



Die digitale Zukunft des Lernens und Lehrens mit Remote-Laboren

Tobias R. Ortelt, Claudius Terkowsky, Andrea Schwandt,
Marco Winzker, Anke Pfeiffer, Dieter Uckelmann,
Anja Hawlitschek, Sebastian Zug, Karsten Henke, Johannes Nau
und Dominik May

Zusammenfassung

Der Einsatz von Remote-Laboren in ingenieurwissenschaftlichen Studiengängen ermöglicht Studierenden an einigen Hochschulen die ortsunabhängige Nutzung von Laboren, Maschinen und Robotern. Remote-Labore eignen sich in besonderer Weise dafür, den digitalisierungsbedingten Anforderungen und dem Qualifikationsbedarf aus Wirtschaft und Industrie zu begegnen. Die

T. R. Ortelt (✉) · C. Terkowsky
Technische Universität Dortmund, Dortmund, Deutschland
E-Mail: tobias.ortelt@tu-dortmund.de

C. Terkowsky
E-Mail: claudius.terkowsky@tu-dortmund.de

A. Schwandt · M. Winzker
Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, St. Augustin, Deutschland
E-Mail: andrea.schwandt@h-brs.de

M. Winzker
E-Mail: marco.winzker@h-brs.de

A. Pfeiffer · D. Uckelmann
Hochschule für Technik Stuttgart, Stuttgart, Deutschland
E-Mail: anke.pfeiffer@hft-stuttgart.de

D. Uckelmann
E-Mail: dieter.uckelmann@hft-stuttgart.de

A. Hawlitschek
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg, Deutschland
E-Mail: anja.hawlitschek@ovgu.de

Onlinebedienung von Laboren bietet viele Ansatzpunkte für den Erwerb digitaler Kompetenzen, wie beispielsweise das Sammeln und Analysieren von Big Data, das Entwickeln geeigneter Schnittstellen für den Onlinezugriff oder den korrekten Einsatz zur Verfügung stehender softwarebasierter Messtechnik. Auch während der Coronapandemie im Sommersemester 2020, als der reguläre Zugang zu Laboren aufgrund der Kontaktbeschränkungen nicht erlaubt war, ermöglichten Remote-Labore den Studierenden praktische Erfahrungen. Jedoch stellen nicht nur die didaktischen, sondern auch die technischen und organisatorischen Aspekte ingenieurwissenschaftliche Studiengänge bei der Umsetzung von Remote-Laboren vor anspruchsvolle Aufgaben. Der nachfolgende Beitrag greift diese Aspekte auf und beschreibt anhand ausgewählter Beispiele, wie die Umsetzung und Integration von Remote-Laboren in Studium und Lehre gelingen kann, aber auch welche Herausforderungen nach wie vor bestehen.

Schlüsselwörter

Remote-Labore • Onlinelabore • Digitalisierung • Labore •
Ingenieurausbildung • Onlinelehre

S. Zug

TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, Deutschland

E-Mail: Sebastian.Zug@informatik.tu-freiberg.de

K. Henke · J. Nau

Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Deutschland

E-Mail: karsten.henke@tu-ilmenau.de

J. Nau

E-Mail: johannes.nau@tu-ilmenau.de

D. May

University of Georgia, Athens GA, USA

E-Mail: dominik.may@uga.edu

1 Einleitung

1.1 Digitalisierung in den Ingenieurwissenschaften

Die Digitalisierung zieht ökonomische, gesellschaftliche und organisatorische Veränderungen nach sich, die für ingenieurwissenschaftliche Studiengänge nicht ohne Konsequenzen bleiben. Die Weiterentwicklung von Technologien umfasst komplexe Automatisierungsprozesse wie auch vernetzte cyberphysische Systeme und erfordert gelingende Kommunikationsstrategien von Mensch zu Maschine und von Mensch zu Mensch. Die damit verbundenen beruflichen Anforderungen führen zu veränderten Tätigkeitsprofilen in den Ingenieurwissenschaften (Sorko und Irsa 2019).

Vor diesem Hintergrund fordert der VDI, den Umfang digitaler Inhalte und überfachlicher digitaler Kompetenzen im Studium zu erhöhen, um Studierende auf zukünftige berufliche Anforderungen vorzubereiten (Gottburgsen et al. 2019). Remote-Labore bieten als Lernumgebung vielfältige Anknüpfungspunkte, um den digitalen Herausforderungen erfolgreich zu begegnen. In diesem Beitrag werden die Entwicklungslinien von Remote-Laboren und deren Funktion in ingenieurwissenschaftlichen Studiengängen skizziert und anhand ausgewählter Beispiele erläutert. Es folgen Handlungsempfehlungen für die technische, organisatorische und didaktische Umsetzung einer Remote-Labor-Infrastruktur. Der Beitrag schließt mit einem kritischen Ausblick auf die aktuelle Laborlandschaft an deutschen Hochschulen und ihre Entwicklungsperspektiven.

1.2 Digitalisierung durch Remote-Labore

Als integraler Bestandteil der Ingenieurwissenschaften gilt die Kompetenzentwicklung im Labor, denn hier verknüpfen Studierende Theorie und Praxis (Bruchmüller und Haug 2001; Feisel und Rosa 2005). Im Zuge der Digitalisierung entwickeln sich digitale Laborformen wie Onlinelabore, die über das Internet erreichbar sind. Onlinelabore verstehen sich als eine übergreifende Kategorie, der sich virtuelle Labore, Simulationen und Remote-Labore zuordnen lassen (Rivera und Petrie 2016). Die Digitalisierung der Labore ermöglicht es Studierenden, ihr Studium individueller zu gestalten und den Lernort und die Lernzeit zum Teil selbst zu bestimmen.

Der Begriff Remote-Labor wird seit circa 30 Jahren zur Charakterisierung von realen Laboraufbauten verwendet, welche mittels Hardware automatisiert und über das Internet zur Verfügung gestellt werden. Der Begriff Remote-Labore geht

zurück auf den englischsprachigen Begriff Remote Laboratories. Er wird auch mit Fernlabore (Thoms 2019) übersetzt.

Im Gegensatz zu virtuellen Laboren, die reine Simulationen darstellen, bedienen sich Remote-Labore physisch real vorhandener Laborgeräte und liefern reale Messergebnisse und Messreihen. Der eigentliche Versuchsvorgang kann aber über das Internet von praktisch überall und zu jeder Zeit durchgeführt werden.

1.3 Community Working Group Remote-Labore in Deutschland

Die Entwicklung von Remote-Laboren für Lehr-Lern-Zwecke erfordert von Beginn an eine enge Zusammenarbeit von IT und Didaktik, um technische Machbarkeit und methodisch-didaktische Intention aufeinander abzustimmen. Frühe Veröffentlichungen lassen den Eindruck entstehen, dass der Entwicklungsfokus auf der technischen Umsetzung lag (Chen et al. 2010). Dieser Eindruck deckt sich mit den Erfahrungen der Entwickelnden von Remote-Laboren, die an der Schnittstelle von Didaktik und Technik in der „Community Working Group (CWG) – Remote-Labore in Deutschland“ zusammenarbeiten.

Die CWG ist ein Netzwerk von 15 Institutionen aus Deutschland (vgl. Abb. 1) und widmet sich seit ihrer Gründung 2018 der Erforschung und Entwicklung von



Abb. 1 Beteiligte Institutionen der CWG Remote-Labore in Deutschland. (Ortelt)

Remote-Laboren sowie deren Einsatz in der Lehre. Dabei werden die technische Entwicklung und ingenieurdidaktische Gestaltung digitaler Lehr-Lern-Angebote zielgerichtet verbunden. Derzeit plant die CWG die erste deutschlandweite Plattform zur gemeinsamen Nutzung von Remote-Laboren. Die technische sowie didaktische Expertise der CWG in der Konzeptionierung, Entwicklung und dem Betrieb von Remote-Laboren sowie die damit verbundenen Möglichkeiten der Digitalisierung ingenieurwissenschaftlicher Studiengänge werden in diesem Artikel vorgestellt.

2 Stand der Entwicklungen von Remote-Laboren

2.1 Einbindung von Remote-Laboren in die Lehre

In Anlehnung an Sunal et al. (2008), Tekkaya et al. (2016) und May (2017) können Remote-Labore in vier Formen des forschenden Laborlernens eingebunden werden:

1. *Wissen durch Veranschaulichung realer Prozesse ermöglichen:*

In Vorlesungen werden Live-Experimente mit Remote-Laboren vorgeführt. So können abstrakte Theorien, Modelle und Prozesse auf ihre experimentelle Gewinnung zurückgeführt und durch die Anschauung deren Verständnis erhöht werden. Die Theorievorlesung wird um Elemente der Experimentalvorlesung erweitert (Ortelt et al. 2016).

2. *Handlungsorientiertes Lernen ermöglichen:*

Die Studierenden lernen in der Laborübung, eigenständig und aktiv handelnd Experimente im Remote-Labor durchzuführen, sei es zunächst als Nachvollzug der Schauexperimente oder als Durchführung von ihnen unbekanntem Experimenten mit im Studienverlauf zunehmenden Schwierigkeitsgraden (Terkowsky et al. 2013).

3. *Forschungsbasiertes Lernen ermöglichen:*

Der digitale Wandel in den Ingenieurwissenschaften macht Forschungsbedarf deutlich, vor allem im Bereich Industrie 4.0 und Internet der Dinge (IoT). Studierende haben an Hochschulen die Möglichkeit, an laborbasierten Forschungsvorhaben zu partizipieren, um berufsrelevante Aufgabenstellungen zu bearbeiten und entsprechende Kompetenzen zu erwerben (Guedey et al. 2020).

4. *Kompetenzentwicklung und Employability für „Arbeiten 4.0“ ermöglichen:* Studierende erkennen eigenständig fachliche Herausforderungen und entwickeln selbst organisiert und kreativ Forschungsfragen, die sie eigenverantwortlich mittels Remote-Labor beantworten (Terkowsky et al. 2019). Sie arbeiten dabei mit dem Equipment ihres späteren Berufslebens und bearbeiten typische Probleme der beruflichen Praxis (Tekkaya et al. 2016).

2.2 Remote Labore in der Lehr-Lernforschung

Neben den Formen der Einbindung von Remote-Laboren in die Lehre wurden in der Lehr-Lernforschung auch die Vor- und Nachteile von Remote-Laboren in zahlreichen Studien untersucht (zum Beispiel Brinson 2015; Faulconer und Gruss 2018; Post et al. 2019) Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass im Bereich der kognitiven Lehr-Lernziele Remote-Labore und das klassische Hands-on-Labor (ein Labor, in dem Versuchsaufbau und Lernende am gleichen Ort sind) in Bezug auf die Lernzielerreichung vergleichbare Ergebnisse erzielen. Im Folgenden werden weitere Ergebnisse der Studien dargestellt.

Vorteile von Remote-Laboren:

- Remote-Labore ermöglichen selbstorganisiertes Lernen; digital vernetzte Laborressourcen können außerhalb der Öffnungszeiten von unterschiedlichen Zielgruppen genutzt werden.
- Mit Remote-Laboren werden reale Daten mit Messwertestreuung erzeugt, damit ist die wissenschaftliche Auswertung möglich.
- Remote-Labore können standortübergreifend, kosteneffizient und angebotsdiversifiziert vernetzt werden, so müssen nicht dieselben Ressourcen an verschiedenen Standorten bereitgehalten werden und Maschinen oder Experimente eines Standorts können anderen Standorten zugänglich gemacht werden.
- Wenn Studierende Live-Experimente per Remote-Labor durchführen, dann führen sie jeweils ihr individuell konfiguriertes Experiment durch. Ihre Lernmotivation kann sich durch das Gefühl der wirklichen Fernanwesenheit durch Fernsteuerung (remote control) erhöhen.

Nachteile von Remote-Laboren

- Da es sich um reale Labore handelt, ist deren Skalierbarkeit begrenzt (Alves et al. 2016). Dauert die eigentliche Durchführung des Experiments nur wenige

Sekunden, werden Remote Laboratory Management Systeme (RLMS) verwendet, die Zugriffe über eine Warteschlange verwalten. Ist die Dauer des Experiments länger, wird mit Buchungssystemen gearbeitet, die den Zugriff für klar definierte Zeitfenster gewährleisten. Ein Ansatz, um die nötige 1:1-Relation von Nutzenden und Experiment im Remote-Labor zu lösen, stellen Ultra-Concurrent-Remote-Labore dar. Dabei wird die Durchführung bestehender Remote-Labore aufgezeichnet (Messdaten und Video) und den Nutzenden per Datenbank zur Verfügung gestellt. Es werden für die Eingangsparameter n -Schritte festgelegt und das Experiment x -mal wiederholt, sodass sich beim Abruf der Daten aus der Datenbank die Messwerte unterscheiden.

- Remote-Labore sind in der Regel projektgeförderte Einzelanfertigungen, wodurch es zu einer höheren technischen Anfälligkeit und in der Folge zu Ausfallzeiten kommen kann. Damit in Verbindung stehen regelmäßige und unregelmäßige Betriebs- und Wartungskosten.
- Einige Remote-Labore bestehen aus teilweise oder vollständig vorkonfigurierten Versuchsaufbauten, wodurch im Vergleich zum Hands-on-Labor nur eine eingeschränkte Interaktivität möglich ist; darüber hinaus zeigen eingesetzte Kameras nur einen begrenzten Ausschnitt der Realität vor Ort, wodurch das motivationsfördernde Gefühl der Immersion beeinträchtigt werden kann.

3 Labore der Community Working Group

In diesem Kapitel werden für fünf Remote-Labore der CWG Remote-Labore Deutschland jeweils die Aspekte Technik, Didaktik und Organisation anhand von gesammelten Erfahrungen und Forschungsergebnissen beschrieben.

3.1 FPGA-Remote-Labor

Das Remote-Labor der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg bietet Labormöglichkeiten für Studiengänge der Elektrotechnik und Technischen Informatik. Studierende entwerfen Schaltungen für die Bildverarbeitung, beispielsweise die Kantenerkennung zur Detektion von Fahrspuren einer Autobahn (Abb. 2, links oben). Die Schaltungsrealisierung erfolgt für eine programmierbare Digitalschaltung per FPGA (Field Programmable Gate Array) und kann im Remote-Labor ausprobiert werden.

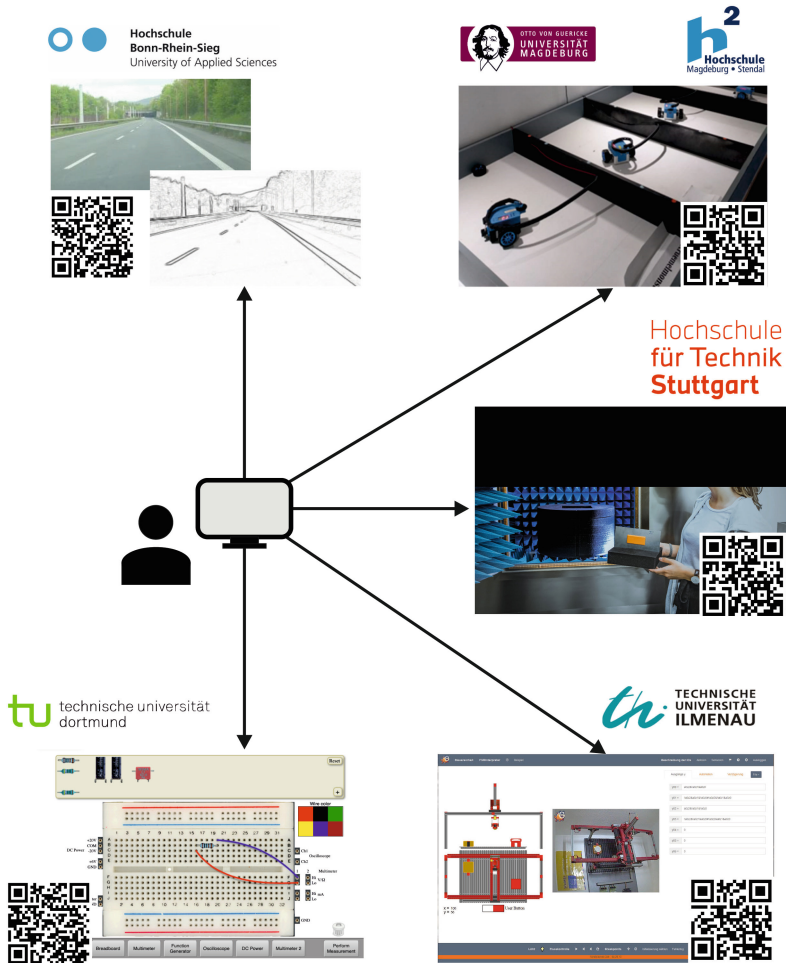


Abb. 2 Übersicht der Remote-Labore der Community Working Group (Auswahl). (Ortelt)

3.1.1 Technik

Das Laborsetting besteht aus einer Signalquelle, welche ein Videosignal zur Verfügung stellt. Im FPGA wird dieses Bildsignal verarbeitet und als Ergebnis ein modifiziertes Bild ausgegeben. Dieses wird von einem Frame-Grabber aufgenommen und den Lernenden angezeigt. Der Stromverbrauch für die Verarbeitung in

der Digitalschaltung wird ebenfalls ermittelt und angezeigt. Mit Schaltern können der Digitalschaltung Steuersignale übergeben werden.

Basis des Remote-Labors ist das RLMS WebLab-Deusto. Diese Software bietet ein Management von Nutzenden und Experimenten. Dabei können verschiedene Rollen und Rechte der Nutzenden definiert werden. Für gleichzeitigen Zugriff mehrerer Nutzender ist eine Warteschlange implementiert.

Die Steuerrechner für das Remote-Labor nutzen Linux als Betriebssystem. Spezifisch für den Laboraufbau müssen Treiber und Ansteuerung der Peripherie eingebunden werden. Diese Peripherie umfasst den Programmieradapter für das FPGA, als Bildquelle einen Raspberry-Pi-Minicomputer, den Frame-Grabber für die Erfassung des Ausgangsbildes sowie das Messgerät für die Verlustleistung.

3.1.2 Didaktik

Das Remote-Labor ist als offene Lernumgebung konzipiert, welche nicht auf vorgeplante Versuche beschränkt ist, sondern vielfältige Experimente ermöglicht (Winzker und Schwandt 2019).

Mit dem Aufbau sind Laborversuche aus mehreren Lernfeldern möglich:

- **Kennenlernen von Digitalschaltungen:** Im Eingangsbild können die Farben invertiert werden. Mit Schaltern lässt sich die Farbausgabe steuern.
- **Signalverarbeitung:** Algorithmen der Bildverarbeitung können in der Digitalschaltung implementiert werden. Beispielcodes für Kantenerkennung und Bildschärfung sind verfügbar.
- **Digitaltechnik:** Schaltungen können auf verschiedene Arten implementiert werden, beispielsweise mit unterschiedlicher Rechengenauigkeit. Dadurch wird der Zusammenhang von Schaltungselementen, Stromverbrauch und Qualität der Signalverarbeitung deutlich.
- **Mikroelektronik:** FPGAs mit unterschiedlicher Schaltungstechnik sind verfügbar und können bezüglich des Stromverbrauchs verglichen werden.

3.1.3 Organisation

Die Entwicklung des Remote-Labors wurde durch ein Fellowship für Innovationen in der digitalen Hochschullehre des Landes Nordrhein-Westfalen ermöglicht. Wie alle technischen Systeme muss auch das Remote-Labor gewartet werden. Eine Basiswartung ist durch eine wissenschaftliche Mitarbeiterin gegeben, welche das Labor betreut. Dies ist jedoch nur möglich, da das Remote-Labor keine beweglichen Teile umfasst und daher kein Verschleiß auftritt. Die Verfügbarkeit wird erfasst und beträgt sehr zufriedenstellende 99,5 % über zwei Jahre Laufzeit.

Für das Betriebssystem wird eine Long-Time-Support-Version genutzt, aber die Ansteuerung von Schnittstellen des Systems ist anfällig für Inkompatibilitäten bei Sicherheitsupdates.

Für größere Wartungsarbeiten oder Weiterentwicklungen ist keine Finanzierung vorgesehen und aktuelle Förderprogramme unterstützen in der Regel nur neue Projektideen und keine Pflege vorhandener Angebote. Momentan ist das FPGA-Remote-Labor voll einsatzbereit und hatte bereits Zugriffe aus über 40 Ländern.

3.2 DigiLab4U

Das BMBF-geförderte Verbundprojekt Open Digital Lab for You (kurz: DigiLab4U) entwickelt, erprobt und evaluiert eine digitalisierte Laborumgebung, die eine standortübergreifende Vernetzung realer und virtueller Laboreinrichtungen ermöglicht. Thematisch fokussiert DigiLab4U die Lehre im Umfeld des Internets der Dinge (IoT) sowie dessen Anwendungen (zum Beispiel Industrie 4.0 (I4.0) in der Logistik, Smart Building).

3.2.1 Technik

Entsprechend dieser Idee wird an der HFT Stuttgart derzeit eine Radio-Frequency-Identification-(RFID)-Messkammer per Remote-Zugriff zugänglich gemacht. Gleichzeitig wird an der Entwicklung einer Virtual-Reality-Variante dieser Kammer gearbeitet. RFID ermöglicht die eindeutige und kontaktlose Identifizierung von Objekten und zählt zu den Basistechnologien im Bereich I4.0 und IoT.

Bei der technischen Konzeption wird auf Standardisierungsaktivitäten im IoT aufgesetzt. In Anlehnung an die Industrial Internet Reference Architecture (IIRA) und auf Basis bisheriger Lab-Netzwerkarchitekturen wurde ein Framework entworfen, in dem das Zusammenspiel der Komponenten (zum Beispiel LMS, Learning Record Store, Lab-Management-System) festgelegt ist. Bedingt durch die Heterogenität der Labore für das Internet der Dinge sind typische Standardanwendungen (etwa LabView von National Instruments) für Labore kaum nutzbar. Die Anbindung der Systeme erfordert die Betrachtung der individuellen Schnittstellen. Die Automatisierung der bisherigen manuellen Tätigkeiten, wie bei der RFID-Messkammer die Bestückung mit Transpondern, stellt eine weitere Herausforderung dar, zumal die Mittel für entsprechende Robotik oder Handhabungssysteme oft nicht zur Verfügung stehen.

3.2.2 Didaktik

Im Projekt DigiLab4U wird die Digitalisierung genutzt, um laborbasierte Anteile ingenieurwissenschaftlicher Studiengänge als semesterbegleitendes Angebot zu konzipieren und sukzessive auszubauen. Im Fokus steht dabei die Planung, Entwicklung und Evaluation einer hybriden, institutionsübergreifenden Lern- und Forschungsplattform für laborbasiertes Lernen, Lehren und Forschen mit den Themenschwerpunkten Industrie 4.0 und dem IoT.

Beispielsweise lernen die Studierenden in der RFID-Messkammer anhand eines Use Cases aus der Praxis, die theoretische Lesereichweite oder ein 360°-Leseprofil eines RFID-Transponders im Hinblick auf industrielle Anwendungsfelder zu analysieren und auszuwerten. Für die Vorbereitung und Durchführung der Übung werden Lernmaterialien über das Learning-Management-System (LMS) Moodle bereitgestellt. Die Kombination aus realer und virtueller – und zukünftig auch remote verfügbarer – Messkammer wird dabei eingesetzt, um unterschiedliche Lernbereiche anzusprechen und die jeweiligen Vorteile der digitalen und analogen Laborinfrastruktur zu nutzen (Kapici et al. 2019). Auf Grundlage der gestaltungsorientierten Mediendidaktik nach Kerres wird der Einsatz digitaler Medien hinsichtlich möglicher Potenziale für laborbasierte Lernprozesse erforscht (2013). Besonders im Fokus stehen methodisch-didaktische Szenarien, die im Sinne der Mixed Reality reale und virtuelle laborbasierte Lernressourcen kombinieren und erproben.

Der Einsatz von Moodle, das Arbeiten in einem VR-Szenario, das Experimentieren in der Messkammer, remote und real, liefern eine Reihe von Datenspuren, deren Relevanz für Learning Analytics und hier zur Unterstützung individueller Bewertungs- und Feedbackprozesse für das Projekt untersucht werden (Leitner et al. 2017; Ochoa 2017). Das Projekt folgt einem Design-Based-Research-Ansatz. Derzeit befinden sich die Laborszenarien in einer ersten formativen Evaluation.

3.2.3 Organisation

In DigiLab4U werden betriebliche, multiorganisatorische und multidisziplinäre Aspekte untersucht. Eine Kernaufgabe für Labornetzwerke ist es, ein nachhaltiges Geschäftsmodell zu entwickeln. Zwischen den beteiligten Universitäten und Laboren muss eine Vertrauensbeziehung aufgebaut werden, die unter anderem die Verfügbarkeit der Labore in den entsprechenden Lernphasen sicherstellt. Zudem ist die Einbeziehung weiterer Labore geplant und wird über einen Call for Participation gestützt. Unter multidisziplinären Gesichtspunkten werden vorrangig Ingenieurstudiengänge betrachtet, wobei zudem die Nutzbarkeit für Forschung

und Lehre in anderen Disziplinen untersucht werden soll, da technische Zusammenhänge (zum Beispiel in der Logistik, Industrie 4.0) zunehmend an Bedeutung gewinnen.

3.3 Industrial eLab

Das BMBF-geförderte Projekt Industrial eLab wurde von 2017 bis 2020 von der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und der Hochschule Magdeburg-Stendal durchgeführt. In diesem Rahmen wurde ein bestehendes Remote-Labor „Eingebettete Systeme“ auf der Basis der Ergebnisse empirischer Studien soft- und hardwareseitig sowie didaktisch aufgewertet.

3.3.1 Technik

Studierende programmieren 15×15 cm große mit einem multimodalen Sensorset ausgestattete Roboter in C und C++, sodass diese am Ende selbstständig in einem Labyrinth navigieren können. Der Mikrocontroller-Code wird an einen Server gesandt, der die Koordination der angeschlossenen Systeme übernimmt. Dieser prüft das Programm und transferiert es auf den Roboter, wo es kompiliert und ausgeführt wird. Umgekehrt empfangen die Studierenden die Ausgaben des Controllers und ein Videosignal.

3.3.2 Didaktik

Im Remote-Labor „Eingebettete Systeme“ lernen die Studierenden nicht nur die Grundzüge der Programmierung eingebetteter Systeme, sondern zugleich den Umgang mit den Herausforderungen der Remote-Steuerung. Da die Studierenden nicht im Labor sind, nehmen sie externe Faktoren, die das Verhalten der Roboter stören können (zum Beispiel Umwelteinflüsse wie Sonneneinstrahlung, welche die Sensoren beeinflusst), weder direkt wahr, noch können sie diese direkt manipulieren. Sowohl die Programmierung der Roboter als auch Prozeduren zur Fehlerdiagnose müssen die Studierenden dementsprechend anpassen. Damit ist eine solche Lernumgebung nicht nur ein über das Internet angesteuertes Labor, welches sich ansonsten nicht vom Präsenzlabor unterscheidet, sondern bereitet die Studierenden auf die berufliche Praxis mit ferngesteuerten Maschinen und Anlagen vor. Die fehlende direkte Interaktion zwischen Lehrenden und Studierenden ist in einem solchen Lernszenario eine didaktische Herausforderung, insbesondere dann, wenn Studierende über wenig inhaltliches Vorwissen und Vorerfahrung verfügen oder wenn die Studiengruppe in der Lehrveranstaltung diesbezüglich sehr heterogen ist. Letzteres macht adaptive Formen didaktischer Anleitung

notwendig. Hierfür wurden im Projekt Indikatoren im Nutzungsverhalten analysiert, die auf Unterstützungsbedarf hindeuten (Hawlitcshek et al. 2019a), sowie die Effektivität spezifischer didaktischer Interventionen untersucht (Hawlitcshek et al. 2019b).

3.3.3 Organisation

Das Remote-Labor „Eingebettete Systeme“ wurde als begleitende Plattform in der Vorlesung „Prinzipien und Komponenten eingebetteter Systeme“ genutzt, an der jährlich zwischen 40 und 50 Studierende verschiedener Informatikstudiengänge teilnahmen. Die Übungen strukturierten sich in fünf bis sechs praktische Aufgaben, die im Semester zu lösen waren. Dafür waren Selbstlernphasen im Remote-Labor und wöchentliche Präsenzveranstaltungen vorgesehen, die zum einen zur Beantwortung von Fragen und zum anderen zur Vorstellung der erreichten Lösungen gegenüber den Tutor*innen genutzt wurden.

3.4 GOLDi

Das hybride interaktive Onlinelabor GOLDi – Grid of Online Lab Devices Ilmenau (Henke et al. 2016) steht für ein Cloudkonzept zur Realisierung einer universellen Remote-Labor-Infrastruktur. Es ermöglicht das selbstständige Entwerfen und Simulieren von Steueralgorithmen auf realen und virtuellen Versuchsobjekten wie zum Beispiel Fahrstuhl, Hochregallager und weiteren physikalischen Hardwaremodellen in verschiedenen Spezifikationstechniken.

Gegenstände der Lehrveranstaltung Technische Informatik sind unter anderem Boolesche Ausdrucksalgebra und digitale Automaten. Zunächst soll der Unterschied zwischen Konstanten und Variablen erkannt werden. Dazu erhalten die Studierenden die Aufgabe, die Laufkatze eines Portalkranmodells im Remote-Labor zu steuern, das heißt hin- und herfahren zu lassen. Nach Eingabe der Booleschen Ausdrücke und Starten des Experiments kann die Bewegung beobachtet werden und die Studierenden erhalten ein unmittelbares Feedback auf ihre Aktionen. Bei fehlerhaften Eingaben kommt es entweder zu Fehlverhalten des Modells (zum Beispiel unerwartete Bewegung) oder es wird bei Fehlern, die den Portalkran zerstören würden (etwa Fahrt über Endlagen hinaus), eine Fehlermeldung ausgegeben.

3.4.1 Technik

Gegenwärtig existieren GOLDi-Instanzen an zehn Partneruniversitäten in Armenien, Georgien, der Ukraine und Australien. Durch die cloudbasierte Remote-Labor-Architektur wird eine effiziente Fernwartung und Aktualisierung der Laborsoftware gewährleistet. Änderungen in der Cloud stehen sofort allen Partnern zur Verfügung, ohne dass vor Ort Installationen oder Updates vorgenommen werden müssen.

GOLDi kann für verschiedene Aspekte in die Lehre eingesetzt werden. In der Grundlagenausbildung können die Steueralgorithmen im GOLDi-Onlinelabor beispielsweise als digitale Automaten, sogenannte Finite State Machines (FSM), entworfen und ausgeführt werden. In höheren Semestern kommen als Steuergeräte auch Mikrocontroller, programmierbare Schaltkreise (FPGAs) oder industrielle programmierbare Steuerungen (SPS) zum Einsatz. Interessant für die Ausbildung in höheren Semestern ist auch der Vergleich der Realisierung von Steueralgorithmen für Mikrocontroller als Softwarelösung mit der Realisierung als Hardwarelösung auf FPGA-Basis oder der Lösung mit industriellen Steuerungen (SPS).

3.4.2 Didaktik

Mit der GOLDi-Remote-Labor-Infrastruktur als offene Lernumgebung wird ein einheitlicher Entwurfsprozess digitaler Steuerungssysteme, unabhängig von der gewählten Spezifikationstechnik, unterstützt. Sie wird auch in Vorlesungen und Seminaren eingesetzt, um interaktiv schnell verschiedenste Effekte demonstrieren zu können.

Je nach Aufgabenstellung besteht der Entwurfsprozess in der Regel aus der konzeptionellen Formulierung und dem Entwurf des Steueralgorithmus unter Verwendung verschiedener Entwurfssysteme oder labintegrierter interaktiver Lernobjekte (Wuttke et al. 2019). Dieser kann schließlich im Onlinelabor als Experiment ausgeführt werden.

3.4.3 Organisation

Der Aufbau der cloudbasierten Gesamtinfrastruktur erfolgte ab 2012 durch EU-Projektfinanzierungen. Seit Finanzierungsauslauf erfolgt die Weiterentwicklung unter Einbeziehung von Studierenden der TU Ilmenau.

Der Austausch im internationalen Labornetzwerk führt zu neuen Ideen der Weiterentwicklung des Labors. Darüber hinaus werden seit 2017 im Rahmen von ERASMUS+ KA107-Projekten neue Konzepte des kollaborativen Arbeitens in internationalen Teams von Studierenden durchgeführt.

Mit dem vom Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft und dem Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e. V. von 2020 bis 2022 geförderten Projekt EIFEL (Entwicklung und Erprobung interaktiver Inhaltsobjekte für den Einsatz in digital gestützten Lehr- und Prüfungsszenarien) können interaktive Inhaltsobjekte für eine digitale Unterstützung der Lernprozesse im Fach Informatik erarbeitet und erprobt werden. Sie gestatten es einerseits, neue Lehrformen wie Flipped Classroom und problembasiertes Lernen mithilfe von realen und virtuellen GOLDi-Laborversuchen zu gestalten, und erlauben andererseits das individuelle praxisorientierte Lernen durch örtlich und zeitlich flexiblen Zugriff auf Onlineexperimente.

3.5 Virtual Instrument Systems in Reality (VISIR)

VISIR am Standort Dortmund wurde innerhalb des Projektes „ELLI 2 – Exzellentes Lehren und Lernen in den Ingenieurwissenschaften“ implementiert. Seit 2019 steht es für die Lehre zur Verfügung. VISIR ist ein Remote-Labor für das Lehren und Lernen von Grundlagen in den Bereichen Elektronik, Elektro- und Informationstechnik in Schulen oder Hochschulen. VISIR gilt derzeit als das am weitesten entwickelte und am weitesten verbreitete Remote-Labor und wurde 2015 vom GOLC als weltweit bestes Remote-Labor ausgezeichnet. Es existieren eigenständige VISIR-Instanzen an insgesamt 16 Hochschulen auf vier Erdteilen. Der Einsatz von VISIR in der Lehre wurde inzwischen vielfach evaluiert. Es zeigt sich, dass VISIR die Lernprozesse von Studierenden positiv beeinflusst, sofern die Lehrenden geeignete Lehr-Lernaktivitäten einsetzen (vgl. Garcia-Zubia et al. 2017).

3.5.1 Technik

VISIR ermöglicht das Aufbauen von grundlegenden Schaltungen, bestehend aus Komponenten wie Widerständen, Kondensatoren, Dioden, Operationsverstärkern oder Transistoren, deren Verhalten per Multimeter und Oszilloskop beobachtet und gemessen werden kann. Mit diesen Komponenten können Studierende beispielsweise einfache Reihen- und Parallelschaltungen von Widerständen, die Wheatstonesche Brückenschaltung, Tiefpass- und Hochpassfilter oder komplexere Operationsverstärkerschaltkreise realisieren und empirisch erforschen. Per Computermaus oder Touchpad können die Schaltungen auf einem grafischen User-Interface (GUI) virtuell aufgebaut werden, welches ein typisches Steckboard zur Realisierung von elektronischen Schaltkreisen nachbildet. Während die Nutzungsoberfläche auf Basis von LabView ein computergeneriertes Steckboard

darstellt, werden die eigentlichen Schaltungen mit speziell dafür konfigurierten Relaisschaltungen, der sogenannten Matrix, real umgesetzt. Durch vergleichbare Installationen an den 16 Standorten ist die Basis für ein Ressource-Sharing gegeben.

3.5.2 Didaktik

VISIR wird von Lehrenden bisher vor allem zur Veranschaulichung in Vorlesungen und Übungen und für handlungsorientiertes Online Lernen eingesetzt. An der TU Dortmund wurde und wird VISIR in zwei Formaten eingesetzt:

- In der Veranstaltung „Technik Lernen und Lehren“, deren Zielgruppe angehende Techniklehrer*innen sind, wurde im Sommersemester 2019 VISIR integriert. Zum einen nutzten die Studierenden das System selbst, zum anderen entwickelten sie Lernszenarien, wie es in Schulen eingesetzt werden kann.
- In der Forschungswerkstatt, einem tutoriell unterstützten studentischen Lern- und Arbeitsraum zur selbstorganisierten Nutzung am Zentrum für Hochschulbildung (zhb), wird VISIR eingesetzt, um Studierenden des Maschinenbaus das Absolvieren der Nebenfächer Elektro- und Informationstechnik zu erleichtern.

3.5.3 Organisation

Im Gegensatz zu den anderen Remote-Laboren wurde VISIR als funktionsbereites Gesamtsystem beschafft. Für den technischen Aufbau und die Inbetriebnahme wurde ein Auftrag an LabsLand¹ vergeben, sodass am Ende ein einsatzbereites Remote-Labor verfügbar war. Das derzeitige Betriebsmodell am zhb der TU Dortmund sieht vor, dass die Nutzung innerhalb der TU Dortmund und in weiteren Netzwerken für didaktische Forschungs- und Entwicklungsvorhaben kostenfrei möglich ist. Alle Servicearbeiten, wie Softwareupdates und Troubleshooting werden von LabsLand kostenfrei per Fernwartung vorgenommen. Der Austausch von defekten Komponenten obliegt dem zhb als Betreiber des Remote-Labors.

Im Gegenzug stellt das zhb sein VISIR LabsLand in nicht genutzten Betriebszeiten kostenfrei für deren eigene internationale Vermarktung zur Verfügung. Neben Stromkosten für den Betrieb fallen nur Gebühren für die Lizenzierung von Software an.

¹Kommerzielle Plattform für Remote-Labore www.labsland.com. Zugegriffen: 04.11.2020.

4 Handlungsempfehlungen

Von den Autorinnen und Autoren wurden Handlungsempfehlungen in den drei Bereichen Technik, Didaktik und Organisation erstellt, die aus ihrer Sicht wichtig für die Entwicklung und den Betrieb von Remote-Laboren sind. Abb. 3 zeigt diese Handlungsempfehlungen, die im Folgenden beschrieben werden.

4.1 Handlungsempfehlungen im Bereich der Technik

Für den zuverlässigen Betrieb von Remote-Laboren ist die Technik entscheidend.

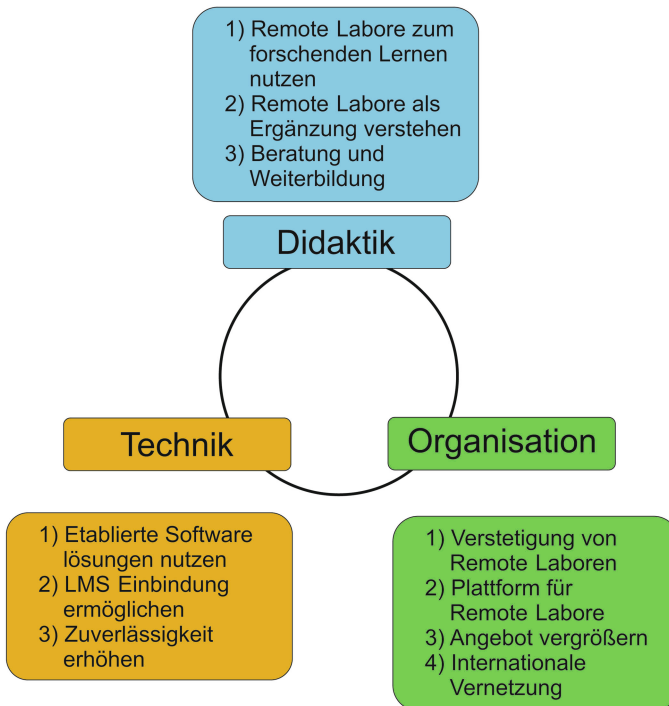


Abb. 3 Handlungsempfehlungen für Remote-Labore aus Sicht der CWG. (Ortelt)

1. *(Weiter-)Entwicklung einer Remote-Labor-Software*

Jedes Remote-Labor benötigt eine Managementsoftware, die den Zugriff auf das Experiment regelt, die Nutzungszeiten überwacht, Reservierungen und die Organisation einer Warteschlange ermöglicht. Sie bietet eine Schnittstelle zu User-Eingaben, den Sensoren und Aktoren sowie Funktionen für Learning Analytics. Eine solche Software sollte entweder als Weiterentwicklung einer bestehenden Software oder als Neuentwicklung zur Verfügung stehen und gepflegt werden. Bei einer Neuentwicklung sollte der Anspruch darin bestehen, eine auf andere Remote-Labore übertragbare Lösung zu finden.

2. *Benutzermanagement durch LMS-Anbindung*

Der Zugriff auf ein Remote-Labor benötigt Authentifizierung. Hierfür empfiehlt sich eine Schnittstelle zu den LMS. Der Datenaustausch sollte in beide Richtungen erfolgen. Berechtigte Nutzende können sich durch Zugriff aus dem LMS identifizieren und das Remote-Labor kann Informationen über Lernaktivitäten zurück in das LMS geben. So können Studierende das Remote-Labor in ihrer bekannten Lernumgebung nutzen und müssen keine weiteren Logins verwalten.

3. *Zuverlässigkeit der Remote-Labore*

Remote-Labore werden nur akzeptiert, wenn sich Lehrende und Lernende auf einen zuverlässigen Betrieb verlassen können. Dazu müssen zum einen der stabile Zugriff und die Automatisierung des Experiments garantiert werden und zum anderen sollten im besten Fall die Remote-Labore redundant vorliegen, wie es beispielsweise bei VISIR der Fall ist.

4.2 Handlungsempfehlungen im Bereich der Didaktik von Remote-Laboren

Die Digitalisierung beeinflusst und verändert nicht nur die Fachinhalte in den Ingenieurwissenschaften, sondern bietet gleichermaßen neue Möglichkeiten für die methodisch-didaktische Gestaltung der laborbasierten Lernumgebungen.

1. *Didaktisch-organisatorische Einbindung der Remote-Labore*

Aktuelle Untersuchungen zur didaktisch-organisatorischen Einbindung von Laboren (siehe Abschn. 2.1) zeigen, dass in Bachelor-Laboren vor allem die Stufen 1 (Wissen durch Veranschaulichung realer Prozesse ermöglichen) und 2 (Handlungsorientiertes Onlinelernen ermöglichen) adressiert werden, während in Masterlaboren in erster Linie die Stufen 2 und 3 (Forschungsbasiertes

Lernen ermöglichen) adressiert werden. Remote-Labore werden dabei vorwiegend zur Adressierung der Stufen 1 und 2 eingesetzt (Tekkaya et al. 2016). Damit wird das Potenzial der Laborlehre vor dem Hintergrund von Stufe 4 (Kompetenzentwicklung und Employability für Arbeiten 4.0 ermöglichen) nicht ausgeschöpft. Für einen optimalen Lernerfolg sollten im Studienverlauf alle vier Stufen adressiert werden.

2. *Kombination von Remote-Laboren und Hands-on-Laboren*

In der Ingenieurausbildung ist es wichtig, dass Studierende echte Maschinen bedienen und typische Handlingprozesse wie zum Beispiel das Vermessen manuell durchführen. Daher sollten Remote-Labore als Ergänzung zum klassischen Labor verstanden werden. Durch die Verfügbarkeit von 24 Stunden an sieben Tagen der Woche besteht für die Studierenden die Möglichkeit, das Labor jederzeit zu nutzen.

3. *Hochschuldidaktische Weiterbildung und Beratung*

Hier sind einerseits labordidaktische Weiterbildungen für Lehrende angezeigt und andererseits umfassende Beratungskonzepte nötig, um das Potenzial ausschöpfen zu können. Für ein erfolgreiches Beispiel eines solchen Beratungs- und Organisationsentwicklungsprozesses siehe Franszkiewicz et al. (2019).

4.3 Organisation

1. *Bestehende Labore verstetigen*

Bestehende Remote-Labore bilden eine Basis, mit denen Hochschulen und Lehrende Erfahrungen im Einsatz von Remote-Laboren sammeln können. Allerdings werden dort nur Neuentwicklungen von Remote-Laboren gefördert. Daher sind für die Verstetigung von Remote-Laboren zwingend Mittel erforderlich. Motivation für dieses Engagement könnte die perspektivische Entwicklung von hochschulübergreifenden Nutzungskonzepten und Lernressourcen für etablierte Remote-Labore sein.

2. *Plattform für Remote-Labore entwickeln*

Remote-Labore können nur an externen Hochschulen eingesetzt werden, wenn sie auffindbar sind. Ein erster Schritt für eine deutsche Plattform wurde durch die Webseite der CWG erreicht. Dort sind verfügbare Remote-Labore sichtbar.

3. *Neue Remote-Labore anhand des Bedarfs entwickeln*

Hochschulen, Fachgesellschaften und Didaktiker*innen sollten an der Entwicklung von Remote-Laboren beteiligt werden, sodass Remote-Labore entstehen, die auch wirklich benötigt werden. Nutzungszahlen der Remote-Labore sollten dafür beobachtet und analysiert werden.

4. *Internationale Vernetzung*

Der Bedarf und das Interesse an Remote-Laboren sind nicht an Ländergrenzen gebunden. Entwicklungsländer würden durch die Nutzung von Remote-Laboren eine Unterstützung ihrer Bildungssysteme erfahren.

5 **Fazit**

Der Beitrag zeigt den Entwicklungs- und Verbreitungsstand von Remote-Laboren in Deutschland. Die Erfahrung mit dem Einsatz bestehender Remote-Labore macht deutlich, dass diese einen wichtigen Beitrag zur Digitalisierung der Lehre liefern können. Remote-Labore können einerseits dabei helfen, dass das Lehren und Lernen im Labor mit der allgemeinen Digitalisierung des Studiums Schritt halten. Andererseits können mithilfe von Remote-Laboren auch Kompetenzen im Umgang mit digitalisierten Arbeitsgeräten durch die Studierenden aufgebaut werden. Allerdings ist die Entwicklung von Remote-Laboren kein Selbstläufer. Für den erfolgreichen und dauerhaften Betrieb müssen technische, didaktische und organisatorische Voraussetzungen dauerhaft erfüllt werden. Damit sind Anschaffungs-, Entwicklungs-, Betriebs- und Personalkosten verbunden, bestehende Labore sollten verstetigt und standortübergreifende Kooperationen geschlossen werden. Lehrende benötigen labordidaktische Kompetenzen, um Remote-Labore sinnvoll in die Lehre einzubinden. Darüber hinaus werden sich in Zukunft weitere Forschungs- und Entwicklungsfelder im Bereich der Remote-Labore im Speziellen und der Onlinelabore im Allgemeinen entwickeln. So stecken beispielsweise die gezielte Nutzung von und die damit verbundene Forschung zu Onlinelaboren zur Steigerung der Barrierefreiheit im Studium oder zur Ansprache nichttraditioneller Studierendengruppen, für die ein campusgebundenes Präsenzstudium beispielsweise nicht infrage kommt, noch weitgehend in den Kinderschuhen. Hier werden sich weitere Innovationspotenziale ergeben.

Literatur

Alves, G. R., Fidalgo, A., Marques, A., Viegas, C., Felgueiras, M. C., Costa, R., Lima, N., Castro, M., Díaz-Orueta, G., Ruiz, E. S. C., García-Loro, F., García-Zubía, J., Hernández-Jayo, U., Kulesza, W., Gustavsson, I., Pester, A., Zutin, D., Schlichting, L., Ferreira, G., Bona, D. d., Silva, J. B. d., Alves, J. B., Biléssimo, S., Pavani, A., Lima, D., Temporario, G., Marchisio, S., Concari, S., Lerro, F., Fernández, R., Paz, H., Soria, F., Almeida, N., Oliveira, V. d., Pozzo, M. I., & Dobboletta, E. (2016). Spreading remote lab usage a system

- A community – A Federation. In *2nd International Conference of the Portuguese Society for Engineering Education (CISPÉE)*. <https://doi.org/10.1109/CISPÉE.2016.7777722>.
- Brinson, J. R. (2015). Learning outcome achievement in non-traditional (virtual and remote) versus traditional (hands-on) laboratories: A review of the empirical research. *Computers & Education*, 87, 218–237. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2015.07.003>.
- Bruchmüller, H.-G., & Haug, A. (2001). *Labordidaktik für Hochschulen. Eine Hinführung zum praxisorientierten Projekt-Labor*. Alsbach: Leuchtturm-Verlag.
- Chen, X., Song, G., & Zhang, Y. (2010). Virtual and remote laboratory development: A review. *Earth and Space 2010*, 3843–3852. [https://doi.org/10.1061/41096\(366\)368](https://doi.org/10.1061/41096(366)368).
- Faulconer, E. K., & Gruss, A. B. (2018). A review to weigh the pros and cons of online, remote, and distance science laboratory experiences. *The International Review of Research in Open and Distributed Learning*, 19(2), 155–168. <https://doi.org/10.19173/irrodl.v19i2.3386>.
- Feisel, L. D., & Rosa, A. J. (2005). The Role of the Laboratory in Undergraduate Engineering Education. *Journal of Engineering Education*, 94(1), 121–130. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2005.tb00833.x>.
- Franuzkiewicz, J., Frye, S., Terkowsky, C., & Heix, S. (2019). Flexibles und selbstorganisiertes Lernen im Labor – Remote-Labore in der Hochschullehre. *Zeitschrift für Hochschulentwicklung*, 14, 273–285. <https://doi.org/10.3217/zfhe-14-03/16>.
- Garcia-Zubia, J., Cuadros, J., Romero, S., Hernandez-Jayo, U., Orduña, P., Guenaga, M., Gonzalez-Sabate, L., & Gustavsson, I. (2017). Empirical analysis of the use of the VISIR remote lab in teaching analog electronics. *IEEE Transactions on Education*, 60(2), 149–156. <https://doi.org/10.1109/TE.2016.2608790>.
- Gottburgsen, A., Wannemacher, K., Wernz, J., & Willige, J. (2019). Ingenieurausbildung für die Digitale Transformation. Zukunft durch Veränderung. VDI-Studie. <https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/vdi-studie-ingenieurausbildung-fuer-die-digitale-transformation>. Zugegriffen: 4. Nov. 2020.
- Guedey, M., Pfeiffer, A., & Uckelmann, D. (2020). Transferring research on IoT applications for smart buildings into engineering education. *2020 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*. <https://doi.org/10.1109/EDUCON45650.2020.9125150>.
- Hawlitcschek, A., Dietrich, A., & Zug, S. (2019). Welche inhaltliche Unterstützung ist für Studierende beim Programmieren in einem Remote-Labor hilfreich? In N. Pinkwart & J. Konert (Hrsg.), *DELFI 2019* (S. 335–336). Bonn: Gesellschaft für Informatik e. V. https://doi.org/10.18420/delfi2019_342.
- Hawlitcschek, A., Krenz, T., & Zug, S. (2019). When students get stuck: Adaptive remote labs as a way to support students in practical engineering education. In D. Ifenthaler, D.-K. Mah, & J. Y.-K. Yau (Hrsg.), *Utilizing learning analytics to support study success* (S. 73–88). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64792-0_5.
- Henke, K., Vietzke, T., Wuttke, H.-D., & Ostendorff, S. (2016). GOLDi – Grid of Online Lab Devices Ilmenau. *International Journal of Online Engineering (iJOE)*, 12(04), 11–13. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v12i04.5005>.
- Kapici, H. O., Akcay, H., & de Jong, T. (2019). Using hands-on and virtual laboratories alone or together-which works better for acquiring knowledge and skills? *Journal of Science Education and Technology*, 28(3), 231–250. <https://doi.org/10.1007/s10956-018-9762-0>.
- Leitner, P., Ebner, M., Erpenbeck, J., & Sauter, W. (2017). Learning Analytics in Hochschulen. In J. Erpenbeck & W. Sauter (Hrsg.), *Handbuch Kompetenzentwicklung im Netz. Bausteine einer neuen Lernwelt* (S. 371–383). Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag.

- May, D. (2017). *Globally Competent Engineers – Internationalisierung der Ingenieurausbildung am Beispiel der Produktionstechnik*. Aachen: Shaker Verlag.
- Ochoa, X. (2017). Multimodal learning analytics. In C. Lang, G. Siemens, A. F. Wise, & D. Gašević (Hrsg.), *The handbook of learning analytics* (1. Aufl., S. 129–141). Alberta: Society for Learning Analytics Research (SoLAR). <https://doi.org/10.18608/hla17.011>.
- Ortelt, T. R., Gies, S., Traphöner, H., Chatti, S., & Tekkaya, A. E. (2016). Integration of new concepts and features into forming technology lectures. In S. Frerich, T. Meisen, A. Richert, M. Petermann, S. Jeschke, U. Wilkesmann, & A. E. Tekkaya (Hrsg.), *Engineering education 4.0: Excellent teaching and learning in engineering sciences* (S. 529–545). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46916-4_40.
- Post, L. S., Guo, P., Saab, N., & Admiraal, W. (2019). Effects of remote labs on cognitive, behavioral, and affective learning outcomes in higher education. *Computers & Education*, 140, 103596. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103596>.
- Rivera, L. F. Z., & Petrie, M. M. L. (2016). Models of collaborative remote laboratories and integration with learning environments. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)*, 12(09), 14–21. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v12i09.6129>.
- Sorko, S. R., & Irsa, W. (2019). *Interaktive Lehre des Ingenieursstudiums – Technische Inhalte handlungsorientiert unterrichten*. Berlin: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56224-6>
- Sunal, D. W., Wright, E., & Sundberg, C. (2008). *The impact of the laboratory and technology on learning and teaching science K-16*. Charlotte: Information Age Publishing.
- Tekkaya, A. E., Wilkesmann, U., Terkowsky, C., Pleul, C., Radtke, M., & Maevus, F. (2016). *Das Labor in der ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung – Zukunftsorientierte Ansätze aus dem Projekt IngLab*. München: Utz.
- Terkowsky, C., Frye, S., & May, D. (2019). Online engineering education for manufacturing technology: Is a remote experiment a suitable tool to teach competences for “Working 4.0”? *European Journal of Education*, 54(4), 577–590. <https://doi.org/10.1111/ejed.12368>.
- Terkowsky, C., Jahnke, I., Pleul, C., May, D., Jungmann, T., & Tekkaya, A. E. (2013). PeTEX@Work: Designing CSCL@Work for online engineering education. In S. P. Goggins, I. Jahnke, & V. Wulf (Hrsg.), *Computer-supported collaborative learning at the workplace: CSCL@Work* (S. 269–292). Boston: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1740-8_13.
- Thoms, L.-J. (2019). *Spektrometrie im Fernlabor: Wirkung von Informationsdarbietungen beim forschenden Lernen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-25708-8>
- Winzker, M., & Schwandt, A. (2019). Open education teaching unit for low-power design and FPGA image processing. *2019 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*. Kovington: IEEE. <https://doi.org/10.1109/FIE43999.2019.9028694>.
- Wuttke, H.-D., Hutschenreuter, R., Sukiennik, D., & Henke, K. (2019). Interactive content objects for learning digital systems design. In M. E. Auer & T. Tsiatsos, (Hrsg.), *Mobile technologies and applications for the internet of things*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11434-3_11.

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.

