



# 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.

---

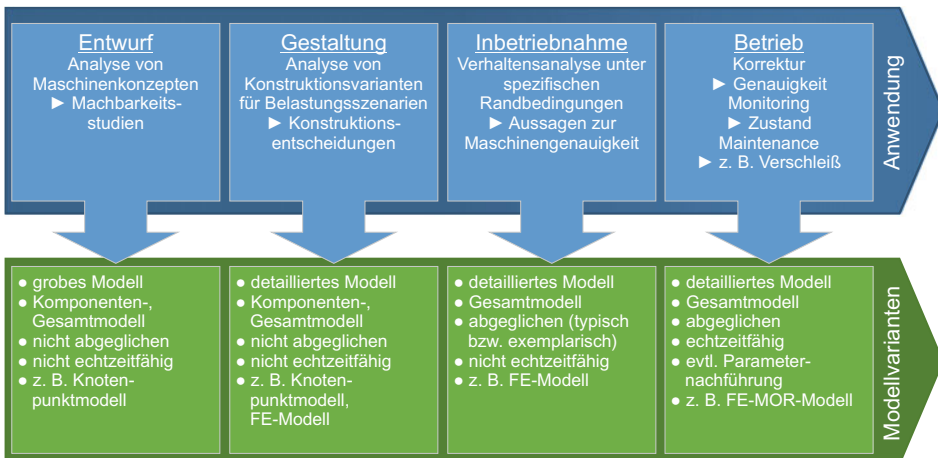
S. Ihlenfeldt (✉) · X. Thiem · J. Müller  
Professur für Werkzeugmaschinenentwicklung und adaptive Steuerungen, Technische Universität  
Dresden, Dresden, Deutschland  
E-Mail: [Steffen.Ihlenfeldt@tu-dresden.de](mailto:Steffen.Ihlenfeldt@tu-dresden.de)

## 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.

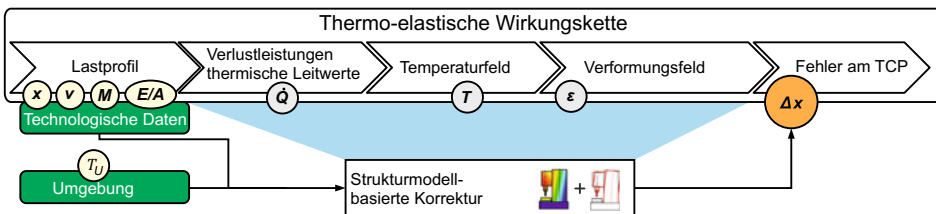
## 21.4 Ziel der Korrektur

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.



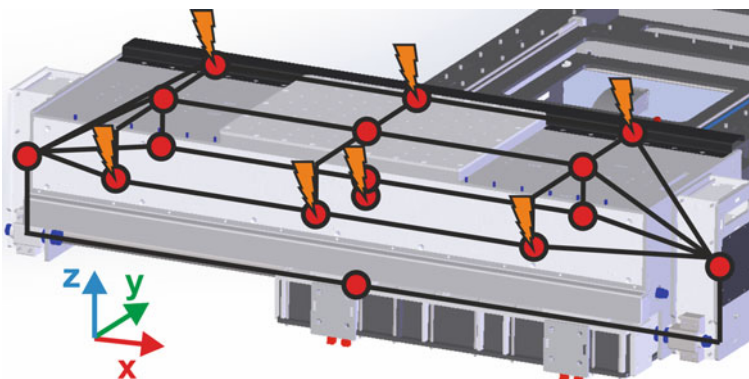
**Abb. 21.2** Einordnung des Korrekturansatzes an der thermo-elastischen Wirkungskette, nach [17]

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]

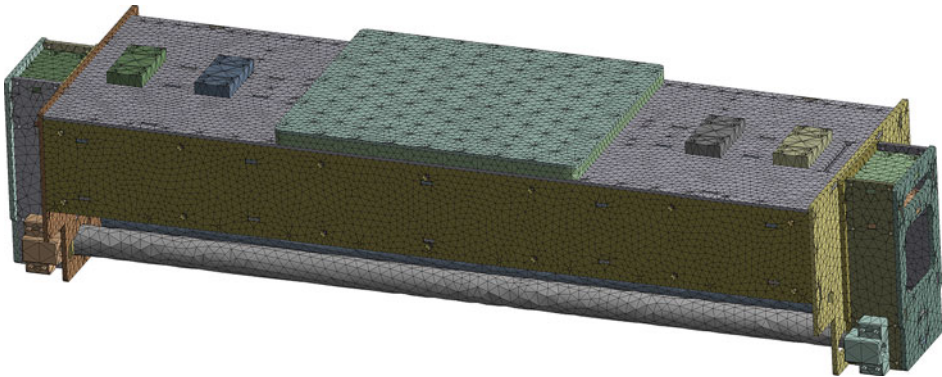
Ausgangsgröße des Strukturmodells ist die thermisch bedingte Verlagerung am TCP für verschiedene Stützpunkte im Arbeitsraum der Maschine. Mit Hilfe eines kinematischen Modells der Maschine werden aus diesen Stützpunkten die Korrekturwerte für alle Maschinenachsen ( $\Delta x$  in Abb. 21.2) berechnet. Für die positionsaktuelle Korrekturwertberechnung und -aufschaltung in der Steuerung werden diese Korrekturwerteberechnung und -aufschaltung in der Steuerung werden diese Korrekturwerteberechnung 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]



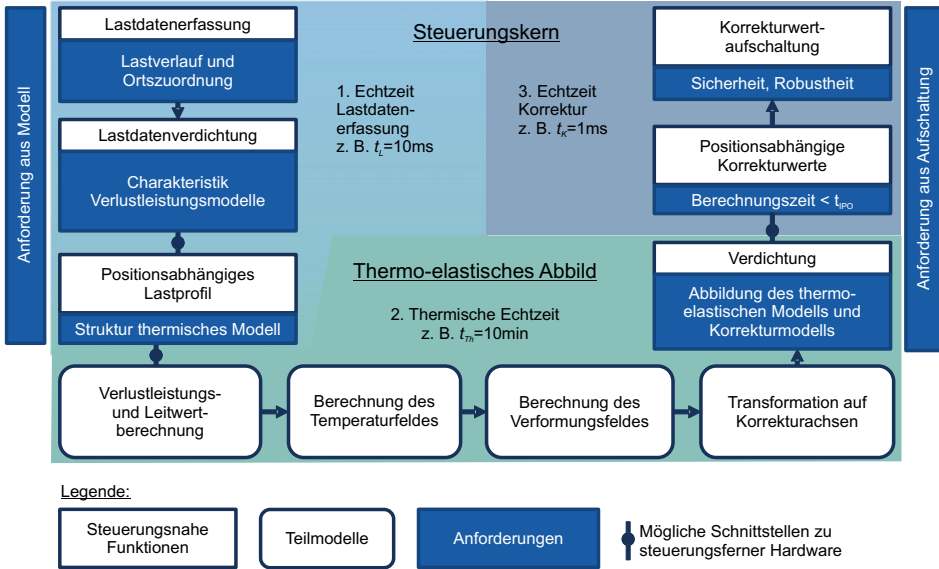
**Abb. 21.4** Schienenbaugruppe als fein vernetztes FE-Modell

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 Schienenbaugruppe 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]

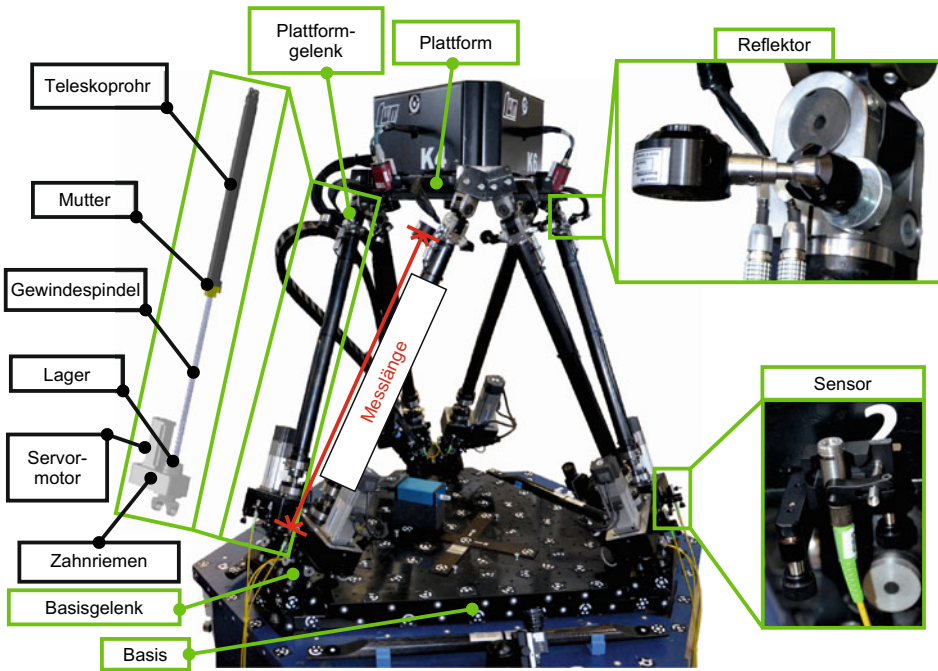
Für den Übergang von der thermischen Echtzeit zur Echtzeit für die Korrekturwertaufschaltung wird der thermo-elastische Zustand der Maschine in Form von Korrekturtabellen abgebildet. Diese Tabellen können die Fehlerparameter der Achsen, den Fehler am TCP oder direkt die Achskorrekturwerte für bestimmte 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

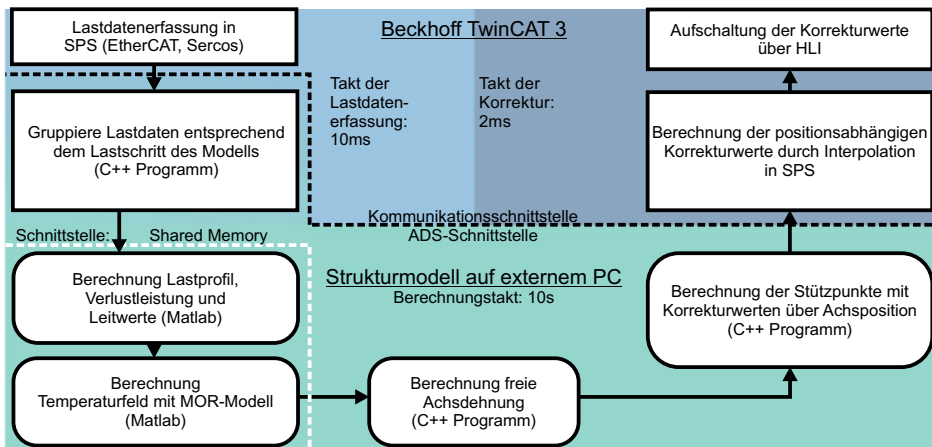


**Abb. 21.6** Hexapod Felix IV mit Messaufbau, nach [24]

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

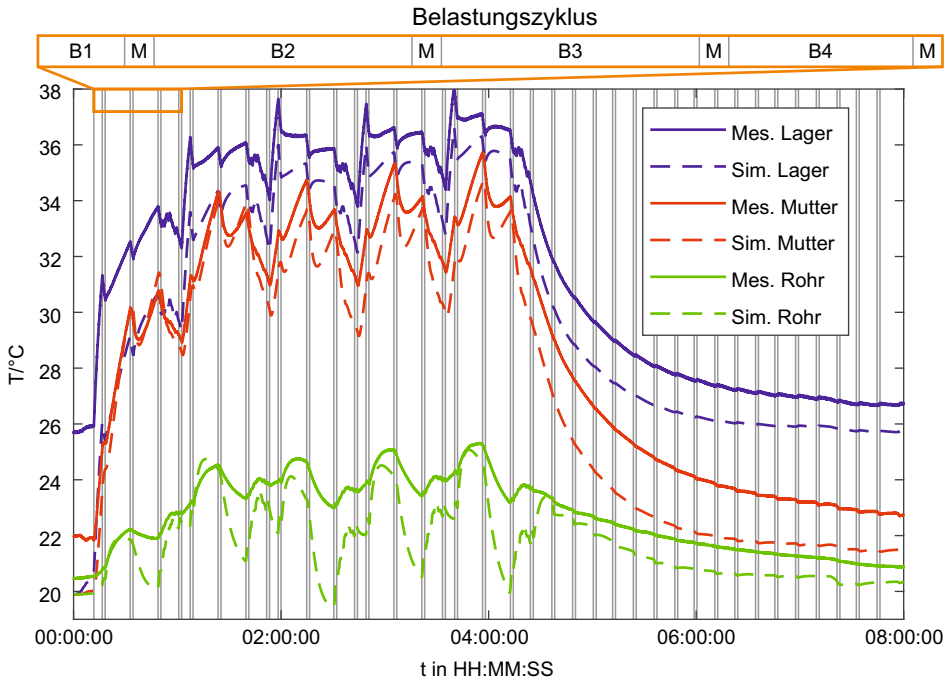


**Abb. 21.7** Implementierung der Korrektur für Hexapod, nach [6]

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.

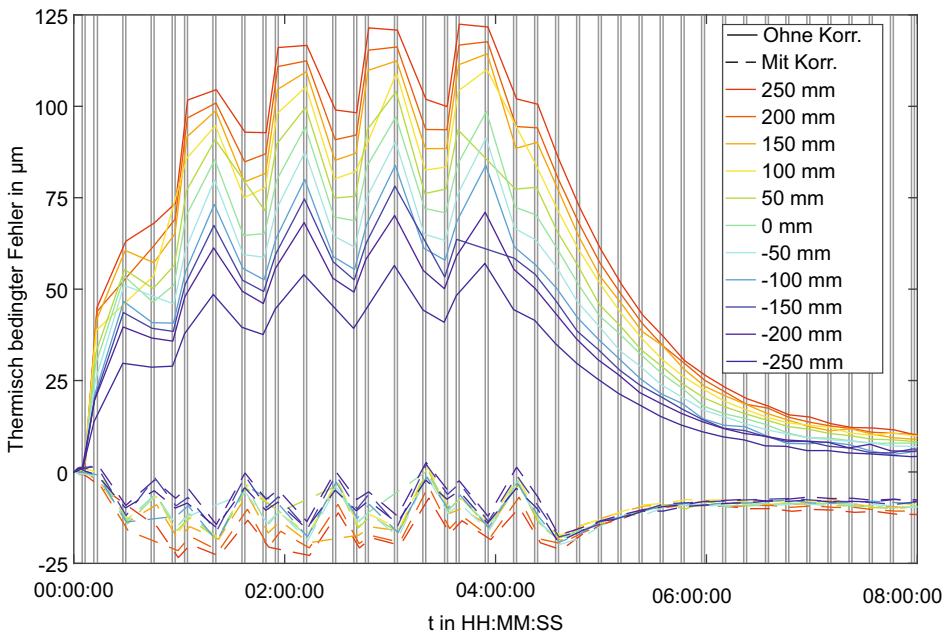
Für die Validierung wurde ein Lastfall gewählt, der mehrere, stark unterschiedliche Belastungsabschnitte enthält. Abb. 21.8 zeigt den Vergleich gemessener und simulierter Temperaturen eines Kugelgewindetriebs. Vier Belastungsabschnitte (durch vertikale graue Linien markiert) wurden zu einem Zyklus zusammengefasst, 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.

