigem) Testreport zur Testausführung

Gekoppelt mit der Simulationssoftware ISG-virtuos, konnte für einen Werkzeugmaschinenhersteller eine Umgebung für den automatisierten Ablauf und die automatisierte Auswertung seiner Tests aufgebaut werden. Die auf Wiederverwendung angelegten Bibliotheken von ISG-dirigent wurden dabei als besonders hilfreich empfunden. Abb. 12.6 zeigt einen laufenden Test an einem Bearbeitungszentrum im Rahmen der VIBN. Trotz vollautomatischen Ablaufs ist eine übersichtliche Betrachtung des Testablaufs an einem Laborarbeitsplatz weiterhin möglich. Dabei werden die virtuelle Werkzeugmaschine inklusive HMI (links) und der aktuell aktive Testbaustein (rechts) sichtbar.

In Abb. 12.7 wird ein abgeschlossener Testablauf in ISG-dirigent aufbereitet dargestellt. Während des Testablaufs ist ein Fehler aufgetreten, dieser wird gut sichtbar, bis in die oberste Hierarchieebene hinein, angezeigt.

Eine häufig eingesetzte Steuerung an Werkzeugmaschinen für die spanende Metallbearbeitung ist die SINUMERIK 840D sl von Siemens, an der stellvertretend im Folgenden der Umfang von ISG-dirigent gezeigt werden soll: Bereits das Basiswerkzeug *expecco* bringt eine Standard-Bibliothek zum Erstellen von automatischen Abläufen mit. So ermöglicht etwa die Qt-Bibliothek die Kommunikation der Testbausteine mit den Elementen der Bedienoberfläche der SINUMERIK 840D sl, während die VNC-Bibliothek (Virtual Network Computing) die Übertragung von Tastatureingaben an das Bedienfeld der SINUMERIK 840D sl erlaubt. Die SCP-Bibliothek (Secure Copy Protocol) wiederum ermöglicht die Übertragung von Dateien (etwa von NC-Programmen) von und zur SINUMERIK 840D sl.

Die spezifische Bibliothek für die Siemens SINUMERIK 840D sl ergänzt das Werkzeug zur vollen Funktionalität für die VIBN einer mit Sinumerik gesteuerten Maschine.

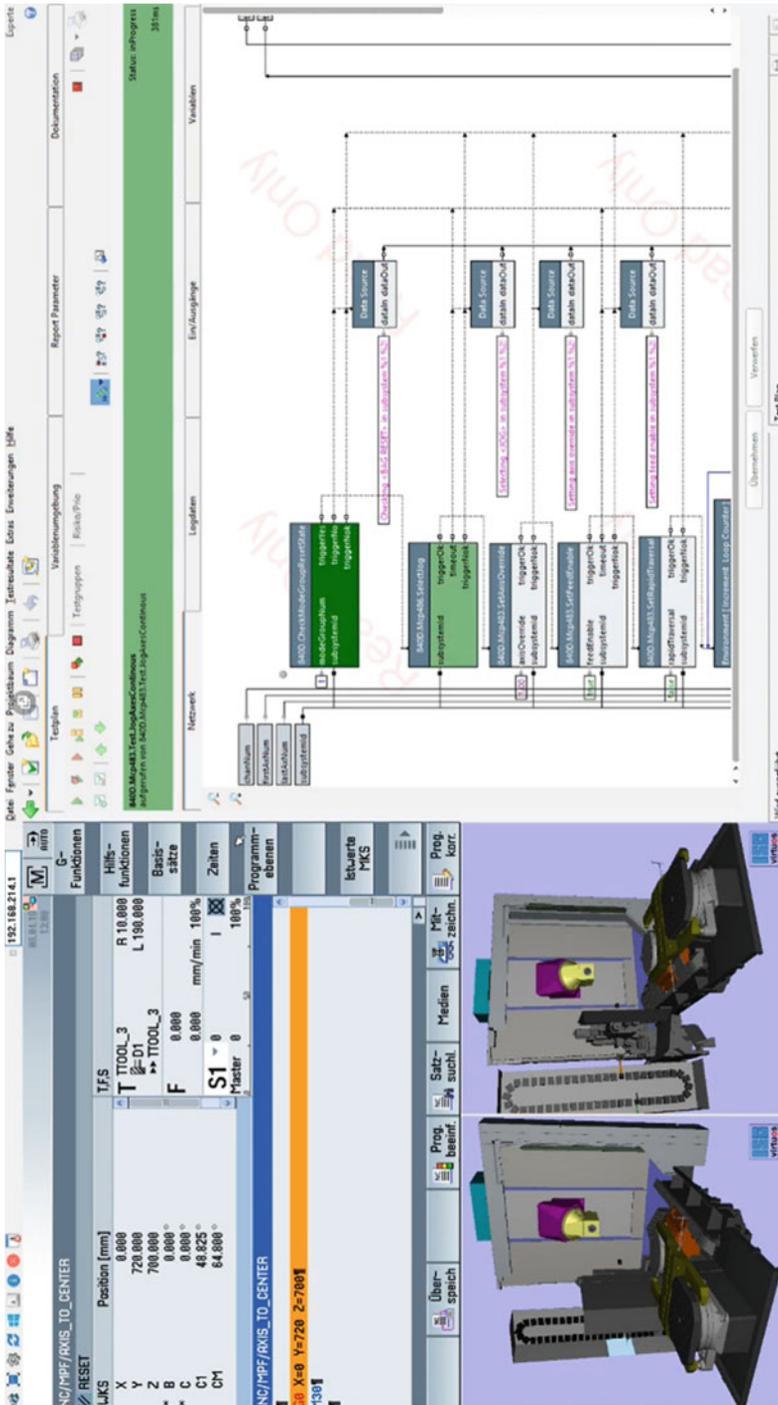


Abb. 12.6 Ansicht eines automatisiert ablaufenden Tests bei der Virtuellen Inbetriebnahme, rechts: ISG-dirigent, links oben: Siemens Sinumerik HMI, unten links: ISG-virtuos Simulationsumgebung mit virtuellem Bearbeitungszentrum

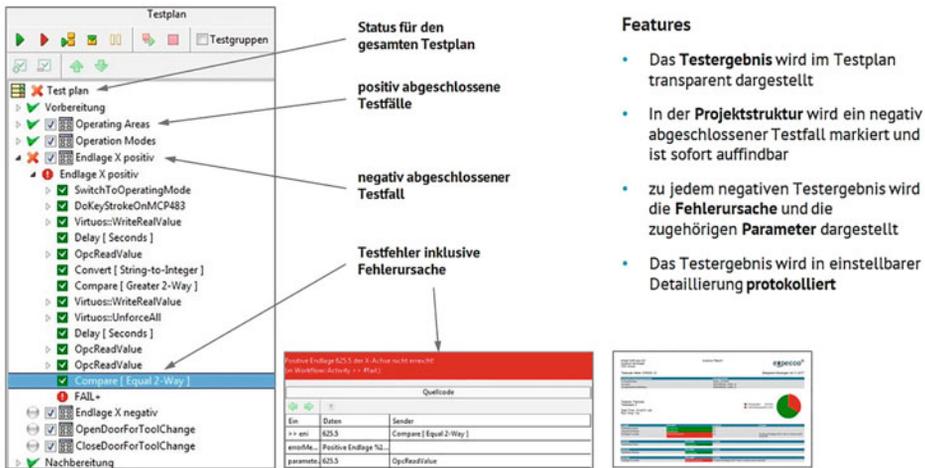


Abb. 12.7 Übersicht eines abgeschlossenen Tests in ISG-dirigent

Aufbauend auf den Bibliotheken OPC UA Client Interface und ISG-virtuos Client Interface zur Kommunikation mit der Steuerung beziehungsweise mit dem Simulationsmodell, ist diese Bibliothek in folgende Unterbereiche unterteilt, siehe Abb. 12.8:

- Die Bausteine der Gruppe *Bedienfeld* (OP 012 – Operators Panel) ermöglichen die nutzergerechte Interaktion der Testbausteine mit der Steuerung bezogen auf das Siemens-Bedienfeld.
- Die Bausteine der Gruppe *Maschinensteuertafel* (MCP483 – Machine Control Panel) ermöglichen die nutzergerechte Interaktion der Testbausteine mit der Steuerung bezogen auf die Siemens-Maschinensteuertafel.
- Die Bausteine der Gruppe *Maschinen- und Settingdaten* (Machine and Settings Data) ermöglichen den nutzergerechten Zugriff der Testbausteine auf diese Daten der Siemens Steuerung.
- Die Bausteine der Gruppen *Arithmetikparameter* (Arithmetic Parameters) und *Anwenderdaten* (User Data) ermöglichen den nutzergerechten Zugriff der Testbausteine auf diese Parameter der Siemens Steuerung.
- Und schließlich ermöglichen die Bausteine der Gruppe *SPS-Daten* (PLC Data) den nutzergerechten Zugriff der Testbausteine auf diese Daten der Siemens Steuerung.

Der Einstieg in die Testautomatisierung während der VIBN gelingt dann am schnellsten, wenn der Maschinenhersteller eine Systematisierung seiner Testabläufe vorgenommen hat. Dazu gehört die Definition der Testabläufe auf Basis einzelner Test-Schritte, die Erfassung der erwarteten Ergebnisse eines Testablaufs und die Erstellung eines Protokolltemplates. Danach kann mit der Identifizierung der Gleichteile zwischen Testabläufen

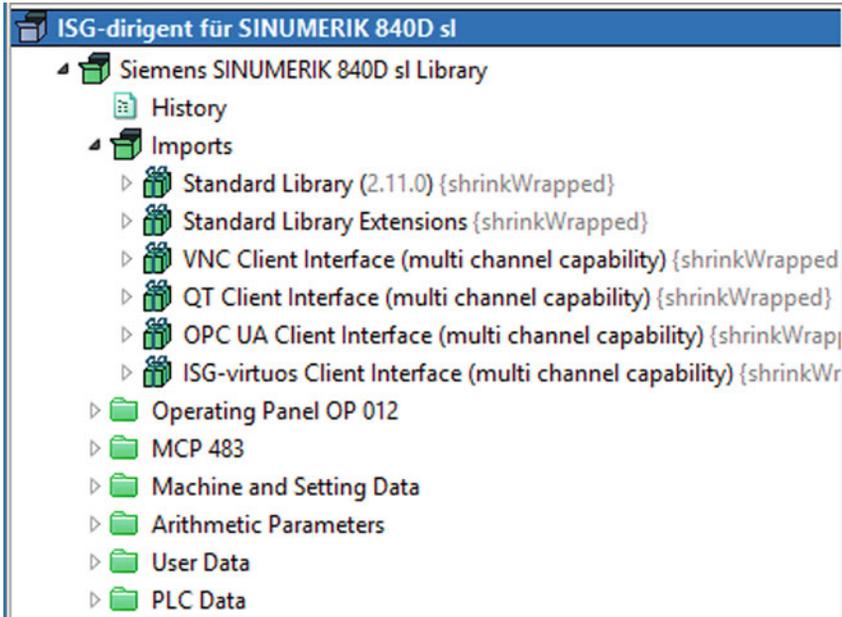


Abb. 12.8 Aus der Liste der geladenen Bibliotheken, die für den Testablauf zur Verfügung stehen, wählt der Benutzer Bausteine aus, die er für seinen Testablauf nutzen möchte

begonnen werden. So kann sukzessive eine Bibliothek an wiederverwendbaren Test-Schritten aufgebaut werden. Das Protokolltemplate dient zur schnellen Übersicht, wie ein Test verlaufen ist und wo eventuelle Fehler gefunden wurden.

Da mit dem TAW zumeist sehr komplexe Programme getestet werden, ist es hilfreich, wenn das Testframework parallele Abläufe, Verzweigungen und Schleifen im Testablauf zulässt, siehe Abb. 12.9.

In der Praxisanwendung hat es sich bewährt eine dynamische Entwicklung der Testabläufe zu nutzen. Das Basistestwerkzeug bietet in ISG-dirigent die Möglichkeit laufende Tests anzuhalten, zu modifiziert und fortzusetzen. Weiterhin können mit den Techniken **Haltepunkte definieren** und **schrittweise Ausführung** Tests selbst getestet und debuggt werden. Abb. 12.10 zeigt dazu einen an einem Haltepunkt gestoppten Test.

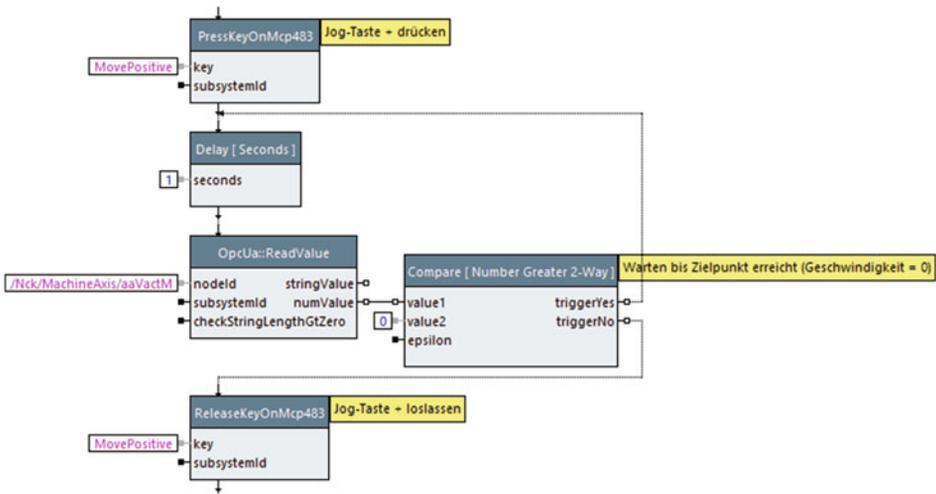


Abb. 12.9 Beispiel einer Schleife im Testablauf

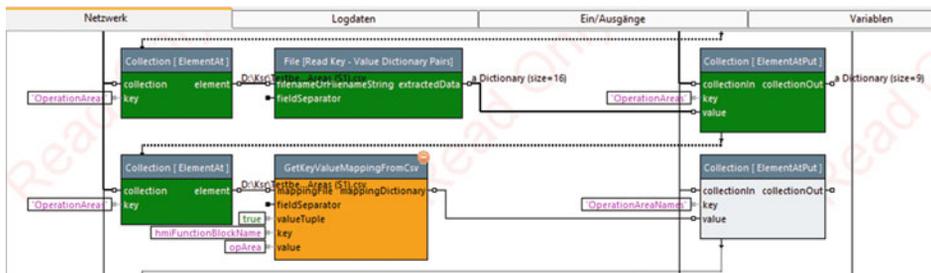


Abb. 12.10 Testablauf mit aktivem Haltepunkt, siehe Testbaustein in orange

12.8 Vorteile der Testautomatisierung für die Qualitätssicherung in der Entwicklung

Beim Einsatz eines Werkzeugs zur Testautomatisierung bei der VIBN entstehen die folgenden Vorteile:

- Sich häufig wiederholende Testabläufe werden aufwandsarm durchgeführt und können auch außerhalb normaler Arbeitszeiten stattfinden
- Durch ein häufigeres und umfangreicheres Testen steigen die Zuverlässigkeit und Robustheit der Steuerungsprogramme und damit auch der gesamten Maschine
- Die Abläufe und damit die Ergebnisse der Tests sind zuverlässig reproduzierbar
- Ein bestehendes Anforderungsmanagement im Unternehmen lässt sich mit der Testautomatisierung verknüpfen

Durch die Integration von Testautomatisierung in den Entwicklungs- und Inbetriebnahmeprozess von Werkzeugmaschinen lässt sich die primäre Arbeit bei der Qualitätssicherung auf die Erstellung der Tests eingrenzen. Zum anderen reduziert sich mit einem TAW der Zeitaufwand für das Testen, sodass Unternehmen viel eher bereit sind, Testautomatisierung als Standard einzuführen. Neben einer Zeitersparnis ermöglichen die automatisierten Tests frei gewordene Personalressourcen anderweitig einzusetzen. Weiterhin sind Dauertests kein Problem, sodass sporadisch auftretende Fehler häufiger entdeckt werden können. Der Kunde profitiert, da er mit weniger „Feuerwehreinsätzen“ direkt vor Ort rechnen muss, da der Hersteller der Maschine Fehler an den Steuerungsprogrammen vorab zuverlässiger beseitigen konnte.

12.9 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel zur Testautomatisierung wurde der aktuelle Stand der VIBN von Werkzeugmaschinen aufgezeigt. Aus diesem Stand der Technik wurde mithilfe von Fragebögen und Interviews, bei führenden Werkzeugmaschinenherstellern aus Deutschland, eine Auflistung an Problemen der VIBN erstellt. Aus den Problemen wurden im Folgenden ein Handlungsbedarf und eine passende Lösung erarbeitet. Der Fokus lag dabei auf der Verbesserung der Tests von Steuerungsprogrammen während der VIBN. Die Hersteller benötigen Unterstützung, um einen zeit-, personal-, und damit kostenreduzierten Test umzusetzen. Neben diesen drei Faktoren ist mit der erarbeiteten Lösung eine weit höhere Testabdeckung bei gleichem Aufwand möglich. Weiterhin werden Praktiken aus dem Testmanagement im Lösungskonzept unterstützt. Die Lösung sieht eine Automatisierung der Testfälle an einer HiLS vor. Dabei werden Gut- und Schlecht-Fall Tests mittels eines TAW durchgeführt. Das Testframework im TAW unterstützt den Tester beim Erstellen und Wiederverwenden von Testfällen, sowie durch Protokollierung und Auswertung während und nach dem Testablauf.

Die vorgestellte Lösung ist in Form der Bibliothekssammlung ISG-dirigent in Verbindung mit expeco kommerziell verfügbar und wird von Werkzeugmaschinenherstellern erfolgreich eingesetzt. Ausstehend ist die Herausforderung den automatisierten Test als neues „Werkzeug“ in den Entwicklungsprozess der Hersteller zu integrieren.

Literatur

1. Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI); Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE), VDI/VDE 3693 Blatt 2 Virtuelle Inbetriebnahme - Einführung der virtuellen Inbetriebnahme in Unternehmen, Berlin: Beuth Verlag, 2018.
2. Benington H (1987) Production of Large Computer Programs. ICSE '87 Proceedings of the 9th international conference on Software Engineering, S 299–310

3. Kaefer M (2016) Steuerungsarchitektur und Kommunikationstechnik. Vorlesung Steuerungstechnik II, Universität Stuttgart S. 67–76
4. Daniel C (2015) Virtuelle Komponenten verkürzen Inbetriebnahme. *MaschinenMarkt* 41:40–42
5. Pritschow G, Röck S (2004) Hardware in the loop. Simulation of machine tools. *CIRP Annals – Manufactur Technol* 53:295–298
6. Preiml H (2013) Erfahrungen mit der virtuellen Inbetriebnahme in der Anlagen-Projektierung. *MaschinenMarkt*, 19 07 2013. <http://www.virtual-reality-magazin.de/heitec-erfahrungen-mit-der-virtuellen-inbetriebnahme-der-anlagen-projektierung>. Zugegriffen: 10. Mai 2016
7. VDMA Software und Digitalisierung, Simulation und Visualisierung – Erste Ergebnisse der Trendumfrage 23 03 2017 https://sud.vdma.org/documents/15012668/20460216/Trend-Analyse-Simulation_Internet_1505303416307.pdf/9021347b-0670-4d6b-aaed-e1409d9e2d13. Zugegriffen: 3. Juli 2020
8. Willrett H (2007) Zwilling im Computer – Virtuelle Werkzeugmaschine: die Zukunft in der Arbeitsvorbereitung. *Industrieanzeiger* S. 28–31
9. VDI/VDE (2015) Virtuelle Inbetriebnahme – Modellarten und Glossar, VDI/VDE-Richtlinien 3693–1. Beuth, Berlin
10. Pritschow G (2006) Einführung in die Steuerungstechnik. Carl Hanser, Wien
11. Röck S (2007) Echtzeitsimulation von Produktionsanlagen mit realen Steuerungselementen. Jost-Jetter, Stuttgart
12. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA) (2020) Leitfaden Virtuelle Inbetriebnahme – Handlungsempfehlungen zum wirtschaftlichen Einstieg. VDMA Verlag, Frankfurt a. M.
13. ISO/IEC/IEEE (2013) Software and systems engineering—Software testing—ISO/IEC/IEEE 29119 Part 1: Concepts and definitions, Geneva; New York: ISO;IEC;IEEE
14. Kormann B, Vogel-Heuser B, Friedrich M (2012) Befragung deutscher Maschinenbauunternehmen zum Thema Softwaretest – Handlungsbedarf für den Maschinen-/Anlagenbau und Lösungsvorschlag. *Automation 2012 - 13*. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik, Baden-Baden

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Simulationsmodelle der Virtuellen Inbetriebnahme als Lernumgebung für Reinforcement Learning

13

Florian Jaensch und Alexander Verl

Zusammenfassung

Die steigenden Anforderungen der Produktionstechnik nach flexiblen und trotzdem wirtschaftlich effizienten Anlagen stellt die Automatisierungstechnik vor große Herausforderungen. Die Umstellung von beispielsweise einer Roboterzelle auf ein neues Produkt muss dabei schnell und aufwandsarm möglich sein. Die Steuerungssysteme, sowie die zugehörigen Engineering Methoden, müssen zunehmend intelligent und lernfähig werden, um möglichst viele der bisher manuellen Aufwände selbstständig zu übernehmen. Die Simulationsumgebung für eine Virtuelle Inbetriebnahme stellt eine geeignete Lernumgebung dar, in der das Steuerungssystem, mit Methoden des maschinellen Lernens, automatisch trainiert werden kann. Dafür müssen die Simulationswerkzeuge erweitert und möglichst standardisierte Schnittstellen geschaffen werden.

13.1 Vorteile und Grenzen der Virtuellen Inbetriebnahme

Über die letzten Jahrzehnte haben sich industrielle Prozesse und Produktionssysteme stetig weiterentwickelt. In vielen Produktbereichen steigt die Variantenvielfalt, sodass produzierende Unternehmen auch bei kleineren Losgrößen effizient sein müssen. Besonders für kleine und mittelständische Unternehmen steigen dabei die Herausforderungen, trotz kleiner Losgrößen automatisiert produzieren zu können. Zudem sind kleine Unternehmen

F. Jaensch · A. Verl (✉)

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW),

Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

E-Mail: alexander.verl@isw.uni-stuttgart.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Verl, S. Röck und C. Scheifele (Hrsg.),

Echtzeitsimulation in der Produktionsautomatisierung,

https://doi.org/10.1007/978-3-662-66217-5_13

213

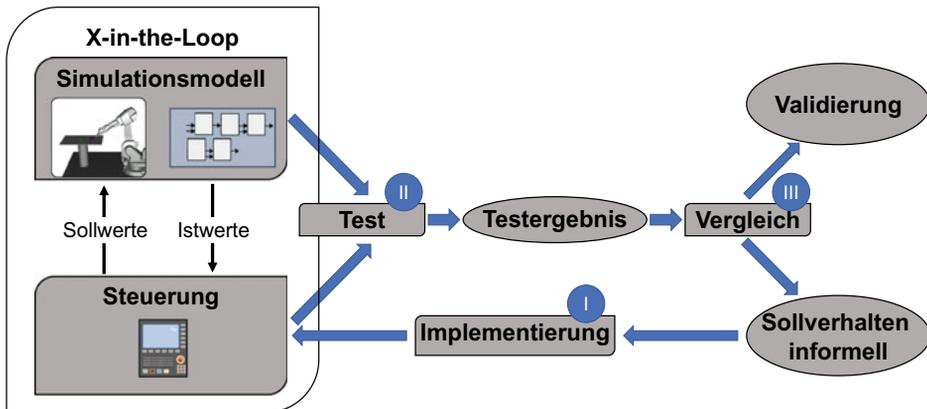
oftmals Teil einer größeren Wertschöpfungskette. Sie müssen dadurch schnell und unter hoher Termintreue reagieren können und ihr Produktionssystem auf eine neue Variante umstellen können.

Problematisch ist zumeist nicht die technische Realisierung einer Automatisierung von Produktionssystemen an sich, sondern diese mit wenig Entwicklungsaufwand zu erreichen. Besonders wichtig für kleine Losgrößen ist es, den Aufwand des Engineerings für alle an der Automatisierung beteiligten Systeme gering zu halten. Dabei hilft der zunehmende Trend zum Software-Defined-Manufacturing [1]. Funktionalitäten, welche früher spezielle Hardware benötigten, werden zunehmend in den Softwareanteil von Automatisierungssystemen verlagert. Für die dadurch steigenden Anforderungen an die Softwareentwicklung sind zudem computergestützte Werkzeuge entstanden. Ein wichtiges Werkzeug der Softwareentwickler im Bereich Produktionstechnik ist die Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) [2] mit ihren Simulationsmodellen des Produktionssystems.

Die Simulationsmodelle stehen früher zur Verfügung als ein realer Aufbau des Produktionssystems, welcher beim Kunden oder beim Hersteller in Betrieb genommen wird. Dem Steuerungsentwickler steht durch das simulierte Produktionssystem früher eine Testumgebung zur Verfügung. Dadurch kann die Steuerungsentwicklung zeitlich und räumlich verlagert werden, was den Arbeitsprozess des Steuerungsentwicklers erleichtert. Eine solche virtuelle Testumgebung wird als X-in-the-Loop System [3] (siehe Abb. 13.1 links) bezeichnet, in der ein Testobjekt X, hier das Steuerungssystem, mithilfe einer Feedbackschleife iterativ entwickelt und optimiert werden kann. Die Testumgebung verwendet dabei hauptsächlich die Steuerungssoftware oder Steuerungshardware für Integrations-, beziehungsweise Systemtests [4]. Das Vorgehen zur Entwicklung ist zumeist eine empirische Steuerungsentwicklung welche die Testumgebung als wichtige Komponente verwendet.

In Abb. 13.1 wird die empirische Vorgehensweise für die Steuerungsentwicklung schematisch dargestellt. Im ersten Schritt wird versucht, die informelle Anforderungsbeschreibung, also das Sollverhalten, durch ein implementiertes Steuerungsprogramm zu erreichen. Das Steuerungsprogramm soll in Kombination mit der XiL Simulation, welche die simulierte Steuerstrecke beinhaltet und die entsprechenden Eingangssignale benötigt, verarbeitet werden können. Das Steuerungsprogramm wird im zweiten Schritt, mit Hilfe von Tests in Form von Simulationen überprüft. Die Tests und Simulationen umfassen dabei mehr oder weniger systematische Entwürfe von Testszenarien von kritischen Aspekten und Situationen, welche idealerweise vorab definiert sind. Im dritten Schritt wird ein Vergleich zwischen dem durch die Steuerung erreichten Verhalten und dem Sollverhalten statt. Wird das Sollverhalten nicht erreicht muss erneut ab Schritt 1 die nächste Iteration mit einem angepassten Steuerungsprogramm durchgeführt werden [5]. Für komplexe Systeme werden zumeist viele abgetrennte Iterationsschleifen mit einzelnen Modul-, Integrations- und Systemtests durchgeführt.

Dieses iterative Vorgehen wird durch den Steuerungsentwickler vorangetrieben, welcher durch direktes Testen seines Entwicklungsschritts ein Feedback erhält und darauf



- I. **Implementierung:** Modellbeschreibung der gesteuerten Strecke und Programmierung einer Steuerung, welche die notwendigen Eingabesignale für die Strecke erzeugt.
- II. **Test:** Aufzeichnung des Verhaltens der Steuerung und der simulierten oder realen Strecke in verschiedenen Szenarien.
- III. **Vergleich:** Bewertung, ob die im Sollverhalten definierten Anforderungen erfüllt werden. Anderenfalls muss Modell oder Steuerungsentwurf geändert werden und das Verfahren mit Schritt 1 erneut begonnen werden.

Abb. 13.1 Schematische Vorgehensweise beim heuristischen Steuerungsentwurf in Anlehnung an [5] in Bezug zur X-in-the-Loop Simulation inklusive einer textuellen Beschreibung des heuristischen Steuerungsentwurfs

basierend den nächsten Entwicklungsschritt plant und umsetzt. Durch die frühere Verfügbarkeit des X-in-the-Loop Systems, kann die Steuerungsentwicklung zeitlich vorverlagert werden, basiert im Grundsatz jedoch weiterhin auf einer konventionellen Entwicklung ohne Simulationsmodelle.

Ein Ansatz welcher die Iterationen mithilfe der Simulation selbstständig durchführt und automatisiert eine Lösung entwickelt und vorschlägt, wäre eine deutliche Erleichterung für den Entwickler. Die VIBN kann dadurch von einem reinen Testsystem zu einem computergestütztem Werkzeug zur Steuerungsentwicklung werden.

13.2 Reinforcement Learning zur Unterstützung der Steuerungsentwicklung

Ein Ansatz welcher eine selbständige Iteration und Lösungsfindung am X-in-the-Loop System ermöglichen kann, ist Reinforcement Learning.

Reinforcement Learning steht für eine Klasse von Problemen, sowie für die Vielzahl von dazugehörigen Lösungsmethoden, die im Bereich des Maschinellen Lernens zur Verfügung stehen. Dabei interagiert ein lernfähiges Programm, ein sogenannter Agent, mit einer Umgebung (engl. Environment), die ihm dabei nicht zwingend bekannt sein muss.

Der Agent sieht die Umgebung über bestimmte Zustandsvariablen und kann über definierte Aktionen Einfluss auf die Umgebung ausüben. Der Agent lernt dabei laufend dazu und passt sich an, indem er für jede Iteration eine Belohnung oder Bestrafung als numerisches Feedback von der Umgebung erhält. Das Ziel des Agenten ist es, die Belohnung auf lange Sicht zu maximieren [6].

Reinforcement Learning hat bereits, in oftmals noch nicht-kommerziellen und nicht industriellen Bereichen, beeindruckende Ergebnisse erzielt. Bekannte Beispiele sind Spiele mit perfekter Information (sämtliche Informationen aller Spieler sind bekannt) wie Schach oder Go, oder auch Videospiele mit imperfekter Information (nicht alle Informationen sind bekannt), wobei in beiden Bereichen oftmals nach dem Lernen auch die fähigsten Menschen weit übertroffen werden konnten [7, 8]. Diese Beispiele haben meist bereits implementierte Punktesysteme oder Gewinnkriterien, weshalb sie sich für eine automatische Optimierung durch Belohnung sehr gut eignen.

Entscheidend für Reinforcement Learning ist die Lernumgebung innerhalb derer der Agent interagieren kann. Für Produktionssysteme (Maschinen, Anlagen und Roboter) scheidet das reale System aus, da der Agent während des Lernens unweigerlich Fehler machen muss. Diese Fehler sind zeit- und kostenintensiv und teilweise gefährlich für das Produktionssystem. Daher müssen simulierte Lernumgebungen für den Einsatz von Reinforcement Learning geschaffen werden. Ein Ansatz zur Schaffung von simulierten Lernumgebungen ist es bereits bestehende Simulationsumgebungen so zu erweitern, dass sie den Anforderungen des Reinforcement Learning gerecht werden.

13.3 Wandel der Testumgebung zur Lernumgebung

Der hier vorgestellte Lösungsansatz basiert auf der strukturellen Ähnlichkeit zwischen der X-in-the-Loop Simulation (XiLS) und Reinforcement Learning, welche in Abb. 13.2 nachvollzogen werden kann.

Der Lösungsansatz besteht darin, die Testumgebung so zu verändern, dass die XiLS vom Funktionsumfang in einer Weise erweitert wird, um als Lernumgebung verwendbar zu sein. Innerhalb dieser Lernumgebung kann ein sogenannter Agent trainiert werden. Dieser Agent ist dadurch in der Lage, geeignete Steuerungslösungen für produktionstechnische Problemstellungen zu lernen [9].

Der Agent ersetzt das Steuerungssystem in der XiLS-Struktur (vgl. Abb. 13.2). Die Kommunikation der Soll-/Istwerte zwischen den simulierten Komponenten und der Steuerung muss in die für Reinforcement Learning übliche Struktur mit Zuständen und Aktionen eingepasst werden. Als Ergänzung zu der XiLS-Struktur, muss eine spezifische Belohnungsfunktion integriert werden, um das Reinforcement Learning Problem vollständig zu definieren.

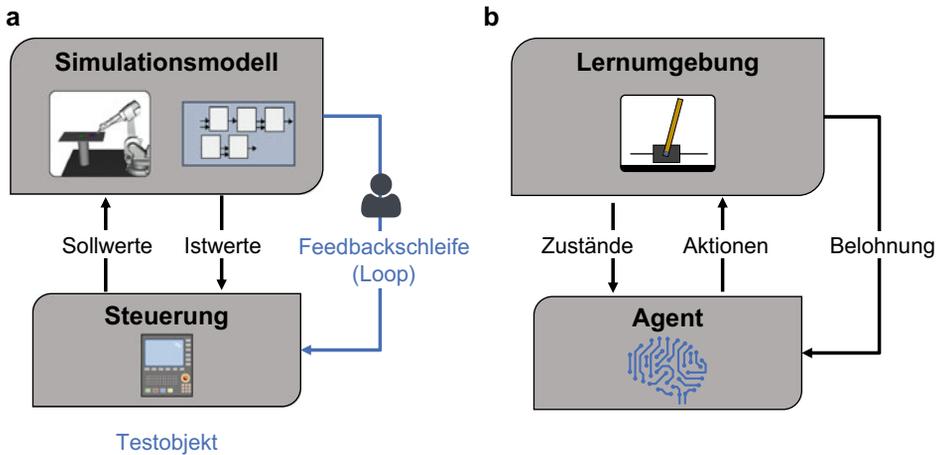


Abb. 13.2 Vergleich der Architektur von X-in-the-Loop Simulation (a) und Reinforcement Learning Ansatz (b) (Vgl. [9])

Auf Basis dieses Lösungsansatzes wurden bereits mehrere Anwendungsfälle untersucht und spezifische industriennahe Problemstellungen gelöst [10, 11]. Für jede Problemstellung wurde eine Lernumgebung innerhalb des VIBN-Werkzeugs ISG-virtuos entwickelt, welche mit einer speziellen Kommunikationsschnittstelle, zur Übertragung der anwendungsfallsspezifischen Aktor- und Sensorsignale an den Agenten, ausgestattet war.

Bei der erfolgreichen Übertragung von Reinforcement Learning Methoden in die Produktionstechnik kann auf existierende und aktuelle Ressourcen zurückgegriffen werden, die sich bereits in anderen Anwendungsbereichen bewährt haben. Der Anwender soll in die Lage versetzt werden die aktuellsten Methoden und Algorithmen an seinen Anwendungsfall koppeln zu können, ohne diese selbst zu entwickeln oder anzupassen. Wichtig dafür ist es, die Lernumgebung an bestehenden Standards zu orientieren. OpenAI, Google oder Microsoft liefern standardisierte Lernumgebungen für Lernalgorithmen. Das am weitesten verbreitete Toolkit kommt von OpenAI [12]. OpenAI Gym [13] bietet Open-Source Lernumgebungen für z. B. Videospiele, physikbasierte Simulationen und unteraktuierte Steuerungsprobleme. Durch den freien Zugang zu den einheitlich aufgebauten Lernumgebungen hat sich daraus ein De-Facto Standard entwickelt.

Dazu stellt OpenAI sogenannte Open-Source Baseline Algorithmen zur Verfügung, welche die wichtigsten Entwicklungen und Fortschritte der aktuellen Forschung beinhalten. Diese Baseline Algorithmen werden laufend verbessert und erweitert. Eine unabhängige Community stellt zum Beispiel Implementierungen dazu als Stable Baselines zur Verfügung. [14]

Den Anbietern fehlt aktuell jedoch eine produktionstechnische Simulationsumgebung oder eine geeignete Ankopplung der Toolkits an industrielle Problemstellungen. Ein Lösungsansatz dazu soll im Folgenden vorgestellt werden.

Für die Erfüllung des OpenAI Standards müssen bestimmte Funktionalitäten im VIBN-Werkzeug abgebildet werden. Es muss eine Schnittstelle für den Austausch von Signalen zwischen Agent und Simulation bestehen. Üblicherweise existieren bei VIBN-Werkzeugen Schnittstellen auf Feldbusebene, um die Kommunikation zwischen Steuerung und Simulation in gleicher Art und Weise wie zwischen Steuerung und realen Feldbuskomponenten sicherzustellen.

Innerhalb der Lernumgebung wurde statt einer Feldbus-Schnittstelle eine Remote-Schnittstelle gewählt, um weitere relevante Funktionalitäten, wie das Starten, Stoppen, Parametrieren und Zurücksetzen von Simulationen umsetzen zu können. Da die relevanten Reinforcement Toolkits wie auch OpenAI Gym in der Programmiersprache Python implementiert sind, wird diese Kommunikationsschnittstelle zunächst durch eine Wrapper-Klasse für Python umgesetzt. Über eine weitere Wrapper-Klasse erbt, die VIBN-Lernumgebung die Funktionen und die Struktur von OpenAI Gym, welche mittels der Kommunikationsschnittstelle überschrieben und konkretisiert werden. Die VIBN-Lernumgebung soll so möglichst automatisch aus dem Simulationsprojekt generierbar sein. Die VIBN-Lernumgebung beinhaltet auf diese Weise zwar nicht die eigentliche Simulation und die Modelle, kann jedoch über die Verlinkung und die Remote-Schnittstelle, die Modelle aufrufen und selbstständig starten. Die VIBN-Lernumgebung kann 1:1 wie ein Standard OpenAI Environment verwendbar gemacht werden (siehe Abb. 13.3). Dadurch können Standard-Lernalgorithmen, welche zu OpenAI Gym kompatibel sind, ohne Anpassung gekoppelt werden.

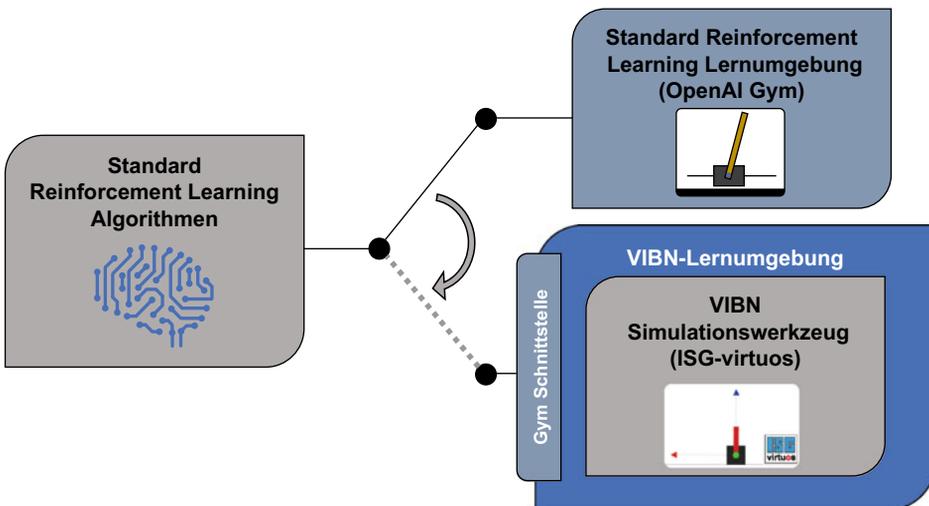


Abb. 13.3 Zielbild – ISG-virtuos ist als OpenAI Gym verwendbar, um Baselines Algorithmen ohne Anpassung verwenden zu können

13.4 Anwendungsbeispiel Roboter-Zellensteuerung

Im Anwendungsbeispiel wird eine Roboter-Zellensteuerung einer Fräs- und Handhabungszelle mithilfe von Reinforcement Learning gesucht und optimiert.

Je nach Problemstellung gibt es viele Interpretationen, wie die Systemgrenzen eines Robotersteuerungssystems definiert werden [15]. Für industrielle Roboter werden in der Regel alle Technologien, die zur Steuerung des Roboters benötigt werden, zusammengefasst als Steuerungssystem bezeichnet [16].

Das Steuerungssystem kann auf Basis einer hierarchischen funktionsbasierten Struktur beschrieben werden. Steuerungsfunktionen auf unterer Ebene sind für die Bewegungsausführung der einzelnen Achsen zuständig. Die Steuerungsfunktionen auf höherer Ebene beinhalten die logische Handlungsplanung zur Erfüllung spezifischer Aufgaben [15]. In industriellen Anwendungen sind die Bewegungssteuerung und die logische Steuerung in der Regel separate Einheiten, welche zumeist jedoch als kombiniertes Produkt *Robotersteuerung* bereitgestellt werden.

Das Lernen wird im Anwendungsbeispiel auf der Aufgabenebene durchgeführt. Die Bewegungssteuerung wird mithilfe eines industriellen numerischen Steuerungskerns (NC Kern) ausgeführt. Dafür wird der integrierte virtuelle NC Kern im VIBN-Werkzeug ISG-virtuos verwendet [17].

Die Lernumgebung ist damit eine Software-in-the-Loop Simulation eines kinematischen Robotermodells mit einer geeigneten NC-Steuerung zur Bahn- und Geschwindigkeitsplanung auf Basis von G-Code. Die Förderbänder und Werkstücke sind mithilfe von Materialflussmodellen realisiert. Zudem wird der Materialabtrag beim Fräsen simuliert. Die Lernumgebung ist in Abb. 13.4 dargestellt.

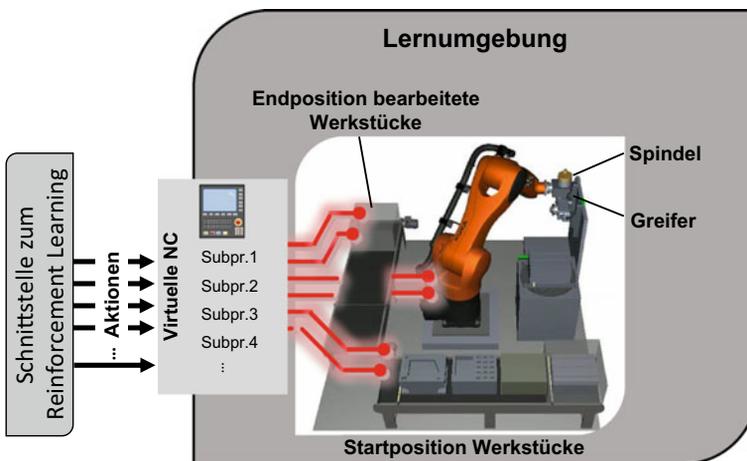


Abb. 13.4 Environment des Anwendungsbeispiels Roboter-Zellensteuerung

Anstatt durch theoretische Überlegungen und Vorarbeiten ein vereinfachtes Modell zu erstellen, das dem Agenten das Lernen so einfach wie möglich macht, soll in diesem Ansatz dem Anwender so wenig Arbeit wie möglich entstehen. Daher wird ein Zustandsraum geschaffen, der aus einer Dimension pro verwendeten Sensor besteht. Für jede mögliche Sensordatenkombination wird ein neuer Zustand erstellt. Es erfolgt keine Priorisierung oder Generalisierung der Sensordaten. Im beschriebenen Anwendungsfall sind die Zustandssensoren alle einfach zu diskretisieren (z. B. Lichtschranken). Ausnahmen bilden die Endzustände, welche als feste Zustände implementiert sind und die die Umgebung zurücksetzen und den nächsten Durchlauf starten. Es ergeben sich insgesamt über 3500 mögliche Zustands-Aktions-Kombinationen für den Agenten. Zum Erfolgreichen Lösen der Aufgabe muss daraus eine Sequenz von 18 korrekt hintereinander ausgeführten Aktionen gefunden werden.

Abb. 13.5 zeigt den Lernfortschritt als Verhältnis der Gesamtzahl von positiven zu negativen Belohnungen während eines Durchlaufes. Die Kurve zeigt somit die Gesamt-Performance des Agenten bis zu einem bestimmten Zeitpunkt (Anzahl durchlaufener Episoden) und nicht die aktuelle Performance zu einem bestimmten Zeitpunkt. In der Abbildung kann die stetig steigende Performance des Agenten und somit das Lernen nachvollzogen werden. Der Absolutwert des Verhältnisses von positiven zu negativen Belohnungen ist auf einem niedrigen Niveau, weil über den gesamten Lerndurchlauf nicht immer die beste Aktion ausgewählt wird, sondern auch zufällige Aktionen ausprobiert werden. Dazu kommt, dass es über die 18 Aktionen die der Agent machen muss viele Möglichkeiten für negative Belohnungen und nur eine einzige Möglichkeit am Ende für eine positive Belohnung gibt.

Nach einer ausreichenden Anzahl von Aktionen konnte für dieses Anwendungsbeispiel in mehreren Versuchen immer eine optimale Strategie gefunden werden. Abhängig von den Umgebungsbedingungen (das heißt der Förderbandgeschwindigkeit, die zu Kollisionen innerhalb des Prozesses führt) gibt es verschiedene optimale Strategien, die jeweils gefunden wurden. Abb. 13.6 zeigt das Ergebnis eines erfolgreichen Lerndurchlaufs anhand von beispielhaften Einzelbildern, welche sich jeweils zu den Aktionen der gefundenen Sequenz zuordnen lassen.

Detailliertere Beschreibungen der Lernumgebung (Zustandsraum, Aktionsraum und Belohnung) sowie des Lernansatzes und der Ergebnisse können in [10] nachvollzogen werden.

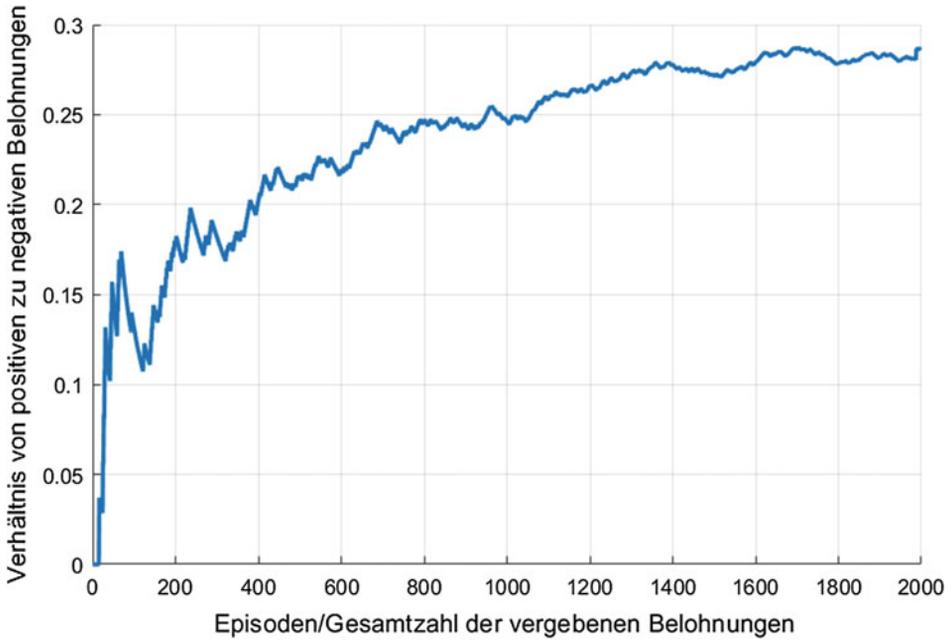


Abb. 13.5 Lernfortschritt dargestellt als Verlauf des Verhältnisses zwischen positiven und negativen Belohnungen

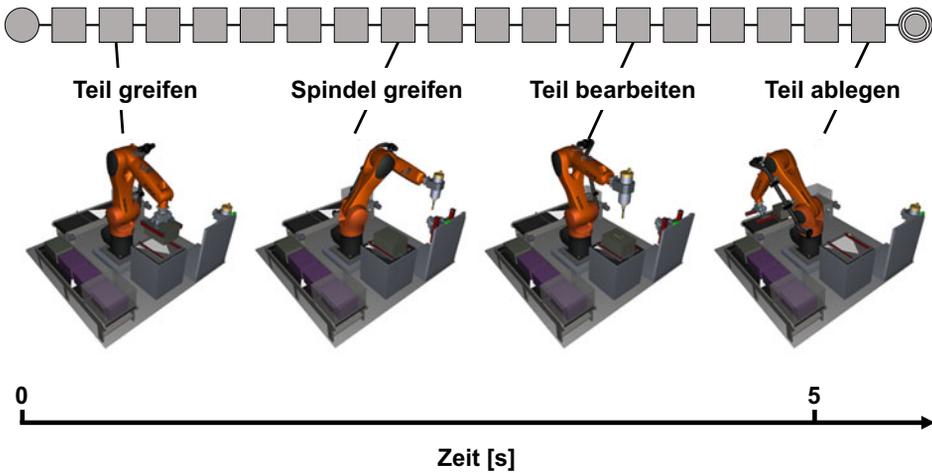


Abb. 13.6 Darstellung der Ergebnisse des Lernvorgangs zur Roboter-Zellensteuerung anhand von Einzelbildern eines Simulationsdurchlaufes welche Teile der korrekten Sequenzen an Aktionen darstellen

13.5 Anwendungsbeispiel Roboter-Kabelhandhabung

Zur Validierung der beschriebenen VIBN-Lernumgebung nach OpenAI-Standard ist eine Roboter-Kabelhandhabungsaufgabe untersucht worden, bei der ein Kabel in einer bestimmten Pose automatisiert auf einen Tisch gelegt werden soll. Die Anwendung Kabelhandhabung ist für den vorgestellten Ansatz aufgrund der Potenziale und dem bisherigen Fehlen von Lösungen besonders interessant.

In der Automobilbranche wird die Verkabelung oder die Montage von Schläuchen und Dichtungen weitestgehend manuell durchgeführt. Kabelbäume haben grundsätzlich einen großen Einfluss auf die Qualität und Kosten eines PKWs [18]. In einer Studie von 2012 zur Untersuchung der körperlichen Belastung bei der Endmontage von Kabelbäumen stellte sich heraus, dass weniger als 5 % der Montageschritte automatisiert waren [19]. Das Einsparpotential bei einer Automatisierung wird noch deutlicher unterstrichen, wenn berücksichtigt wird, dass circa 750 verschiedene Kabel mit einer Gesamtlänge von ca. 1,5 km in einem Mittelklasse-PKW verbaut sind [18].

Trotz der Potenziale existieren kaum industrielle Anwendungen, da der Schwierigkeitsgrad der Automatisierung bisher eine zu große Hürde darstellt. Im Gegensatz zur Roboter-Handhabung von starren Objekten, bei denen hauptsächlich Position und Orientierung des Manipulators (und damit auch des Werkstücks) berücksichtigt werden müssen, spielt bei flexiblen Objekten zusätzlich die aktuelle Deformation des Werkstücks eine große Rolle. Daher reichen nicht die 6 üblichen Freiheitsgrade (DoF) zur Handhabung eines Objekts, sondern es müssen prinzipiell unendlich viele DoFs berücksichtigt werden. Wenn das flexible Objekt manipuliert, also zum Beispiel in eine definierte Pose gebracht werden soll, handelt es sich folglich um ein unteraktuiertes System. Von der Pose des Manipulators können dadurch nur indirekt Schlüsse auf den Zustand des zu handhabenden Objektes gezogen werden. Das zu handhabende Objekt kann bei gleicher Roboterpose mit der Umgebung kollidieren oder kollisionsfrei sein, abhängig vom Pfad, auf dem der Roboter zu dieser Pose kam. Die Planung einer Trajektorie kann somit nur zeitabhängig und abhängig vom aktuellen Zustand erfolgen, wobei dieser Zustand und die weitere Planung sehr komplex zu bestimmen bzw. zu berechnen ist [20].

Insbesondere wenn keine Spezialmaschinen, sondern flexible Automatisierungslösungen auf Basis von Industrierobotern verwendet werden, treten die Schwierigkeiten bei der Beeinflussung des Objektverhaltens verstärkt auf. Aufgabenstellungen, welche ein Mensch durch seine, auf Erfahrung und Lernen basierten sensomotorischen und kognitiven Fähigkeiten relativ einfach lösen kann, sind für Roboter bisher eine sehr große Herausforderung. Auch für Menschen relativ einfach anmutende Aufgaben, wie ein Kabel zu greifen, sicher durch den Arbeitsraum zu befördern und in einem definierten Bereich sauber abzulegen, sind mit einem Roboter nur schwer umsetzbar. Die Übertragung des menschlichen Erfahrungsschatzes und deren Fähigkeiten auf Robotersysteme, sind mithilfe der gängigen Roboterprogrammiermethoden und -Schnittstellen bislang ebenfalls nicht möglich.

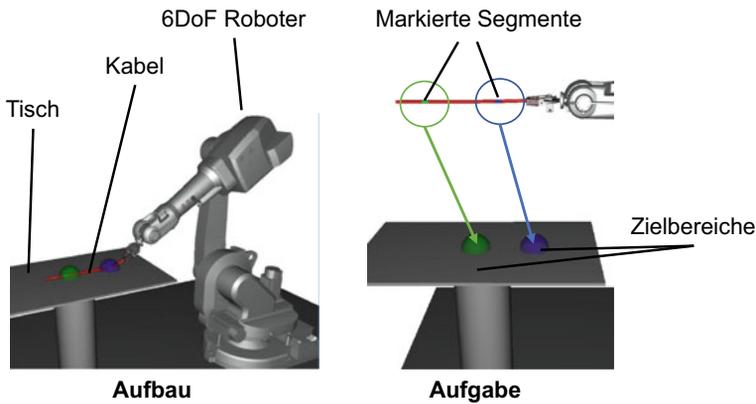


Abb. 13.7 Anwendungsfall Roboter-Kabelhandhabung: Die markierten Segmente sollen in der über die Zielbereiche definierten Pose abgelegt werden

Der Anwendungsfall Roboter-Kabelhandhabung (vgl. [11]) ist in Abb. 13.7 dargestellt. Das Kabel wird zunächst horizontal im freien Raum positioniert, ist vom Roboter gegriffen und schwingt aufgrund der Schwerkraft nach unten. Der Roboter, beziehungsweise der Reinforcement Learning Algorithmus, soll das Kabel stabilisieren und kontrolliert auf dem Tisch platzieren, sodass die markierten Segmente wie abgebildet im Zielbereich liegen (siehe Abb. 13.7 rechts). Die Lernumgebung besteht aus einem 6-Achs-Roboterkinematikmodell in ISG-virtuos gekoppelt mit einer Mehrkörper-Kabelsimulation in der Physik-Engine AGX Dynamics. Die beiden Simulationswerkzeuge sind über den Functional Mock-up Interface Standard gekoppelt [21]. Die Lernumgebung wird durch einen kontinuierlichen Zustandsraum (Position und Geschwindigkeit des letzten Kabelsegments) und einen diskreten Aktionsraum (3 Achsen mit inkrementaler Achsbewegung) aufgebaut. Der Roboter wird für diesen Anwendungsfall auf 3 seiner 6 Achsen begrenzt. Der Lernansatz ist episodisch. Der Agent hat pro Episode 7s Zeit, um das Kabel im Zielgebiet zu stabilisieren, falls keine Kollision die Episode vorzeitig abbricht. Entscheidend für einen erfolgreichen industriellen Einsatz ist eine sinnvolle Belohnungsfunktion und eine Möglichkeit, diese zu implementieren. Für diesen Anwendungsfall sind 3 verschiedene Belohnungsfunktionen integriert, welche in verschiedenen Kombinationen untersucht werden:

- **Mittlerer quadratischer Positionsfehler (MQF):** Positionsfehler zwischen den markierten Segmenten und den Zielbereichen (in Abb. 13.7 als Pfeile dargestellt). Der Positionsfehler geht negativ in die Belohnungsfunktion ein (Bestrafung). Die Bestrafung (negative Belohnung) ist umso kleiner, je näher das Segment an einem Zielbereich liegt.

- **Kollisionsfehler:** Wenn der Roboter mit dem Tisch kollidiert (Kollisionsfehler), erfolgt eine negative Belohnung, die auch die Episode zurücksetzt. Für die negative Belohnung wird ein vorher definierter skalarer Wert gewählt, der sich an einer aufsummierten MQF-Belohnung einer schlechten Episode orientiert. Eine zu klein gewählte Bestrafung könnte zu einem lokalen Maximum führen, wenn der Roboter sehr früh in der Episode kollidiert und daher weniger negative MQF-Belohnung für die Episode erhält.
- **Position erreicht:** Wenn das Zielsegment innerhalb eines bestimmten Zielgebiets liegt (in Abb. 13.7 als Halbkugel visualisiert), erfolgt eine positive Belohnung. Diese Belohnung wird erst ausgelöst, wenn die Aufgabe zumindest teilweise erfolgreich ausgeführt ist, also ein Segment den Zielbereich erreicht hat. Beim Reinforcement Learning spricht man hierbei von einem Sparse Reward Problem, da die Belohnungsfunktion in den meisten Bereichen null ist und nur für sehr wenige Zustände einen positiven Wert liefert. Auf Grund der verzögerten Rückmeldung in Form der Belohnung ist diese Art insbesondere für Probleme interessant, bei denen keine Echtzeit-Informationen über die Position der markierten Segmente des Kabels vorliegen.

Der verwendete Lernalgorithmus ist ein DeepQ-Learning-Algorithmus, mit einem DeepQ Netz (DQN) von Stable Baselines, mit verschiedenen Erweiterungen, die das Lernen beschleunigen und stabiler machen [8, 22, 23, 24].

Die eingesetzte Policy ist eine Multilayer Perceptron (MLP) Policy, was bedeutet, dass die interne Bewertungsfunktion des Agenten durch ein mehrschichtiges künstliches Neuronales Netz [14] approximiert wird. Das MLP ist für diesen Anwendungsfall mit zwei versteckten Schichten ausgeführt, die jeweils 64 Neuronen enthalten.

Die Simulation läuft nicht in einem Echtzeittakt. Der Agent kann die Simulation in 10 ms Taktschritten schrittweise takten. Da keine spezialisierte Simulations- und Machine Learning Hardware mit leistungsfähiger GPU verwendet wird, sind die Taktschritte nicht schneller als Echtzeit. Durch die Physiksimulation und das online Trainieren des Neuronalen Netzes kann die getaktete Simulation zumindest circa im Bereich der Realzeit durchgeführt werden.

Ein wichtiges Ergebnis für die Validierung ist, dass der Reinforcement Learning Algorithmus mit der VIBN-Lernumgebung Lösungen für diese Kabelhandling-Aufgabe finden konnte. In Abb. 13.8 ist eine Lösung nach etwa 20 000 Simulations- und Trainingsschritten des Agenten anhand von Einzelbildern visualisiert, die über eine Episode gespeichert wurden. Das Kabel wird so auf dem Tisch abgelegt, dass durch Reibung die Pendelenergie abgebaut wird. Danach wird das Kabel langsam nach hinten in die Zielposition gezogen.

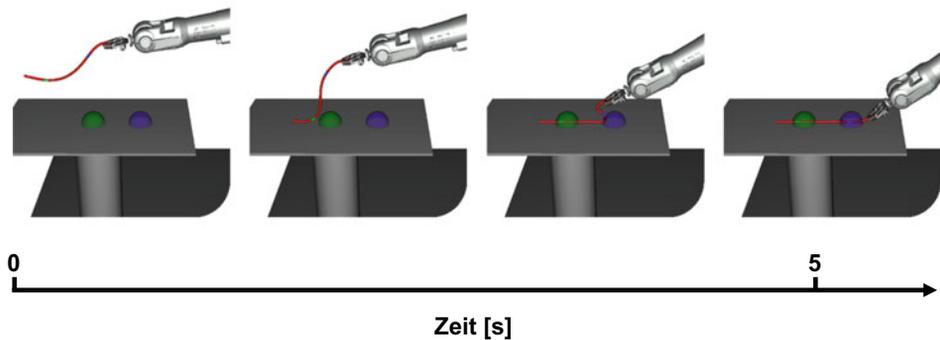


Abb. 13.8 Darstellung der Ergebnisse des Lernvorgangs zur Roboter-Kabelhandhabung anhand von Einzelbildern eines Simulationsdurchlaufes

13.6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Ansatz zur Verwendung von VIBN-Simulationsmodellen als Lernumgebung für selbstlernende und selbstoptimierende Steuerungssysteme aufgezeigt. Dabei wurde erläutert wie die VIBN, ursprünglich als Testumgebung entwickelt, in eine Lernumgebung überführt werden kann. Des Weiteren wurde der Ansatz anhand von zwei Anwendungsbeispielen, mit unterschiedlichen Problemstellungen für Robotersteuerungen, näher betrachtet und validiert.

Eine solche Lernumgebung, eingebettet in ein industrietaugliches Werkzeug, kann in der Zukunft einen wichtigen Beitrag zur Zeit- und Kosteneinsparung für komplexe Automatisierungslösungen liefern. Zudem kann ein solcher Ansatz ein Schritt in Richtung des Digitalen Zwillings nach Kritzinger et al. [25] sein, welcher als steuerndes, simulatives und optimierendes Abbild der realen Anlage viele Mehrwerte bietet.

Literatur

1. Lechler A, Verl A Software Defined Manufacturing Extends Cloud-Based Control. Bd. 3: Manufacturing Equipment
2. VDI/VDE 3693 – Blatt 2 – Virtuelle Inbetriebnahme: Einführung der virtuellen Inbetriebnahme in Unternehmen, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2018
3. Schröter J (2013) Das erweiterte X-in-the-Loop-Framework zur durchgängigen Integration von Optimierungsverfahren in den Produktentwicklungsprozess am Beispiel der Entwicklung energieeffizienter Fahrzeuge. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe
4. VDI/VDE 3693 – Blatt 1 – Virtuelle Inbetriebnahme: Modellarten und Glossar, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2016
5. Abel D, Bollig A (2006) Rapid control prototyping: Methoden und Anwendungen; mit 16 Tabellen. Springer, Heidelberg

6. Sutton RS, Barto A (2018) Reinforcement learning: An introduction. The MIT Press, Cambridge
7. Silver D et al (2017) Mastering the game of Go without human knowledge. *Nature* 550(7676):354–359. <https://doi.org/10.1038/nature24270>
8. Mnih V et al (2013) Playing Atari with Deep Reinforcement Learning. <http://arxiv.org/pdf/1312.5602v1>
9. Jaensch F, Csiszar A, Kienzlen A, Verl A (2018) Reinforcement learning of material flow control logic using hardware-in-the-loop simulation, First International Conference on Artificial Intelligence for Industries (AI4I), Laguna Hills, USA, S 77–80
10. Jaensch F, Csiszar A, Sarbandi J, Verl A (2019) Reinforcement learning of a robot cell control logic using a software-in-the-loop simulation as environment, Second International Conference on Artificial Intelligence for Industries (AI4I), Laguna Hills, USA, S 79–84
11. Jaensch F, Verl A (2020) Virtual commissioning simulation as reinforcement learning environment for robot cable handling, Third International Conference on Artificial Intelligence for Industries (AI4I), Irvine, USA, S 27–31
12. Sewak M (2019) Deep reinforcement learning: Frontiers of artificial intelligence, 1st Aufl.
13. Brockman G et al (2016) OpenAI gym. <http://arxiv.org/pdf/1606.01540v1>
14. Hill A et al. Stable baselines: GitHub, GitHub repository
15. Grimbale MJ, Johnson MA, Siciliano B, Sciacivico L, Villani L, Oriolo G (2009) Robotics. Springer, London
16. Brogårdh T (2009) Robot control overview: An industrial perspective. *MIC* 30(3):167–180. <https://doi.org/10.4173/mic.2009.3.7>
17. Scheifele C, Verl A, Riedel O (2018) Echtzeit-Co-Simulation für die Virtuelle Inbetriebnahme. *atp* 60(11–12):44. <https://doi.org/10.17560/atp.v60i11-12.2361>
18. Reif K (2011) Bosch Autoelektrik und Autoelektronik: Bordnetze, Sensoren und elektronische Systeme; mit 43 Tab, 6. Aufl. Vieweg+Teubner Verlag/Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden
19. Enríquez JA, Díaz J, Weichel, Frieling E (2012) Analyse körperlicher Belastung beim Einbau des Kabelbaums in das Fahrzeug und Empfehlung zur Belastungsreduktion — eine Felduntersuchung in einem Werk der deutschen Automobilindustrie. *Z Arb Wiss* 66(1):13–24. <https://doi.org/10.1007/BF03373857>
20. Hinze C, Wnuk M, Lechler A, Verl A (2019) Harte Echtzeit für weiche Materialien. *atp* 61(11–12):112–119
21. Blockwitz T et al (2012) Functional mockup interface 2.0: The standard for tool independent exchange of simulation models. In Proceedings of the 9th International MODELICA Conference, September 3–5, 2012, Munich, Germany, S 173–184
22. Schaul T, Quan J, Antonoglou I, Silver D (2015) Prioritized experience replay. <http://arxiv.org/pdf/1511.05952v4>
23. van Hasselt H, Guez A, Silver D (2015) Deep reinforcement learning with double Q-learning. <http://arxiv.org/pdf/1509.06461v3>
24. Wang Z, Schaul T, Hessel M, van Hasselt H, Lanctot M, Freitas N (2015) Dueling network architectures for deep reinforcement learning. <http://arxiv.org/pdf/1511.06581v3>
25. Kritzinger W, Karner M, Traar G, Henjes J, Sihn W (2018) Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine* 51(11):1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Konzept für die automatisierte Planung von Montagesystemen

14

Daniella Brovkina und Oliver Riedel

Zusammenfassung

Die Digitalisierung und die Ideen von Industrie 4.0 treiben die Produktionssysteme voran. Die Virtuelle Inbetriebnahme ist bereits in der Engineering-Phase der Produktionsanlage eine etablierte Methode. Solche eng mit der Virtuellen Inbetriebnahme gekoppelten Methoden wie Model-in-the-Loop (MiL) und Software-in-the-Loop (SiL) Simulationen können bereits in der Planungsphase als Validierungswerkzeug den Planungsprozess unterstützen. Im Falle von Montagesystemen erfolgt die Planung in Iterationen mit geringem Automatisierungsgrad. In diesem Beitrag wird ein Konzept für einen modellbasierten Ansatz zur vollautomatisierten Planung von Montagesystemen vorgestellt, das eine automatisierte Layout-Generierung in Kombination mit Simulationsmodellen zur Virtuellen Inbetriebnahme ermöglicht.

14.1 Einleitung

Die Digitalisierung transformiert schrittweise die moderne Produktion und führt kontinuierlich zu erheblichen strukturellen Veränderungen, die sich nicht nur in der Betriebsphase einer Fabrik ausprägen, sondern auch in der Entwicklungsphase. Entwicklungsschritte, die

D. Brovkina

Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME), Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

O. Riedel (✉)

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

E-Mail: oliver.riedel@isw.uni-stuttgart.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Verl, S. Röck und C. Scheifele (Hrsg.),

Echtzeitsimulation in der Produktionsautomatisierung,

https://doi.org/10.1007/978-3-662-66217-5_14

229

früher ausschließlich manuell durchgeführt wurden, erfolgen heutzutage über Softwarelösungen mithilfe digitaler Modelle. Im Kontext von Montagesystemen sind diese trotz aller technologischen Fortschritte in der Entwicklung und Auslegung sowie der Digitalisierung von Produktionsprozessen noch weit von den Vorstellungen der vierten industriellen Revolution entfernt.

Die primäre Anwendung von Montagesystemen befindet sich in der Massenproduktion, welche eine geringe Produktvielfalt erfordert. Die hohe Individualisierung von Produkten stellt jedoch einen der relevanten Trends dar, der mit dem Paradigma Industrie 4.0 einhergeht [1]. Dies repräsentiert nicht nur einen der ausschlaggebenden Aspekte von Industrie 4.0, sondern resultiert ebenfalls in einer Herausforderung für die Produktionsplanung und -steuerung. Mit der steigenden Großserienproduktion von individualisierten Produkten müssen auch die Montagesysteme zunehmend flexibler werden. Um dieser Forderung der Flexibilität nachzukommen, bedarf es einem Assistenzsystem zur Entscheidungsfindung bei der Montage und Planung. In diesem Kontext ist ein Assistenzsystem ein digitales Werkzeug, das einen Ingenieur während der Systementwicklung unterstützt. Das Assistenzsystem kann manuell sein und nur eine grafische Oberfläche (GUI) für die Entwicklungswerkzeuge bieten, oder es kann automatisiert sein und dem Ingenieur Schritte abnehmen und Informationen für die Entscheidungsfindung bereitstellen. Ein vollautomatisiertes Assistenzsystem zur Entscheidungsfindung als Komponente der computergestützten Produktionsplanung stellt einen der fehlenden Bausteine für eine kosteneffiziente Prozesskette zur individuellen Produktgestaltung dar. Allerdings bleibt eine allgemein anwendbare und automatisierte Entscheidungsunterstützung derzeit eine ungelöste Herausforderung, denn bislang kommen nur Teillösungen in sehr begrenzten Anwendungsfällen zum Einsatz [2, 3].

Model-Based Systems Engineering (MBSE) gilt als vielversprechender Lösungsansatz für dieses Problem. MBSE nutzt die iterative Kombination interdisziplinärer Aktivitäten, um ein zentrales Modell des Zielsystems zu entwickeln. Der Einsatz von umfassenden Modellen und Simulationen für Montagesysteme unter Berücksichtigung ihrer Produkthanforderungen kann eine Lösung für die automatisierte Planung bieten.

In diesem Beitrag wird ein Konzept zur automatisierten Entwicklung, Planung und Validierung von Montagesystemen unter Verwendung eines MBSE-Ansatzes vorgestellt. Das Konzept befasst sich mit der automatisierten Erkennung von Auslegungsvarianten auf Basis der Produkt-, Prozess- und Ressourcenbeschreibung. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Ressourcenauswahl und der Validierung der Implementierung des Montageprozesses. Dazu wird im Folgenden ein Überblick über die Grundlagen und den Stand der Technik gegeben, auf dessen Basis ein Konzept definiert wird.

14.2 Grundlagen

Die Montage kann in der industriellen Fertigung als die Gesamtheit aller Vorgänge für den Zusammenbau von unterschiedlichen Komponenten mit geometrisch bestimmter Form zu einem Produkt definiert werden [4]. Mit zunehmender Individualisierung der Produkte wird der Komplexitätsgrad der Produkte stark beeinflusst. Der Komplexitätsgrad umfasst die statischen und dynamischen Produkteigenschaften und die Vielzahl der Beziehungen zwischen diesen einzelnen Eigenschaften [5]. Im Kontext der Montage sind dies nicht nur Eigenschaften der Produktkomponente (z. B. deren Form oder Material), sondern auch die Art der Verbindung zwischen Komponenten und die Art der Montageprozesse. Auf diese Weise lässt sich bei zunehmender Individualität der Produkte nicht nur eine Zunahme in der Montagekomplexität beobachten, sondern die ausgeführten Prozesse sowie die benötigten Ressourcen weisen ebenfalls einen stetig steigenden Komplexitätstrend auf, was den allgemeinen Komplexitätsgrad bei der Montageplanung erhöht. Für die Hersteller von Montagesystemen stellt es eine Herausforderung dar, hoch individualisierte Produkte mit einer bestehenden Maschinenkonfiguration oder mit minimalem Umrüstungsaufwand herstellen zu können. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, kommen häufig Mixed-Model-Montagesysteme zum Einsatz. Mixed-Model-Montagesysteme erlauben es, mehrere Produktmodelle ohne oder mit minimaler Rekonfiguration des Montagesystems zu bauen. Diese Systeme sind jedoch hochkomplex und erfordern einen hohen Aufwand bei der Planung und Konstruktion.

Das Systems Engineering (SE) bildet eine etablierte Methode für den Entwurf und die Entwicklung von solchen komplexen Systemen. Systems Engineering integriert alle Disziplinen, die zur Systementwicklung gehören, zu einem strukturierten Entwicklungsprozess und berücksichtigt sowohl die wirtschaftlichen als auch die technischen Aspekte [6]. Es konzentriert sich auf die Definition der Kundenbedürfnisse und der erforderlichen Funktionalität zu einem frühen Zeitpunkt im Entwicklungszyklus, die Dokumentation der Anforderungen und die anschließende Durchführung der Designsynthese sowie der abschließenden Systemvalidierung. Das Ziel des Production Systems Engineering (PSE) Ansatzes ist es, automatisierte Produktionssysteme zu erstellen. Mit dem aktuellen Digitalisierungstrend und der Vision von Industrie 4.0 etabliert sich der Ansatz des MBSE für das Production Systems Engineering, der auf der Definition von Datenmodellen basiert, begleitet von Metamodellen und Metametamodellen. Eine solche mehrstufige Modellierung ermöglicht nicht nur die Wiederverwendung und Generierung von Modellen, sondern auch die Konsistenz zwischen multidisziplinären Modellen und die effiziente Nachvollziehbarkeit von Entscheidungen und Modelländerungen. Im Zusammenhang mit PSE ist MBSE gut geeignet, um die zunehmende Komplexität der modernen hochautomatisierten Montage zu bewältigen.

Eine der größten Konsequenzen der steigenden Komplexität in der Montage ist der zunehmende Aufwand in der Montageplanung sowie in der Verwaltung der notwendigen

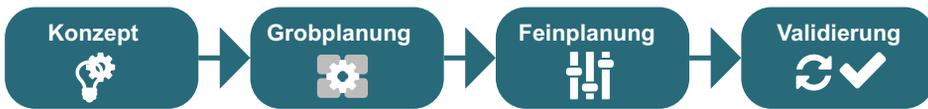


Abb. 14.1 Vier Phasen der Montageplanung

Datenmodelle, die diese Montageprozesse abbilden. Datenmodelle für Produkt, Montageprozesse und Ressourcen müssen jegliche erforderlichen Informationen enthalten, um eine Montageplanung effizient und wiederverwendbar zu ermöglichen. Im Zusammenhang mit der Montage kann der MBSE-Ansatz mehrere Vorteile, insbesondere in der Planungsphase [7, 8], generieren:

- Nachvollziehbarkeit des Baugruppenmodells mit Definition der Hardware- und Softwareanforderungen
- Wiederverwendbarkeit der Modelle
- Exploration des Entwurfsraums und Analyse von Entwurfsänderungen
- Interdisziplinarität und umfassende Darstellung des Montagesystems für interdisziplinäre Teams
- Effiziente Systemtests und Anforderungsbewertung

Die Montageplanung ist eine **Auslegungsplanung** des Montagesystems. Die Auslegungsplanung des Montagesystems umfasst die räumliche Anordnung der Betriebsmittel, berücksichtigt die Montagestrukturtypen sowie Organisationsformen der Montagetätigkeiten und ist stark vom eigentlichen Montageprozess sowie dessen Automatisierungsgrad abhängig. Die Montageplanung erfolgt in den vier Phasen: Konzept, Grobplanung, Feinplanung und Validierung (Abb. 14.1).

Die Konzeptphase umfasst die erste Planungsstufe der Entwicklung eines Montagesystems. Dies umfasst beispielsweise das Festlegen der Ziele sowie der Anforderungen an das Montagesystem. Systembeschränkungen, wie z. B. das vorhandene Budget oder die verfügbaren Hallenflächen für den gesamten Montageprozess, werden erfasst. Darüber hinaus werden alle nötigen Planungsdaten beschafft, das zu erzeugende Produkt dargestellt und die Aufgaben der Systementwicklung festgelegt. Falls ein bereits vorhandenes Montagesystem umgeplant werden muss, wird eine Situationsanalyse des IST-Zustandes dieses Montagesystems durchgeführt.

In der Grobplanungsphase werden Arbeitsabläufe festgelegt, Montagestrukturen entwickelt, Montageabschnitte gebildet und zusätzlich mögliche alternative Montagesysteme herausgearbeitet. Hierzu wird ein technisches Verständnis über den Montageprozess und die Fähigkeiten der Betriebsmittel benötigt. Darüber hinaus erfolgt die Ressourcenauswahl, die Bewertung und Auswahl der herausgearbeiteten Lösungsvarianten sowie das Berechnen der zur Montagesystem-Ausbringung notwendigen Hallenflächen und Montagekosten.

In der Feinplanungsphase erfolgt die detaillierte Ausarbeitung des Gesamtsystems und dessen Teilsysteme. In dieser Phase werden auch die Ablaufplanung und die Ausstattung des Montagesystems sowie die Optimierung des resultierenden Layouts vorgenommen.

Im Planungsschritt der Validierung werden alle notwendigen und möglichen Simulationen durchgeführt, um die Korrektheit der Planung zu überprüfen. Dies erstreckt sich von der Simulation einer einzelnen Arbeitsstation und des Arbeitstakts bis hin zur Simulation des gesamten Montagesystems. In diesem Schritt werden Simulationsmodelle für die Virtuelle Inbetriebnahme erstellt. Auf Basis dieser Simulationen werden Analysen durchgeführt, welche das Optimierungspotenzial eines Montagesystems offenlegen. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse lassen sich Fehler beheben und Prozesse neu ausrichten, ohne dass das Montagesystem physisch existieren muss.

Die Auslegungsplanung eines Montagesystems wird zum jetzigen Zeitpunkt mit einem geringen Automatisierungsgrad durchgeführt, wodurch hohe Kosten aufgrund des Bedarfs an qualifiziertem Personal sowie des zur Durchführung benötigten Platzbedarfs resultieren.

14.3 Stand der Technik

Für die umfassende Darstellung der Forschungslücken im Bereich der Montageplanung werden im Folgenden alle vier Phasen des Planungsprozesses in Bezug auf den aktuellen Stand der Technik beleuchtet (Abb. 14.2).

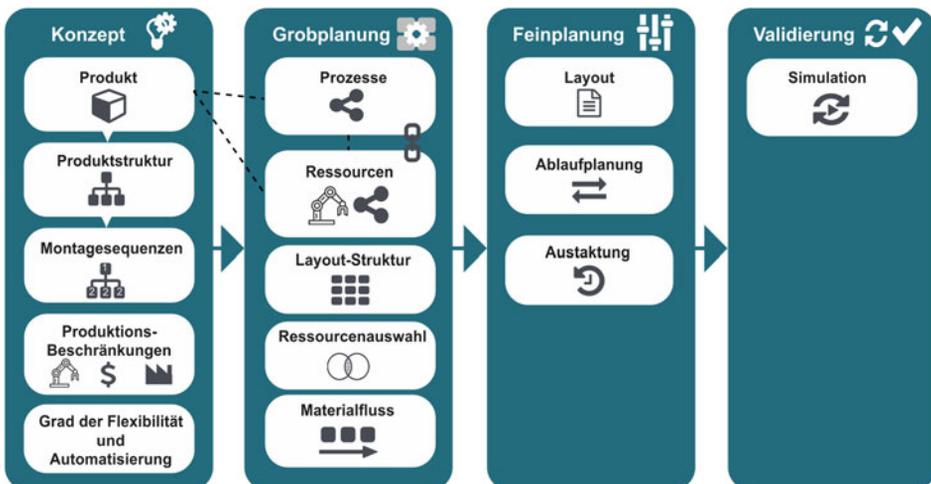


Abb. 14.2 Detaillierte Darstellung der vier Montageplanungsphasen

In der Konzeptphase werden die Produktionsbeschränkungen, der Grad der Flexibilität und Automatisierung des zu entwickelten Montagesystems definiert. Die zentrale Rolle spielt aber das Produkt, seine Struktur und dessen Montagesequenzen. Die vorliegenden Informationen über die Produktstruktur und die Sequenzierung der Montage bestimmen den Automatisierungsgrad in diesem Schritt. Die geometrischen Informationen über das Produkt werden mit einem Computer-Aided-Design-(CAD) Programm erstellt und können in Formaten wie STEP, IGES, Collada, JT oder STL exportiert werden. In dieser Repräsentationsform beinhaltet das Produkt Bauteile und Merkmale, die für den Planungsprozess verwendet werden können. Grundsätzlich können die Produktmerkmale in Low-Level- und High-Level-Merkmale unterschieden werden [9]. Die Low-Level-Merkmale beziehen sich auf die geometrischen und topologischen Merkmale von Bauteilen. High-Level-Merkmale werden als Kombination von Low-Level-Merkmalen und deren Beziehungen untereinander für spezifische Anwendungen, wie der hier fokussierten Montage beschrieben. In CAD-Formaten gehen die High-Level-Informationen wie etwa die Montageinformationen vollständig verloren, da die CAD-Daten keine funktionalen semantischen Informationen enthalten [10]. Diese funktionale semantische Montageinformationen bilden High-Level-Merkmale, können aber nur indirekt aus den Low-Level-Merkmalen ermittelt werden.

Um die CAD-Darstellung um High-Level-Montagemerkmale zu erweitern, existieren mehrere Ansätze: Montagegraphen [11], Merkmalsgraph der Einschränkungstoleranz [12], Erweiterter Graph der Einschränkungstoleranz [13], Enriched Assembly Model [14], graphen-basierter Entwurfssprachen-Ansatz [15, 16].

Es existiert eine Vielzahl von Formaten für die Darstellung von Montagesequenzen wie zum Beispiel, Assembly-Tree, gerichtete Graphen, Liaison-Graphen, Vorranggraphen [17]. Hierbei sticht hervor, dass jeder dieser Formate ein graphenbasiertes Datenmodell zugrunde legt.

Bei den Montagesequenzen existiert ein breites Spektrum an Arbeiten, die sich mit der Generierung von Sequenzen durch die Analyse der geometrischen Informationen befassen [17, 18, 19]. Zahlreiche Arbeiten präsentieren sowohl Teillösungen, die z. B. Beziehungen zwischen Komponenten extrahieren oder nur einfache Montageabläufe generieren, als auch Komplettlösungen, die aus den Produktbeschreibungen automatisch detaillierte Montagesequenzen generieren.

Das Hauptproblem in der Konzeptphase ist die Darstellung der Produktstruktur und die Möglichkeit, die montagespezifischen Informationen darzustellen. Die Bereitstellung dieser Daten wird auch in der Grobplanungsphase kritisch, denn die Ressourcenauswahl basiert auf den daraus abgeleiteten Prozessbeschreibungen.

Zu den Ressourcen gehören alle Betriebsmittel des Montagesystems. Die Betriebsmittel sind mechatronische Systeme, die sich im Kontext von Industrie 4.0 zu Produktionsmodulen und in der Folge zu cyber-physischen Systemen (CPS) weiterentwickeln.

CPS-Module können als Integration von Hard- und Software zu einem intelligenten System definiert werden, das über Sensoren und Aktoren in Echtzeit mit der physikalischen Welt kommunizieren kann [20].

Im Zusammenhang mit der Betriebsmittelsimulation wird oft der Digitale Zwilling erwähnt. Der Begriff „Digitaler Zwilling“ ist mehrdeutig und kann auf unterschiedliche Weise definiert werden [21]. In diesem Beitrag wird ein Digitaler Zwilling als ein digitales Abbild eines CPS betrachtet, „das dessen Eigenschaften, Zustand und Verhalten durch Modelle, Informationen und Daten erfasst“ [22]. Digitale Zwillinge können bereits in der Entwicklungsphase zum Testen und Validieren eingesetzt werden. Um dies zu erreichen, können in verschiedenen Entwicklungsstadien Model-in-the-Loop Simulationen (MiLS), Software-in-the-Loop Simulationen (SiLS) und Hardware-in-the-Loop Simulationen (HiLS) verwendet werden. Bei einer MiLS wird ein Modell des Steuerungssystems in Verbindung mit einem Modell des zu steuernden Systems (Anlagenmodell) simuliert, um die Gültigkeit der konzeptionellen Steuerungslösung zu bewerten [23]. Bei einer SiLS wird der Steuerungscode in der Zielsteuerungsumgebung in Verbindung mit der simulierten Anlage ausgeführt. Bei einer HiLS ist das reale Steuerungssystem über die reale Kommunikationsperipherie mit einer virtuellen Maschine verbunden [24]. Diese Methoden können in der Validierungsphase eingesetzt werden, wenn Simulationsmodelle des resultierenden Montagesystems erstellt werden. Aber bereits in der Grobplanungsphase kann die MiLS und SiLS zur Validierung als Teil des Ressourcenauswahlprozesses durchgeführt werden. Das Hauptziel des Ressourcenauswahlprozesses ist es, die CPS zu identifizieren, die in der Lage sind, den jeweiligen Prozess auszuführen und die Korrektheit der Implementierung zu überprüfen.

Die überwiegende Mehrheit an Arbeiten, die sich mit der Darstellung von Ressourcenfähigkeiten und Montageprozessen beschäftigen, konzentrieren sich auf die Ausführung von Fähigkeiten, jedoch wird die strikte Kopplung zwischen den Fähigkeiten und dem jeweiligen Montageprozess selten tiefgehend beleuchtet [17, 25, 26, 27]. Die Modelle für Montageprozesse sind in der Regel eng mit Fähigkeitsmodellen gekoppelt, beziehungsweise werden durch dasselbe Modell dargestellt. Diese enge Kopplung schafft eine Einschränkung innerhalb des Ressourcenauswahlprozesses. Der Mangel an flexiblen oder generalisierbaren Lösungen führt dazu, dass dieser Schritt in der Regel manuell von Experten durchgeführt wird. Bei Lösungen, bei denen die Ressourcenauswahl automatisiert erfolgen kann, werden die Fähigkeit und der Montageprozess durch das gleiche Modell dargestellt. Wenn in diesem Fall ein Prozess auf logisch unterschiedliche Weise implementiert werden kann (z. B. durch verschiedene Maschinentypen, Roboter mit einem Greifer und einer dedizierten Station), muss der Prozess für verschiedene Fälle durch ein unterschiedliches Modell dargestellt werden. Dies führt dazu, dass nicht alle Maschinen, die den Prozess implementieren können, identifiziert werden können.

Für die Auslegungsdarstellung existieren textbasierte, tabellenbasierte, XML-basierte, geometriebasierte und grafikbasierte Ansätze [28]. In der Arbeit von Laemmle et al. in [28] wird ein Simulationsmodell als Darstellung des Montagesystem-Layouts erzeugt.

Ein solcher Ansatz ermöglicht die direkte Validierung des Layouts unter Verwendung des generierten Modells in der Simulation. Der Ansatz beinhaltet jedoch keine Methodik für die Ressourcenauswahl. In der Arbeit von Michniewicz [2] wurde ein Ansatz für das automatisierte Layout-Entwicklung entwickelt, der eine Methodik zur Ressourcenauswahl beinhaltet. Der Montageprozess und die Fähigkeiten werden durch gekoppelte Modelle dargestellt, die von derselben Klasse vererbt werden. Um die Kompatibilität zwischen den Fähigkeiten und Prozessen zu finden, wird ein Baumdiagramm verwendet, das für die Ressourcenauswahl hierarchisch analysiert wird. Der resultierende Ansatz benötigt zudem eine Nutzerinteraktion und ist nicht vollständig automatisiert. Ein auf den Arbeiten von Michniewicz [2] und Backhaus [25] basierendes Konzept stellen Leiber et al. in [29] vor. Dieses Konzept beinhaltet einen Algorithmus zur Ressourcenauswahl, der auf einer hierarchischen Analyse der Prozess- und Fähigkeitsbeschreibung basiert. Der Ansatz beinhaltet einen genetischen Algorithmus zur Montagesystem-Layout-Generierung, berücksichtigt jedoch keine unterschiedlichen Organisations- und Strukturformen der Montagesysteme. Diese werden zu Beginn des Planungsprozesses vordefiniert. Die Logistik und ihre Transportelemente werden ebenfalls in vereinfachter Form berücksichtigt. Alle drei Arbeiten sind zudem auf Roboterzellen beschränkt.

Die bestehenden Ansätze zur automatisierten Layout-Entwicklung haben mehrere große Lücken, die weiter erforscht werden müssen. Eine davon ist die enge Kopplung von Fähigkeiten und Montageprozessen. Zudem berücksichtigen bestehende automatisierte Ansätze auch nicht die verschiedenen Montagestrukturtypen und Organisationsformen von Montagesystemen. Es existiert keine verallgemeinerte automatisierte Methodik zur Ressourcenauswahl.

In der Feinplanungsphase wird aus der in der Grobplanungsphase definierten Layout-Struktur ein Layout erstellt. Für das resultierende Layout können die Abläufe geplant werden. Zur Optimierung des Layouts und dieser Ablaufplanung wird die Austaktung des Montagesystems verwendet. Die Austaktung ist der am meisten erforschte Bereich im Kontext der Montage, der auch heute noch ein relevantes Forschungsthema ist.

Zusammenfassend ist die Automatisierung des Montageplanungsprozesses ein relevantes Thema. Die Automatisierung würde es ermöglichen, die Zeit und in der Folge auch die Kosten, die für die Planung von Montagesystemen notwendig sind, drastisch zu reduzieren. Die etablierten Ansätze zeigen, dass die Simulation zur Validierung des resultierenden Systems genutzt werden kann, aber es die Entwicklung umfassender Simulationsmodelle erfordert. Die automatisierte Generierung der entsprechenden Simulationsmodelle für Montagesysteme stellt weiterhin eine Herausforderung dar. Ein MBSE-basierter Ansatz, der die Logistik und eine umfassende Ressourcenauswahl berücksichtigt, kann eine Lösung für dieses Problem darstellen.

14.4 Konzept

Das Konzept für ein System zur automatisierten Planung von Montagelinien ist in Abb. 14.3 dargestellt und umfasst alle vier Phasen der Montageplanung.

1. **Konzeptphase:** In der Konzeptphase werden alle notwendigen Daten für die Planung gesammelt. Diese Daten umfassen Informationen über das Produkt und die Produktionsanforderungen an das Montagesystem. Die Produktbeschreibung enthält eine Geometriedarstellung in einem standardisierten Austauschformat und eine Produktdokumentation (z. B. PDF). Diese Informationen werden in dieser Phase um eine

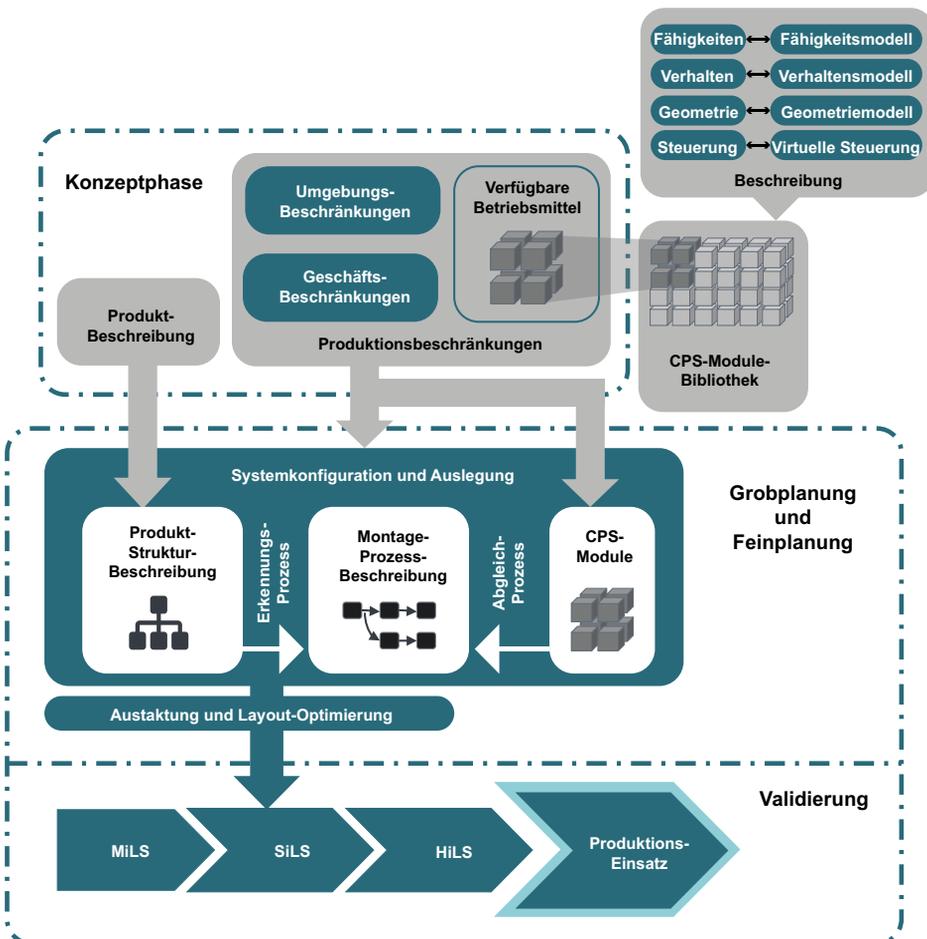


Abb. 14.3 Konzept für ein System zur automatisierten Planung von Montagelinien

graphenbasierte Produkt-Strukturbeschreibung mit Montagesequenzdefinition ergänzt. Diese graphenbasierte Beschreibung ist eine Produktdarstellung innerhalb des Systems. Die Produktionsbeschränkungen bestehen aus zwei Blöcken: Beschränkungen und verfügbare Betriebsmittel. Die Beschränkungen können anschließend in zwei Kategorien unterteilt werden: Umgebungsbeschränkungen (z. B. verfügbare Fläche, Infrastrukturressourcen) und Geschäftsbeschränkungen (z. B. Budget, Vorlaufzeit, geforderte Stückzahl der produzierten Produkte). Die Beschränkungen werden im Standard-Anforderungsdarstellungsformat ReqIF [30] importiert. Die verfügbaren Betriebsmittel sind die aus der Bibliothek ausgewählten CPS-Module. Diese Bibliothek ist Teil des Systems und enthält die Beschreibung der Modelle für die verfügbaren CPS. Diese Beschreibung umfasst Fähigkeiten, Verhalten, Geometrie und Steuerung des Moduls. Sie enthält auch eine Beschreibung für die Simulations- und Steuerungsumgebung, um die anschließende Generierung der Simulationsmodelle aus der Beschreibung zu ermöglichen.

2. **Grobplanung:** In dieser Phase werden in einem ersten Schritt Montageprozesse aus der Produktstrukturbeschreibung erkannt. Zu diesem Zweck enthält ein Produktbeschreibungsgraph die Beschreibung der Produktmerkmale. Die Produktmerkmale definieren die mögliche Reihe von Standardprozessen, die dem Produktteil zugeordnet werden können. Im nächsten Schritt wird in einem iterativen Abgleichprozess ermittelt, welche CPS-Module die identifizierten Prozesse durchführen können. Die für die Prozess- und Fähigkeitsbeschreibung verwendeten Modelle basieren auf der gleichen graphenbasierten Struktur, jedoch ist die Prozessbeschreibung abstrakt und kann auf verschiedene Fähigkeiten abgebildet werden. Dadurch lassen sich alle möglichen Kombinationen von CPS-Modulen für das Montagesystem identifizieren. Die Validierung der Implementierung der Prozesse durch CPS-Module kann mittels MiLS erfolgen. Ist der Prozess korrekt implementiert, wird aus der Fähigkeitsbeschreibung ein Steuercode generiert. Anschließend kann eine SiLS durchgeführt werden, um Leistungskennzahlen des Moduls zu identifizieren. Nach dem Abgleichprozess wird eine Systemkonfiguration und Layoutstruktur in Form eines Graphen definiert.
3. **Feinplanung:** In dieser Phase findet die Auslegung statt, wobei das Layout aus der Layout-Struktur generiert wird. Als nächster Schritt wird die Austaktung der Montagelinie mit anschließender Layout-Optimierung durchgeführt. Als Kriterien für die Optimierung werden die Leistungskennzahlen der einzelnen CPS-Module und Produktionsbeschränkungen verwendet.

4. **Validierung:** Für die resultierende Systemkonfiguration und Auslegung wird eine Simulationsumgebung als Komposition aus den Simulationsumgebungen aller verwendeten CPS-Module erzeugt. Das resultierende Layout wird innerhalb der SiLS validiert.

Die Automatisierung der Montageplanung ermöglicht es, das Layout des Montagesystems schneller zu erstellen, zu validieren und Simulationsmodelle für die Virtuelle Inbetriebnahme zum früheren Zeitpunkt zu generieren. Das resultierende Simulationsmodell des Montagesystems kann innerhalb der MiLS, SiLS und HiLS getestet und zur Virtuellen Inbetriebnahme verwendet werden. Das Gesamtergebnis ist ein vollständig entwickeltes und validiertes Montagesystem, das gebaut und für die Produktion eingesetzt werden kann.

14.5 Anwendungsszenario

Als Anwendungsszenario soll eine Montage betrachtet werden, bei der ein Produkt, das aus Unterteil, Oberteil und verbindenden Bolzen besteht, durch einen Pick-and-Place-Prozess montiert wird. Als CPS-Module werden eine Montageanlage in Kombination mit einem Roboter betrachtet. Die Nutzung der Montageanlage in Verbindung mit einem Roboter wird als Anwendungsfall ausgewählt, um die Integration von Robotik und Fertigungsanlagen zu untersuchen und die Vorteile und Herausforderungen dieser Kombination zu identifizieren. Insbesondere wird untersucht, wie die Fähigkeiten heterogener Maschinen im Rahmen des Montageplanungsprozesses berücksichtigt werden können.

Die Lukas Nülle Montageanlage am ISW (Abb. 14.4) ist eine modulare Fertigungsanlage, die aus klar definierten Modulen besteht. Jedes Modul besteht aus einem Fließband, auf dem eine Fertigungseinheit aufgebaut werden kann. Diese Fertigungseinheit interagiert mit dem Werkstückträger, der durch das Fließband transportiert wird. Die Fertigungseinheit kann eine Komponente hinzufügen, manipulieren oder montieren, wodurch verschiedene Fertigungsfähigkeiten für ein bestimmtes Produkt konfiguriert werden können. Die Module besitzen standardisierte Schnittstellen, um in eine Steuerungsarchitektur integriert zu werden.

Trotz des modularen Aufbaus erfordert die Anlage eine manuelle Integration einzelner Module und eine individuelle Prüfung der Fertigbarkeit durch einen Menschen. Die standardisierten Schnittstellen müssen in einer übergeordneten Steuerungsarchitektur mit einer Zustandsüberwachung und einer Prozessablaufsteuerung zusammengeführt werden. Bauteile müssen auf ihre Kompatibilität mit den Fertigungsstationen geprüft werden und es fehlt eine Abschätzung von Key Performance Indicators (KPIs) der einzelnen Module. Die KPIs sollen anschließend für die Layout-Generierung und -Optimierung sowie Montageprozessausgleich verwendet werden.

Der Franka Emika Panda (Abb. 14.5) ist ein industrieller Roboterarm, der für die Automatisierung von Fertigungsprozessen und Materialtransporten verwendet werden kann. Der Panda wurde für die kollaborative Robotik entwickelt und besteht aus sieben Gelenken und verfügt über eine integrierte Steuerung mit Schnittstellen, die es ihm ermöglicht, direkt über einen Standard-Computer programmiert zu werden. Er kann auch mit verschiedenen Werkzeugen und Greifern für Pick-and-Place-Operationen ausgestattet werden. Es existieren zahlreiche Softwarewerkzeuge für die Bahnplanung, Programmierung, Simulation und Steuerung des Roboters, die eine flexible Integration mit der Montageanlage ermöglichen.

Die Integration des Roboters in die Montageanlage ermöglicht es, die Bandbreite produzierbarer Teile durch das Hinzufügen von Nicht-Standardelementen zu erweitern, die die Montagestationen der vorhandenen Anlage nicht verwenden oder handhaben können. Diese Integration stellt jedoch Herausforderungen an die Planung des Layouts der Anlage und den automatisierten Auswahlprozess der Ressourcen dar, da der Roboter und die Montagestationen, wenn sie in Kombination mit dem Förderbandmodul eingesetzt werden, im Grunde dieselbe Funktion erfüllen könnten, jedoch auf unterschiedliche Art und Weise. Abb. 14.6 zeigt ein Beispiel für die unterschiedlichen Beschreibungen der Pick-and-Place-Fähigkeit. Um die Pick-and-Place-Operation auszuführen, bewegt sich der Roboter hin zum Teil, greift es, bewegt sich zur Zielposition und platziert es dort. Die Montagestation hingegen ist ortsabhängig und das Förderband befördert das Teil zur Zielposition, wo die Montage stattfindet.

Die Auswahl der geeigneten Anlagenkomponenten aus einer Reihe von Anlagenkomponenten mit den gleichen Fähigkeiten erfordert eine Validierung der Implementierung des Montageprozesses durch Simulation. Das Konzept des Digitalen Zwillings kann hier als hilfreiches Werkzeug dienen, um die Montageprozesse und resultierenden Layouts zu validieren. Mithilfe des Digitalen Zwillings können die CPS-Module automatisiert komponiert werden, indem ein Fähigkeitsmodell für die Prozessfähigkeit erstellt wird, um die Ablaufhierarchie darzustellen. Durch eine Physiksimulation kann der Fertigungsprozess von einzelnen Stationen und den verwendeten Bauteilen auf Korrektheit überprüft werden. Auch die Parametrisierung einzelner Stationen kann durch Simulationen optimiert werden.

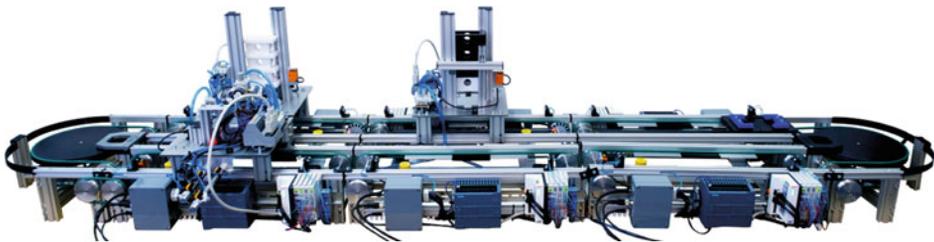


Abb. 14.4 Lukas Nülle Montageanlage am ISW

Abb. 14.5 Franka Emika Panda Roboter

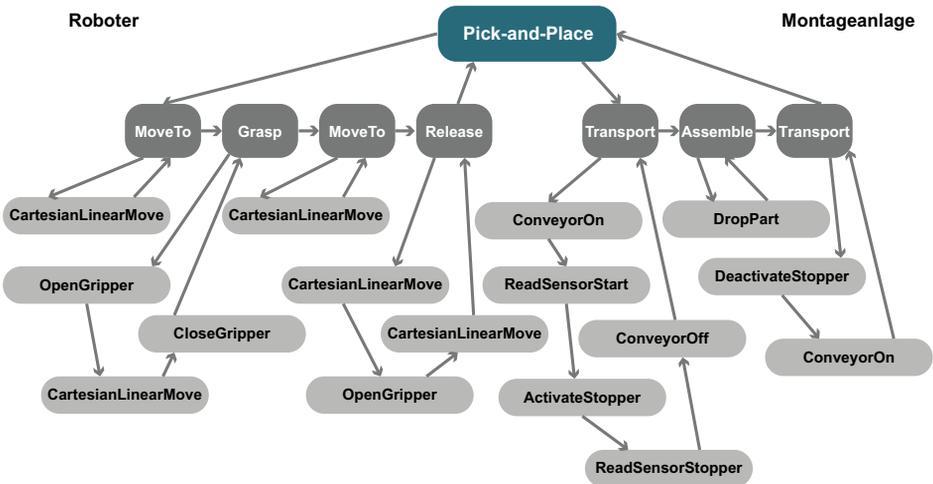


Abb. 14.6 Vereinfachte Beschreibung der Pick-and-Place-Fähigkeit

Das zuvor beschriebene Konzept wurde auf dieses Anwendungsszenario angewandt und nutzt den digitalen Zwilling für MiLS und SiLS des Pick-and-Place-Prozesses und der anschließenden Erstellung des Layouts. Gemäß dem Konzept wurde eine Plattform für die Benutzeroberflächen entwickelt, um alle für die Konzeptphase der Montageplanung erforderlichen Daten zu sammeln. Die entwickelte Plattform ermöglicht das Hochladen von CAD-Daten für die zu produzierenden Produkte, die Definition ihrer Struktur in graphenbasierter Form sowie das Hinzufügen von Beschränkungen für den Planungsprozess und die Auswahl von Anlagenkomponenten aus einer Datenbank, indem sie speziell entwickelte Modelle für die Produktstruktur und die Produktionsbeschränkungen nutzt. Abb. 14.7 zeigt die Benutzeroberfläche der Plattform, auf der der Benutzer ein Montageplanungsprojekt erstellen, Produkte mit ihren CAD-Daten und Dokumentation hinzufügen, Teile des zu montierenden Produkts (innerhalb der Plattform als Assets bezeichnet) hinzufügen und Vorlagen für die Produktbeschreibung verwalten kann, wie zum Beispiel Standardformmerkmale und Beziehungen. Die Plattform ermöglicht die Erstellung einer graphenbasierten Beschreibung der Produktmerkmale auf der Grundlage der Produktdaten. Wie im vorausgegangenen Konzept erwähnt, wird dieser Graph um Prozessbeschreibungen erweitert. Diese Prozessbeschreibungen werden in einer Datenbank für Prozessvorlagen gespeichert und unter Verwendung eines speziellen Datenmodells definiert, das mit dem Datenmodell der Maschinenfähigkeiten kompatibel ist [31]. Der resultierende Graph wird für die anschließende Auswahl der Ressourcen und Planung des Layouts verwendet [32].

Die Datenbank der Anlagenkomponenten enthält semantische Beschreibungen der verfügbaren Anlagen und Geräte, die anhand eines speziell entwickelten semantischen



Abb. 14.7 Interaktive UI Plattform für das Montageplanungssystem

Metamodells erstellt wurden [33]. Diese Beschreibungen dienen als Basis für die Instanziierung einer Asset-Verwaltungsschale. Die Asset-Verwaltungsschale stellt eine technologische Komponente einer Industrie 4.0-Anwendung laut RAMI 4.0 (Reference Architecture Model for Industry 4.0) [34] dar und ist für die Verwaltung und Steuerung von Ressourcen und Diensten verantwortlich.

Die Asset-Verwaltungsschale von CPS-Modulen für dieses Anwendungsszenario besteht aus Komponenten für Steuerung, Verhalten, Visualisierung, Verwaltung, Konfiguration, Kommunikation und Analyse sowie einem Fähigkeitsregister mit einer Datenbank für die Fähigkeiten der Anlagenkomponenten. Die Fähigkeiten werden mithilfe eines graphenbasierten Datenmodells beschrieben (wie es bereits in vereinfachter Form in der Abb. 14.6 dargestellt wurde), das verschiedene Abstraktionsebenen nutzt, um die Maschinenfunktionalität zu beschreiben [31, 35]. Die unterste Ebene, die aus nicht-trennbaren (atomaren) Operationen besteht, ist maschinenspezifisch und wird für die Codegenerierung für eine spezifische Maschine verwendet. Die höheren Abstraktionsebenen definieren logische Schritte innerhalb des Montageprozesses. Um Konsistenz und Interoperabilität einzuführen, werden atomare Operationen als OPC UA Programme modelliert. Dies ermöglicht es, atomare Operationen für jede Maschine vorab zu programmieren und einen Steuercode als Sequenz des Methodenaufrufs von OPC UA Programmen durch den OPC UA Client zu erzeugen. Solche Fähigkeitsbeschreibungen ermöglichen die Generierung von Steuerungscode für das Maschinensimulationsmodell für MiLS und SiLS.

Die Komponenten der Verwaltungsschale enthalten alle notwendigen Informationen für die Erstellung der Simulationsmodelle. Abb. 14.8 zeigt die Struktur der Verwaltungsschale des verwendeten Roboters.

Die Verwaltungskomponente enthält Skripte, die zur Ausführung der Simulationen in Containern verwendet werden. Ein Container ist eine Form der Virtualisierung, die es ermöglicht, Anwendungen in einer einheitlichen, portablen und wiederverwendbaren Form bereitzustellen und zu verwalten. Der verwendete Roboter wird mithilfe von Gazebo [36] und der MoveIt-Software [37] simuliert. Gazebo ermöglicht die Trennung von Simulationsserver und webbasierter Visualisierung, die der separaten Struktur der Verhaltens- und Visualisierungskomponenten folgt. Für die MiLS ist es möglich, Steuercode aus der abstrakten Fähigkeitsbeschreibung zu generieren und das MoveIt Commander Scripting zur Steuerung des simulierten Roboters zu verwenden. Für die SiLS wurde ein OPC UA Server mit den entsprechenden OPC UA Programmen implementiert.

Ein ähnlicher Aufbau der Verwaltungsschale gilt auch für die Module der verwendeten Montageanlage. Für MiLS wurden in diesem Fall Skripte innerhalb von ROS [38] verwendet. Für die SiLS wurde ebenfalls ein OPC UA Server implementiert. Als MiLS ist es möglich, das Simulationsmodell mithilfe von OPC UA-Programmen zu testen, die die richtigen Servervariablen verwenden, bevor der endgültige SPS-Code generiert wird. Der SPS-Code kann mit der TwinCAT-Software innerhalb von SiLS getestet werden.

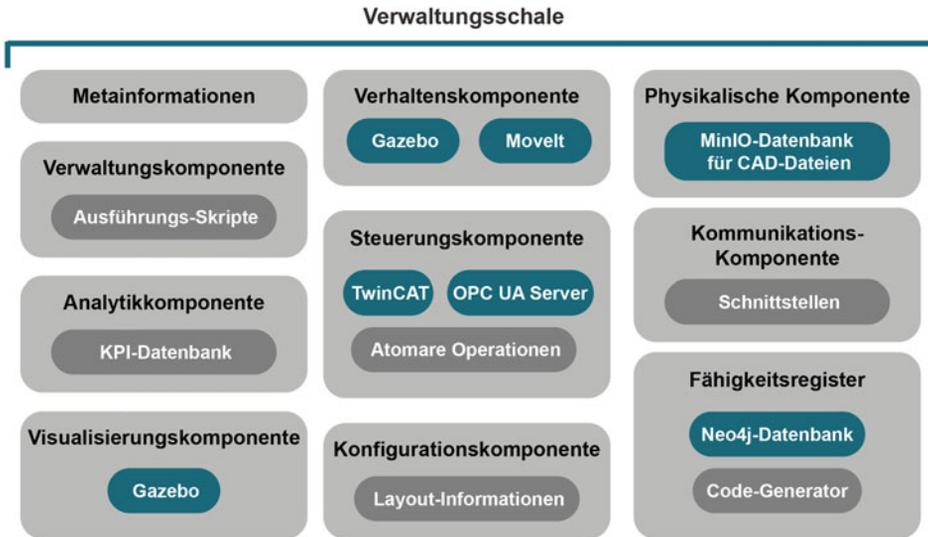


Abb. 14.8 Verwaltungsschale des verwendeten Roboters

Die beschriebene Implementierung dient als Basis für die Validierung der Montageplanung. Die Kombination aus der Produktbeschreibung und dem generierten Simulationsmodell für eine Maschine ermöglicht es, einzelne Schritte des Montageprozesses auszuführen und an einer bestimmten Maschine zu validieren. Wenn die MiLS für alle Schritte der Produktmontage erfolgreich ausgeführt wurde, ist es möglich, für jeden Schritt die zuständige Maschine zu identifizieren, Code für die SiLS zu generieren und diesen auszuführen, um die KPIs der resultierenden Durchführung in der Analysekomponente der Verwaltungsschale zu speichern.

Der resultierende Graph mit den zugehörigen Maschinen definiert eine Grundstruktur des Layouts des Montagesystems. Mithilfe der Geometriedaten und KPIs können die Module in der Layout-Struktur kombiniert werden. Aus dieser Layout-Struktur kann ein Simulationsmodell der gesamten Montageanlage innerhalb eines Simulationsmodells erstellt werden, wenn alle Maschinen mit derselben Software simuliert wurden. KPIs von Einzelschrittsimulationen in einer SiLS können abschließend für die Optimierung des Layouts verwendet werden.

14.6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird ein Konzept für ein automatisiertes Montageplanungssystem unter Verwendung des MBSE-Ansatzes vorgestellt. Das Hauptziel dieses Konzepts ist es, die Schritte des Montageplanungsprozesses zu automatisieren, die normalerweise manuell

von Experten durchgeführt werden. In einem nächsten Schritt soll das Konzept um Bibliotheken der CPS-Module erweitert werden. Derzeit werden die Modelle manuell erstellt und strukturiert. Zukünftig sollen die Modelle in einer Bibliothek abgelegt und wiederverwendet werden, um andere Maschinen und Anlagen damit beschreiben zu können. Zusätzlich besteht durch den Trend der Digitalisierung und Industrie 4.0 die Aussicht, dass bereits in naher Zukunft Anlagenmodelle von den Herstellern der Betriebsmittel bereitgestellt werden.

Das vorgestellte System zur automatisierten Planung von Montagelinien führt die derzeit manuell ausgeführten Schritte, wie z. B. die Ressourcenauswahl automatisiert durch. Der Ressourcenauswahlprozess verwendet ein abstraktes Modell des Montageprozesses und ein detailliertes Fähigkeitsmodell, um alle möglichen Lösungen für die Ressourcenauswahl zu identifizieren. Um den Ansatz der Ressourcenauswahl richtig zu bewerten, werden mehrere Evaluierungsszenarien vorbereitet. Sie beinhalten Produkte mit unterschiedlichem Komplexitätsgrad und einen Satz von Maschinen mit unterschiedlichen Fähigkeiten. Das vorgestellte Konzept ist ein Work in Progress und befindet sich derzeit in der Implementierungsphase und wird als Assistenzwerkzeug mit webbasierter Benutzungsschnittstelle umgesetzt.

Literatur

1. López-Gómez C, Leal-Ayala D, Palladino M, O'Sullivan E (2017) Emerging trends in global advanced manufacturing: Challenges, opportunities and policy responses, United Nations Industrial Development Organization
2. Michniewicz J (2019) Automatische simulationsgestützte Arbeitsplanung in der Montage. Technische Universität München, München
3. Makris S, Michalos G, Chryssolouris G (2012) Virtual commissioning of an assembly cell with cooperating robots, *Advances in Decision Sciences*.10.1155/2012/428060
4. Richtlinie VD (1990) VDI 2860-Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole
5. Calinescu A (2002) Manufacturing complexity: an integrative information-theoretic approach. University of Oxford, Oxford
6. Haskins C, Forsberg K, Krueger M, Walden D et al. Systems engineering handbook. INCOSE, S 13
7. Vitech Corporation <http://www.vitechcorp.com/>. Zugegriffen: 19. Aug. 2020
8. SEBoK v1.9. BKCASE Project. Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK). https://www.sebokwiki.org/wiki/Main_Page. Zugegriffen: 19. Aug. 2020
9. Hasan B, Wikander J, Onori M (2016) Assembly design semantic recognition using Solid Works-API. *IJMERR*. 5(4):280-287
10. Shah JJ, Rogers MT (1993) Assembly modeling as an extension of feature-based design 5:218
11. Vigano R, Gómez GO (2012) Assembly planning with automated retrieval of assembly sequences from CAD model information
12. Wu Y, Shah JJ, Davidson JK (2003) Computer modeling of geometric variations in mechanical parts and assemblies 3:54

13. Ramnath S, Haghghi P, Venkiteswaran A, Shah JJ (2020) Interoperability of CAD geometry and product manufacturing information for computer integrated manufacturing 33:116
14. Lupinetti K, Pernot JP, Monti M, Giannini F (2019) Content-based CAD assembly model retrieval: Survey and future challenges 113:62
15. Tonhäuser C, Rudolph S (2017) Individual coffee maker design using graph-based design languages. *Design Computing and Cognition'16*, Springer, S 513
16. Kübler K, Schopper D, Riedel O, Rudolph S (2020) Towards an automated product-Production system design – Combining simulation-based engineering and graph-based design languages 52:258
17. Michniewicz J, Reinhart G, Boschert S (2016) CAD-based automated assembly planning for variable products in modular production systems 44:44
18. Pintzos G, Triantafyllou C, Papakostas N, Mourtzis D et al (2016) Assembly precedence diagram generation through assembly tiers determination 29:1045
19. Mane U, Jonnalagedda V, Dabade B (2019) Rule based system to generate hierarchical directed graph for mechanical assemblies 19:29
20. Lee EA Cyber-physical systems-are computing foundations adequate. Position paper for NSF workshop on cyber-physical systems: research motivation, techniques and roadmap, Citeseer, S 1
21. Fuller A, Fan Z, Day C (2019) Digital twin: Enabling technology, challenges and open research
22. Stark R (2017) *Smarte Fabrik 4.0–Digitaler Zwilling*, S 1
23. Vepsäläinen T, Kuikka S (2014) Integrating model-in-the-loop simulations to model-driven development in industrial control 90:1295
24. Scheifele C, Verl A (2016) Hardware-in-the-loop simulation for machines based on a multi-rate approach. *Proceedings of The 9th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, EUROSIM 2016, The 57th SIMS Conference on Simulation and Modelling SIMS*, Linköping University Electronic Press, S 715
25. Backhaus JCS (2016) *Adaptierbares aufgabenorientiertes Programmiersystem für Montagesysteme*. Herbert Utz
26. Järvenpää E, Siltala N, Hylli O, Lanz M (2019) The development of an ontology for describing the capabilities of manufacturing resources 30:959
27. Malakuti S, Bock J, Weser M, Venet P et al (2018) Challenges in skill-based engineering of industrial automation systems, in 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE, S 67
28. Laemmle A, Gust S (2019) Automatic layout generation of robotic production cells in a 3D manufacturing simulation environment 84:316
29. Leiber D, Hammerstingl V, Weiß F, Reinhart G (2019) Automated design of multi-station assembly lines 79:137
30. Object Management Group (OMG) About the requirements interchange format specification version 1.2. <https://www.omg.org/spec/ReqIF/About-ReqIF/>. Zugegriffen: 19. Aug. 2020
31. Brovkina D, Riedel O (2021) Assembly process model for automated assembly line design, in 2021 IEEE 3rd Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE), IEEE, S 588
32. Brovkina D, Riedel O (2021) Matching algorithm for automated resource selection within assembly line design, 2021 IEEE 3rd Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE), S 627–632. <https://doi.org/10.1109/ECICE52819.2021.9645668>
33. Brovkina D, Riedel O (2019) Skill-based metamodel for sustaining the process-oriented cyber-physical System Description, in 2019 IEEE 39th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXIX), S 1

34. Plattform Industrie 4.0. RAMI 4.0 – Ein Orientierungsrahmen für die Digitalisierung. <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/rami40-einfuehrung-2018.html>. Zugegriffen: 29. Sept. 2021
35. Brovkina D, Riedel O (2020) Graph-based data model for assembly-specific capability description for fully automated assembly line design, in 2020 IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE), IEEE, S 381
36. Gazebo <https://gazebosim.org/home>. Zugegriffen: 2. Jan. 2023
37. MoveIt Motion Planning Framework <https://moveit.ros.org/>. Zugegriffen: 2. Jan. 2023
38. ROS: Home. <https://www.ros.org/>. Zugegriffen: 2. Jan. 2023

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.



Teil III

Echtzeitsimulation in der Betriebsphase



Timm von Bergen, Marc Schnierle und Sascha Röck

Zusammenfassung

Im mechatronischen Entwicklungsprozess des Maschinen- und Anlagenbaus entstehen Digitale Zwillinge, die zur Entwicklungsunterstützung und Virtuellen Inbetriebnahme von Steuerungssoftware sowie -hardware eingesetzt werden. Jedoch werden die Digitalen Zwillinge über den Entwicklungsprozess hinaus bislang kaum einer systematischen Weiterverwendung zugeführt. Dies ist auf die hohen Anforderungen einer standort- und endgeräteunabhängigen Verfügbarkeit und Vernetzungsfähigkeit der Digitalen Zwillinge zurückzuführen. Paradigmen der Cloud- und Webtechnologien bieten in diesen Anforderungsfeldern Lösungen an, die neue Anwendungspotenziale eröffnen. In diesem Beitrag wird dazu das Konzept des Digital Twin as a Service präsentiert, das die Grundprinzipien der Cloud- und Webtechnologien auf die Anwendung und Bereitstellung von Digitalen Zwillingen überträgt.

15.1 Motivation

Das Konzept der X-in-the-Loop-Simulation (XiLS) ermöglicht die virtuelle Auslegung sowie Inbetriebnahme von Steuerungssystemen in frühen Entwicklungsphasen des Maschinen- und Anlagenbaus und findet vermehrt Einsatz im mechatronischen Entwicklungsprozess. Die XiLS umfasst die Model-in-the-Loop Simulation (MiLS), Software-in-the-Loop Simulation (SiLS) und Hardware-in-the-Loop Simulation (HiLS), deren Gemeinsamkeit die Kopplung einer Steuerungsausprägung (als Modell, Software

T. von Bergen · M. Schnierle · S. Röck (✉)

Virtual Automation Lab (VAL), Hochschule Esslingen, Esslingen, Deutschland

E-Mail: Sascha.Roeck@hs-esslingen.de

oder Hardware) mit einer simulierten Maschine oder Anlage ist. Die daraus resultierenden Digitalen Zwillinge werden mit Geometrie- und Verhaltensmodellen beschrieben, die das Anlagenverhalten nachbilden.

Die im Rahmen des mechatronischen Entwicklungsprozesses entstehenden Digitalen Zwillinge werden bislang primär für dezidierte Fragestellungen im Entwicklungs- und Inbetriebnahmeprozess eingesetzt, obwohl vielfältige Anwendungspotenziale über den gesamten Lebenszyklus einer Anlage vorhanden sind. Beispiele dafür sind der Einsatz Digitaler Zwillinge zur Zustandsüberwachung, Predictive Maintenance, Mitarbeiterschulung oder Wartungs- und Vertriebsunterstützung von Maschinen und Anlagen.

Die dargestellten Einsatzmöglichkeiten erfordern gleichermaßen eine standort- und endgeräteunabhängige Verfügbarkeit sowie Vernetzungsfähigkeit und Skalierbarkeit der Digitalen Zwillinge. Moderne Paradigmen der Cloud- und Webtechnologien fördern die dafür notwendigen flexiblen Softwarearchitekturen.

Während Cloudtechnologien wie Virtualisierungs- und Containerkonzepte skalierbare, netzwerkzentrierte, abstrahierte IT-Infrastrukturen [1] eröffnen, ermöglichen Entwicklungen der Webtechnologien wie Webserver und -browser oder standardisierte Programmierschnittstellen und Kommunikationsprotokolle (wie WebSockets, WebRTC, WebGL) eine endgeräteunabhängige Auslieferung und Verfügbarkeit der Daten und Softwareanwendungen.

Diese Technologien sind zentrale Treiber für die große Flexibilität und Funktionsvielfalt sowie die dynamische Entwicklungsgeschwindigkeit in der Webentwicklung und bieten großes Potenzial für Anwendungen mit Digitalen Zwillingen. Abb. 15.1 zeigt die Verknüpfung der Cloud- und Webtechnologien mit dem Digitalen Zwilling zu einem Digital Twin as a Service (DTaaS) Ansatz.

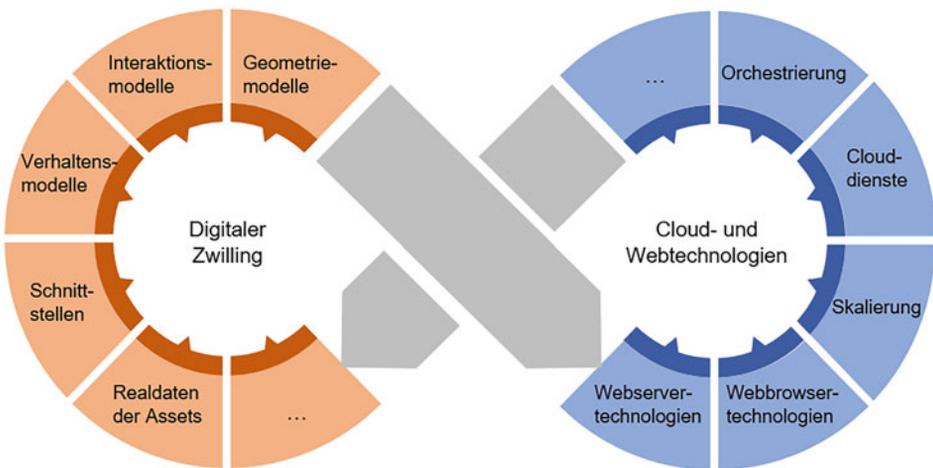


Abb. 15.1 Digital Twin as a Service (DTaaS) Ansatz

Die systematische Verknüpfung von Digitalen Zwillingen mit Cloud- und Webtechnologien eröffnet wechselseitige Mehrwerte:

- **Cloud- und Webtechnologien als Mehrwerte für Digitale Zwillinge:**

Durch die Integration von Web- und Cloudtechnologien kann der Funktionsumfang der Digitalen Zwillinge grundlegend erweitert werden. Neben der Verwendung von Basistechnologien wie Webbrowsern oder Webservern kann an der Weiterentwicklung von Softwaremodulen und Bibliotheken im Rahmen weltweiter Beiträge der Cloud- und Web-Community partizipiert werden. Als Beispiele können Speicherdienste, Dienste zur Nutzerverwaltung, Sprachverarbeitungsdienste sowie Algorithmen zur Geometrieverarbeitung, Physikberechnung, Bildverarbeitung und Künstlichen Intelligenz (KI) genannt werden.

- **Digitale Zwillinge als Mehrwerte für Cloud- und Webtechnologien:**

Digitale Zwillinge bilden eine wertvolle Funktions- und Datenbasis für unterschiedliche Anwendungen der Cloud- und Webtechnologien im Maschinen- und Anlagenbau. Sie können beispielsweise als Referenzmodell für cloudbasierte Predictive Maintenance Dienste, zur Erzeugung synthetischer Trainingsdaten für KI-Anwendungen, in Mixed Reality-Anwendungen zur Mitarbeiterschulung oder als datenbasiertes Assistenzsystem eingesetzt werden.

15.2 Interoperabilität zwischen Digitalen Zwillingen sowie Cloud- und Webtechnologien

Für die Erschließung der dargestellten Mehrwerte aus der bidirektionalen Verknüpfung zwischen Digitalen Zwillingen sowie Cloud- und Webtechnologien werden folgende technische Leitziele formuliert:

- **Interoperabilität zwischen Digitalen Zwillingen sowie Cloud- und Webtechnologien:**

Für die symbiotische Verbindung Digitaler Zwillinge mit Cloud- und Webtechnologien ist die Bereitstellung bidirektionaler Verbindungsmöglichkeiten notwendig. Für eine flexible Interoperabilität sollten die Schnittstellen des Digitalen Zwillingen den standardisierten Schnittstellen folgen, die in der Cloud- und Web-Domäne dominieren.

- **Verfügbarmachung industrieller Assets für Cloud- und Webtechnologien:**

Digitale Zwillinge erfordern die Zugänglichkeit zu industriellen Systemen, wie Hardware-in-the-Loop Simulatoren, Programmiersystemen oder industriellen Steuerungen. Die Kommunikation mit diesen sogenannten Assets wird durch Protokolle auf der Maschinen- und Anlagenebene bestimmt (OT: Operational Technology). Demgegenüber stehen die Kommunikationsprotokolle der Cloud- und Webtechnologien (IT:

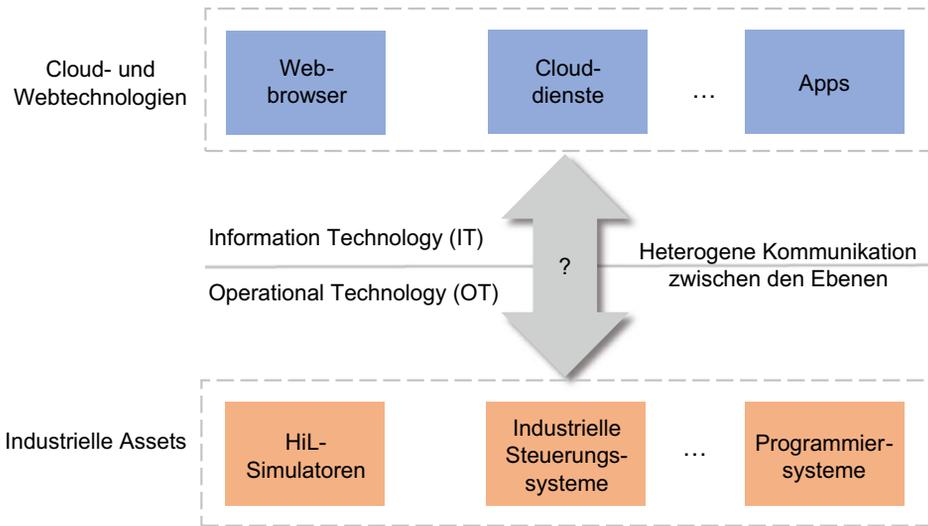


Abb. 15.2 Heterogene Kommunikation zwischen den Cloud- und Webtechnologien und industriellen Assets

Information Technology). Das Zusammenführen und effektive Zusammenspiel der beiden Kommunikationsebenen OT und IT, wie in Abb. 15.2 dargestellt, ist eine der entscheidenden Herausforderungen im Kontext des Industrial Internet of Things (IIoT).

Die Interoperabilität zwischen Digitalen Zwillingen sowie Cloud- und Webtechnologien erfordert die Überwindung technischer Herausforderungen, die aus den hohen Anforderungen an die Erreichbarkeit und der Weiterverwendung Digitaler Zwillinge resultieren. Die Einsatzmöglichkeit bestehender Clouddienste zur Erweiterung von Digitalen Zwillingen motiviert die Integration von standardisierten Kommunikationsprotokollen der Web- und Cloudtechnologien. In diesem Abschnitt werden Kommunikationsprotokolle, moderne Softwarearchitekturen und Softwarebereitstellungsarten vorgestellt, die den genannten Anforderungen gerecht werden.

Standardprotokolle HTTP und Websockets

Bereits bei der Bereitstellung der ersten Webseite von Tim Berners-Lee im CERN im Jahr 1989 (vgl. [2]), wurden präzise spezifizierte Schnittstellen verwendet. Dies war aus Sicht von Berners-Lee erforderlich, da am CERN unterschiedliche IT-Infrastrukturen zur Datenhaltung vorherrschten, die einen Datenaustausch erschwerten (vgl. [3]). Für die Kommunikation und zum Transfer der Daten wurde das Hypertext Transfer Protocol (HTTP) entwickelt. Die semantische Darstellung der Webseite wurde durch die Seitenbeschreibungssprache Hypertext Markup Language (HTML) beschrieben und die Auffindbarkeit der Webseite wurde durch den später Uniform Resource Locator (URL)

genannten Standard umgesetzt. Diese Form der Bereitstellung ist bis heute in den Grundzügen erhalten geblieben und hat sich zum Standard im Internet entwickelt. Das World Wide Web, wie es heute verstanden wird, basiert auf Webservern zur Webseitenbereitstellung und Webbrowsern zur endgeräteunabhängigen Anzeige der Webseiten über HTTP als Übertragungsprotokoll und HTML als Beschreibungssprache.

Für den Abruf von Informationen wird bei HTTP auf eine synchrone Kommunikation basierend auf dem Client-Server-Prinzip gesetzt. Dabei stellt der Client eine Anfrage (Request) an einen verfügbaren Webserver und erhält auf diese spezifische Anfrage eine Antwort (Response). Die HTTP-Anfragemethoden erlauben die Übertragung von Argumenten und ermöglichen somit auch eine Informationsübermittlung an den Server, der eine spezifische Antwort erstellt. Mittlerweile findet das Protokoll Anwendung in Webbrowsern unterschiedlicher internetfähiger Endgeräte. HTTP hat sich über die Auslieferung von Webseiten hinaus als Standard für zahlreiche weitere Anwendungen entwickelt und macht mittlerweile Daten für Mobile Apps sowie Dienste der Cloud verfügbar. In modernen Clouddiensten wird auf das HTTP Protokoll das Representational State Transfer (REST) Paradigma aufgesetzt [4]. Die verfügbaren Eigenschaften von Objekten werden über Uniform Resource Identifier (URI) beschrieben und enthalten Informationen über den Ort und Namen verfügbarer Eigenschaften. Die REST-Routen erlauben einen Zugriff auf Eigenschaften der vorhandenen Objekte, sodass etwa die Route „/Maschine1/Motor1/Temperatur“ Zugriff auf die gewünschte Information erlaubt. Dem REST-Paradigma folgend werden Informationen zustandslos zwischen Server und Client ausgetauscht, so dass alle notwendigen Informationen bei der Anfrage (Request) und Antwort (Response) übertragen werden.

Für die bidirektionale, zyklische und asynchrone Kommunikation zwischen Client und Server wird in den Cloud- und Webtechnologien das sogenannte WebSocket-Protokoll verwendet (vgl. [5]). Im Gegensatz zu HTTP, halten Websockets (WS) die darunterliegende zustandsbehaftete Transmission Control Protocol (TCP) Verbindung aufrecht, bis diese aktiv durch einen Teilnehmer beendet wird. Nach Aufbau der Verbindung durch den Client kann gleichberechtigt eine bidirektionale Datenübertragung von Client und Server erfolgen.

Microservice Architektur

Moderne Cloud- und Webanwendungen werden als modulare Softwareanwendungen mit sogenannten Microservices umgesetzt. Microservices sind abgeschlossene Softwareeinheiten, die jeweils eine definierte Funktion über die Protokolle HTTP und WS anbieten (vgl. Abb. 15.3). Dabei können Microservices eigene User-Interfaces bereitstellen, jedoch ist dies nicht zwingend erforderlich.

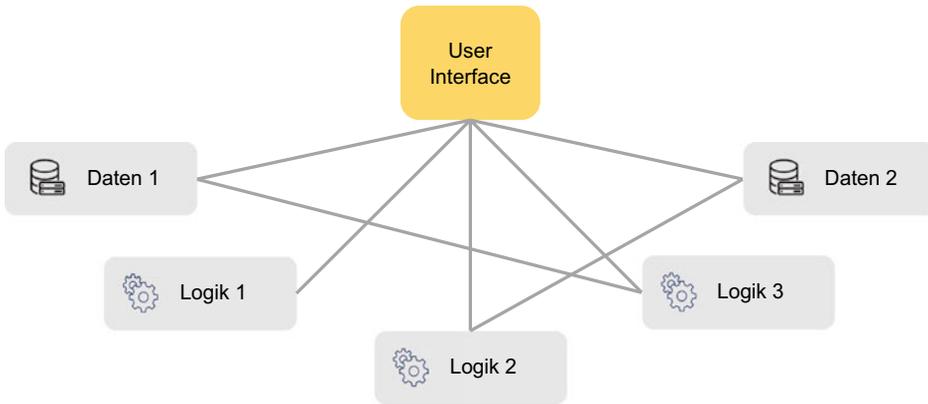


Abb. 15.3 Beispielhafte Struktur einer Softwareanwendung mit Microservice-Architektur: Aufteilung von einzelnen Funktionalitäten auf mehrere unabhängige Microservices

Die Bereitstellung von Software, die der Microservice-Architektur folgt, hat zahlreiche Vorteile:

- **Lose Kopplung:**

Die Software ist in funktionelle Einheiten aufgeteilt, die lose gekoppelt sind. Bei der Entwicklung eines Microservice liegt der Fokus auf der Lösung eines definierten Problems, sodass die Entwicklung ohne Abhängigkeiten zu anderen Microservices umgesetzt werden kann.

- **Robustheit:**

Durch die lose Kopplung eines Microservice ist dessen Lauffähigkeit nicht von weiteren Softwarebestandteilen abhängig und damit weniger fehleranfällig. Die Abgeschlossenheit der Funktionalität erlaubt zudem ein effizientes Testen der definierten Anforderungen ohne aufwändig zustandsbehaftete Szenarien zu integrieren.

- **Wiederverwendbarkeit:**

Die Verwendung eines Microservice beschränkt sich nicht nur auf den Einsatz in einer einzigen Anwendung, sondern kann grundsätzlich in weiteren Anwendungen aufgrund der Verfügbarkeit unter Einsatz von Standardschnittstellen wiederverwendet werden.

- **Skalierbarkeit:**

Die Abgeschlossenheit eines Microservice erlaubt auf einfache Weise eine skalierbare Bereitstellung, da lediglich die für den Microservice erforderlichen Ressourcen den Anwendungen zur Verfügung gestellt werden müssen. Der schnittstellenbasierte Ansatz ermöglicht die Verteilung von Softwarekomponenten auf unterschiedlichen Hardwaresystemen.

- **Austauschbarkeit:**

Die schnittstellenbasierte Architektur erleichtert zudem einen Austausch von Microservices und die Erweiterungsmöglichkeit durch zusätzliche Microservices. Für den Austausch von Microservices müssen durch das REST-Paradigma lediglich die gleichen REST-Routen mit den analogen Informationen bereitgestellt werden.

Digital Twin as a Service

Zur Umsetzung der geforderten Interoperabilität von Digitalen Zwillingen und den Cloud- und Webtechnologien wird im Folgenden ein Konzept präsentiert, das die Bereitstellung Digitaler Zwillinge über eine Microservice-Architektur vorsieht. Hierfür müssen die Softwarekomponenten modular als abgeschlossene Funktionseinheiten bereitgestellt werden sowie über HTTP und Websocket Schnittstellen zur Vernetzung mit weiteren Microservices verfügen.

Die Bereitstellung von IT-Dienstleistungen ist in den letzten Jahrzehnten vermehrt vom lokalen Rechner in Cloud-Infrastrukturen gewandert. Bei der Bereitstellung der Dienstleistungen kann zwischen verschiedenen Ansätzen unterschieden werden. Als Infrastructure as a Service (IaaS) werden Rechen-, Speicher-, Netzwerk- und weitere Basisressourcen zur Verfügung gestellt. Wenn die Infrastruktur darüber hinaus um eine Laufzeitumgebung inklusive des Betriebssystems erweitert wird, spricht man von Plattform as a Service (PaaS). Eine als Cloud-Service bereitgestellte Software stellt die vollständige Funktionalität einer Applikation als Software as a Service (SaaS) zur Verfügung (vgl. [6]). Die Erweiterung einzelner Applikationen als Cloud-Service zu zusammenhängenden Software-Umgebungen können in verschiedenen Formen auftreten und werden aufgrund ihres generalistischen Ansatzes als Anything oder Everything as a Service (XaaS) bezeichnet.

Die Verfügbarmachung von Funktionalitäten und Eigenschaften des Digitalen Zwilling für eine Vielzahl von Anwendungen kann durch die Erweiterung des XaaS Ansatzes um den Digital Twin as a Service (DTaaS) realisiert werden (vgl. Abb. 15.4).

Die servicebasierte Bereitstellung des Digitalen Zwilling (Englisch: Digital Twin-DT) wird durch eine Kombination von Microservices in drei IT-Funktionsebenen realisiert (vgl. Abb. 15.5):

- **DT Communication:** Die Kommunikation des Digitalen Zwilling wird durch eine Reihe von skalierbaren Microservices für verschiedene Kommunikationsprotokolle zur Verfügung gestellt. Zum einen sollen in der Ebene *DT Communication Web* die Daten des Digitalen Zwilling über HTTP und Websockets für verschiedene Dienste bereitgestellt werden und zum anderen sollen über die Ebene *DT Communication Assets* Microservices zur Verfügung stehen, die eine Verbindung zur OT-Ebene zu verschiedenen Assets aufbauen. Die Anbindung unterschiedlicher Assettypen und dadurch

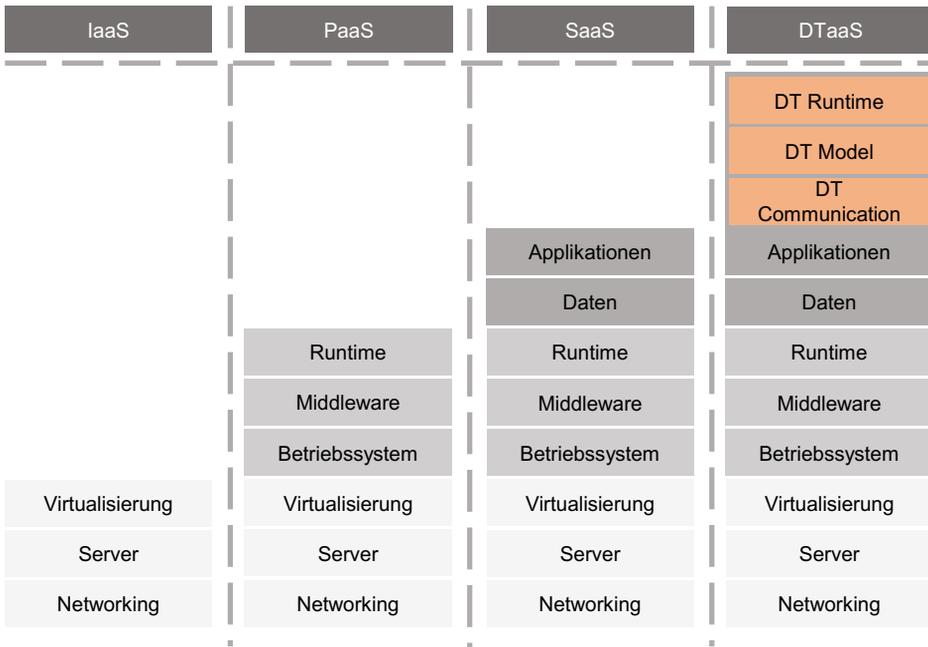


Abb. 15.4 Erweiterung des XaaS Ansatzes um den Digital Twin as a Service (DTaaS)

benötigter industrieller Protokolle (OPC UA, MQTT, ...) werden durch jeweils einen Microservice umgesetzt.

- **DT Model:** Diese Ebene stellt die Bestandteile der Digitalen Zwillinge auf Grundlage einer zentralen Beschreibung bereit. Diensten aus den Cloud- und Webtechnologien werden durch die zentrale Bereitstellung unterschiedliche Möglichkeiten des Zugriffs und der Bearbeitung ermöglicht. Die Digitalen Zwillinge umfassen unter anderem das Verhaltens- und Interaktionsmodell, die geometrischen Repräsentationen sowie das Mapping zwischen Modell und Realdaten von Assets.
- **DT Runtime:** Die *DT Runtime* führt den Digitalen Zwilling entsprechend des *DT Model* aus und etabliert über die Microservices der *DT Communication* die benötigte Kommunikation zu Assets und zu Anwendungen der Cloud- und Webtechnologien.

Abb. 15.5 zeigt den DTaaS Ansatz mit seinen Komponenten im Zusammenspiel mit Systemen und Technologien der Cloud- und Webtechnologien.

Die Interoperabilität zwischen Digitalen Zwillingen und den Cloud- und Webtechnologien ist über HTTP und Websockets in der *DT Communication Web* realisiert. So wird sichergestellt, dass die Digitalen Zwillinge innerhalb von Anwendungen der Cloud- und Webtechnologien weiterverwendet werden können und darüber hinaus auf einfache Weise erreichbar sind. Gleichzeitig kann der Funktionsumfang der Digitalen Zwillinge durch

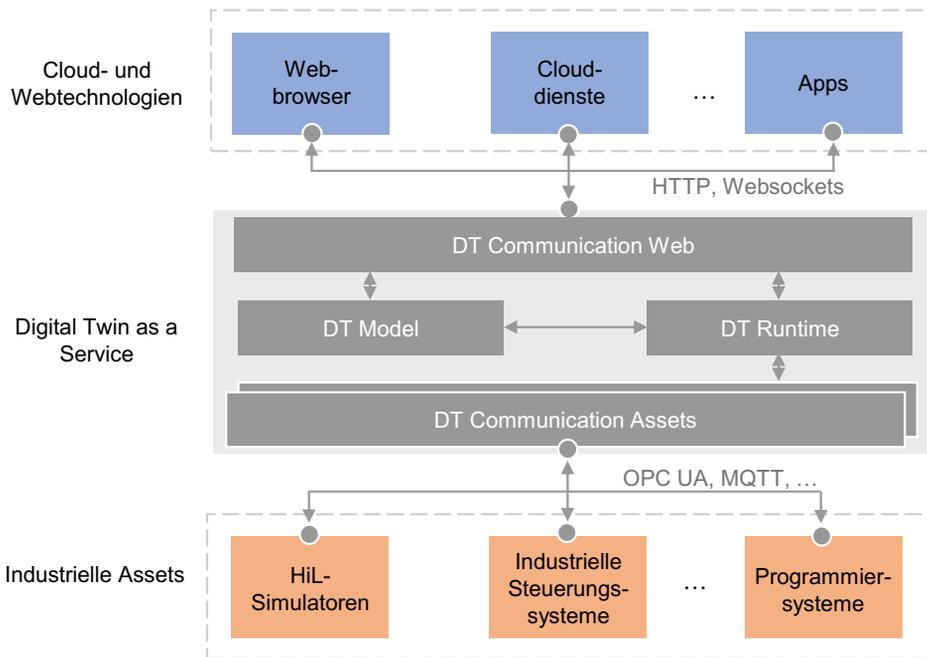


Abb. 15.5 Architektur des Digital Twin as a Service Ansatzes

verfügbare Dienste in der Cloud erweitert werden. Der DTaaS Ansatz bietet die Möglichkeit bestehende Systeme, wie Services in der Cloud, in einem Digitalen Zwilling zu vereinen und diesen damit zu erweitern.

15.3 Verfügbarmachung industrieller Assets für Cloud- und Webtechnologien

Basierend auf der im vorausgegangenen Abschnitt beschriebenen Interoperabilität zwischen Digitalen Zwillingen sowie Cloud- und Webtechnologien wird im Folgenden auf die Kommunikation mit industriellen Assets eingegangen.

Kommunikation industrieller Assets

Die industrielle Kommunikation zwischen Steuerungen, Sensoren und Aktoren erfolgt zumeist über Feldbusse, die nicht nur spezielle Schnittstellen zur Kommunikation, sondern auch spezielle Hardware erfordern. Zunehmend wird die Kommunikation der Assets auf Ethernet-basierte Computernetzwerke übertragen, die auf standardisierte Technologien setzen. Dabei geht im Kontext von Internet of Things (IoT)-Anwendungen der Trend zum

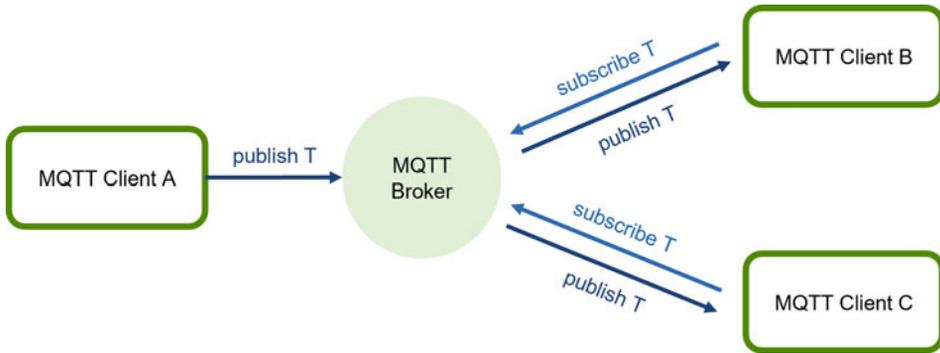


Abb. 15.6 MQTT Kommunikationsschema mit publish/subscribe Mechanismus

Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) Protokoll und insbesondere in industriellen Anwendungen vermehrt zum Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) Protokoll.

Das MQTT Protokoll findet vor allem Anwendung in der Machine-to-Machine Kommunikation (horizontal) und erfährt aufgrund geringer Latenzen und niedriger Bandbreitenanforderungen eine weite Verbreitung. Das Protokoll kommt aber auch für die Machine-to-Cloud Kommunikation (vertikal) zum Einsatz. Die Kommunikation des MQTT Protokolls folgt einem Publish/Subscribe Mechanismus nach dem Client-Server-Prinzip. Dabei steht der MQTT Broker als zentraler Server im Mittelpunkt der Kommunikation, zu dem MQTT Clients eine Verbindung aufbauen. Die Clients abonnieren in diesem Protokoll Topics (subscribe), die als Kanäle verstanden werden können, um Daten auf diesen zu empfangen. Im Beispiel in Abb. 15.6 sendet Client A ein Datenpaket unter Angabe eines Topic T an den Broker (publish). Client B und C haben das entsprechende Topic T beim Broker abonniert (subscribe). Das von Client A übermittelte Datenpaket wird anschließend vom Broker an die Clients B und C gesendet (publish).

Einen weiteren Kommunikationsstandard für Assets stellt OPC UA dar, der über den reinen Datenaustausch hinaus noch zahlreiche weitere Informationen des Assets bereitstellt. OPC UA zielt auf eine Machine-to-Machine Kommunikation (horizontal) ab, erlaubt aber gleichzeitig auch eine vertikale Vernetzung von Assets sowie zu unterschiedlichen Anwendungen in der Automatisierung wie zum Beispiel Leitsystemen. Die OPC UA Kommunikation erfolgt überwiegend nach dem Client-Server-Prinzip (vgl. Abb. 15.7). Assets können gleichzeitig Client und Server sein. Zur Bereitstellung von Daten wird die Serverrolle und zur Nutzung der Daten anderer OPC UA Teilnehmer wird die Rolle des Clients eingenommen. Damit beide Rollen eingenommen werden können, müssen diese auch entsprechend implementiert sein.

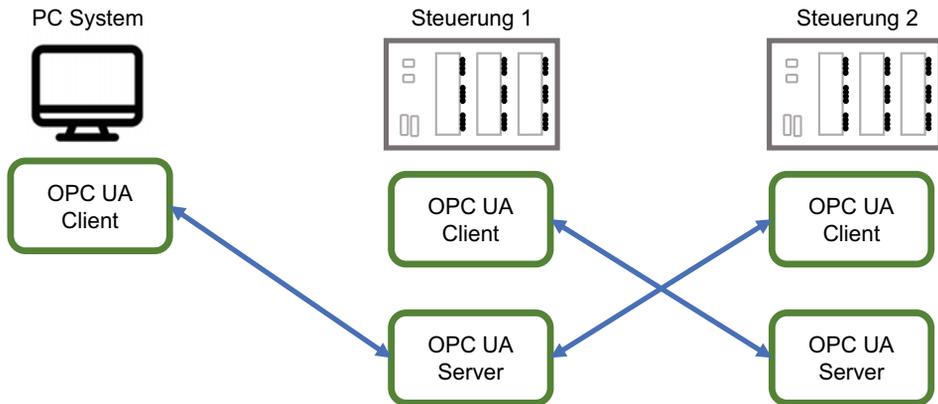


Abb. 15.7 OPC UA Client-Server-Prinzip mit unterschiedlichen Teilnehmern

Die OPC UA Spezifikation wird in 15 Teilspezifikationen beschrieben. Auszugsweise werden im Folgenden die wichtigsten Eigenschaften zum Datenaustausch zusammengefasst:

- **Security Model:** Die Spezifikation sieht eine verschlüsselte und somit sichere Kommunikation vor.
- **Information Model:** Das Information Model gibt Aufschluss über die verfügbaren Informationen und Funktionalitäten. Diese sind in einer Baumstruktur abgebildet. Die Baumknoten beschreiben eine Maschine oder Anlage über Objekte, Eigenschaften, Regeln, Funktionen und Ereignisse.
- **Data Access:** Das Information Model und die angebotenen Informationen sind über synchrone Standardfunktionen wie browse, read und write verfügbar. Mit den genannten Standardfunktionen können die Knoten und die über diese bereitgestellten Daten abgerufen und bearbeitet werden. Darüber hinaus ist ein Datenmonitoring über subscriptions vorgesehen, wobei die Daten asynchron zum Zeitpunkt der Änderung einer Variablen übertragen werden können. Die Datenübertragung findet über die zustandsbehaftete Kommunikation TCP statt und ermöglicht damit eine direkte Verbindung zwischen Client und Server (one-to-one).
- **PubSub:** Über das zustandlose User Datagram Protocol (UDP) wird eine voneinander unabhängige Verbindung von OPC UA Publisher und Subscriber möglich. Die OPC UA Publisher senden über Multicast Internet Protocol (IP)-Adressen Daten in ein Netzwerk (one-to-many). OPC UA Subscriber können die entsprechenden Datenströme empfangen, ohne eine direkte Verbindung zum OPC UA Publisher aufzubauen. Die Anforderung der Datenströme muss hierfür im Netzwerk bekannt gemacht werden.

Die darunterliegende Technologie der IP-Multicasts beschränkt sich auf lokal kontrollierte Subnetze, da ein Multicast in das Internet durch die Internet Service Provider eingeschränkt wird.

DTaaS mit Zugang zu industriellen Daten

Das DTaaS-Konzept ermöglicht durch den *DT Model Service* die Beschreibung des Digitalen Zwillings inklusive der Verknüpfung mit den für die jeweilige Anwendung benötigten Assetdaten. Darüber hinaus ist auch ein bidirektionaler Zugriff auf die Realdaten industrieller Assets durch Cloud- und Webdienste über die *DT Runtime* möglich. Für die Kommunikation mit industriellen Assets wird über die *DT Communication Assets* eine Abstraktionsschicht für die Einbindung verschiedener Kommunikationsprotokolle für Assets bereitgestellt. Demzufolge fungiert der DTaaS als abstrakte Middleware für die Kommunikation zwischen industriellen Assets und dem Digitalen Zwilling sowie weiteren Cloud- und Webanwendungen (vgl. Abb. 15.5). Der DTaaS als abstrakte Middleware führt zu den folgenden Vorteilen:

- **Reduktion der Kommunikationslast:**

Mit Datenverbindungen für m Anwendungsinstanzen des Digitalen Zwillings und n Assets ergeben sich über die Middleware insgesamt $n + m$ Kommunikationsschnittstellen. Würden die m Anwendungsinstanzen dagegen mit den n Assets jeweils one-to-one verbunden werden, wären $n \cdot m$ Kommunikationsschnittstellen erforderlich. Durch die Middleware ist nicht nur der Implementierungsaufwand für die Schnittstellen deutlich geringer, sondern auch die Kommunikationslast, da deutlich weniger Einzelverbindungen instanziiert werden müssen. Die Reduktion und die Begrenzung der Kommunikationslast für die Assets ist eine wichtige Eigenschaft, um den Digitalen Zwilling skalierbar zur Verfügung zu stellen. Eine one-to-one Verbindung mit mehreren Anwendungen kann außerdem bei leistungsschwachen Assets (z. B. industrielle Steuerungssysteme mit begrenzten Rechenressourcen) zu einer zu hohen Kommunikationslast führen und damit Störungen verursachen. Durch die Kontrolle des Kommunikationsflusses können redundante Abfragen gebündelt werden. Dies reduziert unter anderem den Aufwand, der in den Ausbau der lokalen Kommunikationsinfrastruktur investiert werden muss.

- **Zugriffsschutz:**

Der zentrale Zugriff erlaubt die Nutzung von Berechtigungskonzepten bei lesenden und schreibenden Zugriffen. Dieser Schritt ist unabdingbar zur Vermeidung von Missbrauch und einer unberechtigten Informationsbeschaffung, insbesondere von sensiblen technischen oder personenbezogenen Daten.

- **Übergang zur Echtzeitkommunikation:**

Die Bündelung von Datenströmen über eine zentrale Instanz erlaubt einen definierten Übergang von der Echtzeitkommunikation zur Nicht-Echtzeitkommunikation. Dabei können Daten bedarfsgerecht gepuffert und vorgefiltert bereitgestellt werden.

15.4 Realisierung einer Digital Twin as a Service Plattform

Am Virtual Automation Lab (VAL) der Hochschule Esslingen wird eine Digital Twin as Service Plattform (VAL DTaaS) entwickelt, welche auf den vorgestellten Konzepten basiert. Mit der VAL DTaaS können verschiedene Microservices kombiniert werden, sodass die Erstellung, der Betrieb und die Verfügbarmachung Digitaler Zwillinge standortübergreifend und endgeräteunabhängig ermöglicht wird.

Architekturübersicht der VAL DTaaS

Entsprechend der in Abb. 15.8 dargestellten Architekturübersicht besteht die VAL DTaaS aus verschiedenen internen Basisfunktionen, wie einer Benutzerverwaltung, der Verwaltung von Microservices und einfachen Diensten zum Speichern von Daten.

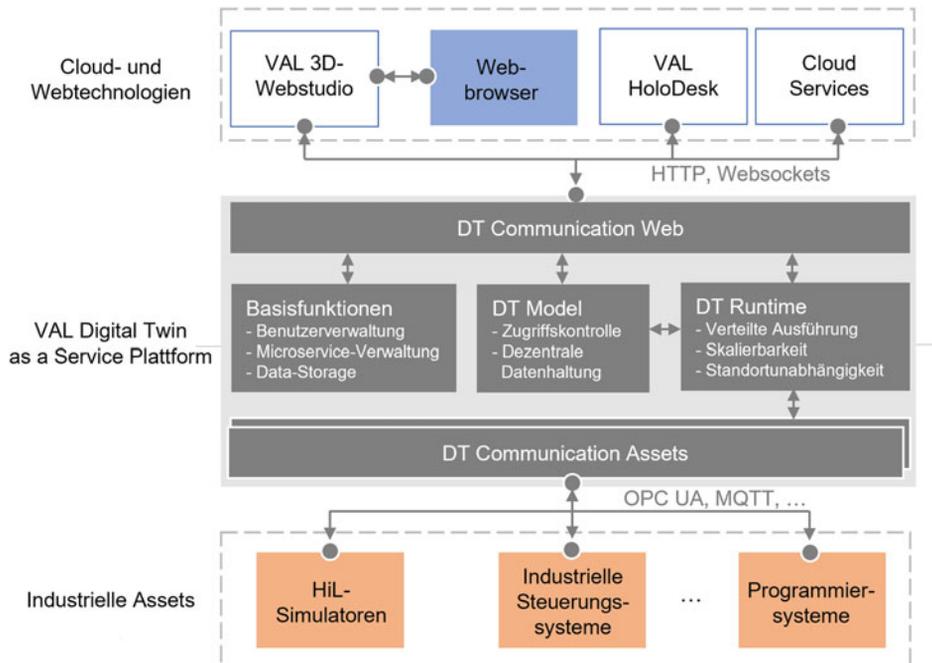


Abb. 15.8 Architekturbild der VAL Digital Twin as a Service Plattform (VAL DTaaS)

Durch die *DT Communication Assets* wird die Kommunikation über die unterstützten Protokolle (OPC UA, MQTT, ...) zu den industriellen Assets abstrahiert und über die einheitliche Schnittstelle *DT Communication Web* verfügbar gemacht. Zu integrierende Assets müssen in *DT Communication Assets* lediglich bekannt gemacht werden. Hierzu wird die Zugänglichkeit über eine IP-Adresse, das eingesetzte darunterliegende Protokoll und ein Zugangs-Port konfiguriert. Fortan stehen die Daten der Assets für Cloud- und Webanwendungen zur Verfügung. In der VAL DTaaS bündelt die *DT Communication Assets* protokollspezifische Anfragen identischer Informationen und sorgt damit für eine Reduktion des Kommunikationsaufwandes bei einzelnen Assets sowie für eine Reduktion der Kommunikationslast im Netzwerk. Darüber hinaus können Datenflüsse auch hinsichtlich vorhandener Zugriffsbeschränkungen limitiert werden.

Die *DT Model* und *DT Runtime* ermöglichen die Auslieferung an externe Dienste sowie Instanzierung und Ausführung eines Digitalen Zwillinges. Aufgrund der Microservice-Architektur kann die Plattform beliebig skaliert werden und lässt somit die gleichzeitige Nutzung durch eine Vielzahl von Anwendungen von unterschiedlichen Standorten zu.

Die benötigte Infrastruktur für die VAL DTaaS kann in Public Cloud oder in Edge Cloud Umgebungen zur Verfügung gestellt werden. Die Vorteile der Public Cloud liegen in der einfachen Verfügbarmachung und der Nutzung von schnell skalierbaren Ressourcen. In der Edge Cloud hingegen können aufgrund der lokalen Netzwerkinfrastruktur niedrigere Kommunikationslatenzen erreicht werden. Unter dem Einsatz von Time Sensitive Networking (TSN) kann dies bis zu einer deterministischen und echtzeitfähigen Kommunikation weiterentwickelt werden.

VAL 3D-Webstudio

Das VAL 3D-Webstudio stellt das User-Frontend zur Modellierung und Visualisierung der Digitalen Zwillinge auf der VAL DTaaS bereit. Es ist ein zentraler Webdienst um die geometrische Darstellung, die Verhaltensmodellierung und die Interaktionsmöglichkeiten zu erstellen und zu bearbeiten. Darüber hinaus ermöglicht das VAL 3D-Webstudio die Modellierung der Verknüpfungen zwischen Live-Daten der industriellen Assets mit den Szenenvariablen des Digitalen Zwillinges. Die Szenenvariablen dienen zur Manipulation von Objekteigenschaften zur Änderung von Eigenschaften zur Laufzeit des Digitalen Zwillinges. Das VAL 3D-Webstudio wird als browserbasierte Webanwendung bereitgestellt und ermöglicht damit eine standortunabhängige Modellierung und Visualisierung der Digitalen Zwillinge auf allen internetfähigen Endgeräten mit Webbrowsern. Für die Modellierung im VAL 3D-Webstudio können Geometriemodelle über verschiedene CAD Austauschformate importiert werden. Die integrierten Geometriemodelle lassen sich anschließend durch Definition von Freiheitsgraden kinematisieren und mit Szenenvariablen verbinden, sodass Objekteigenschaften (z. B. Position, Rotation oder Sichtbarkeit) in Abhängigkeit von Realdaten dynamisch beeinflusst werden. Die dynamischen Änderungen erfolgen auf Grundlage eines objektspezifischen Verhaltensmodells. Neben der

grafischen Modellierung in der 3D-Szene und über einen Objektbaum steht zur Programmierung spezifischer Modelleigenschaften ein browserbasierter JavaScript Code-Editor zur Verfügung.

Über die Beschreibung des Digitalen Zwillings hinaus wird im VAL 3D-Webstudio die Integration von Services aus externen Cloudplattformen ermöglicht. Die Anbindung erfolgt ebenfalls über den JavaScript Code-Editor, womit die Funktionen direkt in den Digitalen Zwilling integriert werden können.

Der auf diese Weise modellierte Digitale Zwilling wird aus dem *DT Model Service* abgerufen und anschließend in dem *DT Runtime Service* unter Berücksichtigung der Live-Daten industrieller Assets und Daten externer Microservices zyklisch zur Ausführung gebracht.

VAL HoloDesk

Der Digitale Zwilling inklusive der berechneten Daten kann während der Ausführung von externen Diensten abgerufen und weiterverarbeitet werden. So können Digitale Zwillinge mit der am Virtual Automation Lab der Hochschule Esslingen entwickelten VAL HoloDesk-App in einer Mixed Reality-Anwendung auf modernen Visualisierungsendgeräten (z. B. Virtual Reality (VR)-Brillen, Augmented Reality (AR)-Brillen, Tablets) genutzt werden. Über die VAL DTaaS kann das im VAL 3D-Webstudio erstellte Modell des Digitalen Zwillings an die VAL HoloDesk-App ausgeliefert und betrieben werden. Dabei bleiben alle Datenverbindungen zu den Assets bestehen. Somit ist beispielsweise eine steuerungsgekoppelte Visualisierung des Digitalen Zwillings einer Maschine oder Anlage über eine Virtual Reality-Brille oder Augmented Reality-Brille möglich.

15.5 Anwendungsbeispiele

Die VAL DTaaS ermöglicht durch die servicebasierte Bereitstellung des Digitalen Zwillings vielfältige Anwendungen über den gesamten Lebenszyklus einer Anlage hinweg. Im Folgenden sind ausgewählte Anwendungen zusammengefasst.

Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation (MRiLS)

Die Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation koppelt Visualisierungs- und Interaktionsmethoden der Mixed Reality mit Methoden der X-in-the-Loop Simulation (vgl. [7]) und eröffnet mit der servicebasierten Bereitstellung des Digitalen Zwillings durch den DTaaS Ansatz vielfältige Anwendungspotenziale während des gesamten Lebenszyklus der Anlage. Beispielsweise kann der Digitale Zwilling für die Virtuelle Inbetriebnahme, die Schulung sowie für das 3D-Monitoring eingesetzt werden. Der Digitale Zwilling kann dadurch flexibel auf verschiedenen Mixed Reality-Endgeräten (VR-Brillen, AR-Brillen, Tablets) bereitgestellt und einfach mit externen Simulationstools und/oder einer industriellen Steuerung einer realen Anlage gekoppelt werden.

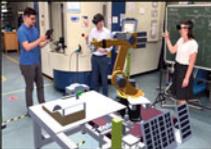
	Konstruktion und Planung	Virtuelle Inbetriebnahme	Schulung und Vertrieb	Daten-Monitoring
Mixed Reality-Szene				
Einsatzmöglichkeiten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Auslegung komplexer Kinematiken ▪ Realistisches Planungsszenario ▪ Standort- und Arbeitsraumplanung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (Steuerungs-) Programmierung ▪ Prozess- und Steuerungsoptimierung ▪ Maßstabstgetreue Visualisierung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bediener-schulung ▪ Verhalten in Störsituationen ▪ Standortübergreifende Kollaboration ▪ Präsentation und Vertrieb beim Kunden 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 3D Maschinen-Monitoring ▪ Fehleranalyse anhand eines 3D Modells

Abb. 15.9 Anwendungsmöglichkeiten der MRiLS basierend auf der VAL DTaaSP

Abb. 15.9 zeigt eine Übersicht ausgewählter Einsatzszenarien, die unter Verwendung der VAL DTaaSP umgesetzt wurden.

Sprachinteraktion mit einem Industrieroboter

Neben der immersiven Visualisierung und Bereitstellung des Digitalen Zwillings, ermöglicht der servicebasierte Ansatz der VAL DTaaSP eine intuitive Sprachinteraktion mit dem Digitalen Zwilling oder einer realen Anlage. Abb. 15.10 zeigt den beispielhaften Einsatz einer KI-basierten Sprachverarbeitung zur Kollaboration mit einem Digitalen Zwilling eines Kuka Knickarm-Roboters, der über eine Beckhoff-Steuerung betrieben wird. In der VAL DTaaSP steht ein entsprechender Digitaler Zwilling des Roboters zur Verfügung, der über OPC UA mit der Steuerung verbunden ist. Durch Sprachein- und ausgaben können Zustands- und Steuerungsinformationen des Roboters abgerufen werden. So kann der Anwender beispielsweise per Sprachbefehl den aktuell eingestellten Override abfragen. Dieser wird anschließend als Audio-Feedback an den Nutzer zurückgeliefert. Diese Erweiterung der Interaktionsmöglichkeiten um die Sprachinteraktion ist unter anderem zur Bedienerunterstützung und in Schulungsszenarien von zentraler Bedeutung, da beispielsweise komplizierte Menüführungen vereinfacht werden können und somit der visuelle Fokus nicht vom Ort des Geschehens abgelenkt werden muss.

Durch den DTaaS Ansatz ist die Umsetzung des Szenarios, also die Kopplung von Sprachverarbeitungsdiensten und industriellen Steuerungen, auf einfache Weise möglich. Die Anwendung wurde so gestaltet, dass der Anwender über das Mikrofon der AR-Brille Sprachbefehle absetzen kann. Die entstehende Audiosignalsequenz wird an Clouddienste zur Sprachverarbeitung (Google Cloud, Amazon AWS, Microsoft Azure, ...) übermittelt, dort mittels Speech-To-Text in einen String umgewandelt und wieder an die VAL DTaaSP

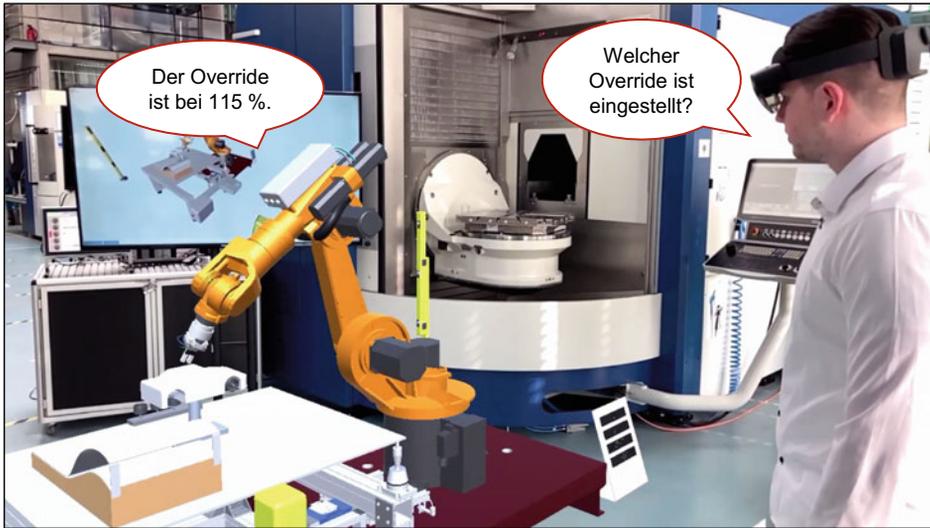


Abb. 15.10 Sprachinteraktion mit einem Industrieroboter unter Verwendung der VAL DTaaSP

zurückgegeben. Basierend auf den Strings werden die Befehle vom Digitalen Zwilling erkannt und weiterverarbeitet. So kann beispielsweise als Antwort eine Sprachausgabe erzeugt werden, indem die Antwort in Form eines Strings von der VAL DTaaSP generiert und an einen Sprachverarbeitungsdienst übermittelt wird, um dort mittels Text-To-Speech in ein Audiosignal umgewandelt zu werden. Das Audiosignal kann dann über die Lautsprecher der AR-Brille ausgegeben werden. Die VAL DTaaSP als Middleware erlaubt den einfachen Zugriff auf die Steuerungsdaten des Roboters und auf die externen Sprachverarbeitungsdienste. Gleichzeitig dient diese als Entwicklungs- und Ausführungsumgebung zur Umsetzung der Anwendungen, so dass weitere Clouddienste in die Umgebung einfach integriert werden können und somit bspw. unter Verwendung von Clouddiensten zur Sprachübersetzung eine integrierte Dolmetscherfunktion realisierbar wird.

Synthetische Trainingsdatenerzeugung

Kontextsensitives Einblenden von Informationen wie beispielsweise der Maschinen- und Prozess-Daten mittels AR ist eine weitere Assistenzfunktion, die durch das DTaaS-Konzept ermöglicht wird. Zu diesem Zweck ist es notwendig, dass die im Blickfeld des Nutzers befindlichen Maschinen- oder Anlagenkomponenten automatisch erkannt werden, um dem Nutzer die entsprechenden anlagenspezifischen Informationen anzeigen zu können. Die VAL DTaaSP ermöglicht dabei als Middleware den Zugriff auf maschinenspezifische Daten und verknüpft diese mit einem im Kamerabild der AR-Brille erkannten Objekt der Maschine oder Anlage. Zur Objekterkennung können bestehende Deep Learning Algorithmen eingesetzt werden.

Notwendige Bedingung für den Einsatz der Deep Learning Algorithmen zur Objekterkennung in Bildern oder Videosequenzen sind umfangreiche Trainingsdatensätze, in denen die Ausgangsdaten mit Objektklassen gelabelt sein müssen. Diese Datensätze anhand realer Bilder manuell zu labeln und aufzubauen ist sehr zeitintensiv und führt zwangsläufig zu kleinen Trainingsdatensätzen, was meist zu einer hohen Fehlerquote bei der Objekterkennung führt.

Zur Bewältigung dieser Problemstellung kann die VAL DTaaSP zur synthetischen Trainingsdatengenerierung eingesetzt werden [8]. Damit können Digitale Zwillinge von zu erkennenden Objekten für die synthetische Generierung von Bildern mit einer virtuellen 3D-Szene sowie das automatisierte Labeling genutzt werden. Der Prozess der Trainingsdatengenerierung kann mit diesem automatisierten Ansatz bedeutend beschleunigt und die Qualität sowie Reproduzierbarkeit der Trainingsdaten systematisch sichergestellt werden.

In Abb. 15.11 wird das Prinzip der synthetischen Trainingsdatengenerierung und der Objekterkennung mittels der VAL DTaaSP einer Anwendung zur Objekterkennung gezeigt. Anhand der VAL DTaaSP und dem darin modellierten Digitalen Zwilling des Roboters wird ein neuronales Netz als Microservice eingebunden und mit mehreren tausend synthetisch generierten und automatisch gelabelten Bildern trainiert. Das neuronale Netz benötigt zum Training keine realen Bilder des Roboters und erkennt diesen und seine Komponenten (annotiert in Abb. 15.11 rechts) mit sehr hoher Trefferquote.

Innerhalb der VAL DTaaSP können im VAL 3D-Webstudio Digitale Zwillinge auf einfache Weise ausgewählt und mit wenigen zu konfigurierenden Parametern dem Training eines neuronalen Netzes zugeführt werden. Durch die Verbindung von Digitalen Zwillingen mit Cloud- und Webtechnologien können die notwendigen Funktionen und

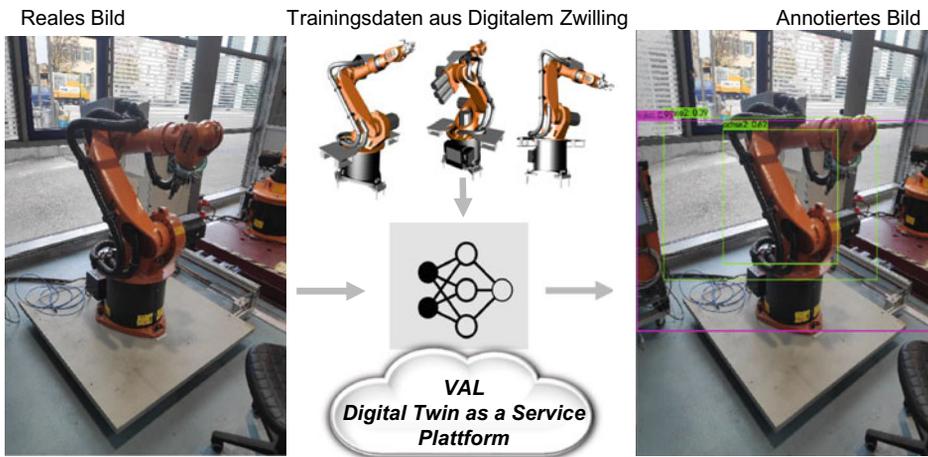


Abb. 15.11 Synthetische Trainingsdatenerzeugung aus dem Digitalen Zwilling für die Objekterkennung mit Deep Learning Algorithmen auf Basis der VAL DTaaSP

erforderlichen Hardwareressourcen für das Training neuronaler Netze auf einfache Weise instanziiert und bereitgestellt werden. Das trainierte neuronale Netz wird dem entsprechenden Digitalen Zwilling zugeordnet und kann anschließend über die Schnittstellen der VAL DTaaS abgerufen werden.

15.6 Zusammenfassung

Im Maschinen- und Anlagenbau entstehende Digitale Zwillinge bieten großes Anwendungspotenzial über die frühen Phasen des mechatronischen Entwicklungsprozesses hinaus. Die Verknüpfung von Digitalen Zwillingen mit modernen Cloud- und Webtechnologien wie Browsern, Webservern oder Clouddiensten bieten dabei wechselseitige Mehrwerte, die neue Anwendungspotenziale eröffnen. Beispiele sind die standort- und endgeräteunabhängige Verfügbarmachung von Digitalen Zwillingen über das Internet für Monitoring-Zwecke oder die Erweiterung von Digitalen Zwillingen um Sprachverarbeitungsdienste für virtuelle Schulungsszenarien. Der Beitrag beleuchtet dazu technologische Herausforderungen für die Verknüpfung zwischen Cloud- und Webtechnologien und den industriell geprägten Soft- und Hardwaresystemen des Anlagen- und Maschinenbaus. Das präsentierte Lösungskonzept der VAL Digital Twin as a Service Plattform erweitert Digitale Zwillinge um Kommunikations- und Serviceansätze der Cloud- und Webtechnologien und steigert damit die Verfügbarkeit und Vernetzungsfähigkeit von Digitalen Zwillingen. Die Tragfähigkeit des Digital Twin as a Service Ansatzes wird auf Basis der Anwendungsszenarien Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation, Sprachinteraktion und synthetische Trainingsdatenerzeugung für KI-Anwendungen dargestellt.

Literatur

1. Baun C, Kunze M, Nimis J, Tai S (2011) Grundlagen, Cloud Computing, Informatik im Fokus. Springer, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-18436-9_2
2. Berners-Lee T (1991) The original HTTP as defined in 1991. <https://www.w3.org/History/1989/proposal.html>. Zugegriffen: 1. Jul 2023
3. Berners-Lee T (1991) Information management: A proposal. <https://www.w3.org/History/1989/proposal.html>. Zugegriffen: 1. Jul 2023
4. Fielding RT (2000) Architectural styles and the design of networked-based software architectures – Dissertation. https://www.ics.uci.edu/~fielding/pubs/dissertation/fielding_dissertation_2up.pdf. Zugegriffen: 1. Jul 2023
5. Fette I, Melnikov A (2011) RFC 6455: The websocket protocol. <https://tools.ietf.org/pdf/rfc6455.pdf>. Zugegriffen: 1. Jul 2023
6. Mell P, Grance T (2011) The NIST definition of cloud computing – Recommendations of the National Institute of Standards and Technology – Special Publication 800–145, U.S. Department of Commerce

7. Hönig J, Schnierle M, Scheifele C, Spielmann T, Münster C, Roth A, Röck S, Verl A (2021) Mixed-reality-in-the-loop simulation von Produktionssystemen zur Aus- und Weiterbildung. *atp magazin* 63:6–7. Vulkan-Verlag. doi: 10.17560/atp.v63i6-7.2538
8. Fettahoglu T, Hönig J, Schnierle M, Röck S (2023) Synthetische Trainingsdatengenerierung und Objekterkennung mit Deep Learning für Mixed Reality-Anwendungen mit Digitalen Zwillingen, Tagungsband AALE 2023 - 19. Konferenz für Angewandte Automatisierungstechnik in Lehre und Entwicklung an Hochschulen, Luxemburg

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Marc Schnierle, Jana Hönig und Sascha Röck

Zusammenfassung

Der Einsatz von X-in-the-Loop Simulationsmethoden (XiLS) ermöglicht im mechatronischen Entwicklungsprozess die virtuelle Erprobung und Inbetriebnahme von Automatisierungssystemen im Maschinen- und Anlagenbau. Die daraus resultierenden Anwendungsfelder sind bislang hinsichtlich der Interaktion zwischen Mensch, realer Umgebung und Simulation stark limitiert. Diese Einschränkungen sollen durch die Erweiterung der XiLS-Methodenreihe um die sogenannte Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation (MRiLS) überwunden werden. Die MRiLS erweitert die Kopplung zwischen Steuerungsausprägung und Digitalem Zwilling unter Berücksichtigung der realen Umgebung und des Menschen durch moderne Visualisierungs- und Interaktionsmethoden der Mixed Reality. Diese Erweiterung eröffnet neue Anwendungspotenziale des Digitalen Zwillings über den gesamten Lebenszyklus einer Anlage hinweg.

16.1 Motivation

Der steigende Automatisierungsgrad gepaart mit immer kürzer werdenden Entwicklungszeiten erhöht die Anforderungen an den mechatronischen Entwicklungsprozess im Maschinen- und Anlagenbau. Die X-in-the-Loop Simulationsmethoden (XiLS) bilden einen Baustein, um diesen gewachsenen Anforderungen entsprechen zu können. Insbesondere die XiLS-Methoden zur virtuellen Erprobung und Inbetriebnahme von hochautomatisierten Maschinen und Anlagen ermöglichen durch die Parallelisierung von

M. Schnierle · J. Hönig · S. Röck (✉)

Virtual Automation Lab (VAL), Hochschule Esslingen, Esslingen, Deutschland

E-Mail: Sascha.Roeck@hs-esslingen.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Verl, S. Röck und C. Scheifele (Hrsg.),

Echtzeitsimulation in der Produktionsautomatisierung,

https://doi.org/10.1007/978-3-662-66217-5_16

Entwicklungsschritten und die frühzeitige Simulation von Störsituationen eine Verkürzung der Entwicklungsdauer und erfahren daher einen wachsenden Einsatz [1]. Dabei können die Testkonfigurationen Model-in-the-Loop Simulation (MiLS), Software-in-the-Loop Simulation (SiLS) und Hardware-in-the-Loop Simulation (HiLS) unterschieden werden [2], die jeweils durch die Kopplung einer Steuerungsausprägung mit einem Digitalen Zwilling der Anlage oder einer Anlagenkomponente charakterisiert sind. Bei der MiLS wird ein Modell der Steuerung, indem die Steuerungsfunktionen hinterlegt sind, gegen den Digitalen Zwilling der Anlage getestet. Als Erweiterung wird in einer SiLS die auf dem Modell der Steuerung aufbauende Steuerungssoftware eingebunden. Die HiLS bezieht darüber hinaus zusätzlich die Zielhardware der Steuerung ein, die in der Regel über einen industriellen Feldbus mit einem echtzeitfähigen Digitalen Zwilling gekoppelt ist. Während sich die Testkonfigurationen durch die Ausprägungsstufe von Steuerung und Digitalem Zwilling unterscheiden, ist die konzeptionelle Architektur kongruent.

In der bisherigen Anwendung der oben beschriebenen Testkonfigurationen lassen sich jedoch folgende Defizite identifizieren:

- **Exozentrische Visualisierung des Digitalen Zwillings**

Die Visualisierung des Digitalen Zwillings erfolgt überwiegend in einer zweidimensionalen und vom Betrachter unabhängigen (exozentrischen) Projektion dreidimensionaler Objekte auf einem Computerbildschirm. Durch diese Projektion gehen Tiefeninformationen für das stereoskopische Sehen des Menschen verloren und die räumliche Wahrnehmung wird stark beeinträchtigt. Damit verhindert die exozentrische Visualisierung die vollständige Integration des Menschen in den Simulationskreislauf sowie eine stufenlose visuelle Verschmelzung von Realität (z.B. Umgebung und Mensch) und Virtualität (Digitaler Zwilling).

- **Beschränkte intuitive Interaktion des Menschen**

Neben den Limitierungen der Visualisierung kann der Mensch und dessen Verhalten bislang nur sehr reduziert in die Simulation einbezogen werden, zum Beispiel durch Interaktionen mit Maus und Tastatur. Eine intuitive Interaktion und Exploration in der Simulationsszene sind bislang nicht möglich.

- **Fehlende Multiuser-Kollaboration**

XiLS-Anwendungen werden überwiegend in isolierten Einzelarbeitsplatzsystemen ausgeführt, die eine Zusammenarbeit mehrerer Benutzer in einer Simulationsszene ausschließen. Dies umfasst neben der Multiuser-Kollaboration in einem lokalen System auch die Zusammenarbeit über Standorte hinweg.

Zur Lösung der beschriebenen Defizite stellt dieser Beitrag die Methode der Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation (MRiLS) als Erweiterung der XiLS-Methodenreihe vor (siehe Abb. 16.1). Die MRiLS vereint moderne Visualisierungsmethoden z. B. der

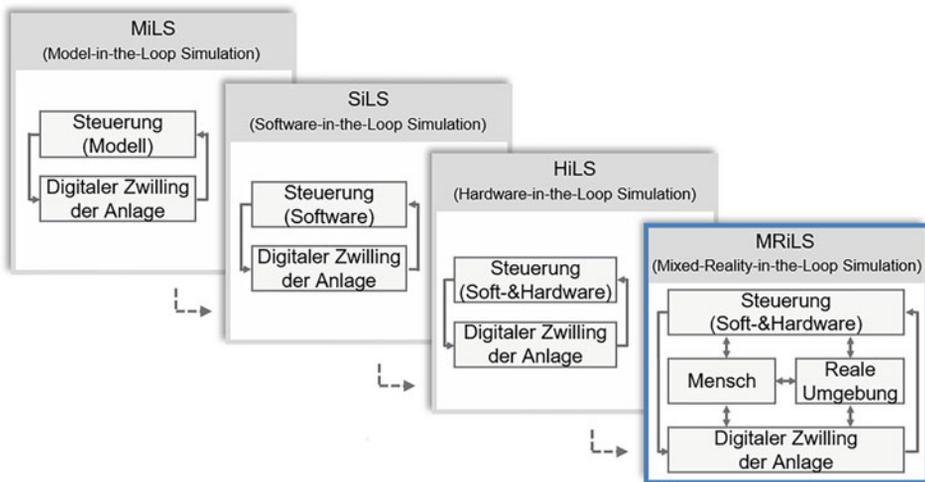


Abb. 16.1 Erweiterung der XiLS-Methodenreihe um die Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation (MRiLS)

Augmented Reality (AR) oder Virtual Reality (VR) mit Interaktionsmethoden wie Gestensteuerung oder haptischem Feedback, um ein möglichst intensives Präsenzgefühl beim Nutzer in der virtuellen Szene zu erzielen. Damit wird eine stufenlose Kombination von Realität und Virtualität sowie die vollständige Integration des Menschen in den Simulationskreislauf ermöglicht.

Einführendes Beispiel

Nachfolgend ist das Konzept der MRiLS am Beispiel der Roboterprogrammierung für eine Sondermaschine dargestellt (siehe Abb. 16.2).

Im Beispiel sind die reale Steuerung und große Teile der realen Anlage um den Digitalen Zwilling eines Handhabungsroboters (zur deutlichen Erkennbarkeit in Abb. 16.2 grün eingefärbt) ergänzt. Der Digitale Zwilling wird durch die reale Steuerung betrieben und den Nutzern über Mixed Reality-Brillen als Erweiterung in der realen Umgebung vom Betrachter abhängig (egozentrisch) visualisiert. Die Nutzer nehmen den Digitalen Zwilling in der realen Umgebung verankert wahr, können Abstände räumlich präzise abschätzen, Kollisionen mit realen Anlagenkomponenten erkennen und mittels Gestensteuerung manipulieren. Durch die egozentrische Visualisierung und die intuitive Interaktion werden die Nutzer vollständig in den Simulationskreislauf der MRiLS integriert. Diese Eigenschaften ermöglichen Inbetriebnahme- oder Planungsprozesse im Kontext der realen Umgebung. Gegenüber der hier im Beispiel exemplarisch dargestellten Konfiguration der MRiLS mit einem hohen Anteil an realen Komponenten sind auch



Abb. 16.2 Konzept der Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation am Beispiel einer Sondermaschine

Ausprägungsstufen mit einem höheren Anteil an virtuellen Komponenten bis hin zur vollständig virtuellen Szene möglich, die besonders für Anwendungen im Engineering, der Mitarbeiterschulung oder dem Vertrieb geeignet sind.

Immersion und Präsenzgefühl

Eine wichtige Basis für die skizzierte Integration des Menschen in den XiLS-Kreislauf ist die Immersion und das resultierende Präsenzgefühl. Die Immersion ist eine objektiv bewertbare Fähigkeit eines Systems, dem Nutzer eine umfassende, umgebende und lebendige Illusion der Realität zu vermitteln [3, 4]. Ein hoher Grad an Immersion wird erreicht, wenn dem Nutzer die Umgebung basierend auf seinem Standort und seiner Orientierung realitätsnah präsentiert wird und synthetische Stimuli für alle relevanten Sinne als Reaktion auf seine Position und Aktionen bereitgestellt werden [4]. Die Präsenz oder das Präsenzgefühl ist die menschliche Reaktion auf diese Immersion und beschreibt den subjektiven Bewusstseinszustand und das psychologische Gefühl, sich tatsächlich in der virtuellen Umgebung zu befinden [3, 5]. Ein System mit definiertem Immersionsgrad ruft bei Nutzern unterschiedliche subjektive Intensitäten des Präsenzgefühls hervor [6]. Das Präsenzgefühl umfasst neben der Ortsillusion (Gefühl an einem real erscheinenden Ort zu sein) und der Plausibilitätsillusion (Umgebung reagiert so, wie der Nutzer es erwartet) auch die Repräsentation des eigenen Körpers als Überschneidung dieser beiden Illusionen [7]. Die Repräsentation des eigenen Körpers hat dabei direkten Einfluss auf die Ortsillusion (Nutzer wird an dem Ort dargestellt, an dem er sich auch wahrnimmt) und die Plausibilitätsillusion (virtuelle Repräsentation bewegt sich synchron zu eigenen Gliedmaßen).

Leitziele für die MRiLS

Zur Erreichung eines hohen Präsenzgefühls des Menschen im Simulationskreislauf strebt die MRiLS folgende Leitziele an (siehe Abb. 16.3):

- **Egozentrische realzeitsynchrone Visualisierung**

Zur Steigerung des Immersionsgrads soll die geometrische Repräsentation des Digitalen Zwillings egozentrisch und auf die Umgebung zeitsynchronisiert visualisiert werden. Diese nutzerabhängige Darstellung des Digitalen Zwillings erhöht das räumliche Präsenzgefühl, da die visualisierte Perspektive im Bezug zur Blickrichtung des Nutzers kontinuierlich angepasst wird. Dies beinhaltet eine aus Nutzersicht stabile Verankerung der virtuellen Objekte in Bezug auf den Ort und die Zeit sowohl an statischen als auch an dynamischen Objekten der realen Umgebung und eine perspektivisch korrekte Darstellung der virtuellen Objekte in der realen Umgebung.

- **Intuitive multimodale Mensch-Modell-Interaktion**

Für ein hohes Präsenzgefühl des Nutzers in einer MRiLS muss eine intuitive und multimodale Interaktion mit dem Digitalen Zwilling erreicht werden. Dafür müssen alle für das Szenario relevanten menschlichen Sinne durch Interaktionseingaben (z.B. Controller, oder Gesten- & Sprachsteuerung) sowie Interaktionsausgaben (z.B. auditives oder haptisches Feedback) angesprochen werden. Der entstehende Interaktionskreislauf erfordert zudem intuitive Interaktionsmechanismen im Digitalen Zwilling, um die plausible Reaktion des Digitalen Zwillings auf Nutzerinteraktionen sicherzustellen.

- **Multiuser-Kollaboration**

Die informationstechnische Vernetzung mehrerer Nutzer soll die Zusammenarbeit in einer gemeinsamen Simulationsszene erlauben. Der Digitale Zwilling muss für alle Nutzer in einem gemeinsamen Koordinatensystem positioniert und über verschiedene Endgeräte angezeigt werden. Bei standortübergreifenden Multiuser-Kollaborationen müssen Nutzer zudem wechselseitig durch Avatare visualisiert werden.



Abb. 16.3 Leitziele der Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation

In den nachfolgenden Abschnitten werden diese drei Leitziele sowie Aspekte zu deren Erreichung detaillierter beleuchtet.

16.2 Egozentrische realzeitsynchrone Visualisierung

In konventionellen Anwendungen der XiLS werden wie eingangs dargestellt die dreidimensionalen Geometrieobjekte der Digitalen Zwillinge exozentrisch auf Computerbildschirmen projiziert. Im Gegensatz hierzu ermöglichen moderne Visualisierungsmethoden der Mixed Reality, wie Augmented Reality oder Virtual Reality, eine dreidimensionale egozentrische Visualisierung der Digitalen Zwillinge in der realen Umgebung (siehe Abb. 16.4).

Die stufenlose Kombination der Realität und Virtualität zu einem Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum mittels moderner Visualisierungstechnologien kann entsprechend Abb. 16.5 in vier Hauptkategorien der Mixed Reality (MR) gegliedert werden.

Die reale Umgebung (RE – Real Environment) enthält ausschließlich physisch existierende Elemente, während die virtuelle Realität (VR – Virtual Reality) vollständig aus computergenerierten Elementen aufgebaut ist. Zwischen diesen beiden Extremen liegen zwei Mischformen, die entsprechend dem Anteil von Realität und Virtualität unterschieden werden. Bei der erweiterten Realität (AR – Augmented Reality) überwiegen die realen Komponenten (z. B. virtueller Roboter in realer Fertigungszelle), während bei der erweiterten Virtualität (AV – Augmented Virtuality) die virtuellen Komponenten dominieren (z. B. reale Hände im vollständig virtuellen Raum).

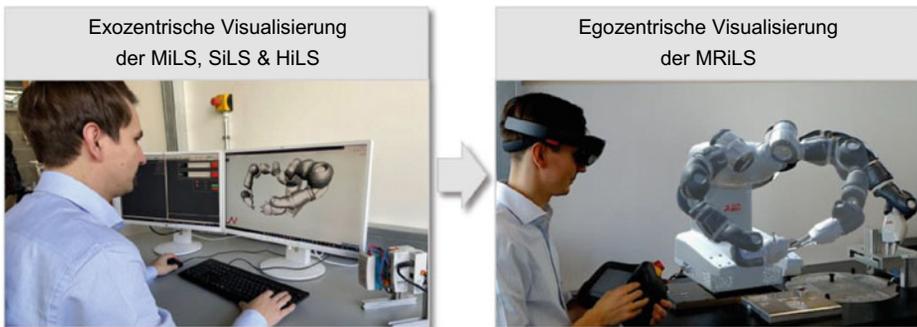


Abb. 16.4 Erweiterung der exozentrischen zweidimensional projizierten Visualisierung zu einer egozentrischen dreidimensionalen Perspektive bei der MRiLS

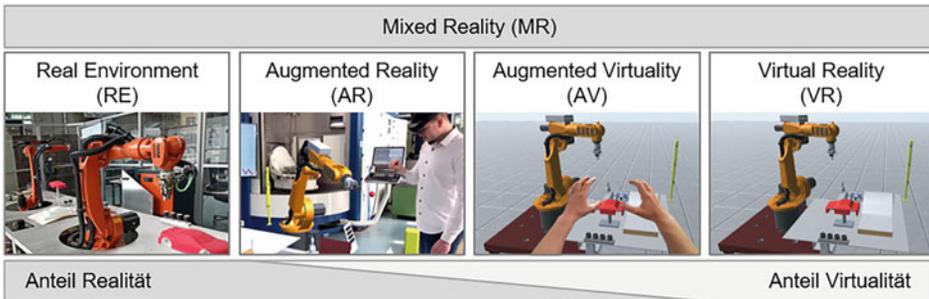


Abb. 16.5 Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum in Anlehnung an Milgram et al. [8]

Ausgabegeräte zur egozentrischen Visualisierung

Im Vergleich zur konventionellen Visualisierung auf Computerbildschirmen erfolgt die visuelle Ausgabe in der MRiLS in unterschiedlichen Konfigurationen des Realitäts-Virtualitäts-Kontinuums. Hinsichtlich der dafür einsetzbaren Endgeräte kann auf Entwicklungen der Gaming-Industrie in den Bereichen der Head-Mounted-Displays (HMD) und der Handheld-Geräte zurückgegriffen werden. HMD-Endgeräte wie beispielsweise AR- und VR-Brillen werden unmittelbar vor dem Auge getragen (siehe Abb. 16.6).

Die Grundlage der immersiven Visualisierung bildet das stereoskopische Sehvermögen des Menschen. Ein betrachtetes Objekt wird von jedem Auge mit einem geringfügig unterschiedlichen Winkel wahrgenommen und das menschliche Gehirn verarbeitet diese beiden perspektivischen Seheindrücke zu einem dreidimensionalen Bild. Aus der Kombination dieser perspektivischen Seheindrücke resultiert das räumliche Sehen sowie die Tiefenwahrnehmung des Menschen [9]. Dieses Wirkprinzip wird in HMD-Endgeräten mit stereoskopischer Visualisierung durch separate Bildanzeigen pro Auge ausgenutzt. Neben den AR- und VR-Brillen können auch Handheld-Geräte wie Tablets oder Smartphones zur egozentrischen Visualisierung zum Einsatz kommen, bei denen jedoch durch die monoskopische Visualisierung keine Tiefeninformationen dargestellt werden können.

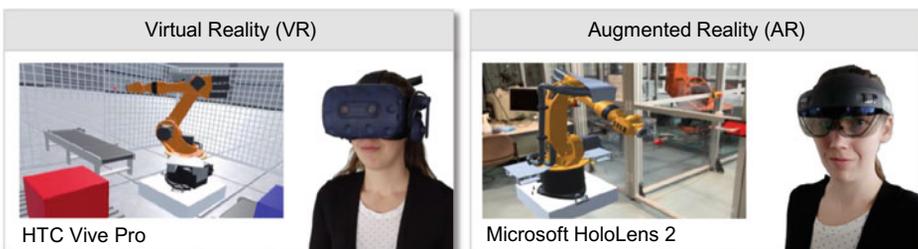


Abb. 16.6 Ausgewählte Head-Mounted-Displays für Virtual Reality und Augmented Reality

Neben der Unterscheidung zwischen stereoskopischer und monoskopischer Visualisierung ist bei Augmented Reality-Endgeräten zusätzlich zwischen dem Optical-See-Through Prinzip und dem Video-See-Through Prinzip zu differenzieren. Bei Optical-See-Through-Endgeräten (z. B. Microsoft HoloLens) betrachtet der Nutzer die reale Umgebung durch eine transparente Projektionsfläche. Die virtuellen Objekte werden auf die Projektionsfläche und somit in das reale Sichtfeld des Nutzers projiziert. Bei Video-See-Through-Endgeräten (z. B. Tablet) wird die Außenwelt über Kameras aufgenommen, mit virtuellen Objekten ergänzt und dem Nutzer über die Endgerätedisplays angezeigt. Die Wahrnehmung der realen Welt erfolgt in diesem Fall nicht mit der menschlichen Sehauflösung wie bei Optical-See-Through-Endgeräten, sondern mit der Kamera- bzw. Displayauflösung.

Egozentrische Positionierung der virtuellen Komponenten

Die egozentrische Visualisierung in einer MRiLS muss sich im Gegensatz zur exozentrischen Visualisierung auf eine Änderung der Blickrichtung des Nutzers adaptieren, um die korrekte Position und Perspektive des Digitalen Zwillings aus Sicht des Nutzers anzeigen zu können (siehe Abb. 16.7).

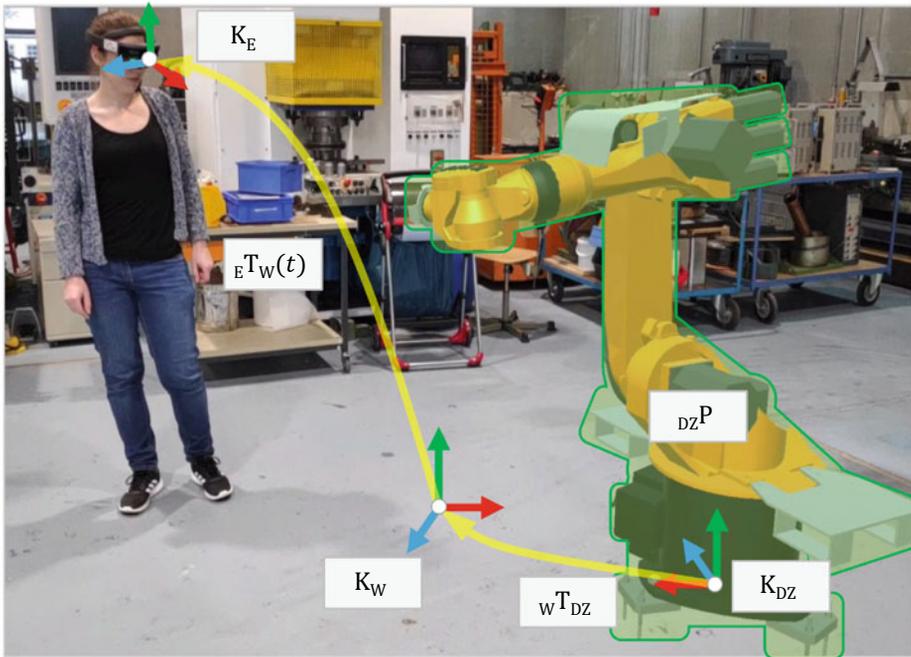


Abb. 16.7 Egozentrische Visualisierung virtueller Anlagenkomponenten in einer MRiLS

Die dafür zu visualisierenden Geometrieobjekte (engl. Meshes) des Digitalen Zwillings können als Matrix ${}_{DZ}P$ mit Geometrieknoten (engl. Vertices) in homogenen Koordinaten im Koordinatensystem K_{DZ} des Digitalen Zwillings beschrieben werden:

$${}_{DZ}P = [p_1, \dots, p_n] \text{ mit } p_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (16.1)$$

Um die Meshes ${}_{DZ}P$ des Digitalen Zwillings im sich dynamisch bewegenden Sichtfeld des Nutzers perspektivisch korrekt darzustellen, muss ${}_{DZ}P$ in jedem Visualisierungstakt aus dem Koordinatensystem K_{DZ} des Digitalen Zwillings in das Koordinatensystem K_E des bewegten Endgeräts transformiert werden.

Für die räumliche Transformation der Meshes ${}_{DZ}P$ von K_{DZ} nach K_E ist die homogene Transformationsmatrix ${}_{E}T_{DZ} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ erforderlich. Diese setzt sich aus der Transformation ${}_{W}T_{DZ}$ vom Objektkoordinatensystem K_{DZ} in das Weltkoordinatensystem K_W und der zeitvarianten Transformation ${}_{E}T_W(t)$ von K_W in das Endgerät-Koordinatensystem K_E zusammen (vgl. Abb. 16.7):

$${}_{E}T_{DZ}(t) = {}_{E}T_W(t) \cdot {}_{W}T_{DZ} = \begin{bmatrix} {}_{E}R_{DZ} & {}_{E}\vec{p}_{DZ} \\ [0,0,0] & [1] \end{bmatrix}. \quad (16.2)$$

Die Rotationsmatrix ${}_{E}R_{DZ} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ beschreibt die Rotation und der Ortsvektor ${}_{E}\vec{p}_{DZ} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ die Position von K_{DZ} in K_E . Die Transformationsmatrizen ${}_{E}T_W(t)$ und damit ${}_{E}T_{DZ}(t)$ sind zeitabhängig, da der Nutzer seine Position und Orientierung im Raum und somit die Position und Orientierung zum ortsfesten Weltkoordinatensystem K_W fortlaufend ändert.

Mithilfe von ${}_{E}T_{DZ}(t)$ können die Meshes ${}_{DZ}P$ des Digitalen Zwillings in das Koordinatensystem K_E des Endgeräts transformiert werden:

$${}_{E}P(t) = {}_{E}T_{DZ}(t) \cdot {}_{DZ}P = {}_{E}T_W(t) \cdot {}_{W}T_{DZ} \cdot {}_{DZ}P. \quad (16.3)$$

Für die kontinuierliche Bestimmung der zeitabhängigen Transformationsmatrix ${}_{E}T_W(t)$ wird die Position und Orientierung des Endgeräts über Trackingsysteme ermittelt, die sich hinsichtlich der Trackingmethoden in Outside-In und Inside-Out Systeme klassifizieren lassen.

Bei Outside-In Trackingsystemen befindet sich die Tracking-Logik nicht im Endgerät, sondern in einem externen System (z. B. im Raum installiertes Kamerasystem). Das getrackte passive Objekt hat dabei keine unmittelbare Kenntnis über seine Position [9]. Diese Art des Trackings erfordert zwingend eine gerätetechnische Ausstattung im Raum und eignet sich daher insbesondere für stationäre Aufbauten.

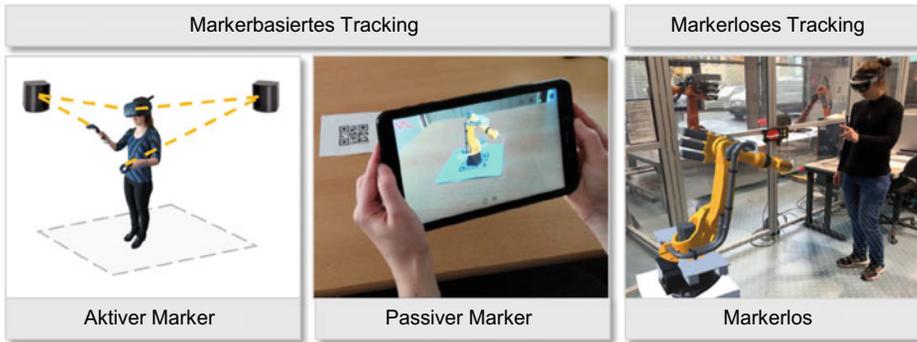


Abb. 16.8 Markerbasiertes und markerloses Tracking bei Inside-Out-Verfahren

Im Gegensatz hierzu stehen Methoden des Inside-Out Trackings, bei denen das Endgerät seine Positionsdaten über Referenzen in der Umgebung selbst ermittelt [9, 10]. Dabei ist zwischen markerbasierten und markerlosen Trackingverfahren zu differenzieren. Bei markerbasierten Verfahren können sowohl aktive als auch passive Marker eingesetzt werden. Ein Beispiel für aktive Marker sind Infrarot-basierte Systeme (siehe Abb. 16.8 links), bei denen Basisstationen als Infrarot-Marker fungieren und paarweise Laserstrahlen aussenden, die auf die Sensorik des Headsets treffen (z. B. HTC Lighthouse Technologie). Aus der zeitlichen Differenz der auftreffenden Laserstrahlen ermittelt das Endgerät seine Position im Raum.

Im Gegensatz hierzu werden passive Marker wie Muster- oder QR-Codes bildverarbeitend erkannt und als Referenzpunkt genutzt (siehe Abb. 16.8 Mitte). Während markerbasierte Verfahren aktive oder passive Marker im Raum benötigen, werden beim markerlosen Tracking (siehe Abb. 16.8 rechts) Merkmale der Umgebung im Endgerät zur Positionsbestimmung genutzt (z. B. Microsoft HoloLens).

Datengetriebene Bewegung virtueller Komponenten

Die egozentrische Visualisierung und die dafür notwendige kontinuierliche Transformation der statischen Meshes $_{DZ}P$ in das Endgeräte-Koordinatensystem K_E bilden die Grundlage für die Visualisierung einer MRiLS. Über diese Basis hinaus ist die Integration von industriellen Steuerungsdaten in jedem Visualisierungstakt der MRiLS von zentraler Bedeutung. Die MRiLS soll Positionsdaten von industriellen Steuerungssystemen mit den kinematischen Freiheitsgraden des Digitalen Zwillings verknüpfen und damit Anwendungen, wie die eingangs dargestellte Roboterprogrammierung, ermöglichen. Die datengetriebene Transformation der Geometrieobjekte innerhalb des Koordinatensystems K_{DZ} führt dabei zu zeitvarianten Meshes $_{DZ}P(t)$ und es gilt:

$$\begin{aligned} {}_{DZ}P(t) &= [{}_{DZ}T_{O1}(t) \cdot {}_{O1}P, {}_{DZ}T_{O2}(t) \cdot {}_{O2}P, \dots, {}_{DZ}T_{On}(t) \cdot {}_{On}P] \\ {}_E P(t) &= {}_E T_W(t) \cdot {}_W T_{DZ} \cdot {}_{DZ}P(t) \end{aligned} \quad (16.4)$$

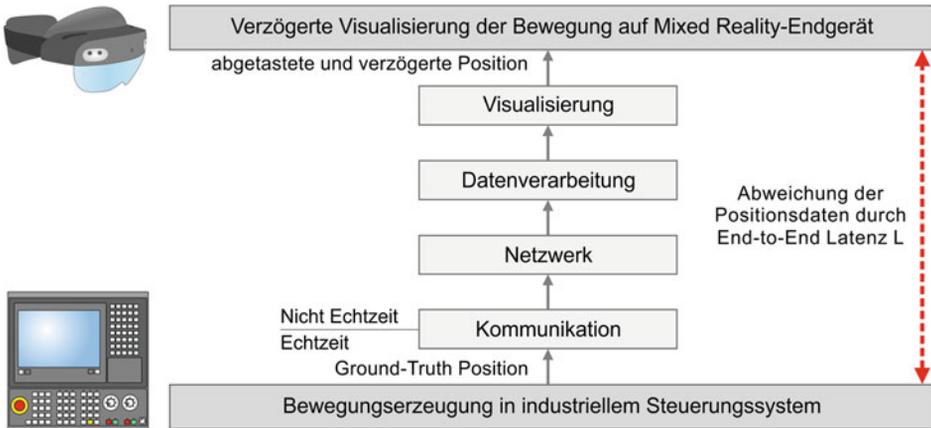


Abb. 16.9 Übertragungsweg von dem industriellen Steuerungssystem zum Mixed Reality-Endgerät in einer MRiLS

${}_{01}P, {}_{02}P, \dots, {}_{0n}P$ stellen die einzelnen Geometrieknoten der bewegten Meshes innerhalb des Digitalen Zwillings dar, die jeweils aus dem körperfesten Objektkoordinatensystem K_{O_i} in das Koordinatensystem des Digitalen Zwillings K_{DZ} transformiert werden. Der kinematische Freiheitsgrad des jeweiligen Objekts führt zu zeitvarianten Transformationsmatrizen ${}_{DZ}T_{O_i}(t)$ und damit zu zeitvarianten Meshes ${}_{DZ}P(t)$.

Positionierungsfehler durch Latenz- und Abtastvorgänge

Die in ${}_{DZ}P(t)$ einfließenden Steuerungsdaten unterliegen auf dem Übertragungsweg vom industriellen Steuerungssystem zum Mixed Reality-Endgerät verschiedenen Latenz- und Abtastvorgängen, die zu einer Abweichung zwischen visualisierten und auf dem Steuerungssystem erzeugten Positionsdaten führen (siehe Abb. 16.9).

Die Abtastraten und Netzwerklatenzen der Kommunikation, Datenverarbeitungszeiten sowie die Visualisierungslatenz des Endgeräts resultieren in einer sogenannten End-to-End Latenz L zwischen Steuerungssystem und Mixed Reality-Endgerät. Die End-to-End Latenz eines Mixed Reality-Systems bezeichnet die Zeitspanne von der Entstehung einer Information im Steuerungssystem bis zu deren Visualisierung auf dem Endgerät [11]. Durch schwankende Netzwerkauslastungen, dynamische Verarbeitungszeiten und Schwebungseffekte durch diskrete Mehrfachabtastungen ist in einer MRiLS von zeitvarianten End-to-End Latenzen auszugehen.

Abb. 16.10 zeigt die durch die End-to-End Latenz auftretende Positionsabweichung zwischen den visualisierten Positionsdaten auf dem Endgerät und der tatsächlichen Position eines Roboters (Ist-Positionen vom Steuerungssystem) am Anwendungsbeispiel einer MRiLS in Augmented Reality-Konfiguration. Das Szenario erweitert eine reale Roboterkinematik um einen virtuellen Greifer (zur besseren Erkennbarkeit grün eingefärbt und

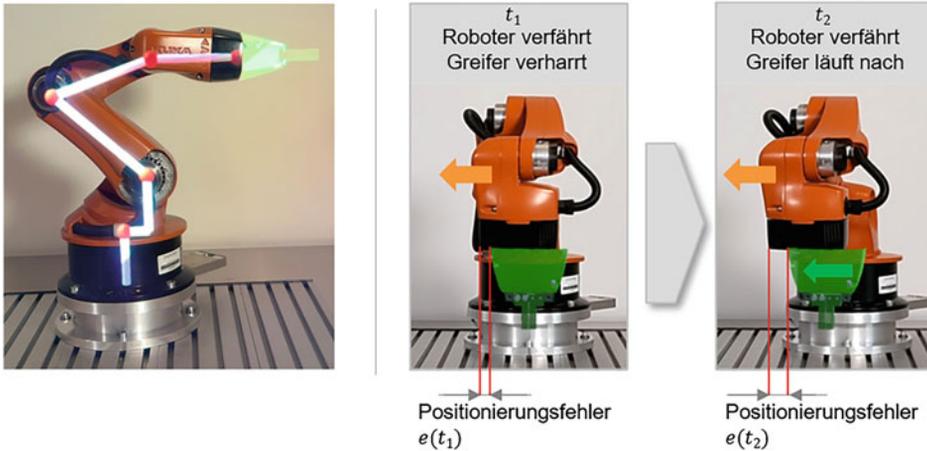


Abb. 16.10 Positionierungsfehler virtueller Anlagenkomponenten durch Latenz- und Abtasteffekte

durch das virtuelle Kinematikmodell des Roboters ergänzt), der mithilfe eines markerbasierten passiven Trackingsystems und einer kinematischen Vorwärtstransformation am Endeffektor des realen Roboters positioniert wird. Bei einer Achsbewegung der Roboterkinematik entstehen Positionierungsfehler $e(t)$ zwischen realer und virtueller Kinematik (siehe Abb. 16.10, Zeitpunkte t_1 und t_2), da der virtuelle Greifer durch die End-to-End Latenz der Positionsänderung der realen Roboterkinematik nur verzögert folgen kann.

Diese Positionsabweichungen schränken zum einen das Präsenzgefühl des Nutzers ein und limitieren zum anderen die Anwendbarkeit der MRiLS für industrielle Anwendungsszenarien in der Produktionsautomatisierung. Aus diesem Grund ist eine Kompensationsmethode zur Reduktion des auftretenden Positionierungsfehlers $e(t)$ eine notwendige Bedingung für den praxisorientierten Einsatz der MRiLS. Eine ausführliche Beschreibung dieser nachfolgend in Kurzform dargestellten Methode kann in [12] nachgelesen werden.

Kompensationsmethode für die Positionierungsfehler

Das Prinzip zur Reduktion der auftretenden Positionierungsfehler ist an einem exemplarischen Positionsverlauf einer Roboterachse in Abb. 16.11 dargestellt. Der zum Zeitpunkt t_k auf der Steuerung erzeugte Positionswert $s(t_k)$ wird um die Latenz L_k verzögert auf dem Endgerät zum Zeitpunkt $t_{k,L} = t_k + L_k$ visualisiert. Der reale Positionswert auf der Steuerung ist jedoch zu diesem Zeitpunkt bereits $s(t_{k,L})$ und dementsprechend ergibt sich der Positionierungsfehler zu:

$$e(t_{k,L}) = s(t_{k,L}) - s(t_k). \quad (16.5)$$

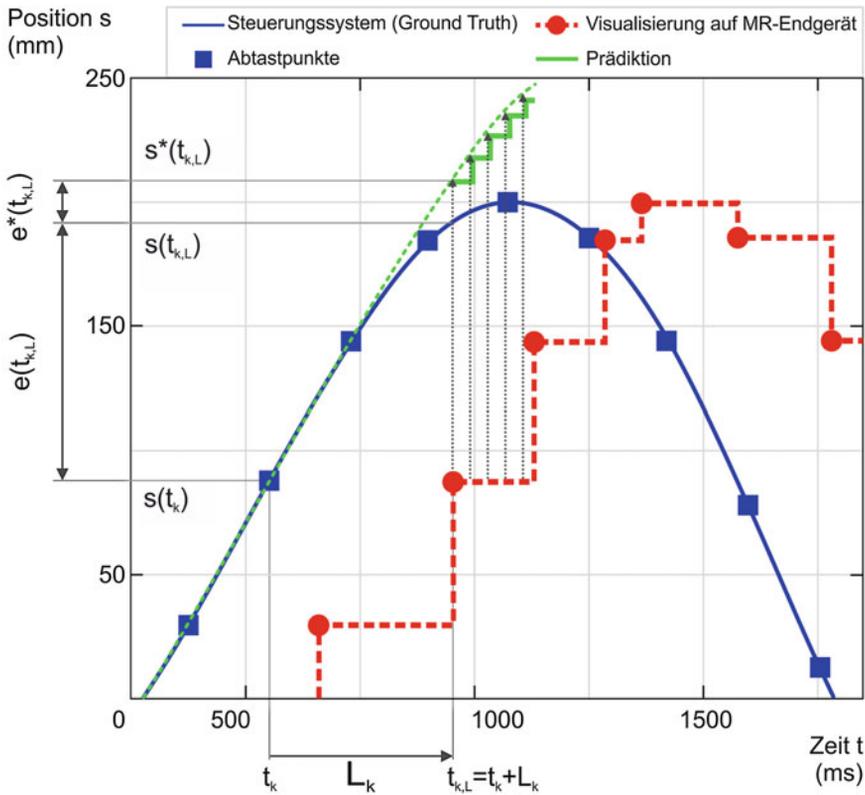


Abb. 16.11 Prädiktionsbasierte Kompensation von Positionierungsfehlern in einer MRiLS

Unter Einsatz der aus der Steuerung abgetasteten Positionsdaten $[s(t_0), \dots, s(t_k)]$ und den zugehörigen End-to-End Latenzen $[L_0, \dots, L_k]$ kann mittels einer Prädiktionsfunktion ein Schätzwert $s^*(t_{k,L})$ der Position $s(t_{k,L})$ berechnet werden. Der bleibende Positionierungsfehler $e^*(t_{k,L})$ soll dabei betragsmäßig kleiner als der ursprüngliche Positionierungsfehler $e(t_{k,L})$ sein:

$$|e^*(t_{k,L})| = |s(t_{k,L}) - s^*(t_{k,L})| < |s(t_{k,L}) - s(t_k)| = |e(t_{k,L})|. \quad (16.6)$$

Für die Berechnung von $s^*(t_{k,L})$ und die damit zu erzielende Reduzierung des Positionierungsfehlers ist sowohl eine Schätzung der End-to-End Latenz L_k^* als auch eine Prädiktionsfunktion notwendig.

Schätzung der End-to-End Latenz

Die Schätzung der End-to-End Latenz muss für jeden Visualisierungstakt des MR-Endgeräts zur Laufzeit der MRiLS erfolgen und im Kontext der industriellen Einsatzszenarien ohne zusätzliche Messhardware durchführbar sein.

Die End-to-End Latenz L_k^* wird dazu in zwei Latenzanteile aufgeteilt:

$$L_k^* = L_{app,k}^* + L_{visu,k}^* \quad (16.7)$$

- Die Applikationslatenz $L_{app,k}^*$ beschreibt die Zeitspanne von der Informationsentstehung im Steuerungssystem bis zur Verarbeitung auf dem MR-Endgerät (vor dem Start des Renderingauftrags in der Grafikpipeline).
- Die Visualisierungslatenz $L_{visu,k}^*$ beschreibt die Zeitspanne vom Start des Renderingauftrags in der Grafikpipeline des MR-Endgeräts bis zur für den Nutzer sichtbaren Visualisierung auf dem Display des MR-Endgeräts.

Schätzung der Applikationslatenz $L_{app,k}^*$ durch Uhrensynchronisation

Die dem Abtastzeitpunkt t_k zugehörige Applikationslatenz $L_{app,k}^*$ kann durch Subtraktion des Zeitstempels $C_1(t_k)$ der Steuerung von dem verzögerten Zeitstempel $C_2(t_k + L_{app,k})$ des MR-Endgeräts geschätzt werden:

$$L_{app,k}^* = C_2(t_k + L_{app,k}) - C_1(t_k). \quad (16.8)$$

Dazu wird $C_1(t_k)$ anhand der Systemuhr C_1 auf der Steuerung erstellt und mit dem Datenpaket der Positionsdaten an das MR-Endgerät übertragen. $C_2(t_k + L_{app,k})$ hingegen wird anhand der Systemuhr C_2 nach Verarbeitung der Positionsdaten auf dem MR-Endgerät ermittelt. Die Applikationslatenz wird anschließend auf dem MR-Endgerät nach Gl. (16.8) berechnet. Dies jedoch setzt eine gemeinsame Zeitbasis für die beiden Zeitstempel voraus, was die Synchronisation der Systemuhren erforderlich macht.

Für die Synchronisation werden die Systemuhren C_1 und C_2 jeweils mit einem linearen Uhrenmodell $C_i = \gamma_i \cdot t + \Theta_i$ über eine gemeinsame Referenzzeit abgebildet (siehe Abb. 16.12).

Die sich zwischen Steuerungssystem und MR-Endgerät unterscheidenden Uhrenparameter γ_i und Θ_i führen zu einem unbekanntem Uhrenoffset $\Phi(t) = C_2(t) - C_1(t)$. Da sich das MR-Endgerät auf die stabile Zeitbasis in der Echtzeitebene der Steuerung synchronisieren soll, kann $\gamma_1 = 1$ und $\Theta_1 = 0$ gesetzt werden [13]. Der Uhrenoffset lässt sich unter dieser Vorgabe mit den unbekanntem Uhrenparametern γ_2 und Θ_2 ausdrücken:

$$\Phi(t) = C_2(t) - C_1(t) = (\gamma_2 - \gamma_1) \cdot t + \Theta_2 - \Theta_1 = (\gamma_2 - 1) \cdot t + \Theta_2. \quad (16.9)$$

Für die Bestimmung von γ_2 und Θ_2 können Ansätze aus dem Bereich der Synchronisation von physikalischen Uhren in verteilten Systemen adaptiert werden [14], die auf

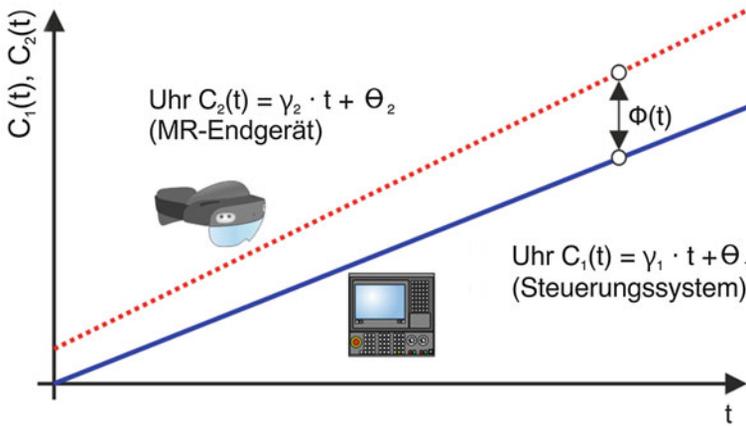


Abb. 16.12 Lineares Uhrenmodell für MR-Endgerät und Steuerungssystem mit Uhrenoffset Φ

dem Algorithmus nach Christian [15] aufbauen und zum Beispiel beim Network Time Protocol (NTP, RFC 958) oder Precision Time Protocol (PTP, IEEE 1588) zum Einsatz kommen. Zur Synchronisierung auf der Anwendungsebene des MR-Endgeräts werden diese Grundprinzipien übernommen und in eine Client-Server-Kommunikationsabfolge zwischen Steuerungssystem und MR-Endgerät überführt (siehe Abb. 16.13). Das MR-Endgerät sendet dazu an einen Synchronisationsmaster (z. B. Feldbusteilnehmer auf Echtzeitebene der Steuerung) zum Zeitstempel $C_2^r(t_{i,1}^{sync})$ eine Synchronisierungsanfrage, die beim Master zum Zeitstempel $C_1^r(t_{i,2}^{sync})$ eintrifft und nach einer Verarbeitungszeit mit dem Zeitstempel $C_1^r(t_{i,3}^{sync})$ beantwortet wird. Die Antwort trifft zum Zeitstempel $C_2^r(t_{i,4}^{sync})$ schließlich beim MR-Endgerät ein.

Unter Annahme symmetrischer Paketlaufzeiten $\Delta t_{i,12}^{sync} = \Delta t_{i,34}^{sync}$ kann der Uhrenoffset Φ_i^* in jeder Synchronisationssequenz mit folgendem Zusammenhang bestimmt werden (Details zur Herleitung siehe [16]):

$$\Phi_i^* = \Phi^*(t_{i,4}^{sync}) = \frac{C_2^r(t_{i,1}^{sync}) - C_1^r(t_{i,2}^{sync})}{2} + \frac{C_2^r(t_{i,4}^{sync}) - C_1^r(t_{i,3}^{sync})}{2}. \quad (16.10)$$

Zur Identifikation der Uhren-Parameter γ_2 und Θ_2 muss die Bedingung $\Phi_i^* - \Phi \stackrel{!}{=} 0$ in jeder Synchronisationssequenz erfüllt sein. Das nach mehreren Synchronisationssequenzen daraus entstehende überbestimmte Gleichungssystem wird mittels eines Least Squares Ansatzes in eine lineare Normalgleichung überführt, deren Lösung eine gute Näherung der Uhren-Parameter liefert. Nach erfolgter Parameteridentifikation kann die Systemuhr C_2 anhand des Uhrenmodells auf dem MR-Endgerät berechnet werden. Da C_2

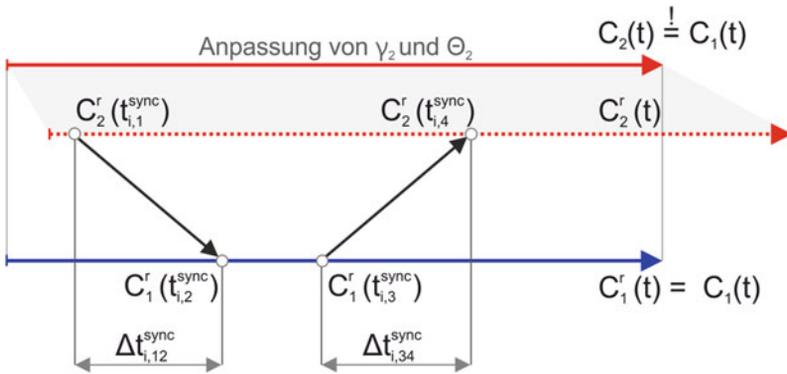


Abb. 16.13 Synchronisationssequenz zur Bestimmung des Uhrenoffsets Φ^*

nun näherungsweise mit der Systemuhr C_1 des Steuerungssystems übereinstimmt, können deren Zeitstempel für die Schätzung von $L_{app,k}^*$ nach Gl. (16.8) herangezogen werden.

Schätzung der Visualisierungslatenz $L_{visu,k}^*$ durch Endgeräte-Kalibrierung mit Visible Light Communication

Zur Bestimmung der Visualisierungslatenz wird eine Messmethode nach dem Prinzip der Visible Light Communication (VLC) verwendet (siehe Abb. 16.14).

Die Messmethode zeigt für jeden Steuerungstakt den Zeitstempel des Steuerungssystems $C_1(t_{VLC})$ codiert in einer LED-Matrix an, während das nach der oben beschriebenen Methode über einen Feldbusteilnehmer auf die Steuerung synchronisierte MR-Endgerät

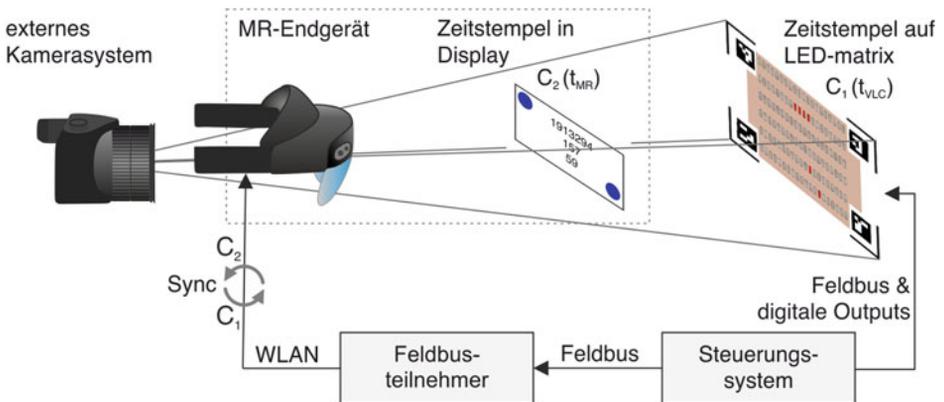


Abb. 16.14 Messmethode zur Bestimmung der Visualisierungslatenz eines Optical See-Through MR-Endgeräts nach dem Prinzip der Visible Light Communication (VLC)

jeweils seinen beim Start des Renderingauftrags gesetzten Zeitstempel $C_2(t_{MR})$ als virtuellen Inhalt im eigenen Display darstellt. Über ein externes Kamerasystem können beide Zeitstempel anschließend bildverarbeitend ausgewertet werden. Der Zeitstempel $C_1(t_{VLC})$ wird vom Kamerasystem (bei einer Bildfrequenz von 240 Hz und einer Belichtungszeit von ca. 4.2 ms) nahezu unmittelbar erfasst, während der Zeitstempel $C_2(t_{MR})$ erst nach dessen Verarbeitung in der Rendering-Pipeline im Kamerabild erscheint. Die Differenz beider Zeitstempel bildet näherungsweise die Visualisierungslatenz ab, wobei die Belichtungszeit des Kamerasystems dabei deutlich kleiner sein muss als die zu erwartende Visualisierungslatenz, die auf gängigen MR-Geräten wie bspw. der Microsoft HoloLens 2 Industrial in der Größenordnung um 50 ms liegt. Für einen Abtastzeitpunkt t_k (vgl. Abb. 16.11) wird der vom MR-Endgerät visualisierte Zeitstempel zum Zeitpunkt $t_{MR} = t_k + L_{app,k}$ gesetzt, während das Steuerungssystem einen Zeitstempel auf der LED-Matrix darstellt, der dem Zeitpunkt $t_{VLC} = t_k + L_k^*$ zugehört. Die Visualisierungslatenz $L_{visu,k}^*$ kann anschließend entsprechend der auswertbaren Zeitstempel berechnet werden:

$$L_{visu,k}^* = C_1(t_{VLC}) - C_2(t_{MR}) = C_1(t_k + L_k^*) - C_2(t_k + L_{app,k}). \quad (16.11)$$

Messergebnisse auf Basis dieser Methode zeigen eine starke Korrelation von $L_{visu,k}^*$ zu der Renderingzeit Δt_{render} , die in der Anwendungsebene des MR-Endgeräts über die Grafikkbibliothek softwaretechnisch ermittelbar ist. Zentraler Einflussfaktor auf Δt_{render} ist dabei die Belastung der Renderingpipeline, die von der Anzahl der zu visualisierenden Geometrieknoten der Meshes DZP sowie von der Komplexität des Szenengraphs abhängig ist. Anhand zahlreicher Messungen konnte herausgefunden werden, dass bis zur Belastungsgrenze der Renderingpipeline die Renderingzeit und die Visualisierungslatenz bei gleichbleibender Anzahl an Geometrieknoten nahezu konstant bleiben [12]. $L_{visu,k}^*$ kann damit als zeitinvariant und von t_k unabhängig angenommen werden und wird zu L_{visu}^* . Eine mitlaufende Auswertung von Δt_{render} ist auf dem MR-Endgerät ohne zusätzliche Hardware durchführbar, durch die aufgrund der starken Korrelation auf die Visualisierungslatenz geschlossen werden kann. Die Korrelation zwischen Renderingzeit und Visualisierungslatenz wird für das MR-Endgerät einmalig mittels Visible Light Communication gemessen und auf dem MR-Endgerät in Form einer Kennlinie (L_{visu}^* über Δt_{render}) hinterlegt und steht somit für die Berechnung der End-to-End Latenz auf dem MR-Endgerät zur Verfügung.

Mit den Schätzungen der Applikationslatenz $L_{app,k}^*$ und der konstanten Visualisierungslatenz L_{visu}^* kann die End-to-End Latenz L_k^* zwischen dem industriellen Steuerungssystem und der Visualisierung auf dem MR-Endgerät nach Gl. 16.7 berechnet und der im Folgenden beschriebenen Prädiktionsfunktion zugeführt werden.

Prädiktionsfunktion zur Positionsschätzung

Mithilfe der geschätzten End-to-End Latenz L_k^* können die am Endgerät eingetroffenen Positionsdaten des Steuerungssystems in einer Prädiktionsfunktion für $s^*(t)$ genutzt

werden. Die Prädiktionsfunktion kann zum Beispiel unter Annahme konstanter Beschleunigung zwischen zwei Abtastungen mit einem abschnittsweise bestimmten Polynom zweiten Grades formuliert werden. Dazu werden in jedem Abtastschritt die Parameter des Polynoms für das nächste Prädiktionszeitintervall anhand vorangegangener Positionswerte bestimmt. Anschließend wird die Polynomfunktion auf dem Endgerät im Prädiktionszeitintervall zwischen zwei Abtastzeitpunkten interpoliert (vgl. Abb. 16.11). Die Prädiktionsfunktion kann damit für ein Prädiktionszeitintervall wie folgt aufgestellt werden:

$$s^*(\tau) = a_k \cdot \tau^2 + b_k \cdot \tau + c_k \text{ mit } \{\tau \in \mathbb{R} | (t_k + L_k) \leq \tau \leq (t_{k+1} + L_{k+1})\}. \quad (16.12)$$

Anwendungsbeispiel der Kompensationsmethode

Für das in der Einführung skizzierte MRiLS-Anwendungsszenario eines virtuellen Greifers an einer realen Roboterkinematik zeigt Abb. 16.15 den Ist-Positionsverlauf (Ground Truth), den aufgrund der Latenz verzögerten Positionsverlauf (unkompensiert) und den prognostizierte Positionsverlauf (kompensiert) des End-Effektors. Die End-to-End Latenz kann in diesem Anwendungsbeispiel bei einer mittleren Latenz von $L_k^* \approx 110$ ms bis auf ca. 4 ms genau geschätzt und der Positionierungsfehler mit der vorgestellten Kompensationsmethode um 80 % reduziert werden.

Das Diagramm in Abb. 16.15 hebt zusätzlich die drei Zeitpunkte A, B & C hervor, deren Visualisierungen auf dem MR-Endgerät mit und ohne Kompensation in Abb. 16.16 dargestellt sind. Es ist gut zu erkennen, dass die Positionierungsfehler durch Einsatz der Kompensationsmethode deutlich reduziert werden können. Zur weiteren Bewertung der Methode werden die gemessenen Positionierungsfehler (mit und ohne Kompensation) in einem Fehlerfeld-Diagramm dargestellt (siehe Abb. 16.17). Darin werden die Fehler, die durch die zeitliche Verzögerung aufgrund der Latenz L bei konstanter Geschwindigkeit v

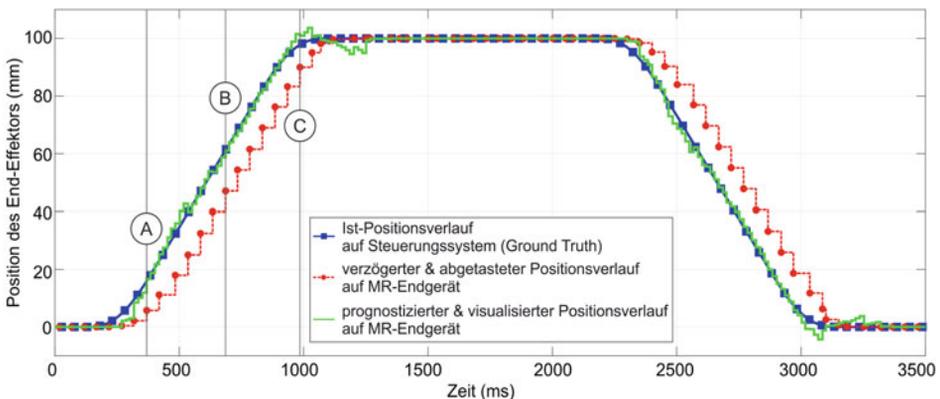


Abb. 16.15 Soll-Positionsverlauf (Ground Truth) des End-Effektors verglichen mit unkompensiertem und kompensiertem Positionsverlauf auf dem MR-Endgerät

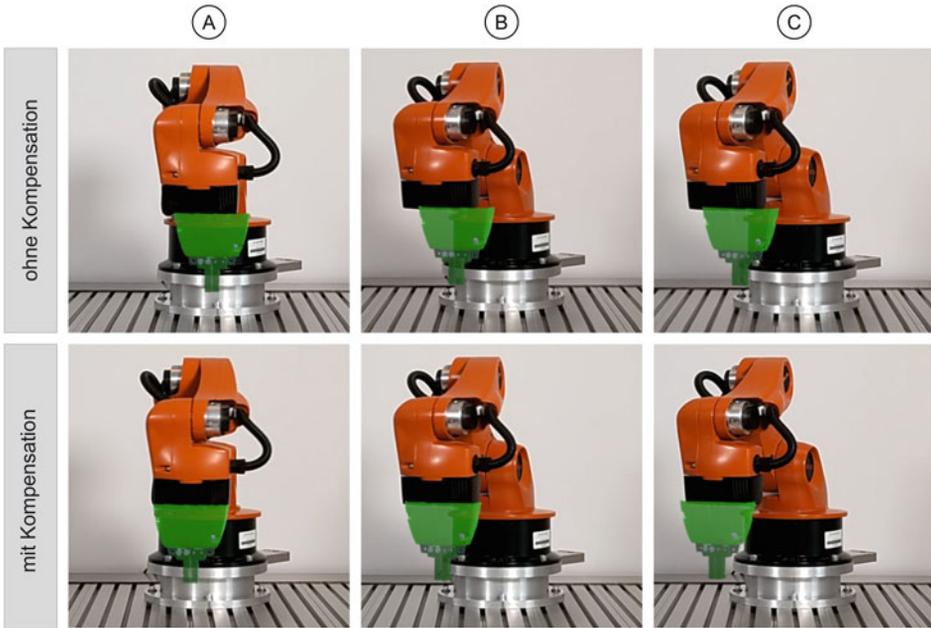
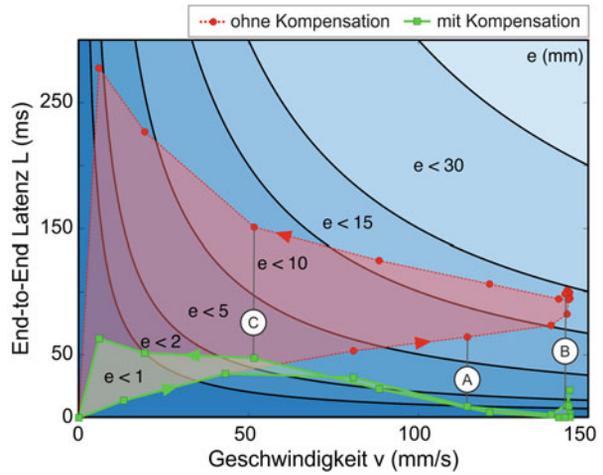


Abb. 16.16 MRiLS-Szenen auf dem MR-Endgerät „Microsoft HoloLens 2 Industrial“ mit und ohne Kompensation

Abb. 16.17
Fehlerfeld-Diagramm mit unkompenzierten und kompenzierten Fehlern bei der Positionierung eines virtuellen Greifers nach Abb. 16.15 und 16.16 für $t < 1500$ ms



auf einer geradlinigen Bahn entstehen, entsprechend dem Zusammenhang $e = v \cdot L$ abgebildet. Jedes Fehlerfeld drückt einen Fehlerbereich mit $e < e_{max}$ aus. Das Diagramm zeigt, dass die MRiLS mit Kompensationsmethode in Fehlerfeldern für deutlich kleinere Fehler ausgeführt werden kann, ohne Infrastrukturanpassungen zur Latenzreduktion vornehmen oder die Geschwindigkeit des Automatisierungssystems verringern zu müssen.

Zusammenfassend reduziert die Kompensationsmethode den Positionierungsfehler bewegter virtueller Anlagenkomponenten in einer MRiLS, der durch Abtast- und Latenzeffekte zwischen einem Steuerungssystem und einem MR-Endgerät verursacht wird. Dies verbessert die Anwendbarkeit der MRiLS insbesondere in Szenarien, die durch eine Kombination von bewegten virtuellen und realen Komponenten eines Automatisierungssystems charakterisiert sind.

16.3 Intuitive multimodale Mensch-Modell-Interaktion

Die vollständige Integration des Menschen in ein Simulationsszenario bedarf neben der egozentrischen Visualisierung zusätzlich auch intuitive, immersive und multimodale Interaktionsmöglichkeiten zwischen Mensch und der virtuellen Umgebung. Die visuelle Ausgabe stellt zwar die Basis der Immersion dar, ist aber allein nicht ausreichend [4]. Zur Erreichung eines erhöhten Immersionsgrads sollten weitere menschliche Sinne angesprochen werden (Multimodalität), wie beispielsweise die auditive sowie die haptische Wahrnehmung. Zur Steigerung des subjektiven Präsenzgefühls sind zudem intuitive Interaktionsmechanismen zu integrieren, sodass die Interaktionen für den Menschen plausibel erscheinen.

Interaktionseingabe

Die Interaktionseingabe ermöglicht die Manipulation der virtuellen Umgebung durch Auslösen (z. B. Betätigen eines virtuellen Maschinenschalters) von hinterlegten Methoden in der MRiLS (z. B. Maschine starten). Die Interaktionsmöglichkeiten sind abhängig vom eingesetzten Endgerät und variieren je nach Hersteller und Gerätetyp stark. So können zum Beispiel Controller, Gesten- oder Sprachsteuerungen zum Einsatz kommen (siehe Abb. 16.18). Nachfolgend werden die verschiedenen Eingabemöglichkeiten vorgestellt.



Abb. 16.18 Controller, Gesten- und Sprachsteuerungen zur Interaktion mit einem Digitalen Zwilling

- **Controller:** Controller sind physisch existierende Eingabegeräte, mit denen der Nutzer handgeführte Eingaben tätigen kann. Über die getrackte Position (Ort und Rotation) des Controllers wird die Handposition des Nutzers und dessen Bewegungen in die virtuelle Welt übertragen. Für weitere Eingabeoptionen verfügen Controller über Taster, worüber implementierte Aktionen ausgelöst werden können (z. B. Öffnen eines Menüs). Die Kombination aus Position und Tasterbetätigung des Controllers ermöglicht eine klare Zuordnung bei der Interaktionsausführung. Damit kann beispielsweise ein virtuelles Objekt über die Positionierung des Controllers ausgewählt und über das Betätigen eines Tasters gegriffen werden.
- **Gestensteuerung:** Eine Gestensteuerung ermöglicht die Manipulation der virtuellen Komponenten über vordefinierte Gesten, wie zum Beispiel Bewegungen der Finger, des Körpers, der Augen oder dem Gesicht (Mimikerkennung). Die relevanten Merkmale werden über bildverarbeitende Algorithmen aus Kamerabildern oder über am Körper angebrachte Sensoren erfasst. Die Erkennung der Geste erfolgt durch die Analyse von Bewegungsabfolgen. Durch Finger-Tracking kann das Manipulieren von virtuellen Komponenten durch intuitive Gesten erzielt werden (z. B. Greifen durch Hand schließen und Loslassen durch Hand öffnen). Erweiternd können zusätzliche Sensoren am Körper angebracht werden, um weitere Positionsinformationen des Nutzers, wie beispielsweise die Arm- oder Beinposition in die MRiLS zu integrieren. Mittels Eye-Tracking Methoden kann zudem die Blickrichtung des Menschen erfasst und zur Interaktion genutzt werden.
- **Sprachsteuerung:** Neben den zuvor vorgestellten bewegungsbasierten Eingabemöglichkeiten kann auch Sprache zur Interaktionseingabe eingesetzt werden. Über Sprachbefehle kann der Mensch den Digitalen Zwilling steuern sowie die virtuellen Komponenten manipulieren oder Aktionen hervorrufen. Dabei wird die Spracheingabe mit einem Mikrophon aufgenommen und über eine Merkmalsextraktion mittels eines Akustik- sowie Sprachmodells in einen Text (Zeichenkette/String) umgewandelt (Speech-to-Text). Die Zeichenkette kann anschließend im Modell weiterverarbeitet und zum Aufruf von Funktionen eingesetzt werden, um eine Aktion im Digitalen Zwilling auszulösen.

Interaktionsausgabe

Die Interaktionsausgabe beschreibt die Wirkung der virtuellen Umgebung auf den Menschen. Neben der visuellen Ausgabe ist für die MRiLS insbesondere das auditive und haptische Feedback relevant.

- **Auditives Feedback:** Mittels auditiver Ausgabe werden dem Nutzer Geräusche und Töne (z. B. Maschinengeräusche) in Form von Audiosignalen wiedergegeben, sodass die virtuelle Umgebung in realistischer und plausibler Art wahrgenommen wird. Zudem können auditive Ausgaben wie Tonsignale und Sprachsequenzen bei der

Auswahl von Objekten, zur Hilfestellung oder für zusätzliche Informationen (z. B. Maschinenstatus) verwendet werden. Die Sprachausgabe von Textelementen erfolgt über die automatisierte Umwandlung von Text (Zeichenkette/String) in Sprachsequenzen (Text-to-Speech). Die auditive Ausgabe wird über die Lautsprecher der Endgeräte oder über externe Lautsprecher umgesetzt und kann neben der Informationsbereitstellung auch zur Orientierung im Raum dienen. Durch eine Laufzeitdifferenz zwischen der Ausgabe am rechten und am linken Ohr kann der Mensch die Quelle des Audiosignals orten und sich hierdurch im virtuellen Raum besser orientieren.

- **Haptisches Feedback:** Das Ziel der haptischen Ausgabe ist es, dem Menschen die virtuellen Komponenten durch synthetische Stimuli haptisch erfahrbar zu machen. Dabei ist zwischen mechanischem, neuralem und kontaktlosem haptischem Feedback zu unterscheiden. Das mechanisch haptische Feedback kann sowohl über eine haptisch taktile wie auch eine elektro-mechanische Rückkopplung erzeugt werden. Die haptisch taktile Rückkopplung spricht über Druckpunkte oder Vibration den Tastsinn des Menschen an ausgewählten Körperstellen an. Häufig wird das haptisch taktile Feedback in Datenhandschuhe an der Handfläche oder an einzelnen Fingern positioniert, sodass ein Feedback beim Greifen von virtuellen Objekten generiert werden kann. Alternativ kann das Vibrations-Feedback auch in Controllern integriert sein, um eine Rückmeldung bei der Interaktion mit virtuellen Objekten zu geben. Die elektro-mechanische Rückkopplung ist im Gegensatz zur haptisch taktilen Rückkopplung eine direkte Kraft-rückkopplung und erfolgt über externe aktive Skeletstrukturen, die mechanisch an den interagierenden Körperteilen angebracht werden. Dadurch können physikalische Eigenschaften über die Ansteuerung der externen Skeletstrukturen für eine Interaktion nachgebildet werden. Bei dem neuralen haptischen Feedback werden durch am Körper befestigte Elektroden Stromimpulse erzeugt, die die entsprechenden Muskelpartien in unterschiedlichen Situationen stimulieren. Im Gegensatz zu diesen Methoden der Reizerzeugung am Körper des Menschen, werden bei dem kontaktlosen haptischen Feedback die Reize ohne direkten Kontakt mit der Reizquelle übertragen. Beispiele hierfür sind pneumatische Luftimpulse oder Ultraschallwellen, die über Lautsprecher gezielt auf die Hautoberfläche ausgesendet werden, um dort eine leichte Vibration zu erzeugen.

Abstraktion des Interaktionskreislaufes

Um die Vielzahl an multimodalen Interaktionseingaben und -ausgaben für einen Digitalen Zwilling und dessen Verhaltens- und Interaktionsmodell ohne Adaptionaufwand endgeräteunabhängig verwenden zu können, ist die Abstraktion der Interaktion zwischen Mensch und Digitalem Zwilling erforderlich. In Abb. 16.19 ist das Konzept der Interaktionsabstraktion dargestellt, die gerätespezifische Ein- und Ausgaben in geräteunabhängige Funktionsaufrufe im Digitalen Zwilling abbildet.

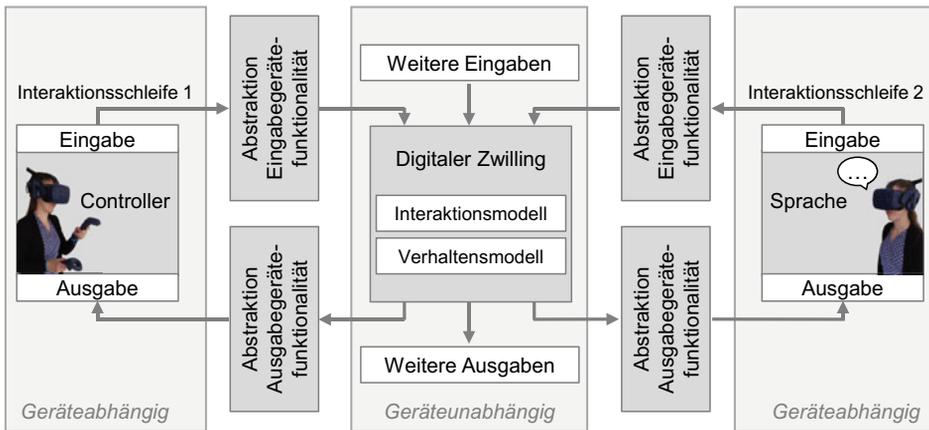


Abb. 16.19 Konzept der Interaktionsabstraktion in Anlehnung an Schnierle et al. [17]

Die Abstraktionsschicht kann als Softwaremodul mit Treiber-Funktion aufgefasst werden, die das Interaktions- und Verhaltensmodell von den spezifischen Gerätefunktionen entkoppelt. Die Eingabe des Nutzers (z. B. Betätigen eines virtuellen Tasters über Controller, Touch-Bedienung, Gestensteuerung oder durch Sprachbefehl) wird über die Abstraktionsschicht mittels definierter Events in gebildeten Interaktionskategorien an den Digitalen Zwilling übermittelt und dort entsprechend des geräteunabhängigen Verhaltens- und Interaktionsmodell ausgewertet. Die darauffolgenden Reaktionen des Verhaltens- und Interaktionsmodells werden gleichermaßen in Events überführt, die entsprechend der Fähigkeiten des angebotenen Ausgabegerätes in eine geräteabhängige Ausgabegeräte-funktionalität aufgelöst werden. Die abstrahierte Ausgabegerätefunktionalität umfasst wie die Eingabegerätefunktionalität verschiedene Kategorien von Interaktionen. Die Ausgabe kann dabei sowohl verschiedene Wahrnehmungen des Menschen, wie die visuelle, haptische oder auditive Wahrnehmung ansprechen (z. B. visuelle Hervorhebung von Objekten, Vibration, auditive Rückmeldung) als auch verschiedene Ausprägungsstufen der Gerätetechnik für dieselbe Modalität umfassen (z. B. Vibration des Controllers oder des Smartphones). Die Ein- und Ausgaben können entweder unidirektional (z. B. Audioausgabe) oder in eine bidirektionale Interaktionsschleife integriert sein, die eine Ein- und Ausgabe mit derselben Gerätetechnik umfasst, (z. B. Positionseingabe und haptische Rückmeldung über denselben Controller).

Die Interaktionsabstraktion ermöglicht neben dem flexiblen Einsatz verschiedener Eingabe- und Ausgabemöglichkeiten auf Basis eines gemeinsamen geräteunabhängigen Digitalen Zwillinges zudem die Bereitstellung einer möglichst umfassenden multimodalen Illusion der virtuellen Komponenten entsprechend der individuell eingesetzten Gerätetechnik des jeweiligen Nutzers.



Abb. 16.20 Mensch-Modell-Interaktion am Beispiel eines Robotermodells

Interaktionsmodell für die intuitive Manipulation einer Roboterkinematik

Intuitive und natürliche Interaktionen erfordern neben einer multimodalen Ein- und Ausgabe auch ein entsprechendes Verhaltens- und Interaktionsmodell des Digitalen Zwillinges. Während das Verhaltensmodell das allgemeine Systemverhalten des Digitalen Zwillinges beschreibt (Kinematik, Dynamik, Kollision, ...), ergänzt das Interaktionsmodell den Digitalen Zwilling um das Reaktionsverhalten bei einer Interaktion mit dem Nutzer. Dabei löst eine Interaktion einen im Interaktionsmodell definierten Funktionsaufruf aus, welcher gegebenenfalls das Systemverhalten beeinflusst. Die Wirkung der Interaktion im Verhaltensmodell kann vom einfachen Umschalten eines virtuellen Schalters bis hin zur Manipulation ganzer Maschinenkinematiken reichen. Insbesondere für Schulungs- und Planungszwecke ist die intuitive Manipulation der Maschinenkinematik eine wichtige Anwendung. Abb. 16.20 zeigt beispielhaft eine intuitive Manipulation des Digitalen Zwillinges eines Industrieroboters. Der Nutzer greift per Handgeste ein virtuelles Interaktionsobjekt (rote Kugel), welches kinematisch mit dem Roboter gekoppelt ist und somit die intuitive Manipulation der Roboterpose ermöglicht.

Für die intuitive Manipulation aller Achsen eines 6-achsigen Industrieroboters sind mehrere Interaktionsobjekte möglich. Die Kinematik kann in zwei Teilprobleme zerlegt werden, sodass die kinematischen Ketten der Hauptachsen $q_{Haupt} = [q_1, q_2, q_3]$ und der Handachsen $q_{Hand} = [q_4, q_5, q_6]$ getrennt voneinander betrachtet werden können (siehe Abb. 16.21 links und Mitte). Die Zerlegung der räumlichen Kinematik in zwei zu beeinflussende Ebenen ermöglicht eine entkoppelte und damit intuitivere Manipulation der Roboterkinematik über zwei virtuelle Interaktionsobjekte (siehe Abb. 16.21 rechts). Während über die blaue Kugel die Hauptachsen q_{Haupt} und damit die Position der Handwurzel manipuliert werden, können über die Handachsen q_{Hand} unabhängig davon die Orientierung des Endeffektors über die rote Kugel verändert werden.

Für die Interaktionseingabe ist ein Interaktionsmodell für die numerische Berechnung der inversen Kinematiken (Rückwärtstransformationen) in der Hauptachsen- und in der Handachsen-Ebene anhand der Position des jeweiligen Interaktionsobjekts hinterlegt. Als Interaktionsausgabe können neben grafischen Zusatzinformationen über Gelenkwinkel

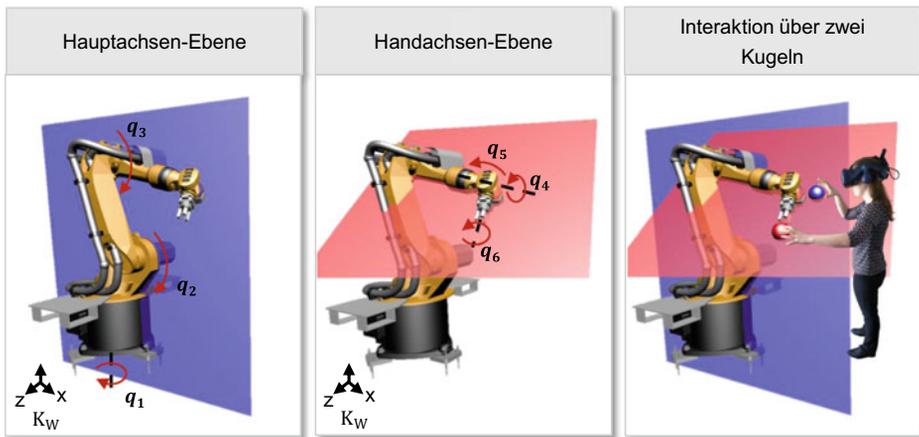


Abb. 16.21 Intuitive Manipulation eines 6-achsigen Industrieroboters mit zwei virtuellen Interaktionsobjekten

und Endeffektorposition auch akustische oder haptische Ausgaben beispielsweise beim Erreichen der Achsgrenzen oder bei ungültigen Positionen realisiert werden, sofern die entsprechenden Ausgabegeräte zur Verfügung stehen.

16.4 Multiuser-Kollaboration

Die Kollaboration mehrerer Nutzer in einer gemeinsamen Mixed Reality-Umgebung (auch Shared Experience genannt) erfordert sowohl in standortübergreifenden Szenarien als auch in Szenarien an einem gemeinsamen Standort die Einbindung aller beteiligten Mixed Reality-Endgeräte in einen MRiLS-Kreislauf (siehe Abb. 16.22).

Für die Multiuser-Kollaboration ist eine Synchronisierung des Systemzustands zwischen allen Nutzern sicherzustellen. Unabhängig von den eingesetzten Endgeräten müssen sowohl der Digitale Zwilling, die Steuerungsdaten als auch die Nutzer-Positionsdaten für jeden Teilnehmer der MRiLS möglichst latenzarm zur Verfügung gestellt werden. Um dies zu ermöglichen, kommt ein servicebasierter Softwareansatz in Form einer Middleware entsprechend des ‚Digital Twin as a Service‘ – Paradigmas zum Einsatz. Die Middleware bindet die Steuerungsdaten und weitere externe Datenquellen (Assets) über eine standardisierte Asset-Schnittstelle (bspw. über OPC UA oder MQTT) an und stellt diese den MR-Endgeräten vereinheitlicht über die Client-Schnittstelle bereit (vgl. Abb. 16.22). Durch die zentrale Instanz des Digitalen Zwillings existiert zu jedem Zeitpunkt ein konsistenter Systemzustand, der an die angebotenen Endgeräte übertragen werden kann.

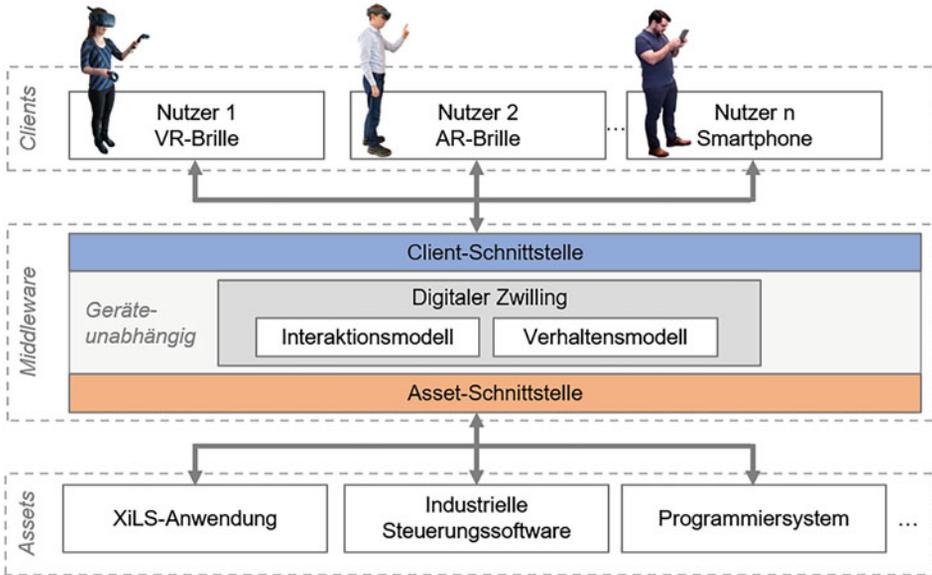


Abb. 16.22 Multiuser-Kollaboration in einer Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation

Die Middleware verwaltet und aggregiert zudem die ein- und ausgehenden Datenströme und reduziert damit die auf die Assets wirkende Kommunikationslast im Vergleich zu direkten Punkt-zu-Punkt Verbindungen zwischen Clients und Assets. Zum Austausch der Positionsdaten aller angebotenen Nutzer können Konzepte aus dem Multiplayer-Gaming adaptiert werden. Um den angebotenen heterogenen Endgeräten (z. B. AR/VR-Brillen, Smartphones oder Tablets) einen konsistenten Zustand der Daten bereitzustellen, wird das Netzwerkmodell ‚Snapshot Interpolation‘ eingesetzt. Bei der Snapshot Interpolation erfolgt die Berechnung der Simulation auf einem Gerät (z. B. dedizierter Server), das die Ergebnisse (Zustandsdaten der virtuellen Szene) in Form einer Momentaufnahme (sog. Snapshot) zyklisch an die angebotenen Clients sendet [18]. Die angebotenen Endgeräte können bidirektional mit dem Server kommunizieren und sind eigenständig für die Rekonstruktion der Simulation und der Visualisierung auf dem jeweiligen Endgerät zuständig. Die angebotenen heterogenen Endgeräte können über die zuvor vorgestellte Interaktionsabstraktion mit der Szene interagieren.

Neben der informationstechnischen Vernetzung bedarf es bei der kollaborativen MRiLS der konsistenten Positionierung des Digitalen Zwilling in den MRiLS-Szenen der einzelnen Nutzer. Dafür muss für alle nutzerabhängigen (egozentrischen) Visualisierungen einer Szene ein gemeinsames Koordinatensystem sichergestellt werden, um den Digitalen Zwilling für alle Nutzer an derselben Stelle in der Szene zu visualisieren und jeden Nutzer eindeutig in der Szene zu lokalisieren. Hierbei ist zwischen zwei Szenarien zu



Abb. 16.23 Kollaboration an unterschiedlichen und an einem gemeinsamen Standort

unterscheiden, der Kollaboration an unterschiedlichen Standorten und der Kollaboration an einem gemeinsamen Standort (siehe Abb. 16.23).

- **Kollaboration an unterschiedlichen Standorten:**

Mehrere Nutzer interagieren an unterschiedlichen Standorten mit dem Digitalen Zwilling, wobei die Nutzer keine Wechselwirkungen mit der realen Umgebung haben (VR). Die Lokalisierung der einzelnen Nutzer erfolgt relativ zu dem Koordinatensystem des Digitalen Zwillings auf Basis des nutzerindividuellen Trackings. Neben der Positionierung des Digitalen Zwillings bedarf es in diesem Szenario der virtuellen Repräsentation der einzelnen Nutzer (Avatare), sodass jeder Nutzer zu jedem Zeitpunkt die Position der jeweils anderen Nutzer kennt.

- **Kollaboration an einem gemeinsamen Standort:**

Interagieren mehrere Nutzer an einem gemeinsamen Ort unter Einbeziehung der realen Umgebung (AR), ist neben dem nutzerindividuellen Tracking und der daraus resultierenden relativen Positionierung der Nutzer zum Koordinatensystem des Digitalen Zwillings auch eine zwischen den Nutzern konsistente Verankerung des Digitalen Zwillings im Raum notwendig, beispielsweise über visuelle Marker. Der Marker dient den einzelnen Endgeräten als globales Ursprungs-Koordinatensystem für den Digitalen Zwilling, sodass die Position des Digitalen Zwillings für alle Nutzer im Raum konsistent ist.

16.5 Realisierung und Anwendung

In diesem Abschnitt werden die Realisierung und verschiedene Einsatzszenarien einer MRiLS vorgestellt, die im Rahmen des BMBF-Projekts "Hybrides Interaktionskonzept für Schulungen mittels Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation" (Förderkennzeichen 16SV8348) erstellt wurden.

Technologische Architektur

Die Architektur der Realisierung ist in Abb. 16.24 dargestellt. Das zentrale Modul bildet die am Virtual Automation Lab (VAL) an der Hochschule Esslingen entwickelte Digital Twin as a Service Plattform (VAL DTaaSP, [19]), die eine angebundene Hardware-in-the-Loop-Simulation (HiLS) mit Mixed Reality-Endgeräten in Form einer Middleware verbindet. Die HiLS wird mit der Echtzeit-Simulationsumgebung ISG-virtuos und dem Steuerungssystem Beckhoff TwinCAT umgesetzt und über OPC UA mit der Middleware gekoppelt [20].

Die VAL DTaaSP bietet neben den Basisdiensten zur Benutzer- und Assetverwaltung auch ein webbrowsersbasiertes Engineering-Werkzeug, das VAL 3D-Webstudio, zur Modellierung und Visualisierung der MRiLS-Szene im Webbrowser. Durch die browserbasierte Bereitstellung kann von jedem im Netzwerk angemeldeten Endgerät auf die VAL DTaaSP zugegriffen werden, ohne dass eine Installation notwendig ist. Die

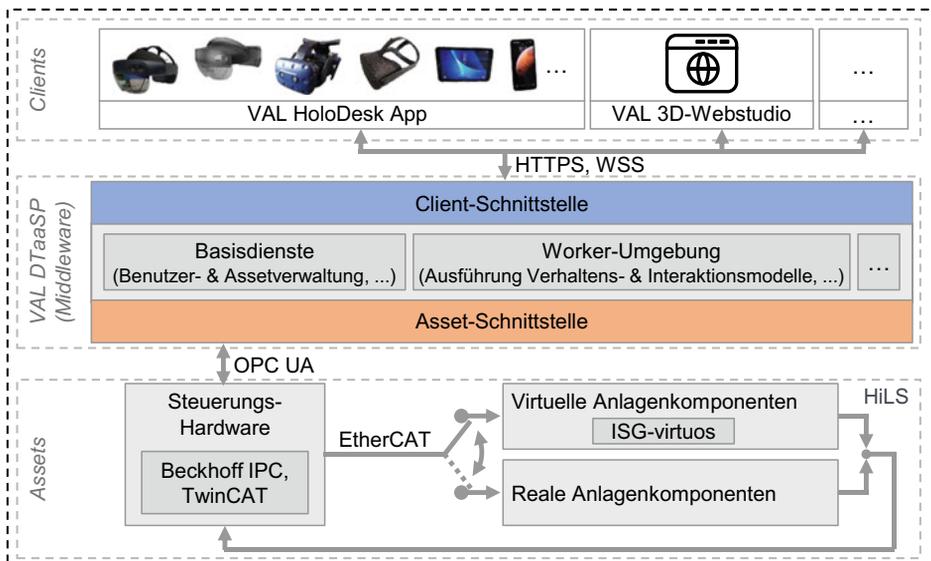


Abb. 16.24 Architektur der Realisierung einer MRiLS

Verhaltens- und Interaktionsmodelle des Digitalen Zwillings können in diesem Entwicklungswerkzeug erstellt, mit den Daten der Assets (hier die HiLS) verknüpft und in der Worker-Umgebung der Middleware ausgeführt werden. Die Bereitstellung und Ausführung der Mixed Reality-Szene auf unterschiedlichen Mixed Reality-Endgeräten erfolgt über die Schnittstellenanwendung VAL HoloDesk, die über das HTTP- und WebSocket-Protokoll an die VAL DTaaSP angebunden ist. Die virtuellen Komponenten werden von der Middleware auf Grundlage einer gemeinsamen Datenbasis an die angeschlossenen Endgeräte bereitgestellt, ohne dass endgeräte- und applikationsspezifischer

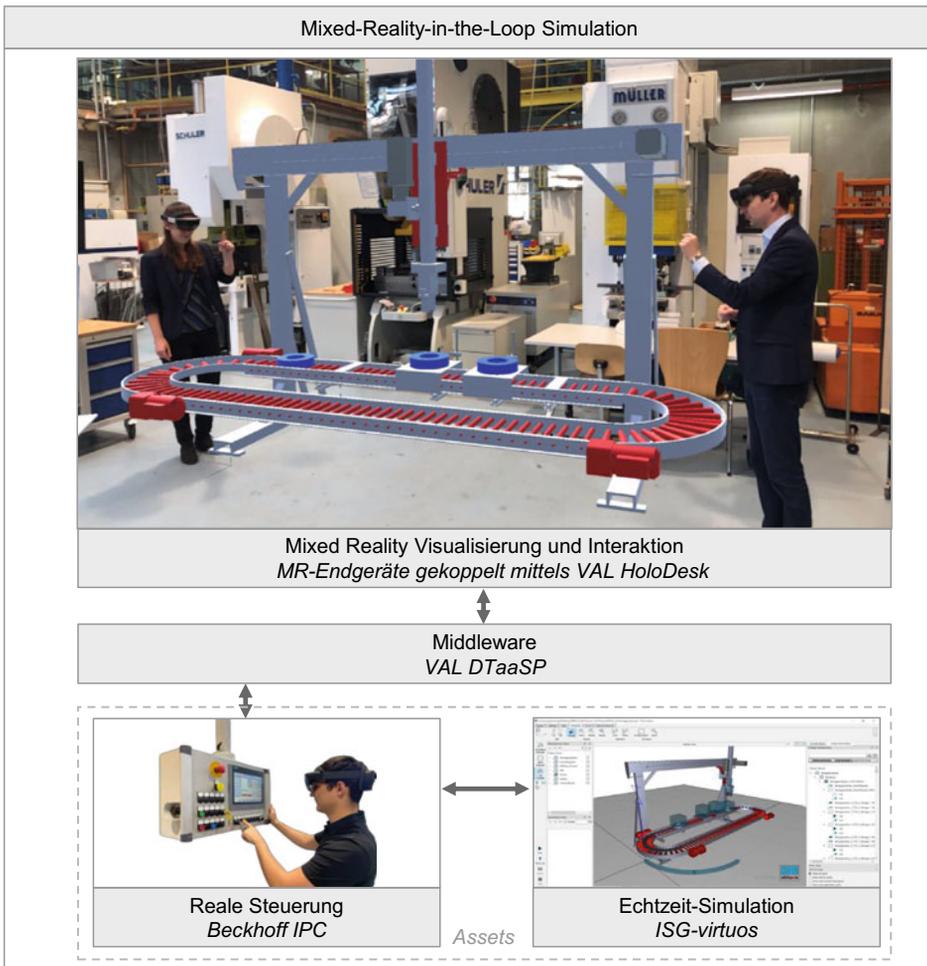


Abb. 16.25 MRiLS eines automatisierten Handhabungssystems in einer AR-Szene

Adaptionen notwendig sind. Die Integration mehrerer Nutzer in einer Szene erfolgt über eine gemeinsame Instanz des Digitalen Zwillings auf der VAL DTaaSP.

Einsatz der MRiLS

Auf Basis der zuvor beschriebenen Architektur wurde die MRiLS eines automatisierten Handhabungssystems der Roth Steuerungstechnik GmbH für die Inbetriebnahme und Schulung technischer Fachkräfte umgesetzt. Abb. 16.25 zeigt beispielhaft den Einsatz der MRiLS in einer Augmented Reality-Szene.

Die beiden MR-User interagieren in dieser Szene mit einem Digitalen Zwilling der Anlage und können damit das Maschinenverhalten intuitiv erlernen. Für die Inbetriebnahme können zudem reale und virtuelle Anlagenkomponenten in einer gemeinsamen Szene „vermischt“ werden, um bereits real existierende Anlagenkomponenten virtuell zu erweitern. Diese Anwendung ermöglicht eine teilvirtuelle Inbetriebnahme unter Einbeziehung des Menschen und der realen Umgebung. Damit können ohne Gefährdung

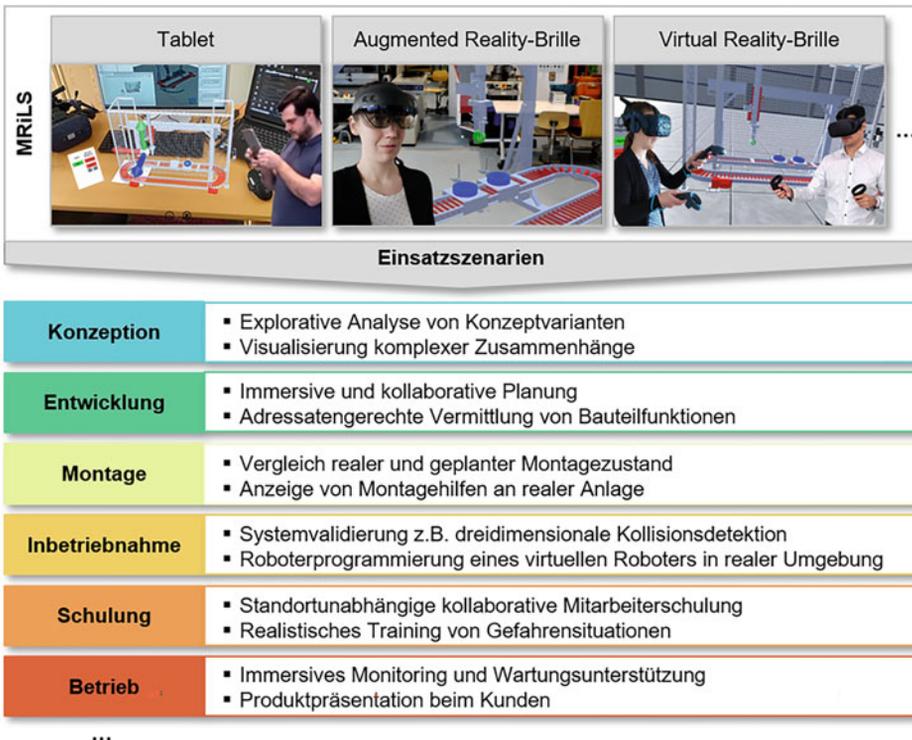


Abb. 16.26 Einsatz der MRiLS während ausgewählten Phasen des Lebenszyklus einer Anlage

von Mensch und Maschine ganze Prozessabläufe getestet, optimiert und geschult werden. Weitere Einsatzmöglichkeiten der MRiLS in verschiedenen Phasen des Lebenszyklus einer Maschine oder Anlage von der Konzeption bis in den Betrieb sind in Abb. 16.26 zusammengefasst.

16.6 Zusammenfassung

Die X-in-the-Loop Simulationsmethoden (XiLS) bilden einen methodischen Baustein, um die wachsenden Anforderungen im mechatronischen Entwicklungsprozess des Maschinen- und Anlagenbaus zu erfüllen. Die bislang eingesetzten XiLS Methoden sind jedoch hinsichtlich der Interaktion zwischen Mensch und Simulation stark limitiert und werden über die Virtuelle Inbetriebnahme von Steuerungssystemen hinaus kaum eingesetzt. Als Querschnittsmethode für neue Anwendungspotentiale von Digitalen Zwillingen wird in diesem Beitrag die Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation (MRiLS) vorgestellt, die ein Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum aus realen und virtuellen Anlagenkomponenten aufbaut und den Menschen mittels moderner Visualisierungstechnologien vollständig in den Simulationskreislauf integriert. Zur Erreichung eines hohen Präsenzgefühls des Menschen im Simulationskreislauf strebt die MRiLS eine egozentrische realzeitsynchrone Visualisierung, eine intuitive multimodale Mensch-Modell-Interaktion sowie eine Multiuser-Kollaboration an. Aus diesen Zielen resultieren vielfältige Anforderungen an die MRiLS, die in diesem Beitrag ausführlich erörtert und zu denen Lösungsansätze vorgeschlagen werden.

Literatur

1. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (2017) IT-Report „Simulation im Maschinenbau“. VDMA-Verlag
2. VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (2016) Virtuelle Inbetriebnahme – Modellarten und Glossar, VDI/VDE 3693 Blatt 1
3. Slater M, Wilbur S (1997) A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 6:603–616, MIT Press, Cambridge
4. Sherman WR, Craig AB (2003) Understanding virtual reality – Interface, Application, and Design, in *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 12(4):441–442, MIT Press, Cambridge
5. Oh CS, Bailenson JN, Welch GF (2018) A systematic review of social presence: Definition, antecedents, and implications. *Frontiers in Robotics and AI*, Bd. 5. doi: 10.3389/frobt.2018.00114
6. Slater M (2003) A note on presence terminology. *Presence-Connect* 3(3):1-5
7. Slater M (2009) Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*. 364(1535):3549–3557. doi: 10.1098/rstb.2009.0138

8. Milgram P, Takemura H, Utsumi A, Kishino F (1995) Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. *Proceedings of SPIE 2351, Telem manipulator and Telepresence Technologies*. doi: 10.1117/12.197321
9. Dörner R, Broll W, Grimm P, Jung B (2019) *Virtual und Augmented Reality (VR/AR) – Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität*. Springer Vieweg, Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-662-58861-1
10. Tönnis M (2010) *Augmented Reality – Einblicke in die Erweiterte Realität*. Springer, Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-14179-9
11. Schlegel M (2011) *Zeitkalibrierung in Augmented Reality Anwendungen*. Dissertation. TU München
12. Schnierle M, Röck S (2022) Latency and sampling compensation in mixed-reality-in-the-loop simulations of production systems. *Production Engineering* 17:341–353. Springer. doi: 10.1007/s11740-022-01175-2
13. Puttnies H, Schweissguth E, Timmermann D, Schacht J (2019) Clock synchronization using linear programming, multicasts, and temperature compensation. *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)* 1–6. doi: 10.1109/GLOBECOM38437.2019.9013260
14. Gore RN, Lisova E, Åkerberg J, Björkman M (2021) CoSiWiNeT: A clock synchronization algorithm for wide area IIoT network. *Applied Science* 11. MDPI, Basel. doi: 10.3390/app112411985
15. Cristian F (1989) Probabilistic clock synchronization. *Distributed Computing* 3(3):146–158. doi: 10.1007/BF01784024
16. Gore RN (2021) *Investigating software-based clock synchronization for industrial networks*. Licentiate Theses. Mälardalen University Sweden - School of Innovation, Design und Engineering
17. Schnierle M, Polak C, Röck S (2019) Mensch-Roboter-Interaktion mit Mixed Reality auf Basis einer „Digital Twin as a Service“-Plattform, *atp magazin* 5/2019, Robotik und Digital Twin in der Smart Factory. Vulkan-Verlag. doi: 10.17560/atp.v61i5.2415
18. Welper G (2015) Transformed snapshot interpolation. *arXiv: Numerical Analysis*. doi: 10.48550/arXiv.1505.01227
19. Schnierle M, Röck S (2018) Plattform für die Mixed-Reality-in-the-Loop-Simulation. *wt-online*, Springer-VDI. doi: 10.37544/1436-4980-2018-09-59
20. Hönig J, Schnierle M, Scheifele C, Spielmann T, Münster C, Roth A, Röck S, Verl A (2021) Mixed-reality-in-the-loop simulation von Produktionssystemen zur Aus- und Weiterbildung. *atp magazin*, *atp* 63:6–7, Vulkan-Verlag. doi: 10.17560/atp.v63i6-7.2538

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Anwendungsberichte über den industriellen Einsatz der Mixed Reality im Maschinen- und Anlagenbau

17

Ulf Sprung, Thomas Celofiga, Dario Goller, Jana Hönig, Marc Schnierle, Timm von Bergen und Sascha Röck

Zusammenfassung

Visualisierungs- und Interaktionsmethoden der Mixed Reality, wie beispielsweise Augmented Reality oder Virtual Reality, eröffnen neuartige Anwendungspotenziale im Maschinen- und Anlagenbau. In diesem Beitrag werden Mehrwerte der Mixed Reality sowie praxisnahe Anwendungsszenarien aus Perspektive von zwei Maschinenbau-Unternehmen präsentiert. Während die topex GmbH in diesem Beitrag den Entwicklungsprozess kundenindividueller Anlagen und die Schulung von Fachpersonal mittels Mixed Reality im Sondermaschinenbau fokussiert, präsentiert die Schuler Pressen GmbH Einsatzszenarien im Produktentstehungszyklus sowie im Betrieb von Werkzeugmaschinen.

U. Sprung (✉) · D. Goller
topex GmbH, Erkenbrechtsweiler, Deutschland
E-Mail: U.Sprung@topex.de

T. Celofiga
Schuler Pressen GmbH, Göppingen, Deutschland

J. Hönig · M. Schnierle · T. von Bergen · S. Röck
Virtual Automation Lab (VAL), Hochschule Esslingen, Esslingen, Deutschland

17.1 Einleitung

Der Maschinen- und Anlagenbau bildet in Deutschland eine wichtige industrielle Säule und ist im Rahmen des Technologietrends und Innovationstreibers Industrie 4.0 mit steigenden Anforderungen hinsichtlich Entwicklungszeit, Komplexität, Flexibilität und Vernetzung von Maschinen und Anlagen konfrontiert.

Die Querschnittstechnologie des Digitalen Zwillings kann in Verbindung mit modernen Visualisierungstechnologien einen Beitrag zu den aus diesen Anforderungen ableitbaren Herausforderungen leisten. Insbesondere die symbiotische Kombination von Digitalen Zwillingen mit Visualisierungs- und Interaktionsmethoden der Mixed Reality zur Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation (MRiLS) eröffnet vielfältige neue Anwendungspotenziale über den gesamten Lebenszyklus von Maschinen wie beispielsweise in der Gestaltung komplexer Planungsprozesse oder einer praxisorientierten Mitarbeiterqualifizierung.

Während die bislang im Entwicklungsprozess des Maschinen- und Anlagenbaus eingesetzten X-in-the-Loop Simulationen [1] auf konventionellen Computer-Monitoren ohne visuelle Integration der realen Anlagenumgebung basieren und eine Interaktion des Menschen über Maus und Tastatur fokussieren, ermöglicht die MRiLS eine vollständige Integration des Menschen in ein Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum. Die virtuellen Komponenten werden dem Nutzer dazu über Mixed Reality-Endgeräte wie Augmented Reality (AR)-Brillen oder Virtual Reality (VR)-Brillen bereitgestellt.

In diesem Beitrag wird ein praxisorientierter Anwendungsbericht aus Perspektive des mittelständischen Sondermaschinenbau-Unternehmens topex GmbH (Abschnitt 17.2) und aus der Perspektive des Werkzeugmaschinenbau-Unternehmens Schuler Pressen GmbH (Abschnitt 17.3) vorgestellt. Die Unternehmen skizzieren ausgewählte Digitalisierungspotenziale, die durch den Einsatz dieser modernen Technologien während der Entwicklungs- und Betriebsphase erreicht werden können. Die Umsetzungen werden anhand konkreter Szenarien aufgezeigt.

17.2 Mixed Reality im Sondermaschinenbau der topex GmbH

In diesem Abschnitt werden die Herausforderungen in der Domäne des Sondermaschinenbaus sowie die Einsatzmöglichkeiten der Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation und deren Mehrwerte aus Perspektive des mittelständischen Sondermaschinenbau-Unternehmens topex GmbH vorgestellt.

Anwendungsdomäne und Herausforderungen

Der Maschinen- und Anlagenbau ist durch den steigenden Automatisierungsgrad sowie die wachsende Vernetzung der Maschinen mit einer zunehmenden Maschinenkomplexität konfrontiert. Für den Teilssektor Sondermaschinenbau lassen sich im Vergleich zum Serienmaschinenbau zudem spezifische Merkmale identifizieren:

- **Hohe Variantenvielfalt:** Die Maschinen und Anlagen werden entsprechend individueller Kundenanforderungen entwickelt, wodurch eine hohe Variantenvielfalt bei geringen Losgrößen resultiert.
- **Aufwändige Planung:** Die Integration von Sondermaschinen in bestehende Produktionssysteme und die spezifischen Rahmenbedingungen des Kunden verursachen hohe Planungsaufwände und Kalkulationsunsicherheiten.
- **Dynamische Entwicklungsprozesse:** Aus den kundenindividuellen Projekten resultieren Entwicklungsprozesse mit kurzen Zykluszeiten und dynamischen Änderungsprozessen.

Als mittelständisches Sondermaschinenbau-Unternehmen beschäftigt sich die topex GmbH mit diesen Herausforderungen und bietet seinen Kunden individuelle Automatisierungslösungen zur Teilekennzeichnung und für komplexe Handhabungsprozesse. Das Leistungsspektrum reicht von automatisierten Etikettier-Systemen über Laserbeschriftungsanlagen zur lebenslangen Produktkennzeichnung und Rückverfolgbarkeit bis hin zu RFID-Systemen zur Erfassung von Produkten. Die Anlagen der topex GmbH zeichnen sich durch einen hohen Anteil an Robotik und eine hochintegrierte Bauweise aus (siehe Abb. 17.1).



Abb. 17.1 Exemplarische Sondermaschinen der topex GmbH zur automatisierten Bauteilkennzeichnung im Bereich RFID und Handhabung von biegeschlaffen Bauteilen wie Spacermaterialien und Isolationsfolien in der Batteriefertigung für Elektrofahrzeuge

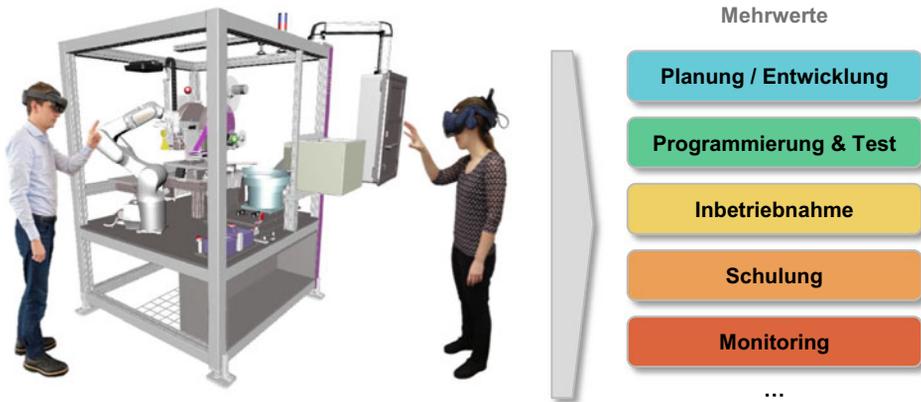


Abb. 17.2 Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation als Treiber für digitale Mehrwerte im Sondermaschinenbau

Mehrwerte des Digitalen Zwillinges und der Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation

Ein Baustein zur Bewältigung der steigenden Herausforderungen zunehmend komplexer werdender vernetzter Anlagen im Sondermaschinenbau sind Digitale Zwillinge, welche die reale Maschine mit deren Daten- und Verhaltensmodell virtuell abbilden. Die Digitalen Zwillinge werden in der Entwicklungsphase der Anlage erstellt und bieten bereits in dieser Phase Mehrwerte für das Unternehmen: So können beispielsweise Ingenieure die Simulationsmodelle bereits in der Planung für die Virtuellen Inbetriebnahme nutzen, um Anlagenabläufe und Steuerungsfunktionen zu optimieren.

Eine MRiLS erweitert die bislang eingesetzten Digitalen Zwillinge um Visualisierungs- und Interaktionsmethoden der Mixed Reality und bildet als Querschnittstechnologie die Grundlage für vielfältige weitere digitale Mehrwerte über den kompletten Lebenszyklus einer Anlage hinweg. Beispielhafte Einsatzgebiete der MRiLS bei der topex GmbH sind in der Planung und Entwicklung, in der betrieblichen Aus- und Weiterbildung sowie bei der Überwachung der im Betrieb befindlichen Anlage (Monitoring) zu identifizieren (siehe Abb. 17.2).

Aus den dargestellten Merkmalen und Trends des Sondermaschinenbaus können insbesondere zwei Handlungsfelder abgeleitet werden, die im Vergleich zum Serienmaschinenbau durch die kundenindividuellen Maschinen und Anlagen geprägt sind und deren Mehrwerte durch den Einsatz der MRiLS nachfolgend an beispielhaften Szenarien detaillierter vorgestellt werden:

- Planung und Integration von kundenspezifischen Lösungen in bereits bestehende Fertigungslinien

- Schulung von Fachpersonal für die Bedienung und Instandhaltung der Sondermaschinen

Die Umsetzung der dargestellten MRiLS-Handlungsfelder erfolgt auf Basis der am Virtual Automation Lab (VAL) der Hochschule Esslingen entwickelten Digital Twin as a Service Plattform (VAL DTaaS) [2, 3]. Die VAL DTaaS ermöglicht die flexible Kopplung von verschiedenen Mixed Reality-Endgeräten, wie zum Beispiel AR/VR-Brillen, Tablets und Smartphones, mit industrieller Steuerungstechnik und Offline-Programmiersystemen. Die Digitalen Zwillinge können in der VAL DTaaS über eine webbasierte Engineering-Oberfläche erstellt werden und stehen über eine Cloud-Infrastruktur standort-, zeit- und endgeräteunabhängig zur Verfügung.

Einsatz des Digitalen Zwillings und der Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation zur Planung und Integration von kundenspezifischen Lösungen in bestehende Fertigungslinien

Eine wachsende Herausforderung für den Entwicklungsprozess im Sondermaschinenbau stellt die Integration von kundenspezifischen Sondermaschinen in bereits bestehende Fertigungslinien dar. Kritische Aspekte hinsichtlich räumlicher Vorgaben, Kollisionsvermeidung sowie Prozessabläufe im realen Umfeld sind zu beachten, um spätere kosten- und zeitintensive Anpassungen vermeiden zu können.

In vielen Entwicklungsprojekten stehen keine vollständigen beziehungsweise aktuellen Zeichnungen oder 3D-CAD-Daten der realen Umgebung am Kundenstandort zur Verfügung, wodurch große Unsicherheiten in der Planung verursacht werden. Derzeit beschränkt sich die Darstellung der Plandaten von Sondermaschinen in der Praxis im Wesentlichen auf konventionelle 3D-CAD-Systeme oder Layout-Visualisierungen ohne Einbeziehung der realen Produktionsumgebung vor Ort. Nachteilig an diesem Ansatz ist, dass die reale Umgebung in den solitären Softwaresystemen visuell nicht einbezogen werden kann und somit alle wichtigen Rahmenbedingungen manuell modelliert werden müssen (z. B. räumliche Gegebenheit, Arbeitsräume angrenzender Produktionssysteme). Die Informationskongruenz zwischen Realität und virtuellem Planungsstand kann daher nur unter großem Zeitaufwand geprüft werden.

Mit der Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation kann der Digitale Zwilling der geplanten Sondermaschine dagegen dreidimensional in Originalgröße im realen Anlagenumfeld visualisiert werden und in Kombination mit Bewegungsabläufen und Steuerungszyklen eine frühzeitige Planung mit gesichertem Informationsstand unterstützen (siehe Abb. 17.3).

Die topex GmbH hat die MRiLS erfolgreich in einem Kundenprojekt eingesetzt, in dem Fahrzeug-Rohkarosserien mit RFID-OnMetalTags versehen werden. Die RFID-Technologie ermöglicht eine schnelle und zuverlässige Identifikation von Produkten entlang der kompletten Fertigungs- und Wertschöpfungskette, in diesem Anwendungsfall zur Fahrzeugidentifikation.

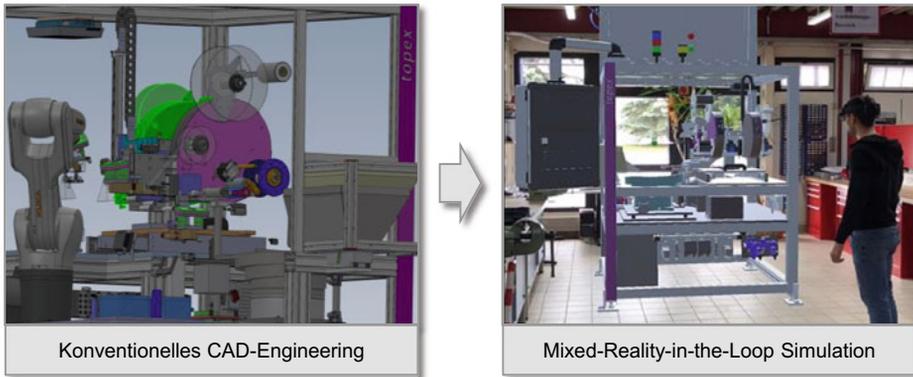


Abb. 17.3 Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation zur dreidimensionalen Visualisierung einer Sondermaschine in der realen Umgebung

Die Sondermaschine der topex GmbH umfasst den Standarddrucker topex 7000, der durch den Einbau einer RFID Schreib-/Leseinheit zu einem RFID fähigen Komplettsystem konfigurierbar ist. Die für diesen Zweck konzipierte Maschinenzelle ist zudem mit einem Handlingroboter ausgestattet, der sowohl das Teilehandling innerhalb der Zelle als auch die Applizierung des RFID-OnMetalTags direkt an der Fahrzeugkarosserie übernimmt.

Aufgrund der beschränkten räumlichen Platzverhältnisse sollen bereits in einem frühen Stadium des Projektes die grundlegende Machbarkeit und Kollisionspotenziale beim Anfahren sowie beim Erreichen einzelner Roboterpositionen an der Karosserie geprüft, und damit eine Entscheidungsgrundlage für die Auswahl eines Robotersystems geschaffen werden.

Zu diesem Zweck wurden verschiedene Robotersysteme virtuell erprobt und sämtliche Bewegungsabläufe sowie die Teilesimulation mit der MRiLS hinsichtlich Kollisionsvermeidung sowie Zykluszeit getestet. In dem Anwendungsszenario werden hauptsächlich zwei Modi der MRiLS verwendet:

- **Intuitive Roboterinteraktion zur Positionierkontrolle**

Der Bediener kann die Pose eines virtuellen Handlingroboters durch Verschieben des Endeffektors manipulieren. Hierzu greift der Bediener den virtuellen Endeffektor und bewegt diesen zu den Zielkoordinaten. Auf Basis der Koordinaten wird mithilfe einer Rückwärtstransformation die Pose des Roboters berechnet und dem Bediener mittels Mixed Reality visualisiert. Über diese intuitive Manipulation kann der Bediener einfach und schnell überprüfen, ob alle relevanten Positionen im realen Umfeld erreicht werden können. Die dreidimensionale Visualisierung sowie die intuitive Interaktion mit dem Digitalen Zwilling der Anlage bietet zugleich die Grundlage für einen schnellen

fachbereichsübergreifenden Austausch von Informationen. Auftretende Probleme können dabei direkt am Modell besprochen und für alle Teilnehmenden dreidimensional in der realen Umgebung visualisiert werden.

- **Anbindung von Steuerungsdaten zur virtuellen Programm-Inbetriebnahme**

Der Digitale Zwilling des Roboters ist an die industrielle Steuerung angebunden und wird über diese gesteuert. Zusätzlich sind in diesem Szenario Bewegungsabläufe von weiteren Komponenten (z. B. Einzelachsen) sowie ein Teilefluss integriert. Durch die Kopplung des Digitalen Zwillings und der industriellen Steuerung kann das Programm der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) mithilfe der MRiLS dreidimensional in der realen Umgebung visualisiert und getestet werden. Der Benutzer kann sich dabei um die virtuelle Anlage bewegen und mögliche Programmfehler und Kollisionen detektieren. Das optimierte Programm kann anschließend ohne Adaptionaufwand in die Maschinensteuerung geladen und auf dieser ausgeführt werden.

Unter Verwendung dieser beiden Modi der MRiLS wurden für den Anwendungsfall verschiedene Robotermodelle des Herstellers Kuka AG in der virtuellen Maschinenzelle bezüglich den Anforderungen des beschränkten Platzverhältnisses sowie des Erreichens aller relevanten Positionen getestet (siehe Abb. 17.4). Durch die intuitiven Interaktionsmöglichkeiten zur Manipulation der Endeffektor-Position in Mixed Reality können mögliche Kollisionspotenziale frühzeitig aufgedeckt werden.

Im weiteren Projektverlauf wurde die MRiLS der Maschinenzelle in die reale Fertigungslinie des Automobilherstellers integriert, um die Wechselwirkungen mit der realen Anlagenumgebung zu prüfen. Neben der Erreichbarkeit der Applizierposition des RFID-OnMetalTags an der Fahrzeugkarosserie durch den Handlingroboter standen auch die Kopplung der weiteren Komponenten der Maschinenzelle mit der Fertigungsumgebung sowie die Handhabung des Bedienpanels im Fokus.

Der Einsatz der MRiLS hat bei diesem Anwendungsbeispiel in einer frühen Projektphase die Auswahl und Konfiguration der Robotersysteme erleichtert und im realen Umfeld nicht erreichbare Applizierpositionen sowie Kollisionspotenziale innerhalb und außerhalb der Maschinenzelle aufgedeckt. Neben dem beschriebenen Einsatz zur Konstruktionsunterstützung und zur Vorabinbetriebnahme kann der erstellte Digitale Zwilling im weiteren Projektverlauf über den gesamten Lebenszyklus der Anlage hinweg, beispielsweise zum Maschinenmonitoring oder der Schulung, eingesetzt werden.

Einsatz des Digitalen Zwillings und der Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation zur Schulung von Fachpersonal

Neben der Entwicklung und Herstellung der Sondermaschinen kommt der Schulung des Fachpersonals für Bedienung und Instandhaltung eine immer größer werdende Bedeutung zu. Aus dem Serienmaschinenbau bekannte Konzepte wie Schulungszentren oder separate Schulungsmaschinen, die vorab zur Einweisung der Mitarbeitenden genutzt werden

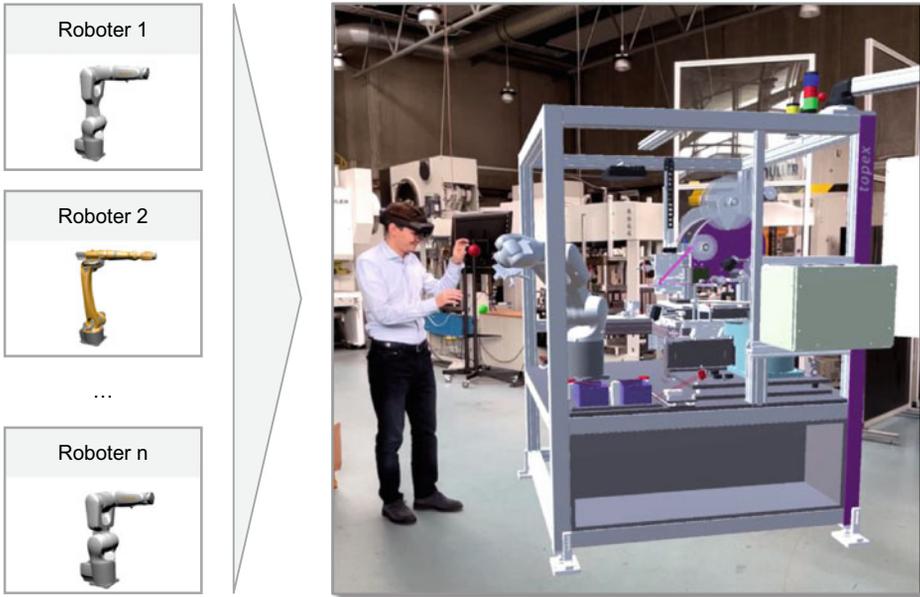


Abb. 17.4 Integration verschiedener Roboter-Modelle in die Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation der Maschinenzelle

können, sind aufgrund der hohen Variantenvielfalt der Maschinen nur bedingt in den Sondermaschinenbau übertragbar. Bisher werden Schulungen im Sondermaschinenbau im Allgemeinen an der realen Maschine durchgeführt, nachdem die Maschine beim Kunden installiert und in die entsprechenden übergeordneten Fertigungssysteme integriert wurde. Die kurzen Entwicklungszeiten, die heterogene Steuerungslandschaft und nicht zuletzt der steigende Automatisierungsgrad sowie die geforderte Flexibilität der Anlagen sorgen dabei für wachsende Anforderungen an die Maschinenschulungen im Sondermaschinenbau. Die Schulung an der realen Anlage ist jedoch durch eine fehlende Skalierbarkeit des Lerngegenstandes, mangelnde Flexibilität bezüglich des Lernortes und der Lernzeit sowie durch eine mögliche Gefährdung von Mensch und Maschine bei Fehlbedienungen geprägt. Demgegenüber kann der Schulungsteilnehmer bei der Schulung mittels MRiLS mit dem Digitalen Zwilling der Sondermaschine orts- und zeitunabhängig ohne Gefährdungspotenzial mit einer hohen Schaltungstiefe immersiv und intuitiv interagieren. Hierzu ist der Digitale Zwilling an eine Ausprägung der Steuerungstechnik angekoppelt und bildet definierte Eigenschaften der realen Anlage ab.

Bei der topex GmbH wurde im Rahmen einer Technikerarbeit für eine ausgewählte Sondermaschine zur Kennzeichnung von Steuerungsgehäusen der Fahrzeugelektronik die MRiLS für eine Mitarbeiterschulung umgesetzt und erstmals auf der Internationalen

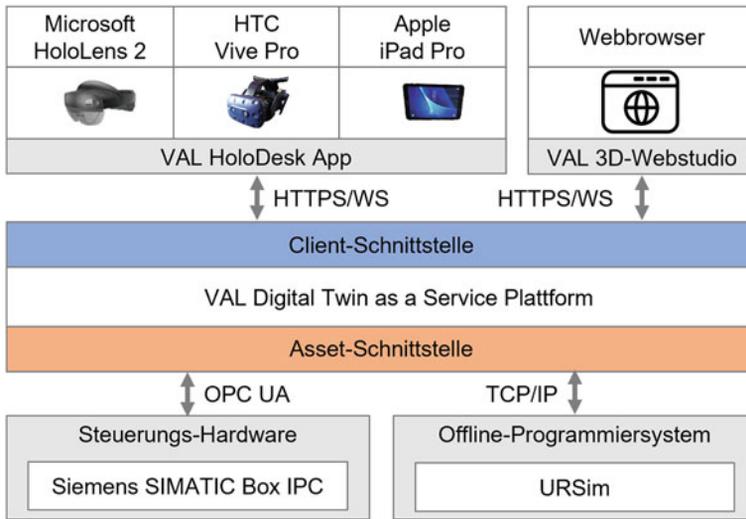


Abb. 17.5 Architektur der MRiLS des Kennzeichnungssystems mit Anbindung an Steuerungs-Hardware der Siemens AG und an das Offline-Programmiersystem URSim von Universal Robots

Fachmesse für Produktions- und Montageautomatisierung (Motek) präsentiert. Die Sondermaschine umfasst neben dem Roboter UR5 des Herstellers Universal Robots weitere Komponenten der Firma FESTO wie Pneumatikzylinder sowie einen elektrischen Drehantrieb. Die Bedruckung und Bereitstellung des individuellen Etiketts erfolgt durch einen Standarddrucker der Baureihe 7000 der topex GmbH.

Abb. 17.5 zeigt die Architektur der MRiLS des Kennzeichnungssystems. Die Erstellung und Bereitstellung des Digitalen Zwillings erfolgt in der VAL DTaaSP. Über die Asset-Schnittstelle sind die externen Assets an die Plattform angebunden. Das Offline-Programmiersystem URSim zur Programmierung des Roboters UR5 von Universal Robots ist über das Kommunikationsprotokoll TCP/IP gekoppelt. Der Datenaustausch mit der Steuerungs-Hardware von Siemens (SIMATIC Box IPC) erfolgt über OPC UA.

Abb. 17.6 zeigt den Einsatz der MRiLS mit Kopplung an die reale Steuerungs-Hardware und Verwendung des Offline-Programmiersystems in Augmented Reality. Der Bediener erhält über eine AR-Brille die virtuellen Anlagenkomponenten in der realen Umgebung dreidimensional visualisiert und kann mit diesen intuitiv interagieren. Über das mobile Bedienpanel in Form eines Tablets kann der Bediener zudem den Roboter unter Verwendung des originären Offline-Roboterprogrammiersystems URSim immersiv programmieren.

Mit Hilfe der MRiLS kann der Schulungsteilnehmer bei diesem Anwendungsbeispiel den Roboter zuerst auf Basis des Digitalen Zwillings virtuell programmieren und durch das dreidimensionale Abbild mögliche Kollisionen detektieren, bevor anschließend die virtuellen Komponenten schrittweise durch reale Komponenten wie zum Beispiel das Etikettier-System ersetzt werden (siehe Abb. 17.7). Durch die intuitive und immersive

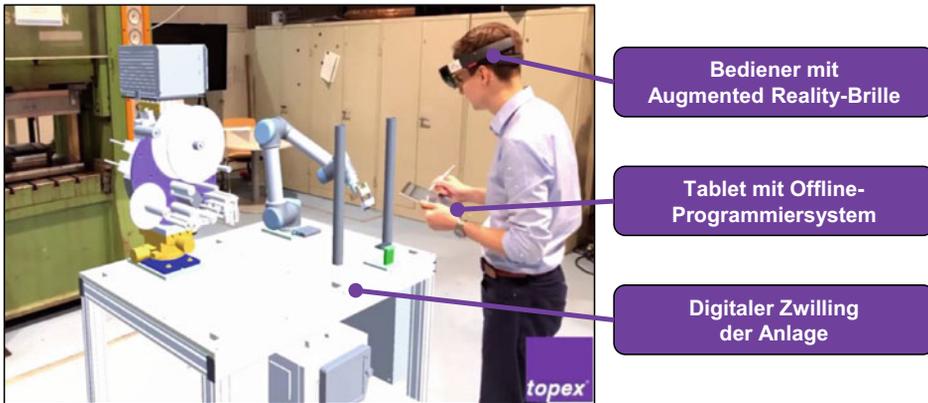


Abb. 17.6 MRiLS-Schulungssystem mit Kopplung an reale Steuerungsalgorithmen

Programmierung des Roboters auf Basis des offiziellen Programmiersystems können die Lernenden ihr Wissen aus der MRiLS direkt auf die reale Anlage übertragen.

Der Digitale Zwilling bietet durch die orts- und zeitunabhängige Bereitstellung für die Zukunft vielfältige Mehrwerte bei der Schulung technischer Fachkräfte (siehe Abb. 17.8). So ist bei der Schulung mittels MRiLS neben dem flexiblen Zugriff auf die Schulungsinhalte beispielsweise auch die Entkopplung von Schulung und realer Maschine, eine hohe Schaltungstiefe durch risikolose Testszenarien mit realer Steuerungstechnik sowie auswertbare Schulungshandlungen und reproduzierbare Schulungsszenarien möglich.

Zusammenfassung

Die Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation bietet nicht nur bei der Planung und Integration von kundenspezifischen Lösungen in bereits bestehende Fertigungslinien sowie bei der Schulung von Fachpersonal große Potenziale, sondern bildet durch die Kombination von Digitalen Zwillingen mit Visualisierungsmethoden der Mixed Reality die Grundlage für zahlreiche digitale Mehrwerte im Sondermaschinenbau.



Abb. 17.7 Stufenlose Kombination realer Anlagenkomponenten eines Etikettier-Systems der topex GmbH auf der Motek 2019

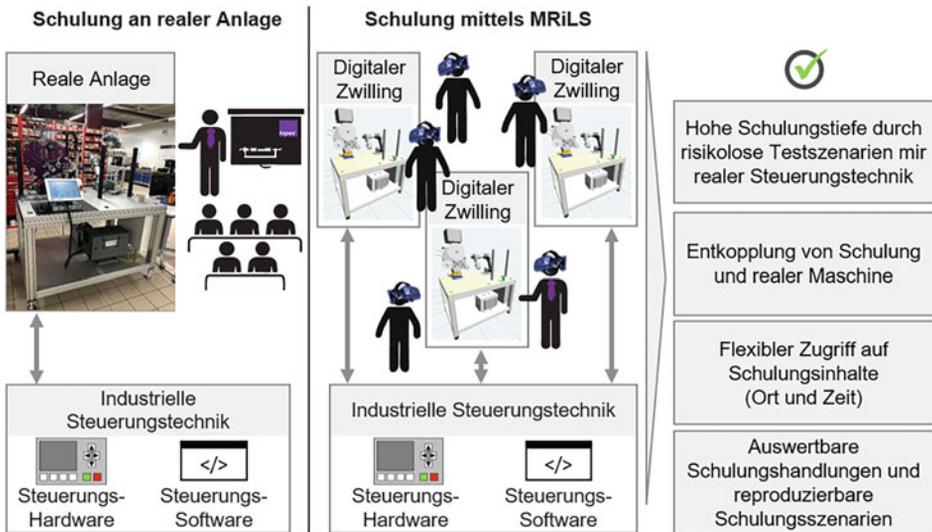


Abb. 17.8 Vorteile eines MRiLS-basierten Schulungssystems gegenüber einer Schulung an der realen Anlage

Die Möglichkeit, Maschinen und Prozesse bereits in einem frühen Stadium des Projektverlaufs im realen Umfeld visualisieren zu können, reduziert Risiken und erhöht dadurch die Planungssicherheit in Projekten des Sondermaschinenbaus. Sollten Probleme, wie Störkonturen, fehlerhafte Schnittstellen und Ablaufstörungen erst vor Ort festgestellt werden, müssen diese dann zumeist unter enormen Zeitdruck, erschwerten Umständen und mit hohen Mehrkosten behoben werden. Mithilfe der MRiLS können diese bereits in einem frühen Stadium des Projektes aufgedeckt und somit frühzeitig vor der Inbetriebnahme (IBN) behoben werden. Die Vorteile, sowohl für den Auftraggeber wie auch für den Auftragnehmer, im Hinblick auf Kosten-, Zeitersparnis und Risikominderung gerade bei komplexen und schwierig einzuschätzenden Umständen motivieren den systematischen Einsatz der Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation im Entwicklungs- und Schulungsprozess des Sondermaschinenbaus.

17.3 Mixed Reality im Werkzeugmaschinenbau für die Umformtechnik bei der Schuler Pressen GmbH

In diesem Abschnitt wird die Anwendungsdomäne des Werkzeugmaschinenbaus sowie die Einsatzmöglichkeiten des Digitalen Zwillings und der Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation aus Sicht der Schuler Pressen GmbH vorgestellt.

Anwendungsdomäne und Herausforderungen

Der Werkzeugmaschinenbau ist als Teil des Maschinen- und Anlagenbaus eine wichtige Industriebranche in Deutschland und bildet mit seinen Maschinen und Anlagen die Grundlage für industrielle Produkte, Produktinnovationen sowie neue Verfahrenstechnologien. Wie der allgemeine Maschinenbau ist auch der Werkzeugmaschinenbau mit der Forderung immer kürzerer Entwicklungs- und Produktionszeiten bei hohem Preisdruck sowie der steigenden Produktivität und den wachsenden Qualitätsansprüchen konfrontiert. Ein wichtiger Technologietrend in diesem Zusammenhang ist die umfassende Digitalisierung und intelligente Vernetzung der industriellen Produktion im Sinne der 4. Industriellen Revolution (Industrie 4.0) [4]. Für deren Umsetzung müssen sich jedoch nicht nur die Industrieunternehmen, als potenzielle Abnehmer der Werkzeugmaschinen, sondern auch die Werkzeugmaschinenhersteller selbst mit der Digitalisierung und Vernetzung von Produkten, Prozessen, Wertschöpfungsketten sowie der gesamten Produktion und Logistik beschäftigen. Dies bedarf von Seiten der Hersteller der Entwicklung und Bereitstellung einer umfassenden Lösung für die durchgängige Vernetzung der Prozesse sowie die Sicherstellung der Funktionsfähigkeit, der immer komplexer werdenden Prozesse und Anlagen.

Die Schuler Pressen GmbH, als Teil des internationalen Technologiekonzerns ANDRITZ, beschäftigt sich mit diesen Herausforderungen und bietet kundenspezifische Spitzentechnologie in allen Bereichen der Umformtechnik – von der vernetzten Presse bis hin zur Presswerksplanung. Das Produktportfolio umfasst neben Pressen auch Automations- und Software-Lösungen, Werkzeuge, Prozess-Knowhow und Services für die gesamte metallverarbeitende Industrie.

Mehrwerte Digitaler Zwilling und Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation bei der Schuler Pressen GmbH

Ein Schlüsselement für Industrie 4.0 Anwendungen im Werkzeugmaschinenbau ist der Digitale Zwilling einer Maschine, Anlage oder einer ganzen Produktion, welcher grundlegend ein virtuelles Abbild als Daten- und Verhaltensmodell einer realen Sache beschreibt. Der Digitale Zwilling wird bereits in der Entwicklung erstellt und über den Lebenszyklus der Anlage hinweg mit weiteren Daten angereichert.

Der Digitale Zwilling wird bei der Schuler Pressen GmbH insbesondere für die Virtuelle Inbetriebnahme sowie den Systemtest mittels Hardware-in-the-Loop Simulation eingesetzt. Der Einsatz ist jedoch nicht auf diese Anwendungen begrenzt, sondern kann über den gesamten Produktlebenszyklus einer Anlage hinweg erfolgen. Abb. 17.9 zeigt einen Überblick der bei der Schuler Pressen GmbH identifizierten Stakeholder und Use Cases des Digitalen Zwillings.

Insbesondere durch die Erweiterung um moderne Visualisierungsmethoden der Mixed Reality (z. B. Augmented Reality-Brillen, Virtual Reality-Brillen, Tablets) zur MRiLS



Abb. 17.9 Stakeholder und Use Cases des Digitalen Zwillings bei der Schuler Pressen GmbH

bilden sich vielfältige Einsatzmöglichkeiten, die über konventionelle Computervisualisierungen hinaus gehen.

Digitale Zwillinge in Kombination mit Methoden der Mixed Reality bieten sowohl Mehrwerte für den Hersteller als auch für den Betreiber der Maschinen und Anlagen, wobei sich insbesondere Einsatzgebiete während dem Produktentstehungszyklus und nach der Betriebsübergabe ableiten lassen, die nachfolgend detaillierter vorgestellt werden.

Einsatz des Digitalen Zwillings und der Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation während dem Produktentstehungszyklus

Im Produktentstehungsprozess kommt der simulationsgestützten Entwicklung eine immer wichtigere Aufgabe zu. Neben der steigenden Leistungsfähigkeit der Hardware und Software ist dieser Trend auch auf die kürzeren Produktentstehungszeiten zurückzuführen. Mit Hilfe der Simulation kann dabei schneller und zielgerichteter auf die jeweiligen Kundenanforderungen reagiert werden. Zudem ist die Simulation nicht mehr nur eine Domäne der mechanischen Konstruktion (z. B. in Form einer Mehrkörper-Simulation), sondern wird auch in der Software-Entwicklung und der Virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) des Automatisierungssystems immer wichtiger. Durch den Einsatz der VIBN mit dem Digitalen Zwillings können die Komponenten der Anlage (Software und Hardware) bereits frühzeitig mit steigender Realitätsnähe zum späteren Einsatzszenario gegeneinander getestet werden [1]. Dabei können mögliche Fehler bereits vor dem Aufbau der realen Anlage aufgedeckt werden, so dass alle Steuerungskomponenten und Systeme miteinander funktionieren und auch bei Störfällen korrekt, ohne Gefahr für Mensch, Maschine und Werkzeug, reagieren. Durch das frühzeitige Testen können kosten- und zeitintensive Nacharbeiten an der realen Anlage vermieden und der Entwicklungsprozess verkürzt werden, woraus eine Kostensenkung sowie eine Effizienzsteigerung resultieren (siehe Abb. 17.10).

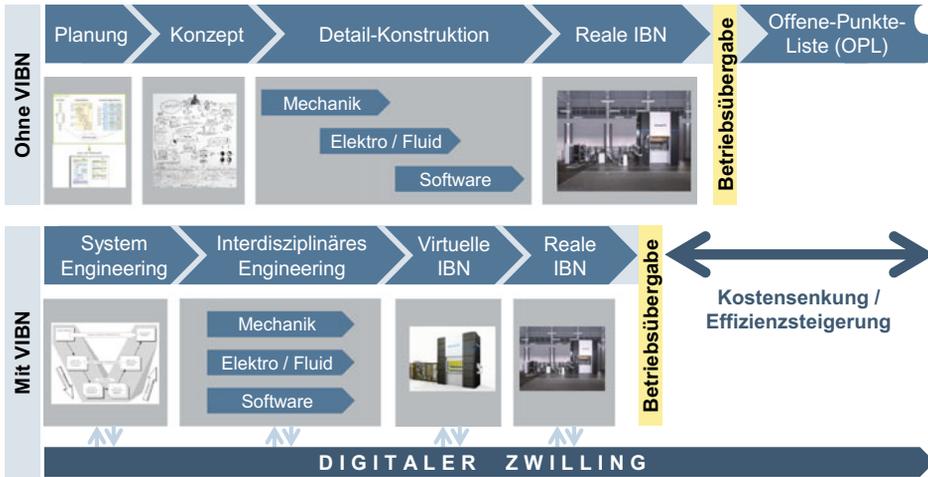


Abb. 17.10 Produktentstehungsprozess ohne und mit Virtueller Inbetriebnahme

Trotz dieser vielfältigen Potenziale ist in der Praxis teilweise eine Zurückhaltung gegenüber dem Einsatz von Digitalen Zwillingen zu beobachten, da es insbesondere bei der Einführung der VIBN an Referenzprojekten und Erfahrungen mangelt, um den Vorteil objektiv darzustellen. Zudem sind für den Erfolg bei der Einführung dieser neuen Technologien nicht nur die vielfältigen technischen Möglichkeiten ausschlaggebend, sondern es müssen auch nicht technische Hürden, wie zum Beispiel die Akzeptanz der Technologie im eigenen Unternehmen und beim Kunden entsprechend einbezogen und überwunden werden. Die Akzeptanz kann durch einen frühzeitigen Austausch zwischen den beteiligten Personen (z. B. Entwickler und späterer Anwender des Digitalen Zwillinges) und dem damit verbundenen direkten und transparenten Aufzeigen der Vorteile des Einsatzes von Digitalen Zwillingen sowie dem nutzergerechten Anreichern von Informationen gefördert werden. Die Umstellung und der Einsatz des Digitalen Zwillinges sowie moderner Visualisierungsmethoden erfolgen darüber hinaus häufig parallel zum normalen Tagesgeschäft, wodurch insbesondere zu Beginn der Einführung ein Mehraufwand resultiert. Um hierbei den Mitarbeitenden bereits frühzeitig die vielfältigen Potenziale aufzuzeigen und bereits nach einer kurzen Zeit greifbare Ergebnisse zu erzielen, sollte anfangs mit kleinen und zeitlich limitierten Projekten gestartet werden, welche im Laufe der Zeit kontinuierlich aufgebaut werden. Im Produktentstehungsprozess wurde bei der Schuler Pressen GmbH beispielhaft ein Digitaler Zwilling sowie die MRiLS einer Münzpräganlage der neuen Generation umgesetzt.

Die technologische Umsetzung des Digitalen Zwillinges und der MRiLS erfolgte über die Echtzeit-Simulationsumgebung ISG-virtuos und die am VAL der Hochschule Esslingen entwickelte VAL DTaaSP [2]. Die Echtzeit-Simulationsumgebung ISG-virtuos ermöglicht neben der Echtzeitfähigkeit des Verhaltens des Digitalen Zwillinges auch eine

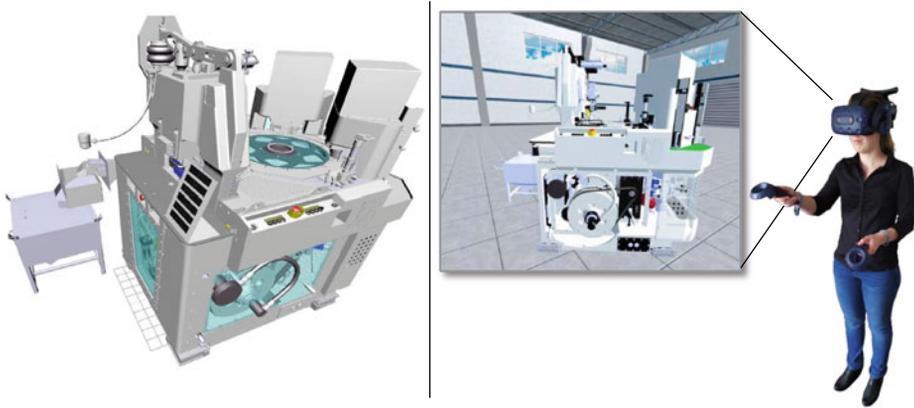


Abb. 17.11 Modell einer Münzpräganlage der Schuler Pressen GmbH (links); Visualisierung und Interaktion in Virtual Reality (rechts)

einfache Kopplung der später im Betrieb eingesetzten industriellen Steuerungstechnik mit dem Digitalen Zwilling. Über die VAL DTaaSP kann der Digitale Zwilling mit Methoden der Mixed Reality gekoppelt, plattformunabhängig bereitgestellt (z. B. Browser, Virtual Reality-Brillen, Augmented Reality-Brillen, Tablets und Smartphones) sowie über eine Cloud-Infrastruktur standort- und zeitunabhängig verfügbar gemacht werden. Die Verbindung beider Systeme erfolgt über eine Schnittstelle auf Basis von OPC UA, die den Austausch der Daten zwischen Echtzeit-Simulation und 3D-Visualisierung gewährleistet.

Durch den Einsatz Digitaler Zwillinge in Kombination mit modernen Visualisierungsmethoden der Mixed Reality konnte die Münzpräganlage den Kunden auf der Messe World Money Fair 2019 egozentrisch, immersiv und in 1:1 Größe gezeigt werden, obwohl die Anlage noch in der Endphase der Entwicklung war und lediglich die ersten Langläuferkomponenten gefertigt wurden (siehe Abb. 17.11). Neben der Möglichkeit der frühzeitigen Vorstellung des neuen Produkts und der Funktionsweise erhält der Hersteller durch die MRiLS bereits vor Markteinführung Feedback von den Kunden, das wiederum direkt in die Produktentwicklung einfließt.

Der Digitale Zwilling wurde im weiteren Projektverlauf um ein reales Bedienpanel erweitert, das über die TCP-Schnittstelle mit der Echtzeitumgebung ISG-virtuos gekoppelt ist. Der Bediener kann über das reale Bedienpanel das Verhalten des Digitalen Zwillings kongruent zur realen Anlage manipulieren und erhält die Reaktion des Digitalen Zwillings der Anlage über das Mixed Reality-Endgerät dargestellt. Bei der Hardware wurden Multicore-Prozessoren eingesetzt, um die Multicore-Fähigkeit des industriellen Softwaresystems TwinCAT der Firma Beckhoff Automation GmbH & Co. KG zur Kopplung mehrerer Anlagenkomponenten in einem gemeinsamen Simulationsprojekt verwenden zu können.

In der Entwicklungsphase kann diese Ausprägungsstufe der MRiLS mit Methoden der Augmented Reality auch zur Visualisierung des Digitalen Zwilling in der realen Umgebung in Originalgröße, zum Beispiel an dem späteren Einsatzort in der Produktion des Kunden, eingesetzt werden. Durch die Kopplung mit der Steuerungsausprägung kann der Programmablauf mittels der MRiLS bereits vor dem realen Anlagenaufbau ohne Gefährdung von Mensch, Maschine und Werkzeug getestet und optimiert werden, um beispielsweise Kollisionen mit anderen bereits real existierenden Anlagen und Komponenten zu vermeiden. Die bereits erstellten Digitalen Zwillinge können zudem als Referenzmodell für Folgeprojekte verwendet werden, wodurch der initiale Aufwand reduziert und somit Entwicklungszeiten und -kosten eingespart werden können. Die MRiLS kann neben der Inbetriebnahme auch im Vertrieb zur Visualisierung der Anlage beim Kunden sowie in der Schulung eingesetzt werden. Die Kopplung mit der realen Steuerungstechnik ermöglicht dabei ein gefahrloses exploratives Erkunden und Trainieren an der Anlage auf Basis des realen Anlagenverhaltens. Die Schulung mittels MRiLS kann sowohl bereits vor dem Aufbau der realen Anlage als auch parallel zum Betrieb der Anlage durchgeführt werden.

Einsatz des Digitalen Zwilling und der MRiLS nach Betriebsübergabe

Der Digitale Zwilling in Kombination mit Methoden der Mixed Reality bietet über die bereits vorgestellten Anwendungsszenarien im Produktentstehungsprozess hinaus auch in der Betriebsphase Mehrwerte für den Hersteller sowie vermehrt auch für den Betreiber und Bediener der Maschinen und Anlagen. Der Hersteller kann den Digitalen Zwilling in der Betriebsphase beispielsweise bei Änderungen des Programmablaufs sowie des Aufbaus der realen Anlage einsetzen. Die Änderungen werden vom Hersteller zuerst simuliert und virtuell in Betrieb genommen, bevor diese anschließend an der realen Anlage übernommen werden. Für den Betreiber hat dies den wesentlichen Vorteil, dass die Anlage erst aus der Produktion genommen wird, wenn alle Änderungen geprüft und getestet sind, wodurch mit einer kürzeren Produktionsunterbrechung zu rechnen ist.

Die Kopplung der im Betrieb der realen Anlage verwendeten Steuerung mit dem Digitalen Zwilling kann zudem zum Monitoring und mittels MRiLS zum immersiven Visualisieren von aufgezeichneten historischen Daten eingesetzt werden. Abb. 17.12 zeigt die beispielhafte Kopplung der an der Hochschule Esslingen betriebenen Schuler Servopresse CSP 100 mit dem Digitalen Zwilling in Augmented Reality (links) sowie die Möglichkeiten der Aufzeichnung von Maschinendaten mit Kopplung an den Digitalen Zwilling (rechts) [5].

Die Kopplung der realen Anlage mit dem Digitalen Zwilling während des Betriebs kann darüber hinaus zum schnellen Erkennen von größeren Abweichungen beziehungsweise Unregelmäßigkeiten der realen Anlage eingesetzt werden. Der echtzeitfähige Digitale Zwilling läuft parallel zur Motion Control Steuerung auf dem Steuerungsrechner, um unmittelbar die berechneten und die realen Werte vergleichen und gegebenenfalls Unregelmäßigkeiten identifizieren zu können. Dieses Einsatzszenario wurde beispielhaft für einen mehrgliedrigen Antrieb mit den Bewegungsdaten Geschwindigkeit, Beschleunigung und

Drehmoment umgesetzt. Im Vergleich zur realen Anlage weist das implementierte Verhaltensmodell des Digitalen Zwillings eine mittlere Abweichung von 5–10 % auf. Die Abweichungen zwischen Verhaltensmodell und realer Anlage könnten im realen Anlagenbetrieb zur Überprüfung des Maschinenzustandes genutzt werden. Sind im Betrieb der Anlage größere Abweichungen als die mittleren Abweichungen des Verhaltensmodell und der realen Anlage festzustellen, ist von einer Fehlfunktion der realen Anlage auszugehen und es sollte eine entsprechende Überprüfung eingeleitet werden. Die erzielte Genauigkeit des Modells könnte in einem nächsten Projektschritt mit Hilfe von Methoden der Künstlichen Intelligenz erhöht werden, um noch genauere Aussagen über ein mögliches Fehlverhalten der realen Anlage auf Basis des Digitalen Zwillings treffen zu können.

Zusammenfassung

Dem Digitalen Zwilling von Maschinen und Anlagen kommt im Werkzeugmaschinenbau auf dem Weg zur 4. Industriellen Revolution eine zentrale Bedeutung zu. Insbesondere in Kombination mit Visualisierungs- und Interaktionsmethoden der Mixed Reality eröffnet der Digitale Zwilling neue Anwendungspotenziale für Hersteller und Bediener von Werkzeugmaschinen im Bereich der Umformtechnik. Der Einsatz ist dabei nicht auf einen einzelnen Anwendungsfall beschränkt, sondern erstreckt sich über den kompletten Lebenszyklus der Anlage von der Entwicklung (z. B. Software Applikation) über die Inbetriebnahme bis hin zum Betrieb der Anlage (z. B. Prozessoptimierung, Monitoring) sowie auf Schulungen und den Vertrieb. Neben den technologischen Möglichkeiten spielen bei der Einführung dieser neuen Technologien auch die nicht-technischen Herausforderungen für den Erfolg beziehungsweise Misserfolg eine zentrale Rolle. Um bei

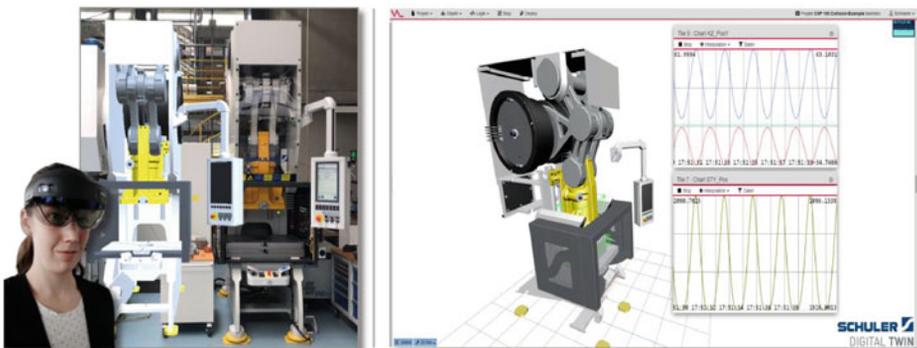


Abb. 17.12 Kopplung der realen Servo-Pressen CSP 100 mit dem Digitalen Zwilling zur Visualisierung und Interaktion (links) sowie zur Aufzeichnung von Maschinendaten in der webbasierten Visualisierung (rechts)

den Mitarbeitenden trotz des Mehraufwandes, der durch die Einführung neuer Technologien resultiert, frühzeitig Akzeptanz zu schaffen, sollten insbesondere zu Beginn kleinere Modelle umgesetzt werden. Bei kleineren Modellen kann bereits nach kurzer Zeit ein greifbarer Erfolg erfahren werden, wodurch die Potenziale der neuen Technologien direkt aufgezeigt werden können. Auf Basis dieser positiven Erfahrungen können die Modelle dann im weiteren Projektverlauf kontinuierlich ausgebaut werden.

Literatur

1. Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI) (2016) Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (VDE); VDI/VDE 3693 Blatt 1: Virtuelle Inbetriebnahme; Modellarten und Glossar
2. Schnierle M, Polak C, Röck S (2019) Mensch-Roboter-Interaktion mit Mixed Reality auf Basis einer „Digital Twin as a Service“-Plattform, atp magazin 5/2019, Robotik und Digital Twin in der Smart Factory, Vulkan-Verlag. doi: 10.17560/atp.v6i1i5.2415
3. Hönig J, Schnierle M, Hüttenberger M, Polak C, Röck S (2021) Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation für Schulungen im Maschinen- und Anlagenbau, Proceedings of DELFI Workshops 2021, S. 9–22, Hochschule Ruhr West, ISBN 978-3-946757-03-0
4. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (2017) IT-Report „Simulation im Maschinenbau“. VDMA-Verlag
5. Hönig J, Wagner S, Röck S (2019) Moderne Servopresse mit digitalem Zwilling für die Forschung, Blechnet. Vogel Communications Group, Würzburg

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Anwendungsberichte über den Einsatz der Mixed Reality in der Aus- und Weiterbildung technischer Fachkräfte

Mathias Liewald, Jana Höinig, Jochen Schade, Angelika Weber, Philipp Clauß, Timm von Bergen, Marc Schnierle und Sascha Röck

Zusammenfassung

Methoden der Mixed Reality (MR) bieten mit deren immersiven und intuitiven Visualisierungs- und Interaktionsformen vielfältige Potenziale in der Wissensvermittlung an Universitäten, Hochschulen sowie beruflichen Schulen. In diesem Beitrag werden praxisorientierte Mehrwerte für die Aus- und Weiterbildung technischer Fachkräfte aufgezeigt, die durch die Kopplung von Mixed Reality-Methoden mit Digitalen Zwillingen zur Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation (MRiLS) ermöglicht werden. Das Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart thematisiert den praxisorientierten Einsatz der MRiLS in der universitären Lehre im Bereich der Umformtechnik, während das Virtual Automation Lab der Hochschule Esslingen die Mehrwerte der MRiLS in der Hochschulbildung vorstellt. Abschließend zeigt die gewerbliche Max-Eyth-Schule Kirchheim unter Teck die Potenziale der MRiLS in der beruflichen Aus- und Weiterbildung im Bereich Robotik auf.

M. Liewald · P. Clauß

Institut für Umformtechnik (IFU), Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

J. Höinig · T. von Bergen · M. Schnierle · S. Röck (✉)

Virtual Automation Lab (VAL), Hochschule Esslingen, Esslingen, Deutschland

E-Mail: sascha.roeck@hs-esslingen.de

J. Schade · A. Weber

Max-Eyth-Schule Kirchheim unter Teck, Kirchheim unter Teck, Deutschland

18.1 Motivation

Durch den steigenden Automatisierungsgrad sowie die wachsende digitale Vernetzung der Produktionssysteme kommt der Aus- und Weiterbildung technischer Fachkräfte eine immer größere Bedeutung zu. Diese wachsende Bedeutung ist dabei nicht auf einen Ausbildungszweig beschränkt, sondern umfasst sowohl die sekundäre, tertiäre als auch quartäre Bildung.

Heutige Aus- und Weiterbildungskonzepte im Bereich der Robotik, Prozessautomatisierung und Umformtechnik basieren meist auf Schulungen an realen Anlagen sowie auf simulationsbasierten Ansätzen. Während bei der Wissensvermittlung an realen Anlagen ein großer Lernerfolg erzielt werden kann, sind auch einige Defizite an dieser Lernform zu erkennen: Die reale Anlage kann als Lerngegenstand nicht flexibel skaliert werden, im laufenden Betrieb verbergen sich Gefährdungspotenziale und es sind nicht alle Prozesse für den Menschen sichtbar. Beispielsweise erfolgt der plastische Formgebungsvorgang von Werkstücken in der Umformtechnik oftmals im geschlossenen Umformwerkzeug. Eine visuelle Beobachtung des Prozessablaufs, der unterschiedlichen Umformstufen sowie der Kinematik der Umformmaschine ist deshalb an der realen Anlage nur schwer möglich. Die simulationsbasierten Methoden ermöglichen hingegen zwar die Visualisierung des Umformprozesses auf zweidimensionalen Monitoren, jedoch ist dies für die Lernenden meist aufgrund der visuellen Limitierungen und begrenzten Interaktivität nicht greifbar, wodurch der Lernerfolg gemindert wird.

An diesen Herausforderungen setzt die Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation (MRiLS) an, die mit der immersiven Visualisierung von Digitalen Zwillingen sowie der intuitiven Interaktion vielfältige Potenziale bei der Wissensvermittlung eröffnet. Die MRiLS kombiniert hierzu die Digitalen Zwillinge mit Visualisierungs- und Interaktionsmethoden der Mixed Reality. Die virtuellen Komponenten werden dem Lernenden über Mixed Reality-Endgeräte (z. B. Augmented Reality (AR)-Brillen oder Virtual Reality (VR)-Brillen) bereitgestellt und ermöglichen hierdurch eine vollständige Integration des Lernenden in den Simulationskreislauf.

Im Folgenden werden praxisorientierte Anwendungsberichte der MRiLS in der ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung aus der Sichtweise des Instituts für Umformtechnik (IFU) der Universität Stuttgart sowie des Virtual Automation Lab (VAL) der Hochschule Esslingen vorgestellt. Abschließend zeigt die gewerbliche Max-Eyth-Schule Kirchheim unter Teck die Potenziale der MRiLS in der beruflichen Aus- und Weiterbildung auf.

Die Bildungseinrichtungen thematisieren in ihren Anwendungsberichten die Herausforderungen bei der Wissensvermittlung in der jeweiligen Anwendungsdomäne und stellen einen Lösungsansatz mittels der MRiLS zur Behebung dieser Herausforderungen vor. Die Umsetzungen werden mithilfe konkreter Einsatzszenarien dargestellt.

18.2 Mixed Reality für die ingenieurwissenschaftliche Ausbildung in der Umformtechnik am IFU der Universität Stuttgart

In diesem Abschnitt wird ein praxisorientierter Anwendungsbericht für den Einsatz der Mixed Reality in der ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung im Fachbereich der Umformtechnik aus Perspektive des Instituts für Umformtechnik der Universität Stuttgart vorgestellt.

Anwendungsdomäne und Herausforderungen

In der Umformtechnik erfolgt der plastische Formgebungsvorgang durch eine auf das Halbzeug oder die Zwischengeometrie des Werkstücks bezogene lokale oder vollflächige Krafteinwirkung mittels geeigneter Umformwerkzeuge. Im Mittelpunkt der technologischen Betrachtungen zahlreicher Umformverfahren steht dabei die angestrebte Form- und Maßgenauigkeit des Werkstücks unter Beachtung seines sich durch den Umformvorgang verändernden Gefüges. Die Herausforderungen an Ingenieure und Technologen in der Umformtechnik besteht demnach in der präzisen rekursiven Betrachtung der räumlichen Gestaltveränderung der Halbzeuggeometrie bei gleichzeitig ablaufenden Gefügeveränderungen in einer oder mehreren Umformstufen bis hin zur Endgeometrie des Werkstücks. Der plastisch wirkende Umformvorgang läuft dabei oftmals im geschlossenen Umformwerkzeug ohne jegliche Möglichkeit der visuellen Beobachtbarkeit des Prozessablaufs ab.

Die fertigungstechnische Auslegung von Betriebsmitteln für Umformprozesse, wie zum Beispiel die der Wirkflächen der Umformwerkzeuge, erfolgt daher in vielen Fällen auf Basis von heuristischem Prozesswissen und ist in Form von angewandtem Erfahrungswissen verfügbar. Wesentliche Voraussetzungen für den Aufbau von heuristischem Erfahrungswissen in der Blech- und auch in der Massivumformung bilden:

- Ein gutes räumliches Vorstellungsvermögen,
- das Verständnis von elastischen Wechselwirkungen in der Kraftwirkungskette der Umformmaschine über einzelne Werkzeugkomponenten in das Bauteil,
- Erfahrungswissen in Bezug auf das Materialverhalten während des Umformens sowie
- das Verständnis von Reibungseffekten in den einzelnen Prozessphasen.

Vor diesem Hintergrund wurden in den letzten Jahrzehnten erhebliche Anstrengungen unternommen, um numerische Berechnungsverfahren für die Auslegung von Umformmaschinen in Bezug auf den erforderlichen Kraft- und Arbeitsbedarf für zuvor spezifizierte Umformvorgänge zu qualifizieren. Solche Berechnungsverfahren werden auch für die konstruktive Gestaltung der Umformwerkzeuge bzw. von deren Wirkflächen verwendet, um den plastischen Formgebungsprozess in seinem zeitlichen Verlauf möglichst genau bestimmen und nachvollziehen zu können. In diesem Zusammenhang entstanden in den letzten Jahren Software-Tools, welche die Visualisierung dieser Berechnungsergebnisse

und der Zeitfolge der Gestaltänderung des Halbzeugs bis zur finalen Werkstückgeometrie ermöglichen.

Seit einigen Jahren wird zudem an digitalen Darstellungen der Umformmaschine gearbeitet, in welche die jeweils zu gestaltenden Umformwerkzeuge durch den Einsatz moderner Visualisierungstechnologien wie AR oder VR zum Beispiel virtuell montiert werden können. Mit diesen visuellen Darstellungen der Digitalen Zwillinge von Umformmaschine und -werkzeug stehen somit gänzlich neuartige Hilfsmittel zur Verfügung, um zum Beispiel das Bedienpersonal in der Produktion bezüglich der Funktionsweise der Maschine effizient zu schulen, Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten zu unterstützen oder auch Studierende an diese Verfahren heranzuführen. Letztlich dienen solche neuen Technologien auch der fortschrittlichen universitären Lehre in der Umformtechnik, um ein rasches Verständnis von Prozesskinematiken in der Blech- und Massivumformung zu erzielen.

In jüngster Zeit sind erste Softwarelösungen am Markt verfügbar, mit denen die in Zeitschritten berechnete Stofffluss- beziehungsweise Formänderungssimulation des Halbzeugs in die entsprechenden Zeitschritte der Simulation von Starrkörperbewegungen integriert werden können. Mit solchen Simulationen sind realistische Eindrücke der Prozesskinematik in Verbindung mit den sich zeitgleich einstellenden Formänderungen des Werkstücks und auch der dafür erforderlichen Umformkräfte sowie der elastischen Deformationen des gesamten Wirksystems möglich. Hintergrund dieser Entwicklungen bilden Forderungen aus Praxis und Wissenschaft, die sich einstellenden Produktionsfehler im bzw. am Werkstück oder in dessen Gefüge phänomenologisch nachvollziehen und darauf aufbauend technologische Gegenmaßnahmen treffen zu können.

Die Herausforderungen für die Entwicklung solcher Software-Tools liegen zum einen in der klassischen Modellierung der Starrkörperbewegung entsprechender Elemente der Umformmaschine und des Umformwerkzeuges in Verbindung mit möglichst realistischer zeitlicher Skalierung. Zum anderen besteht bis heute Entwicklungsbedarf in Bezug auf die Integration von analytischen und numerischen Strukturberechnungen in die Starrkörpersimulation von Umformmaschinen und Umformwerkzeugen.

Im Folgenden wird vor diesem Hintergrund ein Lösungsansatz vorgestellt, welcher am Institut für Umformtechnik (IFU) an der Universität Stuttgart einerseits für Studierende der Umformtechnik und andererseits für die weiterführende Integration von heuristischem Prozesswissen in das Engineering von Umformwerkzeugen im Rahmen wissenschaftlicher Arbeiten realisiert wurde. Das wesentliche Entwicklungsziel bestand in der flexiblen Konfigurierbarkeit der Prozessparameter von Umformprozessen und in der intuitiven Bedienung von Wahlmöglichkeiten für Darstellungsformen des zeitlichen Ablaufs des Umformvorganges in Form der sich verändernden Werkstückgeometrie oder der dabei auftretenden Dehnungen oder Spannungen im Werkstück.

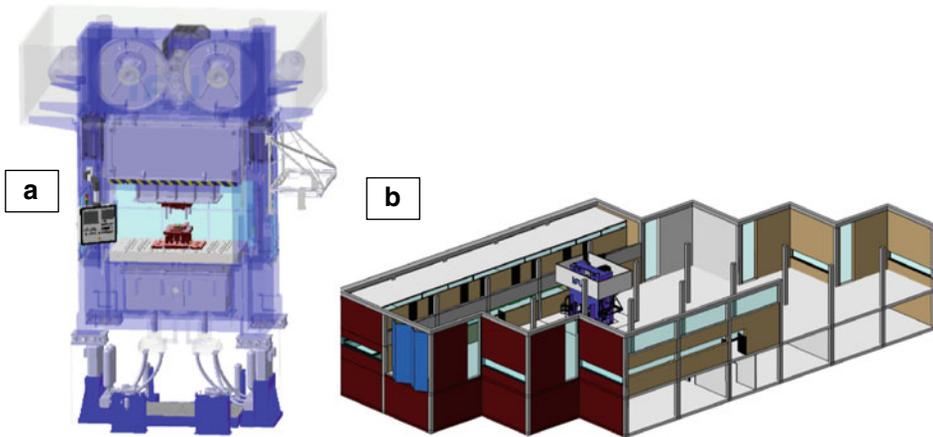


Abb. 18.1 a) Modellierter Ziehpressen als CAD-Darstellung in isometrischer Ansicht, wobei die verdeckten Einzelbaugruppen wie z. B. Zieheinrichtung und Antriebsstrang mittels Transparenz gut sichtbar sind; b) Modellmaschine im virtuellen Abbild des Versuchsfeldes des Institutes

Lösungsansatz und Realisierung

Das Institut für Umformtechnik an der Universität Stuttgart arbeitet seit 2018 an der Entwicklung von Digitalen Zwillingen für ausgewählte Umformverfahren, welche eine entsprechende Modellierung der Umformmaschinen, des Umformwerkzeuges und der charakteristischen Prozesskinematik einschließen. Dazu wurde eine servo-mechanisch angetriebene Karosserieziehpressen auf Basis von CAD-Zeichnungen in ihren wesentlichen konstruktiven Komponenten wie Ständer, Kopf- und Fußstück mit Pressentisch, Zieheinrichtung, Stößel und Stößelantrieb sowie Antriebsmechanik, Überlastsicherung und Hubverstellung abgebildet (siehe Abb. 18.1 a) und in das virtuelle Abbild des Versuchsfeldes des Institutes integriert (siehe Abb. 18.1 b).

Hierbei ist ein möglichst hoher Detaillierungsgrad des CAD-Modelles wichtig, um relevante technische Details der Wechselwirkung von Maschinen- und Werkzeugkomponenten hinreichend genau darstellen zu können und den Anforderungen von Lehre und Forschung gerecht zu werden. Auf Basis dieser konventionellen CAD-Modelle kann nun mit dem in Abb. 18.2 dargestellten Workflow eine Weiterentwicklung zur MRiLS vorgenommen werden. Die MRiLS kombiniert die bereits aus dem Engineering bestehenden Verhaltensmodelle mit Visualisierungs- und Interaktionsmethoden der Mixed Reality.

Zur Erstellung der MRiLS wurden in der Digital Twin as a Service Plattform (VAL DTaaS) des Virtual Automation Lab der Hochschule Esslingen die Spezifikation der Freiheitsgrade und die Bewegungsabläufe der Maschine sowie die möglichen Interaktionen für den Bediener definiert. Nach diesem Modellierungs- und Aufbereitungsschritt konnte das Modell mittels verschiedener Mixed Reality-Endgeräte (z. B. Virtual

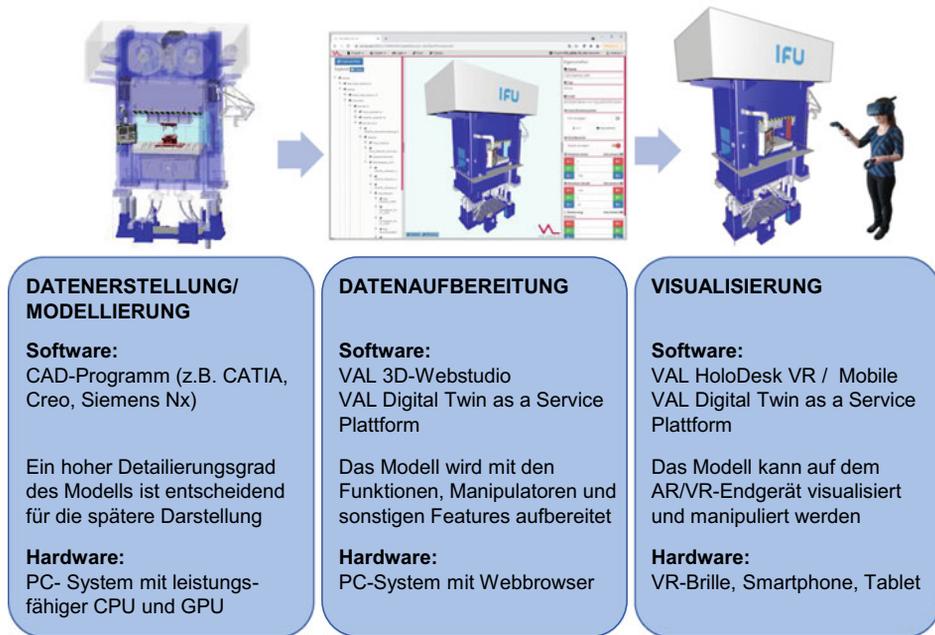


Abb. 18.2 Schaubild der Arbeitsschritte vom konventionellen CAD-Modell hin zur Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation (MRiLS)

Reality-Brillen, Smartphones, Tablets) über die Software VAL HoloDesk instanziiert und interaktiv bedient werden.

Abb. 18.3 zeigt den Aufbau des VR-Arbeitsplatzes am Institut für Umformtechnik an der Universität Stuttgart. Für das Blechumformverfahren Tiefziehen wurden bisher zwei Varianten umgesetzt, um die zu visualisierende Geometrie inklusive Werkzeug und Zieh-teil in der VR/AR-Umgebung betrachten und mit dieser interagieren zu können. Einerseits kann eine VR-Brille zusammen mit einem Controller verwendet werden, um immersiv und interaktiv in die VR-Welt einzutauchen, andererseits kann die Visualisierung auch mittels AR auf dem Tablet oder dem Smartphone erfolgen.

Anwendungsbeispiel: Virtuelle Lehrveranstaltung für das Tiefziehen

Das Tiefziehen gehört zu den Zugdruck-Blechumformverfahren und beruht auf einer gezielt eingestellten Haltefunktion des Randes der Platine zwischen Blechhalter und Matrizenrand und der Ausformung der Platine zu einem Zieheteil zwischen Ziehstempel und Matrizegeometrie. Somit wirkt dieses Werkzeugprinzip während des gesamten Umformvorganges unter Krafteinwirkung auf die gesamte Platine.



Abb. 18.3 VR-Arbeitsplatz am Institut für Umformtechnik. Der Bediener erhält die Visualisierung der VR-Umgebung über die VR-Brille bereitgestellt und kann sich über den Controller bewegen und die virtuellen Komponenten manipulieren

Die Wirkungsweise des weltweit etablierten Blechumformverfahrens Tiefziehen kann durch die realisierte Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation zur Darstellung der Funktionsweise der Ziehpresse und des Umformwerkzeuges dreidimensional visualisiert und in Lehrveranstaltungen leicht verständlich vermittelt werden. Die bislang nicht visuell beobachtbaren Prozessabläufe in dem vollständig geschlossenen Umformwerkzeug können durch die Visualisierung der Mixed Reality betrachtet und explorativ erkundet werden. Die Bedienung ist über ein vereinfachtes virtuelles Bedienpanel neben der Presse realisiert (siehe Abb. 18.4). Die Variation der Prozessparameter wie Stößelgeschwindigkeit, Stößelkraft, Hubverstellung oder Ziehkissenkraft erfolgt durch einen virtuellen Lichtstrahl, der mittels der Controller aktiviert wird.

Über das Bedienpanel können Effekte innerhalb des Umformprozesses aufgrund eingestellter Pressenparameter visualisiert und zur Laufzeit verändert werden. Beispielsweise



Abb. 18.4 Virtuelles Bedienpanel zur Betätigung der Maschinenfunktionalitäten in der MRiLS

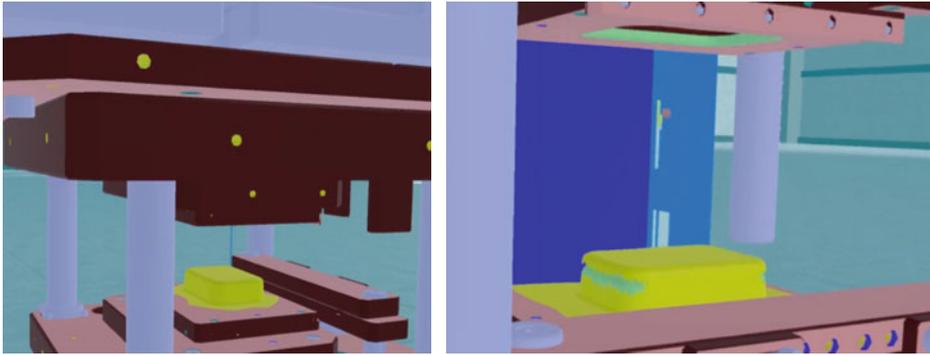


Abb. 18.5 Beispielhafte Szenarien des Tiefziehens z. B. mit beschnittener Platine (links), Werkstück mit Reißer in der MRiLS (rechts)

wird eine zu hohe Faltenbindung im Ziehflansch des Bauteils im Falle einer zu geringen Ziehkissenkraft durch Einblendung der parameterabhängigen Simulationsergebnisse sichtbar und während des Pressvorganges nachvollziehbar. Der Anwender der Presse kann also durch Veränderung der Pressen- bzw. Prozessparameter virtuell hinterlegte Effekte auf das Bauteil wie etwa die Entstehung von Reißern oder Bifurkationseffekte nachvollziehen (siehe Abb. 18.5).

Durch die Ansichten aus verschiedenen Blickwinkeln und Schnitten durch das Ziehwerkzeug können Details wie zum Beispiel die relative Bewegung von Werkzeugkomponenten in Abhängigkeit vom sich einstellenden Fehlerbild auf das Bauteil eingehend und wiederholt betrachtet werden. Über die virtuelle Bedienoberfläche können verschiedene Szenarien aufgerufen werden, welche die Erzeugung von Gut-Teilen, aber auch von fehlerhaften Teilen aufgrund ungeeigneter Prozessparameter umfassen.

Mit der beschriebenen Visualisierung können bereits erste und einfache Lehrinhalte zur Funktionsweise der Umformmaschinen und ihrer Wechselwirkung mit dem Prozessablauf während des Umformens in der Lehrveranstaltung ‚Grundlagen der Umformtechnik‘ an der Universität Stuttgart veranschaulicht werden. In der Lehrveranstaltung erlernen die Studierenden die Grundlagen und Verfahren der Blech- und Massivumformung, die physikalischen Verfahrensgrenzen, den konstruktiven Aufbau der wichtigsten Umformmaschinen und die Bauarten von Umformwerkzeugen sowie die Abschätzung der Umformkräfte und Umformleistungen von exemplarischen Umformvorgängen auf Basis analytischer Näherungslösungen. Die MRiLS-Darstellung des Blechumformvorgangs Tiefziehen eines einfachen Rechteckbauteils wird dabei von Studierenden mit sehr hoher Akzeptanz wahrgenommen. Insbesondere die Einblicke in das Zusammenwirken der wesentlichen Antriebskomponenten des Pressenstößels im Dauerhub sind für das Verständnis der Krafteinleitung des Stößelantriebes in den Stößelkörper, möglicher Kippungseffekte des Ziehstößels innerhalb seiner Führungen sowie deren Wechselwirkung mit dem Ziehkissen von hoher Bedeutung. Mit derart bewegten Darstellungen können

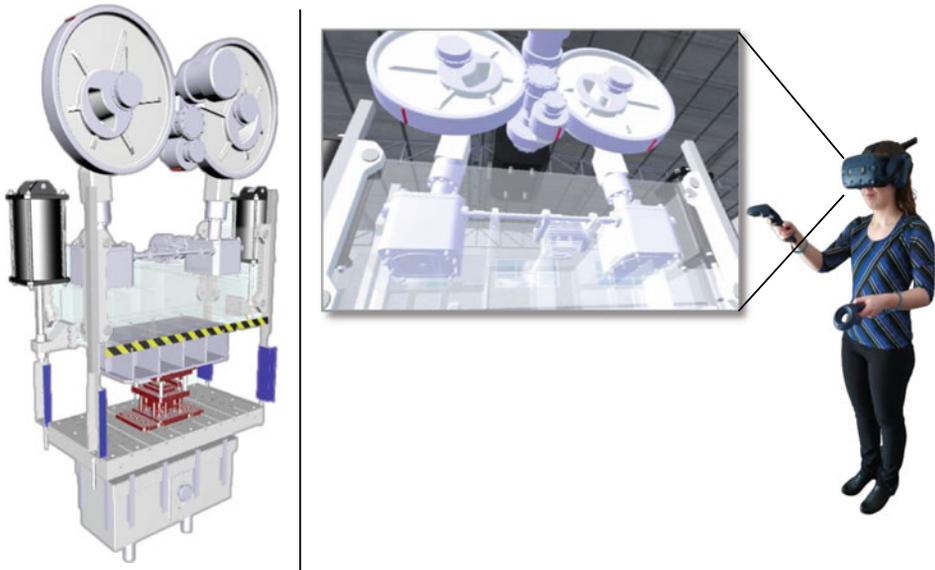


Abb. 18.6 Nutzer betrachtet den Antriebsstrang des Pressenstößels der virtuellen Presse mithilfe einer Virtual Reality-Brille

sämtliche Wechselwirkungen während des Umformvorganges in der Lehre in kurzer Zeit vermittelt werden, um schließlich auch mögliche Versagenserscheinungen am Bauteil durch den in der Umformmaschine erzeugten Kraftfluss anschaulich visualisieren zu können (siehe Abb. 18.6).

Die Nutzung Digitaler Zwillinge für Umformmaschinen und -werkzeuge bietet jedoch auch in der Forschung weiterführende Vorteile. Beispielsweise können störende Einflussfaktoren des Ziehvorgangs wie etwa ungleich lange Ziehpinoles, mit Spiel behaftete Ziehkissen- oder Stößelkonstruktionen oder sich asymmetrisch einstellende elastische Verformungen von Pressentisch oder -stößel anschaulich nachvollzogen und in ihrer Wirkung auf elastische Verformungen der Werkzeugkörper erklärt und effizient erfasst werden.

Weitere Vorteile in Bezug auf die Nutzung der Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation sind im Bereich der Schulung von Maschinenbedienern zu finden. So können in diesem Zusammenhang dreidimensionale egozentrische Darstellungen von Funktionsbaugruppen der Presse wie Antrieb, Stößelgewichtsausgleich, Überlastsicherung, Ziehkissen oder Hubverstellung im Stillstand und während des Hubes bereitgestellt werden. Vor diesem Hintergrund können auch Steuerungsfunktionen leicht nachvollziehbar erläutert und damit die Schulungszeiten von Bedienpersonal erheblich reduziert werden. Auch sind Visualisierungsfunktionen wie das Anzeigen von winkelabhängiger Stößelstellung, der Stößelgeschwindigkeit und -kraft bzw. der Ziehkissenkraft möglich. Die eigentlichen Schulungsinhalte können mit diesen technischen Möglichkeiten mittels einer zeitgleichen

Darstellung des Prozessablaufs über die VR-Brille und auf einem Bildschirm angezeigt werden, sodass die Handlungsweise der auszubildenden Person direkt nachvollzogen und korrigiert werden kann. Zudem bestehen Visualisierungsmöglichkeiten direkt am Arbeitsplatz von möglichen Neukunden, um Funktionalitäten der Maschine und ihrer Bedienbarkeit anschaulich und „begreifbar“ ohne das Vorhandensein einer physischen Maschine präsentieren zu können.

Ausblick

Aus heutiger Sicht sind für Anwendungen aus der Umformtechnik Weiterentwicklungen der MRiLS-Technologie in Bezug auf die Integration von Berechnungsergebnissen aus Struktursimulationen in die Zeitskala der Visualisierung erforderlich. Es bestehen zwar bereits Möglichkeiten, vorher berechnete Strukturbelastungen des Pressenrahmens, des Pressentisches, des Stößels oder des Ziehkissens als auch Simulationsrechnungen des Umformvorganges vorwählbaren Prozessparametern zuzuordnen und diese dann in das Darstellungsergebnis zu integrieren. Jedoch besteht bislang aus Gründen der aktuellen Rechnerleistung noch keine Möglichkeit, frei parametrisierbare numerische Prozesssimulationen mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) in der Zeitskala der MRiLS parallel ablaufen zu lassen und deren Ergebnisse ebenso in den Visualisierungsprozess zu integrieren. Hierzu könnte eine Kombinationslogik erstellt werden, sodass bereits berechnete Strukturdeformationen des Pressenrahmens oder Pressentisches mit den näherungsweise korrelierenden Simulationsrechnungen aus dem Umformprozess in derselben Darstellung betrachtet werden können. Diese Darstellungen werden in Zukunft für das rasche Erlangen des Prozessverständnisses für industrielle Anwendungen in der Praxis und auch für den akademischen Bereich ein hohes Potenzial aufweisen, um Prozesseffekte und deren Auswirkungen auf die Bauteilqualität im Einzelnen nachvollziehen zu können.

18.3 Mixed Reality für die ingenieurwissenschaftliche Ausbildung im Maschinenbau an der Hochschule Esslingen

In diesem Abschnitt werden die Einsatzgebiete und Potenziale der Mixed Reality für die Aus- und Weiterbildung am Virtual Automation Lab (VAL) der Fakultät Maschinen und Systeme der Hochschule Esslingen vorgestellt.

Anwendungsdomäne und Herausforderungen

Der Maschinenbau umfasst die Entwicklung, Konstruktion und Herstellung von Produktionssystemen und ist eine zentrale Ingenieursdisziplin sowie Schlüsseltechnologie unserer modernen Industriegesellschaft. Die Maschinenbaubranche ist mit dem Trend der wachsenden Vernetzung der Produktionsanlagen sowie der steigenden Digitalisierung konfrontiert. Vor diesem Hintergrund kommt der Aus- und Weiterbildung hochqualifizierter technischer Fachkräfte an Hochschulen eine immer größere Bedeutung zu.

In der Fakultät Maschinen und Systeme der Hochschule Esslingen sind unter anderem die Bachelor- und Masterausbildung im Maschinenbau angesiedelt. Während im Bachelorstudiengang ein breites grundlagenorientiertes natur- sowie ingenieurwissenschaftliches Wissen vermittelt wird, liegt der Fokus im Masterstudiengang auf dem Spannungsfeld der drei Einflussgrößen Umwelt, Gesellschaft und Technik. Um die Lernenden bestmöglich auf das spätere Berufsleben vorzubereiten, müssen die Lehr- und Lernformen in diesem Bereich stetig weiterentwickelt und neue Technologien und Trends in die Lehre aufgenommen werden.

Neben der theoretischen Wissensvermittlung liegt an der Hochschule Esslingen ein Schwerpunkt auf dem anwendungsorientierten Wissenstransfer in praxisnahen Laborübungen. Die Laborübungen werden in den vorgestellten Studiengängen mithilfe domänenspezifischer Simulationstools sowie an realen Maschinen durchgeführt.

Die eingesetzten Simulationstools sind üblicherweise als Einzelarbeitsplatzsysteme ausgelegt, die zumeist durch eine konventionelle Visualisierung am PC-Monitor und Interaktion über Maus und Tastatur charakterisierbar sind. Viele Lernende können die abstrakten Visualisierungen der Simulationsergebnisse nur schwer nachvollziehen, wodurch der Lernerfolg bei wichtigen Lerninhalten (z. B. im Bereich der Reglerauslegung oder Koordinatentransformationen bei Roboterkinematiken) gehemmt wird.

Das Lernen an realen Produktionsanlagen wird aktuell häufig von instruktionsorientierten Lerneinheiten dominiert. Trotz des hohen Praxisbezugs weist diese Form der Wissensvermittlung jedoch verschiedene Einschränkungen auf [1]. So steht meist nur eine reale Maschine für viele Lernende zur Verfügung, wobei der Standort und die Verfügbarkeit der Maschine den Lernort und die Lernzeit festlegt. Durch das von den Maschinen ausgehende Gefahrenpotential sind die komplexen Vorgänge innerhalb der Maschine meist von außen nicht sichtbar. Zudem können die Auswirkungen fehlerhafter Parametrierungen nicht ohne Risiko für Mensch und Maschine erprobt werden, obwohl für das Verständnis der Lernenden insbesondere das Maschinenverhalten im Grenzbereich von großer Bedeutung ist.

Lösungsansatz und Realisierung

Als Lösungskonzept für die beschriebenen Herausforderungen wird der Einsatz von Visualisierungs- und Interaktionsmethoden der Mixed Reality in Kombination mit Digitalen Zwillingen zur Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation (MRiLS) in ausgewählten Lehrmodulen an der Hochschule Esslingen erprobt.

Um die Qualität und Akzeptanz dieser Technologien sowie den erfolgreichen, systematischen und domänenübergreifenden Einsatz in der Lehre sicherzustellen, ist die Technologie als Erweiterung in bestehende Lehrformen einzubetten. Es ergeben sich die folgenden Anforderungen an die MRiLS [1]:

- Industrielle Gerätetechnik, bestehende Softwaresysteme und Simulationstools der bisherigen Lehrformen sollten flexibel und einfach integrierbar sein.
- Lehr- und Lernszenarien sollten mit geringen Vorkenntnissen ohne großen Aufwand von den Lehrenden erstellbar und für andere Lehr- und Lernszenarien wiederverwendbar sein.
- Die Modelle sollten endgeräte- und standortunabhängig für die Lernenden verfügbar sein.

Zur Lösung der genannten Anforderungen wird am VAL der Hochschule Esslingen im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten an einer Digital Twin as a Service Plattform (VAL DTaaS) gearbeitet. Die Plattform ermöglicht die flexible Kopplung von verschiedenen Endgeräten (Augmented Reality-Brillen und Virtual Reality-Brillen, Tablets, Smartphones, etc.) mit Datenquellen/Assets (Simulationstools, industrielle Gerätetechnik, wie Sensoren, Steuerungen, Maschinen und Anlagen) und bietet ein webbrowserbasiertes Autorentool zur einfachen Erstellung von Lehr-/Lerninhalten durch die Lehrenden selbst (siehe Abb. 18.7).

Innerhalb des Autorentools, dem VAL 3D-Webstudio, wird ein Funktionspool zur einfachen Erstellung der Digitalen Zwillinge bereitgestellt, der als Basis für die Erstellung der Lerninhalte genutzt werden kann. Die Nutzer können über die Plattform kollaborieren und sich eine gemeinsame MR-Szene über die Endgeräte laden. Dies beinhaltet neben der gemeinsamen Betrachtung auch die Multiuser-Interaktion mit den Digitalen Zwillingen, wobei Lernende allein, gemeinsam oder unter Anleitung eines Lehrenden an Problemstellungen arbeiten können. Zur Erweiterung der Multiuser-Kollaboration,

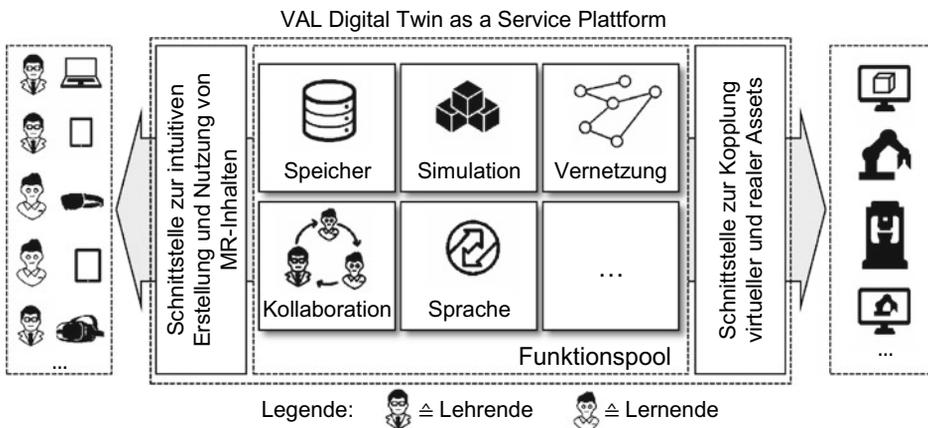


Abb. 18.7 Funktionspool und Schnittstellen des Autorentools der Digital Twin as a Service Plattform des Virtual Automation Lab

bietet der Funktionspool die Möglichkeit externe Cloud-Dienste bspw. zur Sprachverarbeitung und zur Sprachübersetzung einzubinden, wodurch eine multilaterale Kommunikation ermöglicht wird.

Das im VAL 3D-Webstudio erstellte Lernszenario steht den Lernenden über die Schnittstellenanwendung VAL HoloDesk durch den plattformunabhängigen Ansatz ohne Anpassungen des Digitalen Zwillings auf zahlreichen MR-Endgeräten zur Verfügung [2]. Die Cloud-basierte Bereitstellung der VAL DTaaSP ermöglicht den Lehrenden die selbst erstellten MR-Szenarien einer beliebigen Anzahl an Lernenden über das Internet zur Verfügung stellen, die wiederum zeit- sowie ortsunabhängig auf die Inhalte zugreifen und diese individuell erarbeiten können. Das Feedback aus der praktischen Anwendung in der Lehre fließt direkt in die Plattform zurück, sodass sich ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess einstellt.

Mit den niederschweligen Einsatzmöglichkeiten der VAL DTaaSP konnte die Lehre an der Hochschule Esslingen durch verschiedene MR-Lernszenarien erweitert werden. Abb. 18.8 zeigt eine Übersicht bislang umgesetzter Lernszenarien in den drei Kategorien Standalone-Lösungen (ohne Integration externer Tools), Kopplung mit Simulationstools

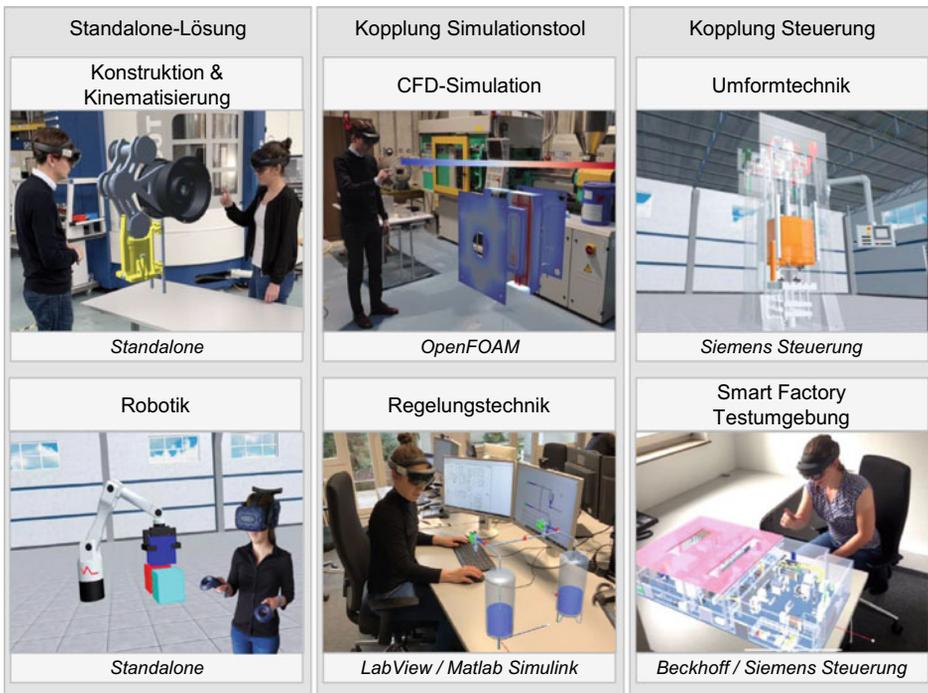


Abb. 18.8 Übersicht bislang umgesetzter Lernszenarien im Virtual Automation Lab der Hochschule Esslingen

sowie die Kopplung mit Steuerungen. Für jede Kategorie wird im Folgenden ein Lernszenario vorgestellt.

Standalone-Lösung am Beispiel „Konstruktion und Kinematisierung“

Das Lernszenario „Konstruktion und Kinematisierung“ ist eine begleitende Laborübung im Modul „Robotersysteme“ des Masterstudiengangs „Ressourceneffizienz im Maschinenbau“ der Hochschule Esslingen [1]. Im Rahmen der theoretischen Vorlesung erlernen die Studierenden die Grundlagen zur Berechnung und Simulation komplexer serieller sowie paralleler Kinematiken. Darauf aufbauend modellieren die Studierenden in dem vorlesungsbegleitenden Projekt eine vorgegebene Roboter-Kinematik in Gruppenarbeit, die sie anschließend in Mixed Reality immersiv erleben können.

Das Projekt wird eingeführt mit einem initialen Workshop zur Vermittlung der grundlegenden Kenntnisse über die Visualisierungs- und Interaktionsmethoden der Mixed Reality sowie des Umgangs mit der VAL DTaaSP anhand praktischer Übungsbeispiele.

Im Projekt modellieren die Studierenden eigenverantwortlich und parallel zu den Theorie-Vorlesungen den Digitalen Zwilling einer Roboter-Kinematik in Gruppenarbeit. Dabei kann zwischen einer Delta-Kinematik, einer Kniehebel-Kinematik sowie einer Scara-Kinematik mit zusätzlicher Linearachse gewählt werden. Die Studierenden werden in dieser Lernphase durch Gruppendiskussionen, Sprechstunden sowie adaptive Hilfestellungen begleitet.

Abb. 18.9 fasst die einzelnen Arbeitsschritte, die von den Studierenden bearbeitet werden müssen, zusammen. Im ersten Schritt der Projektaufgabe wenden die Studierenden ihr bereits vorhandenes Wissen aus dem Bereich der Konstruktion an und erhalten hierdurch einen niederschweligen Zugang zum Projekt. In einer frei wählbaren CAD-Software konstruieren die Studierenden die Geometrie der vorgegebenen Kinematik unter Beachtung der entsprechenden Anforderungen (z. B. Arbeitsraum). Anschließend wird das CAD-Modell in die VAL DTaaSP importiert und die in der Vorlesung erlernte Vorgehensweise zur Modellierung von Roboter-Kinematiken zur Berechnung der kinematischen Vorwärts- und Rückwärtstransformation darauf angewendet. Die Modellierung erfolgt in

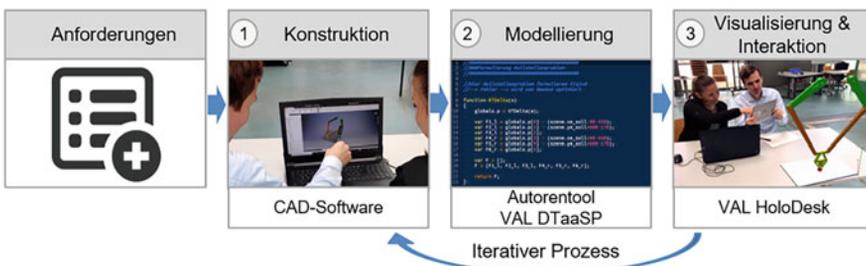


Abb. 18.9 Arbeitsschritte bei der vorlesungsbegleitenden Projektaufgabe



Abb. 18.10 Endgeräteunabhängige Visualisierung der Roboter-Kinematik im webbasierten Autorentool der VAL DTaaSP sowie über die Schnittstellenanwendung VAL HoloDesk auf verschiedenen MR-Endgeräten (VR und AR)

dem webbasierten Autorentool der VAL DTaaSP, wodurch die Projektaufgabe standort- und zeitunabhängig bearbeitet werden kann.

Die Studierenden können zu jedem Zeitpunkt den aktuellen Entwicklungsstand ihrer Roboter-Kinematik über die Schnittstellenanwendung VAL HoloDesk auf ein beliebiges MR-Endgerät laden und auf Basis der immersiven Visualisierung mögliche Fehler sowie die Funktionalität in der Gruppe diskutieren. Durch die Endgeräteunabhängigkeit können auch Tablets und Smartphones für die MR-Visualisierung eingesetzt werden, sodass die Studierenden ihre eigenen Endgeräte verwenden können.

Zum Abschluss der Projektaufgabe präsentieren die Studierenden im Kolloquium ihre Ergebnisse sowie die Vorgehensweise. Abb. 18.10 zeigt die beispielhafte Visualisierung einer Delta-Kinematik im webbasierten Autorentool sowie auf verschiedenen MR-Endgeräten als Virtual und Augmented Reality Anwendung.

Das zuvor vorgestellte Lehr-Lernszenario wird seit mehreren Semestern an der Hochschule Esslingen mit jeweils 15–20 Studierenden pro Semester durchgeführt und regelmäßig evaluiert. Von den Studierenden werden insbesondere die Mehrwerte durch die immersive Visualisierung der eigenen Konstruktion sowie die Möglichkeit der zeit-, orts- und endgeräteunabhängigen Modellierung positiv hervorgehoben.

Kopplung von Simulationssoftware mit Mixed Reality-Methoden am Beispiel Matlab Simulink

Neben Standalone-Szenarien ermöglicht der Einsatz der VAL DTaaSP an der Hochschule Esslingen auch die flexible Erweiterung domänenspezifischer Softwaretools und der darauf aufbauenden Lehrinhalte um Visualisierungs- und Interaktionsmethoden der Mixed Reality (siehe Abb. 18.11).

Die immersive Schulungsumgebung der MRiLS bietet den Lehrenden die Möglichkeit die bislang auf zweidimensionalen Computer-Bildschirmen visualisierten Lerninhalte in einer dreidimensionalen Projektion den Lernenden bereitzustellen und den Zusammenhang zwischen Simulationsdaten und Systemverhalten anhand eines 3D-Modells



Abb. 18.11 Anbindung von Simulationstools an die VAL DTaaSP zur Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation

aufzuzeigen. Das System-Modell im Simulationstool muss dabei weder verändert noch in einer anderen Software aufwendig nachgebildet werden, sondern kann direkt an die VAL DTaaSP gekoppelt und eingesetzt werden.

Matlab Simulink ist ein etabliertes Standard-Werkzeug zur Auslegung und Analyse von dynamischen Systemen und kommt heute in der ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung insbesondere im Bereich der Regelungstechnik zum Einsatz. Im Bachelor-Studiengang „Maschinenbau“ wird Matlab für den modellbasierten Regler-Entwurf sowie die Parameteridentifikation am Beispiel einer Linearachse eingesetzt. Die Visualisierung des Verhaltens der Regelstrecke erfolgt überwiegend über simulierte Zeit- und Frequenzverläufe relevanter Systemgrößen. Für die Studierenden stellt jedoch der Transfer von den abstrakten Systemgrößen hin zum Systemverhalten eine große Herausforderung dar. Ergänzend dazu können die Studierenden durch die Erweiterung der Matlab-Simulation um eine Mixed Reality-Visualisierung das Zeitverhalten des Regelsystems direkt auch am 3D-Modell aus verschiedenen Perspektiven beobachten und dadurch den Einfluss von Regler- und Streckenparameter besser verstehen. Zudem bekommen die Studierenden ein besseres Gefühl für die Dynamik des Systems. Der Datenaustausch zwischen Simulation und Digitalem Zwilling erfolgt über das in Matlab verfügbare Kommunikationsprotokoll UDP (User Datagram Protocol).

Kopplung von realer Steuerungstechnik mit dem Digitalen Zwilling am Beispiel der Maschinenbau-Labore

Parallel zu den Umsetzungen von Lernszenarien wird an der Hochschule Esslingen der Digitale Zwilling der Maschinenbau-Labore in der VAL DTaaSP aufgebaut (siehe Abb. 18.13, [3]). Der Digitale Zwilling umfasst die Maschinen der Labore für Automatisierung & Robotik, Umformtechnik, Kunststofftechnik, Zerspanung & Werkzeugmaschinen, deren Steuerungen über den Kommunikationsstandard OPC UA an die VAL DTaaSP

gekoppelt sind. Dies ermöglicht die standortunabhängige Visualisierung des realdaten-getriebenen virtuellen Labors, sodass von überall im Labornetzwerk auf den aktuellen Betriebszustand der Maschinen zugegriffen werden kann.

Die Kopplung der Steuerungsdaten mit den MR-Endgeräten bietet die Möglichkeit bislang nicht sichtbare Prozesse mittels Augmented Reality in der realen Laborumgebung zu visualisieren. Beispielsweise wurden bei einer Hydraulikpresse die Schaltprozesse der Ventile sowie die Druckzustände in den Hydraulik-Schläuchen mittels Augmented Reality direkt auf die reale Presse projiziert und somit dem Lernenden einen „Blick in die Maschine“ ermöglicht (siehe Abb. 18.12).

In der virtuellen Laborumgebung werden derzeit weitere Lehr-Lernszenarien wie zum Beispiel das Hochfahren und Bedienen einer Hydraulik-Presse umgesetzt. In einer Mixed Reality-Simulation können die Lernenden die Bedienung der Anlage realitätsnah und gefahrlos in einer interaktiven virtuellen Umgebung erlernen. Die VAL DTaaSP ermöglicht dabei die flexible Anbindung eines realen Bedienpanels an den Digitalen Zwilling, sodass die über eine Augmented Reality-Brille visualisierte Hydraulik-Presse mithilfe eines realen Bedienpanels bedient werden kann.

Ausblick

Durch den Einsatz des Autorentools der am Virtual Automation Lab der Hochschule Esslingen entwickelten VAL DTaaSP können die Lehrenden bereits heute die Lernszenarien selbstständig erstellen und den Lernenden endgeräte- sowie standortunabhängig zur Verfügung stellen. In Zukunft sollen die Einsatzgebiete der Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation in der Lehre an der Hochschule Esslingen ausgeweitet werden. Die

Abb. 18.12 Erweiterung einer realen Hydraulikpresse um die Visualisierung der Schaltprozesse der Ventile sowie der Druckzustände in den Hydraulik-Schläuchen mittels Augmented Reality



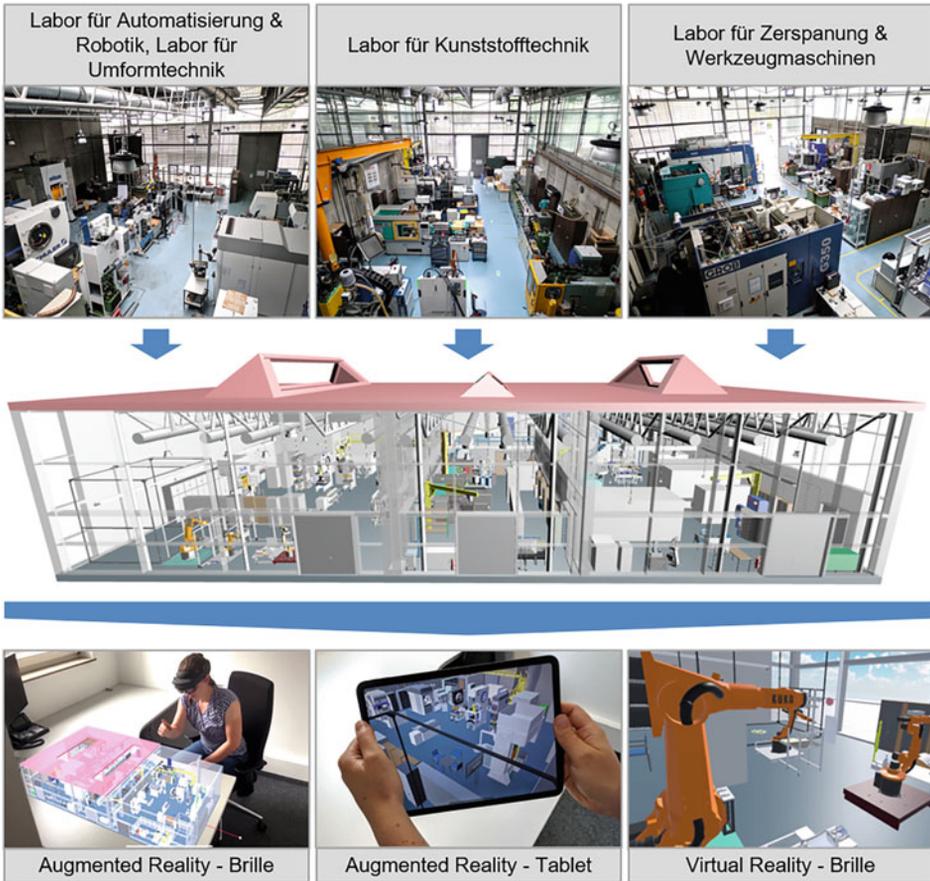


Abb. 18.13 Der Digitale Zwilling der Maschinenbau-Labore an der Hochschule Esslingen

Mehrwerte durch den Einsatz der Mixed Reality-Methoden sollen dabei systematisch untersucht werden, um besonders geeignete Anwendungsszenarien zu identifizieren.

18.4 Mixed Reality für die berufliche Aus- und Weiterbildung an der Max-Eyth-Schule Kirchheim unter Teck

In diesem Abschnitt werden Potenziale und der Einsatz von Mixed Reality in der beruflichen Aus- und Weiterbildung an der Max-Eyth-Schule in Kirchheim unter Teck, eine gewerbliche Schule mit den Fachrichtungen Elektrotechnik, Mechatronik/Automatisierungstechnik, Informatik, Metall- und Maschinentechnik, sowie Land- und Baumaschinenmechatronik im Landkreis Esslingen vorgestellt. Im Vollzeitbereich kann an

der Max-Eyth-Schule Kirchheim unter Teck in der Ausbildungsvorbereitung, der Berufsfachschule, dem Berufskolleg und dem technischen Gymnasium jeder Bildungsabschluss vom Hauptschulabschluss bis zur allgemeinen Hochschulreife erworben werden. Darüber hinaus werden zusammen mit Partnern aus Industrie und Handwerk im dualen System Auszubildende in verschiedenen Ausbildungsberufen ausgebildet und in der Fachschule für Technik zum staatlich geprüften Techniker in den Fachrichtungen Maschinentechnik, Mechatronik/Automatisierungstechnik und Elektrotechnik geschult. Die Meisterschule für Land- und Baumaschinen bildet Meister für das Landmaschinenmechatroniker-Handwerk aus. Der Fokus dieses Anwenderberichtes liegt auf der Aus- und Weiterbildung im Bereich der Automatisierungstechnik.

Anwendungsdomäne und Herausforderungen

Mit der wachsenden Komplexität von hochautomatisierten und vernetzten Produktionssystemen steigen die Anforderungen an die Aus- und Weiterbildung technischer Fachkräfte für die Bedienung, Inbetriebnahme, Programmierung und Wartung von Maschinen und Anlagen. Die Ausbildung in beruflichen Schulen wie der Max-Eyth-Schule in Kirchheim unter Teck muss neben diesen komplexen technologischen Rahmenbedingungen der Lerngegenstände auch heterogene Wissensstände sowie individuelle Lerngeschwindigkeiten der Lernenden einbeziehen.

Die inhaltliche und didaktische Ausrichtung der Wissensvermittlung an der Berufsschule basiert auf Lehrplänen mit Lernfeldern, wodurch bereits eine frühe Orientierung auf projektbezogenen Unterricht stattfindet [4]. Auch in weiteren beruflichen Schularten wie zum Beispiel der Fachschule für Technik wird Wissen fokussiert über praxisnahen Labor- und Werkstattunterricht in Gruppen- oder Einzelarbeit vermittelt. In den Unterrichtseinheiten werden Einzelaufgaben oder Projekte bearbeitet, die zunächst in der Simulation an Desktop-Rechnern und anschließend an der realen Maschine umgesetzt werden. In heutigen PC-basierten Simulationssystemen mit Visualisierung auf Computer-Monitoren ist das dreidimensionale immersive Erleben des Lerngegenstandes nicht möglich, wodurch die Transferleistung hin zur realen Maschine erschwert ist. Bei der Interaktion mit der realen Anlage ist hingegen ein hoher Lernerfolg zu beobachten, jedoch ist das Lehren und Lernen an der realen Anlage durch eine fehlende Skalierbarkeit sowie die Ortsabhängigkeit des realen Lerngegenstandes geprägt. Aufgrund einer möglichen Gefährdung von Mensch und Maschine sind zudem explorative Lernformen (z. B. der detaillierte Blick in den Innenraum einer Maschine) während des Betriebs der Anlage nur eingeschränkt möglich. In bestimmten Lernbereichen wie beispielsweise der Maschinen-Sicherheit können zudem viele Fachthemen bislang nur theoretisch betrachtet werden.



Abb. 18.14 Erweiterung bisheriger Methoden und Formen der Wissensvermittlung in der beruflichen Bildung um das Lernen mittels Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation

Lösungsansatz und Realisierung

Zur Bewältigung der skizzierten Herausforderungen bietet der Einsatz von Methoden der Mixed Reality (MR) als Erweiterung bislang eingesetzter Formen der Wissensvermittlung in der beruflichen Aus- und Weiterbildung technischer Fachkräfte großes Potenzial. Insbesondere die Kopplung von Visualisierungs- und Interaktionsmethoden der MR mit Digitalen Zwillingen von Maschinen und Anlagen zur Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation (MRiLS) eröffnen in der Aus- und Weiterbildung der Automatisierungstechnik vielfältige Einsatzgebiete (siehe Abb. 18.14).

Während die Integration des Digitalen Zwillings das realitätsgetreue Verhalten der Anlage zur Erreichung einer hohen Schaltungstiefe sicherstellt, ermöglichen die Visualisierungs- und Interaktionsmethoden der Mixed Reality eine vom Benutzer abhängige und dreidimensionale Visualisierung sowie eine intuitive und mehrere Sinne ansprechende Interaktion. Die MRiLS integriert dadurch den Menschen und dessen Verhalten vollständig in den Simulationskreislauf und verknüpft damit die Vorteile von simulationsbasiertem Lernen und realen Maschinenschulungen. Ergänzend hierzu bietet die Schulung mittels MRiLS folgende weitere Potenziale in der beruflichen Aus- und Weiterbildung technischer Fachkräfte:

- **Flexible Skalierbarkeit:** Die Lerngegenstände einer MRiLS können flexibel und einfach skaliert werden, sodass jedem Lernenden ein individueller Lerngegenstand in Form eines Digitalen Zwillings zur Verfügung gestellt werden kann.
- **Kollaboratives und standortübergreifendes Lernen:** Die Verbindung mehrerer Lernender in einem MRiLS-Lernszenario ermöglicht das kollaborative und standortübergreifende Lernen in einer gemeinsamen virtuellen Umgebung auf Basis Digitaler Zwillinge. So können sich die Lernenden beispielsweise von zu Hause in das Schulungsszenario einloggen oder den Digitalen Zwilling maßstabsgetreu im realen Klassenzimmer visualisieren.

- **Exploratives und gefahrloses Lernen:** Die Lernenden können das Verhalten, den Aufbau und die Bedienung von Maschinen anhand der MRiLS gefahrlos und immersiv erlernen und den Digitalen Zwilling explorativ erkunden (z. B. Blick in den Innenraum der Maschine während des Betriebs). Zudem kann mithilfe der MRiLS das Anwender-Verhalten in Gefahrensituationen ohne Gefährdung von Mensch und Maschine realitätsnah trainiert werden.

In der beruflichen Aus- und Weiterbildung an der Max-Eyth-Schule Kirchheim unter Teck konnten unter Einsatz der am Virtual Automation Lab der Hochschule Esslingen entwickelten Digital Twin as a Service-Plattform (VAL DTaaSP) bereits erste Einsatzszenarien der MRiLS umgesetzt werden. Die DTaaSP ermöglicht neben der flexiblen und endgeräteunabhängigen Kopplung des Digitalen Zwillings mit Mixed Reality-Endgeräten auch die Anbindung von industrieller Steuerungstechnik sowie Offline-Programmiersystemen. Durch diese Kopplung können die bislang in der beruflichen Bildung eingesetzten Simulationswerkzeuge flexibel um Visualisierungs- und Interaktionsmethoden der Mixed Reality erweitert werden. Der Digitale Zwilling kann in der VAL DTaaSP über eine webbasierte Oberfläche von der Lehrperson oder den Lernenden eigenständig konfiguriert, editiert und ohne Adaptionaufwand auf verschiedenen Mixed Reality-Endgeräten visualisiert werden.

An der Max-Eyth-Schule Kirchheim unter Teck wird für die MRiLS insbesondere Potenzial in den Bereichen ‚Roboterprogrammierung‘ und ‚Maschinen-Sicherheit‘ gesehen, die im Folgenden detaillierter dargestellt werden.

Einsatzszenario Roboterprogrammierung

Die Schülerinnen und Schüler erlernen an der Max-Eyth-Schule Kirchheim unter Teck die Programmierung eines 6-Achs-Industrieroboters unter Einsatz der virtuellen Robotersteuerung Kuka OfficeLite. Die Lernenden programmieren dabei eigenständig den Programmablauf zu einer vorgegebenen Aufgabenstellung wie beispielsweise das Schreiben des Schriftzuges „MESK“ oder von Symbolen auf einer Tafel mithilfe eines am Endeffektor befestigten Stifts (siehe Abb. 18.15 links) sowie das anschließende Reinigen der Tafel (siehe Abb. 18.15 rechts).

Die Visualisierung und Überprüfung des Programmablaufes kann in der Simulationssoftware Kuka SimPro erfolgen, bevor der Code anschließend auf den realen Roboter übertragen wird. Allerdings ist die Visualisierung in der desktopbasierten Simulationssoftware für die Lernenden häufig mit einer zu hohen Komplexität und einer fehlenden Vorstellungskraft bei der zweidimensionalen Projektion der dreidimensionalen Komponenten verbunden, sodass dieser Zwischenschritt im Unterrichtsalltag übersprungen und das selbst geschriebene Programm direkt auf die Steuerung übertragen und somit am realen System evaluiert wird. Mögliche Fehler im Programm wie beispielsweise Kollisionen oder fehlerhafte Schriftzeichen werden dadurch erst am realen System sichtbar. Dies hat zur Folge, dass manche Lernende ihr selbstgeschriebenes Programm nur zögerlich testen, da sie Bedenken bezüglich einer möglichen Beschädigung des Roboters haben. Zudem

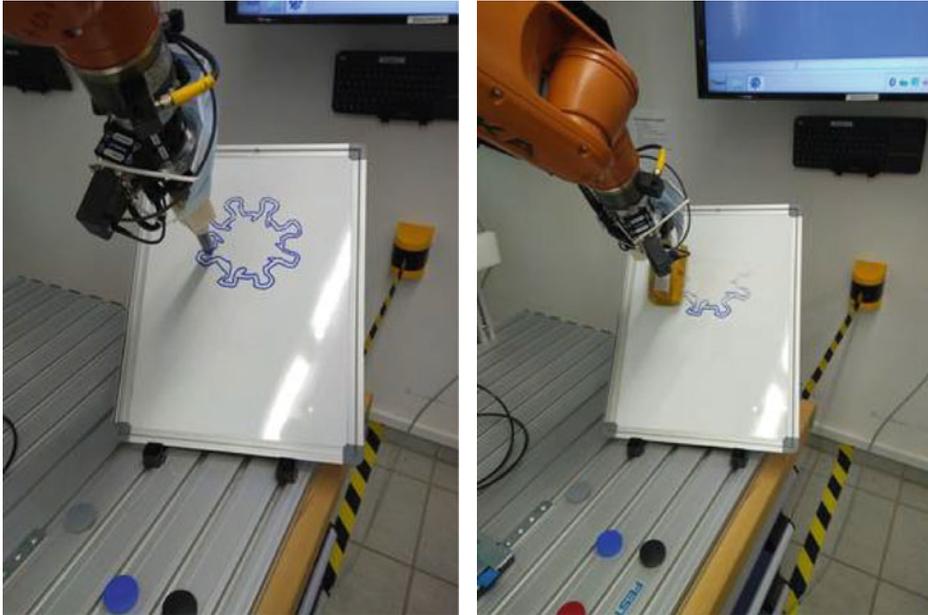


Abb. 18.15 Programmierübung an einem Kuka Roboter: Beschriftung und Reinigung einer Tafel

kann aufgrund der limitierten Anzahl an Robotern immer nur ein Lernender zeitgleich sein Programm am realen Roboter testen.

Die MRiLS begegnet diesen Herausforderungen durch Kopplung des Offline-Programmiersystems mit den Visualisierungs- und Interaktionsmethoden der Mixed Reality und ermöglicht dadurch vielfältige Potenziale in der Lehre. Mögliche Fehler in der Programmierung wie beispielsweise Kollisionen können frühzeitig erkannt werden und führen durch die dreidimensionale egozentrische (von der Position des Benutzers abhängige) Visualisierung des Roboters und dessen Peripherie zu keiner Gefährdung von Mensch und Maschine. Darüber hinaus ermöglicht die einfache Skalierbarkeit der MRiLS die Verfügbarkeit eines eigenen virtuellen Roboters für jeden Lernenden und damit das individuelle und explorative Lernen. Nach erfolgreichem Testen des eigenen Roboterprogramms können die Lernenden das Programm anschließend auf den realen Roboter übertragen und sicher zur Ausführung bringen. In einem weiteren Schritt wird der reale Roboter in die MRiLS integriert. Hierzu wird die reale Robotersteuerung über OPC UA an die VAL DTaaSP angebunden, wodurch sich der Digitale Zwilling auf Basis der Daten des realen Roboters bewegt. Über die Visualisierung der MRiLS können die Lernenden den Digitalen Zwilling des Roboters somit parallel zum Betrieb ohne Gefährdung explorativ erkunden sowie einzelne Aspekte detailliert betrachten und analysieren. Die herstellerunabhängige Möglichkeit der Kopplung von verschiedenen Steuerungen



Abb. 18.16 Beispielhafter Einsatz der MRiLS für die Programmierung eines 6-Achs-Industrieroboters in Augmented Reality (links) und Virtual Reality (rechts)

und Offline-Programmiersystemen bei der VAL DTaaSP ermöglicht zudem die flexible Integration weiterer Maschinen und Anlagen in das betrachtete Szenario.

Abb. 18.16 zeigt beispielhafte Impressionen des Einsatzszenarios bei der Programmierung eines 6-Achs-Industrieroboters in Augmented Reality (links) und Virtual Reality (rechts).

Im Rahmen einer Technikerarbeit wurde an der MESK in Kooperation mit dem Virtual Automation Lab (VAL) ein Lehrkonzept für die Konstruktion und Programmierung eines Linienportals erstellt [5].

Die Lernenden sollen einen kartesischen Roboter zur Führung eines Stiftes unter vorgegebenen Randbedingungen (z. B. Arbeitsraum) in einem frei wählbaren 3D-CAD-System konstruieren, bevor sie anschließend den Programmablauf in der webbasierten Engineering-Oberfläche der VAL DTaaSP programmieren. Der Programmcode soll verschiedene Betriebsmodi wie das Anfahren eines vorgegebenen Punktes sowie das Schreiben eines Schriftzuges (z. B. „MESK“) in Form von Punkt-zu-Punkt-Bewegungen umfassen.

Mithilfe der VAL DTaaSP können die Lernenden dabei die selbst konstruierte Kinematik zu jedem Zeitpunkt per Knopfdruck dreidimensional auf verschiedenen Mixed Reality-Endgeräten visualisieren, analysieren und explorativ erkunden. Abb. 18.17 zeigt den beispielhaften Einsatz auf einem Tablet in Augmented Reality (links) und in Virtual Reality (rechts).

In einem nächsten Schritt soll die Kinematik des Linienportals in einem realen Aufbau umgesetzt werden, sodass die Lernenden das erarbeitete Wissen direkt am realen System einsetzen können.



Abb. 18.17 Beispielhafter Einsatz der MRiLS für die Konstruktion und Programmierung eines Linienportales in Augmented Reality (links) und Virtual Reality (rechts)

Einsatzszenario Maschinensicherheit

Ein weiteres Lernfeld an der Max-Eyth-Schule Kirchheim unter Teck ist die Sicherheitstechnik von Roboter- und Maschinenzellen. Dieses Themengebiet ist bislang durch einen hohen Theorieanteil geprägt und beinhaltet unter anderem die Gefährdungsbeurteilung sowie die Planung sicherer Roboterzellen. Herausfordernd für die Schülerinnen und Schüler in diesem Bereich ist das Erlernen der Sicherheitsbeurteilung von Roboterzellen auf Basis zweidimensionaler Projektionen. Die Frage nach möglichen Kollisionen oder Risikopotenzialen ist durch die hohen Anforderungen an das Vorstellungsvermögen von den Lernenden nur schwer zu beantworten.

Der Einsatz der MRiLS ermöglicht in diesem Kontext eine dreidimensionale, egozentrische und immersive Visualisierung der virtuellen Roboterzellen. In Kombination mit der interaktiven Gestaltung der MRiLS können die Lernenden die verschiedenen Szenarien der Roboterzelle anwendungsnah und gefahrlos testen. Zudem können die Lehrenden den Lernenden verschiedene Beispiele für sichere und nicht sichere Roboterzellen bereitstellen und durch gezielt eingebaute Sicherheitslücken (z. B. nicht korrekt angebrachter Notausschalter an der Tür) bei den Lernenden den Blick für sicherheitsrelevante Aspekte schärfen.

Abb. 18.18 zeigt beispielhaft den Einsatz der MRiLS in der Ausprägung Virtual Reality zur Überprüfung der Erreichbarkeit des Notausschalters in einer Gefahrensituation. Während die Position 1 (links) von dem Nutzer außerhalb der Sicherheitszelle erreicht werden kann, sind die Positionen 2 (mitte) und 3 (rechts) innerhalb der Sicherheitszelle positioniert und somit in einer Gefahrensituation für den Nutzer nicht erreichbar.

Ausblick

Die MRiLS eröffnet mit der egozentrischen Visualisierung sowie der intuitiven multimodalen Interaktion in Kombination mit Digitalen Zwillingen und der Vernetzung zu

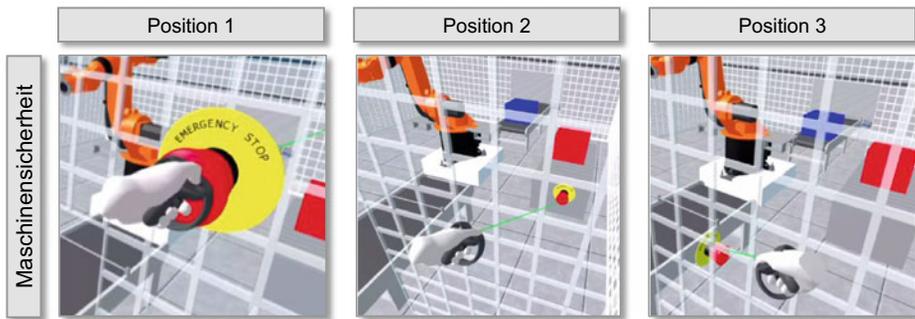


Abb. 18.18 Beispielhafter Einsatz der MRiLS im Einsatzszenario ‚Maschinensicherheit‘ für Überprüfung der Erreichbarkeit des Notauschalters

bestehenden Lehrsystemen zahlreiche Potenziale zur Weiterentwicklung von aktuellen Ausbildungskonzepten. Derzeit ist die Max-Eyth-Schule Kirchheim unter Teck als assoziiertes Partner in dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt „MRiLS“ (Fkz.: 16SV8344 – 16SV8348) beteiligt. Im Rahmen des Forschungsprojektes sollen weitere Anwendungsfelder der MRiLS in der beruflichen Bildung im Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus erprobt werden.

Neben dem Einsatz im Schulalltag zeigt die MRiLS für die Zukunft insbesondere im Bereich des Remote-Learnings vielfältiges Anwendungspotenzial. Schülerinnen und Schüler können Digitale Zwillinge von Maschinen und Anlagen mit eigenen Endgeräten (z. B. Smartphone oder VR-Brille) standortunabhängig visualisieren und Problemstellungen handlungsorientiert in der Mixed Reality bearbeiten. Die Bereitstellung der Digitalen Zwillinge über Cloud-Infrastrukturen ermöglicht dabei das kollaborative und standortübergreifende Lernen (z. B. von zu Hause). Die MRiLS bietet somit für die Zukunft das Potenzial, in weiteren Lernfeldern eingesetzt zu werden und die Lernenden bei ihrem individuellen Lernprozess als Querschnittsmethode zu unterstützen.

Literatur

1. Hönig J, Schnierle M, von Bergen T, Polak C, Röck S (2020) DigiTwin:didact – Maschinen verstehen mit dem Digitalen Zwilling in AR/VR-Lernszenarien, Wettbewerb: AVRiL https://ak-vrarl.gi.de/fileadmin/AK/VRAR/PDF/AVRiL2020_paper_silber.pdf
2. Schnierle M, Polak C, Röck S (2019) Mensch-Roboter-Interaktion mit Mixed Reality auf Basis einer „Digital Twin as a Service“-Plattform, atp magazin 5/2019, Robotik und Digital Twin in der Smart Factory, Vulkan-Verlag, doi: 10.17560/atp.v61i5.2415
3. Hönig J, Schnierle M, Hüttenberger M, Polak C, Röck S (2021) Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation für Schulungen im Maschinen- und Anlagenbau, Proceedings of DELFI Workshops 2021, S 9–22, Hochschule Ruhr West, ISBN 978-3-946757-03-0

4. Ministerium für Kultur, Jugend und Sport Baden-Württemberg (2014) Bildungsplan für die Fachschule für Technik, Fachrichtung Automatisierungstechnik/Mechatronik
5. Sachse M (2020) Erstellung eines Digitalen Zwillings eines kartesischen Roboters, Technikerarbeit an der Max-Eyth-Schule Kirchheim unter Teck begleitet vom Virtual Automation Lab der Hochschule Esslingen

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Lernpotenziale und -herausforderungen Digitaler Zwillinge in der Betriebsphase

19

Julia Franz und Camilla Wehnert

Zusammenfassung

Mit der Entwicklung und dem Einsatz Digitaler Zwillinge in Industrieunternehmen wird eine Veränderung der Lernumwelten prognostiziert. Insbesondere für formale und non-formale Formate der betrieblichen Weiterbildung können daraus sowohl Potenziale als auch Herausforderungen abgeleitet werden. Vor diesem Hintergrund werden im folgenden Beitrag Lernpotenziale und -herausforderungen für Lernende und Lehrende in den Blick genommen und aus erwachsenenpädagogischer Perspektive reflektiert. Abschließend wird der Frage nachgegangen, inwiefern didaktische Prinzipien als Reflexionsmöglichkeit zum Umgang mit Herausforderungen genutzt werden können.

19.1 Einführung

Digitalisierungsprozesse in Industrieunternehmen werden in interdisziplinären Diskursen im Kontext von Industrie 4.0 (vgl. z. B. [1]) oder Smart Factory [2] aufgegriffen. Im Entwicklungsprozess des Maschinen- und Anlagenbaus sowie auf Basis der Entwicklung eines vernetzten „Internet of Things“ (z. B. [3]) entstehen digitale Assistenz- und Steuerungsprogramme (vgl. [4]), die zu einer immer stärker wachsenden Automatisierung und Optimierung der Prozessabläufe eingesetzt werden. In diesem Zusammenhang haben „Digitale Zwillinge“ im Kontext der Produktionsautomatisierung im Produktlebenszyklus von der Planung über die Inbetriebnahme bis hin zum Recycling und der Entsorgung (vgl.

J. Franz (✉) · C. Wehnert
Professur für Erwachsenenbildung und Weiterbildung, Otto-Friedrich-Universität Bamberg,
Bamberg, Deutschland
E-Mail: Julia.Franz@uni-bamberg.de

[5, 6, 7, 8, 9]) in den letzten Jahrzehnten an Bedeutung gewonnen. Reale Anlagen und Maschinen erhalten ihr virtuelles, digitales Abbild, das wiederum in unterschiedlichen Formen an Steuerungsmechanismen gekoppelt werden kann (vgl. [10, 11, 12]).

Aus einer erwachsenenpädagogischen Perspektive erscheinen diese Entwicklungen insofern interessant, als dass davon ausgegangen werden kann, dass sich dadurch informelle Lernumwelten in Betrieben deutlich verändern werden (vgl. [13]). So können am Digitalen Zwilling unterschiedliche Szenarien und Prozesse gefahrlos simuliert oder das Innere von Anlagen und Maschinen visualisiert werden. Insbesondere im Kontext der Mixed Reality können damit neuartige informelle Lernerfahrungen für alle Beteiligten ermöglicht werden. Über diese Lernerfahrungen ist in der erziehungswissenschaftlichen und erwachsenenpädagogischen Forschung bislang relativ wenig bekannt. Mit Digitalen Zwillingen entstehen aber auch Potenziale für formale und non-formale Formate der betrieblichen Weiterbildung, die im Kontext des BMBF-Projekts „Hybrides Interaktionskonzept für Schulungen mittels Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation“ (Förderkennzeichen 16SV8348) im Mittelpunkt stehen. In diesem Projekt geht es konkret darum, Digitale Zwillinge für Schulungszwecke mit Methoden der Mixed Reality zur Mixed Reality-in-the-Loop Simulation (MRiLS) zu kombinieren. Ziel ist es, nicht nur wie bisher auf zweidimensionalen Computerbildschirmen das dreidimensionale Simulationsmodell zu beobachten, sondern mittels moderner Endgeräte – wie Virtual Reality (VR)- und Augmented Reality (AR)-Brillen oder Tablets und Smartphones – neue, flexible Interaktionsmöglichkeiten zu generieren (vgl. [14]), u. a. indem das Simulationsmodell beispielsweise in den realen Raum gestellt werden kann.

Diese neuen Interaktions- und Visualisierungsmöglichkeiten bestehen beispielsweise auch darin, mithilfe einer AR-Brille ergänzende Komponenten zu einer real existierenden Anlage hinzuzufügen, wie beispielsweise einen Industrieroboter zu einem Förderband, und damit zu interagieren. Die Bedienung einer Maschine könnte auch mit einer VR-Brille in einer komplett virtuellen Umwelt erlernt werden. Diese Beispiele verweisen auf neue Interaktionsmöglichkeiten zwischen Mensch und Maschine, indem durch AR- und VR-Technologien eine interaktive Durchdringung der Maschinen und Anlagen ermöglicht werden kann. Gleichzeitig besteht ein weiteres Potenzial auch darin, dass in Schulungen zeitgleich mehrere Schulungsteilnehmende mit unterschiedlichen Endgeräten (z. B. AR-/VR-Brillen oder Tablets) miteinander interagieren können (vgl. [14]).

Vor dem Hintergrund wird in diesem Beitrag die Frage thematisiert, welche Chancen und Herausforderungen für solche Lernszenarien bestehen und wie diese aus einer erwachsenenpädagogischen Perspektive reflektiert werden können. In der Bearbeitung dieser Frage beziehen wir uns auf die aktuellen Forschungsdiskurse sowie auf die ersten Ergebnisse einer Bedarfsanalyse im Rahmen des MRiLS-Projekts. Hier wurden zehn leitfadengestützte Interviews mit den Projektpartnern geführt. Die Erkenntnisse aus den Interviews werden für diesen Beitrag illustrierend genutzt.¹ Um die Chancen und

¹ Weitere Informationen zur Bedarfsanalyse können bei der korrespondierenden Autorin nachgefragt werden.

Herausforderungen genauer zu erfassen, wird zunächst der Blickwinkel der Lernenden eingenommen (19.2), bevor der Blick auf die Schulungsleitungen gerichtet wird (19.3). Aus beiden Sichtweisen werden jeweils spezifische Herausforderungen abgeleitet. Diese werden schließlich aus erwachsenenpädagogischer Perspektive reflektiert (19.4). Konkret soll hier danach gefragt werden, welche genuin didaktischen Prinzipien bei der Bearbeitung dieser Herausforderungen in virtuellen und augmentierten Lernumgebungen genutzt werden können.

19.2 Herausforderungen und Chancen aus der Perspektive Lernender

Im Diskurs scheint bislang großer Konsens darüber zu bestehen, dass das Potenzial der Schulungsarbeit mit Digitalen Zwillingen vor allem in drei Aspekten besteht. Einerseits wird immer wieder die gefahrlose Übungsmöglichkeit für Lernende hervorgehoben. Fehlerszenarien und irreguläre Abläufe können virtuell exploriert werden, ohne Gefahr zu laufen, Mensch oder Maschine zu beschädigen. Als zweites Potenzial wird eine Zeit- und Kostenersparnis gesehen. Abläufe können bereits am Digitalen Zwilling erlernt und erprobt werden, ohne dass die reale Maschine vorhanden sein müsste, was gerade im Kontext der Inbetriebnahme eine immense Zeitreduktion bedeuten kann, da bereits vor der Inbetriebnahme Schulungen durchgeführt werden können. In anderen Fällen können Szenarien erprobt werden, ohne dass die reale Anlage ausgeschaltet werden muss, was durch den Produktionsstopp wiederum hohe Kosten verursachen würde. Zum Dritten wird immer wieder betont, dass Digitale Zwillinge es ermöglichen würden, in das Innere von Maschinen und Anlagen hineinschauen zu können, was hinsichtlich der realen Maschinen nicht realisierbar ist, wie folgendes Zitat verdeutlicht: *„Digitale Medien, vor allem VR, sind gute Alternativen zu den selbst erstellten Modellen und theoretischen Erklärungen, um die inneren Teile einer Maschine sichtbar zu machen. Die mediale Präsentation erleichtert nachweislich den Aufbau eines für das Verständnis der Technik unerlässlichen ‚mentalen Modells‘ bei den Technikern.“* ([15], S. 41). Auf diese Weise könne der Lerngegenstand intensiver betrachtet sowie ein tieferes Verständnis für die Abläufe in einer Maschine erlangt werden.

Diese drei Aspekte stellen sicherlich große Chancen bereit. Gleichzeitig ergeben sich aber auch eine Reihe von differenzierten Herausforderungen für Lernende, die bei der Entwicklung entsprechender Lernszenarien berücksichtigt werden sollten.

- *Die Heterogenität von Zielgruppen und die Affinität zu virtuellen Lerngegenständen:* Eine erste Herausforderung für die betriebliche Weiterbildung mit Digitalen Zwillingen ergibt sich hinsichtlich der unterschiedlichen Zielgruppen und deren unterschiedlicher Affinität für digitale Lernumgebungen. Während davon ausgegangen werden kann, dass

die Affinität beispielsweise bei Maschinenbedienern und Instandhaltern nicht durchweg gegeben ist, lässt sich vermuten, dass insbesondere bei Programmierern eine hohe Affinität gegeben ist. So wird in unseren ersten Interviews betont, dass *„auch viele Mitarbeiter jetzt nicht tagtäglich mit den modernsten IT-Themen in Berührung kommen. Und damit vielleicht eine gewisse Hemmschwelle oder einfach aufgrund dieses Unbekanntheitsgrades von AR/VR vielleicht zunächst mal eine gewisse Zurückhaltung besteht“* (Interview MRiLS_2, Z. 947–951). So würde gerade die Gruppe der Maschinenbediener *„eigentlich an der realen Maschine arbeiten“* (Interview MRiLS_4, Z. 548) wollen. Dieser Aspekt macht darauf aufmerksam, dass Lernende mit unterschiedlichen Voraussetzungen, Vorerfahrungen und möglicherweise auch Lernwiderständen in entsprechende Schulungen kommen werden. Gerade bei Gruppen mit geringer Affinität bedarf es sowohl einer sensiblen Einführung in digitale Lehr-Lernformate als auch einer plausiblen Begründung für das digitale Format, sodass sich der Mehrwert für die Lernenden erschließen lässt.

- *Spielerisches authentisches Erproben und die Reflexion der Ernstsituation:* Das bereits genannte Potenzial, gefahrlos die Bedienung einer Maschine zu erproben, bringt auch eine große Herausforderung mit sich. So kann es sein, dass die spielerische Erprobung am Digitalen Zwilling, bei der man beispielsweise auch gezielt das „Crashen“ der Maschine herbeiführen kann, dazu führt, dass die Gefahrensituationen im Umgang mit der realen Maschine unterschätzt werden. Die Interviewpartner betonen diesbezüglich, dass es auch wichtig sei, den lernenden Schulungsteilnehmenden bewusst zu machen *„dass das jetzt vielleicht doch eine Simulation“* (Interview MRiLS_2, Z. 603) sei, um auch die Differenz zwischen Virtualität und Realität zu markieren. Aus erwachsenenpädagogischer Sicht bedarf es dazu einer sensiblen Reflexionsperspektive für die Lernenden, um sowohl spielerische Lernerfahrungen zu ermöglichen als auch reale Gefahrensituationen verantwortungsvoll zu reflektieren.
- *Intuitive Bedienung und Eingewöhnung:* Aus der empirischen Forschung im Umgang mit virtuellen Lernsituationen ist bekannt, dass insbesondere die Usability von entscheidender Bedeutung für die Einschätzung von Lernerfahrungen ist (vgl. [16]). Im Umgang mit Wearables wie AR- und VR-Brillen kann allerdings nicht per se von einer intuitiven Nutzung ausgegangen werden, da entsprechende Technologien im Alltag noch recht wenig präsent sind. Daher wird auch in den Interviews davon gesprochen, *„dass es eine ungewohnte Umgebung ist, gerade wenn Leute das erste Mal eine VR Brille aufhaben“* (Interview MRiLS_1, Z. 133 f.). Insofern *„muss man sich auch erstmal mit den Medien auseinandersetzen“* (Interview MRiLS_1, Z. 147 f.), was *„eine gewisse Eingewöhnungszeit hat, um sich auf diese Lehrinhalte zu konzentrieren“* (Interview MRiLS_2, Z. 352 f.) und *„um diesen Neuheitsgrad zu heilen“* (Interview MRiLS_2, Z. 350). Vor diesem Hintergrund muss in entsprechenden virtuellen Lernumgebungen auch eine gewisse Eingewöhnungsphase didaktisch berücksichtigt und geplant werden, beispielsweise indem Teilnehmende durch kurze Übungen im Umgang mit dem jeweiligen Endgerät für dessen Bedienung sensibilisiert werden.

- *Immersion und Übertragung:* Das Potenzial virtueller Lernumgebungen wird immer wieder auch hinsichtlich der Möglichkeit, „Immersion“ (vgl. z. B. [17, 18]) zu erzeugen, dargestellt. Immersion ist „*the subjective impression that one is participating in a comprehensive, realistic experience*“ ([17], S. 736). Das bedeutet, dass Lernende die virtuellen oder augmentierten Aspekte der Lernumgebung letztlich als real anerkennen müssen. Dies stellt einen hohen Anforderungsbedarf an die Gestaltung der virtuellen Umgebung dar. So müssen entsprechende Bedienfelder so real als möglich dargestellt werden, was beispielsweise auch die Farbgebung der Simulation betrifft. So sollten Schalter, Hebel und andere Interaktionsmöglichkeiten die gleiche Farbe wie bei der realen Maschine erhalten. Dadurch kann der Prozess des Lerntransfers zwischen virtueller Lernumgebung und realer Maschine erhöht werden. Gleichzeitig geht mit dem Prinzip der Immersion auch die Herausforderung einher, möglichst schnell und einfach wieder aus der virtuellen Welt austreten zu können, um mögliche Auswirkungen wie beispielsweise „*Motion Sickness*“ (Interview MRiLS_10, Z. 405) zu verhindern. In einem der Interviews wird in diesem Zuge beschrieben „*dass man da dann plötzlich durch die unterschiedlichen visuellen Wahrnehmungen mit Übelkeit zu kämpfen hat*“ (Interview MRiLS_10, Z. 405 f.) und die Wichtigkeit hervorgehoben, „*dass man quasi nicht die Brille vom Kopf reißen muss, wenn man raus will, sondern dass man einfach durch ein Kommando sofort quasi die Szene abschaltet und man rauskommt*“ (Interview MRiLS_10, Z. 400–402). Aus erwachsenenpädagogischer Perspektive bedeutet das, dass es durchaus sinnvoll wäre, den Übergang von Realität und Virtualität didaktisch zu inszenieren und explizit zu thematisieren.
- *Komplexität der Interaktion mit anderen Lernenden:* Die Idee im MRiLS-Projekt besteht auch darin, dass mehrere Lernende sich mit unterschiedlichen Endgeräten in der gleichen Lernumgebung bewegen. Dies stellt wiederum Herausforderungen an die Gestaltung der Interaktionsmöglichkeiten der Lernenden dar, wie auch in den Interviews mehrfach hervorgehoben wird. So stellt sich hier die Frage, wie die anderen Teilnehmenden jeweils wahrgenommen werden, welche Bedeutung entsprechenden Avataren zukommt oder noch etwas pauschaler, wie ein „Ich“ in der virtuellen Welt für die anderen erkennbar dargestellt wird. Daran anknüpfend stellt sich dann die Frage, in welchen Formen (Chat, Sprache, Gestik) die Lernenden untereinander Kontakt aufnehmen können, um beispielsweise an einer gemeinsamen Aufgabe in der virtuellen Lernumgebung zu arbeiten. Gerade da unterschiedliche Endgeräte im Einsatz sein werden, die selbst verschiedene Interaktionsmöglichkeiten aufweisen, ist die Herstellung der Interaktion mit anderen Lernenden als durchaus komplex und vielschichtig zu bezeichnen. Gleichzeitig stellt aber gerade diese Interaktion eine weitere Möglichkeit dar, virtuelle Lernprozesse zu bereichern und dem Lernen an der realen Maschine so nah wie möglich zu kommen.
- *Kommunikation mit Lehrenden:* Der Kommunikationsaspekt betrifft jedoch nicht nur die Kommunikation der Lernenden untereinander, sondern auch die Kommunikation zwischen den Lernenden und den jeweiligen Schulungsleitungen. Auch hier stellt sich

die Frage, welche Formate von Kommunikationsprozessen dazu beitragen können, dass sich Lernende selbstgesteuert in der virtuellen Umgebung aufhalten und in ihren jeweiligen Lernprozessen individualisiert durch die Schulungsleitungen begleitet werden können. So wird auch in den Interviews hervorgehoben, dass Dozierende weniger die Rolle des „*Belehrende[n], der das Wissen ein-einschickt, wie im Nürnberger Trichter*“ (Interview MRiLS_3, Z. 789–793) übernehmen, sondern vielmehr den Lernprozess begleiten würden. Hier könnte man beispielsweise überlegen, inwiefern informelle Anleitungsgespräche (wie zum Beispiel „Tür-und-Angel-Gespräche“) als Kommunikationsform in die Lernumgebung integriert werden können. Als weitere Möglichkeiten können über vorbereitete Erklärvideos der Schulungsleitungen, Live-Beratungen oder auch den Einsatz von Avataren als Lernbegleitung nachgedacht werden.

Zusammenfassend zeigt sich, dass hinsichtlich virtueller Lernumgebungen in betrieblichen Kontexten eine ganze Reihe von Potenzialen bestehen, die den Lernprozess unterstützen und erleichtern können, damit gleichzeitig aber auch bedenkenswerte Herausforderungen für die Lernenden einhergehen. Vor diesem Hintergrund kommt den Schulungsleitungen eine ganz besondere Bedeutung zu, auf die im Folgenden eingegangen werden soll.

19.3 Herausforderungen aus Sicht von Schulungsleitungen

Betrachtet man die Gruppe typischer Schulungsleitungen – beispielsweise hinsichtlich der Inbetriebnahme neuer Anlagen und Maschinen – aus erwachsenenpädagogischer Perspektive, so fällt zunächst auf, dass diese grundsätzlich als pädagogische Quereinsteiger betrachtet werden können. Die Schulungsleitungen haben in der Regel keine pädagogische Qualifizierung oder systematisch didaktische Ausbildung (vgl. [15]), sondern verfügen über technische oder wirtschaftliche Ausbildungen und Qualifikationen und sind fachliche Vertreter für Steuerungstechnik, Mechatronik oder Maschinenbau. In den Interviews wird diesbezüglich thematisiert, die Schulungen als persönlichen Anreiz nutzen zu wollen, um sich auf dem unbekanntem didaktischen Fachgebiet zu verbessern: „*Und ja, persönlich erhoffe ich mir dadurch, dass ich auch hier dazulerne, wie ich eben Wissen vermittele, weil ich habe das nicht gelernt. [...] das ist meine Anforderung an mich selber, dass ich hier dann eben was mitnehmen kann, [...] damit ich eben lerne, welche Methoden gibt es, Wissen zu vermitteln und welche Methoden gibt es eben dieses Wissen zu festigen*“ (Interview MRiLS_7, Z. 1538–1546). Weiterhin wird betont, dass es „*bei uns natürlich die Entwickler die Experten wirklich [waren], die die Schulungen dann neben ihren Entwicklungstätigkeiten durchgeführt haben*“ (Interview MRiLS_4, Z. 123–124). Aus Studien zu freiberuflichen Kursleitenden der Allgemeinen Erwachsenenbildung, die ebenfalls kaum über pädagogische Qualifizierungen verfügen, weiß man inzwischen, dass insbesondere diese Auseinandersetzung und Identifikation mit einem spezifischen Inhalt das didaktische

Handeln in Schulungen prägt (vgl. z. B. [19]). Vor diesem Hintergrund ist davon auszugehen, dass Schulungsleitungen in der betrieblichen Weiterbildung vor allem als Fachleute agieren und Formate der frontalen Wissensvermittlung nutzen, um beispielsweise die Mechanismen und Bestandteile von Maschinen und Anlagen oder Steuerungssystemen zu erläutern. Frontale Wissensvermittlung ist zwar grundsätzlich ein wichtiger Bestandteil didaktischen Handelns. Im Kontext der Auseinandersetzung mit einem sogenannten „Lernkulturwandel“ (vgl. z. B. [20]) lässt sich allerdings konstatieren, dass frontale Vermittlung *einen* möglichen Bestandteil der Gestaltung von Lernprozessen darstellt, jedoch bei weitem nicht die einzige oder ausschließliche Möglichkeit. Gerade im Kontext des Umgangs mit virtualisierten Lernumgebungen bedarf es zusätzlicher Gestaltungsformen.

In den Diskursen zu selbstgesteuertem Lernen wird immer wieder betont, dass die Entwicklung von Selbstlernkompetenzen ein wichtiger Baustein zur Gestaltung neuer Lernkulturen sei (vgl. [21]). Dazu gehört, dass Lehrenden zunehmend die Aufgabe zukommt, diese Selbstlernkompetenzen in entsprechenden Lernumgebungen anzuregen. Dies bedeutet beispielsweise, dass Lehrende zunehmend Materialien, wie etwa Übungsaufgaben und Szenarien entwickeln, die Lernende dann selbstständig bearbeiten. Um entsprechende Lern- und Arbeitshilfen entwickeln zu können, bedarf es allerdings Unterstützungsleistungen, etwa in Form von Handreichungen oder Weiterbildungen (vgl. [15]). Dabei nehmen Lehrende grundsätzlich weniger die Rolle der Wissensvermittler, als vielmehr die der Lernbegleitungen ein, welche die Lernenden in ihren individuellen Prozessen – beispielsweise durch Feedback- und Beratungsgespräche – unterstützen. Darüber hinaus gilt es, insbesondere in virtuellen komplexen Lernumgebungen der betrieblichen Weiterbildung, auch die Zusammenarbeit in Gruppen zu initiieren und die Kommunikationsprozesse zwischen Teilnehmenden zu moderieren und zu strukturieren. Dieser kleine Einblick in Veränderungen in Richtung einer neuen Lernkultur macht auf der einen Seite deutlich, dass gerade dieses Rollenverständnis für virtuelle Schulungen anschlussfähig erscheint. Auf der anderen Seite wird sichtbar, dass die Schulungsleitungen hier in der Bewältigung des erforderlichen Rollenwechsels professionell unterstützt werden sollten, da dies eine Abkehr von traditionellen Rollenverhältnissen in Lernprozessen impliziert, die gerade im Bereich der betrieblichen Weiterbildung häufig nur schwer selbstläufig realisiert wird.

Zusammenfassend lässt sich entsprechend festhalten, dass Schulungsleitungen in virtuellen Lernumgebungen der betrieblichen Weiterbildung mit vielfältigen Herausforderungen konfrontiert sind, für die sie selten qualifiziert sind. Vor diesem Hintergrund soll im nächsten Schritt reflektiert werden, inwiefern zentrale didaktische Prinzipien der Erwachsenenbildung Schulungsleitungen in ihren didaktischen Handlungen unterstützen können.

19.4 Didaktische Prinzipien der Erwachsenenbildung als Reflexionsmöglichkeit zum Umgang mit Herausforderungen

Die Fachdisziplin Erwachsenenbildung und Weiterbildung beschäftigt sich mit den Bedingungen des Lehrens und Lernens im Erwachsenenalter. Dabei wird in der Disziplin weniger auf eine konkrete erwachsenenspezifische Didaktik gesetzt (vgl. [22]), vielmehr werden allgemein didaktische Theorien, wie die bildungstheoretische, die lehr-lerntheoretische oder die konstruktivistische Didaktik als handlungsleitende Referenztheorien herangezogen (vgl. z. B. [23]). Noch stärker lässt sich allerdings – vor allem in den praxisorientierten Auseinandersetzungen – ein Prinzipiendiskurs beobachten. So wird davon ausgegangen, dass es verschiedene didaktische Prinzipien gibt, die als normative Kategorien genutzt werden und Lehrenden Orientierung in der Gestaltung konkreter Lehr-Lernprozesse bieten können. Im Folgenden sollen einige dieser Prinzipien kurz vorgestellt werden, bevor jeweils reflektiert wird, welche Bedeutung diesen Prinzipien im Kontext virtueller Schulungen mit Digitalen Zwillingen in der betrieblichen Weiterbildung zukommen kann.

- *Teilnehmer- und Biografieorientierung*: Teilnehmerorientierung ist sicherlich eines der traditionsreichsten didaktischen Prinzipien in der Disziplin der Erwachsenenbildung (vgl. [24]). Letztlich geht es bei diesem Prinzip darum, dass Lehr- und Lernprozesse ausgehend von den Teilnehmenden gedacht, auf sie zugeschnitten und mit ihnen ausgehandelt werden sollten. Das bedeutet, dass die Teilnehmenden bereits in der Planung von Lernarrangements „mitgedacht“ werden und diese Beteiligungsmöglichkeiten in den konkreten Lehr- und Lernsituationen enthalten sein sollten. Das Prinzip der Biografieorientierung ist eng mit der Teilnehmerorientierung verknüpft. Konkret wird damit darauf verwiesen, die (Berufs)Biografie der Teilnehmenden ernst zu nehmen, ihr Vorwissen zu reflektieren und aktiv in die Lehr-Lernsituation einzubinden. Dabei stellt sich die Frage, wie Teilnehmer- und Biografieorientierung nun in virtuellen Lernumgebungen mit Digitalen Zwillingen aussehen kann: Für die Antizipation der Lernumgebungen würde dies bedeuten, sich konkret in die jeweiligen Zielgruppen der Maschinenbediener, Instandhalter oder der Programmierer hinein zu versetzen, um danach zu fragen, über welches Vorwissen die jeweilige Zielgruppe verfügt und welche Interessen diese Zielgruppen mit dem jeweiligen Lerngegenstand konkret verbindet. Gerade im Kontext der Eingewöhnungsphase in virtuelle Lernumgebungen und bei Gruppen mit niedriger Affinität für virtuelle Lernmöglichkeiten kann Biografieorientierung eine Chance darstellen, zunächst gemeinsam mit den Lernenden zu reflektieren, welche Erfahrungen sie mit virtuellen Kontexten in ihrer Biografie bereits gemacht haben. Insgesamt spielen also die Erfahrungen in der individuell-biografischen Lebensgeschichte eine wichtige Rolle, insbesondere wenn es um Aspekte der Akzeptanz oder Hemmschwelle in Bezug auf den virtuellen Lerngegenstand geht.

- *Partizipations- und Interaktionsorientierung*: Mit einer Partizipationsorientierung wird darauf aufmerksam gemacht, dass sich Teilnehmende in der Gestaltung der Lehr-Lernprozesse aktiv einbringen können, was auf mehrere Arten realisiert werden kann. Dies kann beispielsweise über den Grad der Mitsprache und Mitentscheidung im Lehr-Lernprozess erfolgen, was gleichsam eine Transparenz seitens der Lehrenden in Bezug auf die Lehrorganisation, die Inhalte und Methoden erforderlich macht (vgl. z. B. [25]). Auch geht es darum, Interaktionsmöglichkeiten und -räume für kommunikative Prozesse zu gestalten, um die Teilnehmenden aktiv in das Lehr-Lerngeschehen einbeziehen zu können und eine lernförderliche Atmosphäre zu schaffen. Besonders im Kontext virtueller Schulungen ist dies von essentieller Bedeutung, um trotz der Distanz und Unmittelbarkeit eine Lernumgebung zu schaffen, in der die Teilnehmenden nicht nur Rezipierende sind, sondern zur Partizipation aufgefordert werden. Entsprechend kommt bei der Gestaltung von Lehr-Lernsettings mit Erwachsenen auch das Prinzip der Interaktionsorientierung zur Geltung, nach dem die Kommunikation und der Austausch zwischen Teilnehmenden gefördert und ermöglicht werden sollte. Gerade im Kontext von virtuellen Schulungen spielt die komplexe und freie Interaktion an unterschiedlichen Endgeräten eine wichtige Rolle, um Lernprozesse beziehungsweise gemeinsame Handlungen im virtuellen Raum sicht- und erfahrbar zu machen. Ein gemeinsames Lernen, also mit- und voneinander lernen ist nur dann möglich, wenn Interaktionen im virtuellen Raum möglichst flexibel und niedrigschwellig gestaltet und angeboten werden. Eine gemeinsame Interaktion ermöglicht letztlich auch sogenannte „Perspektivenwechsel“, die aus einer konstruktivistischen didaktischen Perspektive (vgl. [26]) relevant erscheinen, da Lernprozesse gerade dann ermöglicht werden, wenn es gelingt, dass die Lernenden Perspektiven wechseln und Aspekte aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachten können. In virtuellen Schulungen ist dies in zweierlei Hinsicht von Bedeutung. Zum einen bedeutet es, dass in der virtuellen Umgebung Lernende auf die „Sicht“ der anderen Teilnehmenden oder der Schulungsleitung umschalten können sollten, um so im wörtlichen Sinne deren Perspektive zu übernehmen. Zum anderen kann es für die Lernenden sehr vorteilhaft sein, die Sichtweise (z. B. erfahrener) Mitlernenden einzunehmen, um auf den Lerngegenstand Maschine mit einer bislang unbekanntem Perspektive blicken zu können und so den Wissens- und Erfahrungshorizont zu erweitern.
- *Erfahrungs- und Reflexionsorientierung*: Im Sinne erfahrungsorientiert gestalteter Lehr-Lernumgebungen soll das Erfahrungswissen der Teilnehmenden bewusst, geplant und explizit einbezogen werden. So sammeln die verschiedenen Zielgruppen der Instandhalter, Bediener und Programmierer viele unterschiedliche Erfahrungen im Prozess der Arbeit, wobei eine Dokumentation dieser Erfahrungen in der Regel nicht oder kaum stattfindet. Daher kann es für die Lernenden sinnvoll und lernförderlich sein, im Rahmen von virtuellen Schulungen die individuellen Erfahrungen auszutauschen und zu reflektieren. Daran schließt auch das didaktische Prinzip der Reflexionsorientierung an, mit dem davon ausgegangen wird, dass Reflexion zu vertieften Lernprozessen führen

kann. Beispielsweise kann ein Rückblick in die eigene (Lern-)Biographie der kritischen Reflexion von Lernerfahrungen und dem Aufdecken von Kompetenzen dienen (vgl. z. B. [27]). Es geht darum, einen Raum zu schaffen, in dem praktische Erfahrungen zusammen mit fachlicher Expertise und Lernberatung seitens der Lehrenden auf einer Metaebene überdacht, reflektiert und beraten werden. Gerade im alltäglichen Betrieb an der Maschine stehen Fachkräfte häufig vor komplexen Herausforderungen, die im Rahmen von Schulungen zur Sprache gebracht werden können, um verschiedene Lösungswege aufzuzeigen und gemeinsam zu reflektieren.

19.5 Fazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit diesem Beitrag der Versuch unternommen wurde, den Einsatz von Digitalen Zwillingen in Schulungen didaktisch zu reflektieren. Insbesondere die herausgearbeiteten didaktischen Prinzipien bieten eine Orientierungsmöglichkeit für Schulungsleitungen, die entsprechende Fortbildungen neben ihrer fachlichen Tätigkeit in Betrieben anbieten. Damit wird auch die Chance eröffnet, erlebte Situationen und Herausforderungen in der Schulungspraxis didaktisch zu reflektieren und ggf. auch neue methodische Ideen für die Durchführung von Schulungen mit Digitalen Zwillingen zu entwickeln.

Literatur

1. Bothof A, Hartmann EA (2015) Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0. Springer, Berlin
2. Steven M, Dörseln JN (2020) Smart Factory: Einsatzfaktoren – Technologie – Produkte. Kohlhammer, Stuttgart
3. Wortman F, Flüchter K (2015) Internet of Things. Technology and value added. *Business & Information Systems Engineering* 57:221–224
4. Link M, Hamann K (2019) Einsatz digitaler Assistenzsysteme in der Produktion. Gestaltung der Mensch-Maschine Interaktion, *ZWF* 114(10):683–687
5. Winkler S, Schumann M, Klimant P (2019) Vom Digitalen zum Virtuellen Zwilling. Mehrwert der Digitalisierung in der Produktion, *ZWF* 114(10):669–672
6. Lutz M, Münch M, Turgut A, Lucke D, Palm D, Braun A, Ohlhausen P (2020) Der Digitale Zwilling entlang des Produktlebenszyklus. Aktuelle Anwendungen und zukünftige Potenziale in produzierenden Unternehmen. *ZWF* 115(6):422–424
7. Glatt M, Kölsch P, Krenkel N, Langlotz P, Siedler C, Yi L, Aurich JC (2020) Rahmenwerk zur Einordnung Digitaler Zwillinge in Produktionssystemen. *ZWF* 115(6):429–433
8. Daniel C (2020) Simulationsplattform für Automatisierungslösungen. *ZWF* 115(Special):32–35
9. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA) (2018) Wege zum Digitalen Zwilling: Simulation und Visualisierung im Produktlebenszyklus; Anwendungs- und Nutzenbeispiele aus dem Maschinen- und Anlagenbau. VDMA, Frankfurt

10. Scheifele D, Eger U, Röck S, Sekler P (2010) Effizient Automatisieren mit virtuellen Maschinen. In: Schenk, Michael (Hrsg.): *Forschung vernetzen – Innovationen beschleunigen: 7./8. IFF-Kolloquium*, 24. April und 20. November 2009, Magdeburg. Halle, Saale, Magdeburg: Universitäts- und Landesbibliothek Sachsen-Anhalt; IFF, S 51–64
11. Scheifele C, Verl A, Riedel O (2018) Echtzeit-Co-Simulation für die virtuelle Inbetriebnahme. *Echtzeitfähige Integrations-Plattform für digitale Zwillinge*. atp 60(11/12):44–55
12. Scheifele C, Verl A, Riedel O (2018) Engineering mit cyber-physischen Systemen. Vom mechatronischen zum cyber-physischen Engineering. atp 60(11/12):68–78
13. Franz J, Wehnert C (2020) Digitale Lernumwelten in produzierenden Betrieben. *Hessische Blätter für Volksbildung* 3:34–43
14. Schnierle M, Polak C, Röck S (2019) Mensch-Roboter-Interaktion mit Mixed Reality. atp 61(5):84–91
15. Niegemann L, Niegemann H (2018) Potenziale und Hemmnisse von AR- und VR-Medien zur Unterstützung der Aus- und Weiterbildung im technischen Service. In: Thomas O, Metzger D, Niegemann H (Hrsg) *Digitalisierung in der Aus- und Weiterbildung. Virtual und Augmented Reality für Industrie 4.0*. Springer Gabler, Berlin, S 35–48
16. Lesser K, Müller Y (2019) Evaluation der User Experience eines AR-Systems. Konzeptionierung und Anwendung einer ganzheitlichen Bewertungsmethodik. *ZWF* 114(10):673–678
17. Dunleavy M, Dede C (2014) Augmented reality teaching and learning. In: Spector MJ, Merrill DM, Elen J, Bishop MJ (Hrsg) *Handbook of research on educational communications and technology*. Springer, New York, S 735–745
18. Jadin T (2017) Die Potenziale von Mixed Reality für die betriebliche Aus- und Weiterbildung. In: *Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (Hrsg) Soziotechnische Gestaltung des digitalen Wandels – kreativ, innovativ, sinnhaft*, Brugg-Windisch und Zürich, Dortmund
19. Bastian H (1997) *Kursleiterprofile und Angebotsqualität*. wbv, Bielefeld
20. Arnold R, Schüßler I (1998) *Wandel der Lernkulturen. Ideen und Bausteine für ein lebendiges Lernen*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt
21. Arnold R, Gómez Tutor C, Kammerer J (2002) Selbstgesteuertes Lernen braucht Selbstlernkompetenzen. In: Kraft S (Hrsg) *Selbstgesteuertes Lernen in der Weiterbildung. Selbstgesteuertes Lernen in der Weiterbildung*. Schneider Verlag Hohengehren, Baltmannsweiler, S 76–89
22. Meuler E (2011) Didaktik der Erwachsenenbildung – Weiterbildung als offenes Projekt. In: Tippelt R. von Hippel A. (Hrsg) *Handbuch Erwachsenenbildung/Weiterbildung*. VS Verlag für Sozialwissenschaften. https://doi.org/10.1007/978-3-531-94165-3_61
23. Lehner M (2009) *Allgemeine Didaktik: Eine Einführung*. Utb Basics
24. Breloer G, Dauber H, Tietgens H (1980) *Teilnehmerorientierung und Selbststeuerung in der Erwachsenenbildung*. Westermann, Braunschweig
25. Klein R (2011) Die handlungsleitenden Prinzipien von Lernberatung – Weiterungen und Konkretisierungen. In: Klein R, Reutter G (Hrsg) *Die Lernberatungskonzeption. Grundlagen und Praxis*. Ifak, Göttingen, S 29–40
26. Arnold R, Siebert H (2003) *Konstruktivistische Erwachsenenbildung. Von der Deutung zur Konstruktion von Wirklichkeit*. 4. Aufl., Schneider Verlag Hohengehren, Baltmannsweiler
27. Schüßler I (2008) Reflexives Lernen in der Erwachsenenbildung – zwischen Irritation und Kohärenz. In: *bildungsforschung*, (5), 2, URL: <http://www.bildungsforschung.org/Archiv/2008-02/erwachsenenbildung>. Zugriffen: 2. Nov. 2020

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Online-Berechnung des Digitalen Zwillings für CNC am Beispiel der additiven Fertigung

20

Frederik Wulle, Christian Scheifele und Alexander Verl

Zusammenfassung

Die Forderung nach hoher Präzision bei Dosier- und Extrusionsanwendungen und gleichzeitig wirtschaftlicher Prozessgeschwindigkeit stellt eine große Herausforderung in der Entwicklung und Steuerung von Werkzeugmaschinen dar. Die teils hochviskosen Werkstoffe lassen sich nur schwer handhaben, wodurch es bei Dosieranwendungen oftmals zu ungewolltem Nachtropfen oder verzögertem Austritt kommt. Modellbasierte Steuerungsverfahren tragen zur Prozessführung bei und können ein Bearbeitungsergebnis optimieren. Eine Kopplung von Modellen in CNC-Steuerungen ist heute schon möglich, stößt jedoch häufig an Integrationsrandbedingungen und hat nicht die Möglichkeit, zur Laufzeit einer Bearbeitung auf den neuesten Stand gebracht zu werden.

F. Wulle

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW),
Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

C. Scheifele

ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH, Stuttgart, Deutschland

A. Verl (✉)

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW),
Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

E-Mail: alexander.verl@isw.uni-stuttgart.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Verl, S. Röck und C. Scheifele (Hrsg.),

Echtzeitsimulation in der Produktionsautomatisierung,

https://doi.org/10.1007/978-3-662-66217-5_20

361

20.1 Technologischer Hintergrund

In der additiven Fertigung sind für die steuerungstechnische Implementierung von Drucksystemen aktuell Einzellösungen für eine Vielzahl von verschiedenen Maschinen üblich. Bisher existiert noch keine gängige Lösung für die Standardisierung und die damit verbundene Modularisierung der Steuerung von Extrusionswerkzeugen. Somit werden Druckkopfeinzelachsen (hier sind so bezeichnete E- oder Q-Achsen geläufig) als unabhängige kinematische Systeme betrachtet, was zur Folge hat, dass eine einheitliche Prozesssteuerung und -regelung nur eingeschränkt umsetzbar ist.

Industrielle Extrusionsanwendungen reichen heute von hochpräzisen Dosieranlagen über das Ausbringen von Klebe- und Dichtmassen bis hin zum Betondruck großer Freiformflächen. Alle Verfahren haben gemeinsam, dass die zu extrudierende Substanz gezielt von einem Förderantrieb aus dem Werkzeug ausgebracht und abgelegt werden soll.

In der Trajektorienplanung, bei automatisierten Klebeanwendungen oder in der additiven Fertigung wird das dynamische Verhalten (träges Fließverhalten) von Kunststoffextrudern kaum berücksichtigt (siehe Abb. 20.1). Dies verursacht Prozess- und Bauteilqualitätsminderungen, die vor allem in den Anfahr- und Endphasen oder bei variierender Bahngeschwindigkeit beim Ablegen von Raupen sichtbar werden [1]. Das Ziel ist eine prozessorientierte Echtzeit-Trajektorienplanung, also die Adaption aller kinematischen Größen auf die Dynamik des Klebe- oder 3D-Drucksystems.

Die Lösung für dieses Problems basiert auf der Modellierung des dynamischen Verhaltens und dessen Integration in Form einer modellbasierten Vorsteuerung in die CNC-Steuerung. Hierbei wird eine mathematisch-physikalische Modellbeschreibung von Extrusionswerkzeugen erstellt und hierauf aufbauend eine echtzeitfähige modellbasierte Vorsteuerung für den Prozess entwickelt. Diese Vorsteuerung wird als Echtzeitmodell in die Simulationsumgebung integriert, in der die Schnittstellen zum CNC-Kern angekoppelt werden.

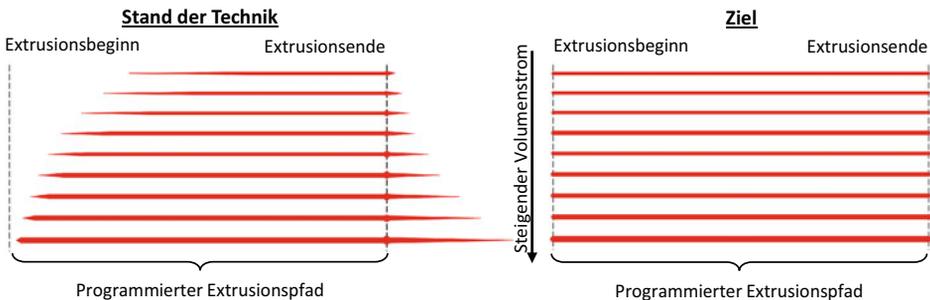


Abb. 20.1 Darstellung von Materialverhalten beim 3D-Druck [1]

20.2 Modellintegration in CNC-Steuerungen

CNC-Kern/Funktionen

CNC-Bahnsteuerungen zeichnen sich durch das gleichzeitige Ansteuern von mehreren interpolierbaren Achsen aus [2]. Die CNC umfasst hierbei alle wichtigen Funktionen zur Anzeige, Datenspeicherung, Interpolation, Lage- und Geschwindigkeitsregelung, Datenspeicherung und Datenverarbeitung. Im CNC-Kern wird eine Bahnbewegung auf Grundlage eines NC-Programms berechnet und im Feldbustakt auf die beteiligten Achsen und Systeme kommandiert. Dabei ermitteln Kernfunktionen auf Grundlage der programmierten Feedrate die Bahngeschwindigkeit unter Berücksichtigung der transformierten Achsbewegungen der Vorschubachsen. Die Vorschubachsen werden hierbei in der Regel als einfache, dynamische Systeme wie beispielweise PT2-Glieder oder deren dynamisches Potenzial durch maximalen Ruck, Beschleunigung und Geschwindigkeit in der Steuerung beschrieben. Diese Achs-Modelle werden ergänzt durch die Modellierung weiterer physikalischer Effekte, wie beispielsweise Reibung oder Umkehrspiel [3]. Auf eine exaktere Abbildung wird in der Regel verzichtet, um die Echtzeitfähigkeit zu gewährleisten.

Modellintegration in den CNC-Kern

Um das dynamische Verhalten von Werkzeugmaschinen durch modellbasierte Steuerungsfunktionen zu verbessern, wurde in [4] eine Methode entwickelt, um echtzeitfähige Strukturmodelle in CNC-Steuerungen zu integrieren mit dem Ziel der Vermeidung von Eigenschwingungen. Dazu werden FE-Modelle von Maschinenstrukturen erstellt. Da eine dynamische Simulation sehr rechenintensiv ist und diese nicht innerhalb des Echtzeittaktes (basierend auf 1 ms) berechenbar ist, werden die FE-Modelle mit Methoden der Modellreduktion reduziert. Ein klassisches Modellreduktionsverfahren, das hier zum Einsatz gebracht worden ist, ist die modale Reduktion, bei der das Modell auf n Moden eines betrachteten Bauteils reduziert wird und damit nur n Freiheitsgrade besitzt. Hierbei werden die Verformungs- bzw. Bewegungsgleichungen durch modale Matrizen, bestehend aus den Eigenvektoren, transformiert. Anschließend erfolgt die Kopplung der Komponentenmodelle durch festgelegte Koppelbedingungen, die in Abhängigkeit zu den Achspositionen stehen. Aus den Komponentenmodellen werden dann die momentanen Gesamtmodelle im Online-Betrieb erstellt und das Systemverhalten und dessen Eigenfrequenzen berechnet. Damit die momentane Systemeigenschaft zum jeweiligen Taktbeginn an die Steuerung übergeben werden kann, erfolgt die Berechnung zyklisch. Bei dieser Untersuchung wurde gezeigt, dass dynamische, rechenintensive Modelle in einer echtzeitfähigen Steuerungsumgebung integriert werden können, wenn diese in deren numerischem Aufwand reduziert werden.

Derartige Modellintegrationen sind jedoch heutzutage in CNC-Anwendungen eher Forschungsinhalte, als dass sie in der Praxis häufig eingesetzt werden. Dies ist darin begründet, dass der CNC-Kern meist ein eigenständig funktionierender Task in einer Anlagensteuerung ist, der nur bestimmte, definierte Schnittstellen an die SPS oder die

Antriebe hat. Es ist somit nicht möglich, die Bahngeschwindigkeitsberechnung frei zu beeinflussen.

Zukünftig werden standardisierte Schnittstellen in modernen CNC-Systemen ermöglichen, dass einzelne Parameter während der Laufzeit mit dem CNC-Kern ausgetauscht werden können, der diese dann für die Bahnplanung berücksichtigt und entsprechend einer Modellvorsteuerung Bahnparameter ändern kann. Damit wird es auch möglich, träge Systeme durch die Verwendung des zukünftigen Bahnverlaufes mit ausreichender Vorlaufzeit vorzusteuern. Die Prozessverbesserung wird durch Trajektorienanpassung (nicht echtzeitfähig) und modellbasierter Vorsteuerung (echtzeitfähig) gewährleistet.

20.3 Modellierung von Extrusionswerkzeugen

Die Modellierung von Extrusionswerkzeugen ist eine komplexe Aufgabe, die von vielen Prozessparametern abhängig ist. Zu diesen gehört die Art von Extruderwerkzeugen:

- Filamentbasierte Extrusion
- Durch Kolbenbewegung induzierte Extrusion
- Extruderschneckenextrusion,

wie auch das zu fördernde Material und die Umgebungsbedingungen [5].

In der Forschung wurde bereits 2004 auf das Problem der Dynamik in bahngesteuerten Druckköpfen hingewiesen. Bellini et al. [6] haben gezeigt, wie ein Druckkopf des Schmelzschichtverfahrens (eng. Fused Filament Fabrikation, kurz FFF) modelliert werden kann. Darin wurde ein konstantes Verhältnis zwischen Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} und Volumenstrom v_{Extrudat} mit dem Proportionalfaktor c_p angesetzt:

$$v_{\text{Extrudat}} = v_{\text{Bahn}} \cdot c_p \quad (20.1)$$

Dieser Ansatz wurde jedoch nur simulativ untersucht. Das Fluidverhalten in Düsen wurde in mehreren Forschungsarbeiten betrachtet, wie beispielsweise in [7]. Das thermische Prozessverhalten eines FFF-Druckkopfes wurde in [8] analysiert. Effekte, die beim Drucken in Ecken entstehen, wurden symptomatisch in [9] behoben. Eine vollständige Extruder-basierte Modellierung liegt hier jedoch nicht vor. Modellierungen des Extruderverhaltens im Zusammenhang mit einer Bahnplanung wurden unter Verwendung des Hagen-Poiseuille-Ansatzes erstellt [10]. Eine Vorsteuerung zur Wärmeeinbringung in den FFF-Prozess wurde in [11] unter Zuhilfenahme der B-Spline Bahnoptimierung erfolgreich implementiert. Technologien zur Prozessmodellierung und deren Vorsteuerung innerhalb der CNC-Architektur mithilfe echtzeitfähiger Digitaler Zwillinge wurden bereits entwickelt. Diese werden heute jedoch auf Grund der erhöhten Systemanforderung kaum in industriellen Steuerungen implementiert. Veränderte Prozessbedingungen können somit nicht angepasst werden.

Im Nachfolgenden wird ein Beispiel für ein Modell zur Beschreibung des Dosier- und Extrusionsprozesses vorgestellt. Über eine dynamische Beschreibung des viskosen Extrudats in Abhängigkeit der Zeit wird das Systemverhalten modelliert und durch dessen Inversion eine mögliche Vorsteuerung angestrebt. Die Schritte zur Modellbildung und Vorsteuerung sind folgende:

1. Mathematische und physikalische Beschreibung des Druckprozesses
2. Überführung der Modellierungsmethode und Reduzierung als echtzeitfähiger Simulationstask
3. Vorsteuerung des dynamischen Verhaltens des Extrusionswerkzeugs durch Kopplung der CNC mit dem Simulationstask

Das Extrudermodell wird am Beispiel eines filamentbasierten FFF-3D-Druckkopfes aufgestellt und validiert. Abb. 20.2 zeigt schematisch das Funktionsprinzip eines FFF-Extruders.

Ein Extrudermotor mit einem Rändeldurchmesser d_r fördert das thermoplastische Filament mit dem Durchmesser d_f und Querschnitt $A_f = \frac{\pi}{2}d_f^2$ in den Druckkopf. Damit das

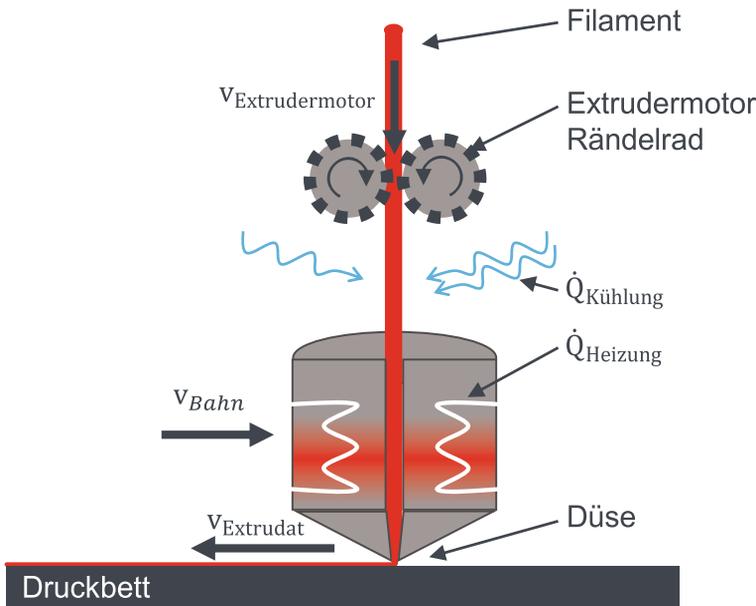


Abb. 20.2 Schematische Darstellung der Einflussgrößen auf die additive Fertigung: v_{Bahn} beschreibt die Verfahrensgeschwindigkeit, $v_{\text{Extrudermotor}}$ die Fördergeschwindigkeit des Extrudats, v_{Extrudat} die Geschwindigkeit, mit der das Extrudat aufgetragen wird, $\dot{Q}_{\text{Kuehlung}}$ die Wärmeänderung durch Kühlung und \dot{Q}_{Heizung} die Wärmeänderung die Heizung [1]

Filament möglichst lange Formstabilität hat, muss dieses in Bereichen unterhalb der Glasübergangstemperatur ϑ_g gehalten werden, weshalb es gekühlt wird (meist durch aktive Konvektion). Kurz vor der Düse wird das Filament bis auf die Schmelztemperatur ϑ_s erhitzt und aus der Düse extrudiert. Nach der Extrusion erstarrt das Filament durch Kristallisation. Das Aktuieren dieses Prozesses übernimmt vollständig der Extrudermotor, der jedoch nicht direkt den Ausfluss aus der Düse steuern kann, sondern lediglich den Druck. Der Druck p_{fil} , der vom Motor mit Drehmoment $M_{t,\text{Motor}}$ auf das Filament übertragen wird, wird berechnet durch:

$$p_{\text{fil}}(t) = \frac{2M_{t,\text{Motor}}(t)}{(d_r + d_f)A_f} \quad (20.2)$$

Für stationäre Systemmodelle gibt es zahlreiche Ansätze wie bspw. das von Carreau [12]. Soll der Volumenstrom zeitlich verändert werden, werden instationäre Strömungsbetrachtungen durch eine Erweiterung der allgemeinen Strömungsbeschreibung nach Bernoulli [13] angewandt. Die zeitliche Änderung der Strömungsgeschwindigkeit entlang eines Pfades über die Systemgrenzen von Position 1 (Beginn des Extrusionskanals) nach Position 2 (Ende der Extrusionsdüse) ist hierbei:

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + \int_1^2 \frac{dp}{\rho(p)} + \sin(\alpha)g(L_2 - L_1) = - \int_1^2 \frac{dv_2}{dt} dL \quad (20.3)$$

Ausgehend von der stationären Fließgeschwindigkeit v_1 ergibt sich nach Lösung der Gleichung (20.3) der zeitliche Verlauf v_2 . Die spezifische Lageenergie (L_i ist die Lage in vertikaler Richtung am Punkt i) mit Ortsfaktor g ist in Abhängigkeit zum Orientierungswinkel α zur Horizontalen angegeben und kann bei einer waagrecht angeordneten Fließkanalgeometrie vernachlässigt werden. Die spezifische Druckenergie beträgt Null, sofern vor und nach dem Extrusionswerkzeug Umgebungsdruck herrscht und vereinfacht eine druckunabhängige Dichte ρ des Extrudats angenommen wird. Durch die Vernachlässigung der spezifischen Druckenergie und Lageenergie kann die Gleichung (20.3) in eine nichtlineare, gewöhnliche Differentialgleichung erster Ordnung umgewandelt werden. Sofern sich die Fließgeschwindigkeit zwischen den betrachteten Abschnitten 1 und 2 nicht ändert, kann das Integral des Zusatzterms durch $L_{1-2} \frac{dv_2}{dt}$ ersetzt werden. Die Gleichung (20.3) vereinfacht sich somit zu

$$v_2^2 + 2L_{1-2} \frac{dv_2}{dt} = v_1^2 \quad (20.4)$$

mit der Länge des Strömungskanals L_{1-2} , der Eintrittsgeschwindigkeit v_1 und der Austrittsgeschwindigkeit v_2 . Diese Gleichung kann direkt invertiert und analytisch gelöst werden. Kommen jedoch weitere Teilsysteme der Modellierung hinzu, ist die Lösung dieses Modells im Allgemeinen nicht mehr analytisch lösbar. Die allgemeine Systembeschreibung des Druckkopfsystems sei nun als Übertragungsfunktion G_0 und dessen Inverse als G_0^{-1} bezeichnet. Für die Optimierung des Extrusion-Bahn-Verhaltens gilt, dass der

Vorschubquotient c_v aus Bahngeschwindigkeit und modellierter Extrudatsgeschwindigkeit konstant ist.

$$c_v = \frac{v_{\text{Extrudat}}}{v_{\text{Bahn}}} = \frac{G_0 v_{\text{Bahn}}}{v_{\text{Bahn}}} = \text{const} \quad (20.5)$$

Im nächsten Kapitel ist beschrieben, wie diese Forderung durch die Verknüpfung eines Modells als Digitaler Zwilling mit dem CNC-Kern erfüllt wird.

20.4 Modellbasierte Vorsteuerung mit Digitalem Zwilling

Die modellbasierte Vorsteuerung wird realisiert anhand eines modularen Simulationsmodells, das mit der CNC interagiert, um optimierte Bahnverläufe für die Prozessführung ermöglichen zu können. Die einzelnen Elemente des Simulationsmodells sind dabei modular nach einem Baukastenprinzip aufgebaut, sodass ein späteres reales System einfach aus diesen Modulen aufgebaut werden kann (Abb. 20.3): ein Prozess-in-the-Loop. In einem weiteren Schritt erfolgt eine automatische Abstraktion des modularen Gesamtmodells für eine Beschreibung des dynamischen Verhaltens. In Abb. 20.3 sind CNC-Kanäle dargestellt, in denen Achsen geführt werden. Hierbei kann ein CNC-Kanal über eine TeCOM-Schnittstelle (TwinCAT Component Object Model) mit einem Simulations-Solver (Virtuos-Solver) gekoppelt werden. Dies kann auch unter Einbeziehung mehrerer CNC-Kanäle geschehen.

Die Bahnplanung (weiche Echtzeit), Bahnausführung (Echtzeit) und Extrudermotorsteuerung (Echtzeit) wird durch das Simulationsmodell beeinflusst. Um dies zu erreichen, wird ein Modell direkt in die CNC-Steuerung integriert, um eine modellbasierte Steuerung zu ermöglichen. Der Algorithmus zur Vorsteuerung ist im Folgenden skizziert:

1. Die Bahnplanung in der CNC berechnet die für eine gegebene Geometrie benötigte Bahngeschwindigkeit (in den Stationen der Programmeingabe HMI, Decoding und Tool Compensation).
2. Im Simulationstask werden durch die modellprädiktive Steuerung die aktuellen Dynamikgrenzwerte des Extrusionswerkzeuges berechnet. Hierbei wird auf Grundlage eines definierten Zeitabschnittes der Trajektorienplanung der Betriebspunkt des Extrusionswerkzeuges simuliert und der Steuerung wird ein Feedback gesendet, falls die Dynamik des Extrusionswerkzeuges nicht für die geplante Bahn ausreicht (Schnittstelle TeCOM mit Virtuos-Solver).
3. Die Bahnplanung wird auf Basis dieser virtuellen Prozesssimulation angepasst/optimiert (auf Grundlage der Rückmeldung des Virtuos-Solvers).
4. Innerhalb des Echtzeittasks stellt die CNC den zukünftigen Bahngeschwindigkeitsverlauf der modellbasierten Extrudersteuerung zur Verfügung.

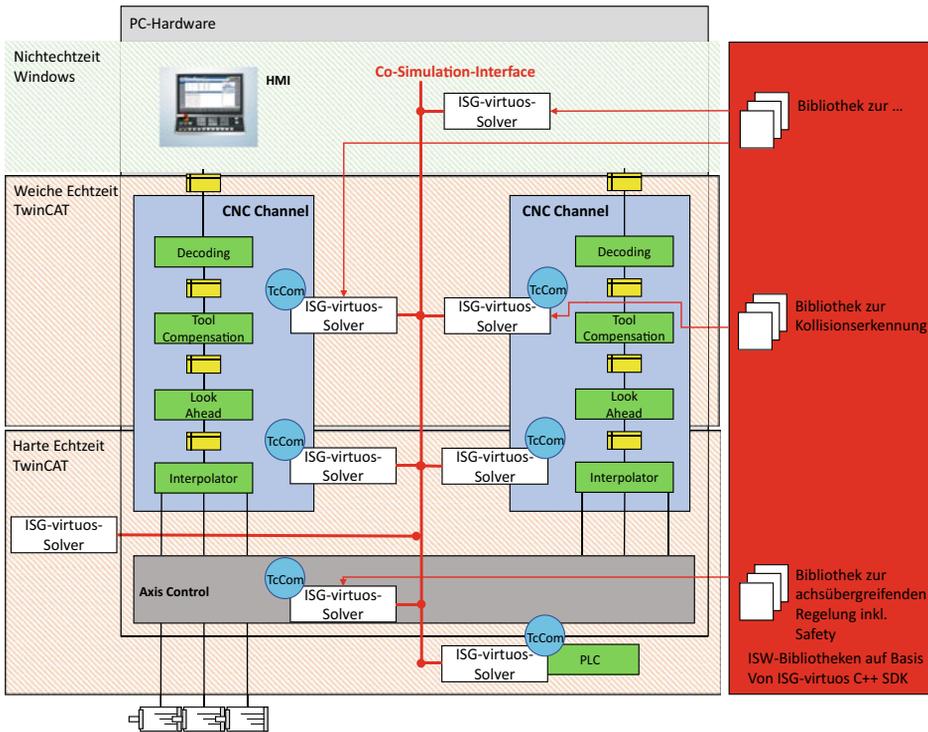


Abb. 20.3 Schematische Integration der ISG-virtuos Solver (Digitaler Zwilling) auf den verschiedenen Ebenen der CNC-Steuerung

5. Der Digitale Zwilling simuliert vorab das Verhalten/die Trajektorienplanung sowie das daraus resultierende Druckergebnis mittels des echtzeitfähigen Simulationsmodells parallel zur realen Fertigung (Schnittstelle TcCOM mit Virtuos-Solver).
6. Die Extrudermotorsteuerung sowie die Bahnausführung werden in Echtzeit kommandiert (Axis Control).

Hierbei erfolgt Schritt 5 zyklisch, was bedeutet, dass auf Grundlage des Look Aheads (Geschwindigkeitsvorschau) eine Zeitspanne von v_{Bahn} in jedem NC- bzw. Simulationstakt verwendet wird, um Sollwerte für die Extrudatgeschwindigkeit v_{Extrudat} zu berechnen. Die Kopplung des CNC-Kanals mit der Simulation ist in Abb. 20.4 dargestellt. Hierbei sind die Komponenten in einen weichen Echtzeitteil (SDA = Steuerdatenaufbereitung) und einen harten Echtzeitteil (GEO = Interpolation, Lageregler) untergliedert.

Das exemplarische Ergebnis für FFF-Extruderanwendungen auf Basis eines erweiterten Bernoulli-Ansatzes ist in Abb. 20.5 zu sehen. Dazu wurde eine mehrachsige Druckanlage verwendet, die mit einem Stand-der-Technik-Druckkopf ausgestattet war. Der Extrusionsantrieb wurde durch einen Servomotor betrieben und das gedruckte Material ist Polylactide als Filament mit 1,75 mm Durchmesser. Der Düsendurchmesser beträgt 0,4 mm.

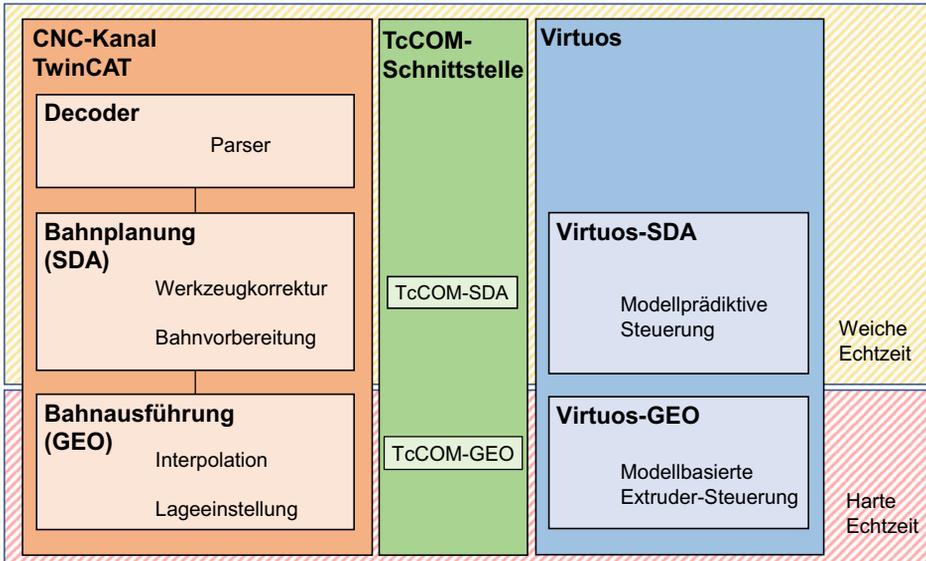


Abb. 20.4 Modellkopplung von CNC-Kanal und Echtzeitmodell

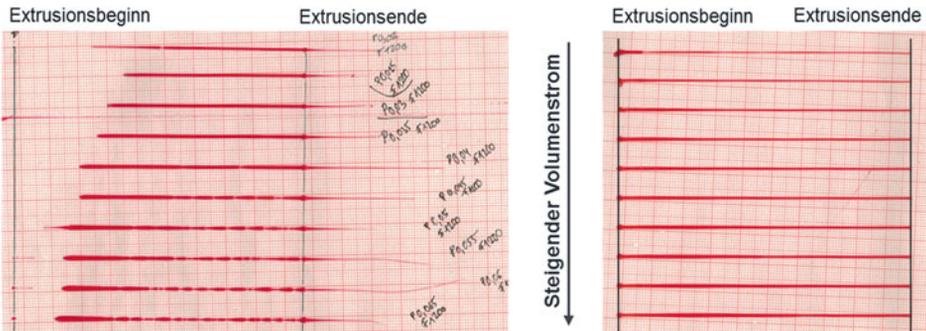


Abb. 20.5 Druckergebnis mit direkter Synchronisierung (links) der modellbasierten Steuerung der additiven Fertigung [1]

Eindeutig zu erkennen ist, wie im unregelmelten Prozess das Nachlaufverhalten des Druckkopfes die Druckqualität beeinträchtigt. Im geregelten bzw. vorgesteuerten Prozess ist eine deutliche Verbesserung zu sehen. Diese hier dargestellte Modellkopplung ist modular aufgebaut, sodass die im Abschnitt *Modellierung von Extrusionswerkzeugen* dargestellte Beschreibung, die als Baukasten in die Simulationsumgebung implementiert wurde, beliebig erweitert und ergänzt werden kann.

20.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Verwendung eines Digitalen Zwillings zur Prozessoptimierung demonstriert. Als Anwendungsbeispiel wurde ein Verfahren der additiven Fertigung betrachtet, das sogenannte Schmelzschichtverfahren, welches ein prozessbedingtes träges Verhalten aufweist. Dieses konnte durch Modellierung des Prozesses und Kopplung eines Modells in die CNC-Steuerung mittels echtzeitfähiger Vorsteuerung kompensiert werden.

Literatur

1. Wulle F, Bubeck W, Elser A, Wolf M, Verl A (2019) Trajektorienplanung mittels modellprädiktiver Vorsteuerung eines FDM-Druckkopfes, 26. Kunststoffkolloquium Stuttgart
2. Kief HB, Roschiwal HA, Schwarz K (2017) CNC-Handbuch: CNC, DNC, CAD, CAM, FFS, SPS, RPD, LAN, CNC-Maschinen, CNC-Roboter, Antriebe, Energieeffizienz, Werkzeuge, Industrie 4.0, Fertigungstechnik, Richtlinien, Normen, Simulation, Fachwortverzeichnis, 30. Aufl. Hanser, München
3. Engelberth T (2020) Adaptive Verspannung von Zahnstange-Ritzel-Antrieben. Fraunhofer, Stuttgart
4. Sekler P (2012) Modellbasierte Berechnung der Systemeigenschaften von Maschinenstrukturen auf der Steuerung. Jost-Jetter, Heimsheim
5. Gibson I, Rosen D, Stucker B (2015) Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing. Springer, Heidelberg
6. Bellini A, Güçeri S, Bertoldi M (2004) Liquefier Dynamics in Fused Deposition. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 126(2):237-246
7. Ramanath HS, Chua CK, Leong KF, Shah KD (2008) Melt flow behaviour of poly-epsilon-caprolactone in fused deposition modelling. J Mater Sci Mater Med 19:2541
8. Atif Yardimci M, Güçeri S (1996) Conceptual framework for the thermal process modelling of fused deposition 2:26
9. Weiss B, Storti DW, Ganter MA (2015) Low-cost closed-loop control of a 3D printer gantry 21:482
10. Crockett R (1997) The liquid-to-solid transition in stereodeposition techniques
11. Ertay DS, Yuen A, Altintas Y (2018) Synchronized material deposition rate control with path velocity on fused filament fabrication machines 19:205
12. Michaeli W (2009) Extrusionswerkzeuge für Kunststoffe und Kautschuk: Bauarten, Gestaltung und Berechnungsmöglichkeiten, 3. Aufl. Hanser, München
13. Bschorer S (2018) Technische Strömungslehre: Lehr- und Übungsbuch, 11. Aufl. Springer Vieweg, Wiesbaden

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Strukturmodellbasierte Korrektur thermisch bedingter Fehler

21

Steffen Ihlenfeldt, Xaver Thiem und Jens Müller

Zusammenfassung

In jeder Phase des Produktlebenszyklus müssen unterschiedliche thermische Fragestellungen beantwortet werden. Zu diesem Zweck bildet der Digitale Zwilling die Maschine selbst und die auf ihr laufenden Prozesse aufgabenbezogen ab. Damit ist die virtuelle Maschine nicht ein einzelnes Modell, sondern muss als Digitaler Werkzeugkasten kontextbezogener Modellvarianten gesehen werden. Strukturmodelle für die Korrektur thermisch bedingter Fehler an Werkzeugmaschinen stellen eine dieser Modellvarianten dar. Diese Modelle bilden den thermo-elastischen Zustand der Maschine im Betrieb ab. Die strukturmodellbasierte Korrektur steht im Fokus dieses Kapitels. Es werden die Teilfunktionen des Korrekturansatzes und die damit verbundenen Echtzeitanforderungen erläutert. Im Anschluss wird die konkrete Implementierung für die Demonstratormaschine Hexapod *Felix IV* vorgestellt. Die Korrektur wird validiert mit Hilfe eines Versuches, der ein großes Belastungsspektrum aufweist. Für diesen Versuch konnte eine Reduktion der thermisch bedingten Fehler von mehr als 80 % erzielt werden.

S. Ihlenfeldt (✉) · X. Thiem · J. Müller
Professur für Werkzeugmaschinenentwicklung und adaptive Steuerungen, Technische Universität
Dresden, Dresden, Deutschland
E-Mail: Steffen.Ihlenfeldt@tu-dresden.de

21.1 Einleitung

Die steuerungsintegrierbaren Modelle bzw. Digitalen Zwillinge weisen vielfältige Einsatzmöglichkeiten auf [1]. Die möglichen Anwendungen reichen von dem Entwurf über die Regelung, die Korrektur bis hin zur Überwachung von Maschinen. Damit fungieren die Modelle als Digitaler Werkzeugkasten zum Lösen einer Vielzahl von unterschiedlichen Problemstellungen. Dieser Beitrag fokussiert sich auf die strukturmodellbasierte Korrektur aus dem Bereich des thermischen Maschinenverhaltens.

21.2 Digitaler Zwilling für thermische Problemstellungen

Physikalisch basierte, thermische und thermo-elastische Modelle können als Digitaler Zwilling der Werkzeugmaschine verstanden werden. Die physikalische Modellierung bildet einen Kern des Digitalen Zwillings [1]. Diese Modelle bilden die Struktur der Maschine sowie die Strukturvariabilität durch Verfahrbewegungen ab. Die Modelle haben verschiedene Anwendungen, die sich von dem frühen Entwurfsstadium über die detaillierte Gestaltung und die Inbetriebnahme bis zum Betrieb der Maschine unterscheiden. Die verschiedenen Anwendungsbereiche sind in Abb. 21.1 oben dargestellt. Aus den Anwendungen ergibt sich die jeweils notwendige Modellausprägung. Die Modelle (Digitale Zwillinge) entwickeln sich parallel mit der Entwicklung der realen Werkzeugmaschine weiter und erfüllen die zunehmend steigenden Anforderungen aus den Anwendungen.

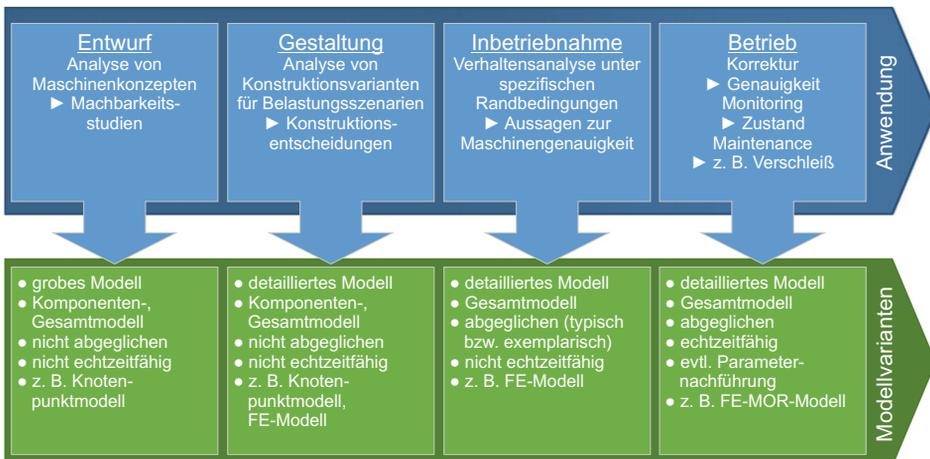


Abb. 21.1 Modellvarianten von thermischen und thermo-elastischen Modellen für verschiedene Anwendungen, nach [2]

Zu Beginn steht die Analyse des Maschinenkonzeptes in der *Entwurfsphase*. Der Fokus liegt zunächst auf Machbarkeitsstudien anhand von groben Modellen von Komponenten bzw. der gesamten Maschine. Die Modelle sollen die wesentliche Charakteristik des thermischen Verhaltens abbilden. Hierfür müssen die Modellparameter nicht mit der Realität abgeglichen und die Modelle nicht echtzeitfähig sein. Geeignet als Modell für diese Anwendung sind z. B. Kapazitäts-Leitwert-Netzwerke (Knotenpunktmodelle, [3]). Diese sind mit relativ geringem Aufwand zu erstellen und ermöglichen grundlegende Aussagen zu dem Verhalten der Maschine.

Im nächsten Schritt können die Modelle zur Analyse und Auswahl von Konstruktionsvarianten während der *Gestaltung* der Maschine dienen. Hierfür werden Modelle mit einem höheren Detailgrad benötigt. Das können z. B. Finite-Element-Modelle (FE-Modelle) sein, mit denen sich, im Gegensatz zu Knotenpunktmodellen, auch konstruktive Details (z. B. Lage der Kühlung) gut abbilden lassen. Für die Analyse der Konstruktionsvarianten können die Modelleingangsdaten anhand typischer Belastungsszenarien erstellt werden.

Während der *Inbetriebnahme* sind die spezifischen Randbedingungen für den Einsatz der Maschine bekannt. Das sind die Umgebungsrandbedingungen (z. B. Hallenklimatisierung, Sonneneinstrahlung am Aufstellungsort, Nähe zum Hallentor) und evtl. Lastfälle, die im späteren Betrieb auftreten können. Für diese Randbedingungen kann mit Hilfe von Modellen eine Verhaltensanalyse durchgeführt werden, um Aussagen zur Maschinengenauigkeit treffen zu können. Damit verbunden sind hohe Anforderungen an die Genauigkeit des Modells. Aus diesem Grund müssen die Modellparameter mindestens für den Maschinentyp oder bei höheren Anforderungen für das konkrete Exemplar abgeglichen sein. Eine Berechnung in Echtzeit ist an dieser Stelle noch nicht notwendig.

Im *Betrieb* gibt es verschiedene Anwendungen für einen Digitalen Zwilling der Werkzeugmaschine, der den aktuellen thermo-elastischen Maschinenzustand abbildet. Der Zwilling kann zum Monitoring der Temperaturverteilung in der Maschine und des thermisch bedingten Fehlers am Wirkpunkt im Arbeitsraum verwendet werden. Mithilfe einer Korrektur des thermisch bedingten Fehlers kann die Fertigungsgenauigkeit der Maschine erhöht werden. Der Digitale Zwilling kann darüber hinaus zur frühzeitigen Erkennung von Wartungsaufgaben genutzt werden. Zum Beispiel kann ein Temperatursensor an einer Profilschienenführung eine erhöhte Temperatur gegenüber dem Modell detektieren und damit auf eine erhöhte Reibung an der Führung hinweisen. Um den Anforderungen dieser Anwendungen im Betrieb zu entsprechen, muss das Modell in „thermischer Echtzeit“ berechnungsfähig sein. Thermische Echtzeit bedeutet, dass das Simulationsergebnis vorliegen muss, bevor relevante Änderungen am Temperaturfeld auftreten. Diese Anforderung kann z. B. durch FE-Modelle mit reduzierter Modellordnung (MOR, [4]) erfüllt werden. Durch Verwendung von MOR-Methoden verringert sich der Berechnungsaufwand erheblich und die Auswertung der Modelle in thermischer Echtzeit wird möglich. Veränderungen des Maschinenverhaltens während des Betriebes können es notwendig machen, dass Modellparameter nachgeführt werden müssen, um die Genauigkeit

des Modells zu erhalten. Zum Beispiel kann das Einlaufverhalten der Lager zu einer Veränderung der Reibmomente führen [5].

Es werden je nach Anwendung unterschiedliche Modellvarianten benötigt, die die jeweiligen Anforderungen erfüllen. Die Komplexität des Digitalen Zwillinges nimmt von der Entwurfsphase bis zum Einsatz im Betrieb der Maschine zu. Die Anwendung des Digitalen Zwillinges zur Korrektur thermisch bedingter Fehler an Werkzeugmaschinen im Betrieb wird in [6] untersucht.

21.3 Stand der Technik

Die Genauigkeitsanforderungen an Werkzeugmaschinen nehmen bei gleichzeitig steigenden Anforderungen an die Produktivität zu [7]. Mit der steigenden Produktivität erhöht sich in der Regel auch der Wärmeintrag in die Maschine und damit der thermisch bedingte Fehler. Dieser Fehler macht einen signifikanten Anteil am Gesamtfehler der Maschine aus [8]. 57 % der in einer Studie befragten Maschinenhersteller und -anwender tendieren dazu, den thermisch bedingten Fehler als dominanten Einfluss auf die Gesamtgenauigkeit der Maschine im Vergleich zu geometrischen, statischen und dynamischen Fehlern einzuschätzen [9]. Eine gängige Gegenmaßnahme zur Reduktion der thermisch bedingten Fehler ist das Kühlen der Maschine. Die Kühlung führt zu einem zusätzlichen Energieverbrauch und damit auch zu zusätzlichen Kosten. In [10] wird der zweithöchste Anteil (nach dem Kühlschmierstoff) an den Energiekosten an der untersuchten Maschine auf die Maschinenkühlung zurückgeführt. Die Energiekosten für die Kühlung lagen in diesem Beispiel deutlich über den Energiekosten für die Antriebe.

Eine Möglichkeit zur Genauigkeitssteigerung ohne zusätzlichen Energieeinsatz sind modellbasierte Korrekturansätze [11]. Grundsätzlich können die Modelle in korrelative Modelle (Blackbox, z. B. in [12] und [13]), Modelle auf Basis von Übertragungsfunktionen (Greybox, z. B. in [14]) und Strukturmodelle (Whitebox, siehe Abschn. 21.6, z. B. in [15]) unterschieden werden. In diesem Beitrag wird die Modellausprägung als Strukturmodell betrachtet. In [16] werden ganzheitliche Korrekturmodelle, wie das Strukturmodell, als Digitaler Zwilling der Maschine bezeichnet. Diese Modelle müssen unter anderem das thermische Verhalten unter Berücksichtigung von sich ändernden Umgebungstemperaturen und sich dynamisch ändernden inneren Wärmequellen abbilden. Die Berechnung der Modelle muss in „thermischer Echtzeit“ erfolgen, was bedeutet, dass das Modell den aktuellen thermisch bedingten Zustand der Maschine für die Korrektur berechnen muss, bevor relevante Änderungen am Temperaturfeld auftreten.

21.4 Ziel der Korrektur

Das grundsätzliche Ziel der Korrektur ist die Genauigkeitssteigerung der Werkzeugmaschine ohne zusätzlichen Energieeinsatz. Hierfür soll möglichst wenig zusätzliche Sensorik eingesetzt werden. Deshalb sollen als Eingangsgrößen für das Modell primär in der Steuerung zugängliche Größen verwendet werden. Darüber hinaus soll mindestens ein Sensor zur Erfassung der Umgebungstemperatur verwendet werden. Die gemessene Umgebungstemperatur soll als Randbedingung im Modell gesetzt werden, um den Umgebungstemperaturverlauf abzubilden.

Ein weiteres Ziel ist die weitestgehend gleichbleibende Korrekturgenauigkeit für variable Lasten (z. B. Einzelteilerfertigung) und Umgebungsbedingungen (z. B. bei nicht klimatisierter Halle). Hierfür werden Modelle benötigt, die die physikalischen Zusammenhänge in der Maschine abbilden und nicht für spezifische Lastfälle angeleitet wurden, wie das z. B. bei nicht oder nur teilweise physikalisch interpretierbaren Blackbox- oder Greybox-Modellen der Fall ist. Aus diesem Grund werden für den hier betrachteten Korrekturansatz Strukturmodelle verwendet.

21.5 Korrekturansatz

In Abb. 21.2 ist die thermo-elastische Wirkungskette [7] und die Einordnung der strukturmodellbasierten Korrektur an dieser Wirkungskette dargestellt [17]. Ausgangspunkt der thermo-elastischen Wirkungskette sind veränderliche Belastungen, die auf die Maschine wirken, wie z. B. durch Verfahrbewegungen oder Umgebungstemperaturschwankungen. Diese Belastungen führen zu sich verändernden Wärmequellen und -senken sowie zu Veränderungen der thermischen Leitwerte (z. B. Konvektion). Daraus resultieren Änderungen des Temperaturfeldes der Maschine. Mit dem Temperaturfeld ändert sich auch gleichzeitig das Verformungsfeld der Maschine, wodurch ein Fehler am Tool Center Point (TCP) entsteht. Das Strukturmodell ist eine modellseitige Abbildung der gesamten thermo-elastischen Wirkungskette.

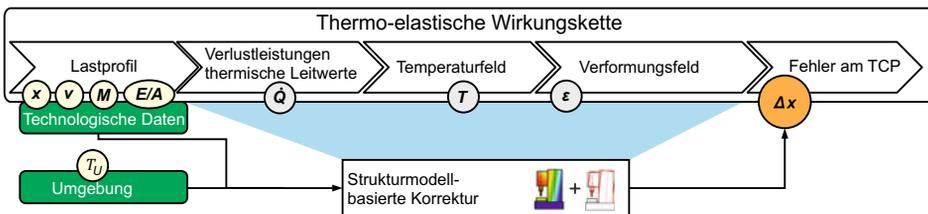


Abb. 21.2 Einordnung des Korrekturansatzes an der thermo-elastischen Wirkungskette, nach [17]

Die Eingangsgrößen des Modells können Achspositionen x , Achsgeschwindigkeiten v , Motordrehmomente bzw. -ströme M und Schaltzustände E/A von z. B. der Kühlung sein (vgl. Abb. 21.2). Durch diese Eingangsgrößen ist die thermische Belastung der Maschine gekennzeichnet. Zum Beispiel hängen die Verlustleistungen (Wärmequellen) durch Reibung sowie die thermischen Leitwerte über Wälzkörperkontakte und auch die Konvektion an den Außenflächen von den Achsgeschwindigkeiten ab. Die Verlustleistungen in Antrieben können in Abhängigkeit von Motorströmen bestimmt werden. Bei zueinander bewegten Baugruppen ist der Ort der Verlustleistungseinprägung und der thermische Leitwert zwischen den Baugruppen abhängig von den Achspositionen. Diese Eingangsgrößen werden im Folgenden als technologische Daten bezeichnet. Darüber hinaus ist die Umgebungstemperatur T_U eine Eingangsgröße des Modells. [18]

Ausgangsgröße des Strukturmodells ist die thermisch bedingte Verlagerung am TCP für verschiedene Stützpunkte im Arbeitsraum der Maschine. Mit Hilfe eines kinematischen Modells der Maschine werden aus diesen Stützpunkten die Korrekturwerte für alle Maschinenachsen (Δx in Abb. 21.2) berechnet. Für die positionsaktuelle Korrekturwertberechnung und -aufschaltung in der Steuerung werden diese Korrekturtabellen in Form von Fehlerparametern der Achsen, Stützpunktgitter im Arbeitsraum mit TCP-Verlagerungen oder Achskorrekturwerte übergeben. [19]

21.6 Art der Modelle

Strukturmodelle bilden die Struktur und die Strukturvariabilität durch Relativbewegungen von Komponenten zueinander ab. In Abb. 21.3 und 21.4 sind zwei mögliche Formen des Strukturmodells beispielhaft an einer Schlittenbaugruppe dargestellt. In Abb. 21.3 ist ein Knotenpunktmodell [3] zu sehen. In Knotenpunktmodellen wird die Struktur der Maschine durch ein Kapazitäts-Leitwert-Netzwerk abgebildet. In der Abbildung stehen

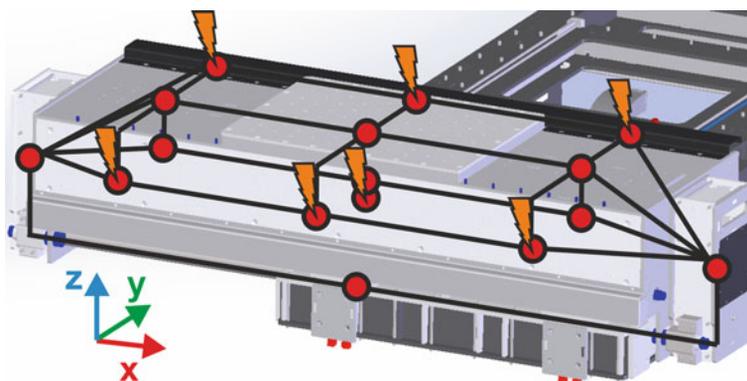


Abb. 21.3 Schlittenbaugruppe als Knotenpunktmodell, nach [20]

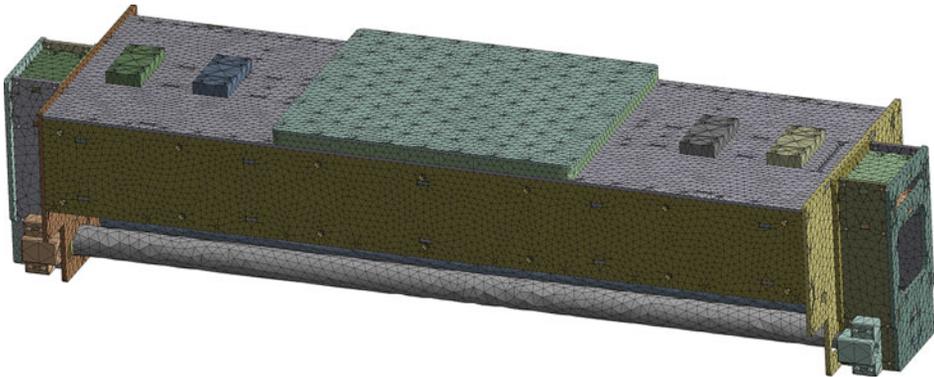


Abb. 21.4 Schlittenbaugruppe als fein vernetztes FE-Modell

die Kreise für Wärmekapazitäten und die Verbindungslinien für thermische Leitwerte. Die Wärmequellen sind in der Abbildung durch orangefarbene Blitze markiert. In diesem Beispiel sind die Wärmequellen die Reibung in den Profilschienenführungen und die Verlustleistung in einem Lineardirektantrieb.

In Abb. 21.4 ist die Schlittenbaugruppe mit einem feinen Finite-Elemente-Netz (FE-Netz) vernetzt. Für die Korrektur kann es notwendig sein, das Finite-Elemente-Modell (FE-Modell) in der Ausprägung eines entfeinerten oder ordnungsreduzierten Modells zu verwenden. Mit „Entfeinern“ ist das Entfernen von Details (z. B. Bohrungen) gemeint, die für das thermische Verhalten nicht relevant sind [21]. Nach der Entfeinerung kann das Modell gröber, d. h. mit weniger Elementen, vernetzt werden, um eine kürzere Berechnungszeit zu erzielen. Durch die Modellordnungsreduktion (MOR, [4] und [22]) kann der Rechenaufwand bis zum Faktor 1000 reduziert werden. Die Genauigkeitsverluste durch die Reduktion lagen in den Beispielen in [21] und [4] unterhalb von einem Prozent.

21.7 Anforderungen an die Steuerungsanbindung

In Abb. 21.5 sind die Teilfunktionen für die strukturmodellbasierte Korrektur sowie die Anforderungen an die steuerungsnahen Funktionen dargestellt. Die grundlegenden Funktionen sind die Lastdatenerfassung (technologische Daten und Umgebungstemperatur), die Teilmodelle und die Korrekturwertaufschaltung. Die Teilmodelle, bestehend aus Verlustleistungs- und Leitwertmodellen, thermischem Modell, thermo-elastischem Modell und kinematischem Modell, spiegeln die Elemente der thermo-elastischen Wirkungskette (vgl. Abb. 21.2) wider. Diese grundlegenden Funktionen müssten im Interpolationstakt der Steuerung ausgeführt werden. Insbesondere die großen thermischen und thermo-elastischen Modelle mit vielen Freiheitsgraden benötigen eine längere Berechnungszeit, als während eines IPO-Takts zur Verfügung steht. Aufgrund der langsamen Dynamik

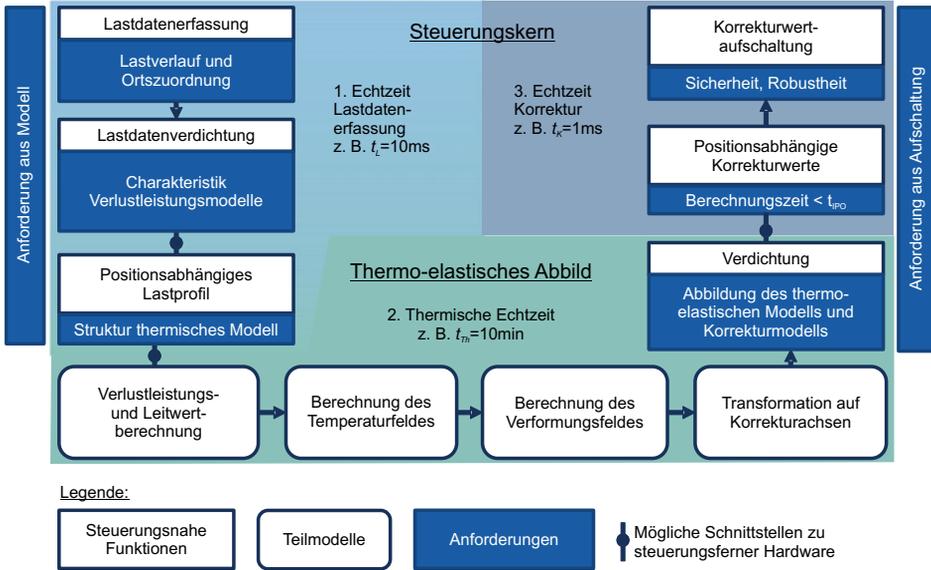


Abb. 21.5 Funktionen für strukturmodellbasierte Korrektur und Echtzeitanforderungen, nach [23]

von thermischen Systemen ist eine Berechnung im Steuerungstakt nicht notwendig. Aus diesem Grund werden die Funktionen drei verschiedenen Echtzeitbereichen mit eigenen Anforderungen zugeordnet.

Der erste Bereich (hellblau in Abb. 21.5) ist die Echtzeit für die Lastdatenerfassung. Dieser Bereich ist gekennzeichnet durch die notwendigen Abtastraten der Lastdaten. Die Abtastraten müssen hoch genug sein, um thermisch relevante Laständerungen zu erfassen. Hochdynamische Bewegungen können z. B. zu kurzen Anstiegszeiten in den Motorströmen führen. Aus diesem Grund können hier Abtastraten im Bereich von Millisekunden notwendig sein, um relevante Lastspitzen zu erfassen. Die Bestimmung der Abtastzeiten auf Basis der Achsgrenzwerte für Ruck, Beschleunigung und Geschwindigkeit ist in [18] beschrieben.

Der zweite Bereich (grün in Abb. 21.5) ist gekennzeichnet durch die thermische Echtzeit. Dieser Echtzeitbereich wird bestimmt durch die Lastschrittweite des transienten thermischen Modells. Für eine stabile Berechnung sollte die Lastschrittweite kleiner als die kleinste thermische Zeitkonstante des Modells sein. Die thermische Zeitkonstante ist proportional zur Wärmekapazität einer Komponente und indirekt proportional zu den Leitwerten, die diese Komponente mit der Umgebung oder anderen Komponenten verbindet [18]. Für Werkzeugmaschinen liegt die kleinste Zeitkonstante typischerweise im Bereich von mehreren Minuten bis Stunden.

Der letzte Bereich (dunkelblau in Abb. 21.5) wird bestimmt durch die positionsaktuelle Berechnung und Aufschaltung der Korrekturwerte. „Positionsaktuell“ bedeutet, dass

die Korrekturwerte abhängig von den Achspositionswerten sind. Idealerweise werden die Korrekturwerte im Interpolationstakt der Steuerung berechnet und auf die Achssollwerte aufgeschaltet.

Die oben beschriebenen grundlegenden Funktionen werden um Funktionen ergänzt, die den Übergang zwischen den Echtzeitbereichen ermöglichen. Der Übergang zwischen den ersten beiden Echtzeitbereichen wird durch das Verdichten der hochaufgelösten Lastdaten zu einer äquivalenten Last für den Lastschritt des Modells erreicht. Dies geschieht in den Funktionen „Lastdatenverdichtung“ und „positionsabhängiges Lastprofil“ (siehe Abb. 21.5). In der „Lastdatenverdichtung“ werden die Lastgrößen aus den Ergebnissen der Berechnung empirischer Verlustleistungs- und Leitwertmodelle gewonnen. Die Verlustleistung im Motor kann z. B. eine Polynomfunktion zweiter Ordnung vom Motorstrom sein und die Verlustleistung durch Reibung in einem Kugelgewindetrieb linear von der Geschwindigkeit abhängen. Aus diesem Grund wird man für den Motorstrom ein quadratisches Mittel und für die Geschwindigkeit den arithmetischen Mittelwert verwendet. In der Funktion „positionsabhängiges Lastprofil“ werden die verdichteten Lastdaten zu Segmenten im thermischen Modell von zueinander bewegten Baugruppen (z. B. an Profilschienen) zugeordnet. Die Zuordnung erfolgt in Abhängigkeit des Überdeckungsverhältnisses der Segmente. Die Werte werden für den jeweiligen Lastschritt gemittelt und so das positionsabhängige Lastprofil gebildet. Damit ist dieser Verarbeitungsschritt der Eingangsdaten von der Struktur des thermischen Modells abhängig. Die Verarbeitung der Eingangsdaten reduziert auch das Datenvolumen, das von der Steuerung über eine Schnittstelle zum Modell übertragen werden muss. [23]

Für den Übergang von der thermischen Echtzeit zur Echtzeit für die Korrekturwertaufschaltung wird der thermo-elastische Zustand der Maschine in Form von Korrekturtabellen abgebildet. Diese Tabellen können die Fehlerparameter der Achsen, den Fehler am TCP oder direkt die Achskorrekturwerte für bestimmte Punkte im Arbeitsraum enthalten. Die Tabellen werden in thermischer Echtzeit aktualisiert und der Steuerung übergeben. Auf Basis dieser Tabellen werden in der Steuerung dann in Abhängigkeit von den aktuellen Achspositionen die Korrekturwerte, je nach gewählter Variante, durch Interpolation und mit Hilfe eines kinematischen Modells der Maschine im Interpolationstakt berechnet und aufgeschaltet. [19]

21.8 Umsetzung am Beispiel eines Hexapoden

Der Korrekturansatz wird am Beispiel des in Abb. 21.6 dargestellten Hexapoden demonstriert. Er besteht aus sechs kugelgewindegetriebenen Stabachsen. Die Achsen sind über Kardangelenke mit der Basis und der bewegten Plattform verbunden. Die Gewindespindeln werden über Zahnriemen durch Servomotoren angetrieben.

Da an dieser Maschine keine direkten Wegmesssysteme zum Einsatz kommen, sind die thermisch bedingten Fehler groß. Die Gelenke weisen einen geringen Querschnitt

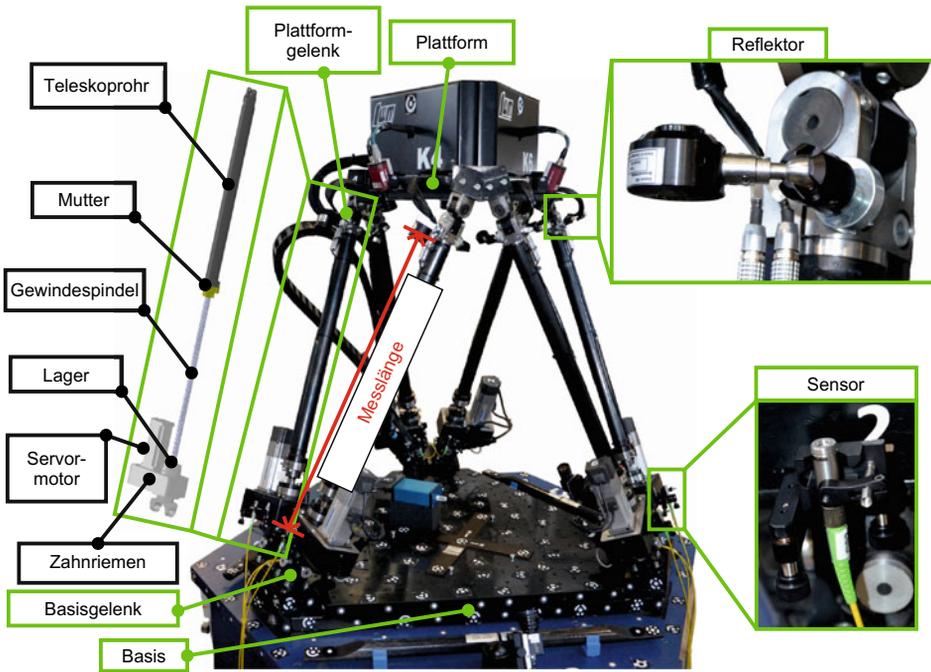


Abb. 21.6 Hexapod Felix IV mit Messaufbau, nach [24]

und damit einen großen thermischen Widerstand auf. Deshalb können die Stabachsen als thermisch entkoppelt von der Basis und der Plattform betrachtet werden. Gleichzeitig bestimmen die Stabachsen die thermisch bedingte Verlagerung der Plattform in entscheidendem Maße. Aus diesem Grunde werden nur die Stabachsen durch ein Strukturmodell abgebildet. Es wird ein FE-Modell mit reduzierter Modellordnung für die Berechnung des Temperaturfeldes verwendet. Für die Ermittlung des thermisch bedingten Fehlers wird angenommen, dass sich die Stabachsen frei in Längsrichtung dehnen können. Der Fehler wird für äquidistant über der Achslänge verteilte Stützpunkte berechnet.

Als Steuerung für den Demonstrator wird eine Beckhoff TwinCAT 3.1 verwendet. In Abb. 21.7 ist die Implementierung der strukturmodellbasierten Korrektur am Hexapod skizziert.

Die technologischen Eingangsdaten des Modells werden in einem SPS-Programm im Takt von 10 ms erfasst. Die Daten werden über die ADS-Schnittstelle (Automation Device Specification) von TwinCAT von einem C++-Programm auf einem externen PC ausgelesen und zu Lastschritten gruppiert. Die Weitergabe der Daten zum Modell in Matlab erfolgt über einen geteilten Speicherbereich (Shared Memory). Ein geteilter Speicherbereich wird ebenfalls genutzt, um das berechnete Temperaturfeld (Takt 10 s) an das

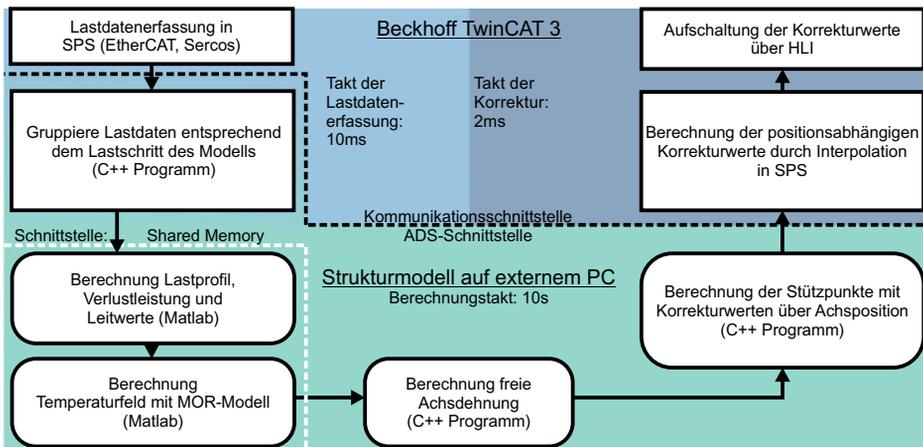


Abb. 21.7 Implementierung der Korrektur für Hexapod, nach [6]

C++-Programm für die Berechnung der Achsdehnung weiterzugeben. Der Berechnungstakt von 10 s ist in der vorgestellten Implementierung deutlich geringer als die geforderte thermische Echtzeit. Die Rechenlast ist durch die Modellordnungsreduktion dennoch gering. Mithilfe des Temperaturfeldes werden die freien thermischen Dehnungen und die Stützpunkte mit Korrekturwerten über der Achsposition berechnet. Diese werden über die ADS-Schnittstelle in die Steuerung geschrieben. Dort werden innerhalb eines SPS-Programmes in Abhängigkeit von den aktuellen Achspositionen die Korrekturwerte durch Interpolation im 2-ms-Takt bestimmt. Je nach Höhe der Korrekturwertänderung wird der Korrekturwert durch ein 7-Segmentbewegungsprofil herausgefahren, um die Achsgrenzwerte für Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck einzuhalten. Die so ermittelten Korrekturwerte werden in der Steuerung über das so genannte High Level Interface (HLI) auf die Achssollwerte aufgeschaltet [24].

Um einen Vergleich zwischen simulierten und realen Temperaturen zu ermöglichen, wurden Pt100-Widerstandstemperatursensoren auf den Lagern, den Muttern und den Teleskoprohren der Kugelgewindetriebe appliziert. Diese Sensoren dienen ausschließlich dem Vergleich mit den Modellergebnissen und werden bei der Berechnung nicht berücksichtigt. In die Berechnung geht nur das Signal eines Umgebungstemperatursensors ein, der in der Mitte der Basis befestigt ist. Die thermisch bedingten Fehler der Achsen wurden mit Hilfe von Laserinterferometern gemessen (Etalon Absolute Multiline Technologie). Der am Hexapod genutzte Versuchsaufbau ist in Abb. 21.6 dargestellt.

Für die Validierung wurde ein Lastfall gewählt, der mehrere, stark unterschiedliche Belastungsabschnitte enthält. Abb. 21.8 zeigt den Vergleich gemessener und simulierter Temperaturen eines Kugelgewindetriebs. Vier Belastungsabschnitte (durch vertikale graue Linien markiert) wurden zu einem Zyklus zusammengefasst, der knapp eine Stunde

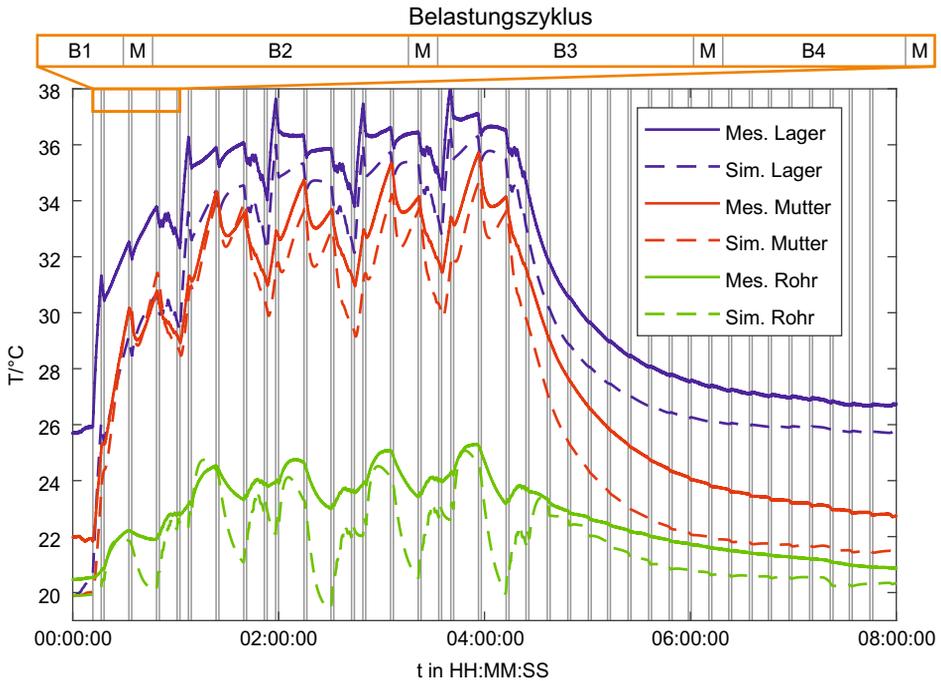


Abb. 21.8 Vergleich gemessener und simulierter Temperaturen am Lager, an der Mutter und am Teleskoprohr eines Kugelgewindetriebes

dauert. Zwischen den Belastungsabschnitten wird der thermisch bedingte Fehler gemessen (M). Im ersten Belastungsabschnitt (B1) wird eine unsymmetrische Belastung auf die Kugelgewindetriebe aufgebracht, indem nur über zwei Drittel der Achslänge verfahren wird und mehr Bewegungen im oberen Segment dieses Bereiches stattfinden. Im zweiten Belastungsabschnitt (B2) werden nur kurz Bewegungen bei eingefahrener Achse und im dritten Belastungsabschnitt (B3) nur kurze Bewegungen bei ausgefahrener Achse durchgeführt. Dadurch herrschen sehr unterschiedliche konvektive Randbedingungen an der Gewindespindel während dieser beiden zuletzt genannten Belastungsabschnitte. Darüber hinaus führen die kurzen Bewegungen zu einem ständigen Beschleunigen und Abbremsen der Achsen, wodurch eine erhöhte Verlustleistung in den Motoren entsteht. Im vierten Belastungsabschnitt (B4) werden Bewegungen mit zufälliger Geschwindigkeit zwischen zufälligen Achspositionen ausgeführt. Nach knapp fünf Stunden Belastung erfolgt eine Abkühlung im Stillstand, die nur durch die Messung der thermisch bedingten Fehler unterbrochen wird. [24]

Die im Zuge des beschriebenen Versuches simulierten Temperaturen werden mit den Messwerten verglichen (siehe Abb. 21.8). Das Simulationsmodell bildet den qualitativen und quantitativen Verlauf an Lager und Mutter des Kugelgewindetriebes gut ab. Größere

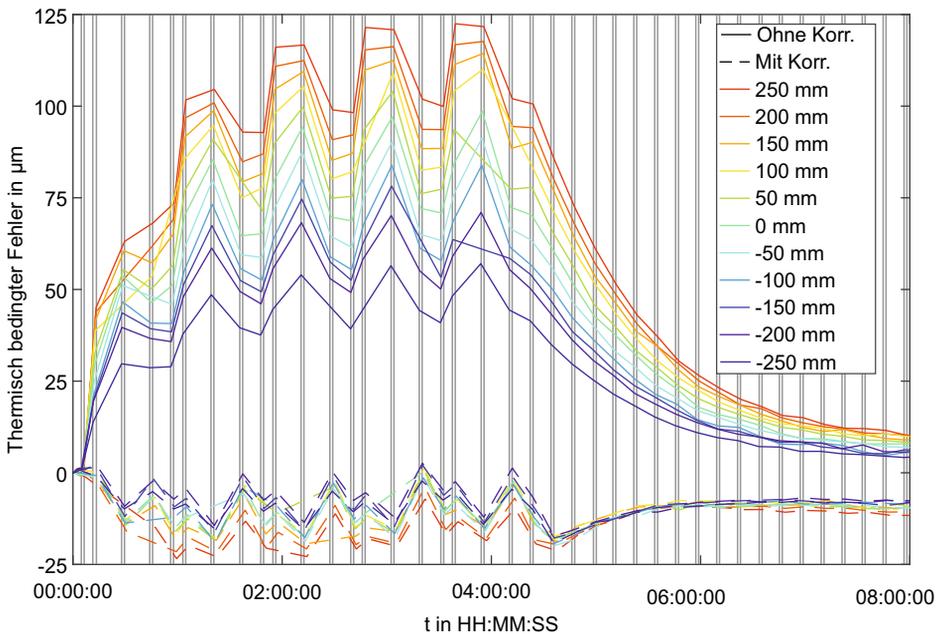


Abb. 21.9 thermisch bedingter Fehler einer Achse mit und ohne aktivierte Korrektur

Abweichungen treten zwischen simulierten und gemessenen Werten am Teleskoprohr auf. Das ist auf die schwierig abzubildenden konvektiven Randbedingungen zurückzuführen. Die anderen fünf Achsen verhalten sich ähnlich zu der betrachteten Achse.

In Abb. 21.9 (Belastungsabschnitte sind analog zu Abb. 21.8 markiert) sind die gemessenen thermisch bedingten Fehler ohne (durchgezogene Linie) und mit aktivierter Korrektur (gestrichelter Linie) dargestellt. Hierfür wurde der Fehler an den Achspositionen -250 mm (Achse eingefahren, dunkelblau in Abb.) bis 250 mm (Achse ausgefahren, rot in Abb.) in 50 mm Schritten gemessen. In der Abbildung ist zu erkennen, dass der maximale Fehler durch die Korrektur von ca. $122 \mu\text{m}$ auf ca. $24 \mu\text{m}$ reduziert werden konnte. Die Verbesserung durch die Korrektur liegt für die anderen Achsen mit 80% bis 87% in einer ähnlichen Größenordnung [24].

21.9 Zusammenfassung

Der Digitale Zwilling kann in den Phasen des Produktlebenszyklus der Werkzeugmaschine zur Lösung von thermischen Problemstellungen genutzt werden. Je nach Anwendung sind hierfür unterschiedliche Modellausprägungen notwendig. Thermisch bedingte Fehler an Werkzeugmaschinen können mithilfe von physikalisch basierten

Strukturmodellen korrigiert und so die Genauigkeit der Maschine erhöht werden. Die Strukturmodelle bilden die Elemente der thermo-elastischen Wirkungskette ab. Um eine effiziente Berechnung in thermischer Echtzeit zu ermöglichen, können Knotenpunktmodelle und ordnungsreduzierte FE-Modelle genutzt werden. Die Teilfunktionen der strukturmodellbasierten Korrektur lassen sich drei Echtzeitbereichen zuordnen, aus denen sich die Anforderungen an die Teilfunktionen ergeben. An einem Hexapoden wird die strukturmodellbasierte Korrektur demonstriert. Der thermisch bedingte Fehler der kugelgewindegetriebenen Stabachsen wird zwischen 80 % und 87 % reduziert.

Literatur

1. Liu M, Fang S, Dong H, Xu C (2020) Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *J Manuf Syst* S0278612520301072. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>
2. Ihlenfeldt S, Penter L, Wiemer H, Thiem X (2020) Die neue Rolle der virtuellen Werkzeugmaschine. *konstruktionspraxis*
3. Jungnickel G (2010) Simulation des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen. Modellierung und Parametrierung. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen, Dresden
4. Galant A, Beitelschmidt M, Kauschinger B (2017) FE-basierte, thermo-elastische online-Simulation einer gesamten Werkzeugmaschine: Strategien, Konzepte und Workflow. In: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen – Modellierung und Simulation -. Chemnitz
5. Kauschinger B, Schroeder S (2017) Unsicherheiten bei der Beschreibung der reibungsbedingten Verlustleistungen von Lagern an Werkzeugmaschinen. In: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen – Modellierung und Simulation – Tagungsband – 5. Kolloquium zum SFB/TR 96 -. Chemnitz
6. Thiem X, Riedel M, Kauschinger B, Müller J (2016) Principle and verification of a structure model based correction approach. *procedia CIRP* 46:111–114. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.169>
7. Großmann K (2012) Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 307–314
8. Mayr J, Jedrzejewski J, Uhlmann E, Alkan Donmez M, Knapp W, Härtig F, Wendt K, Moriwaki T, Shore P, Schmitt R, Brecher C, Würz T, Wegener K (2012) Thermal issues in machine tools. *CIRP Annals – Manufactur Technol* 61:771–791 . <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.008>
9. Putz M, Richter C, Regel J, Bräunig M (2018) Industrial relevance and causes of thermal issues in machine tools. In: Conference on Thermal Issues in Machine Tools Proceedings 2018. Wissenschaftliche Scripten, Auerbach/Vogtl, S 127–139
10. Abele E, Kuhrke B, Rothenbücher S (2011) Energieeffizienz spanender Werkzeugmaschinen. *forschen Wissenschaftsmagazin der TU Darmstadt* 64–67
11. Wegener K, Weikert S, Mayr J (2016) Age of compensation – Challenge and chance for machine tool industry. *IJAT* 10:609–623
12. Naumann C, Putz M (2019) A new multigrid based method for characteristic diagram based correction of thermo-elastic deformations in machine tools. *J Mach Eng* 19:4. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.6229>

13. Huang Z, Liu Y, Du L, Yang H (2020) Thermal error analysis, modeling and compensation of five-axis machine tools. *J Mech Sci Technol*. <https://doi.org/10.1007/s12206-020-0920-y>
14. Mareš M, Horejš O, Havlík L (2020) Thermal error compensation of a 5-axis machine tool using indigenous temperature sensors and CNC integrated Python code validated with a machined test piece. *Precis Eng* 66:21–30. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.06.010>
15. Ess M (2012) Simulation and compensation of thermal errors of machine tools. ETH Zurich
16. Jedrzejewski J, Kwasny W (2020) Intelligent machine tool design approach and limitations. In: Прогресивні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць IX-ої Міжнародної науково-технічної конференції. S 24–27
17. Ihlenfeldt S, Thiem X, Naumann C, Riedel M, Kauschinger B (2016) Experimenteller Vergleich kennfeld- und strukturmodellbasierter Korrektur. In: Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen : begleitender Tagungsband 4. Kolloquium zum SFB/TR 96. Dresden: Verlag Wissenschaftliche Scripten, Aachen, S 111–129
18. Großmann K, Mühl A, Thiem X (2014) Korrektur thermisch bedingter Fehler an Werkzeugmaschinen. *Module eines strukturmodellbasierten Korrekturansatzes*. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 109:318–323
19. Thiem X, Kauschinger B, Müller J, Ihlenfeldt S (2020) Estimation of the influence of volumetric correction approaches on the thermo-elastic correction accuracy. In: *Produktion im Grenzbe- reich – Durch Innovation den Wandel gestalten*. Springer
20. Thiem X, Kauschinger B, Ihlenfeldt S (2018) Structure model based correction of machine tools. In: *Conference on Thermal Issues in machine Tools*. Dresden
21. Großmann K, Städel C, Galant A, Mühl A (2012) Vergleichende Untersuchung alternativer Methoden zur Erzeugung kompakter Modelle – Berechnung von Temperaturfeldern an Werkzeugmaschinen. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 107:452–456
22. Lang N, Benner P, Naumann A, Wensch J (2017) Simulation gekoppelter Baugruppen: Effiziente Zeitintegrationsverfahren und Modellordnungsreduktion. In: *Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen – Modellierung und Simulation*. Chemnitz, S 17–32
23. Thiem X, Kauschinger B, Mühl A, Großmann K (2015) Challenges in the development of a generalized approach for the structure model based correction. *Appl Mech Mater* 387–394. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.794.387>
24. Thiem X, Kauschinger B, Ihlenfeldt S (2019) Online correction of thermal errors based on a structure model. *Int J Mechatronics and Manufactur Syst* 12:49. <https://doi.org/10.1504/IJMMS.2019.097852>

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Räumliche Kraftmessung und -regelung mit strukturintegrierter Sensorik in Hexapoden

22

Christian Friedrich, Jens Müller und Steffen Ihlenfeldt

Zusammenfassung

Strukturintegrierte Kraftsensorik besitzt zahlreiche Vorteile gegenüber klassischen Ansätzen zur Kraftmessung. Gleichzeitig wirken jedoch prozess- und strukturbedingte Einflüsse auf die Kraftsensoren, die in Abhängigkeit der Sensorposition durch ein Messmodell kompensiert werden müssen. Für dynamische Messungen während der Maschinenbewegung müssen diese Messmodelle zwingend in Echtzeit im Steuerungskern laufen und weiterhin durch ein Verfahren zur Parameteridentifikation schnell und einfach an der betriebsbereiten Maschine aktualisiert werden können. Ausgehend von einer systematischen Einordnung möglicher Messsystemvarianten werden die notwendigen Messmodelle und Varianten ihrer Steuerungsintegration vorgestellt. Den Abschluss bildet die Verwendung der integrierten Sensorik für die Kraftregelung und ihre steuerungstechnische Umsetzung in einer kommerziellen Werkzeugmaschinensteuerung.

22.1 Einleitung

Die zwischen Werkzeug und Werkstück wirkende Prozesskraft ist eine der wesentlichen Größen in der Produktionstechnik, deren Messung bzw. Regelung einen Beitrag zur Steigerung von Qualität und Produktivität, Senkung der Kosten oder gar zur Realisierung völlig neuer Prozesse leisten kann [1–3]. Dabei wächst insbesondere der Bedarf

C. Friedrich · J. Müller · S. Ihlenfeldt (✉)

Professur für Werkzeugmaschinenentwicklung und adaptive Steuerungen, Technische Universität Dresden, Dresden, Deutschland

E-Mail: Steffen.Ihlenfeldt@TU-Dresden.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Verl, S. Röck und C. Scheifele (Hrsg.),

Echtzeitsimulation in der Produktionsautomatisierung,

https://doi.org/10.1007/978-3-662-66217-5_22

389

an räumlicher Messung in bis zu sechs Freiheitsgraden (FG). Mit der Verwendung autarker 6D-Kraftmessplattformen (KMP) am Endeffektor sind häufig eine Verkleinerung des Arbeitsraums, Einschränkungen bezüglich der Werkzeug- bzw. Werkstückbefestigung am Endeffektor (z. B. von Frässpindeln), Einschränkungen bei der Robustheit der Fertigungseinrichtung (z. B. bzgl. aggressiver Kühlschmierstoffe oder Späne) und nicht zuletzt hohe Investitionskosten verbunden. Die alternativ häufig eingesetzte Kraftschätzung aus Motorströmen eignet sich aufgrund schwer modellier- und parametrierbarer nichtlinearer oder stochastischer Störeinflüsse im Antriebsstrang meist nur für Anwendungsfälle mit niedrigen Genauigkeitsanforderungen. Ähnliches gilt, wenn auch in geringerem Umfang, für die Drehmomentmessung in den Gelenken bei seriellen Kinematiken, die ferner nicht ohne Weiteres auf die hier betrachteten Parallelkinematiken übertragbar ist. Dennoch besteht erhebliches Potenzial in der Integration einachsiger Kraftsensoren in die Maschinenstruktur und der steuerungintegrierten Verarbeitung der Messsignale zu Kräften und Momenten an der Wirkstelle. Dies gilt insbesondere für parallele Stabstrukturen – und für die 6D-Messung an Hexapodstrukturen und Hexapoden – bei denen eine nahezu reibungsfreie Messung mittels einachsiger Kraftsensoren möglich wird. Die 6D-Kraftmessung mit Hexapoden tritt jedoch bisher nur als reine Messeinrichtungen in Form von starren, unbewegten Hexapodstrukturen mit rein statischer Kalibrierung in Erscheinung [4–10]. Eine Integration in eine Maschinenstruktur erfolgt ebenso wenig wie die Bewegung der Messhexapoden selbst. Somit bleiben die zugehörigen Messmodelle trivial, da sie keine Verrechnung von Pose oder Dynamik mit den Kraftsensordaten erfordern.

Mit der Strukturintegration der Kraftsensorik in die bewegte Maschine ist die echtzeitfähige Berechnung der Messmodelle zur Korrektur interner Einflüsse hingegen zwingend erforderlich. In Abhängigkeit des konkreten Anwendungsfalls folgen daraus Echtzeitanforderungen an die Modellrechnung und weitere Anforderungen an die Steuerung, bspw. eine synchrone Datenerfassung von Antriebs- und Kraftsensordaten. Bis vor nicht allzu langer Zeit waren für neue mess-, steuerungs- und regelungstechnische Lösungen spezielle Echtzeitsysteme für die Forschung und proprietäre Linux-basierte Steuerungen, wie DSpace, NI Labview, Xenomai oder VxWorks, Mittel der Wahl. Mit der rasanten Entwicklung der Steuerungstechnik im Rahmen der aktuellen Trends Industrie 4.0, Cyberphysische Produktionssysteme (CPPS) oder Industrial Internet of Things (IIOT) haben sich die Möglichkeiten der industriellen Steuerungstechnik in Bezug auf unterstützte Schnittstellen, Offenheit für Nutzeranwendungen, Messdatenerfassung und Rechenleistung jedoch signifikant verbessert, was sich in Produkten, wie bspw. Bosch Open Core Engineering und ctrlX oder Beckhoff TwinCAT 3.1 eXtended Automation Engineering, niederschlägt. Aus diesem Grund ist die Integration und Verarbeitung umfangreicher anwendungsspezifischer Messmodelle in Echtzeit und synchron zur Maschinenbewegung nun bereits für einige kommerzielle Werkzeugmaschinensteuerungen grundsätzlich möglich, auch wenn teils noch erheblicher Forschungsbedarf besteht.

Dieser Beitrag greift diese Fragen auf und befasst sich mit der Umsetzung der strukturintegrierten Kraftmessung am Hexapod-Versuchsträger Felix I mit besonderem Blick

auf die Integration der dazu notwendigen Messmodelle in die Maschinensteuerung. Im ersten Schritt werden, aufbauend auf einer systematischen Einordnung der Möglichkeiten zur Sensorintegration, die wesentlichen Grundlagen zu den Messmodellen für verschiedene Messsystemvarianten abgeleitet. Anschließend werden Steuerungsanforderungen in Abhängigkeit der Anwendungsfälle definiert und Lösungen zur Steuerungsintegration für Kraftmessung und -regelung vorgestellt.

Für weitere Ergebnisse zum Lösungsansatz der strukturintegrierten Kraftmessung [11], insbesondere zur erreichbaren Messgenauigkeit mit einem Hexapod-Endeffektor [12], zur Evaluierung der Steifigkeitsänderung durch Sensorintegration [13, 21] sowie zur Parameteridentifikation durch optimale Messposen bzw. Messtrajektorien [14] und zur Kraftregelung [22], soll auf die Literatur verwiesen werden.

22.2 Systematik und Umsetzung am Versuchsträger

Zwischen den bekannten Lösungen einer Kraftmessplattform am Endeffektor (R) und der Kraftschätzung aus den Motorströmen (M) lassen sich die Messsystemvarianten zur strukturintegrierten Kraftmessung mittels Längskraftmessung in Hexapodstrukturen systematisch einordnen (Abb. 22.1).

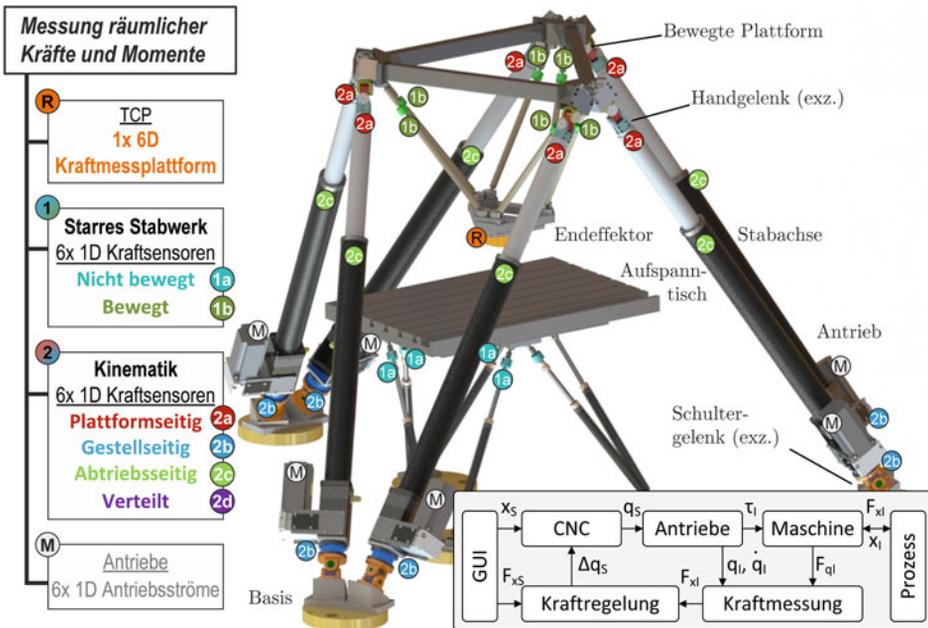


Abb. 22.1 Systematik zur Sensorintegration in Hexapodstrukturen und Hexapoden [11–14, 20]

Als Leichtbaustrukturen finden starre Stabtragwerke seit jeher konstruktive Anwendung, so auch als Aufspanntisch oder als Endeffektor in Maschinen. Durch die Ermöglichung räumlicher Kraftmessung in sechs FG sind sie in der Ausführung als Hexapodstruktur besonders gut für die Sensorintegration geeignet und können als 1a: *unbewegte* (z. B. Aufspanntisch, Spindelhalterung) oder 1b: *bewegte starre* Strukturen (z. B. Endeffektor) eingesetzt werden. Für in die *Kinematik* integrierte Sensoren ergeben sich ebenfalls verschiedene Möglichkeiten: Kraftsensoren sind in den Stabachsen 2a: *plattformseitig*, 2b: *gestellseitig*, 2c: *abtriebsseitig* oder 2d: *verteilt integrierbar*. Schließlich ordnen sich auch die Lösungen aus dem Stand der Technik in diese Systematik ein: Starre Stabwerke, die als eigenständige Sensoren auftreten [4–10], zählen zu Variante 1a. Als existierende Hexapoden mit integrierten Sensoren zählen eine Taumelpresse [15] zu Variante 2a und der Hexapod-Radlader [16, 17] zu Variante 2c. Keine dieser Arbeiten nutzt die Sensoren jedoch für eine Kraft-/Momentenmessung am TCP; vielmehr werden sie für die Antriebsregelung eingesetzt.

Am Versuchsträger Hexapod Felix I sind mit dem Aufspanntisch (1a), der Endeffektorplattform (1b) und der Sensorintegration gestellseitig in den Stabachsen (2b) drei strukturintegrierte Messsystemvarianten zugleich mit den Standardvarianten der Kraftmessplattform (R) und Messung der Motorströme (M) realisiert (Abb. 22.2). Dies ist für Untersuchungen und Vergleich der Möglichkeiten einer Steuerungsintegration verschieden komplexer Messmodelle besonders vorteilhaft.



Abb. 22.2 Umgesetzte Lösungen zur strukturintegrierten Kraftmessung am Versuchsträger Felix I mit 1a: Aufspanntisch (je 5 kN), 1b: Endeffektor (je 5 kN), 2b: Stabachsen mit gestellseitig integrierten Sensoren (je 10 kN) sowie (nicht dargestellt) R: Kraftmessplattform und M: Messung der Motorströme [20]

In jeder Phase des Produktlebenszyklus müssen Fragestellungen aus verschiedenen Sichtweisen und für unterschiedliche Verhaltensbereiche beantwortet werden. Zu diesem Zweck bildet der Digitale Zwilling einer Maschine die Maschine selbst und die auf ihr laufenden Prozesse für die aufgabenbezogene, relevante und hinreichend abstrahierte Beschreibung, Nachbildung, Analyse und Beeinflussung ihrer Bestandteile, Funktionen und Eigenschaften ab.

Während der *Entwurfsphase* besteht insbesondere für starre Strukturen, wie bspw. Aufspanntische oder Endeffektoren, in Grenzen aber auch für Kinematiken die Möglichkeit zur gezielten Beeinflussung charakteristischer Eigenschaften. So sind bspw. die Raumrichtungen mit hoher Empfindlichkeit bzw. hoher Steifigkeit gezielt einstellbar oder es kann isotropes Verhalten für Kräfte und Momente realisiert werden. Da diese Eigenschaften wesentlich durch die Sensoranordnung und damit durch die Geometrie der Stabstruktur bestimmt sind, ist für die Entwurfsphase ein nicht-echtzeitfähiges geometrisches Modell in Form der geometrischen Jacobimatrix ausreichend. Auf dieser Basis kann eine Optimierung der sich gegensätzlich verhaltenden Zielkriterien maximale Struktursteifigkeit und maximale Sensorempfindlichkeit unter Berücksichtigung der konstruktiven Randbedingungen, wie dem verfügbaren Einbauraum, erfolgen [7]. Da lediglich die Anordnung der Sensoren berücksichtigt wird, bleibt das Gesamtsystem hinsichtlich Größe und Messbereich skalierbar.

In der *Gestaltungsphase* werden mit konkreten Maschinenabmessungen und Sensordaten Aussagen über wichtige technische Kennzahlen, wie Messbereich, Überlastbereich, Auflösung oder Steifigkeit, in den kartesischen Raumrichtungen möglich. Modellabgleich und Echtzeitfähigkeit sind hier noch nicht gefordert; mit einem kinetischen Modell können aber bereits Komponentenmassen und -trägheiten berücksichtigt werden. An dieser Stelle kann die Gestaltung durch FE-Modelle zur besseren Einschätzung von Nachgiebigkeiten oder Mehrkörpersimulations-Modelle zur Beurteilung der Dynamik ergänzt werden.

Für die Realisierung praxisrelevanter Anwendungen sind in der *Inbetriebnahme- und Betriebsphase* für den hier betrachteten Anwendungsfall schließlich zwingend echtzeitfähige, steuerungsintegrierte Modelle einzusetzen. Diese umfassen die kinematischen, differenziell kinematischen und kinetischen Transformationen der Maschine sowie darauf aufbauend die Messmodelle mit der Sensoranordnung sowie Sensor- und Korrekturparametern. Unter Echtzeitfähigkeit wird in diesem Zusammenhang die Berechnung im Lagereglertakt von bspw. 1 ms verstanden. Für die Entwicklung der strukturintegrierten Kraftmessung wird der Newton-Euler Formalismus eingesetzt, da bei diesem Verfahren direkt Schnittkräfte und -momente an allen für die Sensorintegration in Frage kommenden Positionen vorliegen. Weil für Parallelkinematiken aufgrund der Schließbedingung keine rekursive Lösung möglich ist, ergibt sich ein Gleichungssystem mit 180 Gleichungen, welches im Steuerungstakt durch einen Gauss-Algorithmus gelöst wird [5, 8]. Schließlich können sich einige Parameter des Modells, wie Massen und Trägheitsmomente, während des Betriebs ändern, z. B. durch Werkzeug- oder Werkstückwechsel, und einen erneuten Parameterabgleich erfordern. Für diesen Zweck besteht die Möglichkeit zur einfachen

und schnellen Parameteridentifikation an der betriebsbereiten Maschine auf Basis optimaler quasi-statischer oder dynamischer Anregungstrajektorien [9]. Voraussetzung dafür ist die Umstellung des Messmodells in eine Form, bei der die Parameter für die Identifikation zugänglich sind.

22.3 Messmodelle

Während für die Transformation der gemessenen Sensorkräfte in kartesische Kräfte und Momente an der Wirkstelle für reine Messhexapoden der Variante 1a eine statische Kalibriermatrix genügt, erfordern die übrigen Messsystemvarianten aufwändigere Messmodelle. Abhängig von der konkreten Sensorplatzierung sind dabei struktur- und prozessbedingte Einflüsse zu berücksichtigen, die eine Modellierung der *Sensoranordnung*, der *Starrkörperdynamik* und *weiterer Einflüsse* umfassen. Gemäß der Systematik ergeben sich als Parameter und Zustandsgrößen zunächst

- für alle Varianten: die (für starre Stabwerke konstante) Jacobimatrix zur Abbildung der Sensorpositionen und -orientierungen (36 Parameter) sowie die Nullpunktoffsets der Sensoren (6 Parameter),
- für bewegte starre Stabwerke (Variante 1b): zusätzlich Masse, Schwerpunktlage und Trägheitsmoment der als Starrkörper modellierten freien Seite des Stabwerks (10 Parameter) sowie in Echtzeit die dazu notwendigen Zustandsgrößen Pose, Geschwindigkeit und Beschleunigung des Stabwerks (18 Zustandsgrößen),
- für Hexapodkinematiken (Varianten 2a-d): zusätzlich Massen, Schwerpunktlagen und Trägheitsmomente aller weiteren 24 bewegten Körper (240 Parameter) sowie deren Posen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen in Echtzeit (450 Zustandsgrößen) sowie schließlich
- bei Verwendung der Motorströme (Variante M): zusätzliche Reibparameter der Antriebsstränge sowie elektrische und dynamische Kenngrößen der Motoren.

Hinzu kommen weitere Einflüsse, wie bspw. Querkräfte und -momente auf die Sensoren, elastische oder thermische Effekte. Insbesondere für die Sensorintegration in Maschinenkinematiken kommen so oft mehrere Hundert teils aufwändige und in Echtzeit zu lösende Gleichungen zusammen, die auf der Steuerung implementiert werden müssen.

Nicht bewegte starre Stabwerke (1a)

Das Messmodell zur Transformation der gemessenen Sensorkräfte f_q in kartesische Kräfte und Momente an der Wirkstelle f_{Ext} besteht für nicht bewegte starre Stabwerke

zunächst lediglich aus der geometrischen Transformation der Kräfte in Form der geometrischen Jacobimatrix des Stabwerks J_S und der Einführung von sechs Nullpunktoffsets f_{q0} für eine einfache Tarierung:

$${}^A f_{Ext} = {}^A X_S^F J_S^{-T} (f_q - f_{q0}) = {}^A X_S^F \begin{pmatrix} n_1 & \cdots & n_6 \\ h_1 \times n_1 & \cdots & h_6 \times n_6 \end{pmatrix} (f_q - f_{q0}). \quad (22.1)$$

Für die Definition der Jacobimatrix sind dabei n_i die Richtungsvektoren der Kraftsensoren und h_i ihre Verbindung zum Koordinatenursprung. Beide Größen lassen sich direkt aus den Konstruktionsdaten gewinnen, mit den gestellseitigen bzw. plattformseitigen Anlenkpunkten $\{S_i\}$ und $\{H_i\}$, Abb. 22.3. Die Überführung der Kräfte f und Momente m vom Koordinatensystem des Stabwerks $\{S\}$ in das Aufgabenkoordinatensystem $\{A\}$ gelingt schließlich mit Hilfe der räumlichen Krafttransformation ${}^A X_S^F$ über die Transformationsmatrix ${}^A R_S$ und den Ortsvektor ${}^A o_S$ wie folgt

$${}^A f = {}^A X_S^F {}^S f = \begin{pmatrix} {}^A f \\ {}^A m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^A R_S & 0 \\ S({}^A o_S) {}^A R_S & {}^A R_S \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} {}^S f \\ {}^S m \end{pmatrix}. \quad (22.2)$$

Sämtliche nicht modellierten Einflüsse, bspw. Gravitationskräfte aufgrund der Eigenmasse, werden für diese Stabwerke durch die Parameter f_{q0} abgebildet. Im Falle einer Lage- oder Eigenschaftsveränderung ist lediglich ein Tarieren erforderlich.

Bewegte Starre Stabwerke (1b)

Bei bewegten starren Stabwerken wirken externe Einflüsse, wie Gravitation und Dynamik, auf die Kraftsensoren, welche entsprechend im Messmodell berücksichtigt werden

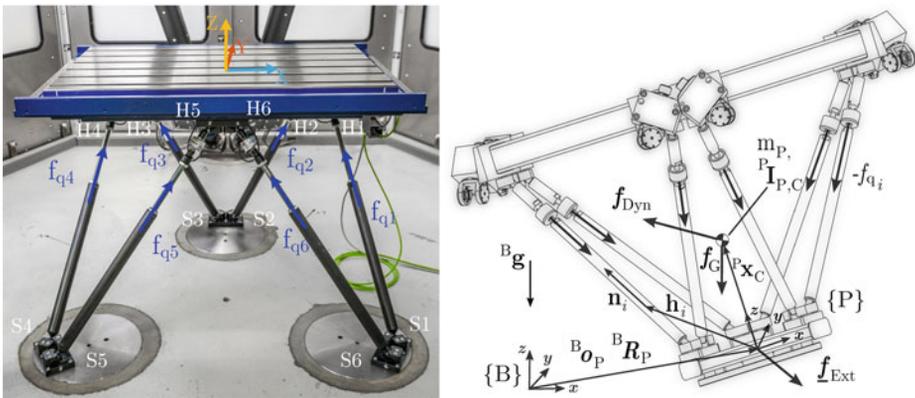


Abb. 22.3 Starre Stabwerke mit Kraftsensoren und Modellgrößen; links: Aufspanntisch (1a), rechts: Endeffektorplattform (1b) [12, 20]

müssen. Auf Basis der Krafttransformation mit Hilfe der Jacobimatrix ${}^P\mathbf{J}_S$ und unter Berücksichtigung eines einfachen Starrkörpermodells für den Plattformteil unterhalb der Sensoren ergibt sich das Messmodell mit Position \mathbf{x} , Geschwindigkeit \mathbf{v} , Winkelgeschwindigkeit $\boldsymbol{\omega}$, Erdbeschleunigung \mathbf{g} und Kreuzproduktmatrix \mathbf{S} zu

$$\begin{aligned} {}^P\mathbf{f}_{\text{Ext}}(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \dot{\mathbf{v}}) &= \underbrace{\begin{bmatrix} m_P \mathbf{E} & m_P \mathbf{S}^T(\mathbf{r}) \\ m_P \mathbf{S}(\mathbf{r}) & {}^P\mathbf{I}_P \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}_P} \begin{bmatrix} {}^P\dot{\mathbf{v}} \\ {}^P\dot{\boldsymbol{\omega}} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{0} & m_P \mathbf{S}({}^P\boldsymbol{\omega}) \mathbf{S}^T(\mathbf{r}) \\ \mathbf{0} & \mathbf{S}({}^P\boldsymbol{\omega}) {}^P\mathbf{I}_P \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}_P} \begin{bmatrix} {}^P\mathbf{v} \\ {}^P\boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} \\ &+ \underbrace{\begin{bmatrix} -m_P {}^P\mathbf{g} \\ -m_P \mathbf{S}(\mathbf{r}) {}^P\mathbf{g} \end{bmatrix}}_{\mathbf{g}_P} \underbrace{{}^{-P}\mathbf{J}_S^{-T}(\mathbf{f}_q - \mathbf{f}_{q0} - \mathbf{f}_K)}_{\hat{\mathbf{f}}_q} \\ &= \mathbf{M}_P {}^P\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_P {}^P\mathbf{v} + \mathbf{g}_P {}^{-P}\mathbf{J}_S^{-T} \hat{\mathbf{f}}_q, \end{aligned} \quad (22.3)$$

wobei für eine ausführliche Herleitung auf die Literatur verwiesen wird [12]. Die Starrkörperparameter Masse m_P , Schwerpunktlage \mathbf{r} und Trägheitsmoment \mathbf{I}_P können durch eine Prozedur zur Parameteridentifikation an der betriebsbereiten Maschine ermittelt werden [14]. Dies ist bspw. nach Werkzeug-/Werkstückwechsel erforderlich, wenn sich die Plattformeigenschaften verändern und das Modell aktualisiert werden muss. Für eine reine Tarierung, bspw. aufgrund von Sensordrifts, genügt es hingegen, die Nullpunktoffsets \mathbf{f}_{q0} neu zu berechnen.

Maschinenkinematik (2a-2d)

Das Messmodell für eine Sensorintegration in die Maschinenkinematik erfordert zunächst die vollständige Lösung der kinematischen, differenziell kinematischen und kinetischen Transformationen der Maschine. Dabei ist eine Lösung mit unterschiedlichen Modellierungsansätzen möglich, die sich auch hinsichtlich der benötigten Rechenoperationen und damit in der Rechenzeit unterscheiden [18, 19]. Für die strukturintegrierte Kraftmessung bietet sich eine Lösung des kinetischen Problems nach dem Newton-Euler-Verfahren an, da auf diese Weise bereits die Schnittkräfte an den Sensorpositionen bekannt sind. Mit diesem Ansatz ergibt sich für den Versuchsträger Hexapod Felix I mit exzentrischen Gelenken ein Gleichungssystem mit 180 Gleichungen und 180 Unbekannten, das im Steuerungstakt zu lösen ist. Für Details zur Aufstellung wird aufgrund des Umfangs auch hier auf die Literatur verwiesen [11].

Ist die Maschinendynamik berechnet, kann damit in Abhängigkeit der Sensorposition eine virtuelle Sensorkraft $\hat{\mathbf{f}}_q$ bestimmt werden

$$\hat{\mathbf{f}}_{q_i}(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \dot{\mathbf{v}}) = \begin{cases} {}^B\mathbf{z}_{HS_i}^T {}^B\mathbf{f}_{HY_i} & \text{Variante 2a} \\ {}^B\mathbf{z}_{SS_i}^T {}^B\mathbf{f}_{SY_i} & \text{Variante 2b,} \\ {}^B\mathbf{z}_{SS_i}^T {}^B\mathbf{f}_{M_i} & \text{Variante 2c} \end{cases} \quad (22.4)$$

um welche die gemessenen Kraftsignale zu korrigieren sind. Für Variante 2d mit verteilten Sensoren sind die Einträge mit Gl. (22.4) für jede Achse i individuell einzusammeln. Die verbleibenden Differenzen entsprechen den gesuchten externen Kräften und Momenten und sind mit der nun poseabhängigen Jacobimatrix der Maschine $\mathbf{J}_{\text{Hex}}(\mathbf{x})$ in den Arbeitsraum zu transformieren:

$${}^B \mathbf{f}_{\text{Ext}}(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \dot{\mathbf{v}}) = \mathbf{J}_{\text{Hex}}^{-T}(\mathbf{x}) \left(\mathbf{f}_q - \hat{\mathbf{f}}_q(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \dot{\mathbf{v}}) - \mathbf{f}_{q0} - \mathbf{f}_K \right). \quad (22.5)$$

22.4 Steuerungsintegration der Kraftmessung

Nur für einige wenige Anwendungen genügt es, die Kraftmessdaten in Nicht-Echtzeit auszuwerten. Für die meisten praxisrelevanten Anwendungen, wie Prozesskraftüberwachung und -aufzeichnung, kraftbasiertes Teachen oder Prozesskraftregelung, ist die Berechnung des Messmodells hingegen zwingend in Echtzeit auszuführen. Weiterhin zählt eine synchrone Erfassung von Antriebs- und Kraftsensordaten zu den Voraussetzungen für die erfolgreiche Umsetzung des strukturintegrierten Ansatzes.

Unabhängig von der Implementierung echtzeitfähiger Algorithmen selbst besteht die Herausforderung in ihrer Integration in die Maschinensteuerung. Diese kann in Abhängigkeit der Steuerungszugänglichkeit direkt, über interne oder über externe Schnittstellen erfolgen (Tab. 22.1). Die größten Freiheiten bei Implementierung und Funktionsumfang bestehen bei Vollzugriff auf die Steuerung. Auch ist dieser für die Kraftregelung Voraussetzung, sofern keine steuerungsseitige Schnittstelle für die Kraftregelung zur Verfügung steht, was auf die meisten Steuerungen für Werkzeugmaschinen zutrifft. Während bei eingeschränktem Zugriff mit Hilfe von Echtzeitbussen die volle Kraftmessfunktionalität realisierbar bleibt, ist bei Zugriff nur über den User-Space eine Messung bei dynamischer Bewegung oder eine Prozesskraftmessung aufgrund unzureichender Taktrate und Synchronizität zu den Bewegungsdaten nicht möglich. Die größte Herausforderung stellen Steuerungen ohne Zugriffsmöglichkeit dar; hier ist nur ein Abgriff an den Hardware-schnittstellen mit entsprechend fraglicher technischer und rechtlicher Realisierbarkeit denkbar.

Für die praktische Umsetzung der strukturintegrierten Kraftmessung durch einen Maschinenhersteller sind die Steuerungsintegration als SPS/C++-Modul sowie die Realisierung als Feldbusteilnehmer (z. B. EtherCAT-Client) am attraktivsten. Nachfolgend soll die Umsetzung mit Vollzugriff auf der kommerziellen Echtzeitsteuerung Beckhoff TwinCAT 3.1 vorgestellt werden. Diese stellt eine Echtzeiterweiterung für das Betriebssystem Microsoft Windows dar und ist durch die Unterstützung der meisten Feldbusse sowie durch ein offenes Steuerungskonzept charakterisiert. Dabei werden sog. TcCOM-Module mit dem Steuerungsprogramm über standardisierte Schnittstellen, Datenbereiche und Zustände verwaltet, in einer oder mehreren Echtzeittasks zur Ausführung gebracht und über ein Prozessabbild mit der Hardware verbunden. Diese Vereinheitlichung erlaubt

Tab.22.1 Auswahl an Möglichkeiten zur Anbindung der Funktionalität der strukturintegrierten Kraftmessung an die Maschinensteuerung in Abhängigkeit ihrer Zugänglichkeit; RT: Echtzeit, SC: Synchronizität, R: Lesezugriff, W: Schreibzugriff [20]

	Beschreibung	RT	SC	R	W
Vollzugriff	Realisierung als SPS- oder C++-Modul innerhalb der Steuerung, Anschluss der Kraftsensoren an die Steuerung und direkter Zugriff auf die Antriebsdaten	✓	✓	✓	✓
Eingeschränkter Zugriff	Realisierung als Feldbus-Teilnehmer, z. B. als ETHERCAT-Client, mit Direktanschluss der Kraftsensoren und Verbindung zur Steuerung via Echtzeitbus (z. B. ETHERCAT)	✓	✓	✓	×
	Realisierung als autarkes Gerät mit Direktanschluss der Kraftsensoren und Abgriff der Antriebsdaten über den User-Space der Steuerung, bspw. mittels OPC/UA, Ethernet oder ADS	×	×	✓	×
Kein Zugriff	Realisierung als autarkes Gerät mit Direktanschluss der Kraftsensoren und Abgriff der Antriebsdaten direkt an den Encodern via Y-Kabel	✓	✓	✓	×
	Realisierung als autarkes Gerät mit Direktanschluss der Kraftsensoren und Kopie der Antriebsdaten vom Antriebsbus der Steuerung (Realisierbarkeit fraglich)	✓	✓	✓	×

die Erstellung der TcCOM-Module durch verschiedene Compiler, sodass bislang verschiedene Steuerungsarchitekturen, wie SPS, MC, CNC oder C++, nun in beliebiger Anzahl und Kombination als Softwaremodule in den Echtzeitkern eingebunden werden können.

Im Detail verfügt der Versuchsträger Felix I über eine CNC für die Bewegungssteuerung, drei SPSen zur Logiksteuerung, z. B. für das Maschinenbedienfeld, sowie drei C++-Module für kinematische Transformationen, Kraftmessung und Kraftregelung. Die synchrone Datenerfassung wird über die Feldbusse CAN-Bus, Profibus sowie EtherCAT und Sercos II realisiert, Abb. 22.4.

Auch bei erfolgreicher Integration der Modelle in die Steuerung sind für eine praxisrelevante Anwendbarkeit der Kraftmessung noch zahlreiche weitere Funktionen zu implementieren, wie bspw. Datenvorverarbeitung (Skalierung, Filterung), Datenaufzeichnung oder M-Funktionen. Eine Übersicht anhand verschiedener Anwendungsfälle gibt Tab. 22.2.

Konkret werden die Modelle zur kinematischen, differenziell kinematischen und kinetischen Transformation für Hexapoden mit exzentrischen Gelenken und darauf

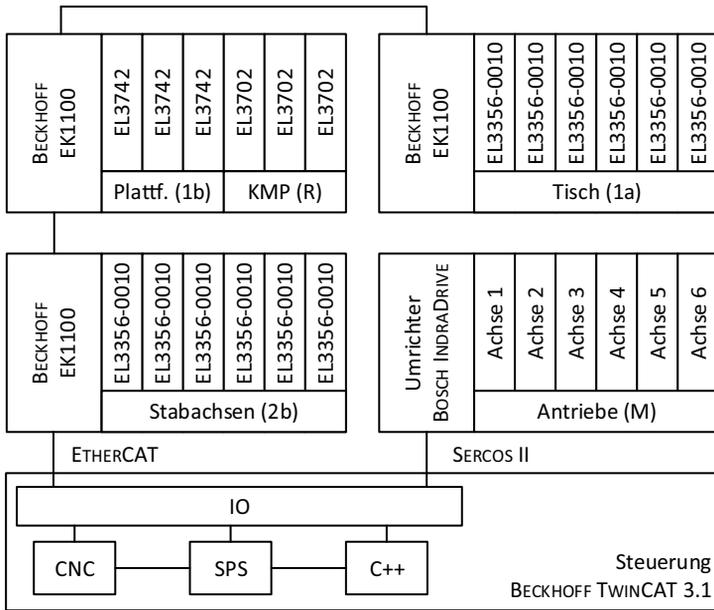


Abb. 22.4 Bustopologie zur echtzeitfähigen synchronen Datenerfassung von Kraftsensor- und Antriebsdaten (Ausschnitt aus der Bustopologie am Versuchsträger Felix I) [20]

Tab. 22.2 Anwendungsfälle der Kraftmessung und Anforderungen an die Steuerungsintegration; EZA: Echtzeitanforderungen, IPO: Interpolator, FFT: Fast Fourier Transformation [20]

Beschreibung	Funktionen	EZA
Anzeige von Kräften und Momenten am TCP auf der Bedienoberfläche der Steuerung	<ul style="list-style-type: none"> • Kin. Transformation • Messmodelle • Bedienoberfläche 	Niedrig (100 ms)
Aufzeichnung von Kräften und Momenten an definierten Posen im Stillstand aus dem NC-Programm und Abspeicherung in einer Datei	<ul style="list-style-type: none"> • G-Code M-Fktn • Datenakquisition • Dateizugriff 	Moderat SPS-Takt (2–20 ms)
Kontinuierliche Kraft-/Momentenüberwachung während eines Prozesses	<ul style="list-style-type: none"> • Limitdefinition • Fehlerreaktion 	Hoch IPO-Takt (1–4 ms)
Start/Stopp kontinuierlicher Aufzeichnung in ausgewählten Prozessabschnitten aus dem NC-Programm und Abspeicherung in einer Datei	<ul style="list-style-type: none"> • G-Code M-Fktn • Datenstreaming 	Hoch IPO-Takt (1–4 ms)
Frequenzanalysen zur Abschätzung dynamischen Übertragungsverhaltens	<ul style="list-style-type: none"> • Blockweises Datenstreaming • FFT 	Sehr hoch (<250 μs)

aufbauend die Messmodelle zur strukturintegrierten Kraftmessung zunächst als unabhängige C++-Bibliothek realisiert. Eine Eigenentwicklung ist dabei sowohl aufgrund der Einschränkungen durch die Echtzeitumgebung, wie fehlende bzw. eingeschränkte dynamische Speicherallokation, fehlende Ausnahmebehandlung oder fehlende Verfügbarkeit von Standard-Bibliotheken, als auch durch kinematische Besonderheiten (exzentrische Gelenke) notwendig. Insbesondere aber erlaubt der Einsatz entsprechender Software-/Code-Wrapper und Compilereinstellungen die Verwendung desselben getesteten Codes in mehreren Versuchsträgern, Simulationsumgebungen (z. B. Matlab, MathCAD) und in der Bedienoberfläche, was die Funktionssicherheit beträchtlich erhöht.

Abb. 22.5 zeigt die Einordnung der Funktionalität in den Steuerungskern: Die Ansteuerung der Maschine erfolgt zunächst klassisch, d. h. über eine Bedienoberfläche wird vom Bediener ein Bewegungsprogramm an die numerische Steuerung (CNC) übergeben, welches mittels der Antriebsregler zur Ausführung gebracht wird. Dabei kann seitens der CNC sowohl im Arbeitsraum (kinematische Transformation im NC-Kern über C++-Modul) als auch im Gelenkraum (kinematische Transformation in der Bedienoberfläche) operiert werden. Das Messmodell läuft in einer eigenen C++-Task und empfängt synchron Position und Geschwindigkeit der Antriebe über Sercos II und Kraftmesswerte über EtherCAT. Sofern vom Eingang unterstützt, kann dabei mittels Oversampling die Abtastrate der Kraftsensoren auf bis zu 100 kHz gesteigert werden, was hier für eine Mittelwertbildung genutzt wird. Anschließend werden die Eingangsdaten vorverarbeitet, die Messmodelle berechnet und die Ergebnisse so bereitgestellt, dass sie auf der Bedienoberfläche angezeigt und über einen Datenlogger aufgezeichnet werden können. Die Einbindung eigener M-Befehle im NC-Kern erlaubt es, die Kraftsensoren aus dem G-Code heraus zu tarieren und quasi-statische bzw. kontinuierliche Messungen zu starten.

Im Ergebnis zeigt Abb. 22.6 beispielhaft anhand der Variante 1b (Endeffektor) die Korrektur der durch die Maschinenbewegung in sechs Freiheitsgraden wirkenden Kräfte auf die Sensoren mit dem steuerungintegrierten Messmodell und die dadurch erreichte genaue Messung während der Bewegung. Für weitere Details zur Stabwerksauslegung, Validierung durch quasi-statische, dynamische und Prozesskraftmessungen sowie eine Einordnung im Vergleich zu einer Referenz-Kraftmessplattform wird auf die Literatur verwiesen [12].

22.5 Kraftregelung

Neben der Prozesskraftmessung und -überwachung besteht das größte Potenzial der strukturintegrierten Kraftmessung in ihrer Anwendung zur Prozesskraftregelung. Anwendungsfälle können dabei das kraftgeführte Teachin, die hybride Kraft-/Positionsregelung mit asynchroner Sollkraft sowie die hybride/parallele Kraft-/Positionsregelung mit bewegungssynchroner Sollwertvorgabe sein (vgl. Tab. 22.3). Dabei erfordern die Anwendungsfälle verschiedene Teilfunktionen, wie bspw. selektierbare Koordinaten, Sollwertvorgabe

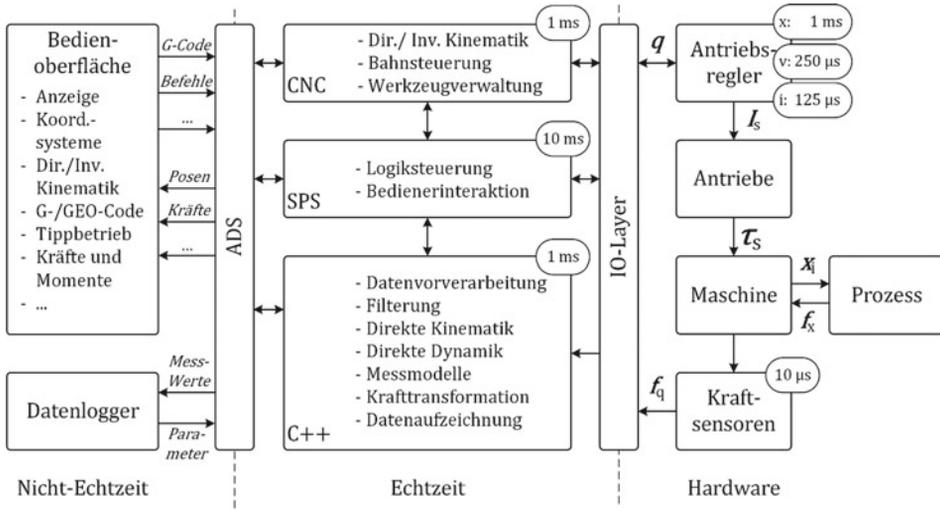


Abb. 22.5 Einbindung von Messmodellen und Kraftmessfunktionalität in den Steuerungskern [20]

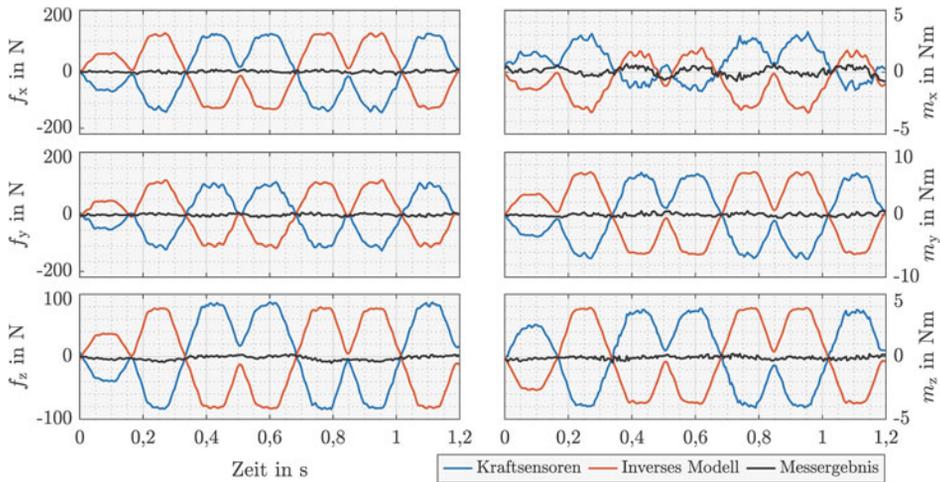


Abb. 22.6 Kompensation der durch die dynamische Maschinenbewegung in 6 Freiheitsgraden entstehenden Kräfte auf die Sensoren mittels eines steuerungsintegrierten Messmodells für strukturintegrierte Kraftsensoren im Endeffektor (Variante 1b) [12, 20]

Tab. 22.3 Anwendungsfälle, Teilfunktionen und Echtzeitanforderungen der Kraftregelung [20]

Beschreibung	Funktionen	EZA
Kraftgeführtes Teachen	<ul style="list-style-type: none"> • Direkte Kraftregelung • Sicherheitsfunktionen • Selektierbare Koordinaten 	Moderat SPS-Takt (2–20 ms)
Hybride Kraft-/Positionsregelung mit asynchroner Sollkraft	<ul style="list-style-type: none"> • Hybride Kraftregelung • Aufgabenkoordinatensystem • Kontaktsuche und Offsetverwaltung • Einfache Kraftsollwertvorgabe 	Moderat SPS-Takt (2–20 ms)
Hybride und parallele Kraft-/Positionsregelung mit bewegungssynchroner Sollkraftvorgabe	<ul style="list-style-type: none"> • Hybrid/parallele Kraftregelung • Synchrone Sollwertvorgabe • Zustandssteuerung via G-Code • G-Code Parameter 	Hoch IPO-Takt (1–4 ms)

und Stellwertaufschaltung, und stellen unterschiedliche Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit und die Steuerungsintegration. Während das Teachen aufgrund des fehlenden Sollwertes, Prozesses und Umgebungskontakts, außer zum Bediener, relativ geringe Echtzeit- und Funktionsanforderungen stellt, sind für die hybride/parallele Kraft-/Positionsregelung mit bewegungssynchroner Sollwertvorgabe Echtzeitverarbeitung im Interpolator-Takt und die G-Code-Integration von Sollwertvorgabe und Ansteuerung erforderlich.

Vor dem Hintergrund der Realisierbarkeit mit einer kommerziellen Werkzeugmaschinensteuerung werden die vorhandenen dezentralen Einzelgelenkregler der Maschine beibehalten. Die Umsetzung erfolgt aus diesem Grund als direkter Kraftregelkreis in Aufgabenkoordinaten, der um den inneren Positionsregelkreis in Gelenkraumkoordinaten geschlossen wird. Es ist nicht sinnvoll, immer alle Koordinaten kraftzuregeln, obwohl dies mit der parallelen Kraftregelung oder der Impedanzregelung möglich wäre, sondern diese anhand der Aufgabe in Kraft- und Bewegungsfreiheitsgrade aufzuteilen. Dies leistet die hybride Kraft-/Positionsregelung mit Hilfe der diagonal besetzten Selektionsmatrix S . Für den vorliegenden Fall befindet sich die Maschine durch die Antriebe immer in Positionsregelung. Bei Bedarf wird der äußere Kraftregler für eine oder mehrere Koordinatenrichtungen überlagert. Es handelt sich deshalb bei der umgesetzten Variante um eine Kombination aus hybrider und paralleler Kraftregelung. Abb. 22.7 zeigt den Regelkreis in der Übersicht.

Für die Umsetzung der positionsbasierten Kraftregelung wird zunächst die Kraftregelungsaufgabe im Aufgabenkoordinatensystem $\{A\}$ mit Hilfe der natürlichen und künstlichen Randbedingungen definiert. Anschließend werden die kraftgeregelten Koordinaten mit der Selektionsmatrix S ausgewählt, die Sollwerte f_S vorgegeben und die Regelabweichung $\Delta^A f$ mittels den aus der Kraftmessung bekannten Istwerten f_I berechnet

$$\Delta^A f = S({}^A f_S - {}^A f_I). \quad (22.6)$$

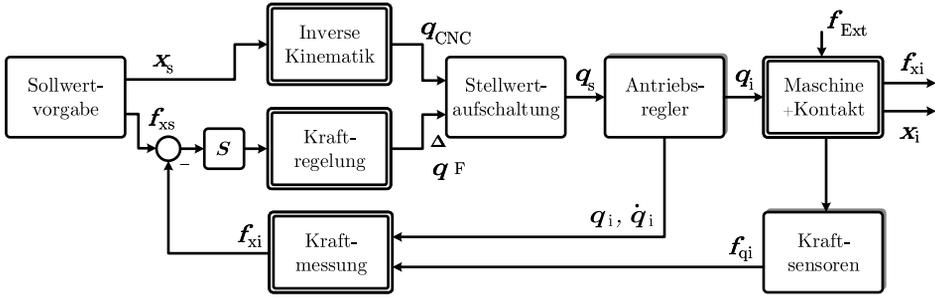


Abb. 22.7 Prinzip der hybriden/parallelen Kraftregelung mit strukturintegrierter Kraftmessung [20]

Zur Generierung der gesuchten Positionsoffsets Δq_F aus der Kraftregelabweichung $\Delta^A f$ für die Aufschaltung der kraftbasierten Stellwerte auf die Antriebe bestehen verschiedene Möglichkeiten: Die Transformationen mit Hilfe der transponierten Jacobimatrix $J_{Hex,G}^T$ und den Transformationsmatrizen X

$$\begin{aligned}\Delta^B f &= {}^B X_P^F {}^P X_A^F \Delta^A f \\ \Delta \tau_q &= J_{Hex,G}^T(x_{CNC}) \Delta^B f \\ \Delta q_F &= K_{Fq} \Delta \tau_q\end{aligned}\quad (22.7)$$

oder der inversen Jacobimatrix $J_{Hex,A}^{-1}$

$$\begin{aligned}\Delta^A x_F &= K_{Fx} \Delta^A f \\ \Delta^B x_F &= {}^B X_P^F {}^P X_A^F \Delta^A x_F \\ \Delta q_F &= J_{Hex,A}^{-1}(x_{CNC}) \Delta^B x_F\end{aligned}\quad (22.8)$$

benötigen zwar nur geringe Rechenleistung, sind aber auch nur in der Nähe der CNC-Pose gültig. Abgesehen vom höheren Rechenaufwand erweist sich die Verwendung der vollständigen direkten (DK) und inversen kinematischen Transformation (IK) als besonders vorteilhaft, da die Regelung direkt in Aufgabenkoordinaten erfolgt, der Parallelbetrieb zur CNC möglich ist und die Stellwerte auch bei größerem Abstand zur CNC-Pose keine Ungenauigkeiten aufweisen. Im Detail wird durch ein Regelgesetz K_{Fx} ein kartesischer Kraftregelungsoffset Δx_F bestimmt, der nach Transformation in das Basiskoordinatensystem $\{B\}$ auf die aktuelle CNC-Pose zur neuen Zielpose x_F addiert wird. Nach Inverstransformation der Zielpose können die Achssollwerte direkt aufgeschaltet oder alternativ vorher zu Offsets Δq_F konvertiert werden:

$$\begin{aligned}
 \Delta^A \mathbf{x}_F &= \mathbf{K}_{Fx} \Delta^A \mathbf{f} \\
 \Delta^B \mathbf{x}_F &= {}^B \mathbf{X}_P {}^P \mathbf{X}_A \Delta^A \mathbf{x}_F \\
 {}^B \mathbf{x}_F &= DK(\mathbf{q}_{\text{CNC}}) + \Delta^B \mathbf{x}_F \\
 \Delta \mathbf{q}_F &= IK({}^B \mathbf{x}_F) - \mathbf{q}_{\text{CNC}}
 \end{aligned} \tag{22.9}$$

Ein direktes Aufschalten der kartesischen Offsets $\Delta \mathbf{x}_F$ ist durch die meist fehlenden Schnittstellen der CNC i. d. R. nicht möglich. Als Regelgesetz kann für \mathbf{K}_{Fx} bspw. ein PI-Regler oder ein Admittanz-Regler zum Einsatz kommen. Die Möglichkeiten zur Sollwertvorgabe und Stellwertaufschaltung werden im nächsten Abschnitt diskutiert.

22.6 Steuerungsintegration der Kraftregelung

Im Gegensatz zur Kraftmessung ist für die Kraftregelung immer ein schreibender Zugriff auf die Steuerung notwendig. Dabei unterscheiden sich die Anforderungen an die Steuerungsintegration für die in Tab. 22.3 aufgezeigten Anwendungsfälle. Zur Realisierung der Kraft-/Positionsregelung mit bewegungssynchroner Sollkraftvorgabe erfolgt die G-Code-Integration der Sollwertvorgabe für die Kräfte analog zur Vorgabe der Positionssollwerte, sodass diese in einem NC-Satz gemeinsam programmiert werden können. Dazu werden im CNC-Kern zusätzlich zu den realen Positionierachsen {X, Y, Z, U, V, W} virtuelle Kraft-Achsen {XF, YF, ZF, UF, VF, WF} angelegt, die durch die Platzierung in einem CNC-Kanal mit den Positionierachsen die synchrone Interpolation der Kraft- und Wegsollwerte möglich machen.

Anschließend wird ein C++-Modul zwischen CNC und Antrieben implementiert, welches die Kraftregelung, die Zustandssteuerung (kein Kontakt, möglicher Kontakt und Kontakt) und die Aufschaltung der Kraftregelungsoffsets auf die Antriebsollwerte realisiert (Abb. 22.8). Weitere Antriebsgrößen, wie Statuswort, Steuerwort oder Istwerte, werden für die realen Achsen ohne Veränderung durchgeleitet. Für die virtuellen Kraft-Achsen werden die Kraftistwerte aus dem Modul Kraftmessung an die CNC weitergegeben und Antriebskenngrößen, wie die Sercos-Phase, simuliert.

Als Voraussetzung erfolgt vorab die Integration der kinematischen Vorwärts- und Rückwärtstransformation der Hexapod-Parallelkinematik zur Umrechnung zwischen Antriebs- und Arbeitsraumkoordinaten in den CNC-Kern. Diese wird entsprechend der Transformationsschnittstelle der verwendeten Echtzeitsteuerung Beckhoff TwinCAT 3.1 mit Hilfe der Funktionen *Forward* und *Backward* im Kern implementiert.

Bei der Umsetzung werden durch die Integration des C++-Moduls in die CNC-GEO-Task Taskgrenzen und damit Totzeiten vermieden. Für die Zustände reiner Kraftregelung wird die Schleppfehlerüberwachung der CNC deaktiviert, da die programmierte Endposition nicht immer erreicht werden kann. Für die Zustände reiner Positionsregelung können

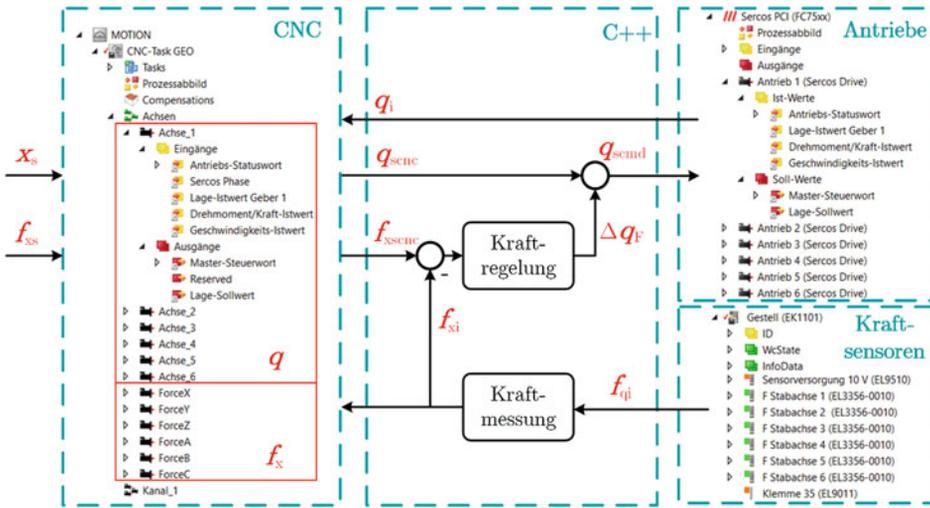


Abb. 22.8 Synchrone Sollwertvorgabe durch reale Positionier- und virtuelle Kraftachsen sowie „Man-in-the-Middle“-C++-Modul zur Stellgrößenaufschaltung in der Steuerung Beckhoff Twin-CAT [20]

die Kraftachsen in den Nachführbetrieb geschaltet werden, um eine Anzeige der Istkraft mittels der virtuellen Achsen zu erreichen.

Listing 1 zeigt ein Beispiel zur Verwendung der Kraftregelung mit G-Code: Es werden die kinematische Koordinatentransformation in Euler-Winkeln aktiviert, ein um $C = 30^\circ$ verdrehtes Basiskoordinatensystem definiert, die Kraftregelung im Selektions-Vektor für die $-Z$ -Richtung angewählt und die Startposition $X = 0, Z = 0$ mm angefahren. Anschließend wird die Kraftregelung mit automatischer Kontaktsuche aktiviert und schließlich während der Fahrt von $X = 0$ auf $X = 500$ mm die Kraft in $-Z$ -Richtung von 100 auf 300 N linear erhöht. Parallel wird die Z-Bewegung von $Z = 0$ auf $Z = 10$ mm vorgesteuert.

Listing 1: Beispiel für die Steuerung der Kraftregelung aus dem G-Code [20]

```

N00 #TRAFO OFF                ;(deactivate kinematic transformation)
N05 #KIN ID[65]              ;(select transformation with euler angles)
N10 ID[65].PARAM[6] = 30    ;(rot base around Z with 30°)
N15 ID[65].PARAM[15] = -1  ;(select force control in -Z-coordinates)
N20 #TRAFO ON                ;(activate trafo)
N25 G1 X=0 Z=0 ZF=100 F50   ;(move to start position X=0 mm, Z=0 mm)
N30 M51                      ;(activate force control, contact search)
N35 G1 X=500 Z=10 ZF=300 F50 ;(move to X=500 mm, Z=10 mm, with force ZF=300
N and velocity 50 mm/min)
N40 M50                      ;(deactivate force control, clear offset)
N45 M30                      ;(end program)

```

Abschließend werden weitere Funktionen zur Steuerung und Parametrierung der Kraftregelung im G-Code verfügbar gemacht. Im Detail lassen sich über die Parameter Arbeitsraumgrenzen für die Kraftregelung, „weiche“ und „harte“ Reglerparameter für jeden der sechs Freiheitsgrade sowie Ursprungskoordinaten für die Regelung in radialen Koordinaten festlegen. Mittels weiterer M-Befehle wird der variable Taskspace de-/aktiviert sowie zwischen radialer und normaler Regelung umgeschaltet.

Exemplarisch zeigt schließlich Abb. 22.9 die Ergebnisse einer Konturverfolgungsaufgabe zur Validierung der Kraftregelung mit bzw. ohne Positionsvorsteuerung der Kontur. Dazu wird eine am Endeffektor befestigte Rolle nach Kontaktsuche und Einregelung einer konstanten Sollkraft von $ZF = -250$ N mit Positionsregelung in X-Richtung und Kraftregelung in Z-Richtung entlang einer der Steuerung unbekanntem Kontur bewegt. Durch die konstante Sollkraft ergibt die Addition von CNC-Sollwert (grün) und Kraftregler-Offset (rot) für beide Experimente in den oberen Abbildungen die Ist-Kontur des Bauteils (blau). Dabei stellt sich eine maximale Regelabweichung von 5,9 % (ohne Vorsteuerung) bzw. 2,7 % (mit Vorsteuerung) ein (Abb. 22.9 unten). Für weitere Details zur Kraftregelung mit strukturintegrierter Kraftsensorik wird auf die Literatur verwiesen [20].

22.7 Fazit

In diesem Beitrag wurde die Messung von Kräften und Momenten an der Wirkstelle mit Hilfe von strukturintegrierten Kraftsensoren für Parallelkinematiken untersucht. Im Anschluss an die Aufstellung und Steuerungsintegration der Messmodelle wurde der Funktionsnachweis durch vergleichende Untersuchungen und die Anwendung einer Kraftregelung erbracht.

Die Messung und Regelung räumlicher Kräfte und Momente mit strukturintegrierter Kraftsensorik in Parallelkinematiken ist mit Hilfe eines Digitalen Zwilling in Form eines steuerungsintegrierten echtzeitfähigen Messmodells möglich und erreicht dabei eine ähnliche Performance wie eine am Endeffektor angebrachte kommerzielle Kraftmessplattform.

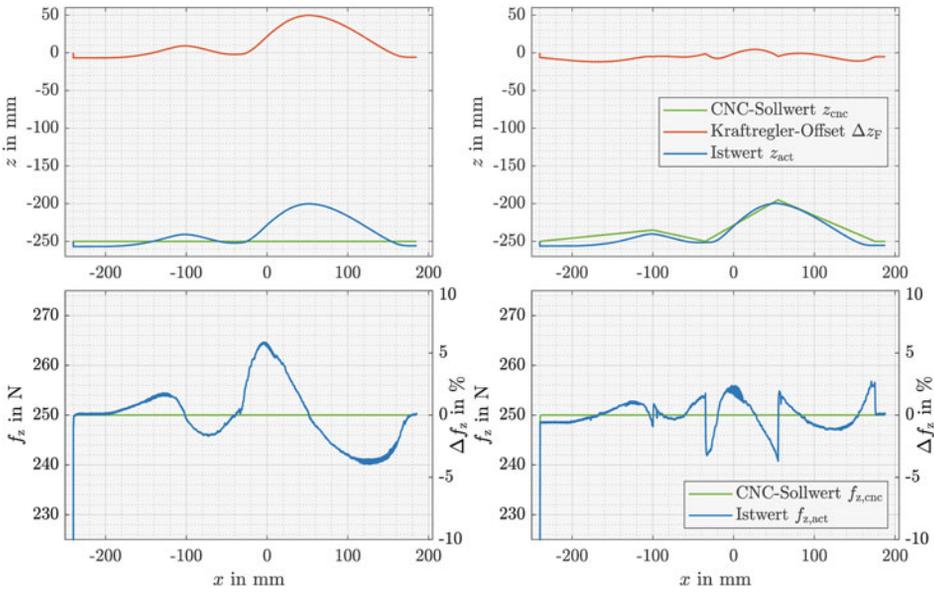
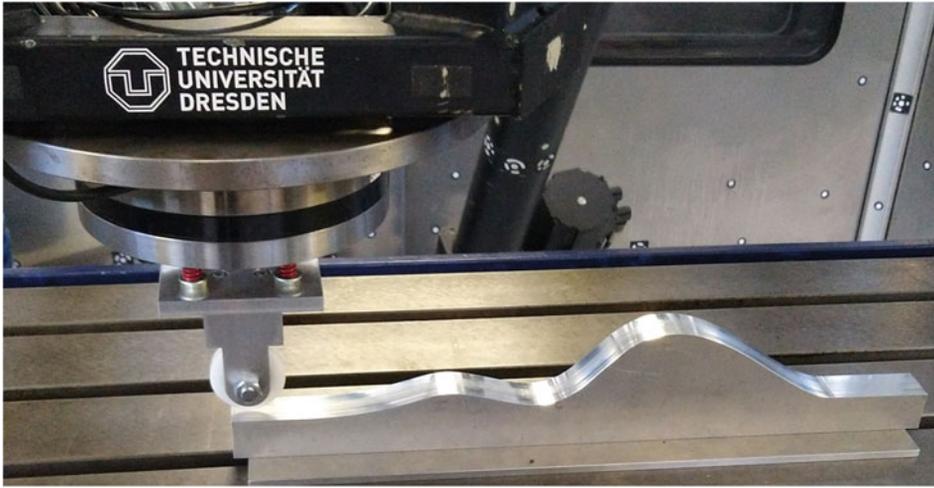


Abb. 22.9 Ergebnisse einer Konturverfolgungsaufgabe mit hybrider/paralleler Kraftregelung und Kraftmessung in der Endeffektor-Plattform (Messsystem 1b); oben: Weganteile in Z-Richtung aus CNC und Kraftregler sowie resultierender Istweg; unten: Soll- und Istkraftverlauf; links: ohne Vorsteuerung in Z, rechts: mit Vorsteuerung der Bauteilkontur mit 5 Stützstellen [20]

Gleichzeitig bestehen dabei wesentliche Vorteile, wie die hohe Robustheit durch größere Entfernung von der Wirkstelle mit Blick auf Späne und Kühlschmierstoffe, die Vermeidung von Einschränkungen bei Arbeitsraum und Befestigungsmöglichkeiten sowie die geringen Kosten durch die Verwendung einachsiger Standardkraftsensoren.

Literatur

1. Denkena B, Schmidt J, Krüger M (2014) Data mining approach for knowledge-based process planning. *Procedia Technol* 15:406–415
2. Stefanescu DM (2011) *Handbook of force transducers: Principles and components*. Springer Science & Business Media
3. Teti R, Jemielniak K, O'Donnell G, Dornfeld D (2010) Advanced monitoring of machining operations. *CIRP Annals* 59(2):717–739, ISSN 0007–8506
4. Desogus S, Germak A, Mazzoleni F, Quagliotti D, Barbato G, Barbieri A, Bigolin G, Bin C (2010) Developing multicomponent force transducers at INRiM. *IMEKO World Congress*, S 17–19
5. Genta G, Prato A, Mazzoleni F, Germak A, Galetto M (2018) Accurate force and moment measurement in spring testing machines by an integrated hexapod-shaped multicomponent force transducer. *Meas Sci Technol* 29(9):095902
6. Matich S, Hessinger M, Kupnik R (2017) Werthschützky und C. Hatzfeld: Miniaturized multiaxial force/torque sensor with a rollable hexapod structure. *tm-Technisches Messen*, 84(s1):138–142
7. Nitsche J, Baumgarten S, Petz M, Röske D, Kümme R, Tutsch R (2017) Measurement uncertainty evaluation of a hexapod-structured calibration device for multi-component force and moment sensors. *Metrologia* 54(2):171
8. Palumbo S, Germak A, Mazzoleni F, Desogus S, Barbato G (2016) Design and metrological evaluation of the new 5 MN hexapod-shaped multicomponent build-up system. *Metrologia* 53(3):956
9. Röske D (2003) Metrological characterization of a hexapod for a multi-component calibration device. In *XVII IMEKO World Congress (Metrology in the 3rd millennium)*, S 347–351
10. Zhao Y, Zhang C, Zhang D, Shi Z, Zhao T (2016) Mathematical model and calibration experiment of a large measurement range flexible joints 6-UPUR six-axis force sensor. *Sensors* 16(8):1271
11. Friedrich C, Kauschinger B, Ihlenfeldt S (2016) Decentralized structure-integrated spatial force measurement in machine tools. *Mechatronics* 40:17–27
12. Friedrich C, Kauschinger B, Ihlenfeldt S (2019) Spatial force measurement using a rigid hexapod-based end-effector with structure-integrated force sensors in a hexapod machine tool. *Measurement* 145C:350–360
13. Friedrich C, Kauschinger B, Ihlenfeldt S (2020) Stiffness evaluation of a hexapod machine tool with integrated force sensors. *Journal of Machine Engineering* 20(1):58–69
14. Friedrich C, Ihlenfeldt S (2021) Model calibration for a rigid hexapod-based end-effector with integrated force sensors. *MDPI Sensors*, 21
15. Hesselbach J, Behrens BA, Dietrich F, Rathmann S, Poelmeyer J (2007) Flexible forming with hexapods. *Prod Eng* 1(4):429–436, ISSN 1863–7353

16. Großmann K, Friedrich C (2012) Steuerung einer neuartigen Hexapod-Arbeitsausrüstung für Radlader. Teil 1 – Systembeschreibung, Busauslegung und Steuerungsarchitektur. ZWF 12:897–902
17. Großmann K, Friedrich C (2013) Steuerung einer neuartigen Hexapod-Arbeitsausrüstung für Radlader. Teil 2 – Regelungskonzept, Hexapodkinematik und Sicherheitsfunktionen. ZWF 01/02:37–41
18. Woernle C (2016) Mehrkörpersysteme: Eine Einführung in die Kinematik und Dynamik von Systemen starrer Körper. Springer
19. Featherstone R (2008) Rigid body dynamics algorithms. Springer Nature
20. Friedrich C (2022) Räumliche Kraftmessung und -regelung mit Parallelkinematiken unter Verwendung strukturintegrierter Kraftsensorik. Dissertation. Technische Universität Dresden. <https://tud.qucosa.de/landing-page/https%3A%2F%2Ftud.qucosa.de%2Fapi%2Fqucosa%253A82770%2Fmets%2F/>
21. Friedrich C, Ihlenfeldt S (2022) Spatial Compliance Measurement of a Clamping Table with integrated Force Sensors. Journal of Machine Engineering 22:1. <https://doi.org/10.36897/jme/146533>
22. Friedrich C, Schlüter F, Ihlenfeldt S (2023) Spatial hybrid/parallel force control of a hexapod machine tool using structure-integrated force sensors and a commercial numerical control. Mechatronics 94. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2023.103007>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957415823000636>

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

