Claudius Terkowsky, Dominik May, Silke Frye, Tobias Haertel,
Tobias R. Ortelt, Sabrina Heix, Karsten Lensing (Hg.)

Labore in der Hochschullehre

Didaktik, Digitalisierung, Organisation

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

wbv

Claudius Terkowsky, Dominik May, Silke Frye, Tobias Haertel,
Tobias R. Ortelt, Sabrina Heix, Karsten Lensing (Hg.)

Labore in der Hochschullehre

Didaktik, Digitalisierung, Organisation

wbv

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Exzellentes Lehren und Lernen
in den Ingenieurwissenschaften
ELLI2

technische universität
dortmund

Die vorliegende Publikation wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.
Förderkennzeichen: 01PL16082C.

2020 wbv Publikation
ein Geschäftsbereich der
wbv Media GmbH & Co. KG, Bielefeld

Gesamtherstellung:
wbv Media GmbH & Co. KG, Bielefeld
wbv.de

Umschlagmotiv: iStock/DrAfter123

Bestellnummer: 6004804
ISBN (Print): 978-3-7639-6216-7
DOI:10.3278/6004804w

Printed in Germany

Diese Publikation ist frei verfügbar zum Download unter
wbv-open-access.de

Diese Publikation mit Ausnahme des Coverfotos ist unter folgender Creative-Commons-Lizenz veröffentlicht:
http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/

Für alle in diesem Werk verwendeten Warennamen sowie Firmen- und Markenbezeichnungen können Schutzrechte bestehen, auch wenn diese nicht als solche gekennzeichnet sind. Deren Verwendung in diesem Werk berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese frei verfügbar seien.

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

Inhalt

Editorial:
Labore in der Hochschullehre – Didaktik, Digitalisierung, Organisation 5

Teil I: Labordidaktik und Kompetenzentwicklung 11

Claudius Terkowsky, Dominik May, Silke Frye
Forschendes Lernen im Labor: Labordidaktische Ansätze zwischen Hands-on und Cross-Reality 13

Jochen Berendes, Mathias Gutmann
Wozu Labor? Zur vernachlässigten Erkenntnistheorie hinter der Labordidaktik 35

Marc D. Sacher, Anna B. Bauer
Kompetenzförderung im Laborpraktikum 51

Andrea Merli, Birgit Kanngießer, Thomas Möller
Kreatives forschendes Lernen im Projektlabor Physik fördern 67

Tobias Haertel, Anja Höschel, Monika Rummler, Claudius Terkowsky
Kreativität und Sicherheit im Labor – ein Widerspruch? 81

Silke Frye, Claudius Terkowsky, Tobias Haertel, Judyta Franuszkiewicz, Sabrina Heix
Re-Design eines Laborpraktikums im Lehramtsstudium – Didaktische Optimierung mittels Design-Based Research 95

Teil II: Cross-Reality Labore 109

Anke Pfeiffer, Dieter Uckelmann
Pilotierung eines didaktischen Modellkonzepts für laborbasiertes Lernen – (Digi)LabTC für DigiLab4U 111

Enno Stöver, Benjamin Remmers, Katrin Schillinger
Lernort Digitale Umformtechnik – kontinuierliche agile Entwicklung einer Lehr-Lern-Umgebung 127

Anja Hawlitschek, Sarah Berndt, André Dietrich, Sebastian Zug
Iterative Adaption eines Remote-Labors unter Berücksichtigung des Feedbacks der Studierenden 145

Konrad E. R. Boettcher, Dana J. Boettcher, Alexander S. Behr
Virtuelle Realität des Unsichtbaren: Verständnisfördernde Visualisierung und Interaktivierung strömungsmechanischer Phänomene 159

Marco Winzker, Andrea Schwandt
FPGA Remote-Labor als Ergänzung und Alternative zum Präsenzlabor 175

Heinz-Dietrich Wuttke, Karsten Henke
Architektur und Einsatz eines hybriden Online-Labors in der MINT-Grundlagenausbildung 193

Dominik May, Silke Frye, Claudius Terkowsky
Die Eignung von Remote-Laboren zur Förderung von Kompetenzen für die Industrie 4.0 am Beispiel von VISIR 211

Teil III: Organisation und digitale Infrastruktur 227

Tobias R. Ortelt, Claudius Terkowsky
Community Working Group „Remote-Labore in Deutschland“: Projekte, Gemeinsamkeiten, Unterschiede 229

Pablo Orduña, Luis Rodriguez-Gil, Ignacio Angulo, Unai Hernandez, Aitor Villar, Javier Garcia-Zubia
weblablib: Ein neuer Ansatz zur Einrichtung von Remote-Laboren 249

Karsten Lensing
Künstliche Intelligenz im Lehr-Lernlabor 263

Dominik May, Claudius Terkowsky, Gustavo R. Alves, Michael E. Auer, Kalyan Ram Bhimavaram, Manuel Castro, Alexander A. Kist, Pablo Orduña, Valerie Varney
Ausblick: Welche Rolle spielen Online-Labore für die Zukunft der Laborlehre? . . 283

Autorinnen und Autoren 299

Editorial: Labore in der Hochschullehre – Didaktik, Digitalisierung, Organisation

Übergeordnetes Ziel des vorliegenden Sammelbandes „Labore in der Hochschullehre“ ist eine Bestandsaufnahme gegenwärtiger und künftiger Entwicklungen eines wichtigen, in Deutschland bislang vergleichsweise wenig beachteten und wissenschaftlich kaum untersuchten Praxisraums hochschulischen Lehrens und Lernens: das Labor. Die im Titel angesprochenen Dimensionen Didaktik, Digitalisierung und Organisation stehen dabei für den durch Kompetenzorientierung und digitale Transformation ausgelösten Modernisierungs- bzw. Innovationsdruck auf ein bewährtes, möglicherweise aber in die Jahre gekommenes Lehr-Lernformat.

Untersuchungen zur Wirksamkeit des Lernens im Labor zeigen, dass forschendes Lernen im Labor die Entwicklung sowohl fachbezogener als auch fachübergreifender Kompetenzen gezielt fördern kann. Allerdings stützen sich eine Vielzahl von Laborübungen, Experimentieranleitungen und Lernmaterialien für Studierende weiterhin auf traditionelle instruktive Labordidaktiken. Sie ermöglichen nur in Ausnahmefällen forschungsorientiertes, kreatives Lernen mit einem hohen Grad an Selbstorganisation, Selbststeuerung und Eigenverantwortung und erscheinen daher wenig innovationsförderlich. Gerade diese Kompetenzen aber werden für ein Arbeitsleben im Kontext von Industrie 4.0 zukünftig immer wichtiger und fordern daher ein „Lernen 4.0“ – auch unter gezieltem Einbezug digitaler Angebote.

Wurde die Bezeichnung *Labor* ab dem 17. Jahrhundert zunächst für die Werkstätten von Apotheker*innen und Alchemist*innen verwendet, so ist der heutige Gebrauch des Begriffs eng verbunden mit dem Aufkommen der empirischen Naturwissenschaften, des Ingenieurwesens und der damit in Verbindung stehenden Universitätsreform des 19. Jahrhunderts. Laborübungen und -praktika wurden in den letzten 180 Jahren weltweit zum festen Bestandteil natur-, ingenieur- und technikwissenschaftlicher Studiengänge. Die Angebote sind dabei sowohl in anwendungs- als auch in forschungsorientierten Studiengängen auf allen Studienstufen von zentraler Bedeutung. Sie werden künftig aber noch weiter an Bedeutung gewinnen, da der technologische Wandel und die digitale Transformation von Wirtschaft, Gesellschaft und Bildungswesen neue Arbeits-, Lebens- und Lernwelten hervorbringt und weiter hervorbringen wird. Das Fachliche wie das Methodische wandeln sich dabei unter dem Einfluss der fortschreitenden Digitalisierung. Auf diese Entwicklung müssen Studierende und Lehrende der Natur,- Ingenieur- und Technikwissenschaften als künftige *Change Agents* nicht nur fachlich-theoretisch und empirisch-praktisch, sondern zunehmend auch kritisch-reflexiv und kreativ-selbstorganisiert vorbereitet werden.

Digitale Angebote verändern jedoch nicht nur das hochschulische Lehren und Lernen, sondern öffnen, verschieben und lösen auch zunehmend die Systemaußengrenzen der Hochschulen auf. Herkömmliche Labore in den Hallen, Räumen und Kellern der Fakultäten, Fachbereiche und Institute vor Ort werden durch Onlineangebote ergänzt und erweitert. Darüber hinaus werden Online-Labore zunehmend durch hochschulübergreifende Verbünde in Verbindung mit kommerziellen Laborangeboten in unterschiedlichen Tauschbeziehungen und Geschäftsmodellen in die lokale Lehre hinein vernetzt. Mehr noch, Lehrende, Lernende, Labore, Lernmaterialien u. v. m. können global-lokal von jedem beliebigen Ort zu jedem anderen mit Internetverbindung verbunden und dort in die lokale Umgebung der Nutzer*innen integriert werden. So entsteht ein mediengenerierter und medienintegrierter soziodigitaler Zusatzraum für das Labor. Für eine nachhaltige Integration in Curricula und Lehre benötigt dieser Raum allerdings entsprechende didaktische Konzepte, IT-basierte Infrastruktur, Akteurinnen und Akteure sowie Strategien in der Hochschule.

Zusammenfassend stellen sich also Fragen im Bereich der Didaktik, der Digitalisierung und der Organisation, deren Beantwortung sich der Band in drei übergeordneten Kapiteln widmet:

I. Im ersten Teil erörtern Beiträge die Frage, inwieweit sich Labordidaktik unter veränderten Kompetenzerwartungen neu aufstellen muss. Das Spannende dabei ist, ob und wie sich auch in herkömmlichen Laboren neben fachlichen Kompetenzen die für die zunehmende Digitalisierung notwendigen überfachlichen Kompetenzen fördern lassen.
II. Im zweiten Teil befassen sich Beiträge mit der aktuellen und zukünftigen Entwicklung von Cross-Reality-Laboren, also der Vermischung unterschiedlicher laborbezogener Medienrealitäten für die Hochschullehre. Hierbei werden sowohl einzelne Laborangebote als auch Plattformen und Netzwerke betrachtet. Hierfür wird auch ihr Nutzen für die Lehre vor dem Hintergrund sich wandelnder Kompetenzanforderungen einer digitalisierten Lebenswirklichkeit und einer Industrie 4.0 diskutiert.
III. Im dritten Teil schließlich stehen Beiträge im Mittelpunkt, die sich mit aktuellen Gelingens- und Misslingensbedingungen auf infrastruktureller und organisationaler Ebene befassen. Sie gehen der übergeordneten Frage nach, welche Voraussetzungen künftig notwendig sein werden, um Cross-Reality-Labore technisch verlässlich und ökonomisch nachhaltig in die Lehre zu integrieren.

Teil I: Labordidaktik und Kompetenzentwicklung

Den Anfang machen *Claudius Terkowsky, Dominik May* und *Silke Frye*, die in ihrem Beitrag „Forschendes Lernen im Labor: Labordidaktische Ansätze zwischen Hands-on und Cross-Reality“ zunächst eine Bestandsaufnahme gängiger Labortypen und ihrer vielschichtigen Funktionen in der Hochschullehre durchführen. Sie diskutieren spezifische Lernziele für das Labor und nehmen eine detaillierte Analyse der Entwicklung und des Istzustands des in vielen Fällen nur rudimentär kompetenzförderli-

chen gegenwärtigen forschenden Lernens im Labor vor. Abschließend erfolgt eine Erörterung von Cross-Reality-Laboren als neue Entwicklungen im Kontext der Laborlehre vor dem Hintergrund der immer stärker in die Arbeitswelt von Hochschule und Industrie vordringenden Digitalisierung.

Jochen Berendes und *Mathias Gutmann* stellen die durchaus provokant gemeinte Frage: „Wozu Labor? Zur vernachlässigten Erkenntnistheorie hinter der Labordidaktik“ und beschäftigen sich anschaulich und zugleich philosophisch versiert mit der Beantwortung eben dieser Frage nach der vernachlässigten Erkenntnistheorie hinter der Labordidaktik. Dies ist deshalb wichtig, weil gerade in der Praxis der fachwissenschaftlich betriebenen Laborlehre solche Reflexionen über sich selbst aus einer übergeordneten erkenntnistheoretischen Perspektive in der Regel kaum vorgenommen werden. Der Beitrag stellt somit das gewichtige wissenschaftsphilosophische Rückgrat des Sammelbandes dar.

Marc D. Sacher und *Anna B. Bauer* widmen ihren spannenden Beitrag „Kompetenzförderung im Laborpraktikum“ dem labordidaktischen Redesign eines naturwissenschaftlichen Labors zu einer kompetenzförderlichen Lehr-Lernumgebung. Anhand des von ihnen neu konzipierten Paderborner Physik Praktikums 3P stellen sie beispielhaft und anschaulich dar, wie Lehrende Laborveranstaltungen vor dem Hintergrund sich wandelnder Kompetenzerwartungen mit von ihnen eingesetzten didaktischen Gestaltungsprinzipien des forschenden Lernens und des Cognitive Apprenticeship gewinnbringend überarbeiten können.

Andrea Merli, Birgit Kanngießer und *Thomas Möller* zeigen in ihrem Beitrag „Kreatives forschendes Lernen im Projektlabor fördern“ eindrucksvoll, wie sich naturwissenschaftliche Kreativität im Labor unter sich ändernden gesellschaftlichen Bedingungen immer wieder neu fördern lässt. Das von ihnen vorgestellte Anfängerpraktikum „Projektlabor Physik“ bietet dazu seit inzwischen nahezu 50 Jahren Studierenden besondere Freiräume für Kreativität, Eigeninitiative und Selbstständigkeit. Die Studierenden realisieren in Projektform selbstgewählte aktuelle Themen und führen von ihnen geplante und entworfene Experimente eigenständig und hochmotiviert durch.

Tobias Haertel, Anja Höschel, Monika Rummler und *Claudius Terkowsky* widmen ihren Beitrag „Kreativität und Sicherheit im Labor – ein Widerspruch?“ der Zusammenführung zweier Aspekte der Laborlehre, die auf den ersten Blick nicht unbedingt zusammenzugehören scheinen. Anhand eines von ihnen gemeinsam entwickelten und umgesetzten hochschuldidaktischen Workshops zeigen sie jedoch auf, wie Lehrende darin erfolgreich unterstützt werden können, beide Perspektiven besser miteinander zu verknüpfen.

Wie ein labordidaktisch und fachlich-inhaltlich in die Jahre gekommenes Laborpraktikum als Teil der Lehramtsausbildung für das Fach Technik neu konzipiert werden kann, zeigen eindrucksvoll *Silke Frye, Claudius Terkowsky, Tobias Haertel, Judyta Franuszkiewicz* und *Sabrina Heix* in ihrem Beitrag „Re-Design eines Laborpraktikums im Lehramtsstudium – Didaktische Optimierung mittels Design-Based Research“. Sie beschreiben einen umfassenden labordidaktischen Beratungsprozess,

an dessen Ende eine umgestaltete Lehrveranstaltung steht, die sowohl bei den Studierenden als auch den Lehrenden zu einer wesentlich höheren Zufriedenheit geführt hat.

Teil II: Cross-Reality Labore

Anke Pfeiffer und *Dieter Uckelmann* beschreiben in ihrem Beitrag „Pilotierung eines didaktischen Modellkonzepts für laborbasiertes Lernen – (Digi)LabTC für DigiLab4U" die theoretischen Rahmenbedingungen, die konzeptionelle Umsetzung sowie erste Evaluationsergebnisse eines laborbasierten didaktischen Designs für eine vernetzte Laborumgebung, die mittels eines Design-Based-Research-Ansatzes entwickelt wird. Diese Laborumgebung soll künftig Studierenden, Lehrenden und Forschenden standortunabhängig praxisnahe, digitalisierte und vernetzte Laborumgebungen mit den Themenschwerpunkten Internet of Things (IoT) und Industrie 4.0 (I 4.0) zur Verfügung stellen.

In ihrem Beitrag „Lernort Digitale Umformtechnik – kontinuierliche agile Entwicklung einer Lehr-Lern-Umgebung" zeigen *Enno Stöver*, *Benjamin Remmers* und *Katrin Schillinger*, wie ein Labor der Umformtechnik als Teil der Produktionstechnik durch agiles Projektmanagement als Lehr-Lernszenario sukzessive zu einem Lernort für Digitale Umformtechnik weiterentwickelt werden kann. Aus dem klassischen Hochschullabor wird so schrittweise eine agile Projektumgebung zur Förderung sowohl einschlägig fachlicher als auch von Industrie-4.0- nahen Kompetenzen.

Anja Hawlitschek, *Sarah Berndt*, *André Dietrich* und *Sebastian Zug* berichten in ihrem Beitrag „Iterative Adaption eines Remote-Labors unter Berücksichtigung des Feedbacks der Studierenden" über die technische und didaktische Realisierung eines Remote-Labors zur Programmierung mobiler Robotersysteme in der Informatikausbildung. Seine Entwicklung zog sich über insgesamt drei Versionen hin – stets begleitet durch eine formative Evaluation zur iterativen Optimierung des Lehr-Lernsystems. Aus den Ergebnissen der formativen Evaluation leiten die Autorinnen und Autoren am Ende allgemeine Regeln zur Realisierung eines Remote-Labors ab.

Konrad E. R. Boettcher, Dana J. Boettcher und *Alexander S. Behr* stellen in ihrem Kapitel „Virtuelle Realität des Unsichtbaren: Verständnisfördernde Visualisierung und Interaktivierung strömungsmechanischer Phänomene" eine von ihnen entwickelte virtuelle Laborumgebung zur Veranschaulichung nicht unmittelbar einsehbarer strömungsmechanischer Prozesse vor. Da Studierende in der Regel Schwierigkeiten haben, solche komplexen Grundlagen der Strömungsmechanik zu verstehen, wurden mittels einer programmierbaren Game-Engine virtuelle Labore zur Unterstützung der Lehre entwickelt. Diese können aus der Ichperspektive angesteuert werden, um so das Verstehen nachhaltig zu unterstützen.

Marco Winzker und *Andrea Schwandt* untersuchen in ihrem Beitrag „FPGA Remote-Labor als Ergänzung und Alternative zum Präsenzlabor" am Beispiel eines über das Internet programmierbaren Logikgatters, wie Präsenzlabore durch Remote-Labore sinnvoll ergänzt oder ersetzt werden können. Ein Field Programmable Gate Array (FPGA) ist ein programmierbarer integrierter Schaltkreis in der Digitaltech-

nik, in den eine logische Schaltung geladen werden kann. Die Untersuchung zeigt, dass die Studierenden im präsentierten Laborsetting sowohl die intendierten Lehr-Lernziele erreichen als auch diese Art des Anytime-Anywhere-Lernens akzeptieren und sich künftig mehr Online-Labore im Studium vorstellen können.

Heinz-Dietrich Wuttke und *Karsten Henke* stellen in ihrem Kapitel „Architektur und Einsatz eines hybriden Online-Labors in der MINT-Grundlagenausbildung" die Entwicklung eines hybriden Online-Labors vor, das in der Grundlagenausbildung zur Technischen Informatik zum Einsatz kommt. Sie beschreiben, in welchen Lehr-Lernszenarien es eingesetzt werden kann und wie die Architektur des Labors vielseitige Anwendungen unterstützt. Studierende sollen durch das Lernen und Arbeiten mit GOLDi dazu befähigt werden, selbstständig digitale Steuerungen zu entwerfen, aufzubauen und ihre korrekte Funktion nachzuweisen.

Dominik May, Silke Frye und *Claudius Terkowsky* analysieren in ihrem Beitrag „Die Eignung von Remote-Laboren zur Förderung von Kompetenzen für die Industrie 4.0 am Beispiel von VISIR" exemplarisch das Potential von Remote-Laboren für eine Ausbildung von Ingenieur*innen im Kontext des Lernens und Arbeitens in der Industrie 4.0. Sie zeigen, dass sich das Remote-Labor VISIR grundsätzlich auch zur Förderung von Industrie-4.0-Kompetenzen eignet. Ihre Analyse legt aber auch nahe, dass die VISIR-Community zwar eine Vielzahl von Industrie- 4.0-Kompetenzen fördern kann, dies aber bislang nur vereinzelt bzw. diversifiziert geschieht und nicht in der Breite über alle Laborbetreibenden hinweg. Die Autor*innen kommen daher zu dem Schluss, dass ein Austausch zur Verbreitung unterschiedlicher lokaler Lösungen ratsam wäre.

Teil III: Organisation und digitale Infrastruktur

Tobias R. Ortelt und *Claudius Terkowsky* stellen in ihrem Beitrag „Community Working Group ‚Remote-Labore in Deutschland': Akteure, Gemeinsamkeiten, Unterschiede" die von ihnen initiierte Arbeitsgruppe vor, die derzeit aus fünfzehn in Deutschland agierenden hochschulischen Einrichtungen besteht. Der Beitrag stellt heraus, dass der Austausch und die weitere Vernetzung der handelnden Akteur*innen im Bereich der Remote-Labore ungemein wichtig sind, damit anhand der bereits erzielten Ergebnisse im Sinne von Best-Practice-Lösungen und weiterer Standardisierungen gemeinsame Weiterentwicklungen effizienter und effektiver durchgeführt werden können.

Pablo Orduña, Luis Rodriguez-Gil, Ignacio Angulo, Unai Hernandez, Aitor Villar und *Javier Garcia-Zubia* beschreiben in ihrem Beitrag „weblablib: Ein neuer Ansatz zur Einrichtung von Remote-Laboren" aktuelle technische Entwicklungen für den Aufbau und die Organisation eines umfassenderen Verbunds von Remote-Laboren. Aufbauend auf dem von ihnen entwickelten Remote Laboratory Management System (RLMS) „WebLab-Deusto" zeigen sie eindrucksvoll auf, wie Remote-Labore von unterschiedlichen Institutionen gemeinsam genutzt und an jedem Standort technisch auf einfache Weise in die Lehre eingebunden werden können.

Unter dem Titel „Künstliche Intelligenz im Lehr-Lernlabor“ befasst sich *Karsten Lensing* in einer Literaturanalyse mit gegenwärtigen und zukünftigen Einsatzmöglichkeiten von KI-basierten Informations- und Assistenzsystemen in hochschulischen Laborumgebungen. Im Ergebnis zeigen sich insbesondere die kognitiven KI-Assistenzfunktionen im Zusammenspiel mit einer Individualisierung von Lehr-Lernprozessen als bedeutsam. Am Ende des Beitrags werden die Prämissen für eine Integration KI-basierter Assistenzsysteme anhand tätigkeitsbezogener Kompetenzansprüche antizipiert, um Möglichkeiten zur Entwicklung einer zukunftsorientierten Labordidaktik aufzuzeigen.

Den Abschluss bildet ein per E-Mail geführtes internationales Expert*innenschreibgespräch zwischen *Dominik May, Claudius Terkowsky, Gustavo R. Alves, Michael E. Auer, Kalyan Ram Bhimavaram, Manuel Castro, Alexander A. Kist, Pablo Orduña* und *Valerie Varney*. Unter dem Titel „Ausblick: Welche Rolle spielen Online-Labore für die Zukunft der Laborlehre?” analysieren und diskutieren sie ihre langjährigen Erfahrungen und formulieren diskursiv und anschaulich verschiedene didaktische, technische und organisatorische Gelingens- und Misslingensbedingungen für die Zukunft von Online- bzw. Cross-Reality-Laboren in der Hochschullehre.

Wir möchten uns bei allen mitwirkenden Autorinnen und Autoren für ihr sehr engagiertes, diszipliniertes und gleichzeitig kreatives Mitwirken insbesondere unter den besonderen Bedingungen der COVID-19-Pandemie und der damit verbundenen gänzlich unerwarteten zusätzlichen Aufgaben und Herausforderungen ganz herzlich bedanken. Die gemeinsamen Diskussionen mit allen Beteiligten waren sehr inspirierend und haben zu vielen neuen Einsichten geführt. Den Lesenden dieses Sammelbands wünschen wir eine ebenso anregende Lektüre und hoffen, mit dem Buch Inspirationen und Impulse zur Weiterentwicklung der Laborlehre liefern zu können.

Dortmund, im Oktober 2020

Claudius Terkowsky
Dominik May
Silke Frye
Tobias Haertel
Tobias R. Ortelt
Sabrina Heix
Karsten Lensing

Teil I:
Labordidaktik und Kompetenzentwicklung

Forschendes Lernen im Labor: Labordidaktische Ansätze zwischen Hands-on und Cross-Reality

Claudius Terkowsky, Dominik May, Silke Frye

Abstract

Labore als Lehr-Lernumgebung sind seit mehr als 180 Jahren ein elementarer Bestandteil der natur- und ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung an Hochschulen. Von der praktischen Demonstration theoretischer Zusammenhänge im Rahmen einer Experimentalvorlesung bis hin zum selbstständigen Experimentieren und Forschen im Rahmen von Abschlussarbeiten begegnet das Format *Labor* Studierenden technischer Studiengänge in unterschiedlichster Form immer wieder, teils mit sehr unterschiedlichen didaktischen Anforderungen. Bis heute haben sich die unterschiedlichsten Labortypen in der praktischen Lehre entwickelt. Die forschungsbasierte didaktische Auseinandersetzung mit Lehr-Lernzielen im Labor zeigt jedoch sowohl eine lange Historie als auch die Wiederkehr der immer gleichen Diskussion. Es wird deutlich, dass – trotz des unumstrittenen Potentials des Labors für die Lehre – häufig der Aufbau von Wissen und Fertigkeiten anstelle der Entwicklung von Kompetenzen im Vordergrund steht. Der vorliegende Beitrag beschreibt unterschiedliche Labortypen in der Lehre, mit dem Labor verbundene Lernziele sowie den Aspekt des forschenden Lernens im und mit dem Labor und schließt mit der Erörterung von Cross-Reality-Laboren als neue Entwicklungen im Kontext der Laborlehre.

Schlüsselwörter: Labordidaktik, forschendes Lernen, Lernziele, Cross-Reality-Labore

1 Einleitung

> "The potential for laboratory is enormous. The laboratory exercise at its best is the fundamental intellectual task of extracting truth from ambiguity, signal from noise. It is a lesson in comparing and evaluating evidence, a central part of intellectual maturity. Unfortunately, many laboratory programs are not taught in a way that brings this out. But this should not cause us to abandon laboratory but to improve it" (Pickering, 1993, S. 700).

Labore sind in der technikbezogenen Lehre, Forschung und Entwicklung weitverbreitet und finden sich in Schulen und Hochschulen, in Industrie-, Regierungs- oder Militäreinrichtungen und sogar an Bord von Flugzeugen, Schiffen, Raumfahrzeugen und Raumstationen. Kurzum, Labore sind elementarer Bestandteil technikbezogenen Lernens und Arbeitens. Was aber ist ein Labor eigentlich? Unter einem Labor

kann allgemein eine Umgebung verstanden werden, in der wissenschaftliche oder technologische Forschungen, Entwicklungen, Experimente, Tests oder Analysen durchgeführt werden. Naturwissenschaftlich geprägte Labore etwa befassen sich mit der empirischen Analyse von stabilen oder veränderlichen materialen Eigenschaften von Festkörpern, Flüssigkeiten oder Gasen und deren Bestimmung in hinreichend verallgemeinerbaren abstrakten Gesetzmäßigkeiten. In ingenieurwissenschaftlich geprägten Bereichen wiederum werden technische Labore dazu genutzt, um Geräte, Prozesse und Produkte zu entwerfen, zu bauen oder auf ihre konkrete Funktionserwartung hin zu testen (Kornwachs, 2015, S. 71 ff.).

Labore als Lehr-Lernumgebung sind seit mehr als 180 Jahren fester Bestandteil der natur- und ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung an Hochschulen (Schmidgen, 2011). Sie sind sowohl in anwendungs- als auch in forschungsorientierten Studienangeboten auf allen Ebenen von zentraler Bedeutung (Tekkaya et al., 2016). Das Lehr-Lernlabor kann in diesem Kontext definiert werden als Lehrveranstaltung, Lernort oder Lernumgebung, in der Studierende im Rahmen ihres natur- oder ingenieurwissenschaftlichen Studiums unter kontrollierten Bedingungen lernen, Handlungen des empirischen Forschens wie Beobachten, Messen, Experimentieren, Testen und Analysieren durchführen zu können (Tamir, 1976; Trumper, 2003). Zu diesem Zweck müssen sie mit einer Vielzahl von elektronischen oder mechanischen Werkzeugen, Geräten und Versuchsaufbauten zielgerichtet umgehen lernen, um die intendierten fachlichen und überfachlichen Lernziele erreichen zu können (Sundberg et al., 2008, S. ix). Empirisch-praktisch forschend erlernen und erfahren die Studierenden grundlegende Theorien, Modelle und Konzepte, lernen zunehmend komplexere fachliche Probleme zu lösen oder eigenständig mit komplexen Laborsystemen erfolgreich zu arbeiten. Sie entwickeln im Labor sowohl fachbezogene als auch fachübergreifende Kompetenzen im Kontext des forschenden wissenschaftlichen Arbeitens und werden so in ihrer Beschäftigungsfähigkeit gefördert, indem sie nicht nur wissenschaftliche, sondern auch berufsfeldrelevante Kompetenzen erwerben (Sheppard et al., 2009, S. 61 f.). Die konkrete Ausgestaltung dieses Kompetenzerwerbs ist jedoch kein statisches Konstrukt – weder in Bezug auf die Inhalte noch auf die technische Ausgestaltung. Es unterliegt heute vielmehr der Dynamik einer immer weiter fortschreitenden (digitalen) Transformation und dem damit einhergehenden technologischen Wandel der Labore. Der hier einzuführende Begriff Cross-Reality-Labor soll dabei die Synthese der physischen und virtuellen Realität von Laboren in vernetzten, simulierenden, immersiven, erweiterten oder gemischten Umgebungen beschreiben. Die zukünftig wichtige didaktische Auseinandersetzung mit Laboren wird darin bestehen, zwischen diesen Optionen wählen zu können und zu bestimmen, inwieweit die eine oder andere von ihnen die wissenschaftliche und berufsfeldrelevante Kompetenzentwicklung für ein Lernen und Arbeiten 4.0 ermöglichen, erleichtern oder auch verhindern wird (May, 2020; Terkowsky et al., 2019a).

Das Labor lässt sich als außergewöhnliche Umgebung charakterisieren, in der – auf dem jeweiligen Entwicklungsstand der Technik – natur- und ingenieurwissenschaftliche Theorie, Empirie, Praxis und Studierende in besonders kompetenzförder-

licher Weise aufeinandertreffen. In der universitären Praxis zeigt sich jedoch, dass eine Vielzahl von Laborübungen und -praktika, Experimentieranleitungen und Lernmaterialien für Studierende diese Potentiale nicht immer ausschöpfen; vielmehr stützen viele Lehr-Lernveranstaltungen sich noch immer auf eher traditionelle induktiv-instruktive und allein auf das Fachliche gerichtete Ansätze der Labordidaktik. Sie sind eher an der Vermittlung von Fachwissen und Fertigkeiten orientiert und weniger kompetenzförderlich bzw. beschäftigungsbefähigend gestaltet (Tekkaya et al., 2016). Kompetenzen zu entwickeln bedeutet aber nicht nur, Wissen und Fertigkeiten aufzubauen, sondern „die Fähigkeit, selbstorganisiert und kreativ Herausforderungen zu bewältigen. (...) Erfolgreiche Kompetenzentwicklung setzt Eigenverantwortung und Selbstorganisation, Lernen in realen Herausforderungssituationen sowie die Anwendung und Bewährung in der eigenen Lebenswelt voraus“ (Erpenbeck & Sauter, 2016, S. 2). Hier zeigen sich noch bedeutende Potentiale für die kompetenzorientierte Nutzung von Lehr-Lernlaboren.

Insbesondere das durch die fortschreitende digitale Transformation zunehmend erforderliche Lernen 4.0, das ein kompetenzförderndes agiles, selbstgesteuertes, kreatives und kollaborativ forschendes Lernen mit digital erweiterten Cross-Reality-Technologien (XR) erfordert, wird in Laboren bislang allenfalls randständig umgesetzt (May, 2020; Terkowsky & Haertel, 2013; Terkowsky et al., 2016; Terkowsky et al., 2019a; Terkowsky et al., 2019b; Kammerlohr et al., 2020).

Gerade vor dem Hintergrund der Industrie 4.0 wird die Hochschulbildung vor neue Herausforderungen gestellt, die auch Einfluss auf die didaktische Gestaltung des Labors als Lehr-Lernumgebung haben. Um Studierende angemessen auf ihre zukünftigen beruflichen Anforderungen in Kontext von Industrie 4.0 vorzubereiten, fordert der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) in einer aktuellen Studie aus dem Jahr 2019 unter dem Titel „Ingenieurausbildung für die Digitale Transformation“ erstens mehr digitale Inhalte in ingenieurwissenschaftlichen Studiengängen, zweitens die integrale und breite Förderung von digitalen Fachkompetenzen sowie drittens die Ausbildung der dafür notwendigen Lehrkompetenzen aufseiten der Lehrenden (Gottburgsen et al., 2019). Nach einer Studie des Stifterverbands aus dem Jahr 2016 unter dem Titel „Hochschulbildung für die Arbeitswelt 4.0“ bedeutet Arbeitswelt 4.0 für die Hochschulbildung jedoch keine grundsätzliche Abkehr von bisherigen Bildungszielen, sondern vielmehr deren Erweiterung um digitale Bildungsinhalte vor dem Hintergrund einer zunehmenden Verzahnung von akademischen und beruflichen Kompetenzen (Stifterverband, 2016). Erfolgreiches Arbeiten in der Industrie 4.0 bedeutet das gelingende Ineinandergreifen fachbezogener und fachübergreifender Kompetenzen, die um digitale Kompetenzen erweitert werden, um in „offenen [akademischen und beruflichen] Situationen, selbstorganisiert und kreativ handeln zu können“ (Erpenbeck & Sauter, 2016, S. 22).

Wie lässt sich das Lehren und Lernen im Labor vor dem Hintergrund dieser Anforderungen reflektieren und die eigene Lehre ggf. überarbeiten, um den Ansprüchen eines im Werden befindlichen Lernens und Arbeitens 4.0 gerecht zu werden, ohne existierende akademische Zielsetzungen außer Acht zu lassen? Wie kann es

gelingen, das Neue, Kompetenzorientierte und Digitale zu ermöglichen, ohne das Traditionelle und Fachliche zu vernachlässigen? Zur zumindest teilweisen Beantwortung dieser übergeordneten Fragen geht der Beitrag folgenden Leitfragen nach:

1. Welche labordidaktischen Formate gibt es in der Lehre, und wie lassen sich diese typisieren (Kap. 2)?
2. Welche Lernziele können mit dem Labor verfolgt werden (Kap. 3)?
3. Wie lässt sich forschendes Lernen im Labor definieren und systematisieren (Kap. 4)?
4. Welche Potentiale bergen technische und digitale Innovationen für Labore im Kontext von Lernen und Arbeiten 4.0, und wie können diese Potentiale die Zukunft der Laborlehre verändern, zum Beispiel im Hinblick auf Cross-Reality-Umgebungen (Kap. 5)?

2 Labordidaktische Formate in der Lehre

Labore dienen je nach Schwierigkeitsgrad unterschiedlich komplexen Zielsetzungen in der Lehre. Dabei spielen sowohl ihr zeitliches Auftreten im Curriculum als auch das von den Studierenden erwartete fachlich-inhaltliche und methodische Vorwissen beim didaktischen Design eine entscheidende Rolle. Labore können unabhängig von anderen Lehrveranstaltungsformaten stattfinden (1), mit diesen additiv kombiniert (2) oder in sie integriert durchgeführt werden (3) (Sheppard et al., 2009, S. 69–74). Inzwischen sind eine Vielzahl verschiedener labordidaktischer Formate im Gebrauch, die im folgenden Entwurf einer Typisierung vorgestellt werden:

1. **Mini-Labs** sind zeitlich und inhaltlich stark begrenzte Laboreinheiten in übergeordneten hochschulischen Lehrveranstaltungen, die zur Vorbereitung auf umfassendere projektbasierte Laborarbeiten dienen (Lewis, 2011).
2. Das klassische **Anfängerpraktikum** in den Naturwissenschaften oder das **Grundlagen-** bzw. **Lehr-Lernlabor** in den Ingenieurwissenschaften dienen in erster Linie dem empirischen Nachvollziehen fundamentaler wissenschaftlicher Erkenntnisse (Bruchmüller & Haug, 2001).
3. Das **Entwicklungs-** oder **Konstruktionslabor** zielt auf die Entwicklung von Prozessen, Produkten oder Konstruktionen zur Lösung konkreter Problemstellungen (a. a. O.).
4. Im **Forschungslabor** wird neues Wissen erzeugt, wobei oft offen gehaltene Fragestellungen die Ausgangsbasis bilden (a. a. O.).
5. Das **Integrierte Labor** dient der Erweiterung anderer Veranstaltungsformate durch gelegentliche Integration und Demonstration von Laborversuchen. Eine Theorievorlesung wird damit zumindest zeitweise zu einer Experimentalvorlesung (a. a. O.).
6. Das **praxisorientierte Projektlabor** umrahmt den wissenschaftlichen Erkenntnisprozess mit Verfahrensweisen des Projektmanagements. Ziel dieser Art von

Laboren ist es, die Studierenden auf experimentelles Arbeiten in der späteren industriellen Praxis vorzubereiten (a. a. O.).

7. In der **Lehr-Lernfabrik** soll ein konkretes Produkt durch die Gestaltung von Produktions- und Logistikprozessen optimal produziert werden. Sie stellt eine projekt- und problemorientierte Lernform dar, in der die Studierenden vor allem Eigeninitiative und Selbstorganisation entwickeln sollen (Kauffeld & Reining, 2019).
8. Im **Game-Based Learning Lab** werden Studierende durch eine interaktive „Story" zur Bewältigung spezifischer Problemstellungen geführt. Diese digitalen Lernspiele oder „Serious Games" zielen darauf ab, motivierende Effekte aus digitalen Unterhaltungsspielen für wissenschaftliches Lernen nutzbar zu machen, etwa durch Vergabe von Punkten für erfolgreiches Handeln, das Sammeln von Belohnungen, die Steigerung von Schwierigkeitsstufen je nach Spielerfolg oder die Herausforderung durch den Wettbewerb gegen andere Mitspieler oder Teams usw. (Callaghan et al., 2013).
9. **Fablabs** und **Maker-Spaces** sind Werkstätten mit offenem oder lehrveranstaltungsbezogenen Zugang, die Studierenden selbstorganisiertes und selbstgesteuertes Lernen mit modernen Produktionsmitteln auf der Basis von industriellen Fertigungsverfahren ermöglichen (Haertel et al., 2017).
10. **Walk-in Labs**, **Forschungs- oder Lernwerkstätten** schließlich sind tutoriell betreute offene oder niederschwellige Angebote und Lernräume, die einerseits den Studierenden bei fachlichen Schwierigkeiten Hilfestellung geben, andererseits Möglichkeiten für studentisches selbstgesteuertes forschendes Lernen eröffnen oder Angebotsstrukturen von Fablabs, Maker-Spaces und Cross-Reality-Laboren (siehe Abschnitt 4) integrieren. Sie können damit einen Beitrag zur Erhöhung der „Selbstwirksamkeitserwartung" (Bandura, 2012) und damit zur Verhinderung von Studienabbrüchen leisten (Schwingen et al., 2013).

Es stellt sich nun die Frage, welche grundsätzlichen laborbezogenen Lernziele mit dieser Fülle an Laborformaten verfolgt werden sollen. Zu einer gelingenden didaktischen Analyse gehört die Definition von Lernzielen, in der Regel auf Basis vorformulierter Lernzieltaxonomien, die einen Rahmen abstecken, wie die konkreten Lernziele eines jeden Versuchs exakt formuliert werden können.

3 Lernziele im Labor

Unter *Lernzielen* werden schriftlich formulierte Aussagen verstanden, die aus der Studierendenperspektive auf den angestrebten Lerngewinn hinweisen, der von ihnen durch die Teilnahme an *vorher definierten Lehr- und Lernaktivitäten* erwartet wird und deren Erreichen durch darauf bezogene *Lehr-Lernerfolgskontrollen* gemessen wird (Biggs & Tang, 2011). Diesen Zusammenhang stellen Biggs und Tang (a. a. O.) durch das Modell des ‚Constructive Alignment' im Detail vor.

Im Hochschulbereich erlangte vor allem die sechsstufige Taxonomie von kognitiven Lernzielen nach Bloom und ihre Überarbeitung nach Anderson und Krathwohl große Verbreitung (Anderson, 2009). Weniger beachtet wurde die explizit für den Hochschulbereich entwickelte, erstmals 1982 veröffentlichte fünfstufige SOLO[1]-Taxonomie nach Biggs (Biggs & Tang, 2011). Beide Taxonomien haben den Nachteil, dass insbesondere laborbezogene Lernziele darin nur unspezifisch konzeptualisiert werden. Nach der Bloomschen Taxonomie wäre das Labor vor allem dem „Anwenden" (Stufe 3) der experimentellen Methode zum „Analysieren" (Stufe 4) einschlägiger Phänomene zuzuordnen. Nach der SOLO-Taxonomie werden Anwenden und Analysieren der Taxonomie-Stufe „relational" zugeordnet, ohne genauer darauf einzugehen, wie die Umsetzung im konkreten Fall der Laborarbeit didaktisch sinnvoll ausgestaltet werden kann (vgl. Tekkaya et al., 2016).

Des Weiteren nutzen gängige Akkreditierungsrichtlinien für ingenieur- und naturwissenschaftliche Studiengänge (vgl. z. B. ABET; ASIIN) aufgrund ihrer übergeordneten Perspektive seit jeher generische Formulierungen in Bezug auf zu erreichende Lernziele. Mit diesen kann insbesondere das Lehren und Lernen in Laboren nur unzureichend qualitätssichernd konzeptualisiert werden. Dies führt in der Folge dazu, dass das Lehren und Lernen im Labor und seine vergleichsweise hohe Kostenintensität (Material, Personal) immer wieder unter Legitimationsdruck gerät, denn Lernziele, die sich an der Vermittlung reproduzierbaren Fachwissens und darauf bezogener Fertigkeiten orientieren, lassen sich auch in anderen Veranstaltungsformaten erfolgreich verfolgen. Um das besondere Potential des Labors als Lehr-Lernort und zur Verfolgung von kompetenzorientierten Lernzielen auszuschöpfen, bedarf es entsprechend besonderer, explizit für das Labor formulierter Lernziele, wie Cunningham in einer ersten großen Übersichtsarbeit schon 1946 zeigte (Cunningham, 1946). Dass diese Forderung über die letzten Jahrzehnte hinweg weitgehend ignoriert wurde, zeigen Hofstein und Lunetta (1982, 2004), Hofstein und Mamlok-Naaman (2007) sowie Brinson (2015).

Möglicherweise aufgrund dieser bis dato nur unzureichend formulierten Lernziele für die Laborlehre nahm sich 2002 eine Gruppe von ca. 50 amerikanischen Hochschullehrenden des erkannten Defizits an. Sie entwickelten dreizehn grundlegende Lernziele für die ingenieurwissenschaftliche Laborlehre, die von Feisel und Rosa 2005 im Journal of Engineering Education publiziert wurden und seither die meistzitierte Lernzieltaxonomie für das Labor darstellen (Feisel & Rosa, 2005). Später wurde die Taxonomie von Felder und Brent für die Lehre in MINT-Fächern überarbeitet (Felder & Brent, 2016, S. 84–86).

Die dreizehn Lernziele des ingenieurwissenschaftlichen Lehr-Lernlabors nach Feisel und Rosa (2005), die sich ebenso für die naturwissenschaftliche Lehre eignen, werden im Folgenden in einer übersetzten Form und als Lernziele formuliert dargestellt:

1 SOLO steht für "Structure of the Observed Learning Outcome". Darunter werden fünf aufeinander aufbauende Komplexitätsstufen von Lernzielen verstanden (siehe: https://www.johnbiggs.com.au/academic/solo-taxonomy/)

Nach dem erfolgreichen Absolvieren der Laborveranstaltung sind die Studierenden in der Lage ...

1. **Experimentieren:** ... experimentelle Untersuchungsdesigns zu entwerfen und zu planen; Experimente zum Gewinnen von auswertbaren Daten zu entwickeln und auszuführen.
2. **Geräte und Instrumente auswählen:** ... alle benötigten Sensoren, mechanischen und elektrotechnischen Instrumente, Gerätschaften und Software-Werkzeuge zur Durchführung von Messungen physikalischer Größen und Prozessvariablen auszuwählen und anzuwenden.
3. **Daten auswerten:** ... die experimentell gewonnenen Daten gemäß methodischer Standards auszuwerten, die Ergebnisse vor dem Hintergrund relevanter wissenschaftlicher Prinzipien zu interpretieren; wissenschaftlich korrekte Schlussfolgerungen zu ziehen und abzusichern sowie alle relevanten Messfehler und Messunsicherheiten statistisch zu berechnen.
4. **Theoretisches Modellieren**: ... die Anwendungsbereiche grundlegender theoretischer Modelle, bezogen auf ihre Stärken und Begrenzungen, für die Vorhersage realer Systemverhalte zu erkennen und einzuschätzen.
5. **Fehler suchen und beheben:** ... Gründe für das Abweichen von experimentell gewonnenen Ergebnissen von der handlungsleitenden Hypothese zu ermitteln und daraufhin das experimentelle Vorgehen entweder zu korrigieren oder eine Anpassung des theoretischen Models vorzunehmen, auf dem die Hypothese beruht.
6. **Ingenieurgemäß konstruieren:** ... spezifische Methoden zum Entwerfen, Konstruieren, Herstellen und/ oder Zusammenbauen von Teilen, Baugruppen oder technischen Systemen anzuwenden.
7. **Frei und kreativ denken**: ... eigenständige kreative Ideen für experimentelles Systemdesign oder zur Lösung realweltlicher Problemstellungen zu entwickeln.
8. **Sicher und verantwortungsvoll handeln:** ... Gesundheits-, Arbeitssicherheits- und Umweltaspekte für Labore und Experimentalsysteme zu erörtern und korrekt einzuschätzen und entsprechende Gesetze und Richtlinien strikt zu befolgen und einzuhalten.
9. **Ergebnisse präsentieren und diskutieren:** ... alle für die Laborarbeit relevanten mündlichen, schriftlichen und visuellen Kommunikationsformate und Präsentationsmedien zum Austausch über Laborarbeit zu beherrschen und anzuwenden; das reicht von kurzen mündlichen und schriftlichen Zusammenfassungen über Laborberichte bis hin zu umfassenden Präsentationen im Stil von wissenschaftlichen Artikeln und Vorträgen mit Diskussion.
10. **In Teams arbeiten:** ... effektiv in Teams zu arbeiten; d. h. beispielsweise, Funktionen, Verantwortlichkeiten und Aufgaben festzulegen und zu verteilen; individuelle und gemeinsame Verantwortung zu übernehmen; auftretende Probleme gemeinsam zu lösen; Beiträge aller Teammitglieder gleichwertig zu berücksichtigen; Deadlines für den gemeinsamen Abschlussbericht einzuhalten.

11. **Quellen und Methoden transparent nachvollziehbar angeben:** ... alle wissenschaftlichen Standards für die Erhebung von Daten und die Darstellung von gewonnenen Ergebnissen zu befolgen; alle relevanten erwarteten und unterwarteten Ergebnisse wahrheitsgemäß und nachvollziehbar darzustellen; alle verwendeten Methoden und gewonnenen Daten wahrheitsgetreu anzugeben und alle weiteren verwendeten Quellen korrekt zu benennen.
12. **Material- und Geräteverhalten wahrnehmen (Perzeption/Sensorik):** ... die menschlichen Sinne bei der Laborarbeit zur direkten Beobachtung von Strukturen und Prozessen oder zur indirekten Beobachtung über dazwischengeschaltete Messgeräte und Apparaturen zu nutzen.
13. **Laborequipment manipulieren (Psychomotorik):** ... alle mechanischen und elektronischen Werkzeuge, Geräte, Versuchsaufbauten, Computer und sonstige Ressourcen des Labors zu handhaben, zu bedienen, zu steuern und zu modifizieren.

Die dargestellten Lernziele dienen in erster Linie als Entwicklungs-, Gestaltungs- und Entscheidungshilfe bei der didaktischen Konzeptionierung von Laborveranstaltungen und der darin enthaltenen Laborversuche. Die Liste erhebt weder den Anspruch der vollständigen Beschreibung des Lehrens und Lernens im Labor noch können alle Lernziele in jedem Labor vollständig adressiert werden noch wird durch die Darstellung eine bestimmte Bearbeitungsreihenfolge vorgegeben. Dennoch ist festzustellen, dass die oben aufgezeigte Auflistung an das Lehren und Lernen im Labor einen hohen Anspruch stellt und sich mit den zugrunde liegenden Lernzielen sowohl auf der Ebene konkreter Fertigkeiten als auch auf der Ebene einer berufsfeldorientierten Kompetenzentwicklung bewegt.

Felder und Brent (2016) vertreten darüber hinaus die Auffassung, dass sich diese Art von Lernzielen nicht mit den in der aktuellen Praxis üblichen, weitverbreiteten Laborpraktika und Lehr-Lernlaboren in Einklang bringen lassen, da diese in der Regel einen Versuch mit klar formulierter Aufgabenstellung pro Laborveranstaltungstermin vorsehen und jeweils mit einem vergleichsweise kurzen Laborbericht abschließen. Diese üblichen Lehr-Lernlabore bilden die spätere berufliche Praxis in Forschung und Entwicklung, bei der in der Regel auch keine Skripten mit klar umrissenen Aufgabenstellungen ausgegeben werden, nicht genügend ab. Vielmehr ist die ingenieurwissenschaftliche Praxis geprägt von zunächst unvollständigen Problemdefinitionen und unklaren Lösungsansätzen. Hier ist also ein klarer Widerspruch zwischen dem Anspruch einer berufsfeldvorbereitenden Zielsetzung für das Labor und der in vielen Fällen gelebten Praxis zu erkennen. Seine Auflösung kann jedoch in beide Richtungen erfolgen und soll hier nicht konkret vorgegeben werden. So können Lehr-Lernlabore zwar weiterhin für mehr oder weniger geleitetes Nachvollziehen von Theorien genutzt werden; allerdings muss eine Vorbereitung auf eine berufliche Praxis (auch in Bezug auf die von Feisel und Rosa (2005) dargelegten Lernziele) dann klar an anderer Stelle im Studium stattfinden und kann nicht als Anspruch an das Labor gestellt werden. Im Umkehrschluss kann ein Labor entspre-

chend der komplexen Lernziele gestaltet werden (siehe zum Beispiel das Entwicklungs- oder Forschungslabor). Dies bedarf jedoch einer komplexeren didaktischen Gestaltung. Eine finale Ergebnispräsentation sollte dann beispielweise nicht in Form eines kurzen Laborberichts erfolgen, sondern in Form und Stil eines vollständigen wissenschaftlichen Artikels. Darüber hinaus können verschiedene kürzere schriftliche Zusammenfassungen für unterschiedliche Zielgruppen vorgesehen werden und die Laborergebnisse schließlich in einer mündlichen Präsentation vorgestellt und diskutiert werden (für vergleichbare Vorgehensweisen siehe Brownell et al. (2012) oder Sacher und Bauer sowie Merli, Kanngießer und Möller im vorliegenden Band). Dies bedarf, wie erwähnt, einer komplexen didaktischen Planung und Durchführung und stößt in der universitären Praxis gewiss auch an Kapazitätsgrenzen.

So gewendet, kann jedoch gerade das Labor im Studium einen Ort darstellen, an dem die Verbindung zwischen Berufsfeldvorbereitung, Lehre, Studium und schließlich Forschung in den Mittelpunkt rückt. Vor diesem Hintergrund wird nach Schwingen et al. (2013) Lernen im Kontext von Forschung ausgerichtet, und so wird aus forschungstypischen Tätigkeiten ein didaktisches Format.

4 Forschendes Lernen im Labor

Die Bereiche „Forschen“ und „Lernen“ stehen in der Lehre für Studierende häufig in keinem erkennbaren Zusammenhang. Huber (2012) beschreibt unter anderem „komplexere Laboraufgaben mit Offenheit der Ergebnisse, nicht nur der einen richtigen Lösung (open ended labs)“ als eine Struktur, in der forschendes Lernen stattfinden kann. Eine Verknüpfung dieser beiden Bereiche soll durch das forschende Lernen realisiert werden (Schwingen et al., 2013). Die Forderung nach Einführung des forschenden Lernens im hochschulischen Labor bzw. dessen Ausweitung ist aber keinesfalls neu. Schon 1918 konstatierte Mann in einer ersten umfassenden Studie über den Entwicklungsstand der Engineering Education in den USA, dass für die Studierenden das Hautproblem bei den meisten aktuellen Laborarbeiten wahrscheinlich darin bestünde, die Anweisungen intelligent zu befolgen, statt Antworten auf Fragen zu finden, die nicht ohne Labortests beantwortet werden könnten (Mann, 1918). Im Folgenden soll daher eine Verbindung der Labors als Lehr-Lernort und dem forschenden Lernen als didaktische Konzept aufgezeigt und dabei gezielt auch die historische Entwicklung dargelegt werden.

4.1 Zur Entwicklung des forschenden Lernens im Labor

Erste systematischere Entwicklungen des forschenden Lernens in natur- und ingenieurwissenschaftlichen Laboren lassen sich bis in die späten 1940er Jahre zurückverfolgen. Altschul (1951) berichtet in dem Artikel „Student ‚Research‘ in a Basic Science Course“ von ersten Laborveranstaltungsformaten, in denen die allgemein vorherrschenden straff organisierten Lehr-Lernlabore durch studentische Forschungsprojekte schon in den Anfangssemestern ersetzen wurden. Dies diente dem Ziel,

nicht nur in der Vorlesung behandelte Inhalte im Labor nachvollziehend zu bearbeiten, sondern Studierenden die Möglichkeit zu bieten, schon früh empirisch forschend zu lernen, um damit von Anfang an die Tätigkeit des aktiven Forschens und die sich dadurch steigernde Selbstwirksamkeitserwartung zu fördern. Schwab (1960) griff diese Entwicklung auf. Er kritisierte dabei insbesondere die gesellschaftlichen und ökonomischen Auswirkungen von in erster Linie auf dem Erlernen von Standardprozeduren beruhenden Lehrplänen in den Natur- und Ingenieurwissenschaften („stable inquiry"), die zu wenig auf die (r)evolutionären Kräfte des forschenden Lernens zur Ausbildung dessen, was er „fluid inquiry" nannte, setzen würden. Dies hätte zur Folge, dass Absolventinnen und Absolventen zwar sehr gut und schnell Standardlösungen auf Standardprobleme anwenden können („standard or conventional engineering"), aber neuartige Probleme, die auch neuartige und unkonventionelle Problemlösungen erfordern („original engineering"), mit den etablierten Standardlösungen nicht adäquat gelöst werden könnten. Für das Labor stellte sich für ihn dieser Mangel an Kreativitätsförderung folgendermaßen dar:

> „The laboratory ceases to be a place where statements already learned are merely illustrated and where perception of phenomena occurs within the restrictive structuring of terms and concepts already laid down. It ceases, too, to be preoccupied with standardized techniques." (Schwab, 1960, S. 187)

Schwab prägte hierzu die Begriffe der Offenheit („openness") und Erlaubnis („permissiveness"), um auf drei Ebenen ihre sukzessive Zunahme hin zu immer mehr selbstständigem, selbstgesteuertem und selbstorganisiertem Handeln im Labor bei gleichzeitiger schrittweiser Rücknahme der einschränkenden Vorgaben bei den Aufgabenstellungen zu beschreiben. Dadurch sollten Kompetenzen für „fluid inquiry" als Voraussetzung für „original engineering" besser gefördert werden:

> „Three levels of openness can be discriminated. At the simplest level, the manual poses problems and describes ways and which the student can discover relations he does not already from his books. At a second level, problems are posed by the manual, but methods as well as answers are left open. At a third level, problem, answer, and method are left open: the student is confronted with a raw phenomenon" (Schwab, 1960, S. 187).

An die Überlegungen und Ausführungen von Schwab schließen sich in der Folge eine Reihe von Untersuchungen und Veröffentlichungen an, die alle eine Unterscheidung unterschiedlicher didaktischer Lehr-Lernformate im Labor darlegen. Dabei spielt der Freiheitsgrad der Lernenden bzw. der Forschenden eine zentrale Rolle.

Herron (1971) etwa entwickelt die Idee von Schwab weiter, in dem er den drei von Schwab beschriebenen Ebenen der zunehmenden „openness and permissiveness" noch eine Ebene „0" ohne Freiheiten und Erlaubnisse in den Aufgabenstellungen voranstellt. Sein Konzept besteht somit aus vier konkreten Ebenen (null bis drei) des forschenden Lernens mit jeweils unterschiedlich definierten Freiheitsgraden – vom vollständigen Nachvollziehen von Forschungsfrage, Lösungsweg und korrektem Ergebnis bis hin zur Unbestimmtheit aller drei Elemente (Herron, 1971). In der

Folge analysierte Herron mit seiner Systematik die Labmanuals von 52 Physiklaborkursen und 62 Biologielaborkursen. Er arbeitete heraus, dass von den Aufgabenstellungen in den 52 Physiklaboren 39 auf Ebene 0, 11 auf der Ebene 1, zwei auf Ebene 2 und keines auf Ebene 3 lagen. In den Biologielaboren ergab sich folgendes Bild: 45 von 62 Laborübungen befanden sich auf Ebene 0, 13 auf Ebene 1, vier auf Ebene 2 und erneut keine auf Ebene 3 (a. a. O.). Tafoya, Sunal und Knecht überarbeiten diese vier Ebenen und ersetzen sie durch die Begriffe „confirmation inquiry", „structured inquiry", „guided inquiry" und „open inquiry" (Tafoya et al., 1980).

Tekkaya et al. (2016, S. 89) wiederum nutzen dieses Modell und untersuchen damit 36 Jahre nach Tafoya et al. und 45 Jahre nach Herron 18 fertigungstechnische Laborveranstaltungen an deutschen Universitäten. Sie kommen bei der Auswertung des durch teilnehmende Beobachtung erhobenen Datenmaterials mittels kategoriebasierter Inhaltsanalyse zu einem ähnlichen Ergebnis: Aufgabenformen der Ebene 1 sind das vorherrschende Format sowohl in Bachelor- also auch in Masterstudiengängen. Die Ebene 3 („open inquiry") hingegen wird in beiden Studiengängen nur marginal adressiert.

Kirschner und Meester (1988) hingegen schlagen ein anderes, ebenfalls viergliedriges Konzept vor. Sie unterscheiden zwischen dem „academic or formal laboratory" zum Veranschaulichen von Naturgesetzen und Konzepten (1), dem „experimental laboratory" für entdeckendes offenes Lernen (2) und dem „divergent laboratory", ein Kompromiss der ersten beiden. Es gibt einerseits vorgegebene standardisierte Aufgabenstellungen, aber auch genügend Freiraum für das Einschlagen eigener Richtungen beim Experimentieren (3). Als vierten Ansatz erläutern sie Laborveranstaltungskonzepte wie das „Experimentelle Seminar", bei dem Expert*innen und Studierende gemeinsam experimentieren und diskutieren und die Studierenden so von den Expert*innen lernen können (4). Bruchmüller und Haug (2001) hingegen schlagen eine drei- bzw. vierstufige Klassifikation von der Vorlesung mit integrierten Laborvorführungen bis hin zum selbstständigen wissenschaftlichen Arbeiten im Labor zum Anfertigen von Abschlussarbeiten vor. Sheppart et al. (2009) entwickelten eine dreistufige Klassifikation mit Experimentalvorlesung und stark angeleiteten und im zu befolgenden Ablauf strikt vorgeschriebenen „Kochrezept"-Experimenten (1), halb-strukturierten Experimenten (2) sowie Lernen als projektbasiertes oder offenes Experimentieren (3). Terkowsky et al. (2013) schließlich formulieren Anfänger-, Fortgeschrittenen- und Expertenlevel, um anhand der jeweiligen Vorerfahrung unterschiedliche Freiheitsgrade in der Bearbeitung beschreiben und bestimmen zu können. Dabei beziehen sie sich nach Dörner auf drei aufeinander aufbauende, unterschiedlich komplexe Problemebenen mit unterschiedlich schwierigen Lösungsstrategien (Dörner, 1992). Tabelle 1 stellt alle oben genannten Konzepte der Einordnung didaktischer Ansätze und deren Stufen dar und macht sie hinsichtlich der verschiedenen Levels of Inquiry (von stark geführt bis sehr offen) vergleichbar.

Tabelle 1: Verschiedene Klassifikationen von Lehr-Lernlaboren

Schwab (1960)	Herron (1971)	Tafoya, Sunal & Knecht (1980)	Kirschner & Meester (1988)	Bruchmüller & Haug (2001)	Sheppard et al. (2009)	Terkowsky et al (2013)
		[demonstration inquiry]		**Integriertes Labor** (Vorlesung plus vertiefende Laborübung)	**demonstrations and** controlled 'cookbook' experiments (combined lecture and laboratory course; learning the fundamental concepts by following a set of clearly defined steps to arrive at a predicted outcome)	
--- simplest level: the manual poses problems and describes ways and which the student can discover relations he does not already from his books	**0**	**confirmation inquiry** (teacher presents concept or principle and student performs some exercise to confirm or re-enact it)	**academic or formal laboratory** (traditional, structured, convergent or cookbook laboratories to illustrate laws and concepts)	--- Stufe I Übungs- und Praktikumsversuche (Durchführung nach starrer Vorschrift ohne Freiheitsgrade)	--- semi-structured experiments (using the concepts to solve practical problems; students are not told exactly what to do but are given a general idea of how to solve the problem and the theories needed to do it	**instruction-based approach** (for beginner-level students: scripted guidelines and predefined experiments to solve interpolation problems)
--- second level: problems are posed by the manual, but methods as well as answers are left open.	--- 1 --- 2	--- **structured inquiry** (teacher defines task or problem to be solved by student; procedure, activities and materials are given) --- **guided inquiry** (teacher defines task or problem to be solved by student)	--- **divergent lab** (from a common start) --- **experimental lab** (open-ended, discovery oriented, unstructured project or undergraduate research laboratories)	--- Stufe II Schrittweises Hinführen zu mehr selbstständiger, kreativer, innovativer Laborarbeit, z. B. Übungsversuche mit Varianten; kleine selbstständige Aufgaben; Versuche mit open end	--- project-based and open-ended experiments (learning to work with complex systems; minimal guidance, students take the lead in the investigation	--- **problem-based learning** (for intermediate-level students; self-directed learning to solve subject-specific real-world synthesis problems)
--- third level: problem, answer, and method are left open: the student is confronted with a raw phenomenon.	--- 3	--- **open inquiry** (student define task or problem to solve; teacher supports)	--- **experimental research** (plus experimental seminar to prepare skills & procedures)	--- Stufe III Selbstständiges wissenschaftliches Arbeiten (z. B. Semester- und Qualifikationsarbeiten)		--- **research-based learning** (advanced-level learners define own research questions and conduct own experimental research to solve dialectic problems)
		[scientific inquiry (experimental research)]				

4.2 Klassifikation forschenden Lernens im Labor

Unter Berücksichtigung von Tabelle 1 und in Anlehnung an Sunal et al. (2008) und May (2017) zeigt folgende Auflistung ein Modell, das die genannten Klassifikationen und Typologien integriert. Zur Bestimmung des Verhältnisses zwischen Lehrenden- und Studierendenzentrierung, insbesondere für das forschende Lernen im Labor, schlagen wir folgende sechs mit zunehmenden Freiheitsgraden versehene Aktivitätstypen im Lehren und Lernen mit dem bzw. im Labor vor:

1. **Experimentalvorlesung plus Übung (demonstration inquiry):** Die Versuche inkl. Datenauswertung und Interpretation werden in der Vorlesung vom Lehrpersonal als Schauexperimente, integrierte Labore oder In-situ-Labore vorgeführt. In einer vorlesungsbegleitenden Übung bearbeiten die Studierenden den Lernstoff mit vertiefenden theoretischen Übungsaufgaben, die allein oder im Team zu berechnen sind. Am Ende werden die gewählten Rechenwege und damit berechneten Lösungen vorgeführt und diskutiert.
2. **Angeleitetes nachvollziehendes Laborlernen (confirmation inquiry):** beschreibt das angeleitete Nachvollziehen vorher eingeführter und als bekannt vorausgesetzter natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Theorien, Prinzipien und Konzepte. Dabei besteht die Aufgabe für die Studierenden in deren Verifikation entlang klar vorgegebener Schritte. Diese Form der Aktivität liegt zum Beispiel vor, wenn die Studierenden den Stoff bereits im Rahmen einer anderen Lehrveranstaltung kennengelernt haben, oder wenn ein vorgeführtes Experiment eins zu eins von ihnen nachgestellt werden soll.
3. **Angeleitetes strukturiertes Laborlernen (structured Inquiry):** Diese Form der Aktivität liegt zum Beispiel vor, wenn die Studierenden den Stoff noch nicht im Rahmen einer anderen Veranstaltung kennengelernt haben. Das Lehrpersonal präsentiert eine Aufgaben- oder Problemstellung mit für die Studierenden unbekanntem Ausgang. Arbeitsschritte und Vorgehensweisen werden durch geeignete Lernaktivitäten und Lernmaterialien strukturiert und unterstützt.
4. **Begleitetes, selbstgesteuertes Laborlernen (guided inquiry):** Das Lehrpersonal gibt nur noch eine Frage- oder Problemstellung vor und unterstützt die Lernenden beim Bestimmen und Durchführen aller Arbeitsschritte und Vorgehensweisen.
5. **Offenes, selbstorganisiertes Laborlernen (open Inquiry):** Die Studierenden bestimmen ihre eigene Forschungs- oder Entwicklungsfrage z. B. im Rahmen einer Studien- oder Semesterarbeit. Das Lehrpersonal berät und unterstützt sie bei ihren Entscheidungen und der Durchführung der Forschung.
6. **Selbstständiges wissenschaftliches Arbeiten im Labor (scientific Inquiry):** Die Studierenden forschen selbstständig für eine Abschluss- oder Qualifikationsarbeit entweder zu selbstgewählten Problemstellungen oder zu vorgegebenen Teilaufgaben aus drittmittelgeförderten Forschungs- und Entwicklungsprojekten. Das Lehrpersonal leitet zwar zum wissenschaftlichen Arbeiten an, die Lernenden sind jedoch im hohen Maße für Vorgehen und Inhalt der Arbeit selbst verantwortlich.

Die Stufen 1 und 6 wurden in diesem Modell im Vergleich zu den zuvor vorgestellten Klassifikationen hinzugefügt, um auch erste Zugänge zu experimentellen Arbeitsweisen im Rahmen von Experimentalvorlesungen bis hin zu höchsten Stufe als eigenständiges wissenschaftliches Arbeiten abbilden zu können. In der Praxis werden die sechs Typen des Laborlernens aller Voraussicht nach nicht immer klar voneinander abzugrenzen sein, sondern es können auch Übergänge zwischen verschiedenen Stufen oder Kombinationen mehrerer Stufen in einer Laborlehrveranstaltung vorkommen. Wichtig ist, dass das Ziel einer hochschulischen Kompetenzentwicklung darin liegen muss, Studierende letztlich zum selbstständigen wissenschaftlichen Arbeiten (im Labor) zu befähigen, dass sie also im Rahmen eines Studiums bis hin zur sechsten Stufe gelangen. Häufig geschieht dies im Kontext von wissenschaftlichen Abschlussarbeiten. In Abb. 1 ist der Zusammenhang zwischen den sechs Stufen forschenden Lernens, der zunehmenden Selbstständigkeit der Lernenden und der berufsqualifizierenden Kompetenzentwicklung erkennbar.

Abbildung 1: Sechs Stufen forschendes Lernens; Kompetenzentwicklung und Selbstständigkeit der Lernenden nehmen mit jeder höheren Stufe zu

Bis hierher wurde im vorliegenden Beitrag das Lehren und Lernen im Labor aus drei unterschiedlichen Perspektiven beleuchtet. Zunächst wurden unterschiedliche Formate des Labors von Mini-Labs bis hin zu offenen Forschungswerkstätten in der Lehre betrachtet. Darauf aufbauend wurden Lernziele im Kontext des Labors in der Lehre betrachtet und wurde mit den dreizehn Lernzielen nach Feisel und Rosa (2005) eine weitverbreitete Systematisierung vorgestellt. Im dritten Schritt wurde das Verhältnis von Berufsqualifizierung, forschendem Lernen und dem Labor in der Lehrpraxis näher beleuchtet. Dabei wurde ein Modell vorgestellt, das entlang des Begriffs „inquiry“ den didaktischen Einsatz von Laboren in der Lehre erläutert, von der Experimentalvorlesung bis hin zum selbstständigen wissenschaftlichen Arbeiten.

Für den letzten Teil des Beitrags soll der Frage nachgegangen werden, wie die fortschreitende digitale Transformation auch das (forschende) Lehren und Lernen im Labor verändert, da sich auch die Medialität der Labore in der Hochschullehre mit der Digitalisierung sukzessive wandelt. Diese Betrachtung erfolgt insbesondere vor dem Hintergrund der fortschreitenden Entwicklung von Cross-Reality-Laboren

in und für die Lehre, also Labore, die zusätzlich oder ausschließlich digitaltechnisch transformierte Realitätsmodi nutzen (Terkowsky et al., 2019a; Terkowsky et al., 2019b).

5 Forschendes Lernen in Cross-Reality-Laboren

Unter dem Sammelbegriff „Cross-Reality“ (Paradiso & Landay, 2009; Pena-Rios et al., 2012) können alle digital erstellten oder unterstützten Realitäten im Sinne von Augmented Reality (AR), Mixed oder Merged Reality (MR) und Virtual Reality (VR) verstanden werden. Mit dem Begriff „Cross-Reality Labor“ (May 2020) werden somit alle Arten digital bzw. online gestützter Lehr-Lernlabore beschrieben. Der Begriff Cross-Reality bezieht sich dabei auf die Verknüpfung der physisch existierenden Realität mit unterschiedlichen Arten virtueller Realität:

- Die Begriffe **Take-Home Lab** (Durfee et al., 2004), **Pocket Lab** (Klinger & Madritsch, 2016) oder **Mobile Lab** (May et al., 2013). stehen für tragbare mobile Labore insbesondere der Elektronik und Informationstechnik, die von Studierenden ausgeliehen und überall in Verbindung mit einem Laptop oder einem Tablet-PC benutzt werden können oder sich zunehmend über ein Smartphone ansteuern lassen – sei es nun in der Vorlesung, zu Hause oder unterwegs. Hier findet zwar keine Verschmelzung unterschiedlicher (virtueller) Realitäten statt, da es sich in aller Regel um vollständig reale Versuchsaufbauten handelt; dennoch kann, je nach technischer Ausgestaltung, die Versuchsdurchführung die Verbindung zu einem externen Server für die Übermittelung von Daten erfordern. Der Versuch findet dann nicht mehr ausschließlich am physischen Ort des Versuchsaufbaus statt.
- Der Begriff **Augmented Reality Labore** bezeichnet physikalisch reale Versuchsaufbauten, die während des Experimentierens um AR ergänzt werden, um z. B. Echtzeitdaten wie Temperatur oder Druck direkt am Versuchsgerät über ein Interface wie z. B. ein Tablet anzuzeigen.
- Der Begriff **Remote-Labore** beschreibt einen Versuchsaufbau, der sich physisch real vorhandener Versuchsgeräte bedient, wobei jedoch der Versuchsvorgang über das Internet von praktisch überall und jederzeit durchgeführt werden kann. Ebenfalls zu Remote-Laboren gezählt werden Labore, die vorher erstellte Videoaufnahmen des Experiments nutzen. Diese Videosequenzen werden jedoch vom System so zusammengestellt, dass Studierende am Computer einen Versuch so durchführen können, als ob sie synchron auf das reale Equipment zugreifen, Einstellungen vornehmen und Versuchsdaten erhalten.
- Der Begriff **Virtuelle Labore** umfasst sowohl VR als auch MR Anwendungen und beschreibt virtuelle Versuchsumgebungen, teil- oder vollimmersiv (etwa an einem Desktop-PC oder mittels eines Head-Mounted-Displays), die Simulationen für die Darstellung und Durchführung des Versuchs nutzen. Dabei können die Versuchsdaten ebenfalls simuliert sein oder auf Datensätze realer Experimente zurückgreifen (Tekkaya et al., 2016, S. 36–37; Zutin, 2018, S. 6).

Darauf aufbauend ist es in Anlehnung an May (2017) möglich, Labore in der Lehre entlang des digitaltechnischen Virtualisierungsgrades in reale Labore (1), Pocket Labs (2), Augmented Reality Labore (3), Remote Labore (4) und Virtuelle Labore (5) zu unterscheiden. Diese Realitätsmodi von Laboren lassen sich je nach Komplexität der adressierten Lernziele auch zu Labor-Mashups kombinieren (Kammerlohr et al., 2020). Der Zugriff kann dabei stationär oder mobil erfolgen, und die zu verfolgenden Aufgabenstellungen können sich an einzelnen oder allen sechs Stufen des forschenden Lernens orientieren und entsprechend komplex ausgestaltete Lernziele adressieren.

Allerdings lassen zumindest Remote und Virtuelle Labore in den allermeisten Fällen ein direktes haptisches Gefühl und den direkten räumlichen Bezug zum Experiment vermissen, da auch die Interaktivität, also die Art Weise der Interaktionsmöglichkeiten zwischen Mensch(en), Maschine(n) und Computer(n), digital transformiert werden. Die menschliche Erfahrung wird also „digital" überlagert; die maschinelle Prozessorik (Sensorik und Aktorik) geht mit der menschlichen Prozessorik (Perzeption und Psychomotorik) eine Verbindung ein, sie werden systemisch gekoppelt. Durch diese mediale Transformation ändern sich auch die psychomotorischen und sensorischen menschlichen Erfahrungen. Hier stellt sich jedoch die Frage, ob diese Veränderung als Defizit oder Zugewinn gesehen und verstanden werden kann. Anders gefragt: Nehmen wir durch die zunehmende Verlagerung des Lehrens und Lernens im Labor aus der real-physischen Welt in die virtuelle Welt dem Labor als Lernort die Basis zur Erreichung zentraler dem Labor zugeordnete Lernziele? Diese Frage ist derzeit nicht abschließend zu beantworten, und selbst aktuelle Metavergleichsstudien wie die von Brinson (2015) geben darauf keine eindeutige Antwort.

Im Kern stehen sich bei dieser Frage diejenigen gegenüber, welche die haptische Erfahrung im Rahmen eines Laborversuchs als zentralen Bestandteil der Lernerfahrung begreifen, und diejenigen, für welche das konzeptionelle Verständnis des durchgeführten Versuches im Vordergrund steht. Eine dritte Perspektive fokussiert vor allem die Potentiale zur Förderung fachübergreifender digitaler Kompetenzen im Rahmen von digital durchgeführten Laboren, die durch die fortschreitende Computerisierung und Digitalisierung aller Lebensbereiche, insbesondere aber der Arbeitswelt, ohnehin zunehmend erforderlich werden. Nach dieser Position werden fachliche und digitalisierungsbezogene überfachliche Lernziele zunehmend konvergieren und das Fachliche vor dem Hintergrund der Digitalisierung verändern. Für einen konstruktiven Ausgleich zwischen den drei oben beschriebenen Perspektiven auf das Lehren und Lernen im Cross-Reality-Labor ist allerdings noch weitere Lehr-Lernforschung notwendig. Dabei gilt es, Veränderungen und deren Stärken, Schwächen und Auswirkungen durch sich zunehmend überlagernde Realitätsmodi auf den Lernprozess vor dem Hintergrund zu definierender Lernziele im Detail zu untersuchen.

Neben der dargelegten didaktischen Auseinandersetzung mit Lernzielen in Cross-Reality-Laboren bleibt noch zu erwähnen, dass die Diskussion um ihre Nut-

zung (und die ihrer Vorläuferentwicklungen) seit über 40 Jahren auch vor einem bildungspolitischen und -organisatorischen Hintergrund geführt wird. In dieser Debatte dominieren zwei Perspektiven: Die erste diskutiert vor allem die Effizienzsteigerung durch Kostensenkung und Flexibilisierung, die mit dem Einsatz von digitalen Laborangeboten anstelle von Hands-on-Laboren erzielt werden kann (Elton, 1983; Horton, 2000; Morales-Menendez et al., 2019); die zweite widmet sich den Potentialen, die Cross-Reality-Laborangebote vor allem für Niedriglohnländer bedeuten, die ohne solche online verfügbaren Angebote nur sehr rudimentäre oder gar keine Lehr-Lernlabore anbieten könnten (Moozeh et al., 2018). Inzwischen entsteht auch eine dritte Forschungsperspektive, die Cross-Reality-Technologien (XR) in der Laborlehre vor allem vor dem Hintergrund der fortschreitenden digitalen Transformation und dem dafür zunehmend erforderlichen kompetenzorientierten Lernen 4.0 diskutiert (Kammerlohr et al., 2020; Terkowsky et al., 2019a; Terkowsky et al., 2019b). Eine detaillierte Auseinandersetzung mit dieser Diskussion führt an dieser Stelle zu weit; siehe hierzu jedoch im vorliegenden Band z. B. Pfeiffer und Uckelmann sowie May, Frye und Terkowsky sowie die Reflexionen im Abschlusskapitel.

Unter Berücksichtigung des gesamten Abschnitts zeigt sich, dass die Einführung von Cross-Reality-Laboren in der Lehre ein weitaus komplexeres Thema ist, als es zunächst scheinen mag. Es geht dabei um weitaus mehr als das reine Digitalisieren von Laborequipment – vielmehr geht es um die digitale Transformation und Umsetzung eines kompetenzfördernden agilen, selbstgesteuerten, kreativen und kollaborativen forschenden Lernens in digital erweiterten Laboren vor dem Hintergrund lokaler und globaler Herausforderungen in der Lehre.

6 Resümee

Labore als Lehr-Lernumgebung sind seit mehr als 180 Jahren aus der natur- und ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung an Hochschulen nicht wegzudenken. Ihnen kommt sowohl in forschungsorientierten als auch in anwendungsbasierten Studiengängen eine zentrale Bedeutung zu. Neben klassischen Experimentalvorlesungen und Grundlagenlaboren gibt es inzwischen eine Vielzahl weiterer Laborformate für unterschiedliche didaktische Zielsetzungen und Zeitpunkte innerhalb der Curricula. Allerdings zeigt sich, dass mit Laboren spezifische kompetenzorientierte Lernziele verfolgt werden müssen, um nicht auf der Ebene lediglich reproduzierbaren Fachwissens und Fertigkeiten zu verweilen. Nur so kann das volle Potential von Laboren als Lehr-Lernort echter Kompetenzförderung vor dem Hintergrund der Förderung von Beschäftigungsfähigkeit in Wissenschaft und Wirtschaft ausgeschöpft werden. Das forschende Lernen ist dabei das zentrale Paradigma der Laborlehre. Allerdings zeigt sich auch hier, dass seine labordidaktische Umsetzung bislang zumeist in den niedrigen Ausprägungsstufen betrieben wird und allenfalls das angeleitete Nachvollziehen von einschlägigen Theorien und Modellen fördert. Somit bleibt der Ansatz des forschenden Lernens im Labor in der praktischen Umsetzung häufig hinter den

kompetenzförderlichen Möglichkeiten zurück. Besonders interessant dabei ist, dass beide Linien – sowohl die Entwicklung und Implementierung der zu verfolgenden konkreten Lernziele für das Labor als auch das forschende Lernen – keine neuen Diskussionen darstellen. Es gibt sie mehr oder weniger deutlich formuliert seit Beginn der Laborlehre, ohne dass die alltägliche Praxis der Curriculumentwicklung sie je hinreichend berücksichtigt hätte. Nicht zuletzt wurde im vorliegenden Beitrag unter dem Stichwort Cross-Reality auch die zunehmende Digitalisierung der Labore vor dem Hintergrund von Lernen und Arbeiten 4.0 angesprochen, das von beiden Seiten, Lehrenden und Lernenden, mehr Medienaffinität, Agilität, Flexibilität und Verantwortungsübernahme erfordert. Es wird sich künftig zeigen, inwieweit es gelingt, diese Veränderungen als Chance zur Gestaltung des Lehrens und Lernens in Laboren zu nutzen.

Literaturverzeichnis

Altschul, R. (1951). Student "Research" in a Basic Science Course. *The Journal of General Education 6* (1), 74–80. Verfügbar unter www.jstor.org/stable/27795374 [04.05.2020].

Anderson, L. W. (Hrsg.). (2009). *A taxonomy for learning, teaching, and assessing. A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives* (Abridged ed., [Nachdr.]. New York: Longman.

Bandura, A. (2012). *Self-efficacy. The exercise of control* (13. Aufl.). New York, NY: Freeman.

Biggs, J. B. & Tang, C. S.-K. (2011). *Teaching for quality learning at university. What the student does* (4. Aufl.). Maidenhead: McGraw-Hill/Society for Research into Higher Education/Open University Press.

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. doi:10.1016/j.compedu.2015.07.003.

Brownell, S. E.; Kloser, M. J.; Fukamim, T. & Shavelson, R. (2012). Undergraduate Biology Lab Courses: Comparing the Impact of Traditionally Based "Cookbook" and Authentic Research-Based Courses on Student Lab Experiences. *Journal of College Science Teaching 41* (4), 36–45.

Bruchmüller, H.-G. & Haug, A. (2001). *Labordidaktik für Hochschulen. Eine Hinführung zum praxisorientierten Projekt-Labor*. Alsbach/Bergstrasse: Leuchtturm-Verlag.

Callaghan, M. J.; McCusker, K.; Losada, J. L.; Harkin, J. & Wilson, S. (2013). Using Game-Based Learning in Virtual Worlds to Teach Electronic and Electrical Engineering. *IEEE Transactions on Industrial Informatics 9* (1), 575–584. doi:10.1109/TII.2012.2221133.

Cunningham, H. A. (1946). Lecture demonstration versus individual laboratory method in science teaching – A summary. *Science Education 30* (2), 70–82. doi:10.1002/sce.3730300204.

Dörner, D. (1992). *Problemlösen als Informationsverarbeitung* (Kohlhammer-Standards Psychologie Basisbücher und Studientexte, 3. Aufl.). Stuttgart: Kohlhammer.

Durfee, W., Li, P. & Waletzko, D. (2004). Take-home lab kits for system dynamics and controls courses. In *Proceedings of the 2004 American Control Conference ACC. June 30–July 2, 2004, Boston Sheraton Hotel, Boston, Massachusetts* (1319–1322 vol. 2). Evanston, Ill: American Automatic Control Council.

Elton, L. (1983). Improving the cost-effectiveness of laboratory teaching. *Studies in Higher Education 8* (1), 79–85. doi:10.1080/03075078312331379141.

Erpenbeck, J. & Sauter, W. (2016). *Stoppt die Kompetenzkatastrophe! Wege in eine neue Bildungswelt* (1. Aufl.). Berlin: Springer.

Feisel, L. D. & Rosa, A. J. (2005). The Role of the Laboratory in Undergraduate Engineering Education. *Journal of Engineering Education 94* (1), 121–130. doi:10.1002/j.2168–9830.2005.tb00833.x.

Felder, R. M. & Brent, R. (2016). *Teaching and Learning STEM. A Practical Guide* (1. Aufl.). s. l.: Jossey-Bass.

Gottburgsen, A.; Wannemacher, K.; Wernz, J. & Willige, J. (2019). *Ingenieurausbildung für die Digitale Transformation. Zukunft durch Veränderung.* VDI-Studie.: VDI Verein Deutscher Ingenieure e. V. Verfügbar unter https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/vdi-studie-ingenieurausbildung-fuer-die-digitale-transformation [14.05.2020].

Haertel, T.; Frye, S.; Schwuchow, B. & Terkowsky, C. (2017). CreatING: Makerspace im ingenieurwissenschaftlichen Studium. *Synergie – Fachmagazin für Digitalisierung der Lehre* (4), 20–23. Verfügbar unter https://d-nb.info/1147778809/3 [15.07.2020].

Herron, M. D. (1971). The Nature of Scientific Enquiry. *The School Review 79* (2), 171–212. doi:10.1086/442968.

Hofstein, A. & Lunetta, V. N. (1982). The Role of the Laboratory in Science Teaching: Neglected Aspects of Research. *Review of Educational Research 52* (2), 201–217. doi:10.3102/00346543052002201.

Hofstein, A. & Lunetta, V. N. (2004). The laboratory in science education: Foundations for the twenty-first century. *Science Education 88* (1), 28–54. doi:10.1002/sce.10106.

Hofstein, A. & Mamlok-Naaman, R. (2007). The laboratory in science education: the state of the art. *Chem. Educ. Res. Pract. 8* (2), 105–107. doi:10.1039/B7RP90003A.

Horton, W. K. (2000). *Designing Web-based training. How to teach anyone anything anywhere anytime.* New York: Wiley.

Huber, L. (2012). Warum Forschendes Lernen nötig und möglich ist. In J. Brockmann & A. Pilniok (Hrsg.), *Methoden des Lernens in der Rechtswissenschaft. Forschungsorientiert, problembasiert und fallbezogen* (Schriften zur rechtswissenschaftlichen Didaktik, Bd. 3, 1. Aufl., S. 59–89). Baden-Baden: Nomos.

Kammerlohr, V.; Pfeiffer, A. & Uckelmann, D. (2020). Digital Laboratories for Educating the IoT-Generation. Heatmap for Digital Lab Competences. In M. E. Auer & D. May (Hrsg.), *Cross Reality and Data Science in Engineering. Proceedings of the 17th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV2020)* (S. 10–27). Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG.

Kauffeld, S. & Reining, N. (2019). Agiles Arbeiten in der Industrie 4.0: Herausforderungen für die Hochschullehre der Zukunft am Beispiel einer Lehr-Lernfabrik. In T. Haertel, C. Terkowsky, S. Dany & S. Heix (Hrsg.), *Hochschullehre & Industrie 4.0. Herausforderungen – Lösungen – Perspektiven* (1. Aufl., S. 137–151). Bielefeld: wbv Media.

Kirschner, P. A. & Meester, M. A. M. (1988). The laboratory in higher science education: Problems, premises and objectives. *Higher Education 17* (1), 81–98. doi:10.1007/BF00130901.

Klinger, T. & Madritsch, C. (2016). Use of virtual and pocket labs in education (Demo). In *Proceedings of 2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV). Date and venue: 24–26 February 2016 in Madrid, Spain* (S. 267–268). Piscataway, NJ: IEEE.

Kornwachs, K. (2015). *Philosophie für Ingenieure*. München: Hanser.

Lewis, J. (2011). The Effectiveness of Mini-Projects as a Preparation for Open-ended Investigations. In D. Psillos & H. Niedderer (Hrsg.), *Teaching and learning in the science laboratory* (Contemporary trends and issues in science education, Bd. 16, S. 139–150). Dordrecht: Springer.

Mann, C. R. (1918). *A Study of Engineering Education*. Boston: The Merrymount Press.

May, D.; Terkowsky, C.; Haertel, T. & Pleul, C. (2013). The laboratory in your hand Making remote laboratories accesible through mobile devices. In *2013 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON 2013). Berlin, Germany, 13–15 March 2013* (S. 335–344). Piscataway, NJ: IEEE.

May, D. (2017). *Globally competent engineers. Internationalisierung der Ingenieurausbildung am Beispiel der Produktionstechnik* (Reihe Dortmunder Umformtechnik, Band 95, 1. Aufl.). Aachen: Shaker Verlag GmbH (Dissertation).

May, D. (2020). Cross Reality Spaces in Engineering Education – Online Laboratories for Supporting International Student Collaboration in Merging Realities. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE) 16* (03), 4. doi:10.3991/ijoe.v16i03.12849.

Moozeh, K.; Ibrahim, N.; Rezaie, R.; Astatke, Y. & Metcalfe, M. R. (2018). Alternative Approaches to Undergraduate Engineering Laboratory Experience for Low-income Nations. In American Society for Engineering Education (Hrsg.), *Proceedings of the 125th ASEE Annual Conference and Exposition* (S. 24–27).

Morales-Menendez, R.; Ramírez-Mendoza, R. A. & Guevara, A. V. (2019). Virtual/Remote Labs for Automation Teaching: a Cost Effective Approach. *IFAC-PapersOnLine 52* (9), 266–271. doi:10.1016/j.ifacol.2019.08.219.

Paradiso, J. A. & Landay, J. A. (2009). Guest Editors' Introduction: Cross-Reality Environments. *IEEE Pervasive Computing 8* (3), 14–15. doi:10.1109/MPRV.2009.47.

Pena-Rios, A.; Callaghan, V.; Gardner, M. & Alhaddad, M. J. (2012). Remote Mixed Reality Collaborative Laboratory Activities: Learning Activities within the InterReality Portal. In N. Zhong & Y. Li (Hrsg.), *IEEE/WIC/ACM International Conferences on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT), 2012. Joint conference] ; 4–7 Dec. 2012, Macau, China ; [including workshops ; part of the] 2012 World Intelligence Congress* (S. 362–366). Piscataway, NJ: IEEE.

Pickering, M. (1993). The teaching laboratory through history. *Journal of Chemical Education 70* (9), 699. doi:10.1021/ed070p699.

Schmidgen, H. (2011). The Laboratory. *European History Online (EGO)*. Verfügbar unter http://www.ieg-ego.eu/schmidgenh-2011-en. [22.04.2020.]

Schwab, J. J. (1960). Inquiry, the Science Teacher, and the Educator. *The School Review 68* (2), 176–195. doi:10.1086/442536.

Schwingen, M.; Scheider, R. & Wildt, J. (2013). Die dortMINT-Forschungswerkstatt – ein innovativer Lernort in der Lehrerbildung. In S. Hußmann & C. Selter (Hrsg.), *Diagnose und individuelle Förderung in der MINT-Lehrerbildung. Das Projekt dortMINT* (1. Aufl., S. 193–213). Münster: Waxmann Verlag GmbH.

Sheppard, S. D.; Macatangay, K.; Colby A. & Sullivan, W. M. (2009). *Educating engineers. Designing for the future of the field* (The preparation for professions series). San Francisco, Calif.: Jossey-Bass.

Stifterverband (2016). *Hochschulbildung für die Arbeitswelt 4.0* (Hochschul-Bildungs-Report 2020). Essen: Edition Stifterverband – Verwaltungsgesellschaft für Wissenschaftspflege mbH (Jahresbericht 2016).

Sunal, D. W.; Sunal, C. S.; Sundberg, C. & Wright, E. L. (2008). The Importance of Laboratory Work and Technology in Science Teaching. In C. Sundberg, D. W. Sunal & E. Wright (Hrsg.), *The impact of the laboratory and technology on learning and teaching science K-16* (Research in science education, S. 1–28). Charlotte, N.C: IAP/Information Age Pub.

Sundberg, C.; Sunal, D. W. & Wright, E. (Hrsg.). (2008). *The impact of the laboratory and technology on learning and teaching science K-16* (Research in science education). Charlotte, N.C: IAP/Information Age Pub.

Tafoya, E.; Sunal, D. W. & Knecht, P. (1980). Assessing Inquiry Potential: A Tool For Curriculum Desicion Makers. *School Science and Mathematics 80* (1), 43–48.

Tamir, P. (1976). *The Role of the Laboratory in Science Teaching*. technical report 10 (The University of Iowa, Hrsg.): Science Education Center. Verfügbar unter https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED135606.pdf [22.04.2020].

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* (acatech Studie). München: Herbert Utz Verlag GmbH.

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. doi:10.1111/ejed.12368.

Terkowsky, C. & Haertel, T. (2013). Fostering the Creative Attitude with Remote Lab Learning Environments. An Essay on the Spirit of Research in Engineering Education. *International Journal of Online Engineering (iJOE) 9* (S5), 13. doi:10.3991/ijoe.v9iS5.2750.

Terkowsky, C.; Haertel, T.; Ortelt, T. R.; Radtke, M. & Tekkaya, A. E. (2016). Creating a place to bore or a place to explore? Detecting possibilities to establish students' creativity in the manufacturing engineering lab. *International Journal of Creativity & Problem Solving 26* (2), 23–45.

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* (Computer-supported collaborative learning series, S. 269–292). New York: Springer.

Terkowsky, C.; May, D. & Frye, S. (2019). Labordidaktik: Kompetenzen für die Arbeitswelt 4.0. In T. Haertel, C. Terkowsky, S. Dany & S. Heix (Hrsg.), *Hochschullehre & Industrie 4.0. Herausforderungen – Lösungen – Perspektiven* (1. Auflage, S. 89–103). Bielefeld: wbv Media.

Trumper, R. (2003). The Physics Laboratory – A Historical Overview and Future Perspectives. *Science and Education 12* (7), 645–670. doi:10.1023/A:1025692409001.

Zutin, D. G. (2018). Online Laboratory Architectures and Technical Considerations. In M. E. Auer, A. K. M. Azad, A. Edwards & T. d. Jong (Hrsg.), *Cyber-Physical Laboratories in Engineering and Science Education* (S. 5–16). Cham, Switzerland: Springer International Publishing.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Sechs Stufen forschendes Lernens; Kompetenzentwicklung und Selbstständigkeit der Lernenden nehmen mit jeder höheren Stufe zu 26

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Verschiedene Klassifikationen von Lehr-Lernlaboren 24

Wozu Labor? Zur vernachlässigten Erkenntnistheorie hinter der Labordidaktik

Jochen Berendes, Mathias Gutmann

Abstract

Der vorliegende Beitrag[1] beleuchtet die Struktur und Funktion forschender Laborpraxis vor dem Hintergrund verschiedener erkenntnis- und wissenschaftstheoretischer Positionen. Das Labor kann in seiner Relevanz unterschätzt werden – mit Blick auf die darin verrichteten praktischen Tätigkeiten, auf dabei erforderliche Urteilsbildungen und nicht zuletzt auf unverzichtbare Impulse für die Wissenschaft. Die abstrakte Gegenüberstellung von Theorie und Praxis ist aufzugeben. Zugleich sollte Wissenschaft weder allein über das Labor noch über die Theoriebildung bestimmt werden. Abschließend plädiert der Beitrag dafür, die skizzierten Fragestellungen in die Labordidaktik sowie in die Planung und Durchführung von Lernlaboren einzubeziehen.

Schlüsselwörter: Labor, Erkenntnistheorie, Wissenschaftstheorie, Technik, Fortschritt, Labordidaktik

1 Das Labor – ein Arbeitsraum

Was stellen wir uns üblicherweise heute unter einem Labor vor? Es ist ein räumlich bestimmter Ort. Ein Labor hat Grenzen, die Innen und Außen voneinander trennen. Das Labor darf nur von qualifizierten Personen betreten werden, vielleicht in Schutzkleidung, und es kann verlassen werden, vielleicht nur unter besonderen Sicherheitskontrollen. Das Labor ist ein mehr oder minder gesicherter Ort, ein Ort der kunstvollen Reduktion, der gezielten Ausgrenzung störender Faktoren. Die verschieden ausgeprägten Regulationen und Abschirmungen von außen haben dabei etwas Thesenhaftes; sie enthalten begründete Annahmen über die wechselhaften Faktoren, die der intendierten Labortätigkeit abträglich sein könnten, wie etwa schwankende Temperaturen, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, elektromagnetische Felder, Staubpartikel. Einige äußere Einflussfaktoren – etwa die Einwirkung der Gravitation oder das Eintreffen von Neutrinostrahlen – entziehen sich der Verfügung, da sie nicht oder nur mit größtem Aufwand von einem Labor fernzuhalten sind. Ob alle Faktoren und

1 Die Ausarbeitung dieses Beitrags wurde im Rahmen des Projekts SKATING aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichnen 01PL11014 unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Kräfte, die auf ein Labor einwirken können, bekannt sind und in ihrer Auswirkung beurteilt werden können, ist grundsätzlich fraglich, doch ist dies in der Regel kein Anlass, den Erkenntnisanspruch des Labors einzuschränken.

Neben der Kontrolle von Rahmen- und Anfangsbedingungen (vgl. Janich, 1995) bietet die räumliche Grenze des Labors zugleich den Schutz der Außenwelt vor den möglichen intendierten oder nicht intendierten Prozessen und Gefahren, vor allem für Gesundheit und Umwelt, die im Labor entstehen können. Die räumliche Grenze und die technische Ausstattung des Labors sind *funktional* auf die Bestimmung dessen ausgerichtet, was an diesem Ort getan werden kann, darf und soll.

Die räumliche Bestimmung des Labors kann aber auch fraglich sein. Albert Einstein soll auf die Frage nach seinem Labor einen Bleistift hervorgezogen haben (vgl. Lars Jaeger, 2015, S. 265): als Minimalvariante eines Labors, die den kognitiven Aspekt des Laborierens und das Gedankenexperiment hervorhebt, empirische Untersuchungen und technische Apparaturen aber zunächst beiseite stellt. Als Maximalvariante eines Labors könnten erste Atombombentests angeführt werden, sofern diese durchgeführt wurden, ohne Sicherheit zu haben, ob die ausgelöste Kettenreaktion überhaupt zu einem Abschluss kommen würde. Im Zuge der *Digitalisierung* entstehen neue Formen digitaler Labore, die als reine Simulationen im Prinzip an jedem Ort mit einem Computer genutzt werden können oder die von jedem Ort Zugriff auf einen realen Versuchsaufbau erlauben (vgl. Franuszkiewicz u. a., 2019; Terkowsky u. a., 2019). Damit wird der räumliche Rahmen des Labors entgrenzt und experimentelles Arbeiten dezentral ermöglicht. Der digitalen Nivellierung des Raumes steht die regelrecht feudale Besetzung von Orten durch eine einzige Experimentierapparatur entgegen, welche die mit ihr verbundenen Netze herrisch zentralisiert – wie etwa das CERN/LHC in der Nähe von Genf.

Hilfreich ist es, einige wichtige Funktionen und Typen von Laboren umrisshaft zu skizzieren: die Präparation von Phänomenen für die Erkenntnis von Prozessen und Gesetzmäßigkeiten und ihre Überprüfung im *Forschungslabor*, die problemorientierte Verwendung von Wissen und Kenntnissen im *Entwicklungslabor*, die Einübung und Vermittlung von Wissen und Kompetenzen im *Lernlabor* und seinen Varianten (vgl. Tekkaya u. a., 2016, S. 31–32) sowie die *Analyse* oder *Produktion von Stoffen*. Im Folgenden werden wir uns auf die Grenze zwischen Forschungs- und Lernlabor konzentrieren, um diese Unterscheidung letztlich auch zu verstören.

2 Das Experiment

Das Labor ist ein künstlicher Ort, an dem Nichtnatürliches auf kunstfertige Weise geschieht, um re-konstruierend zu erschließen, was „naturgemäß“ der Fall zu sein scheint. Was in diesem abgezirkelten Raum *experimentell* erarbeitet wird, soll draußen von weitreichender Bedeutung sein; was hier erarbeitet wird, erhebt den Anspruch universeller *Geltung*, soll verbindliche Erkenntnis für hier und dort, jetzt und zukünftig, darstellen. Die Erzeugung und Erzwingung von Verlaufstypen – das Expe-

riment oder Experimentalsystem (vgl. Rheinberger, 2001), das im Labor beheimatet ist – gleicht in dieser Hinsicht einer Maschine, die etwas immer wieder auf eine bestimmte Weise hervorzubringen hat (vgl. Tetens, 1987). Die künstlich arrangierende Intervention durch das Experiment, verbunden mit erheblicher Investition, wird seit dem 16. Jahrhundert nicht mehr als Verstoß gegen eine natürlich-göttliche Ordnung verstanden, sondern als ein notwendiges Instrument, *innerhalb* umfassender Naturgesetze diese selbst zu erschließen. Nicht die Natur wird beobachtet, sondern beobachtet werden die Ergebnisse methodisch arrangierter und konstruierter Vorgänge. „So finden wir zum Beispiel nirgends im Laboratorium die 'Natur' und die 'Realität', die von so kritischer Bedeutung für das deskriptive Modell [von Wissenschaft] ist. Das meiste, mit dem Wissenschaftler im Labor zu tun haben, ist hochgradig vorstrukturiert, wenn nicht zur Gänze artifiziell. [...] Die Natur scheint im wissenschaftlichen Labor nicht auf, es sei denn, man definiert sie von vornherein als das Produkt wissenschaftlicher Arbeit" (Knorr Cetina, 2016, S. 23). Im Vergleich zur Natur ist das vorliegende Präparat oder der isolierte Prozess eine Abstraktion, das auf der Grundlage abstrahierenden Denkens die Natur repräsentiert bzw. im Labor als ein intentional zugerichtetes *Modell* der Natur fungiert.

Naturwissenschaftliches Beobachten zielt immer auf etwas ab, einen Vorgang oder Zustand, der beobachtet werden soll. Hierbei spielen Messgeräte eine wesentliche Rolle, deren Funktionsfähigkeit schon vor der Messung sichergestellt sein muss, was selbst für eine einfache Waage gilt. Durch Beobachten stellen wir im Labor also nicht einfach fest, was der Fall ist, sondern bringen das, was wir an provozierten Phänomenen wahrnehmen, in eine gemessene Form.

Dieses Moment des präparativen Erarbeitens finden wir, wegen der Technikstützung von Wissenschaften, in besonderer Weise im Labor: Wir präparieren, beseitigen alles, was das Phänomen stört – und *stellen* es auf diese Weise, wie der Jäger das Wild; gleichwohl nicht ohne Kosten, denn wir laufen Gefahr, unser Handeln und die Totalität allein aus dieser handlungstheoretischen Sicht zu erfassen.

3 Erkenntnistheorie

Skizzieren wir zunächst ausgewählte und einander überbietende Modelle zur Beschreibung naturwissenschaftlicher Erkenntnis. Der Positivismus vertritt die Ansicht, dass die von den Naturwissenschaften anerkannten Aussagen wahr sind, denn die *Induktion* schreite von einzelnen Messungen im Labor und wahren Protokoll- oder Beobachtungssätzen zur Bestimmung von Gesetzmäßigkeiten linear aufwärts. Aussagen mit umfassendem Anspruch sind dann und nur dann sinnvoll, wenn sie auf diesem Weg empirisch belegt sind (vgl. Carnap, 1998; Stegmüller, 1978, S. 346–428).

Anfragen an diesen strengen linearen Aufstieg zielen auf unvermeidliche *Zirkularitäten*. Ist es möglich, neutrale, theoriefreie Basis- oder Protokollsätze zu formulieren? Fließt nicht in jede Beobachtung und in jeden Beobachtungssatz bereits techni-

sches Wissen ein, und zwar durch den Handelnden und durch die eingesetzten (Mess-)Geräte? Ein grundsätzlicher Einwand zielt auf den Status der empirischen *Daten*, denn trotz ihres Namens werden diese weder *gegeben* (lat. *dare* für *geben*) noch gefunden oder erhoben, sondern *erzeugt*.

Hinzukommt, dass empirische Erkenntnis nie zu einer völligen Sicherheit gelangt, wie dies vielleicht für mathematische oder logische Schlüsse gelten kann. Denn es sind nur endlich viele Ereignisse experimentell beobachtbar, und dies erlaubt nicht den Schluss auf eine Theorie, die den Anspruch erhebt, alle relevanten möglichen Ereignisse zu beschreiben: „[...] noch so viele wahre Prüfaussagen könnten die Behauptung nicht rechtfertigen, eine erklärende allgemeine Theorie sei wahr" (Popper, 1984, S. 7).

Auch die Formulierung eines Naturgesetzes bezieht sich auf eine Kette von Beobachtungen, die nicht ohne Technik und technischem Sachverstand erzeugt und auch nicht theoriefrei artikuliert werden können. Die Formulierung beruht u. a. auf der Erzeugung von Daten sowie ihrer statistischen Auswertung, Darstellung und Interpretation. Die Interpretation der Datensätze kann dabei durch Annahmen und Hypothesen gefördert und strukturiert werden. „Nicht selten werden nämlich scheinbar offenkundige Muster in den Daten erst wahrgenommen, nachdem man unter der Anleitung einer Hypothese das Augenmerk gezielt darauf richtete" (Carrier, 2017, S. 57).

Angesichts endlicher Datensätze ist ein rein induktiver Beweis nicht möglich, sondern nur der Nachweis, dass die formulierte Gesetzmäßigkeit auch widerlegt, also falsifiziert werden kann, denn *„die Annahme, bestimmte Prüfaussagen seien wahr, rechtfertigt manchmal die Behauptung, eine erklärende allgemeine Theorie sei falsch"* (Popper, 1984, S. 8, Hervorh. im Original). Um es an einem bekannten Beispiel zu erläutern: Die zuverlässige, wiederholbare Beobachtung eines schwarzen Schwans erlaubt der Aussage zu widersprechen, alle Schwäne seien weiß. Wenn ein formuliertes Gesetz durch ihm widersprechende Beobachtungen widerlegt wird, kann an dessen Stelle eine neue, bessere Aussage treten, die wiederum ihrer zukünftigen Ablösung harrt. Wissenschaft befindet sich daher approximativ und kumulativ auf einem Weg zur Wahrheit. Wird wissenschaftliche Erkenntnis so dargestellt, folgt daraus, dass es jederzeit möglich ist, relevante (wiederkehrende) Beobachtungen zu treffen, die selbstverständliche Annahmen perturbieren.

Stellt der auf David Hume (1711–1776) zurückgehende Einspruch gegen empirische Wahrheitsnachweise bereits eine Herausforderung dar (Hume, 2015), so lässt sich dieser Einspruch noch weiter zuspitzen. Denn Abweichung und Anomalie sind bei Karl Popper als Randphänomene begründete und zwingende Anlässe, sich von Theorien zu lösen. Wie aber, wenn empirische Forschung stets verbunden ist mit der Wahrnehmung von Anomalien? Durch prompten Einspruch käme die Theoriebildung stets zum Abbruch. Wie aber, wenn die Naturwissenschaften sich nicht kontinuierlich durch Ansammlung von Erkenntnissen weiterentwickeln, sondern komplexe Umbrüche, Paradigmenwechsel (vgl. Kuhn, 1989), durchlaufen – Umbrüche, bei denen nicht selbstverständlich das überkommene Wissen erneut integriert wird?

Paul Feyerabend, Ian Hacking und andere bieten jedenfalls zahlreiche Beispiele aus der Geschichte der Naturwissenschaften an, die aufweisen, dass Theorien sich erfolgreich etablieren können, obwohl empirische Widersprüche und abweichende Daten von Anbeginn vorliegen. Paul Feyerabend schreibt zugespitzt und grundsätzlich, dass „*keine einzige Theorie jemals mit allen bekannten Tatsachen auf ihrem Gebiet übereinstimmt*“ (Feyerabend, 1993, S. 71, Hervorh. im Original). Entsprechend äußert sich auch Ian Hacking: „Theorien werden generell nicht einfach deshalb abgelehnt, weil sie Anomalien aufweisen, noch werden sie im allgemeinen schlicht deshalb akzeptiert, weil sie empirisch bestätigt sind“ (Hacking, 1996, S. 36).

Die Anomalie wäre demnach nicht die Ausnahme, sondern nahezu die Regel. Die Akteure der Naturwissenschaften wären demnach stets schon darin geübt, gleichsam im Augenwinkel einen schwarzen Schwan als Anomalie wahrzunehmen, sich durch diese Beobachtung aber in ihren Forschungsanliegen nicht verstören zu lassen. Diese Kompetenz, Abweichungen ausblenden oder aufschieben zu können, kann auch eine Kompetenz genannt werden, Beobachtungen zu gewichten, zu kontextualisieren, zu beurteilen und womöglich durch Hilfshypothesen zu integrieren. So könnten wir *entscheiden*, auf dem Weißsein von Schwänen zu bestehen und schwarze Tiere aus der Klasse „Schwan“ *per definitionem* zu entfernen; wir könnten auch die Klasse „Schwan“ erweitern, indem wir „X ist weiß oder schwarz“ erlauben oder unter Absehung von der Gefiederfarbe womöglich (züchterisch gedacht) durch das Kriterium „kreuzt sich erfolgreich mit anderen Schwänen“ ergänzen.

4 Über Ergebnisse sprechen und schreiben

Das Selbstverständnis der in der Wissenschaft Tätigen zeigt sich in der Art, wie gehandelt, gesprochen und geschrieben wird. Nehmen wir relevante divergierende Äußerungskontexte (Fachzeitschriften, Handbücher, Lehrbücher, populäre Darstellungen, Forschungsanträge etc.), so ist plausibel, dass die Geltungsansprüche der *Ergebnisse* empirischer Forschung, der Modus der Wahrheitsansprüche und der Bezug auf Daten und Methoden nicht stets in gleicher Weise signalisiert werden. Die Sicherheit und Unsicherheit von Aussagen wären mit den Ausdrücken *wahr* oder *falsch* auch nur unzureichend abgebildet. Ein paar mögliche Äußerungen, schriftlich oder mündlich, könnten etwa lauten: „Es gilt a.“ „Da W und V gelten, gilt auch a.“ „Es gilt angesichts der Daten a.“ „Da W und V gelten, müsste auch a gelten.“ „Seit t wissen wir, dass a.“ „Wir gehen heute davon aus, dass a.“ „Es wurde nachgewiesen, dass a.“ „Wir haben gezeigt, dass a.“ „Vieles deutet daraufhin, dass a.“ Auf verschiedene Weise wird die Sicherheit der Aussage hier eingeschränkt oder Bezug genommen auf einen temporalen Aspekt, eine Forschergruppe oder vorausgesetztes Wissen. Äußerungskontexte erfordern häufig Formen elliptischer Rede. Die wechselseitige Unterstellung von Wissen im Kreis der Forschungsgemeinschaft scheint legitim und unvermeidbar; doch wäre es eine schwierige, aufschlussreiche Übung, solche Aussagen sich unverkürzt – mit präziser Aufzählung aller Voraussetzungen und Annahmen – vorzustellen.

Karin Knorr Cetina weist darauf hin, dass in einem Labor von *Wahrheit* ohnehin kaum die Rede sei, sondern prägnanterweise von mehr oder minder funktionierender Technik. Es gehe darum, „ [...] Dinge zum Laufen zu bringen (*to make things work*). Die Beschäftigung damit, ob ein Versuch 'läuft', 'geht' oder 'nicht geht' und wie er zum Funktionieren gebracht werden kann, weist eher auf Erfolg als auf Wahrheit als handlungsleitendes Prinzip von Forschungsarbeit hin" (Knorr Cetina, 2016, S. 24). Das heißt, es gibt in diesem Zusammenhang zwei Sprachspiele: Auf einer basalen technischen Ebene herrscht die Opposition *funktioniert – funktioniert nicht* vor, auf der Ergebnisebene ist die Opposition *wahr – falsch* bestimmend. Den schwierigen Übergang von der Laborpraxis zu einem Bericht schildert kritisch Ludwik Fleck, denn die in der Entstehung relevanten Wissensbestände und Fertigkeiten kommen dabei nicht zum Ausdruck: „Der zusammengefaßte Bericht über ein bearbeitetes Gebiet enthält immer nur einen sehr kleinen Teil der betreffenden Erfahrung des Forschers und zwar nicht den wichtigsten [...]. Es ist so als ob nur der Text eines Liedes angegeben wird, nicht aber die Melodie" (Fleck, 1980, S. 126). Der Bericht unterschlägt die zugrundeliegende vielseitige Laborpraxis und Laborerfahrung. Er erlaubt kaum noch Rückschlüsse auf diese. Auch darum verdient es das Labor, selbst Gegenstand von Forschung zu sein.

5 Zugewiesene Funktionen des Labors im Kontext der Methodendiskussion

Die Bedeutung der Labortätigkeit kann im Kontext der Wissenschaft verschieden gewichtet und gewertet werden. Wenn das Labor auch einerseits als Inbegriff neuzeitlicher Wissenschaft verstanden wird, so steht es doch andererseits in dem kulturell verankerten Abwertungsmechanismus, der praktisches und handwerkliches Arbeiten gegenüber theoretischer Arbeit herabsetzt (vgl. Arendt, 1989; Janich, 2015), und diese Abwertung wird zusätzlich gestützt, wenn die *hypothetisch-deduktive Methode* in den zunehmend theorieorientierten Naturwissenschaften seit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts dominant geworden ist, wovon Zweige der Wissenschaftstheorie ausgehen (vgl. Carrier, 2017, S. 35–39). Empirische Beobachtungen und Experimente im Labor haben nur noch eine zugewiesene untergeordnete Funktion gegenüber den aus dem Theoriegebäude abgeleiteten Hypothesen. Labore überprüfen, belegen, weisen nach, doch sie entdecken nicht – oder kaum. „Das Experiment wird reduziert auf eine Instanz zur Überprüfung von Hypothesen. Es wird ihm dadurch eine wesentliche Dimension genommen: seine Funktion bei der Exploration von neuen Wissensfeldern; auch seine konstruktive Rolle bei der Darstellung von Phänomenen bleibt ausgeblendet" (Rheinberger, 2013, S. 61). Die bedeutende Frage, wie denn zu prüfende, möglichst produktive Hypothesen entstehen und entwickelt werden, wird in Karl Poppers *Logik der Forschung* folgenreich in einen separierten Zweig der Erkenntnispsychologie delegiert – und ist dezidiert nicht Gegenstand seiner Theorie (vgl. Popper, 2005, S. 7; Rheinberger, 2013, S. 59).

Experimente sind viel mehr, so könnten wir Rheinbergers Gedanken fortsetzen, als bloße Überprüfungsinstanzen für Hypothesen und Theorien. Sie sind künstliche Orte der Hervorrufung, der Präparation von Phänomenen, sie sind Handlungskontexte, in denen der Umgang mit Phänomenen möglich wird, in welchen sich uns deren Widerständigkeit zeigt (vgl. Gutmann, 2017, 225 ff.). Sie sind also gleichsam „ways of worldmaking", denn sie können – wenn sie gut sind – nicht nur zu neuen Ergebnissen führen, sondern auch zu neuen Formen experimenteller Praxis.

Aus diesen Gründen wirkt die schlichte Opposition von *Induktion* und *Deduktion* so ungenügend, um eine genauere begriffliche Fassung von Erkenntnisprozessen zu schaffen – experimentelle Erfahrung und Erkenntnisgewinn sind vielmehr ein (hermeneutisches) Wechselspiel von Einzelbeobachtungen, Vermutungen und Abstraktionen, dass mit dem Kantischen Begriff der *Urteilskraft* (bestimmende und reflektierende) oder auch mit dem Begriff *Abduktion* von Charles Peirce (vgl. Nöth, 2000, S. 67–70) gefasst werden kann: Wir versuchen, einzelnes begrifflich zu bestimmen und es zu erklären, indem wir es als Beispiel einer Regel zu interpretieren suchen, und wir haben Kenntnis von Gesetzen und halten Ausschau nach deren konkreter Gestalt. Urteile und Entscheidungen fallen auf vielfältige Weise im Labor – den Versuchsaufbau, den gelingenden oder nicht gelingenden Versuchsablauf, das technische Gerät und die Daten(-Interpretation) betreffend. Und es ist davon auszugehen, dass das Lernen im Labor darauf zielt, eine gemeinsame Praxis aufzubauen, eine gemeinsam geteilte Urteilsbildung einzuüben, was zugleich mögliche kreative Ansätze befeuern, aber auch beschneiden oder gar ausschließen kann. *Habituelle Einübung* heißt (aristotelisch zirkulär beschrieben), dass gute Labortätige *das tun*, was *gute* Labortätige tun. Die sprachliche Darstellung und Thematisierung von einzuübenden *Konventionen* ist leicht, wenn sie Festlegungen betreffen: Wozu dient üblicherweise der rote und wozu der blaue Stecker? Ungleich schwieriger zu fassen, doch ungleich bedeutsamer sind andere Fragen, bei denen es um strittige Urteilsbildung geht: Wann halten wir einen Versuch für gelungen – und was ist mit ihm aufgewiesen? Welche Fehlertoleranz ist bei der Auswertung üblich? Wie lange darf ein erfolgloser Ansatz variiert und erprobt werden? Diese Fragen sind auch deshalb nur mühsam zu bearbeiten, da sie auf Entscheidungsprozesse zielen, die womöglich dem eigenen positivistischen, auf ‚Objektivität' zielenden Selbstverständnis zuwiderlaufen.

Das Zusammenspiel von praktischem Vermögen und gedanklicher Leistung stellt Ludwik Fleck heraus: „Alle Experimentalforscher wissen, wie wenig ein Einzelexperiment beweist und zwingt: es gehört dazu immer ein ganzes System der Experimente und Kontrollen, einer Voraussetzung (einem Stil) gemäß zusammengestellt, und von einem Geübten ausgeführt. Eben diese Voraussetzungsvermögen und die Übung, manuelle und gedankliche, bilden zusammen mit dem ganzen experimentellen und nicht experimentellen, sowohl mit dem klargefaßten wie auch mit dem unklaren, 'instinktiven' Wissensbestandes eines Forschers das, was wir Erfahrenheit nennen wollen" (Fleck, 1980 S. 126).

6 Das Labor im Zentrum der Wissenschaft

Der Marginalisierung oder Unterordnung des Labors durch abstrakte Wissenschaftstheorie stehen gegenläufige wissenschaftstheoretische Ansätze entgegen. Eine genuine Stellung und Bedeutung des Labors kann betont werden, indem die abstrakte Aufspaltung von Theorie und Praxis befragt wird, die gerade im Labor sinnfällig hinfällig wird: „Statt der bekannten Entfremdung zwischen Theorie und Praxis finden wir im Labor eine Mischung von Handlung und Kognition, auf die der traditionelle Begriff der Theorie nicht mehr adäquat angewendet werden kann“ (Knorr Cetina, 2016, S. 25).

Das Labor ist gewiss nicht *autark*, sondern von vielfältigen Faktoren abhängig, aber es kann dennoch *autonom* genannt werden. „Die Experimentiertätigkeit führt eine Vielzahl von Eigenleben“ (Hacking, 1996, S. 276). In der deutschsprachigen Tradition sind hierzu Arbeiten von Hugo Dingler und Ludwik Fleck hervorzuheben. In der englischsprachigen Tradition ergibt sich, anknüpfend an die Arbeiten von Charles Peirce und John Dewey, ein pragmatischer Ansatz, der auch in diesem Bereich zu einem *Pragmatic turn* und zu einem *Neuen Experimentalismus* geführt hat, der besagt: Wer verstehen will, rekonstruieren will, *wie* Wissenschaft *funktioniert*, muss konkret beobachten, *wie* Akteure im Labor *handeln*. Fragen der naturwissenschaftlichen Empirie, der Interpretation von Messdaten und der Technologieabhängigkeit der Wissenschaft rücken damit in den Vordergrund. Die Erforschung der Laborpraxis soll grundlegende wissenschaftstheoretische Probleme lösen.

Eine dabei stets wichtige und neue Forschungsimpulse auslösende Unterscheidung betrifft den Wissensbegriff, da auf Grundlage dieser Differenzierungen spezifisches Handlungswissen und Urteilsvermögen Profil gewinnen: Die auf Gilbert Ryle (1979) zurückgehende Unterscheidung von *Knowing that* (abstraktes und artikuliertes Wissen) und *Knowing how* (konkretes, nicht leicht zu artikulierendes Handlungswissen) – und auch die daran anknüpfende Unterscheidung von *explizitem* und *implizitem Wissen* (vgl. Polanyi, 2016).

Statt sich abschließend auf eine Position zur Relevanz des Labors festzulegen, kann es sinnvoller sein, das Labor in seinem Selbstbewusstsein zu stärken, aus der wissenschaftstheoretischen Defensive zu befreien und die offene Vielfalt der Forschungs- und Entdeckungsprozesse wahrzunehmen: „Es gibt einige gründliche experimentelle Forschungen, die ausschließlich von der Theorie herkommen. Manche bedeutenden Theorien gehen aus vortheoretischen Experimenten hervor. Etliche Theorien verschmachten, weil das Zusammenspiel mit der wirklichen Welt ausbleibt, während einige experimentelle Phänomene müßig bleiben, weil es an einer Theorie mangelt“ (Hacking, 1996, 265).

Eine besonders starke These wird von dem Wissenschaftstheoretiker Peter Janich vertreten, der an den Konstruktivismus der Erlanger und Konstanzer Schule (und damit auch an Hugo Dingler) anknüpft (vgl. Wille, 2015). Labore bildeten danach weiterhin den zentralen Ort und antreibenden Motor der Naturwissenschaften; Labor und Technik bieten demnach erst die Grundlage, über das zu sprechen, was

nicht Technik sei: „Nur Technik, also das handwerkliche und ingenieurmäßige Können der Experimentatoren bringt die Natur in den Naturwissenschaften zum Sprechen. Und nur wo ein solches technisches Bewirkungswissen zur Verfügung steht, kann dann über Nichttechnisches, d. h. Natürliches im Sinne des vom Menschen nicht Erzeugten gesprochen werden [...]“ (Janich, 1997, S. 103 f.). Nicht nur, dass die Wissenschaftstheorie zu sehr an sprachlichen Äußerungen orientiert sei – und hierbei einzig *beschreibende* sprachliche Äußerungen im Blick habe, während es auch Anweisungen und Aufforderungen v. a. bei Experimenten gebe – nicht nur diese (gleich doppelt) verengte Sprachzentrierung wirft Janich der Wissenschaftstheorie vor, sondern auch, dass sie die Perspektive der relevanten Akteure in den Laboren übergehe: ihr Handeln, ihr Handlungswissen, ihre Interessen und ihren kulturellen Hintergrund.

Die *Bionik* kann auf den ersten Blick gegen Janichs These angeführt werden, sofern die Verhältnisse umgekehrt scheinen: Natur wird hier zum Vorbild technischer Gestaltung erhoben; Technik eifere dem nach, was in der Natur längst existiere. Um dies aber sagen zu können, bedarf es schon der Beschreibung des vermeintlichen Vorbilds durch die technische Biologie: Das Lebewesen muss auf die Normalform einer technischen Lösung gebracht werden – und *diese* wird dann zum bionischen Vorbild. Übersieht man diese perspektivierende Investition, muss Natur als „der beste Ingenieur“ erscheinen, was zugleich eine Naturteleologie hervorbringt, die für kreationistische Ansätze anfällig wird.

Dies führt zu der weiteren Frage, warum eigentlich naturwissenschaftliche Theorien so gut auf die Welt zu passen scheinen. Neben der konventionalistischen Antwort, die z. B. Messvorschriften dafür verantwortlich macht, und der realistischen, die in der getreuen Abbildung einer unabhängig von uns bestehenden Realität die Aufgabe und Güte der Wissenschaften erblickt, lässt sich Immanuel Kants Gedanke konstruktivistisch aufgreifen, dass wir die geordnete Struktur der Welt (Raum, Zeit, Kausalität, Identität u. a.) stets in diese erst hineintragen und nicht umhinkommen, sie in dieser Ordnung anzuschauen. Doch auch, wenn man nicht die Anschauungs-, sondern die Handlungsform stark machte, um die Gesetzmäßigkeit der Welt zu garantieren, bleibt ein Unbehagen. Denn das Verständnis laborgestützten Handelns sollte weder den Bezug zum Eigensinn der Objekte verlieren und einzig in der Immanenz eigenen Handelns und Deutens verbleiben, noch darf es sich als fraglos an einer gegebenen Realität orientiert sehen. So wenig wie das Experiment einfach einen Ausschnitt der Realität erschließt, stellt es nur eine instrumentelle Verlängerung quasi industrieller Fertigung dar. In manchem gleicht die experimentelle Befassung mit Phänomenen eher einem iterativen Aushandlungsprozess, an welchem Widerständigkeit und Eigensinn des Gegenstandes ebenso beteiligt sind wie Erfahrungen und Vorannahmen der Experimentierenden, ihre Einbindung in wissenschaftspraktische und -theoretische Traditionen – aber auch die Bereitschaft, nicht so sehr das zu sehen, wonach sie suchen, als eher das, was sich zeigt (zu diesem iterativen Aspekt von Präparation, Experiment, Modellierung und Theorie am Beispiel der Biologie vgl. Gutmann & Nick, 2019).

Ein Experiment ist demnach nie einfach nur eine Ansammlung von Apparaturen – erst die Intentionen der Laborierenden und ihre jeweiligen Theoriekontexte erlauben die (Re-)Konstruktion des Experiments sowie die Deutung seiner Resultate. Mit der Einbeziehung der Theorie, ihrer Abstraktionen und Idealisierungen, kommt es aber zugleich zu einer eigentümlichen Blickumkehr: So sehr der Ausgangspunkt im lebensweltlichen Handeln liegen mag, so radikal entfernt die Laborpraxis sich von diesem: Idealisierung erlaubt es, das Wirkliche als *bloße* Möglichkeit eines Idealen vorzustellen, das dieser Wirklichkeit nicht einfach entnommen werden kann. In der freien und doch zielorientierten Wahl und Entwicklung eines solchen Gesichtspunkts (*point of view*) liegt ein allgemeines und notwendiges Bestimmungsmoment von Wissenschaft, das über die Laborpraxis hinausreicht. Sowenig, wie es vollständig glatte Oberflächen gibt, sowenig existieren Massepunkte oder geradlinig gleichförmige Bewegungen. Als Idealisierung gestatten sie es uns aber, *alltägliche* Vorgänge als bloße Fälle idealer Gesetzmäßigkeiten zu verstehen, wie etwa bei der ballistischen Rekonstruktion einer Kugelflugbahn oder der Abläufe eines Verkehrsunfalls. Das Alltägliche wie das Natürliche werden im Lichte experimenteller Erfahrung und ihrer Idealisierung ausgelegt. Genau dies kennzeichnet den Anfang der neuzeitlichen experimentellen Praxis, denn bei Galileo Galilei finden wir angesichts seiner Bemühungen um die mathematische Erfassung der Fallgesetze einerseits eine handwerkliche Dimension bei der Gestaltung der Fallrinne, andererseits das Gedankenspiel, wie Objekte im Vakuum (seinerzeit theologisch und philosophisch tabuisiert) fallen würden, ohne ein Vakuum technisch überhaupt herstellen zu können (vgl. Cohen, 2010, S. 78 f., S. 114 f.).

7 Labor im Fortschritt

„Wer sagt denn, daß die Welt schon entdeckt ist?“, fragt Peter Handke (Handke, 1978, S. 81). In der Tat motiviert das Bewusstsein von Unentdecktem, Unbeschriebenem, die Vorstellung unerforschter oder ungeklärter Bereiche, das eigene forschende Handeln. Zu dem Selbstverständnis des Labors gehört die Frage, welche innovative Funktion ihm im System der Wissenschaft heute zugeschrieben werden kann, aber auch die Frage, wie gesichert die bisherigen Kenntnisse der Naturwissenschaften sind. Das *Selbstverständnis* hat Auswirkungen auf die *Motivation* der Akteure. Diese kann aus der Vorstellung bezogen werden, auf der Schulter von Riesen zu stehen, Erbe eines bewunderungswürdigen, sicheren, stetig gewachsenen Wissensstandes zu sein. Dieses Selbstbewusstsein unterstreicht beispielsweise Holm Tetens: „Das Tatsachenwissen über alle Wirklichkeitsausschnitte, mit denen es die Wissenschaften zu tun haben, wächst, und schon lange wächst es exponentiell. Noch nie wusste die Menschheit so viel wie gegenwärtig [...]“ (Tetens, 2013, S. 71). Wenn auch keine Theorie „perfekt“ und das Erkenntnisinteresse nur ein „Ideal“ sei, das die Wissenschaften anleite, so seien die empirischen Erfolge doch so enorm, dass erkenntnistheoretische Vorbehalte „oftmals nur noch akademisch“ (Tetens, 2013, S. 67)

seien. Ob allerdings technischer Erfolg als Beleg für die Gültigkeit einer Theorie gewertet werden kann, ist fraglich: „Schließlich kann kein erkenntnistheoretisches Argument ausschließen, daß eine Technologie auf Grund einer falschen Theorie konstruiert wird und trotzdem funktioniert“ (Luhmann, 1991, S. 262). Sowenig experimentelle Erfahrung ohne Standardisierung und Kontrolle der technischen Basis denkbar ist, sowenig sind Standardisierung und Kontrolle allein schon wissenschaftliches Wissen (vgl. Gutmann & Nick, 2019). Ein gelingender experimenteller Ablauf ist nicht schon Garant für Erkenntnisgewinn. Die auf kumulativen Fortschritt abzielende Unterstellung einer ununterbrochenen Wissensentwicklung, wie Tetens sie andeutet, folgt einem durchaus autoritären Narrativ: Die unzähligen Experimente, die erfolglos blieben, deren Daten im Theoriegebäude keinen Anschluss fanden, werden hier ebenso ausgeblendet wie die nicht weniger zahlreichen Theorien, Modelle und Hypothesen, die ohne Resonanz blieben. Was im Rückblick als mehr oder minder glatter Verlauf aussieht, entpuppt sich bei genauerer Betrachtung als verschlungener Pfad des Wissensgewinns, der erstaunliche Kontinuitäten ebenso sehen lässt wie schroffe Abbrüche, Umwege und Eliminationen.

Ein großer Teil etwa der heutigen Physik *kann* als gesichertes Wissen beschrieben werden. Diese nachvollziehbare Position weckt aber auch Zweifel: Wann glaubte man nicht, sich von früheren Zeiten abgrenzen zu dürfen, weil man es „so herrlich weit gebracht“ habe? Wann hielt man nicht die wichtigsten Anliegen für mehr oder weniger geklärt? „Um 1900 herrschte die Vorstellung vor, die Physik sei ihrer Vollendung nahe. Die grundlegenden Naturgesetze seien entdeckt und nur wenige Lücken noch zu schließen“ (Carrier, 2017, S. 144). Welche Überraschungen und Konzeptwechsel haben sich seitdem vollzogen? Wäre es überhaupt wünschenswert, nahezu am Ende der Wissenschaftsgeschichte zu stehen? Wenn Theorien wesentlich durch einen *Wirklichkeitsausschnitt* bestimmt sind, den sie zu beschreiben beanspruchen, so ist die schwierige Frage nach der zu benennenden Grenze dieses Ausschnitts sogleich aufgeworfen. Überdies ist die räumliche Metapher des ‚Wirklichkeitsausschnitts‘ hilfreich, suggestiv und irreführend zugleich. So wird man nicht bestreiten, dass die zunächst plausible Unterscheidung von Mikrokosmos und Makrokosmos (entsprechend: Teilchenphysik und Astrophysik) wieder schwierig wird, wenn wir zugestehen, dass die Objekte der Astrophysik wohl so beschaffen sein dürften, dass sie zugleich Gegenstand der Teilchenphysik sein könnten. Gibt es nicht auch zu einzelnen Wirklichkeitsausschnitten konkurrierende Theorien? Wenn ja, nach welchen Kriterien ist eine Wahl zu treffen?

Eine wissenschaftliche Disziplin kann sich über einen statischen Fragen*katalog* beschreiben, gleichsam eine hausinterne *To-do*-Liste, die schrittweise abgearbeitet wird. Diese Form der Beschreibung behält etwas Äußerliches, da jede klärende Antwort unvermeidlich unter dem Vorbehalt notwendiger Korrektur steht, da aber auch jeder Ansatz einer *Antwort* weiterführende *Fragen* durch disziplininterne und disziplinübergreifende Effekte auslösen kann. Der Fortschritt angesichts einer (vorläufigen) Antwort besteht womöglich oft nur in der gewonnenen Fähigkeit, weiterführende Fragen besser, präziser stellen zu können.

8 Fazit – Folgerungen für die Labordidaktik

Labortätigkeit ist stets mit einem impliziten und expliziten *Selbstverständnis* verknüpft – wozu sicher auch das des Ingenieur*wissenschaftlers* oder Wissenschafts*ingenieurs* gehört, dem es zu gelingen scheint, dem Baconschen Ideal der Naturbeherrschung folgend, der Natur ihre Geheimnisse zu entreißen. Dieses Selbstverständnis wird angesichts der Skizze erkenntnistheoretischer Positionen herausgefordert. Eine explizite oder performative Positionierung ist angesichts der vorhandenen – und hier nur angedeuteten – Pluralität unvermeidlich. Ob eine kohärente Position interpersonell (etwa innerhalb eines Labors) und intrapersonell vorausgesetzt werden kann (im Sinne einer individuellen kohärenten Einstellung der jeweils Forschenden), ob sie gefordert oder geschaffen werden kann, wäre zu prüfen. Immerhin wäre es plausibel, wenn einzelne von der *Motivation* getrieben werden, endlich zu begreifen, „was die Welt im Innersten zusammenhält", und doch gleichzeitig sich eingestehen müssen, einzig fehleranfällige Modelle zum Umgang mit Daten zu bieten, die mit der Fachwissenschaft intersubjektiv diskutiert und interpretiert werden müssen – im Lichte vorausgesetzter Theorien, Modelle und Annahmen. Dem realen Erkenntnisdrang steht in einem spannungsreichen Wechselspiel die notwendige Skepsis gegenüber. Ambiguitätstoleranz, Gelassenheit und Ironie sind hier vermutlich als Einstellung und Haltung gefordert, um diese Spannungen bewusst und produktiv auszutragen (vgl. Berendes, 2014, S. 248).

In einem stark gesteuerten Lernlabor erscheint alles definiert: Solides, als gesichert geltendes Wissen wird vermittelt, und Handlungsfähigkeiten bzw. Kompetenzen bei den Lernenden werden aufgebaut und erweitert. Wird der wissenschaftliche und technische Rahmen eines Lernlabors so definiert, gewissermaßen statisch, ist die einzig anerkannte Unbekannte im Lernlabor das Lernverhalten der Studierenden. Das Lernlabor ist, so gesehen, der optimale Ort zur Verhaltensbeobachtung, der optimale Ort zur Beurteilung und Bewertung individueller Lernprozesse. In einem mit Blick auf die technischen Prozesse überraschungsfreien Lernlabor ist das einzig erwartete Ereignis der möglichst getreue Handlungs- und Deutungsnachvollzug durch die Lernenden. Die Grenze zwischen Forschungslabor und Lehrlabor ist aber bekanntlich bereits durch innovative didaktische Ansätze, insbesondere zum *Problembasierten Lernen* (PBL), *Projektorientierten Lernen* (POL) und *Forschenden Lernen*, in Frage gestellt (vgl. Tekkaya u. a., 2016, S. 35; grundsätzlich: Huber & Reinmann, 2019). Stellen wir nun ergänzend die erkenntnistheoretische Frage nach der Bedingung der Möglichkeit naturwissenschaftlicher Erkenntnis, kann dies möglicherweise diese Ansätze zusätzlich stärken und fördern. Denn einerseits dürfen wir bezweifeln, dass die technische Überraschungsfreiheit des Lernlabors erkenntnistheoretisch aufrechtzuerhalten ist, und andererseits wird vermutlich deutlich, welches Wissen, welche Debatten und welche Kompetenzen im Laborkontext erforderlich sind.

Wenn Studierende im Rahmen eines wissenschaftlichen Studiums ein Labor betreten, so ist diese Lehrveranstaltung (von innen wie von außen) so zu kontextualisieren – wie das Labor. Sie sollen wissen können, wo sie sind und was sie tun, wenn

sie im Labor tätig werden. Es bedarf dabei der diskursiven und streitbaren Orientierung, was ein Labor im Rahmen der Wissenschaft heute leisten kann, wie und welche Arten von Erkenntnissen dort zu gewinnen sind und welchen Sinn und Zweck das Nachvollziehen standardisierter Versuche noch haben kann. Aus diesen erst zu klärenden Überzeugungen und erkenntnistheoretischen Prämissen leiten sich die *Lernziele* für Laborveranstaltungen und die Verankerung des Lernlabors im Studienverlauf ab – und schwierig dürfte es sein, Lernziele für das Lernlabor zu formulieren, ohne sich dabei, wissentlich oder nicht, auch erkenntnistheoretisch festzulegen. Aus der Geschichte der Naturwissenschaften – einer nicht selten stilisierten Heldengeschichte – kann Motivation gewonnen werden; doch ebenso ist berechtigter Antrieb in der Vorstellung zu finden, längst nicht am Ende einer Entwicklung zu stehen, sondern potentiell hier und jetzt etwas Überraschendes geschehen zu lassen. Studierende haben etwa vierzig Jahre Berufsleben vor sich. Wäre es daher nicht angebracht, sie auch auf einen künftigen Wandel in Wissenschaft und Technik einzustellen, indem ihnen im Studium diese basale streitbare Dynamik um den Erkenntnisbegriff in der Wissenschaft eröffnet wird? *Lebenslanges Lernen* sollte ihnen möglichst nicht Anpassungsdruck im zugemuteten Wandel bedeuten, sondern es sollte mit dem Wunsch und der Fähigkeit verknüpft sein, gestaltend und reflektiert am Wandel mitzuwirken.

Literaturverzeichnis

Arendt, H. (1989). *Vita Activa* oder Vom tätigen Leben. 6. Aufl. München: Piper.

Berendes, J. (2014). Eine Frage der Haltung? Überlegungen zu einem neuen (und alten) Schlüsselbegriff für die Lehre. In Rentschler, M. & Metzger, G. (Hrsg.), *Perspektiven angewandter Hochschuldidaktik: Studien und Erfahrungsberichte*. (Report – Beiträge zur Hochschuldidaktik 44., S. 229–257). Aachen: Shaker.

Bruchmüller, H.-G. & Haug, A. (2001). *Labordidaktik für Hochschulen. Eine Einführung zum Praxisorientierten Projekt-Labor* (Schriftenreihe report 40). Alsbach: Leuchtturm-Verlag.

Carnap, R. (1998). *Der logische Aufbau der Welt*. Hamburg: Meiner.

Carrier, M. (2017). *Wissenschaftstheorie zur Einführung*. 4. überarb. Aufl. Hamburg: Junius.

Cohen, F. (2010). *Die zweite Erschaffung der Welt. Wie die moderne Naturwissenschaft entstand*. Aus dem Niederländischen von A. Ecke und G. Seferens. Frankfurt a. M.: Campus.

Dingler, H. (1928). *Das Experiment. Sein Wesen und seine Geschichte*. München: Ernst Reinhardt.

Feyerabend, P. (1993). *Wider den Methodenzwang*. 4. Aufl. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.

Fleck, L. (1980). *Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache. Einführung in die Lehre vom Denkstil und Denkkollektiv*. Mit einer Einleitung hrsg. v. L. Schäfer u. Th. Schnelle. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.

Franuszkiewicz, J. u. a. (2019). Flexibles und selbstorganisiertes Lernen im Labor – Remote-Labore in der Hochschullehre. *ZFHE* Jg. 14/3 (November 2019), 273–285.
Gutmann, M. (2017). *Leben und Form*. Berlin: Springer.
Gutmann, M. & Nick, P. (2019). Modellbildung. In Nick, P. u. a. (Hrsg.). *Modellorganismen* (S. 199–242). Berlin: Springer.
Hacking, I. (1996). *Einführung in die Philosophie der Naturwissenschaften*. Aus dem Englischen übersetzt von J. Schulte. Stuttgart. Reclam.
Handke, P. (1978). *Die Stunde der wahren Empfindung*. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.
Huber, L. & Reinmann, G. (2019). *Vom forschungsnahen zum forschenden Lernen an Hochschulen*. Wege der Bildung durch Wissenschaft. Wiesbaden: Springer.
Hume, D. (2015). *Eine Untersuchung über den menschlichen Verstand*. Übers. v. R. Richter. Mit einem Nachwort v. M. Kühn. Hamburg: Meiner.
Jaeger, L. (2015). *Die Naturwissenschaften*. Eine Biographie. Heidelberg: Springer.
Janich, P. (1995). Experiment. In Mittelstraß, J. *Enzyklopädie der Philosophie und Wissenschaftstheorie* (Bd. 1. A-G. S. 621–622). Stuttgart, Weimar: Metzler.
Janich, P. (1997). *Kleine Philosophie der Naturwissenschaften*. München: C. H. Beck
Janich, P. (2015). *Handwerk und Mundwerk*. München: C. H. Beck.
Kant, I. (1956). *Kritik der reinen Vernunft*. In *Werke in sechs Bänden*. Hrsg. v. W. Weischedel. Bd. 2. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
Kant, I. (1957). *Kritik der Urteilskraft*. In *Werke in sechs Bänden*. Hrsg. v. W. Weischedel. Bd. 5. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
Knorr Cetina, K. (2016). *Die Fabrikation von Erkenntnis. Zur Anthropologie der Naturwissenschaft*. Mit einem Vorwort v. R. Harré. Erweiterte Neuauflage. 4. Aufl. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.
Kuhn, T. S. (1989). *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*. 2., rev. u. um das Postskriptum von 1969 erg. Aufl. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.
Luhmann, N. (1991). *Die Wissenschaft der Gesellschaft*. 2. Aufl. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.
Nöth, W. (2000). *Handbuch der Semiotik*. 2. Aufl. Stuttgart, Weimar: Metzler.
Polanyi, M. (2016). *Implizites Wissen*. Übersetzt v. H. Brühmann. 2. Aufl. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.
Popper, K. (2005). *Logik der Forschung*. 11. Aufl. Hrsg. v. Herbert Keuth. Tübingen: Mohr.
Popper, K. (1984). *Objektive Erkenntnis. Ein evolutionärer Entwurf*. 4. verb. und erg. Aufl. Hamburg: Hoffmann und Campe.
Rheinberger, H.-J. (2001). *Experimentalsysteme und epistemische Dinge. Eine Geschichte der Proteinsynthese im Reagenzglas*. Göttingen: Wallstein.
Rheinberger, H.-J. (2013). *Historische Epistemologie zur Einführung*. 3. Aufl. Hamburg: Junius.
Ryle, G. (1978). *Der Begriff des Geistes*. Übers. v. K. Baier. Stuttgart: Reclam.
Stegmüller, W. (1978). *Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie. Eine kritische Einführung*. Bd. 1. 6. Aufl. Stuttgart: Kröner.
Tetens, H. (1987). *Experimentelle Erfahrung*. Hamburg: Meiner.
Tetens, H. (2013). *Wissenschaftstheorie*. Eine Einführung. München: C. H. Beck.

Tekkaya, A. E. u. a. (2016). *Das Labor in der ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung*. Zukunftsorientierte Ansätze aus dem Projekt IngLab. (acatech STUDIE) München: utzverlag.

Terkowsky, C. u. a. (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*. 17 October 2019. DOI: 10.1111/ejed.12368 Verfügbar unter: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ejed.12368 (Zugriff am 26.4.2020)

Wille, M. (2015). Die Disziplinierung des Denkens. Wilhelm Kamlahs und Paul Lorenzens Logische Propädeutik. In Pörksen, B. (Hrsg.): *Schlüsselwerke des Konstruktivismus* (2., erweit. Aufl., S. 149–163). Wiesbaden: Springer.

Kompetenzförderung im Laborpraktikum

Marc D. Sacher, Anna B. Bauer

Abstract

Mit dem Bologna-Prozess hat in der deutschen Hochschullandschaft ein Wandel der Lernorientierung weg von der Content- hin zu einer Outcome-Orientierung begonnen. Laborpraktika können diesem Wandel aufgrund des hohen Praxisanteils besonders gut gerecht werden. Anhand des neu konzipierten, kompetenzorientierten *Paderborner Physik Praktikums 3P* wird in dem Beitrag beispielhaft dargestellt, wie Lehrende in ihren Lehrveranstaltungen den veränderten Kompetenzerwartungen gerecht werden können.

Schlüsselwörter: Laborpraktikum, Kompetenzorientierung, Lehr-Lernumgebungsgestaltung, Cognitive Apprenticeship, Forschendes Lernen

1 Motivation

Im Laborpraktikum erfolgt in naturwissenschaftlich-technischen Studiengängen die Ausbildung der experimentellen Kompetenz. Diese umfasst alle Wissensbestände, Fähigkeiten und Fertigkeiten, die für die Planung [, den Aufbau, die Optimierung] und Durchführung von Experimenten sowie für das Auswerten und Interpretieren experimentell gewonnener Ergebnisse und die Ableitung von Erkenntnissen notwendig sind (Gut-Glanzmann & Mayer, 2018). Auch das Heranführen der Studierenden an den Erkenntnisprozess ihrer Wissenschaftsdisziplin, der Erwerb fundierten fachmethodischen Wissens sowie die Verknüpfung und Vertiefung von Fachwissen können je nach Anlage des Praktikumskonzepts Ziele von Laborpraktika sein (Nagel u. a., 2019; Zwickl u. a., 2012; KFP, 2010). Weiterhin können fachübergreifende Kompetenzen im Bereich der schriftlichen und mündlichen Präsentation sowie soziale und selbstregulative Kompetenzen gefördert werden.

In diesem Artikel wollen wir am Beispiel des *Paderborner Physik Praktikums 3P*[1] beleuchten, wie ein traditionelles Laborpraktikum in ein kompetenzorientiertes Laborpraktikum umgestaltet werden kann, um veränderten Kompetenzerwartungen und individuellen Rahmenbedingungen im eigenen Fach gerecht zu werden.

1 Ausgezeichnet vom Stifterverband und der Joachim-Herz-Stiftung mit einem Fellowship für Innovationen in der Hochschullehre.

2 Ausgangslage

Beim Experimentieren handelt es sich um eine hochkomplexe Methodik, da Forschende nicht nur fachliche und überfachliche Fähigkeiten in kompetente Handlungen transferieren, sondern diese nach jedem Prozessschritt auch vor dem Hintergrund der erhaltenen Ergebnisse reflektieren (Höttecke & Rieß, 2015). Laborpraktika haben daher neben der reinen Vermittlung fachlichen und methodischen Wissens eine weit größere Bedeutung im Studiengang: eine Einführung in die fachspezifische Denk- und Arbeitsweise und in die Sozialisation in der Fachkultur als Vorbereitung auf Qualifikationsarbeiten sowie auf die spätere berufliche Tätigkeit.

In der Physik hat Friedrich Kohlrausch bereits vor über 150 Jahren mit Studierenden in seinem Labor gearbeitet und damit den Grundstein für das Physikalische Praktikum gelegt (Kohlrausch, 1900). Wilhelm Westphal übertrug seinen Ansatz in den 1930er Jahren auf stark zunehmende Studierendenzahlen. Er etablierte ein Konzept mit kochrezeptartigen Anleitungen an Demonstrationsexperimenten (Westphal, 1930). Seit den 1970er Jahren wurden weitere Ansätze entwickelt – solche, die den Studierenden eine größere Selbstständigkeit erlauben (FAU, 2020), die die Forschung in den Mittelpunkt rücken (Alemani, 2017), die auf adressatenspezifischen Kontexten basieren (Theyßen, 2000) oder die gezielt die Kompetenzentwicklung fördern (Sacher u. a., 2015).

Laborpraktika sind heutzutage in alle naturwissenschaftlich-technischen Studiengänge integriert, inhaltlich häufig fachsystematisch strukturiert, an Vorlesungen angebunden und orientiert an Westphals Konzept. Praktikumsversuche gliedern sich in der Regel in eine Vorbereitung im Selbststudium (anhand eines Einführungstextes zu Fachwissen, Aufgabenstellung und Aufbau sowie kleinschrittigen Handlungsanweisungen für die Durchführung und Auswertung), in die Präsenzphase mit Klärung der Aufgabenstellung, in das Fach- und Methodenwissen (Frontalvortrag durch den Lehrenden, offene Diskussion oder Prüfungsgespräch), in das betreute Experimentieren im Labor und schließlich in die Nachbereitung mit Schreiben eines Berichtes oder der Vervollständigung eines Protokolls. Oft wird der Bericht bzw. das Protokoll von Lehrenden mit Rückmeldungen versehen und eine Überarbeitung des Textes erwartet.

Die Betreuung der Studierenden wird abhängig von Hochschulform und Praktikumskonzeption von Hochschullehrern, Postdocs, Doktoranden, Studentischen Hilfskräften und/oder Technikern mit einer Betreuungsrelation zwischen 1 : 2 und 1 : 20 realisiert. Auf Basis einer Abschlussprüfung oder Einzelleistungen (z. B. Gespräche oder Berichte zum Versuch) wird eine Abschlussnote für die Lehrveranstaltung gebildet.

Ursache für die Verbreitung des Praktikumskonzepts ist sicher, dass sich das Konzept auch bei großen Kohorten effizient in Bezug auf Organisation, Ablauf und Lernbegleitung realisieren lässt. Es wird allerdings vermutet, dass bei ihm eine Diskrepanz zwischen den intendierten Zielen und dem tatsächlichen Lernzuwachs der Studierenden vorliegt (Welzel & Haller, 1998). Bei derartigen Experimenten (Wilcox & Lewandowski, 2016) entfällt in der Regel das eigenständige Planen und Aufbauen

und damit das Durchdenken des experimentellen Vorgehens, was häufig zu rein ergebnisorientierten Handlungen führt: Werden die vom Lehrenden erwarteten Ergebnisse reproduziert, wird das Experiment beendet. Eine intensive Analyse des experimentellen Vorgehens findet nicht statt, und so wird eine tiefergehende Beurteilung der Methoden und Messergebnisse verhindert (Holmes, Wiemann & Bonn, 2015). Dies führt zu teilweise erheblichen Defiziten im Bereich der experimentellen Kompetenz (Haller, 1999).

3 Hochschuldidaktische Ansätze

Den genannten Herausforderungen kann mit der Gestaltung eines innovativen Laborpraktikums unter Verwendung erprobter Konzepte und etablierter didaktischer Ansätze begegnet werden. In diesem Kapitel werden neben der Kompetenzorientierung zwei (hochschul-) didaktische Konzepte vorgestellt, die bei der Realisierung von zeitgemäßen Praktika hilfreich sein können.

3.1 Kompetenzorientierung

Kompetenzen werden schrittweise aufeinander aufbauend und kontextspezifisch erworben und zeigen sich in kompetenten Handlungen (Weinert, 2001, S. 27 f.; Klieme & Leutner, 2006).

Aus lehr-lerntheoretischen Untersuchungen folgt, dass sich der Kompetenzerwerb nur bedingt steuern lässt. Mittels authentischer und erkenntnisoffener Lerngelegenheiten sowie transparenter Lernziele kann dies jedoch erreicht werden. Weiterhin kann eine aktive Mitgestaltung des Lernprozesses und eine systematische Feedbackstruktur zur Analyse des eigenen Lernstandes anregen und die Kompetenzentwicklung unterstützen (Rottlaender, 2017).

Für einen elaborierten Erwerb von Kompetenzen sollte eine systematisch gestufte Kompetenzentwicklung angelegt werden. Dies kann z. B. dadurch erreicht werden, dass Lernende ihre Kompetenzen in verschiedenen komplexer und abstrakter werdenden Situationen anwenden und erproben.

Der Schwierigkeitsgrad eines kompetenzorientierten Lernziels und damit die vorgesehene Handlungskomponente wird über den Fachinhalt und ein kognitives Anforderungsniveau expliziert (FBZHL, 2013). Für eine Stufung des Anforderungsniveaus eignet sich beispielsweise das Modell der Lernzieltaxonomie nach Anderson & Krathwohl (2001), von uns angepasst auf Laborpraktika (siehe Abb. 1). Darüber hinaus bestimmt die Komplexität des Inhalts den Schwierigkeitsgrad der Handlungskomponente: Werden mehrere Handlungskomponenten für die Bearbeitung einer Aufgabe verknüpft, erhöht sich der Schwierigkeitsgrad des Lernziels erneut.

Letztendlich zeichnet sich eine kompetenzorientierte Lehre, die den Charakteristika von Lernprozess und Kompetenzerwerb gerecht wird, nach dem Ansatz des Constructive Alignments (Biggs, 2003) dadurch aus, dass Lernumgebung, intendierte Lernziele und die Prüfung der erreichten Kompetenzen aufeinander abgestimmt sind.

Abbildung 1: Taxonomie zur Hierarchisierung kognitiver Prozesse. Für eine kognitive Operation auf einer höheren Stufe müssen alle darunterliegenden Operationen erfolgreich bewältigt werden können. In Prüfungen und bei der Gestaltung von Aufgabenstellungen kann auf die Begriffe zurückgegriffen werden, um eine Auseinandersetzung auf der gewünschten Anforderungsstufe anzuregen (nach Anderson & Krathwohl, 2001)

Ein didaktischer Ansatz, der bei der konkreten Ausgestaltung der Lernumgebung genutzt werden kann, ist das Prinzip des Cognitive Apprenticeship (Collins, Brown & Newman, 1989). Hierbei werden den Lernenden die kognitiven Denkprozesse, die beim Bearbeiten von komplexen Problemstellungen zu absolvieren sind, aufgezeigt und ihre Bedeutung für das „Endprodukt“ erklärt.

Das Vorgehen dabei ist durch folgende Phasen gekennzeichnet: Zunächst demonstriert der Lehrende den Lösungsweg eines Problems bzw. eines zu lernenden Inhalts (modeling) anhand von Handlungsmustern und macht seine Denk- und Handlungsprozesse beim Lösen des Problems sichtbar (articulation). Der Lernende vollzieht diese Muster nach. Danach wird er mit auf seinen Lernstand angepassten Unterstützungsmaterialien wie Arbeitsanweisungen (scaffolding) angeregt, das gelernte Muster auf komplexer werdende Situationen zunehmend selbstständiger (exploration) anzuwenden und eine Generalisierung der Kompetenzen zu erreichen. Der Lehrende unterstützt, indem er mit den Lernenden die Möglichkeiten und Grenzen der einzelnen Handlungsmuster diskutiert und reflektiert (reflection). Bei steigender Selbstständigkeit der Lernenden zieht er sich zunehmend zurück (fading) und nimmt eine eher moderierende Rolle im Lernprozess ein (coaching) (Collins, Brown & Newman, 1989).

Das Forschende Lernen ist ein didaktischer Ansatz (Huber, 2009), bei dem die Lernenden in authentischen Situationen den Prozess eines idealerweise realen Forschungsvorhabens in allen wesentlichen Phasen aktiv (mit)gestalten, erfahren und

reflektieren – von der Fragestellung bis zum Präsentieren. Im Idealfall legen die Studierenden ihr Vorgehen in allen Arbeitsphasen des wissenschaftlichen Erkenntnisprozesses selbst fest. Neben der intensiven Auseinandersetzung mit einer Fragestellung und dem damit verbundenen fachlichen Kompetenzerwerb wird durch den Forschungsbezug die Relevanz der eigenen Kompetenzentwicklung deutlich. Einstellungen und Erkenntnishaltungen, die bei der Sozialisation in der jeweiligen Fachkultur von Bedeutung sind, werden weiterentwickelt (Wilcox & Lewandowski, 2017).

Das Forschende Lernen setzt mit der selbstständigen Bearbeitung einer wissenschaftlichen Fragestellung bereits zahlreiche Kompetenzen voraus. Diese sollten im Vorfeld im Sinne einer systematischen Kompetenzorientierung ausgebildet werden.

4 Realisierung kompetenzorientierter Laborpraktika

Wie bereits beschrieben, handelt es sich beim Experimentieren um einen hochkomplexen Prozess, für dessen Steuerung eine Vielzahl experimenteller und fachübergreifender Kompetenzen notwendig sind – insbesondere eine ständige Reflexion des aktuellen Fortschritts. In diesem Kapitel beschreiben wir schrittweise die Ausarbeitung eines kompetenzorientierten Laborpraktikums gemäß den vorgestellten didaktischen Ansätzen und illustrieren dies mit erprobten Realisierungen aus dem viersemestrigen *Paderborner Physik Praktikum 3P*. Die Kompetenzentwicklung der Studierenden wird im 3P durch strukturierte, offene Aufgabenstellungen, umfangreiche Unterstützungsmaterialien, eine multiperspektivische Feedbackstruktur sowie eine sukzessiv reduzierte Lernprozessbegleitung durch die Lehrenden erzielt.

4.1 Lernziele festlegen

Zu Beginn einer Praktikumskonzeption steht die kleinteilige Sammlung und Auswahl der zu erreichenden Ziele bzw. zu fördernder Kompetenzen. In Paderborn haben wir uns basierend auf Forschungsarbeiten (Zwickl, 2013; Emden, 2011) und eigenen Erfahrungen für jene Kompetenzen entschieden, die ein forschender Physiker für seine Arbeit im Labor benötigt (Abb. 2). Bei ihrer Ausformulierung wurde jeweils der höchste Schwierigkeitsgrad (*Kreieren*) als zu erreichendes Lernziel am Ende des viersemestrigen Praktikums gewählt. Fachübergreifende Kompetenzen, z. B. *Lernstand reflektieren,* vervollständigen die Sammlung. Bei Nebenfachpraktika werden nach einer Analyse möglicher Berufsfelder der Studierenden die Ziele oft deutlich anders angesetzt: Werden sie später eher detaillierte Anweisungen erhalten, sollte das *sorgfältige Abarbeiten von Messaufgaben* auf dem Niveau *Analysieren* im Vordergrund stehen, während Absolventen, die DIN-Normen festlegen, auch das *kritische Beurteilen* und *begründete Festlegen eines Messaufbaus* auf dem Anforderungsniveau *Kreieren* systematisch erlernen sollten.

Abbildung 2: Die im 3P zu erlernenden Kompetenzfacetten: Experimentelle Facetten (Mitte), exemplarische Auffächerung der Facette „Experiment optimieren“ (rechts) und fachübergreifende Facetten (links)

4.2 Kompetenzentwicklung anlegen

Im nächsten Schritt werden die Kompetenzfacetten entsprechend einer systematischen Kompetenzentwicklung in eine aufeinander aufbauende Struktur gebracht. Die einfachste Möglichkeit ist eine Stufung entlang der Anforderungsniveaus vom *Anwenden* bis zum *Kreieren*.[2] Wird zusätzlich die Komplexität der Inhalte verändert, könnte die Kompetenz *Messplan erstellen* beispielsweise wie folgt gestuft werden:

1. Die Studierenden können einen Messplan im Experiment XY anwenden.
2. Die Studierenden können alternative Messpläne im (komplexeren) Experiment YZ kriteriengeleitet beurteilen.
3. Die Studierenden können einen Messplan für ein beliebiges Experiment entwickeln.

Mit der Anzahl der in einer Aufgabenstellung verknüpften Kompetenzfacetten kommt schließlich neben dem Anforderungsniveau und dem Inhalt eine dritte Variable zur Steuerung des Schwierigkeitsgrades hinzu.

Im Sinne einer systematischen, aufeinander aufbauenden Kompetenzentwicklung sollten die Experimentiereinheiten in einer festen Reihenfolge absolviert werden. Die Kompetenzentwicklung im 3P erfolgt fachmethodisch entlang des wissenschaftlichen Erkenntnisprozesses (Abb. 2). In den ersten sechs Wochen werden im Rahmen einer Einführungsvorlesung die grundlegenden Kompetenzen des wissenschaftlichen Experimentierens bis hin zum Anforderungsniveau *Kennen* und *Verstehen* vermittelt. Mit ergänzenden Präsenzübungen wird das Anforderungsniveau *Anwenden* erreicht. In den anschließenden Experimentiereinheiten im ersten Semester werden stets alle übergeordneten experimentellen Kompetenzfacetten durchlaufen, je eine Facette wird dabei auf höchstem Anforderungsniveau adressiert, während die übrigen auf dem Niveau *Anwenden* verbleiben. Im zweiten und dritten Semester steigert sich sukzessive die inhaltliche Komplexität, der Umfang der Aufgabenstellung und die Zahl der miteinander verknüpften Kompetenzfacetten auf hohem („Analysieren“ oder „Beurteilen“) und höchstem („Kreieren“) Anforderungsniveau. Zum Ende des dritten Semesters sollten die Studierenden alle übergeordneten Facetten bis zum Anforderungsniveau *Kreieren* beherrschen, um im vierten Semester eigenständig ein Projekt im Sinne des Forschenden Lernens bearbeiten zu können. In allen Semestern werden die Studierenden angeregt, Handlungen und Denkprozesse im Hinblick auf den Prozess des Experimentierens zu diskutieren und zu reflektieren.

4.3 Inhalte auswählen

Für die Neukonzeptionierung eines Praktikums sollten sämtliche Inhalte hinterfragt, einzelne verworfen, neue ausgewählt und geordnet werden. Ist die Vertiefung von speziellen Vorlesungsinhalten kein zentrales Ziel des Praktikums, kann z. B. auf eine fachsystematische Reihung zugunsten einer gezielten fachmethodischen Kompetenzentwicklung verzichtet werden. Die Inhalte werden dann als Kontext auf

2 Die Anforderungsniveaus *Kennen* und *Verstehen* werden in der Regel in die individuelle Vorbereitung verlagert und die begleitete Präsenzphase für die Bearbeitung höherer Anforderungsniveaus genutzt, um neues Wissen über die kognitiven Prozesse *Beurteilen und Erschaffen* selbst zu generieren, statt auswendig zu lernen.

Grundlage der zu fördernden Kompetenzfacette ausgewählt. Dabei eignet sich nicht jeder Inhalt für jede Facette gleich gut. Die Kompetenz *Aufbau entwickeln* etwa würde man nicht im Kontext radioaktiver Präparate fördern, *Statistische Schwankungen analysieren* hingegen schon.

Das 3P beginnt in der Einführungsphase mit sehr einfachen inhaltlichen Kontexten bzw. Fragestellungen. Die Studierenden absolvieren schrittweise ihr erstes vollständiges Experiment und schreiben dazu ihren ersten Bericht. In Vorlesungen werden anhand von Demonstrationsexperimenten die Handlungsmuster für das Planen, Aufbauen, Durchführen und (computergestützte) Auswerten von Experimenten demonstriert (modeling). In ergänzenden Präsenzübungen übertragen die Studierenden ihr Wissen bei der Bearbeitung der Fragestellung *Welche Dichte hat [eine Möhre]?* auf das nächsthöhere Anforderungsniveau *Anwenden* (exploration). In nachgelagerten Workshops zum wissenschaftlichen Schreiben wird der Zweck jeweils eines Berichtskapitels zunächst anhand eines Beispielberichts besprochen und anschließend auf die eigenen Messdaten angewendet.

Die im ersten Semester folgenden vier eintägigen Experimentiereinheiten beschränken sich bei den Fachinhalten auf gut bekannten Oberstufenstoff im Kontext Mechanik, um den Fokus auf die Fachmethodik und die experimentelle Kompetenzentwicklung legen zu können.

Im zweiten Semester absolvieren die Studierenden zweitägige Experimentiereinheiten im Kontext Elektrodynamik (Bauer & Sacher, 2018). Am ersten Tag wird jeweils ein experimentelles Setup geplant, aufgebaut und charakterisiert, um es am zweiten Labortag für die Erfassung von Messdaten und die Beantwortung der Fragestellung zu nutzen. Außerdem wird das anspruchsvolle *Fragestellung finden* in den Fokus genommen, indem verschiedene Varianten begleitet formuliert, analysiert und beurteilt werden. Unter Verwendung der Schaltungssimulation *LTSpice* werden die Aufgaben zunächst theoretisch bearbeitet und das experimentelle Vorgehen abgeleitet.

Im dritten Semester führen die Studierenden komplexere Experimente zur automatisierten Messwerterfassung und Geräteansteuerung unter Nutzung der Programmiersprache *LabVIEW* im Kontext verschiedener Fachinhalte der ersten Semester durch. Die Experimentiereinheiten erstrecken sich jeweils über drei Tage (Aufbau, Programmierung, Datenerfassung). Die Experimentiereinheiten werden von den Studierenden selbstständig strukturiert, um die Ausbildung der selbstregulativen Kompetenz zu fördern. Der Betreuende unterstützt die Studierenden dabei mittels Feedbacks. Neben Berichten werden erstmals auch Poster zur Präsentation der Ergebnisse angefertigt.

Im vierten Semester bearbeiten die Studierenden in Teams à 3–5 Personen selbstständig ein frei gewähltes Projekt nach dem Ansatz des Forschenden Lernens. Die Themen werden aus dem Aufgabenpool des jährlich stattfindenden International Physics Tournament (IPT 2020) gewählt. Die Studierenden sind selbstständig für das Festlegen einer geeigneten Fragestellung, eines methodischen Vorgehens, das Verteilen von Arbeitsaufträgen und das Definieren von Meilensteinen verantwortlich.

4.4 Aufgaben und Organisationstruktur entwickeln

Kompetenzorientierte Aufgabenstellungen sollen eine intensive, handelnde Auseinandersetzung mit dem Lerngegenstand auslösen, was über kognitive Anforderungsniveaus *Beurteilen* und *Erschaffen* sowie eine hohe Komplexität der Aufgabe realisiert werden kann. Der Weg der Bearbeitung sollte möglichst offen sein, um das selbstständige Denken anzuregen (exploration).

Im 3P werden Aufgaben stets in Form physikalischer Fragestellungen gegeben. Im ersten Semester sind dies einfache vorgegebene Fragestellungen. In den folgenden Semestern legen Studierende mehr und mehr die Fragestellungen selbst fest.

Um die Studierenden Schritt für Schritt zu unterstützen, wurde eine vollständig neue organisatorische Struktur für die Experimentiereinheiten erarbeitet (Abb. 3): In den ersten drei Semestern bearbeiten idealerweise sechs Studierende in Zweierteams gemeinsame Aufgaben, jedes Team erhält jedoch leicht abweichende Anweisungen, Geräte oder Materialien. Im Experiment zur Kompetenz *Versuchsaufbau entwickeln* mit dem Kontext *Energie- und Impulserhaltung* und der Fragestellung *Genügt die erzielte Präzision, um mit dem entwickelten experimentellen Setup die Energie- und Impulserhaltung nachzuweisen?* unterscheiden sich beispielsweise die zur Verfügung gestellten Materialien: Luftkissenbahn vs. Bodengleiter vs. Luftkissentisch.

Abbildung 3: Organisationsstruktur der Experimentiereinheit zur Kompetenz *Versuchsaufbau entwickeln*. Diskussionen zwischen allen sechs Studierenden und Experimentierphasen im Zweierteam wechseln sich ab.

Jede Experimentiereinheit gliedert sich in abwechselnde Diskussions- und Experimentierphasen. In den Diskussionsphasen analysieren und beurteilen alle Studierenden gemeinsam die Planung, das Vorgehen bzw. die gewonnenen Erkenntnisse der Zweierteams aus den Experimentierphasen.

Im ersten Semester sieht die Ausgestaltung der Experimentiereinheiten wie folgt aus: Zunächst werden die Experimentiermaterialien von den Teams analysiert und der Aufbau geplant. In der nachfolgenden Diskussionsphase stellen die Studierenden ihre Planung und die hierzu vorgenommene Verknüpfung von Fragestel-

lung, die in der Vorbereitung erlernten fachlich-theoretischen Zusammenhängen mit den zur Verfügung stehenden Materialien vor und diskutieren diese. Nach der Durchführung des Experimentes in der folgenden Experimentierphase treffen sich die Studierenden zur zweiten Diskussionsphase und stellen ihr Vorgehen und ihre Ergebnisse vor. Die beiden anderen Gruppen haben die Möglichkeit, Rückfragen zu stellen und Optimierungsansätze anzuregen. Durch den in der nächsten Experimentierphase anstehenden Tausch der Experimente untereinander haben die Studierenden eine hohe intrinsische Motivation, auch die Experimente der übrigen Gruppen detailliert zu durchdenken, Rückfragen zu stellen und zu diskutieren. Im Folgenden führen die Studierenden die getauschten Experimente entweder unverändert oder in optimierter Form durch. Bei Rückfragen zu den Experimenten sind die Studierenden angehalten, sich im Rahmen des kollegialen Austausches (Böckelmann & Mäder, 2018) zunächst an ihre Kommilitonen zu wenden, bevor sie die Lehrenden fragen. In einer abschließenden Diskussionsphase werden alle Erfahrungen und Ergebnisse vor dem Hintergrund der experimentellen Fragestellung diskutiert.

Die beschriebene Struktur der Experimentiereinheiten wird im zweiten Semester auf zwei Labortage gestreckt. Im dritten Semester legen die Studierenden den Ablauf der Experimentiereinheiten selbstständig fest. Sie berufen nach Bedarf Diskussionsrunden ein, verteilen Arbeitspakete untereinander und arbeiten nach Bedarf in wechselnden Teams zusammen. Für die Projektarbeit im vierten Semester sind zur Strukturierung der Gesamtkohorte einige Deadlines vorgegeben, etwa für die Vorstellung der Planung vor Kommilitonen oder die Abschlusspräsentation vor externen Gästen (Abb. 4). Die übrige Zeit kann frei eingeteilt werden.

Abbildung 4: Zeitlicher und inhaltlicher Ablauf des vierten Semesters. Die einzelnen Aktionen führen die Studierenden in Teams allein (grün), in Gegenwart von Lehrenden (blau), Peers (rot) oder Gästen (orange) durch.

4.5 Lernprozess unterstützen

Aufgrund des komplexen Konzeptes kommt den Lehrenden im 3P eine zentrale Rolle zu. Da keine kochrezeptartigen Versuchsanleitungen vorliegen, erfordert die nur bedingt vorhersehbare Auseinandersetzung der Lernenden mit der Aufgabe vom Lehrenden neben einem vertieften physikalischen und fachmethodischen Wissen umfangreiche didaktische Fähigkeiten und eine gewisse Flexibilität. Es wurde deshalb eine viertägige Schulung entwickelt, um den Einstieg in die kompetenzorientierte Lehre zu unterstützen.

Für jede Experimentiereinheit erhalten die Lehrenden detaillierte Ablaufpläne, die neben Lernzielen und Aufgabenstellungen auch Anmerkungen zur Lernbegleitung enthalten. In ihrer Rolle als Wissenschaftler*in demonstrieren die Lehrenden als authentische Vorbilder Handlungsmuster, etwa bei der gemeinsamen Lösung von Problemen am Versuchsaufbau, oder leiten als Botschafter ihrer Disziplin Einschätzungen z. B. zur Qualität aufgenommener Messdaten ab (modeling). Sie strukturieren die Experimentiereinheit, begründen den Zweck einzelner Arbeitsphasen und regen die Studierenden an, angewendete Handlungsmuster vor dem Hintergrund des Erkenntnisprozesses zu reflektieren (reflection). Mit gezielten Impulsen, z. B. zum Vergleich verschiedener Ansätze, lenken sie in Diskussionsphasen bei sonst eher zurückhaltender Moderation die Gespräche auf zentrale Aspekte (articulation). Die Lernbegleitung wird über die vier Semester ausgeschlichen (fading). Während im ersten Semester eine sehr enge Lernbegleitung und Strukturierung der Arbeit erfolgt, nehmen die Lehrenden sich jedes Semester weiter zurück und nehmen im vierten Semester eine nur noch beobachtende und beratende Rolle ein, greifen jedoch ein, wenn die von den Studierenden festgelegten Arbeitsschritte oder diskutierten Sachverhalte inhaltlich falsch oder gefährdend sind (coaching). Gegenläufig zum Ausschleichen der Unterstützung wird das kooperative Arbeiten (Böckelmann & Mäder, 2018), d. h. die gegenseitige Unterstützung durch die Kommilitonen (Peers), verstärkt.

Die Unterstützung des Lernprozesses kann darüber hinaus durch gezielt erstellte Unterstützungsmaterialien erfolgen (scaffolding). Diese können im Vorfeld (Vorbereitung auf eine Experimentiereinheit), im Nachgang (Auswerten von Messdaten und Schreiben eines Berichts) und/oder während der Experimentiereinheit eingesetzt werden. Komplexe Anforderungen können etwa mit einer Checkliste oder einem Lernvideo unterstützt werden. Im 3P werden eine Vielzahl von Unterstützungsmaterialien eingesetzt (Abb. 5)[3], wie z. B. Handlungsmuster für einzelne Arbeitsschritte in Form von Leitfäden. In diesen wird jeweils das Vorgehen erklärt, als abzuarbeitende Checkliste zusammengefasst und anhand eines Beispiels demonstriert. In freiwilligen Workshopangeboten können grundlegende Fähigkeiten z. B. zum Löten oder zum Vortraggestalten und -halten erworben werden.

3 Sämtliche Materialien werden über ein Wiki-System zur Verfügung gestellt. Im Sinne einer kollektiven Intelligenz können Studierende selbst Inhalte bearbeiten und ergänzen.

Abbildung 5: Unvollständige Liste der Scaffolding-Materialien im 3P zur Unterstützung der Lernenden. Die Farbgebung gruppiert die Materialien nach Funktionen und Gestaltungsformaten

Zur Unterstützung der Lernenden beim aktiven Gestalten des Lernprozesses kann neben der beschriebenen Unterstützungsstruktur eine systematische Feedbackstruktur implementiert werden. Die Lernenden haben so die Möglichkeit, den Ist- und Sollzustand ihrer Fähigkeiten (Sippel, 2009) sowie die Selbst- und Fremdwahrnehmung miteinander zu vergleichen, um neue Ansatzpunkte für die Gestaltung des eigenen Lernprozesses zu finden.

Im 3P erhalten die Studierenden zu allen gezeigten Leistungen (Experimentieren, Laborberichte, Vorträge halten ...) von den Lehrenden ein differenziertes, auf die jeweiligen Lernziele abgestimmtes schriftliches Feedback (Abb. 6), ergänzt um eine mündliche Einordnung.[4] Darüber hinaus erlernen sie das Prinzip des Peer-Feedbacks als Vorstufe des Peer-Reviews von Veröffentlichungen (Schulz, 2013). Mit diesem Feedback auf Augenhöhe wird zusätzlich eine neue Perspektive auf das Schreiben von Berichten erzielt und ergänzt so die Kompetenzentwicklung in diesem Feld.

4 Im Vorfeld der Leistung werden die Bewertungskriterien und die Abstufungen im Wiki veröffentlicht.

Aufnahme der Messwerte 1

Realisieren des Aufbaus (x200)	keine	Anwenden	Analysieren	Beurteilen	Erschaffen
Aufnahme der Messdaten und Schnellauswertung (x200)	keine	Anwenden	Analysieren	Beurteilen	Erschaffen
Schnellauswertung (x200)	unzureichend	in Ansätzen	erwartungsgemäß	hervorragend	
Teamarbeit (x50)	abwesend	unausgewogen	in Ansätzen	erwartungsgemäß	hervorragend
Zeiteinteilung (x50)	unzureichend	unausgewogen	beteiligt	erwartungsgemäß	hervorragend

Optimierung der durchgeführten Versuche

Analysieren der Messwerte (x100)	unzureichend	in Ansätzen	erwartungsgemäß	hervorragend
Beurteilen der Versuchdesigns (x100)	unzureichend	in Ansätzen	erwartungsgemäß	hervorragend
Gesprächsbeteiligung (x33)	unzureichend	in Ansätzen	erwartungsgemäß	hervorragend
Formulierungen (x33)	unzureichend	in Ansätzen	erwartungsgemäß	hervorragend

Abbildung 6: Ausschnitt des digitalen Feedbackbogens zur Experimentiereinheit Versuchsaufbau entwickeln. Die definierten Lernziele einer Arbeitsphase (fachlich und fachübergreifend) werden dabei als Kategorien aufgeführt, die mithilfe qualitativer Abstufungen eingeschätzt werden

4.6 Kompetenzen prüfen

Kompetenzorientierte Prüfungen werden so formuliert, dass eine Überprüfung der Lernziele auf dem adressierten Anforderungsniveau (siehe Abb. 1) erfolgt; dabei wird zwischen summativen und formativen Prüfungsformaten unterschieden (Reinmann, 2019). In summativen Prüfungen wird am Ende des Lernprozesses der Lernstand überprüft. Formative Prüfungen begleiten den Lernprozess, besitzen meist einen geringeren Umfang und haben zum Ziel, den Studierenden eine stetige Rückmeldung zu ihrem Lernstand zu geben.

Das in ein dreisemestriges und ein einsemestriges Modul gegliederte 3P wird jeweils mit einem Abschlussportfolio und einem dazugehörigen Reflexionsgespräch abgeschlossen. Das Abschlussportfolio (formativ) beinhaltet alle erarbeiteten Produkte (Berichte, Poster, verfasste Peer-Feedbacks, Reflexionsaufgaben zum Lernprozess) sowie sämtliche Feedbackbögen. Im Abschlussgespräch (summativ) wird der individuelle Lernprozess der Studierenden auf Basis des Abschlussportfolios reflektiert und eine Abschlussnote gebildet.

5 Zusammenfassung

Mit veränderten Kompetenzerwartungen an die Hochschullehre und damit verbunden mit einer neuen Lehr-Lernkultur werden die Lehrenden vor neue Herausforderungen gestellt. Anders als Vorlesungen bieten sich Laborpraktika aufgrund ihrer hohen Handlungsorientierung für neugestaltete, kompetenzorientierte Lehre an. Mit einer grundlegenden Neukonzeptionierung dieses Lehr-Lernformats können den bekannten Lerndefiziten aufgrund der Bearbeitung von Experimenten mit klein-

schrittigen Arbeitsanweisungen entgegengewirkt und Laborpraktika lernwirksamer gestaltet werden.

Als mögliche Ansätze für eine kompetenzorientierte Gestaltung werden in diesem Artikel zwei didaktische Konzepte, Forschendes Lernen und Cognitive Apprenticeship, vorgestellt. Dabei wird Schritt für Schritt eine Implementierung kompetenzorientierter Lehre vorgestellt und mögliche Realisierungsansätze am Beispiel des Paderborner Physik Praktikums 3P anhand von Aufgabenstellungen, studentischen Interaktionen, zeitlichen und organisatorischen Abläufen, Unterstützungsmaterialien sowie Feedbackelementen illustriert.

Die Evaluation wird mithilfe von Fragebögen (Zufriedenheitswerte) realisiert. Auf Basis dieser Rückmeldungen wurde das Konzept evidenzbasiert (weiter)entwickelt. Die Evaluation des Konzeptes auf der Ebene der Kompetenzentwicklung wird aktuell im Rahmen einer Dissertation (Bauer, Reinhold & Sacher, 2020) realisiert.

Aktuell arbeiten wir an einem Relaunch unseres digitalen Feedback-Systems, mit dem individuell auf die Lernziele einer Lernumgebung zugeschnittene Feedbackbögen erzeugt werden können. Dieses Werkzeug (Diffle-Tool) wird zukünftig allen Lehrenden als Web-App zur Verfügung stehen (Sacher, 2018).[5]

Literaturverzeichnis

Alemani, M. (2017). *Forschendes Lernen im Physikpraktikum. Stifterverband, Fellowships für Innovationen in der Hochschullehre*. Verfügbar unter https://www.stifterverband.org/lehrfellowships/2017/alemani [03.04.2020].

Anderson, L. W. & Krathwohl, D. R. (2001). *A Taxonomy for learning, teaching and assessing – A revision of Bloom´s taxonomy of educational objectives*. New York: Longman.

Bauer, A. B.; Reinhold, P. & Sacher, M. D. (2020). Bewertungsmodell zur experimentellen Performanz (Physik)Studierender. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen* (S. 106–110). Wien: GDCP.

Bauer, A. B. & Sacher, M. D. (2018). Kompetenzorientierte, universitäre Laborpraktika – Das Paderborner Physik Praktikum (3P). *PhyDid B*, 65–72.

Biggs, J. B. (2003). *Teaching for quality learning at university. Buckingham: Open University Press/Society for Research into Higher Education*. (Second edition).

Böckelmann C. & Mäder K. (2018). Kollegialer Austausch – kollegiales Lernen. In: *Fokus Personalentwicklung* (S. 199–207). Berlin, Heidelberg: Springer.

Collins, A., Brown, J. S. & Newman, S. E. (1989). Cognitive-apprenticeship: Teaching the crafts of reading, writing, and mathematics. In L. B. Resnick (Hrsg.), *Knowing, learning, and instruction* (S. 32–42). Hillsdale, NJ: LEA.

Empfehlung der Konferenz der Fachbereiche Physik (2010). Zur Konzeption von Bachelor- und Masterstudiengängen in der Physik. Verfügbar unter www.kfp-physik.de (Zugriff am: [03.04.2020).

5 Die Entwicklung des Diffle-Tools wird vom Stifterverband und dem Land NRW im Rahmen eines Fellowships für Innovationen in der digitalen Hochschullehre gefördert.

Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) (2020). *Projektpraktikum. Department Physik*. Verfügbar unter https://www.physik.nat.fau.de/projektpraktikum/#collapse_0 [29.05.2020].

Fortbildungszentrum Hochschullehre (FBZHL) (2014). *Leitfaden zur Formulierung kompetenzorientierter Lernziele auf Modulebene. Hochschuldidaktik – Beiträge und Empfehlungen des FBZHL der FAU*. Verfügbar unter https://www.fbzhl.fau.de/wp-content/uploads/2014/11/Leitfaeden_FBZHL_1_2013_Lernziele.pdf [03.04.2020].

Gut-Glanzmann, C. & Mayer, J. (2018). Experimentelle Kompetenz. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 121–140). Berlin, Heidelberg: Springer.

Haller, K. (1999). *Über den Zusammenhang von Handlungen und Zielen. Eine empirische Untersuchung zu Lernprozessen im physikalischen Praktikum*. Berlin: Logos-Verlag.

Holmes, N. G.; Wiemann, C. E. & Bonn, D. A. (2015). Teaching critical thinking. *PNAS*, 112 (36).

Höttecke, D. & Rieß, F. (2015). Naturwissenschaftliches Experimentieren im Lichte der jüngeren Wissenschaftsforschung – Auf der Suche nach einem authentischen Experimentbegriff der Fachdidaktik. *ZfDN* 21 (1), 127–139.

Huber, L. (2009). Warum Forschendes Lernen nötig und möglich ist. In L. Huber, J. Hellmer & F. Schneider (Hrsg.), *Forschendes Lernen an Hochschulen* (S. 9–35). Berlin: Springer VS.

International Physicists Tournament (2020). *Problems*. Verfügbar unter https://iptnet.info/problems/ [03.04.2020].

Klieme, E. & Leutner, D. (2006). Kompetenzmodelle zur Erfassung individueller Lernergebnisse und zur Bilanzierung von Bildungsprozessen – Beschreibung eines neu eingerichteten Schwerpunktprogramms der DFG. *Zeitschrift für Pädagogik* 52 (6), 876–903.

Kohlrausch, F. (1900). *Kleiner Leitfaden der Praktischen Physik*. Leipzig.

Nagel, C.; Scholz, R. & Weber, K. (2019). Umfrage zu Lehr/Lernzielen in physikalischen Praktika. *PhyDid B*, 97–109.

Reinmann, G. (2019). Forschendes Lernen prüfen: Hochschuldidaktische Gedanken zu einer Theorie des Prüfens. *Zeitschrift für Pädagogik*, 4, 608–626.

Rottlaender, E. (2017). Lehren und Lernen nach Bologna: Kompetenzorientiertes Arbeiten im Labor. In T. Bruckermann & K. Schlüter (Hrsg.), *Forschendes Lernen im Experimentalpraktikum Biologie* (S. 1–9). Berlin, Heidelberg: Springer.

Sacher, M. D.; Probst, H. M.; Reinhold, P. J. & Schaper, N. (2015). Entwicklung eines kompetenzorientierten physikalischen Laborpraktikums. In S. Hartz & S. Marx (Hrsg.), *Leitkonzepte der Hochschuldidaktik Theorie – Praxis – Empirie* (S. 128–136). Blickpunkt Hochschuldidaktik. Bielefeld: W. Bertelsmann Verlag.

Schulz, F. (2013). *Peer Feedback in der Hochschullehre hilfreich gestalten. Onlinegestütztes Peer Feedback in der Lehrerbildung mit der Plattform PeerGynt*. (Schriftenreihe Pädagogische Materialien der TU Kaiserslautern, 46).

Theyßen, H. (2000). *Ein Physikpraktikum für Studierende der Medizin. Darstellung der Entwicklung und Evaluation eines adressatenspezifischen Praktikums nach dem Modell der Didaktischen Rekonstruktion*. Berlin: Logos-Verlag.

Welzel, M. & Haller, K. et al. (1998). Ziele, die Lehrende mit dem Experimentieren in der naturwissenschaftlichen Ausbildung verbinden. Ergebnisse einer europäischen Umfrage. *ZfDN* 4 (1): 29–44.

Westphal, W. H. (1938). *Physikalisches Praktikum*. Braunschweig.

Weinert, F. E. (2001). Vergleichende Leistungsmessung in Schulen – Eine umstrittene Selbstverständlichkeit. In: F. E. Weinert (Hrsg.), *Leistungsmessung in Schulen* (S. 17–32). Weinheim: Beltz.

Wilcox, B. & Lewandowski, H. (2017). Students' views about the nature of experimental physics. *Physical Review Physics Education Research* 13.

Zwickl, B. M. & Finkelstein, N. (2013). The process of transforming an advanced lab course: Goals, curriculum and assessment. *American Journal of Physics* (81): 63–70.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Taxonomie zur Hierarchisierung kognitiver Prozesse. Für eine kognitive Operation auf einer höheren Stufe müssen alle darunterliegenden Operationen erfolgreich bewältigt werden können. In Prüfungen und bei der Gestaltung von Aufgabenstellungen kann auf die Begriffe zurückgegriffen werden, um eine Auseinandersetzung auf der gewünschten Anforderungsstufe anzuregen 54

Abb. 2 Die im 3P zu erlernenden Kompetenzfacetten: Experimentelle Facetten (Mitte), exemplarische Auffächerung der Facette „Experiment optimieren" (rechts) und fachübergreifende Facetten (links) 56

Abb. 3 Organisationsstruktur der Experimentiereinheit zur Kompetenz *Versuchsaufbau entwickeln*. Diskussionen zwischen allen sechs Studierenden und Experimentierphasen im Zweierteam wechseln sich ab. 59

Abb. 4 Zeitlicher und inhaltlicher Ablauf des vierten Semesters. Die einzelnen Aktionen führen die Studierenden in Teams allein (grün), in Gegenwart von Lehrenden (blau), Peers (rot) oder Gästen (orange) durch. 60

Abb. 5 Unvollständige Liste der Scaffolding-Materialien im 3P zur Unterstützung der Lernenden. Die Farbgebung gruppiert die Materialien nach Funktionen und Gestaltungsformaten 62

Abb. 6 Ausschnitt des digitalen Feedbackbogens zur Experimentiereinheit Versuchsaufbau entwickeln. Die definierten Lernziele einer Arbeitsphase (fachlich und fachübergreifend) werden dabei als Kategorien aufgeführt, die mithilfe qualitativer Abstufungen eingeschätzt werden 63

Kreatives forschendes Lernen im Projektlabor Physik fördern

Andrea Merli, Birgit Kanngiesser, Thomas Möller

Abstract

Seit knapp 50 Jahren bietet das Anfängerpraktikum „Projektlabor Physik“ an der Technischen Universität Berlin besonders viel Freiraum für Eigeninitiative und Kreativität und stellt dort ein Alleinstellungsmerkmal des Physikstudiums dar. Angelehnt an das Konzept „Forschendes Lernen“ können Studierende bereits ab dem ersten Fachsemester in großer Selbstständigkeit in einer repressionsarmen Umgebung physikalisch-naturwissenschaftliche Kenntnisse erwerben. Die Lernziele des Projektlabors entsprechen denen der traditionellen Anfängerpraktika und werden durch selbst gewählte Themen, eigenständig geplante und aufgebaute Experimente sowie deren Durchführung und Auswertung erreicht.

Durch Gruppenarbeit werden Studierende des Projektlabors in Teamfähigkeit und Entwicklung sozialer Kompetenzen gefördert; der/die Tutor/in als „erfahrenes“ Gruppenmitglied nimmt dabei eine besondere Rolle ein. Der hohe Zeitaufwand für ein modernes und kreatives Praktikum wird sowohl von Studierenden als auch von Betreuer*innen gern in Kauf genommen. Durch eine starke Teilnehmendenorientierung und eine offene Form hat das Projektlabor es geschafft, über Generationen von Studierenden und Themen hinweg aktuell und attraktiv zu bleiben. Studierende im Projektlabor machen die Erfahrung, dass Physik nicht nur interessant und bisweilen anstrengend ist, sondern – sobald das selbst gesteckte Projektziel in einer gemeinsamen Anstrengung erreicht wurde – auch Spaß macht!

Schlüsselwörter: Projektlabor, Physikpraktikum, Forschendes Lernen

Einleitung

Von Beginn an treiben Neugier und das Streben nach Wissen die Menschheit an. Der Erkundungsdrang und das mehrfache Hinterfragen „Wieso?, Weshalb?, Warum?“ beginnen bereits im Kindesalter. Naturphänomene zu begreifen und das Bedürfnis, Probleme zu lösen, sind zugleich der Reiz und die Motivation vieler junger Erwachsener für ein naturwissenschaftliches Studium.

Entscheidet man sich für ein Physikstudium, werden Studienanfänger*innen allerdings häufig von einer hohen Diskrepanz zwischen ihren Erwartungen und der Realität überrascht. Um die teilweise sehr abstrakte Theorie zu verstehen, wird viel

mathematisches Verständnis vorausgesetzt und ein hohes Maß an Frustrationstoleranz verlangt. Tiefere Einblicke in spannende Forschungsgebiete der Experimentalphysik werden in der Regel erst ab der Bachelorarbeit möglich – der treibende Forschungsgeist von Studienanfänger*innen liegt bis dahin meist auf Eis. Als Reaktion darauf haben sich in der Aufbruchsstimmung der siebziger Jahre des letzten Jahrhunderts Studierende an der TU Berlin ein Projektpraktikum erkämpft, in dem sie bereits, direkt von der Schule kommend, ihre Neugier durch selbst konzipierte Experimente einbringen können. Inzwischen hat sich dieses beliebte Praktikum „Projektlabor Physik" als eine sehr erfolgreiche Lehrveranstaltung etabliert.

Das Grundstudium der Physik ist an vielen deutschsprachigen Hochschulen geprägt durch traditionelle Lehrformen. Die Vorlesungen – in der Experimentalphysik gewürzt mit einigen Demonstrationsversuchen – sind große Frontal-Lehrveranstaltungen, konzipiert hauptsächlich für rezeptives Lernen. In Übungen und Seminaren steht das Rechnen von Aufgaben im Vordergrund. Ein Austausch zwischen Studierenden und Dozent*innen ist in diesem Rahmen zwar möglich, wird jedoch unterschiedlich aktiv genutzt. Die physikalischen Anfängerpraktika sind stark strukturiert, damit „an je fünf Halbtagen etwa 200 Studenten arbeiten" können (Westphal, 1972, S. 264). Die Versuchsaufbauten sind fest vorgegeben und aufgebaut; die Durchführung erfolgt nach Anleitung. Die Studierenden experimentieren allein oder zu zweit, füllen vorgefertigte Arbeitsblätter aus und schreiben über Generationen sich praktisch wiederholende Praktikumsberichte.

Die bundesweite Modernisierung des verschulten Studiums war schon Ende der sechziger Jahre ein wesentliches Ziel von Studentenprotesten. Selbstständigkeit, engere Verknüpfung zwischen Forschung und Lehre, mehr Freiraum für Kreativität und Eigeninitiative waren bereits damals einschlägige Forderungen. In dieser Zeit wurde das „forschende Lernen" durch die Bundesassistentenkonferenz (Huber, 1970, S. 227–244) als konstruktivistische Lernform vorgeschlagen. Eine Definition des Begriffes stellte Huber einige Jahre später auf:

> „Forschendes Lernen zeichnet sich vor anderen Lernformen dadurch aus, dass die Lernenden den Prozess eines Forschungsvorhabens, das auf die Gewinnung von auch für Dritte interessanten Erkenntnissen gerichtet ist, in seinen wesentlichen Phasen – von der Entwicklung der Fragen und Hypothesen über die Wahl und Ausführung der Methoden bis zur Prüfung und Darstellung der Ergebnisse in selbständiger Arbeit oder in aktiver Mitarbeit in einem übergreifenden Projekt-(mit)gestalten, erfahren und reflektieren."(Huber, 2009, S. 9)

Noch während diese neuen Lernform in hochschuldidaktischen Kreisen zu regen Diskussionen und Kritik führte, wurde das „forschende Lernen" im Projektlabor bereits umgesetzt. Das Leitmotiv des Praktikums blieb über die Jahre das berühmte Zitat von Konfuzius (551–479 v. Chr.): „Sage es mir, und ich vergesse es. Zeige es mir, und ich erinnere mich. Lass es mich tun, und ich behalte es."

Im Projektlabor treibt man die Botschaft dieser Zeilen auf die Spitze, indem man die Planung und Gestaltung in die aktive Tätigkeit miteinbezieht. Ein hoher Selbstbestimmungsgrad in der Gestaltung des Lernprozesses von Studienbeginn an,

entsprechend der höchsten Stufe des offenen Experimentierens – „open inquiry“ – nach Herron (1971, S. 171–212) steigern das Engagement und die Erkenntnisgewinnung der Studierenden.

Das Projektlabor Physik – ein Studienreformprojekt aus den siebziger Jahren

Das Konzept des Projektlabors als alternative Lernform zum konventionellen Anfängerpraktikum entstand aus der Initiative der Studierenden im Fach Physik an der TU Berlin. In der Erprobungsphase ab 1968 wurde das Reformprojekt für drei Jahre durch die Volkswagenstiftung finanziert und durch einen knappen Beschluss des damaligen Fachbereichsrats 1971 institutionalisiert:

> „Die Ausbildungsziele des Projektgruppenlabors sollen sein:
> a) Erwerb der wesentlichsten Grundkenntnisse der Physik durch theoretische und experimentelle Arbeiten.
> b) Kennenlernen wichtiger Experimentiergeräte und Einübung in deren Benutzung. Für erfolgreiche Arbeit auf diesem Gebiet wird der Übungsschein erteilt.
> c) Einüben in die intensive theoretische Bearbeitung spezieller Detailfragen und Weitervermittlung der so erworbenen Kenntnisse an andere.
> d) Kennenlernen der gesellschaftlichen Stellung des Naturwissenschaftlers durch Beschäftigung mit seiner Rolle im Beruf, der Wissenschafts- und Bildungspolitik, mit der Geschichte der Naturwissenschaften und mit Fragen der Erkenntnistheorie.“
> (Auszug aus dem Fachbereichsbeschluß Physik, TU Berlin, Juli 1971)

Das Ziel a) grenzt sich in Inhalten und Formulierung kaum von der Standardzielsetzung traditioneller Anfängerpraktika ab (vgl. Eichler, Kronfeldt & Sahm, 2005). Das dahinterstehende Konzept unterscheidet sich jedoch wesentlich, denn im Projektlabor wird in allen Phasen des Experimentierens, von der Versuchszielbestimmung bis hin zur Auswertung, eigenständig in kleinen Gruppen gearbeitet. Durch die völlig offene Themenwahl (nur der Bezug zur Physik muss gegeben sein) und Handlungsfreiheit steigt die Motivation der Studierenden. Experimente selbst aufzubauen, bedeutet auch, Fehler zuzulassen. Systematische Fehlersuche und das Herausfinden von Fehlern tragen bekanntlich zum Erkenntnisgewinn bei. Projektversuche sind ergebnisoffen und führen zu Unbefangenheit der Wahrnehmung. Diskussionen werden angeregt, Gedanken ausgetauscht, neue Ideen entstehen – der Neugier und Kreativität wird so Raum geschaffen.

Ziel b) will zusätzlich zur Vertiefung vom fachlichen Wissen die Kommunikation fördern. Hier soll die Fähigkeit erworben werden, physikalische Inhalte zielgruppenorientiert und sachbezogen zu vermitteln. Die wissenschaftliche Kommunikation wird im Projektlabor auf verschiedenen Ebenen geführt: unter Studierenden einer Projektgruppe durch kooperatives Lernen, schriftlich als Dokumentation der Ergebnisse sowie durch mündliche Präsentationen.

Das Lernziel c) sorgte vor allem in der Anfangsphase des Projektlabors für Auseinandersetzungen zwischen Hochschullehrer*innen, Assistent*innen und Studierenden. In Frage gestellt wurde damals die Möglichkeit und Rechtfertigung, ein Verständnis für die gesellschaftliche Relevanz von Physik als Lernziel eines Experimentalpraktikums zu definieren (Sabaß & Koßmann, 1976, S. 1058). Deshalb wurde dieses Lernziel als ein freiwilliges festgelegt und von der Leistungskontrolle ausgeschlossen. Es wird nur dann verfolgt, wenn die Mehrheit der Studierenden es wünscht.

Struktur und Ablauf des Projektlabors

Die Namensgebung des Praktikums ist historisch bedingt. Unter dem Begriff „Projekt“ sind inhaltlich miteinander verbundene Einzelexperimente zu verstehen, deren Komplexität nach Bedarf gesteigert werden kann, bis die von den Studierenden bestimmten Lernziele erreicht werden. Ein Projekt durchläuft mehrere Phasen, die nach Sabaß und Koßmann (ebd., 1976, S. 1061) in Abb. 1 dargestellt sind.

Abbildung 1: Ablauf eines Projekts im physikalischen Anfängerpraktikum „Projektlabor“ (vgl. hierzu Sabaß & Koßmann, 1976, S. 1061)

In der Vorbereitungsphase wird ein Thema bestimmt, ein Überblick über die notwendige Theorie verschafft, ggf. eine Experimentfolge überlegt und das erste Experiment des Projekts festgelegt. In der nächsten Phase werden die Grundlagen zum Versuch in einem Tutorium besprochen. Eine individuelle Erarbeitung der Theorie durch Studierende wird im Vorfeld vorausgesetzt, damit im Tutorium alle offenen Verständnisfragen zum Experiment durch gemeinsame Diskussionen geklärt wer-

den können. Im Tutorium wird gemeinsam die Vorsprache strukturiert, die Messmethode festgelegt und eine Geräteauswahl getroffen. In der Experimentphase kommt es zum eigentlichen Versuchsaufbau, Durchführung und zur Teilauswertung. Ein Praktikumsbericht wird in Hausarbeit angefertigt, eine Vorkorrektur und Diskussion erfolgen in Rahmen eines weiteren Tutoriums. Der nächste Versuch, der inhaltlich auf das erste Experiment aufbaut, wird geplant und die Theorie dazu umrissen. Eine Rücksprache mit den Assistent*innen des PLs und eine Verbesserung der Berichte finden in der Nachbereitungsphase statt. Für den Leistungsnachweis ist die aktive Teilnahme an mindestens elf Experimentalterminen einschließlich Tutorien erforderlich.

Der Umfang der Projekte zu einem bestimmten Lernziel kann unterschiedlich groß sein, die Herangehensweise und Realisierungsmöglichkeiten sind durch die eigenständigen Aufbauten und freie Wahl der verwendbaren Messmethoden sehr vielfältig. Die Gefahr der „Standardisierung“ von Projekten wird dadurch vermieden. Die Mehrheit der Studierenden, die sich für diese Alternative des Anfängerpraktikums entscheiden, möchte nicht die Ergebnisse anderer reproduzieren, sondern eigene Ideen umsetzen und dabei „Neues“ entdecken.

Angeboten wird das Projektlabor für Physikstudierende bereits ab dem ersten Fachsemester und kann insgesamt für drei Semester als alternative Wahlpflichtveranstaltung zum traditionellen Grundpraktikum (vgl. Eichler, Kronfeldt & Sahm, 2005) belegt werden. Zu Semesterbeginn können die Studierenden zwischen den beiden Praktika wählen; ein Wechsel zwischen den Praktikumsformen ist zum folgenden Semester möglich. Die Aufnahmekapazität ist im Projektlabor auf ca. hundert Studierende begrenzt (insgesamt für drei Semester). Wegen der hohen Nachfrage muss häufig ein Losverfahren über die Vergabe der Plätze entscheiden.

Gruppenarbeit im Laborpraktikum

Nicht nur das Lernkonzept, sondern auch die Arbeitsweise unterscheidet das Projektlabor von traditionellen Anfängerpraktika. Heutzutage wird Wissenschaft meist nicht mehr im Alleingang betrieben, sondern in einem Forschungsteam. Ganz nach diesem Modell wurde im Projektlabor Physik von Beginn an die Gruppenarbeit gefördert, damit zusätzlich zu den Fach- und Methodenkompetenzen auch die für das spätere Berufsleben so wichtigen Sozialkompetenzen wie Teamfähigkeit, Kommunikationsfähigkeit und Konfliktfähigkeit entwickelt werden können.

Vor allem in der Anfangsphase des Physikstudiums hat die Zugehörigkeit zu einer Lerngruppe große Vorteile: Die Hemmschwelle, Fragen zu stellen, sinkt; es wird viel diskutiert, sich kritisch mit dem Lehrstoff auseinandergesetzt und sogar gegenseitig motiviert. In der Gruppe hat man mehr „Mut zur Naivität bei der Problemstellung“ (Sabaß & Koßmann, 1976, S. 1056). Lernen auf Augenhöhe, der sogenannte Peer-to-peer-Ansatz, entwickelt überfachliche Kompetenzen wie z. B. Wissenschaftskommunikation, die früh in der Lehre befestigt werden sollen.

Die Projektgruppen bestehen aus maximal sieben Studierenden und einem/r Tutor*in. Die Zusammensetzung der Gruppen ist zufällig und heterogen. Die Gruppenmitglieder haben unterschiedliche Vorkenntnisse und Fähigkeiten, was grundsätzlich keinen Nachteil für das Konzept des „forschenden Lernens“ darstellen sollte (Huber, 2009, S. 9), sondern meist sogar ein Vorteil ist. Die Studierenden können auf verschiedenen Ebenen voneinander profitieren. Betrachtet man eine Projektgruppe als soziale Struktur, steht nicht der individuelle Erfolg der Einzelnen im Vordergrund, sondern der Erfolg der gesamten Gruppe. Eine zu große Heterogenität der Gruppe kann allerdings auch zu Problemen führen – vor allem, wenn die Arbeitseinteilung und Arbeitsdisziplin von den Mitgliedern unterschiedlich wahrgenommen werden. Dominanz oder Unzuverlässigkeit können zu interaktionären Schwierigkeiten zwischen den Beteiligten führen. Gruppendynamische Konflikte sind im Projektlabor eher selten, und wenn sie frühzeitig erkannt werden, können sie nach moderierten Diskussionen beigelegt werden. Beobachtet wird eher ein erfreulicher Effekt: Die Mitglieder einer Gruppe bleiben zum Teil während des ganzen Studiums miteinander in Kontakt, es entstehen sogar Freundschaften, die über das Studium hinaus Jahrzehnte anhalten. Mittlerweile haben über 450 Projektgruppen das Projektlabor durchlaufen – so hat sich ein enormer Erfahrungsschatz für Studierende und Lehrende gebildet.

Eine ganz besondere Rolle in der Projektgruppe erfüllt der/die Tutor*in. Als fachlich höher qualifizierte/r Studierende/r soll er oder sie keine Aufsichtsperson darstellen, sondern eher ein erfahrenes Gruppenmitglied sein, das die Gruppe über die gesamte Praktikumszeit hinweg begleitet. Der/die Tutor*in unterstützt die Studierenden in der Vorbereitungsphase und ist die erste Anlaufstelle für fachliche oder organisatorische Fragen zum Projekt. Im ersten Semester achtet er/sie verstärkt darauf, dass einzelne Studierende der Gruppe die selbstgesetzten Lernziele erreichen, ohne über- oder unterfordert zu werden. In der Funktion als Gruppenmoderator*in greift der/die Tutor*in ein, falls etwa Diskussionen zeitlich ausarten. Beim Aufbau und der Durchführung des Versuchs steht er/sie der Gruppe beratend zur Seite und achtet vor allem auf die Sicherheit beim Experimentieren. In der Berichterfassung wird der/die Tutor*in vor allem im ersten Semester stark beansprucht, etwa für Formatierungsfragen und Auswertungshinweise bzw. zur Vorkorrektur der ersten Protokollversion. Im dritten Semester dann lösen die Gruppen die Koordinations- und Kommunikationsprobleme selbst, der/die Tutor*in wird mehr in Bezug auf Fachkenntnisse beansprucht.

Ein intensiver Austausch zwischen den Mitgliedern einer Gruppe findet im Projektlabor nicht nur auf fachlicher Ebene statt. Der/die Tutor*in ist gleichzeitig Mentor*in, der/die über eigene Erfahrungen im Studium berichtet, die Infrastruktur am Fachbereich kennt und häufig guten Rat zur Organisation des Studiums geben kann.

An einem Experimentiertag können maximal drei Projektgruppen parallel arbeiten und werden von einem/einer wissenschaftlichen Assistent*in betreut. Die mündliche Vorsprachen zu den Einzelversuchen haben keinen Prüfungscharakter,

sondern bieten den Gruppenmitgliedern die Gelegenheit, fachbezogene Kurzvorträge (ca. 15 min) vor Publikum zu üben. Der/die Assistent*in gibt den Vortragenden anschließend ein fachliches Feedback u. a. zu Präsentationstechnik und Rhetorik. Während des Experimentaltermins ist der/die Assistent*in als Ansprechpartner*in erreichbar und kümmert sich darum, dass die Sicherheitsaspekte im Praktikumslabor berücksichtigt werden. Er bzw. sie liest die schriftlichen Gruppenberichte und sorgt durch Rücksprache mit den Studierenden für die Qualitätssicherung. Das Modul mit einem Umfang von sechs Leistungspunkten pro Semester ist unbenotet. Eine Quantifizierung des Erfolgs in Form von Noten könnte dem Teamgeist schaden; Studierende werden jedoch frühzeitig auf eventuelle Leistungsdefizite aufmerksam gemacht.

Das Projektlabor: Raum für Eigeninitiative und Kreativität

Neugier und Interesse bilden die Grundlagen für Kreativität. Mit ihrer Hilfe können Routinen überwunden, festgefahrene Denkweisen verlassen und Standards gebrochen werden. Mit Kreativität verbinden Studierende Anregung, Inspiration, Offenheit, Freiraum und Eigenverantwortung (Jahnke, Haertel & Wildt, 2017, S. 91). Knapp 80 Prozent aller befragten Studierenden der TU Dortmund wünschen sich laut der Studie von Jahnke, Haertel und Wildt mehr Förderung der Kreativität in der Hochschule. Einige Universitäten gehen diesem Bedarf nach und führen forschendes Lernen in der Praxis ein (Lehmann & Mieg, 2018). Die verwendeten Formate sind unterschiedlich. Für naturwissenschaftliche Fächer bieten sich Laborpraktika sehr gut für das Lernen durch Forschung an.

Standardpraktikumsversuche mit bewährten Methoden nach Lehrplan durchzuführen, mag zwar zur Vertiefung physikalischer Grundphänomene und der Überprüfung von Gesetzmäßigkeiten dienen, schränkt aber die Kreativität ein, denn das „richtige“ Messergebnis ist hier vorhersehbar. Offene Laborpraktika hingegen stellen nach unserer Erfahrung eine optimale Umgebung für kreative Ansätze und innovatives Denken im Physikstudium dar. Ideen für die Gestaltung eines Experimentes zu entwickeln, Geräte zum Laufen zu bringen, zu improvisieren und kreativ zu vermitteln sind Fähigkeiten, die für die Laborforschung unerlässlich sind. Unbefangenes, schöpferisches und freies Denken spielen nicht zuletzt für die Modellierung physikalischer Prozesse eine wichtige Rolle.

Das Projektlabor Physik deckt sehr viele Facetten der Kreativitätsförderung (Jahnke, Haertel & Wildt 2017, S. 91) in der Hochschullehre ab. Originalität und Ideenreichtum werden im Praktikum großgeschrieben. Die Vorschläge von Projekten reichen vom Bau eines „Star trackers“ zur Entfernungsbestimmung mittels astrophysikalischer Aufnahmen über den Aufbau eines mikroprozessorgesteuerten Laserparcours bis hin zur Schlierenaufnahme eines Machkegels an einer Rasierklinge. Besonders hoch ist die Motivation für Projekte zu Themen, die auch im Fokus aktueller Forschung stehen und für die noch keine vollständigen theoretischen Erklärun-

gen existieren, wie etwa die Bildung einer Wasserbrücke unter dem Einfluss von Hochspannung. Projekte mit viel Entdeckungspotential wecken bei Studierenden das Gefühl, selbst aktiv zur Wissenschaft beitragen zu können. Neugier und Begeisterung lösen auch Projekte aus, deren Ausgangspunkte „coole“ Effekte aus Sozialen Medien und Scienceblogs sind, wie etwa die Erforschung eines Weintrauben-Plasmas in der Mikrowelle. Hierbei reduziert sich das Projekt keinesfalls auf den Nachbau des Versuches und die Beobachtung von Effekten, sondern um dessen Weiterentwicklung und Analyse. Großer Beliebtheit erfreuen sich momentan Experimente mit Bezug auf Nachhaltigkeit und Technikfolgenabschätzungen, ausgelöst durch das aktuelle politische Engagement vieler Studierender. Projekte wie etwa der Bau einer Biosolarzelle (Grätzelzelle) mit Rote-Beete-Saft und Hibiskustee oder der Modellbau eines Flettnerrotors zur Nutzung von Windkraft (Magnuseffekt) werden aus mehreren Perspektiven betrachtet und Verbindungen zu anderen Disziplinen (z. B. Umweltwissenschaften und Ingenieurswissenschaften) hergestellt. Wie stark das Projektlabor von der Kreativität der Studierenden geprägt ist, zeigt sich an der allgegenwärtigen Nutzung von Smartphones und spezieller Apps, sei es beim Dopplereffekt durch die Messung der Frequenzverschiebung über eine Schwebung oder als schnelle Videokamera zur Bahnverfolgung einer selbst gebauten Rakete. Die junge Generation wächst mit neuen, digitalen Techniken auf und bringt sie im Praktikum sofort ein.

Das fakultative Lernziel c) des Projektlabors hat einen reflexiven Ansatz. Dieser wird von Projektgruppen unterschiedlich erfüllt. Für Technikfolgenabschätzungen werden im Rahmen des Projekts Exkursionen (von Huber als Form des forschenden Lernens eingegliedert, vgl. Huber 2009, S. 17) durchgeführt – zum Beispiel zum Kernkraftwerk Lubmin oder eine Besichtigung der Schachtanlage ASSE II (Lagerung vom radioaktiven Müll). Große Forschungsanlagen wie BESSY II, DESY-Hamburg, European XFEL oder IPP Greifswald werden häufig als Besichtigungsziele gewählt, um Einblicke in die Forschung und spätere mögliche Berufsbilder zu gewinnen. Die Exkursionen werden von den Projektgruppen eigenständig organisiert und auf eigenen Kosten durchgeführt. Auch Fragen zur Erkenntnistheorie und Denkanstöße über die kognitive Verzerrung und Voreingenommenheit bei der Analyse von Datensätzen werden gelegentlich in Projekten thematisiert.

Zur Darstellung der Projektergebnisse werden im Projektlabor kreative Vermittlungsformen eingesetzt. Jedes Einzelexperiment wird mit einem Praktikumsbericht abgeschlossen, der auf der eigenen Wiki-Plattform des Projektlabors veröffentlicht wird. Diese Plattform wird nicht nur von Lehrenden, sondern auch von Studierenden laufend erweitert. Die Gestaltung eines Posters als wissenschaftliche Veröffentlichung zum Projekt ist als Alternative zum Protokoll willkommen. Zum Ende des Semesters präsentieren einige Gruppen mit großer Begeisterung im Rahmen einer öffentlichen Veranstaltung besonders herausragende Projekte. Die Studierenden des Projektlabors stellen auch bei Öffentlichkeitsveranstaltungen der Universität, wie etwa der *Langen Nacht der Wissenschaften,* gern ihre Projekte vor.

Kreativität braucht Freiraum und vor allem ausreichend Zeit – lediglich zeitweilige Eingriffe der Betreuer*innen im „repressionsarmen“ Raum sind erforderlich. Treffen die Gruppen Entscheidungen, mit denen sie sich selbst über- oder unterfordern, planen sie Projekte, die sie zeitlich oder aus Gerätemangel nicht bewältigen können oder gefährden sie die Sicherheit im Projektlabor, ist die Intervention der Betreuer*innen notwendig.

Erfolgsmessungen und Evaluation

Eine quantifizierbare und aussagekräftige Erfassung der Lehrqualität im Projektlabor ist schwierig; das kürzlich nach dem 3L-Modell (Lernzuwachs, Lehrkompetenz und Lernumgebung) konzipierte Instrument von Rehfeldt und Nordmeier (ebd., 2018, S. 37) ist eher auf Standardpraktika anwendbar. Eine Einschätzung des Lehr- und Lernerfolgs findet durch eine regelmäßige Beobachtung der Projektgruppen durch den/die Tagesassistenten/Tagesassistentin statt. Viele Diskussionen in Rahmen der Vorsprachen und Rücksprachen über theoretische und experimentelle Probleme, über die Protokolle und auch über interaktionäre Schwierigkeiten lassen eine gute individuelle Beurteilung der zugewonnenen Fachkompetenzen und sozialen Kompetenzen zu. Der/die Tutor*in als permanentes Gruppenmitglied ist in der Position, „über Erfolge und Misserfolge jedes einzelnen oder der Gruppe über ein ganzes Semester zu integrieren“ (Sabaß & Koßmann 1976, S. 1068). In regelmäßigen Versammlungen des Betreuungspersonals werden zwischen Tutor*innen, Assistent*innen und Hochschullehrer*innen Erfahrungen ausgetauscht und wird über den alltäglichen Betrieb und einzelne Problemfälle gesprochen. Einmal im Jahr organisiert das Projektlaborteam ein internes Wochenendseminar (in der brandenburgischen Landschaft), bei dem Optimierungsvorschläge erarbeitet werden, die Kontinuität in Form von Informationsweitergabe zwischen Tutorengenerationen gesichert wird und einander Feedback gegeben wird.

Von besonderem Interesse sind die über die Jahre erhaltenen Rückmeldungen von Studierenden zum Projektlabor. Einen „lebendigen Einblick“ in die Arbeit der ersten Projektgruppen gewinnt man aus ihren Originalberichten (Sabaß & Koßmann, 1976, S. 1068–1098). Schwachstellen des Konzepts wurden schon früher erkannt und thematisiert; einige Kritikpunkte konnten im Laufe der Zeit eliminiert werden.

Aktuelle Evaluationen durch Studierende liegen in Form von Fragebögen (Evasys) vor. Äußerst gut wurden die Tutorien (samt Tutor/Tutorin) bewertet; weniger Zuspruch fanden die Vorsprachen, weil sie als Leistungskontrolle empfunden wurden. Die fachlichen Anforderungen wurden von den Studierenden als angemessen bewertet, die zeitlichen Anforderungen jedoch wurden als zu eng eingestuft. Etwa 85 Prozent der Studierenden stimmten dem Satz „Der Besuch des Projektlabors lohnt sich“ mit „trifft voll und ganz zu“ zu.

Besonderheiten und Herausforderungen

Das Engagement und die Motivation der Studierenden für ihre Arbeit im Projektlabor sind überdurchschnittlich hoch. Die freiwilligen Leistungen und die in Projekte investierte Zeit übertreffen häufig die Erwartungen der Betreuer*innen. Die Teilnehmer*innen identifizieren sich mit dem Projektlabor. Diese Verbundenheit mit der Veranstaltung hält oft über das Studium hinaus an – einige Ehemalige besuchen das Projektlabor, wenn ihr Weg sie nach Berlin führt.

Abbildung 2: Stimmungsbild im Projektlabor: Nach einem gelungenen Experimentiernachmittag verewigt sich die PG 425 auf einem Gruppenfoto

Zu einer angenehmen und positiven Lernatmosphäre trägt nicht zuletzt die gute Laune der Beteiligten bei (siehe Abb. 2). Auch die Stimmung wird im Projektlabor gefördert; die Lehrveranstaltung hat ein eigenes Weihnachts- und Sommerfest.

Besonders hervorzuheben ist die erstaunlich niedrige Abbruchquote von unter fünf Prozent, die sehr untypisch für das Fach Physik ist. Es wird vermutet, dass die Gruppen Außenseiter auffangen und zur Mitarbeit motivieren.

Durch ihre Lehraufgaben entwickeln die Tutor*innen außerordentliche fachliche und soziale Kompetenzen. Die Bewerbungslage auf Tutorienstellen ist trotz

hoher Arbeitsbelastung sehr gut. Die Abschlusspräsentationen der Projektgruppen zum Semesterende sind rege besucht.

Diese Besonderheiten der Lehrveranstaltung und die positiven Rückmeldungen der Studierenden belegen, dass kreatives Lernen im Studium hohen Zuspruch erfährt und weiter gefördert werden sollte.

Das Projektlabor stellt aber auch Herausforderungen – vor allem, was die Betreuung angeht, denn dieser ist sehr personalintensiv. Studierenden fällt es häufig schwer, alte, in der Schule gelernte Verhaltensweisen abzulegen und ihre Arbeits- und Lernprozesse selbst zu organisieren. Arbeitseinteilung, -strategie und -disziplin müssen im Laufe der Projekte weiterentwickelt werden. Die mangelnde individuelle Vorbereitung einzelner Studierenden führt manchmal zur Zweckentfremdung bzw. Verzögerung des Tutoriums. Die Dauer der Experimentaltermine wird durch „zu viel Bastelei“ und Fehlersuche häufig überschritten. Problematisch ist auch die ungleichmäßige Beteiligung der Gruppenmitglieder während der Durchführung. Durch falsche Bedienung oder unachtsamen Umgang mit Geräten werden diese gelegentlich beschädigt. Die Instandhaltung des Gerätepools ist daher eine Herausforderung. Kreativität und Arbeitssicherheit miteinander zu verbinden ist in einem offenen Praktikumskonzept nicht immer einfach. Studierende finden Versuche mit einem gewissen Gefahrenpotential oft besonders spannend. Sehr gerne wird im Projektlabor z. B. mit Hochspannung, Lasern und Röntgenstrahlung, radioaktiven Präparaten, kalten Gasen (flüssiger Stickstoff) und Gefahrstoffen experimentiert. Solche Experimente dürfen selbstverständlich nur nach der Abnahme durch den/die Assistent*in in Betrieb genommen werden.

Forschendes Lernen stellt auch für Lehrende didaktische Herausforderungen dar, denn es erfordert „eine prinzipielle Offenheit, ebenso eine Gestaltung des Forschungskontextes, bedarfsgerechte Unterstützung und beratende Begleitung im Forschungsprozess“ (Reinmann, 2015, S. 128). Durch den „Rollentausch“ und die Übertragung von Verantwortung für das Projekt, „kann es vorkommen, dass die Lehrenden sich mit komplexen Fragen nunmehr informierter Studierender auseinandersetzen müssen“ (Decker & Mucha, 2018, S. 157). Diese Herausforderungen stellen gleichzeitig aber auch eine enorme Inspiration für die Lehrenden dar.

Zusammenfassung und Ausblick

Das *Projektlabor Physik* ist eine der ersten Lehrveranstaltungen, die das Konzept des forschenden Lernens bereits in den siebziger Jahren umgesetzt hat. Als physikalisches Anfängerpraktikum bietet es an der TU Berlin in Form einer offenen, explorativen Lernumgebung großzügigen Freiraum zur Förderung der Kreativität im Studium. Selbstständiges Arbeiten in dauerhaften Kleingruppen am eigenen Versuchsaufbau führt zur Erweiterung sowohl fachlicher als auch sozialer Kompetenzen. Im Lernformat des Projektpraktikums ist forschendes Lernen bereits ab dem ersten Semester notwendig bzw. möglich und stellt kein Risiko der Überforderung für Stu-

dienanfänger*innen dar. Aussagekräftige Erfolgsmessungen zum Lerneffekt im Projektlabor wurden bislang nicht erfasst. Die Evaluationsergebnisse durch Studierende geben jedoch ein sehr gutes Feedback für Lehrende und spiegeln die Beliebtheit der Veranstaltung wider. Eine hohe Motivation und viel Engagement der Teilnehmenden sowie eine starke Verbundenheit mit dem Praktikum zeichnen das Projektlabor aus. Besondere Herausforderungen stellen die Arbeitsaufteilung und -disziplin der Gruppen, die Instandhaltung der Gerätesammlung sowie die intensive personelle und zeitliche Betreuung dar.

In den mittlerweile fast 50 Jahren Praktikumsbetrieb hat sich der Kern des Konzeptes, die aktive, kreative Rolle der Studierenden, gefestigt, während konkrete Inhalte und Techniken sich fortlaufend erneuern. Die Weiterentwicklung des Praktikums, seine Anpassung an aktuelle didaktische, technologische und politische Fortschritte, erfolgt mehr oder weniger von selbst durch neue Impulse der Teilnehmenden. Die offene Form des Praktikums mit seinem besonders großen Gestaltungsfreiraum für Studierende bereitet ihnen neben dem besonderen Lerneffekt viel Freude und verleiht dem Projektlabor Attraktivität und einen hohen Wert.

Literaturverzeichnis

Decker, C. & Mucha, A. (2018). Forschendes Lernen lernen. Zu den didaktischen und emotionalen Herausforderungen der Integration von Lernen über, für und durch Forschung. *Die Hochschullehre*, Jg. 4, 143–160.

Eichler, J., Kronfeldt, H.-D. & Sahm, J. (2005). *Das Neue Physikalische Grundpraktikum*, Vorwort. 2. Aufl. Springer Berlin Heidelberg New York.

Herron, M. D. (1971). The Nature of Scientific Enquiry. *The School Review*, 79(2), 171–212.

Huber, L. (2009). Warum Forschendes Lernen nötig und möglich ist. In L. Huber; J. Hellmer & F. Schneider (Hrsg.). *Forschendes Lernen im Studium: aktuelle Konzepte und Erfahrungen*. (S. 9–35). Bielefeld: Universitätsverlag Webler.

Huber, L. (1970). Forschendes Lernen: Bericht und Diskussion über ein hochschuldidaktisches Prinzip. *Neue Sammlung*, 10(3), 227–244.

Jahnke, I.; Haertel, T. & Wildt, J. (2017). Teachers' conceptions of student creativity in higher education. *Innovations in Education and Teaching International*, 54 (1), 87–95. DOI: 10.1080/14703297.2015.1088396.

Lehmann, J. & Mieg, H. A. (Hrsg.). (2018). *Forschendes Lernen – Ein Praxisbuch*. Verlag der Fachhochschule Potsdam.

Rehfeldt, D. & Nordmeier, V. (2018). Lehrqualität naturwissenschaftlicher Hochschulpraktika, *PhyDid* 1/17, 34–50.

Reinmann, G. (2015). Heterogenität und forschendes Lernen: Hochschuldidaktische Möglichkeiten und Grenzen. In B. Klages; M. Bonillo; S. Reinders & A. Bohmeyer (Hrsg.), *Gestaltungsraum Hochschullehre. Potenziale nicht-traditionell Studierender nutzen* (S. 121–137). URN: urn:nbn:de:0111-pedocs-114380 Opladen; Berlin; Toronto: Budrich UniPress Ltd.

Sabaß, M. & Koßmann, K. (1976). Das Projektlabor Physik. Studentisches Lern- und Gruppenverhalten in einem Projektpraktikum für Physiker und Lehramtskandidaten im 1.–3.Semester. *Zeitschrift der Technischen Universität Berlin*. 8, 1054–1098.

Westphal, W. H. (1972). 68 Jahre als Physiker in Berlin. *Physikalische Blätter. 28*, 258–265.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Ablauf eines Projekts im physikalischen Anfängerpraktikum „Projektlabor“ . . 70

Abb. 2 Stimmungsbild im Projektlabor: Nach einem gelungenen Experimentiernachmittag verewigt sich die PG 425 auf einem Gruppenfoto 76

Kreativität und Sicherheit im Labor – ein Widerspruch?

Tobias Haertel, Anja Höschel, Monika Rummler, Claudius Terkowsky

Abstract

Labordidaktische Workshops zur Förderung von Kreativität in der Hochschullehre sehen sich mit der Hürde konfrontiert, dass viele innovative Lehr-/Lernszenarien – insbesondere solche, die exploratives Lernen ermöglichen sollen – von Lehrenden mit dem Hinweis auf Konflikte mit den Sicherheitsanforderungen oft nicht umgesetzt werden. Die Wissenschaftliche Weiterbildung (WWB) der ZEWK der TU Berlin, das Zentrum für HochschulBildung und die Ingenieurdidaktik der TU Dortmund haben vor diesem Hintergrund einen labordidaktischen Workshop konzipiert und umgesetzt, der beide Aspekte aufgreift: Kreativität und Sicherheit im Labor. Dabei zeigen sich unterschiedliche didaktische Ansätze: instruktive Sicherheitsunterweisung im Kontext konkreter gesetzlicher Anforderungen vs. ergebnisoffene, explorative Lehre. Diese müssen zunächst adressiert werden, um die notwendige Sicherheit der Lehrenden durch fundiertes Wissen über die Möglichkeiten und Voraussetzungen für sicheres studentisches Arbeiten im Labor herzustellen.

Schlüsselwörter: Kreativität, Sicherheit, Gefährdungsbeurteilung, Labordidaktik, Unterweisung

1 Einleitung

> „*The toughest problems facing our society ... are not likely to be solved* by easy or conventional methods. If they could be, they would have been by now. To tackle these problems successfully, STEM professionals will need the creativity to improve or replace existing processes and products“ (Felder & Brent, 2016).

Kreativität ist eine Schlüsselkompetenz in der Industrie 4.0. Dies gilt für nahezu alle Branchen, insbesondere aber auch für die Ingenieurwissenschaften. Die technische Geschwindigkeitssteigerung ist eine wesentliche Triebkraft gesellschaftlicher Beschleunigung (Virilio & Voullie, 1980; Rosa, 2016) und stellt Ingenieurinnen und Ingenieure vor enorme Herausforderungen. Aktuell etwa, wenn es darum geht, das Fortschreiten des Klimawandels zu stoppen, dessen Folgen zu beheben oder z. B. innerhalb weniger Tage einen Industriebetrieb zur Fertigung von Kraftfahrzeugen auf die Produktion von Beatmungsgeräten in Zeiten der COVID-19-Pandemie umzustellen. Dies setzt Kreativität voraus im Sinne der Produktion neuer Ideen, der Verfol-

gung unkonventioneller Wege bei ihrer Umsetzung und nicht zuletzt Fehlertoleranz beim Ausprobieren umgesetzter Lösungen. Dies alles ist jedoch nach wie vor kaum Bestandteil hochschulischer Lehre (Cropley & Cropley, 2019), wo immer noch Vorlesungen gegenüber projekt- und problembasierten Lehr-/Lernszenarien dominieren. Ein hohes Potential, Kreativität im ingenieurwissenschaftlichen Studium gezielt zu fördern, bieten Laborveranstaltungen (Tekkaya et al., 2016). Je nach Labortyp oder Organisation der Laborarbeit sind jedoch auch viele Laborveranstaltungen eher instruktionsorientiert angelegt, sodass das Potential vielfach ungenutzt bleibt. Voraussetzung dafür, dass diese Möglichkeiten auch tatsächlich genutzt werden, ist ein konsequentes Aufbrechen traditioneller Lehrkonzepte mit bisweilen starren Vorgaben hin zu eher konstruktivistisch geprägten Lernumgebungen, in denen Studierende weitgehend eigenständig Lernprozesse erfahren können. Im Rahmen der BMBF-Projekte „ELLI“ und „ELLI2“ (Exzellentes Lehren und Lernen in den Ingenieurwissenschaften 2011–2016 bzw. 2016–2020) wurden daher am Zentrum für HochschulBildung der TU Dortmund Ansätze zur Förderung von Kreativität in Laborveranstaltungen entwickelt, die in das hochschuldidaktische Workshop-Angebot „Kreativität im Labor“ eingeflossen sind. Dabei lernen Lehrende, ihre Lehr-/Lernszenarien in den Laboren so zu gestalten, dass die Studierenden ihre Kreativität bestmöglich entfalten können.

Bei den ersten Durchführungen des Workshops zeigte sich, dass es einen wichtigen Aspekt gibt, der häufig zum Problem wird: die Sicherheitsanforderungen in den Laboren und Werkstätten. Immer wieder wurde die Umsetzung vielversprechender neuer Ideen für die Lehre verworfen mit dem Hinweis: „Das ist zu gefährlich für die Studierenden!“ oder „Das dürfen wir wegen der Sicherheitsauflagen gar nicht!“ Von den Kolleginnen der TU Berlin kam deshalb die Idee, einen hochschuldidaktischen Workshop zum Thema „Kreativität und Sicherheit im Labor“ zu entwickeln – einen Workshop zur Kreativitätsförderung im Labor, der die Sicherheitsaspekte aufgreift und möglich macht, was bislang durch Unwissen, falsches Wissen oder andere Konzeptvorstellungen allzu oft nicht möglich schien.

Darum wird es in diesem Beitrag gehen, immer vor dem Hintergrund der Fragestellungen: Wie können wir Laborveranstaltungen kreativ und sicher zugleich gestalten? Wie können wir richtig unterweisen und mehr Lernerlebnisse ermöglichen?

2 Labordidaktik, Kreativität und Sicherheit getrennt gedacht: Ein Widerspruch?

In der Weiterbildung „Kreativität und Sicherheit im Labor“ werden Ansätze entwickelt, wie für die eigenen kreativen Ideen oder von Studierenden frei entwickelte praktische Versuche gemeinsam mit allen Beteiligten ein geeigneter Rahmen geschaffen werden kann, der im Einklang mit dem Arbeits- und Gesundheitsschutz steht.

2.1 Labordidaktik

Bereits 1972 startete das damals neu gegründete Institut für Hochschuldidaktik an der TU Berlin eine Workshop-Reihe an der Fakultät Elektrotechnik mit dem Ziel, Spielräume für mehr studentische Eigenständigkeit in der Konzeption und Praxis der Labore zu identifizieren und neue Konzepte zu entwickeln und zu erproben.

Zu dieser Zeit wurde in der Architektur und den Planungswissenschaften an der TU Berlin verstärkt mit verschiedenen Formen studierendengesteuerten Projektstudiums schon im Grundstudium experimentiert. Die klassischen Ingenieurfakultäten standen diesem Ansatz kritisch bis ablehnend gegenüber, suchten aber vereinzelt nach Möglichkeiten, u. a. über die Labore ingenieurtechnische bzw. ingenieurwissenschaftliche Inhalte schon in das Grundstudium einzubringen und dabei sukzessive die Gestaltungsmöglichkeiten für die Studierenden zu erweitern. Eines der größten Probleme war schon damals die Gewährleistung der erforderlichen Sicherheit, die vor allem dem Laborpersonal und den Lehrenden der studentischen Laborgruppen oblag und am ehesten durch vorgeschriebene Versuchsanordnungen herstellbar schien. Dennoch sind aus dieser Workshop-Reihe unterschiedliche Varianten projektorientierter Veränderungen in Laboren hervorgegangen, in besserer Abstimmung mit den jeweils zugeordneten Vorlesungen und Übungen. Eine bis heute angebotene Form ist das „Projektlabor“ der Fakultät Elektrotechnik und Informatik.[1]

Ausgangspunkt an der TU Dortmund für das Thema Labordidaktik war ein unter dem Titel „PeTEX – Platform for eLearning and Telemetric Experimentation“ zwischen Dezember 2008 und November 2009 von der Europäischen Kommission im Programm für lebenslanges Lernen gefördertes Projekt zur Entwicklung von Remote-Laboren. Dabei zeigte sich, dass es sich beim Labor um eine vor allem von den Lehrenden in den Ingenieurwissenschaften didaktisch nur wenig durchdrungene und damit quasi vernachlässigte Lehr-Lern-Situation handelt, Labordidaktik somit als Desideratum identifiziert wurde. Im daraus entstandenen Folgeprojekt „IngLab – Das Labor in der ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung“ (Tekkaya et al., 2016), das zwischen November 2012 und Mai 2016 von der „acatech – Deutsche Akademie für Technikwissenschaften“ gefördert wurde, entstanden labordidaktische Weiterbildungen für Lehrende. In diesem Kontext entstand auch der Workshop „Kreativität im Labor“, der im hier vorgestellten Konzept um die Perspektive der Arbeitssicherheit erweitert wurde.

2.2 Kreativität in der Hochschullehre

Der Aspekt der Kreativität basiert im Wesentlichen auf den Erkenntnissen des dreijährigen Forschungsprojektes „Da Vinci – Gestaltung kreativitätsförderlicher Lehr-/Lernkulturen an Hochschulen“, das zwischen November 2008 und Oktober 2011 im Förderprogramm „Hochschulforschung als Beitrag zur Professionalisierung der Hochschullehre“ im Rahmenprogramm „empirische Bildungsforschung“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert wurde. Als hochschuldidakti-

1 Siehe: https://www.projektlabor.tu-berlin.de/menue/home/.

sche Handlungsforschung konzipiert, hatte Da Vinci zum Ziel, die Lehr-/Lernkultur an Hochschulen auf kreativitätsförderliche Potentiale und Barrieren hin zu analysieren, um dann anhand der Entwicklung, Erprobung und Evaluation beispielgebender Lernszenarien aufzuzeigen, wie Kreativitätsförderung in den universitären Regelbetrieb eingeführt werden kann (Jahnke et al., 2017).

Im Rahmen des Projektes wurden die folgenden sechs Facetten von Kreativität identifiziert, die hier als Lernziele aufgeführt werden (Haertel et al., 2019):

1. **Reflektierendes Lernen:** Nach Besuch der Veranstaltung sind die Studierenden in der Lage, für sie neues und bestehendes Wissen kritisch zu hinterfragen. Sie können die Vor- und Nachteile neuer Zusammenhänge und Ansätze diskutieren und sind in der Lage, falsche Informationen zu erkennen und zu benennen.
2. **Selbstständiges Lernen:** Nach Besuch der Veranstaltung sind die Studierenden in der Lage, Lernaufgaben eigenständig zu bearbeiten, selbstständig notwendige Informationen zu suchen und zu beschaffen, sich bei Problemen geeignete Hilfe zu organisieren und eigene Entscheidungen im Lernprozess zu treffen und zu verteidigen.
3. **Motiviertes Lernen:** Nach Besuch der Veranstaltung sind Studierende in der Lage, ihre übergeordneten Interessen am Fach mit dem Thema der Veranstaltung zu verbinden. Sie können ihre eigenen Interessen an der Veranstaltung reflektieren, Widersprüche benennen und verstehen es, geeignete Methoden zur Überwindung eigener Motivationsdefizite auszuwählen und anzuwenden.
4. **Kreierendes Lernen:** Nach Besuch der Veranstaltung sind Studierende in der Lage, Konzepte zu entwickeln, Prototypen herzustellen sowie ihre Produkte zu präsentieren und zu erläutern.
5. **Vielperspektivisches Lernen:** Nach Besuch der Veranstaltung sind die Studierenden in der Lage, fachliche Probleme oder fachliche Fragestellungen aus unterschiedlichen Perspektiven zu betrachten, Verknüpfungen zu anderen Disziplinen zu ziehen und diese fruchtbar für eigene Arbeiten zu nutzen. Sie können ihr fachliches Wissen auf Fragestellungen und Probleme anderer Disziplinen übertragen.
6. **Innovationsorientiertes Lernen:** Nach Besuch der Veranstaltung verstehen Studierende es, Kreativitäts- und Denktechniken zur Generierung von Ideen anzuwenden. Sie sind in der Lage, ihre eigene Offenheit gegenüber neuen Ideen und die Wirkung struktureller Beharrungskräfte zu bewerten. Sie können neue Ideen kommunizieren und bewerten und sind in der Lage, die mit der Überführung von Ideen zu Innovationen verbundenen Unsicherheiten zu beherrschen.

Auch wenn die genannten Facetten grundsätzlich gleichberechtigt sind und von Lehrenden entsprechend ihrer individuellen Schwerpunkte unterschiedlich fokussiert werden können, bauen sie inhaltlich aufeinander auf. In einem weiteren Prozess wurden nun beide Handlungsstränge – Kreativität und Kreativitätsförderung – sowie Labordidaktik in den Ingenieurwissenschaften in den QPL-Projekten ELLI und ELLI2 zu einem explorativen Evaluationskonzept (Terkowsky et al., 2016) sowie da-

rauf aufbauend zu einer weiteren hochschuldidaktischen Weiterbildung miteinander verwoben. Danach wurden sie mit dem im folgenden Abschnitt beschriebenen Inhalten zur Sicherheit im Labor verknüpft.

2.3 Sicherheit im Labor

An Hochschulen gelten die gesetzlichen und berufsgenossenschaftlichen Regelungen zum Arbeits- und Gesundheitsschutz. Dazu zählen auch die im Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) und in der DGUV Vorschrift 1 „Grundsätze der Prävention" geforderte Beurteilung der Arbeitsbedingungen (Gefährdungsbeurteilung) und die Unterweisung der Beschäftigten bzw. Versicherten, zu denen auch die Studierenden gehören (§ 5 und 12 ArbSchG, § 3 und 4 DGUV Vorschrift 1). Ziel ist es, Arbeitsunfälle zu verhüten und Gesundheitsgefahren angemessen zu begegnen. Verantwortlich für das Einhalten dieser Regelungen ist der Arbeitgeber. Diese Arbeitgeberpflicht liegt bei den Hochschullehrenden jeweils für den ihnen unterstellten Bereich und damit auch der von ihnen verantworteten Lehre. Aufgaben wie die Durchführung von Unterweisungen der Studierenden in den Laboren können an entsprechend qualifizierte Lehrende übertragen werden.

Werden Konzepte für Labore verändert, müssen auch die dadurch entstehenden Gefährdungen neu beurteilt werden. Bei komplett neu errichteten Laboratorien, Maker Spaces und Ähnlichem, müssen Gefährdungsbeurteilungen und darauf basierende Betriebsanweisungen erstellt werden; bei vorhandenen Laboratorien muss geprüft werden, ob bestehende Gefährdungsbeurteilungen und Betriebsanweisungen angepasst werden müssen. Gegebenenfalls sind weitere Schutzmaßnahmen festzulegen. Aus diesen Gefährdungsbeurteilungen und Betriebsanweisungen resultieren die Inhalte regelmäßig durchzuführender Unterweisung der Studierenden.

Entstehen bei neuen Lehr-/Lernformaten neue Gefährdungen, muss zunächst geprüft werden, ob die Risiken für Lehrende und Studierende durch Substitution – z. B. von Gefahrstoffen oder bestimmten Verfahren – verringert werden können. Bei mit Gefährdungen verbundenen Tätigkeiten sollte stets abgewogen werden, ob diese für das Erreichen des Lernzieles notwendig sind und die Studierenden genügend Vorkenntnisse mitbringen, um die Tätigkeiten sicher ausführen zu können.[2]

3 Hochschuldidaktischer Workshop „Kreativität und Sicherheit im Labor"

Der Workshop „Kreativität und Sicherheit im Labor" wurde mit dem Ziel konzipiert, kreativitätsförderliche Lehr-/Lernszenarien für Laborveranstaltungen zu entwickeln, die unter Berücksichtigung der relevanten Sicherheitsaspekte auch tatsächlich umgesetzt werden können. Er richtet sich an alle Lehrenden in Laboren, ist gekennzeichnet durch eine Mischung aus Arbeiten im Plenum und Kleingruppenarbeit und

2 Siehe: § 5 ArbSchG, § 3 DGUV Vorschrift 1.

setzt stark auf aktivierende Lernmethoden sowie selbstbestimmte Arbeitsphasen. Der Workshop ist wie folgt aufgebaut:

Tag 1: 9:00–10:30 Uhr	Thema: Gegenseitiges Kennenlernen, Einstieg Kreativität	Dauer: 90 min

I. Gegenseitiges Kennenlernen und Einstieg ins Thema

Die Teilnehmenden sollen durch die Kennlernphase zu der Überzeugung gelangen, in der Gruppe auch noch so „verrückte Ideen" äußern zu können, ohne dafür negatives Feedback zu bekommen. Gerade bei der Kreativität ist dies wichtig. Deswegen werden zunächst die folgenden Schritte vorgenommen:

1. Warm-Up-Spiel: Alternativen, Möglichkeiten, Auswahl (AMA)
   Auf einem Flipchart-Papier wird eine Zeichnung aus vier Kreisen und drei Strichen angebracht. Anschließend werden die Teilnehmenden gebeten, 50 unterschiedliche Antworten auf die Frage zu nennen, was auf dem Papier abgebildet ist. Die Übung darf nicht vorher unterbrochen werden; es geht erst weiter, wenn 50 Antworten gefunden wurden, was immer möglich ist. Dabei werden in der Regel erst naheliegende Antworten in den Raum gerufen (Bäume, Lollies, Schilder ...) bevor dann komplexere, aber auch originellere Lösungen genannt werden (Turnringe in der Sporthalle von oben, Tisch auf Rollen um 180 Grad gedreht, Durchschnitt von zwei Röhren auf Eisenstangen ...). Ziel der Übung ist es, die strukturelle „Faulheit" des Gehirns zu überwinden, sich mit der erstbesten Lösung für ein Problem zufriedenzugeben. Stattdessen soll das Gehirn trainiert werden, über erste Assoziationen hinwegzudenken und dann zu originelleren Antworten zu kommen (Bono, 2013).
2. Während dieser Übung treffen häufig die letzten Teilnehmenden ein, sodass danach mit einer kurzen Vorstellungsrunde der Teilnehmenden begonnen werden kann. Sie werden gebeten, ganz kurz ihren Namen, ihre Organisation, ihre Aufgabe in der Lehre und ihr Interesse am Workshop zu beschreiben. Dabei fertigen sie auf runden Moderationskarten Namensschilder mit ihren Vornamen an.
3. Anschließend wird der Tagesablauf des Workshops vorgestellt und mit den Ergebnissen der Erwartungsabfrage in Übereinklang gebracht.
4. Um das Kennenlernen zu vertiefen und zugleich einen Einstieg ins Thema zu bekommen, werden die Teilnehmenden nun gebeten, sich in einem gegenseitigen Interview jeweils zu zweit zu folgenden Fragen zu interviewen:
   - Was ist Kreativität für dich?
   - Unter welchen Bedingungen bist du kreativ?
   - Gegen welche Sicherheitsvorschriften hast du schon verstoßen?

   Danach stellen sich die Teilnehmenden gegenseitig im Plenum vor. Dabei erkennen sie in den unterschiedlichen Antworten, dass das Konzept von Kreativität rund um einen gemeinsamen Kern heterogen geprägt ist und die Bedingungen, unter denen Menschen kreativ sind, sehr gegensätzlich ausfallen. Der

Umgang mit Sicherheitsvorschriften hingegen fällt homogener aus. Hier dominieren eindeutig Verstöße außerhalb des Arbeitsplatzes, z. B. das Überqueren einer roten Fußgängerampel.

- Mit diesem Vorgehen aktivieren die Lehrenden ihr Vorwissen und knüpfen die Themen Kreativität und Sicherheit an ihre eigene Laborpraxis an.
- Es findet ein erster Transfer zur eigenen Lehrveranstaltung statt.
- Es wird zum ersten Mal das Spannungsverhältnis zwischen Kreativität und Sicherheit in Form von Heterogenität und Homogenität im Workshop berührt.

Tag 1: 10:45–12:30 Uhr	Thema: Unterweisung und Gefährdungsbeurteilung	Dauer: 105 min

II. Unterweisung und Gefährdungsbeurteilung

Nach dem Einstieg in die Kreativität folgt nun der Einstieg in das Thema Sicherheit mit den Schwerpunkten Unterweisung und Gefährdungsbeurteilung:

- Kurzer Vortrag zur Notwendigkeit von Unterweisungen, wer sie durchführen darf und wer dafür verantwortlich ist.
- Befragung der Teilnehmenden, welche Methoden sie bisher bei Unterweisungen genutzt haben.
- Klärung der rechtlichen Anforderungen und berufsgenossenschaftlicher Vorschriften.
- Vorstellung aktivierender und gesetzeskonformer Methoden für die Unterweisungen (Videos, Quiz und Spiele).
- Erörterung der Vorteile und Grenzen von Online-Unterweisungen, z. B. durch mangelnde Möglichkeiten für Rückfragen, explizite Forderung nach mündlichen Unterweisungen in einigen Verordnungen z. B. der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV)
- Diskussion der Kombinationsmöglichkeiten von Online- und Präsenzunterweisungen.
- Präsentation der generell erforderlichen Unterweisungsinhalte (Verhalten im Brandfall, Erste Hilfe, Unfallmeldung, Laborordnung).
- Einführung in die „Gefährdungsbeurteilung“, um weitere spezifische Inhalte von Unterweisungen zu ermitteln:
  - Überblick über gesetzliche Grundlagen und mögliche relevante Verordnungen (Gefahrstoffverordnung (GefStoffV), Biostoffverordnung (BioStoffV), Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (OStrV) oder Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (LärmVibrationsArbSchV)).
  - Vorgehen bei einer Gefährdungsbeurteilung und Festlegung der Schutzmaßnahme

Am Ende dieses Teils bearbeiten die Teilnehmenden in Gruppen für eine von ihnen gewählte Lehrveranstaltung die Frage: Welche Themen gehören in die Unterweisung? Als Grundlage erhalten sie eine Checkliste mit Gefährdungsfaktoren. Sie identifizieren die Gefährdungen, die für ihr Beispiel-Labor relevant sind und sich entsprechend in der Unterweisung wiederfinden müssen. Die Ergebnisse werden einander präsentiert und im Plenum diskutiert.

Tag 1: 13:15–15:00 Uhr	Thema: Denkhüte	Dauer: 105 min

III. Entwicklung kreativitätsförderlicher Lehr-/Lernszenarien im Labor

Aufbauend auf den Grundlagen zu Gefährdungsbeurteilung und Sicherheitsunterweisung folgt im Workshop die erste kreative Phase. Dabei können die Teilnehmenden aus zwei verschiedenen Zielen auswählen: der Gestaltung von kreativitätsförderlichen Lehr-/Lernszenarien im Labor oder der Gestaltung kreativer Sicherheitsunterweisungen. Gemeinsam ist das Anliegen, die Studierenden auf höhere kognitive Kompetenzniveaustufen zu bringen. Dabei gibt es Unterschiede im Erreichbaren: Für die Sicherheitsunterweisung ist es ein Fortschritt, die Studierenden nicht nur durch bloße Instruktion auf die Stufe „Wissen“ oder bestenfalls „Verstehen“ zu bringen, sondern im Idealfall auch auf „Anwenden“. Bei den Lehr-/Lernszenarien hingegen bietet gerade das Labor die Chance, flexibler als in Vorlesungen auch höhere Taxonomiestufen anzustreben (Anderson, 2009). Je nach Präferenz werden die Teilnehmenden in die Gruppen „Lehr-/Lernszenarien“ oder „Sicherheitsunterweisung“ eingeteilt.

In jeder Gruppe stellt eine Teilnehmerin oder ein Teilnehmer einen konkreten Fall aus der eigenen Praxis in den Mittelpunkt, der kreativitätsförderlich neugestaltet werden soll. Dazu wird die sehr effiziente Methode der Denkhüte von Edward de Bono angewendet (Knieß, 2006). Statt mit sechs werden in diesem Workshop jedoch nur vier hochschuldidaktische Denkhüte eingesetzt. Dazu bekommen jede Teilnehmerin und jeder Teilnehmer vier Hüte in vier unterschiedlichen Farben, wobei jeder Hut eine bestimmte Perspektive/Denkrichtung repräsentiert. Zu den vier Perspektiven zählen: böse/r Professor/in, effizienzorientierte/r Studierende/r, engagierte/r wissenschaftliche/r Mitarbeiter/in und Sicherheitsbeauftragte/r. Alle Teilnehmenden haben gleichzeitig den Hut nur einer Farbe auf und denken dann nur aus der Perspektive, die durch die Hutfarbe angezeigt wird. In einer Rolle verbleiben sie so lange, bis eine Teilnehmerin oder ein Teilnehmer vorschlägt, eine andere Hutfarbe aufzusetzen. Alle wechseln dann den Hut und denken nur noch in der neuen Perspektive der entsprechenden Hutfarbe. Die Teilnehmenden können die Farbe wechseln, so oft sie möchten; entscheidend ist, dass am Ende jede Farbe bzw. Perspektive mindestens einmal berücksichtigt wurde.

Durch die unterschiedlichen Sichtweisen entstehen zunächst viele Ideen (divergente Phase). Wenn die Teilnehmenden das Gefühl haben, dass durch die Hüte keine neue Ideen mehr gefördert werden, beenden sie die Technik, nehmen die Hüte ab und beginnen, aus der Vielzahl der Ideen die vielversprechendsten auszu-

wählen und arbeiten diese in Richtung real umsetzbarer Konzepte aus (konvergente Phase). Die so entstandenen Konzepte für Lehr-/Lerneinheiten bzw. kreative Sicherheitsunterweisungen werden im Plenum vorgestellt.

In diesem Schritt machen sich die Lehrenden Gedanken über die Auswahlkriterien ihrer Ideen (personelle, finanzielle Ressourcen, curriculare Rahmenbedingungen) und treffen entsprechende Entscheidungen. Bei der Präsentation ihrer Ergebnisse bekommen sie Peer-Feedback und Feedback vom Moderationsteam. Es werden erste Ansätze diskutiert, wie die neuen Lehr-/Lerneinheiten evaluiert werden könnten.

Tag 2: 9.00–10.15 Uhr	Thema: Kreativität	Dauer: 75 min

IV. Kreativität in der Hochschullehre

Tag 2 beginnt mit der Klärung offener Fragen, die sich am ersten Tag oder in der Nachwirkung des ersten Tages ergeben haben. Anschließend wird das Thema Kreativität in der Hochschullehre vertieft. Dies geschieht zunächst entlang der Präsentation und Diskussion der sechs Facetten der Kreativität (s. Abschnitt 2.2). Im weiteren Verlauf wird der Fokus auf die notwendige Offenheit aller Beteiligten gelegt:

- *Lehrende* müssen offen sein für Freiräume von Studierenden und Ergebnisse, von denen sie vorher kein klares Bild im Kopf gehabt haben. Wollen Lehrende von ihren Studierenden neue, innovative Ideen und Gedanken haben, müssen sie dafür sorgen, dass die Ideen sich nicht an den Erwartungen der Lehrenden orientieren können. Das bedeutet, Aufgaben oder Bereiche so offen zu gestalten, dass für die Studierenden ein erwartetes oder gewünschtes Ergebnis nicht erkennbar ist. Bei der Entgegennahme der Lösungen ist es für die Lehrenden wichtig, eigene Vorstellungen geeigneter Antworten (welche die Lehrenden in der Regel haben bzw. sogar haben sollten) loszulassen und sich auf die Ansätze der Studierenden zunächst offen einzulassen, bevor sie zu einer Bewertung gelangen. In der Praxis ist diese Einstellung gar nicht so leicht umzusetzen, jedoch ein wichtiges Signal an die Studierenden, dass ihre Überlegungen grundsätzlich wertgeschätzt werden, auch und gerade wenn sie einen anderen Weg als den üblichen gehen.
- *Lernende* müssen die Unsicherheit aushalten, sich nicht an Halt gebenden Strukturen (z. B. erkennbare Erwartungen, vorgegebene Arbeitsschritte, Lösungshorizonte) orientieren zu können. Da vorangehende Bildungsabschnitte nicht immer die Selbstständigkeit der Lernenden oder ihre Bereitschaft, eigene Entscheidungen unter dem Eingang von Risiko zu treffen, gefördert haben, benötigen viele Lernenden hier die Unterstützung der Lehrenden. Diese sollten in der Lage sein, ihren Studierenden zu erläutern, dass sie auch ohne die feste Struktur, die sie von anderen Lernprozessen kennen, zu guten Ergebnissen kommen können und dass das Aushalten dieser Unsicherheiten und die Generierung auch nicht weiterführender Ideen bereits Teil der gewünschten Leistung ist. Nicht das Ergebnis eines kreativen Prozesses also wird bewertet, sondern der heterogene Weg dorthin.

Tag 2: 10:30–12:30 Uhr	Thema: Beispiele	Dauer: 120 min

V. Beispiele

Hier werden Beispiele vorgestellt, die Abwechslung in eine Unterweisung bringen und die Studierenden aktivieren können. Nicht alle Beispiele sind direkt auf Unterweisungen für Labore zugeschnitten, da sie die Teilnehmenden inspirieren sollen, eigene Spiele für ihre Unterweisungen zu entwickeln.

Zunächst werden drei kurze Videos vorgeführt, deren Auswahl sich an den Fachrichtungen der Teilnehmenden orientiert. Es werden professionell erstellte Filme sowie geeignete YouTube-Videos ausgewählt, die aus Studierenden-Projekten entstanden sind. Mit den Teilnehmenden werden die Kriterien für den Einsatz von Videos bei Unterweisungen diskutiert, u. a. Länge der Filme, passende Inhalte, korrekte Inhalte – vor allem bei selbsterstellten Videos.

Nach den Videos wird den Teilnehmenden das interaktive Quiz als aktivierende Lehrform am Beispiel des Quiztools Kahoot vorgestellt.[3] Zum Kennenlernen spielen sie dafür zunächst mit ihren Smartphones ein Frage-Antwort-Spiel mit kurzen Fragen zum Thema „Sicherheitsunterweisung“, die per Beamer präsentiert werden.

Im Anschluss überlegen sich die Teilnehmenden jeweils mindestens eine Frage mit geeigneten Antwortmöglichkeiten für ein Quiz, passend zu ihrem Labor. Durch die Moderation wird ein Quiz aus den Fragen der Teilnehmenden exemplarisch mit dem Quiztool erstellt. Das Quiz wird einmal im Plenum durchgespielt. Die Einsatzmöglichkeiten in der Praxis werden besprochen.

Nach dem Onlinetool werden zwei Spiele aus dem Repertoire der SDU (Stabsstelle Sicherheitstechnische Dienste und Umweltschutz der TU Berlin) mit den Teilnehmenden gespielt, die für den Einsatz bei Aktionswochen oder Gesundheitstagen entwickelt wurden: „Suchbild: Schlechter Bildschirmarbeitsplatz“ und „Abfalltrenn-Quiz“.

Das „Suchbild: Schlechter Bildschirmarbeitsplatz“ zeigt einen völlig überfüllten Bildschirmarbeitsplatz, an dem an mehreren Stellen Fehlerquellen bzw. Verbesserungsbedarf zu finden sind, beispielsweise Stolperstellen durch nachlässig verlegte Kabel, ergonomisch ungeeigneter Bürostuhl, Blumentopf auf dem Computergehäuse (s. Abb. 1). Die Teilnehmenden suchen anhand des Bildes Verbesserungsmöglichkeiten.

Das Abfalltrenn-Quiz besteht aus 32 Karten mit Fotos von typischen Büroabfällen, die dem richtigen Entsorgungsweg (Papierabfall, Wertstoffabfall, Restmüll, Altglas oder gesonderter Abfall) zugeordnet werden sollen (s. Abb. 2).

3 https://kahoot.com/ Andere Quiztools sind z. B. Pingo, Socrative, EduVote: https://pingo.coactum.de/; https://socrative.com/; https://www.eduvote.de/.

Abbildung 1: Suchbild „Schlechter Bildschirmarbeitsplatz“ (Copyright: Hüllenkrämer, SDU/TU Berlin)

Anschließend erhalten die Teilnehmenden die Aufgabe, in Gruppen je nach Interessenlage ein eigenes Abfalltrenn-Quiz mit labortypischen Abfällen, ein „Suchbild: Schlechter Laborarbeitsplatz“ oder ein anderes für Unterweisungen geeignetes Spiel zu entwerfen.

Abbildung 2: Quiz für Abfalltrennung (Copyright: Goldau, SDU/TU Berlin)

Tag 2: 13:30–14:30 Uhr	Thema: Ideale Sicherheitsunterweisung	Dauer: 60 min

Mit einer Kreativitätstechnik (6-3-5 nach Knieß, 2006) werden Konzepte für eine ideale Sicherheitsunterweisung entworfen, unabhängig vom eigenen Lehr-/Lernkontext. Anschließend beurteilen die Teilnehmenden, welche Anteile tatsächlich (ggf. unter bestimmten Anpassungen) übertragbar wären oder welche Rahmenbedingungen sich ändern müssten, damit sinnvolle neue Ansätze anwendbar wären.

Tag 2: 14:30–15:00 Uhr	Thema: Abschluss	Dauer: 30 min

Der Workshop endet mit einer Abschlussdiskussion („Was nehmt Ihr mit? Was bleibt hier?“) und der Evaluation der Veranstaltung.

4 Erkenntnis: Sicherheit über die Sicherheit ermöglicht erst Kreativität

„Das ist zu gefährlich für die Studierenden!“ – „Das dürfen wir wegen der Sicherheitsauflagen gar nicht!“ Diese Aussagen im Rahmen von Workshops zur Förderung von Kreativität im Labor ohne Verknüpfung mit dem Thema Sicherheit waren oft verantwortlich dafür, dass innovative, explorative Lehr-/Lernszenarien im Labor nicht zur Umsetzung gelangten.

Als zentrale, gleichwohl überraschende Erkenntnis nach der Durchführung des Workshops zeigte sich, dass die Widersprüche zwischen Kreativität und Sicherheit im Labor mehr in der Didaktik als in der Sache selbst (Sicherheitsvorgaben schränken kreative Prozesse im Labor ein) zu finden sind. Tatsächlich zeigte sich, dass viele Tätigkeiten im Labor, von denen die Teilnehmenden dachten, dass Studierende sie aus Sicherheitsgründen nicht ausüben dürften, nach korrekter Gefährdungsbeurteilung und daraus abgeleiteten Maßnahmen eben doch von Studierenden durchgeführt werden dürfen.

Vor dem Hintergrund der rechtlich klaren Vorgaben über die Durchführung von Sicherheitsunterweisungen war das didaktische Grundverständnis der für die Sicherheit zuständigen Teilnehmenden stark geprägt von Instruktion und dem Verharren auf unteren kognitiven Taxonomiestufen. Den rechtlichen Anforderungen ist damit auch Genüge getan.

Für die Teilnehmenden sorgte die Verknüpfung der Themen Kreativität und Sicherheit im Workshop jedoch für die „Aha“-Erlebnisse, dass erstens auch Sicherheitsunterweisungen gern aktivierende Elemente enthalten und auf höhere kognitive Taxonomiestufen abzielen dürfen und sie zweitens stets Gefahr laufen, dieses didaktische Verständnis unbewusst auch auf ihre Lehre im Labor zu übertragen. Instruktionsorientierte Lehre hält sie auf der sicheren Seite.

Hier durch die gemeinsame Workshop-Gestaltung von Arbeitssicherheit und Labordidaktik aufzuzeigen, dass in den meisten Fällen auch explorative Lehr-/Lernszenarien im Labor möglich sind, war eine wesentliche Errungenschaft des Workshops Kreativität und Sicherheit im Labor. Dabei hat das Wissen oder eben Nichtwissen über Anforderungen und Möglichkeit einen ganz entscheiden Einfluss darauf, was Lehrende bereit sind, in ihrer Lehre umzusetzen. Die Vermeidungshaltung offenerer Lehr-/Lernszenarien im Labor beruht demnach häufig auf Unsicherheit und der darauf aufbauenden Haltung, Risiken zu vermeiden. Im Workshop konnte den Teilnehmenden gezeigt werden, wie sie durch korrektes Vorgehen in Bezug auf die Sicherheit im Labor Risiken für sich selbst ausschließen können. Die Teilnehmenden waren immer wieder überrascht darüber, was im Bereich explorativen Lernens im Labor alles möglich ist, wenn Gefährdungsbeurteilung, Ableitung von Maßnahmen und Unterweisung korrekt durchgeführt werden.

5 Ausblick

Die Zusammenführung zweier Aspekte der Lehre im Labor, die auf den ersten Blick nicht zusammengehören, hat die Bewusstwerdung unterschiedlicher didaktischer Konzepte und Überwindung entsprechender mentaler Grenzen ermöglicht. Die Erörterung der Themen „Kreativität und Sicherheit“ vor dem Hintergrund labordidaktischer Grundlagen hat zur Weiterentwicklung sowohl der Sicherheitsunterweisungen als auch der Lehr-/Lernszenarien im Labor geführt.

Eine weitere spannende Zusammenführung könnte z. B. mit dem Themengebiet „Datenschutz“ herbeigeführt werden, das ebenfalls rechtlich-normativ geprägt ist und bei vielen Lehrenden mit Unsicherheit behaftet sein dürfte. Eine fruchtbare Erweiterung der Labordidaktik könnte auch in den Themengebieten „Umweltschutz“ und „Nachhaltigkeit“ liegen.

Videoempfehlungen

Professionell erstellte Filme finden sich unter anderem auf den folgenden Portalen:

- Mediathek Arbeitsschutzfilme: www.arbeitsschutzfilm.de
- Napo-Filme: www.napofilm.net
- Filme der BG RCI:
  www.bgrci.de/fachwissen-portal/themen-im-fokus/sammlung-fokus-themen/neue-videoclips-visualisieren-risiken-beim-umgang-mit-gefahrstoffen/
- Filmportal der BGHM: www.bghm.de/film-portal/player/

Genutzte Beispiele von Youtube:

- Leibniz Universität Hannover „Sicherheit im Labor“: https://www.youtube.com/watch?v=AT1mTB75wkg
- TU Berlin „Mülltrennung To-Go Becher“: https://youtu.be/3i8R-_nSShc

Literaturverzeichnis

Anderson, L. W. (Hrsg.). (2009). *A taxonomy for learning, teaching, and assessing. A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives* (Abridged ed., [Nachdr.]. New York: Longman.

Bono, E. de. (2013). *De Bonos neue Denkschule. Kreativer denken, effektiver arbeiten, mehr erreichen* (5. Aufl.). München: mvg-Verlag.

Felder, R. M. & Brent, R. (2016). *Teaching and Learning STEM. A Practical Guide* (1. Aufl.). s. l.: Jossey-Bass.

Haertel, T.; Terkowsky, C. & Frye, S. (2019). Kreativität in der Industrie 4.0: Drei zentrale Thesen für die Ingenieurdidaktik. In T. Haertel, C. Terkowsky, S. Dany & S. Heix (Hrsg.), *Hochschullehre & Industrie 4.0. Herausforderungen – Lösungen – Perspektiven* (1. Auflage, S. 13–25). Bielefeld: wbv Media.

Jahnke, I.; Haertel, T. & Wildt, J. (2017). Teachers' conceptions of student creativity in higher education. *Innovations in Education and Teaching International 54* (1), 87–95. doi:10.1080/14703297.2015.1088396.

Knieß, M. (2006). *Kreativitätstechniken. Möglichkeiten und Übungen; [Methoden und Übungen]* (dtv, Originalausgabe).

Rosa, H. (2016). *Beschleunigung. Die Veränderung der Zeitstrukturen in der Moderne* (Suhrkamp-Taschenbuch Wissenschaft, Bd. 1760, 11. Auflage, Originalausgabe). Frankfurt am Main: Suhrkamp.

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* (acatech Studie). München: Herbert Utz Verlag.

Terkowsky, C.; Haertel, T.; Ortelt, T. R.; Radtke, M. & Tekkaya, A. E. (2016). Creating a place to bore or a place to explore? Detecting possibilities to establish students' creativity in the manufacturing engineering lab. *International Journal of Creativity & Problem Solving 26* (2), 23–45.

Virilio, P. & Voullie, R. (1980). *Geschwindigkeit und Politik. Ein Essay zur Dromologie;* [Internationaler Merve-Diskurs], Bd. 90. Berlin: Merve-Verlag.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Suchbild „Schlechter Bildschirmarbeitsplatz“ 91

Abb. 2 Quiz für Abfalltrennung 91

Re-Design eines Laborpraktikums im Lehramtsstudium – Didaktische Optimierung mittels Design-Based Research

Silke Frye, Claudius Terkowsky, Tobias Haertel, Judyta Franuszkiewicz, Sabrina Heix

Abstract

Neben ihrer Fachkompetenz zeichnet gute Techniklehrer*innen die Begeisterung für ihr Unterrichtsfach aus. Um diese Begeisterung im Studium zu wecken und zu unterstützen, eignen sich insbesondere praktische Lern- und Lehrformate wie das Labor. Hier haben Studierende die Möglichkeit, technische und naturwissenschaftliche Phänomene hands-on zu untersuchen. Häufig stützen sich Laborpraktika in den Hochschulen jedoch auf stark strukturierte und instruktive Konzepte, die Studierenden wenig Raum für die Entwicklung von Kompetenzen zur Selbstorganisation geben. Dieser Beitrag zeigt an einem konkreten Beispiel, wie in einem Laborpraktikum für Lehramtsstudierende im Fach Technik gemeinsam von Lehrenden und Hochschuldidaktiker*innen verfestigte Handlungsroutinen aufgebrochen werden konnten und das didaktische und methodische Konzept mit dem Ansatz des Design-Based Research optimiert wurde. Dabei konnten als Schlüsselelemente für das erfolgreiche Re-Design die Formulierung und Kommunikation der verfolgten Lernziele, die konsequente Umsetzung der Handlungsorientierung sowie die Stärkung der Selbstorganisation der Studierenden identifiziert werden. Darüber hinaus zeigt der Beitrag, wie eine Kooperation von Hochschuldidaktiker*innen und Lehrenden auf Augenhöhe aussehen kann und wie in dieser partizipativen Optimierung beide Seiten voneinander profitieren.

Schlüsselwörter: Lernziele, Design-Based Research, Selbstorganisation, Handlungsorientierung, Lehramtsausbildung

1 Einleitung

Neben ihrer Fachkompetenz zeichnet gute Techniklehrer*innen auch die besondere Begeisterungsfähigkeit für das eigene Fach aus. Um bei Schüler*innen Begeisterung für Technik wecken zu können, müssen Lehramtsstudierende eben diese Begeisterung in ihrem Studium selbst entdecken und erleben. Dafür ist in der Regel der Anwendungsbezug in der hochschulischen Ausbildung maßgeblich. Zur Umset-

zung einer praxisorientierten technischen Bildung steht dabei das „Handeln lernen“ und somit die Handlungsregulation (vgl. Volpert, 1971; Hacker, 1989) im Mittelpunkt. Realisiert werden kann dies bspw., indem die Studierenden selbstständig „vollständige Handlungen“ ausführen – sich also über technische Prozesse informieren, diese Prozesse planen, Entscheidungen treffen, die Planung ausführen, kontrollieren und abschließend auch bewerten. Neben der Fachkompetenz muss dabei insbesondere die Selbstorganisation der Studierenden gefördert werden. Sie steht für die Fähigkeit, den eigenen Lernprozess autonom zu organisieren und zu reflektieren (vgl. Savin-Baden & Tombs, 2018). Diese Verknüpfung von Fachkompetenz und Selbstorganisation ist Grundlage für die Entwicklung einer Methodenkompetenz, die es den Studierenden ermöglicht, technische Innovationen zu verstehen und später in ihren eigenen Unterricht einzubringen (Hein & Schulte, 2009).

Ein in technischen Studiengängen verbreitetes didaktisches Format, das praxis- und fachbezogenes sowie selbstorganisiertes Lernen ermöglicht, ist das Laborpraktikum. Aufbauend auf theorieorientierten Vorlesungen und Seminaren, wird anhand von ausgearbeiteten und geplanten Experimenten praktisches, wissenschaftliches und technisches Arbeiten trainiert. Studierende wenden fachspezifische Methoden an, während sie technische Experimente und Messungen durchführen, auswerten und interpretieren. Ein solches Laborpraktikum ist auch Teil des Curriculums des Lehramtsstudiums im Fach Technik für Haupt-, Real-, Sekundar- und Gesamtschulen an der Technischen Universität (TU) Dortmund.

2 Laborpraktikum für angehende Lehrer*innen im Fach Technik – Ausgangssituation

Das sogenannte Technische Praktikum (TPR) ist an der TU Dortmund Teil der Ausbildung von Lehramtsstudierenden im Fach Technik. Dieses Laborpraktikum umfasst zwei aufeinander aufbauende Kurse, das TPR 1 und das TPR 2. Insgesamt erstrecken sich diese Kurse über das dritte bis fünfte Bachelorsemester.

Das TPR kann als klassisches Grundlagenlabor charakterisiert werden, in dem die Studierenden im Wesentlichen fundamentale wissenschaftliche Erkenntnisse empirisch nachvollziehen (vgl. Bruchmüller & Haug, 2001). Ziel ist die Verzahnung von Theorie und Praxis. Die Studierenden untersuchen, dokumentieren und analysieren in Kleingruppen von zwei bis drei Personen grundlegende technische und naturwissenschaftliche Phänomene. Die Kurse stützten sich in ihrer ursprünglichen Form auf ein stark strukturiertes und instruktives Konzept. Die Studierenden führten dabei anhand von Versuchsanleitungen insgesamt 18 vorstrukturierte Experimente durch. Durch diese Anleitungen sollte sichergestellt werden, dass die Versuche innerhalb des vorgegebenen Zeitrahmens von allen Studierenden vollständig abgeschlossen werden (vgl. Bruchmüller & Haug, 2001). Alle Versuche folgten dem in Abbildung 1 dargestellten Ablauf.

Abbildung 1: Ablauf der Versuche im Technischen Praktikum vor dem Re-Design

Die fachlichen Inhalte und Grundlagen eines Versuchs, die jeweils in einem bereitgestellten Skript zusammengefasst waren, wurden vorab in einem Kolloquium abgeprüft. Konnten die Studierenden in dieser ersten Prüfung alle Fragen der Lehrenden zu den fachlichen Inhalten beantworten, führten sie im Anschluss den jeweiligen Versuch anhand einer strukturierten Schritt-für-Schritt-Anleitung durch. Danach wurden die aufgenommenen Daten und Messwerte von ihnen dokumentiert, ausgewertet und ein Bericht erstellt. Auf Basis dieses Berichtes fand ein zweites Prüfungsgespräch statt, mit dem der Versuch abgeschlossen wurde.

Dieser seit Jahren übliche Ablauf und die damit verbundenen Handlungsroutinen führten zunehmend zu Unzufriedenheit bei Lehrenden und Studierenden. Die Lehrenden kritisierten, dass die Studierenden von Semester zu Semester schwächere Leistungen zeigten und es ihnen immer mehr an grundlegendem Fachwissen fehle. Um dies auszugleichen, wurden die Skripte und Versuchsanleitungen durch die Lehrenden immer umfangreicher und detaillierter ausgearbeitet. Die Lehrenden wandten also zunächst die Strategie des „mehr desselben“ (Watzlawick, 2009) an, um zu einer Lösung für das von ihnen erkannte Problem zu gelangen. In den Lehrevaluationen kritisierten die Studierenden jedoch den dadurch zunehmenden Aufwand für die Vorbereitung und Auswertung der Versuche sowie die engen Vorgaben und restriktiven Anleitungen. Daraus folgte der Eindruck der Lehrenden, die Studierenden seien unmotiviert und würden im Rahmen des Laborpraktikums nur im begrenzten Maße die gewünschten praktischen Erfahrungen sammeln.

Auch mit der vorhandenen fachdidaktischen Expertise der Lehrenden schienen die Bemühungen zur Verbesserung des Laborpraktikums allein aus der fach- und professionsgebundenen Perspektive nicht ausreichend. Je mehr Druck die Lehrenden auszuüben versuchten, um die Studierenden zum Lernen zu motivieren, desto weniger Motivation und Zufriedenheit zeigten diese. Dies wiederum steigerte die Unzufriedenheit der Lehrenden, worauf sie erneut versuchten, den Zwang zu erhöhen. Ergebnis war dann wieder ein größerer Widerstand der Studierenden. Watzlawick et al. (2017) nennen diese Spirale eine diskrepante Interpunktion von Ereignisfolgen. Die Lösung solcher Problemtypen besteht daher nicht darin, nach Ursache und Wirkung zu suchen bzw. wechselseitig nach den dafür verantwortlichen Personen und sie ggf. mit Sanktionen dazu zu zwingen, ihr Verhalten zu ändern, sondern allen Teilnehmenden der Interaktion die Möglichkeit zu eröffnen, aus diesem Zirkelschluss auszusteigen und gemeinsam bessere Lösungen zu finden (vgl. Watzlawick et al., 2017).

Um einen unabhängigen, objektiven Blick von außen zu erhalten, wurde von den Lehrenden daher eine Kooperation mit hochschuldidaktischen Expert*innen des Zentrums für HochschulBildung (zhb) der TU Dortmund initiiert. Aus der Zusammenarbeit von Fachdidaktiker*innen und fachbezogen arbeitenden Hochschuldidaktiker*innen aus dem Bereich der Labordidaktik entstand auf Grundlage des Design-Based Research eine partizipative Optimierung (vgl. Schlick et al., 2018) der methodisch-didaktischen Konzeption des Technischen Praktikums.

3 Design-Based Research als gestaltungsorientierter Forschungsansatz

Der Ansatz des Design-Based Research (DBR) stammt aus der amerikanischen Bildungsforschung (Brown, 1992). Ausgangspunkt für seine Entwicklung war die Unzufriedenheit darüber, dass wissenschaftliche Erkenntnisse nicht ausreichend in der Praxis des Lehrens und Lernens berücksichtigt wurden (vgl. Reinmann, 2005). Ziel des Ansatzes ist es, Lernumgebungen zu gestalten und dabei gleichzeitig Lerntheorien in konkreten Kontexten zu überprüfen und weiterzuentwickeln. Somit werden Wissenschaft und Praxis miteinander verknüpft, um Lernsettings „erforschend zu gestalten und gestaltungsorientiert zu beforschen“ (Jahnke et. al., 2009).

Gess, Rueß und Deicke (2014) charakterisieren DBR mit sechs zentralen Merkmalen:

1. Die Entwicklung und der Test einer didaktischen Verbesserung (Intervention) stehen im Zentrum des (Forschungs-)Prozesses des DBR.
2. DBR findet in einem realen Bildungskontext, also in einer konkreten, komplexen und praktischen Lern- und Lehrsituation, statt.
3. Unterschiedliche Forschungsmethoden werden im DBR entsprechend der Ziele und Perspektiven kombiniert.
4. DBR verläuft in einem iterativen Prozess, in dem das Design und Re-Design der Intervention ständig weiterentwickelt werden.
5. Praxisexpertise wird durch die Beteiligung der Lehrenden in den Forschungsprozess einbezogen.
6. DBR leistet einen Beitrag zur Theorieentwicklung, indem theoretisch fundierte Interventionen überprüft und weiterentwickelt werden.

In der Durchführung sind iterative Phasen von Analyse und Aktion Kern des DBR (vgl. Plomp, 2013; Euler, 2014). In der Literatur finden sich dazu verschiedene Zyklusmodelle, die alle, abgesehen von einigen Unterschieden in Details, wie in Abbildung 2 dargestellt, ausgehend von der Identifikation des Handlungsbedarfs die Phasen Analyse, Entwicklung und Gestaltung, Erprobung, Analyse durch Evaluation sowie Revision und Modifikation umfassen (Jahn, 2014).

Abbildung 2: Zyklusmodell des Design-Based Research (in Anlehnung an Euler & Sloan, 2014)

Aus der labordidaktischen Perspektive wurden methodische Vorgehensweisen und Ergebnisse des acatech-Projekts „Das Labor in der Ingenieurausbildung – Zukunftsorientierte Ansätze aus dem Projekt IngLab“ (Tekkaya et al., 2016) sowie aus der Arbeit von May (2017) zur Internationalisierung der Ausbildung von Ingenieur*innen für den Design-Based Research Ansatz fruchtbar gemacht.

Wie das angesprochene Laborpraktikum gemeinsam von Hochschuldidaktiker*innen und Lehrenden mit dem Ansatz des DBR optimiert wurde, wird im Folgenden dargestellt.

4 Optimierung des Technischen Praktikums mittels Design-Based Research

Eine besondere Herausforderung bei der Optimierung des TPR waren eingefahrene Routinen und die zum Teil starke Skepsis gegenüber Veränderungen sowie die sich daraus ergebende, beschriebene Abwärtsspirale von Unzufriedenheit. Aus diesem Grund erfolgte jeder Schritt im DBR unter dem Anspruch, alle Beteiligten bei der Entwicklung mitzunehmen und auf Bestehendem aufzubauen, um auf die vorhandene Skepsis einzugehen und so eine möglichst hohe Offenheit für Veränderungen zu erzeugen und in der Folge auch zu erhalten. Darüber hinaus wurde konsequent das Ziel der Praktikabilität verfolgt, um konkrete, handhabbare und nützliche Ergebnisse für Lehrende und Studierende zu erreichen.

Phase 1 – Analyse

Die Analyse der Ausgangssituation ist der erste Schritt im DBR. Da eine kontextsensitive Optimierung des Laborpraktikums erfolgen sollte, war es wichtig, eben diesen Kontext zu erfassen und dabei auch mögliche Restriktionen für die Optimierung und Umsetzung des didaktischen und methodischen Designs zu identifizieren. Die Situationsanalyse des bestehenden Laborkonzeptes des TPR wurde durch die Hochschuldidaktiker*innen als außenstehende Instanz durchgeführt und setzte sich aus drei methodisch aufeinander aufbauenden Elementen zusammen:

1. Dokumentenanalyse

Zur Einordnung des Laborpraktikums im Studiengang und zur Klärung der formellen Vorgaben und Anforderungen erfolgte zunächst eine Auswertung der Modulbeschreibungen. Die ausgewiesenen Inhalte und Lernziele stellten Fixpunkte bzw. Rahmenbedingungen für eine mögliche didaktische und methodische Neugestaltung des Labors dar. Anschließend wurden die Skripte untersucht, die als fachliche Grundlage für die Versuche genutzt wurden. Ausgehend davon erfolgte eine Analyse der Versuchsanleitungen, insbesondere der methodischen Vorgaben und des instruktiven Aufbaus.

Ergebnis der Dokumentenanalyse war eine verbindliche Klärung der Rahmenbedingungen und Restriktionen für das Laborpraktikum in Bezug auf den zeitlichen Umfang, die zugeordneten Leistungspunkte und Prüfungsleistungen sowie ein erster, rein formaler Eindruck zu den Inhalten in den Bereichen Maschinenbau, Elektro- und Informationstechnik sowie zum didaktischen und methodischen Konzept des TPR.

2. Teilnehmende Beobachtung

Im Anschluss fanden teilnehmende Beobachtungen in allen Phasen des TPR statt. Diese umfassten sowohl das einführende und abschließende Kolloquium als auch die eigentliche Versuchsdurchführung. Dabei wurden neben dem organisatorischen Ablauf insbesondere das Verhalten der Studierenden und Lehrenden, die zur Verfügung stehenden Materialien sowie die erfolgten Hilfestellungen durch technische Mitarbeiter*innen, welche die praktische Arbeit der Studierenden im Labor begleiteten, dokumentiert.

Ergebnis waren dokumentierte individuelle Handlungsabläufe und -routinen der beteiligten Lehrenden und Verhaltensweisen der Studierenden in den verschiedene Phasen des Versuchs sowie Beschreibungen der Prozessabläufe.

3. Strukturierte Interviews

Zur Validierung und Vertiefung wurden die Beobachtungen durch kurze strukturierte Interviews ergänzt. Hierbei wurden die Studierende dazu befragt, ob ihnen die Versuchsdurchführung Freude bereitet habe, Probleme aufgetreten seien und welche Vorschläge zur Veränderung der Versuche sie einbringen würden. Die Lehrenden wurden dazu befragt, ob ihre individuellen Ziele erreicht wurden, ob es positive oder negative Auffälligkeiten im jeweiligen Versuch gab und wie sie den Ablauf insgesamt bewerteten. Zusätzlich wurden von Studierenden und Lehrenden die Zielsetzungen, Stärken und Schwächen des Versuchs sowie Veränderungswünsche für das gesamte Laborpraktikum erfragt.

Ergebnis der strukturierten Interviews waren individuelle Bewertungen und Reflexionen aus der subjektiven Perspektive der beteiligten Personen. Die Studierenden gaben beispielsweise an, dass sie die praktische Arbeit in den Versuchen generell schätzten, die ständigen Prüfungssituationen im Kolloquium und beim Abschluss des Versuchs ihnen aber die Freude daran nähmen. Außerdem wurde häufig

darauf verwiesen, dass die eingesetzten Skripte nicht hilfreich seien für die Versuchsdurchführung – zu umfangreich, gleichzeitig unvollständig oder auch fehlerhaft. Bei der Befragung der Lehrenden wurde deutlich, dass kein einheitliches Verständnis über die Lernziele des Laborpraktikums und der einzelnen Versuche vorherrschte. Die Kurse waren stark geprägt von individualisierten und vor allem impliziten Zielsetzungen der Lehrenden, die für die Studierenden nicht transparent und nachvollziehbar waren.

Phase 2 – Entwicklung und Gestaltung

Zentrale Aussagen aus den Interviews und die Eindrücke der Hochschuldidaktiker*innen aus den Beobachtungen wurden dazu genutzt, die Lehrenden für die didaktischen und methodischen Aufgaben- und Problemstellungen im TPR zu sensibilisieren und lieferten den Impuls dazu, das gesamte Laborkonzept zu verändern. Ausgehend von der Erkenntnis des mangelnden gemeinsamen Zielverständnisses und der fehlenden Kommunikation der Lernziele an die Studierenden wurde durch die Hochschuldidaktiker*innen in Workshops zunächst das Constructive Alignment (Biggs, 1996) als das in der Hochschuldidaktik auch im Bereich von Laborpraktika und -übungen etablierte didaktische Analyseverfahren eingeführt und ausgehend davon die Definition gemeinsamer Ziele der Lehrenden für das Laborpraktikum initiiert.

Mit Bezug auf die Inhaltsfelder, in denen das Fach Technik in Kernlehrplänen des Landes Nordrhein-Westfalen strukturiert ist, erfolgte eine thematische Ausrichtung und Auswahl der Versuche. Da diese Inhaltsfelder das gesamte Spektrum des Unterrichtsfachs Technik und damit das Arbeitsfeld der zukünftigen Lehrer*innen darstellen, war es ein Ziel der Lehrenden, mit den Versuchen im TPR diese Inhaltsfelder zu adressieren. Dabei wurde die Anzahl der Versuche deutlich verringert (acht statt zwölf Versuche im TPR 1 und drei statt sechs im TPR 2) und den Lernzielen für jeden einzelnen Versuch eine größere Bedeutung gegeben. Mittels Moderation durch die hochschuldidaktischen Expert*innen wurden danach die methodische Ausgestaltung und die Lernzielkontrolle von den Lehrenden in den Versuchen konsequent auf diese Lernziele ausgerichtet. Dabei entschieden sich die Lehrenden auch dazu, die instruktiven Elemente zu reduzieren, um die Selbstorganisation der Studierenden zu fördern. Skripte und Anleitungen wurden durch initiierende Problemstellungen und explizit formulierte Lernziele ersetzt, um selbstorganisiertes Lernen zu ermöglichen und zu fördern.

Die Studierenden sollen nach dem neuen Konzept in Kleingruppen relevante fachliche Inhalte selbstständig recherchieren und die Versuchsdurchführung individuell planen. Während sie sich bislang ohne räumliche und zeitliche Vorgaben durch die vorgegebenen Skripte und Anleitungen jedoch inhaltlich und methodisch streng instruiert auf die Versuche vorbereitet hatten, wurde dieses Konzept nun umgekehrt: Ort und Zeit der Vorbereitung wurden durch eine tutorielle Begleitung der Vorbereitung bewusst vorgegeben, während die Steuerung des Lernprozesses in den Elementen Inhalt, Methode und Medien den Studierenden nun selbst übertragen

wurde (vgl. Franuszkiewicz et al., 2019a). Das erste Kolloquium wurde durch ein sog. Vorbereitungsgespräch ersetzt, in dem die Studierenden ein individuelles, konstruktives Feedback der Lehrenden zur Vorbereitung und Planung des Versuchs erhalten. Nach der Durchführung des Versuchs entsprechend der eigenen Planung erfolgen dann die eigenständige Auswertung und eine abschließende Präsentation der Ergebnisse. Dabei sollen Studierende und Lehrende gemeinsam beurteilen, inwieweit die kommunizierten Lernziele erreicht wurden und ob damit ein ausreichender Lernerfolg besteht. Abbildung 3 zeigt die neue Struktur der Versuche.

Abbildung 3: Ablauf der Versuche im Technischen Praktikum nach dem Re-Design

Nachdem alle Versuche in diese Struktur umgesetzt wurden, startete das Technische Praktikum im Wintersemester 2017/18 fünf Monate nach Beginn der Situationsanalyse mit dem neuen Konzept.

Phase 3 – Erprobung

Da sich das TPR 1 über zwei Semester erstreckt und das TPR 2 nur in jedem zweiten Semester angeboten wird, umfasste die geplante Erprobungsphase zwei Semester. Dies ermöglichte den Lehrenden trotz geringer Teilnehmendenzahlen eine Eingewöhnung in das neue Konzept und eine umfassende Erprobung der erarbeiteten Optimierung. Bereits in diesem Erprobungszeitraum wurde das didaktische Design von ihnen in Details progressiv angepasst. So wurde u. a. nach Rückmeldungen von Studierenden die Formulierung bzw. Detaillierung der Lernziele in einzelnen Versuchen verändert. Ein Beispiel ist das folgende Lernziel zu einem Versuch aus dem Themenbereich Elektrotechnik. Nach der Neugestaltung des TPR war das Lernziel zunächst wie folgt formuliert:

„Du kannst den Zusammenhang zwischen der Dimensionierung der Bauteile und den Schaltzeiten sowie der Frequenz einer astabilen Kippstufe herstellen."

In der Erprobung meldeten die Studierenden zurück, dass ihnen dieses Lernziel aufgrund seiner Formulierung und inhaltlichen Komplexität nicht ausreichend Orientierung für den Lernprozess biete. In dieser Situation zeigte sich zunächst ein Rückfall der Lehrenden in alte Handlungsmuster: Sie versuchten, Hilfestellung zu geben, indem sie zusätzliche Materialien und ergänzende Informationen zur Verfügung stellten. Die darauf folgende Frage von Studierenden, warum zu diesem Versuch ein Skript wie in der alten Version des Praktikums genutzt werden solle, führte bei den Lehrenden zu einer Reflexion der Situation und einem Rückbezug auf die Bedeu-

tung klar kommunizierter Lernziele. Das genannte Ziel wurde daraufhin heruntergebrochen in vier detailliertere Lernziele:

1. *Du kannst den Aufbau einer astabilen Kippstufe und die Funktion der Gesamtschaltung beschreiben.*
2. *Du kannst erklären, welchen Einfluss die Dimensionierung der Widerstände auf das Verhalten der LEDs hat.*
3. *Du kannst erklären, welchen Einfluss die Dimensionierung der Kondensatoren auf das Verhalten der LEDs hat.*
4. *Du kannst den Zusammenhang zwischen der Dimensionierung der Bauteile und den Schaltzeiten sowie der Frequenz einer astabilen Kippstufe ableiten.*

Die ersten drei dieser Lernziele sind logische Schritte zum Erreichen des vierten Lernziels. Sie wurden jedoch zunächst nicht explizit von den Lehrenden formuliert. Die Studierenden gaben aber an, dass diese vorgelagerten Lernziele sie dabei unterstützten, sich dem vierten Lernziel in kleineren Schritten zu nähern und die fachlichen Inhalte zu strukturieren. Ergänzende Arbeitsmaterialien und Informationen waren dazu nun nicht mehr erforderlich.

Die in der Erprobung gesammelten Erfahrungen wurden am Ende des Sommersemesters 2018 aus Perspektive der beteiligten Lehrenden und Studierenden evaluiert, um eine detaillierte Darstellung der Funktion des neuen Konzeptes im TPR zu erhalten und zu analysieren, inwieweit die Optimierung ihren Zweck erfüllt hatte.

Phase 4 – Analyse durch Evaluation

Ziel der Evaluation war es, die Wirksamkeit des didaktischen und methodischen Re-Designs sowohl aus Perspektive der Lehrenden als auch der Studierenden zu erheben. Dazu wurde ein qualitativer Ansatz gewählt, da so die subjektiven Perspektiven der beteiligten Personen und ihre individuellen Handlungsweisen umfassender berücksichtigt und die Reflexion der hochschuldidaktischen Expert*innen als Forschende, die in die Interpretation einfließen, erfasst, dokumentiert und ausgewertet werden können (Franuszkiewicz et al., 2019a).

Collins et al. (2004) empfehlen, bei der Analyse eines didaktischen und methodischen Re-Designs mindestens drei Gruppen abhängiger Merkmale zu untersuchen und zu beschreiben:

1. *Lernmerkmale,*
   z. B. Lernerfolg bzw. Wissenszuwachs, Fertigkeiten und Lernstrategien;
2. *Klimamerkmale,*
   z. B. Engagement und Motivation der Lernenden, Kooperation und Übernahme von Verantwortung;
3. *systemische Merkmale,*
   z. B. Effizienz, Nachhaltigkeit und Aufwand für die Adaption.

Diese Merkmale wurden in teilstrukturierten Interviews erhoben, in denen die hochschuldidaktischen Expert*innen zehn Studierende befragten, die einen Teil der Versuche des TPR in der alten Form und einen anderen Teil in der neugestalteten Form

absolviert hatten. Da das Laborpraktikum sich über drei Semester erstreckte und die Studierenden individuell wählen konnten, welche Versuche sie in welchem Semester belegten, bestanden personenindividuelle Kombinationen aus Versuchen in der alten und in der neuen Form, über welche die Studierenden befragt werden konnten. Zusätzlich wurden Interviews mit vier Lehrenden geführt, die das Laborpraktikum ebenfalls sowohl vor als auch nach der Neugestaltung betreuten (vgl. Franuszkiewicz et al., 2019a sowie Franuszkiewicz et al., 2019b).

Als ausgewähltes Merkmal für die Gruppe der *Lernmerkmale* wurde in den Interviews der *Lernerfolg* der Studierenden thematisiert, da die Lehrenden diesen in der alten Version explizit als Problem benannt hatten. Die Studierenden betonten in ihren Antworten, dass das (Auswendig-)Lernen der Skripte in der alten Version des Laborpraktikums für sie keinen nachhaltigen Lernerfolg mit sich gebracht habe. Dies habe sich, so gaben acht von zehn von ihnen in der Befragung an, im neuen Konzept verändert: Hier seien die fachlichen Inhalte stets auch mit konkreten Handlungen und einer unmittelbaren Anwendung verbunden, was zu einer – subjektiv erlebten – Steigerung des eigenen Lernerfolgs geführt habe. Von drei der vier Lehrenden wurden die fachlichen Lernergebnisse der Studierenden im Vergleich zur alten Version als gleichwertig oder besser eingeschätzt. Ebenfalls drei der vier Lehrenden bewerteten zudem die Leistungen hinsichtlich der überfachlichen Kompetenzen sowie das methodische Vorgehen der Studierenden besser als in der alten Version.

Die mangelnde *Motivation* der Studierenden war ein wesentlicher Ausgangspunkt für den Optimierungsprozess des TPR. Daher wurde auch dieser Aspekt als eines der *Klimamerkmale* in der Befragung untersucht. Eine Steigerung der Motivation und des Interesses sowie der Kreativität der Studierenden bei der Bearbeitung der Problemstellungen der Versuche bestätigten in den Interviews alle vier befragten Lehrenden. Drei der zehn Studierenden verwiesen u. a. explizit darauf, dass sich die reduzierte Anzahl an Prüfungssituationen durch das Ersetzen des ersten Kolloquiums durch das konstruktive Feedback der Lehrenden positiv auf ihre Motivation ausgewirkt habe.

Stellvertretend für die *systemischen Merkmale* wurde in den Interviews ein Vergleich der *zeitlichen, inhaltlichen und organisatorischen Aufwände* erfragt, da diese von den Studierenden im alten Konzept besonders kritisiert wurden und zugleich für die dauerhafte Umsetzung des neuen Konzeptes durch die Lehrenden wesentlich sind. Die Lehrenden wiesen hier auf den hohen inhaltlichen Aufwand für die Umgestaltung der Versuche hin, stellten ansonsten aber einstimmig fest, dass sich der organisatorische und zeitliche Aufwand für die Durchführung des TPR selbst reduziert oder nicht verändert habe. Die Interviews der Studierenden zeigten, dass sie den zeitlichen Aufwand für das TPR sehr unterschiedlich bewerteten. Vier von ihnen gaben an, der zeitliche Aufwand habe sich durch die Umgestaltung reduziert oder sei unverändert geblieben; sechs hingegen erklärten, durch das neue Konzept sei ein erhöhter Zeitaufwand entstanden. Als Grund dafür nannten sie die festen Präsenzzeiten für die tutoriell begleitete Vorbereitung und die Durchführung der Versuche.

Phase 5 – Revision und Modifikation

Insgesamt zeigte die Evaluation einen Erfolg der Optimierung des didaktischen und methodischen Konzeptes des Laborpraktikums. Als Schlüsselelemente des Designs konnten hierbei die klare Formulierung *und Kommunikation der Lernziele*, die *Umsetzung der Handlungsorientierung* durch die Abbildung der vollständigen Handlung in jedem Versuch sowie die *Stärkung der Selbstorganisation der Studierenden* identifiziert werden.

Insbesondere anhand der Befragung der Studierenden wurden aber auch einige Schwachstellen des neuen Konzeptes erkannt. Beispielsweise wurde von ihnen auf die nicht ausreichende fachliche Vorbereitung und versäumte hochschuldidaktische Qualifizierung der Tutor*innen hingewiesen. Zudem war der Wunsch nach mehr zeitlicher und räumlicher Flexibilität aufseiten der Studierenden groß. Aus diesem Grund sollten in beiden Kursen des Technischen Praktikums weitere Anpassungen erfolgen.

Ausblick auf weiteres Entwicklungs- und Gestaltungspotential

Um dem Wunsch der Studierenden nach größerer räumlicher und zeitlicher Flexibilität entgegenzukommen, wird im TPR 1 aktuell testweise in einem Versuch VISIR (Virtual Instruments Systems In Reality; siehe Beitrag zu VISIR in diesem Band), eine fernzugängliche Online-Experimentiereinrichtung (Alves et al., 2016), eingesetzt. Dieses System ermöglicht es, Experimente von einem beliebigen Ort aus und in einem frei gewählten Zeitfenster durchzuführen.

Im TPR 2 wird außerdem, aufbauend auf die im TPR 1 erworbenen Kompetenzen zur Selbstorganisation, die bislang durch die Lehrenden vorgegebene zeitliche Planung des Versuchsablaufs in allen Versuchen vollständig flexibilisiert. Die Studierenden vereinbaren individuelle Termine mit Lehrenden und Tutor*innen sowie mit den technischen Mitarbeiter*innen, die die praktische Arbeit im Labor begleiten. Dabei bleiben die grundsätzlichen Phasen des Versuchsablaufs, wie in Abbildung 3 dargestellt, weiterhin als Grundstruktur erhalten.

Diese Anpassungen zur weiteren zeitlichen und räumlichen Flexibilisierung des Laborpraktikums befinden sich aktuell in der Einführung bzw. ersten Erprobung. Aufgrund geringer Studierendenzahlen, personellen Veränderungen bei den beteiligten Lehrenden und den besonderen Herausforderungen der Hochschullehre in Zeiten der COVID-19-Pandemie konnte bislang keine Analyse dieser zweiten Intervention erfolgen. Im Sinne des DBR soll sich dies aber zeitnah anschließen. Die Ergebnisse werden dann auch weiter als Ausgangspunkt für einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess im beschriebenen Laborpraktikum genutzt.

5 Resümee

Der Beitrag zeigt, wie mit dem Ansatz des Design-Based Research ein langjährig eingefahrenes Laborkonzept didaktisch und methodisch optimiert wurde. Dabei wurden durch die Kooperation von Lehrenden und Hochschuldidaktiker*innen sowohl die Praktikabilität als Dimension der Praxis als auch die wissenschaftliche Methodik als Dimension der Forschung gleichwertig im Optimierungsprozess berücksichtigt.

Es wird deutlich, dass die enge Zusammenarbeit von Hochschuldidaktiker*innen und Lehrenden in den Fachwissenschaften gewinnbringend für beide Seiten ist. Lehrenden in den Fachwissenschaften und, wie in diesem Beispiel gezeigt, auch in den Fachdidaktiken fehlt häufig die hochschuldidaktische Expertise zur Konzeption kompetenzorientierter Lehr- und Lernsituationen für Studierende. Im Gegenzug fehlt Hochschuldidaktiker*innen oft das praktische Anwendungs- und Bezugsfeld zur Erprobung und Evaluierung ihrer Konzepte und Theorien. Ist es die Absicht der Hochschuldidaktik, theoretische und praktische Ziele in der Hochschulbildung zu verzahnen und Bildungsprobleme zu lösen, erfordert dies eben eine solche Kooperationen in der (Lehr-)Praxis. Hier zeigen sich insbesondere auch Vorteile einer fachbezogenen oder disziplinorientierten Hochschuldidaktik (z. B. Ingenieurdidaktik bzw. Labordidaktik), die in Beratung, Weiterbildung und Forschung eine Kooperation „auf Augenhöhe“ und im Sinne des Scholarship of Teaching and Learning erleichtert und unterstützt.

Aus Perspektive der Lehrenden wurde in diesem Optimierungsprozess zudem deutlich, dass eine kritische Auseinandersetzung mit dem eigenen Lehrkonzept erforderlich ist, um eingeschliffene Handlungsroutinen zu erkennen und zu brechen und Veränderungen umzusetzen. Hierbei können der „Blick von außen“ sowie die Beratung und Moderation des Prozesses durch Hochschuldidaktiker*innen helfen, Hürden zu überwinden. Für die Bereitschaft zur Debatte und Akzeptanz war es in diesem konkreten Optimierungsprozess wesentlich, nicht nur alles von Grund auf zu verändern, sondern auch auf Bestehendem aufzubauen und traditionelle Lösungen weiterzuentwickeln. Die deutlichen Erfolge bestärken den Mut zur Veränderung und regen zu weiteren Schritten in einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess an.

Auch wenn die Ergebnisse der Evaluation einen deutlichen Erfolg des didaktischen und methodischen Re-Designs des Laborkonzeptes zeigen, ist die Übertragung der identifizierten Schlüsselelemente (Formulierung und Kommunikation der Lernziele, Umsetzung der Handlungsorientierung und Stärkung der Selbstorganisation der Studierenden) auf andere Labore nur bedingt möglich bzw. sinnvoll. Selbst wenn sich die Kontexte in der Lehr- und Lernumgebung Labor ähneln, sind sie doch nie völlig gleich. Die Ergebnisse sollten daher nicht an Stelle eines eigenen „didaktischen Denkens“ übertragen werden, können aber ein Impuls für die Auseinandersetzung mit eigenen Handlungsroutinen in der Lehre sein.

Literaturverzeichnis

Alves, G. R.; Fidalgo, A.; Marques, A.; Viegar, C.; Felgueiras, M. C.; Costa, R.; Lima, N.; Castro, M.; Diaz-Orueta, G.; Ruiz, E. S. C.; Garcia-Loro, F.; Garcia-Zubia, J.; Hernandez-Jayo, U.; Kulesza, W.; Gustavsson, I.; Pester, A. & Zutin, D. (2016). *Spreading remote lab usage a system — A community — A Federation* (S. 1–7) 2nd International Conference of the Portuguese Society for Engineering Education: UTAD, Vila Real, Portugal: proceedings. Vila Real, Portugal, 2016.

Battaglia, S. (2010). Quo vadis, hochschuldidaktische (Hochschul)Forschung? *Journal Hochschuldidaktik* 1/2010, 28–32.

Brown, A. (1992). Design Experiments: Theoretical and Methodological Challenges in Creating Complex Interventions in Classroom Settings, *Journal of the Learning Sciences* 2(2), 141–178.

Biggs, J. (1996). Enhancing teaching through constructive alignment. *Higher Education,* 32(3), 347–364.

Bruchmüller, H.-G. & Haug, A. (2001). *Labordidaktik für Hochschulen. Eine Hinführung zum praxisorientierten Projekt-Labor.* Alsbach/Bergstrasse: Leuchtturm-Verlag.

Collins, A.; Joseph, D. & Bielaczyc, K. (2004). Design Research: Theoretical and Methodological Issues, *Journal of the Learning Sciences,* 13(1), 15–42.

Euler, D. (2014). Design-Research – a paradigm under development. In D. Euler & P. Sloane (Hrsg.). *Design-Based Research* (S. 15–44). Stuttgart: Franz Steiner Verlag.

Euler, D. & Sloane, P. F. E. (2014). Design-Based Research. *Zeitschrift für Berufs- und Wirtschaftspädagogik,* Bd. 27. Stuttgart: Franz Steiner.

Franuszkiewicz, J.; Frye, S.; Terkowsky, C. & Heix, S. (2019a). Flexibles und selbstorganisiertes Lernen im Labor – Remote-Labore in der Hochschullehre. *Zeitschrift für Hochschulentwicklung (ZfHE)* 14(3), 273–285.

Franuszkiewicz, J.; Heix, S.; Frye, S.; Haertel, T. & Terkowsky, C. (2019b). From laboratory education to laboratory edu-action: evaluation of a redesigned lab course for prospective technology teachers and resulting demands for cyber-physical 'remotification'. In *Proceedings of the 5th Experiment@ International Conference (exp.at'19), June 11–14 2019,* University of Madeira, Funchal, Madeira Island, Portugal, IEEE Conference Publications.

Gess, C.; Rueß, J. & Deicke, W. (2014). Design-based Research als Ansatz zur Verbesserung der Lehre an Hochschulen – Einführung und Praxisbeispiel. *Qualität in der Wissenschaft* 1/2014, 10–16.

Hacker, W. (1989). Vollständige vs. unvollständige Arbeitstätigkeiten. In S. Greif, H. Holling und N. Nicholson (Hrsg.), *Arbeits- und Organisationspsychologie. Internationales Handbuch in Schlüsselbegriffen* (S. 463–466). Weinheim: Beltz Psychologie-Verlags-Union.

Hein, C. & Schulte, H. (2009). Position zu ländergemeinsamen Inhalten in der Techniklehrerausbildung. In Deutsche Gesellschaft für Technische Bildung e. V. (Hrsg.), *Inhaltsfelder und Themen zeitgemäßen Technikunterrichts,* 87–96. Freiburg: Deutsche Gesellschaft für Technische Bildung.

Jahn, D. (2014). Durch das praktische Gestalten von didaktischen Designs nützliche Erkenntnisse gewinnen: Eine Einführung in die Gestaltungsforschung. *W & E 66*(1), 3–15.

Jahnke, I.; Terkowsky, C.; Burkhardt, C.; Dirksen, U.; Heiner, M.; Wildt, J. & Tekkaya, A. E. (2009). Experimentierendes Lernen entwerfen – E-Learning mit Design-Based Research. In N. Apostolopoulos, H. Hoffmann, V. Mansmann & A. Schwill (Hrsg.), *E-Learning 2009. Lernen im digitalen Zeitalter* (S. 279–290). Münster, New York, München, Berlin: Waxmann.

May, D. (2017). *Globally competent engineers – Internationalisierung der Ingenieurausbildung am Beispiel der Produktionstechnik*. Aachen: Shaker Verlag.

Plomp, T. (2013). Educational Design Research: An Introduction. In T. Plomp & N. Nieveen (Hrsg.), *Educational Design Research, Part A* (S. 10–51). Enschede: SLO.

Reinmann, G. (2005). Innovation ohne Forschung? Ein Plädoyer für den Design-Based Research-Ansatz in der Lehr-Lernforschung. *Unterrichtswissenschaft*, 33(1), 52–69.

Savin-Baden, M. & Tombs, G. (Hrsg.). (2018). *Threshold concepts in problem-based learning*. Leiden, Boston: Brill Sense.

Schlick, C.; Bruder, R. & Luczak, H. (2018). *Arbeitswissenschaft*. Berlin: Springer Vieweg.

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* (acatech Studie). München: Herbert Utz Verlag GmbH.

Volpert, W. (1971). *Sensumotorisches Lernen – Zur Theorie des Trainings in Industrie und Sport*. Frankfurt am Main: Limpert.

Watzlawick, P. (2009). *Anleitung zum Unglücklichsein*. München: Piper Taschenbuch.

Watzlawick, P. (2017). *Menschliche Kommunikation: Formen, Störungen, Paradoxien*. Bern, Hogrefe Verlag.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Ablauf der Versuche im Technischen Praktikum vor dem Re-Design 97

Abb. 2 Zyklusmodell des Design-Based Research 99

Abb. 3 Ablauf der Versuche im Technischen Praktikum nach dem Re-Design 102

Teil II:
Cross-Reality Labore

Pilotierung eines didaktischen Modellkonzepts für laborbasiertes Lernen – (Digi)LabTC für DigiLab4U

Anke Pfeiffer, Dieter Uckelmann

Abstract

In den Ingenieurwissenschaften gewinnt das *Internet der Dinge* (Internet of Things, IoT) zunehmend an Bedeutung. Sowohl das Wissen um die technischen Grundlagen als auch ein Verständnis für die breiteren gesellschaftlichen Auswirkungen des IoT werden für angehende Ingenieur*innen in ihrem zukünftigen Arbeitsfeld entscheidend sein. Gleichzeitig ermöglicht die Digitalisierung in Bildung und Forschung neue Formen der standortübergreifenden Vernetzung von Laborinfrastrukturen und kann damit Studierenden und Forschenden ein breites Spektrum an praktischen Handlungs-, Lern- und Forschungsfeldern bieten. Das BMBF-geförderte Projekt Open Digital Lab for You[1] (DigiLab4U) verfolgt in diesem Sinne das Ziel, Studierenden, Lehrenden und Forschenden standortunabhängig praxisnahe, digitalisierte und vernetzte Laborumgebungen mit dem Themenschwerpunkt IoT und Industrie 4.0 (I4.0) zur Verfügung zu stellen. Dabei soll zukünftig nicht nur der Zugriff auf eine Laborinfrastruktur ermöglicht werden, sondern auch auf entsprechende methodisch-didaktische Lehr- und Lernressourcen. Der nachfolgende Artikel beschreibt, angelehnt an die Phasen eines Design-Based-Research-Ansatzes, die theoretischen Rahmenbedingungen, die konzeptionelle Umsetzung sowie erste Evaluationsergebnisse eines laborbasierten didaktischen Designs für eine vernetzte Laborumgebung.[2] Eine curriculare Integration durch skalierbare Laboreinheiten und -phasen konnte im Sommersemester 2019 in einem ingenieurwissenschaftlichen Studiengang erstmals umgesetzt werden. Coaching- und Präsentationsphasen wurden gezielt als didaktisches Mittel eingesetzt, um die individuellen fachlichen Wissensbestände und handlungspraktischen Erfahrungen der Studierenden zu reflektieren.

Schlüsselwörter: Ingenieurwissenschaften, laborbasiertes Lernen, Internet der Dinge, Industrie 4.0

---

1 Projektkonsortium: Hochschule für Technik Stuttgart (HFT), Bremer Institut für Produktion und Logistik (BIBA), Institut für Wissensmedien der Universität Koblenz-Landau (IWM), RWTH Aachen, Universität Parma.

2 Unser Dank gilt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Unterstützung des Forschungsprojektes Open Digital Lab for You (DigiLab4U, FKZ 16DHB2112).

Einleitung

Die Digitalisierung und speziell der Bereich IoT sowie dessen Umsetzung im industriellen Umfeld (vgl. I4.0) ziehen durch die zunehmende Verlagerung der Wertschöpfung von der physischen in die digitale Welt in vielen Bereichen rapide und massive Veränderungen nach sich (vgl. Heyde et al., 2017, S. 1757 ff.). Kern dieser Umwälzung bildet die Durchdringung der Industrie, ihrer Produkte und ihrer Dienstleistungen mit Software bei gleichzeitiger (meist internetbasierter) Vernetzung der Produkte und Dienste (vgl. Sendler, 2013, S. 1). Dieser Prozess bleibt nicht ohne Konsequenzen für die Gestaltung von Studiengängen in den Ingenieurwissenschaften, denn sie sind gefordert, die aufstrebenden informationstechnologischen Inhalte aus dem Themenspektrum IoT und I4.0 in ihren Curricula zu berücksichtigen (vgl. Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e. V., 2016). Studierende der Ingenieurwissenschaften sollen idealerweise die Möglichkeit haben, die vielfältigen Bereiche der Digitalisierung kennenzulernen, praxisnah zu erfahren und mitzugestalten (vgl. Kortuem et al., 2013, S. 54; vgl. Terkowsky et al., 2013, S. 270). Aufgrund der meist hohen Anschaffungs-, Wartungs- und Betreuungskosten sind die universitären Möglichkeiten jedoch häufig begrenzt (vgl. Heradio et al., 2016, S. 15). Hochschulübergreifende Kooperationen, wie sie aktuell in *Open Digital Lab for You* gezielt aufgebaut werden, bieten sich hier an, um industrienahe, reale und digitale Laborumgebungen zu vernetzen und einem größeren Nutzerkreis zur Verfügung zu stellen. Ziel ist es, Studierenden, Lehrenden und bei Bedarf auch Forschenden eine Laborinfrastruktur anzubieten, die weitestgehend orts- und zeitunabhängig zur Verfügung steht.

Für Hochschulen sollten die Angebote niedrigschwellig im Curriculum integrierbar sein, um im Optimalfall semesterbegleitend im Studienverlauf genutzt werden zu können. Die Integration der Laborinfrastruktur in das Curriculum eines ingenieurwissenschaftlichen Studiengangs erfolgt in diesem Beitrag prototypisch für den Bachelor Informationslogistik der HFT Stuttgart.

Den Ausgangspunkt dieses Forschungs- und Entwicklungsprozesses stellt ein Design-Based Research Ansatz (DBR) dar, der den Rahmen für die Entwicklung eines theoriegeleiteten mediendidaktischen Designs für eine hybride Lernumgebung bildet (vgl. Euler, 2014, S. 14 ff.) Die Lernumgebung beinhaltet eine Kombination aus Präsenz- und Online-Lernphasen sowie die Integration von realen und digitalen Laboren mit praktischen Hands-on-Laborübungen, die über eine Lernplattform (Moodle) begleitet werden. Das Design basiert auf einem zyklischen Iterationsprozess mit Analyse-, Design-, Evaluation- und Re-Designphase. In der Design-Phase geht es derzeit darum, die aus der Analysephase resultierenden Anforderungen der unterschiedlichen beteiligten Akteure (Lernende, Lehrende) und die curricularen Erfordernisse in ein entsprechendes laborbasiertes Lerndesign zu übersetzen.

In diesem Beitrag werden zunächst in Form einer didaktischen Analyse ausgewählte Elemente als Rahmenbedingungen für die Konzeptentwicklung vorgestellt. Daran anknüpfend erfolgt die Vorstellung des (Digi-)LabTC-Konzeptes – ein didakti-

sches Konzept für die curriculare Integration von DigiLab4U – sowie die Darstellung erster Evaluationsergebnisse.

Laborbasiertes Lernen 4.0

Veränderte Anforderungen an Labore im Arbeitsfeld IoT

Laborbasiertes Lernen spielt in der Ingenieurausbildung eine zentrale Rolle, da es die Erreichung wichtiger pädagogischer Ziele durch den direkten Theorie-Praxis-Transfer ermöglicht. Die Studierenden sollen mithilfe laborbasierter Lernumgebungen in die Lage versetzt werden, praxisnahes Equipment technisch und methodisch gezielt handhaben zu können, um auf diesem Wege authentische praxisrelevanten Erfahrungen zu sammeln (vgl. Feisel & Rosa, 2005, S. 121).

Labore sind in den Ingenieurwissenschaften traditionellerweise komplexe Lehr- und Lernumgebungen, die Studierenden das Experimentieren, Beobachten und Üben in einem Studienbereich ermöglichen und damit aktuelle und zukünftige Lernbedarfe ansprechen und decken (vgl. Haug, 1980, S. 13). Gerade im Zuge der Digitalisierung wird das Lernen im Labor auch als eine Möglichkeit betrachtet, den digitalen Wandel in der Ingenieurausbildung aktiv mitzugestalten (vgl. Uckelmann, 2012, S. 3). Für ingenieurwissenschaftliche Studiengänge eröffnen sich dadurch aus mindestens zwei Perspektiven neue Möglichkeiten für laborbasiertes Lernen, die an dieser Stelle kurzgefasst erläutert werden sollen.

Erstens haben die oben bereits erwähnten veränderten technischen Anforderungen Auswirkungen auf Labore und die entsprechende Infrastruktur. Die Arbeitsfelder IoT und I4.0 sind gekennzeichnet durch eine Verknüpfung der realen mit der virtuellen Welt. Diese Verknüpfung muss sich in Lernlaboren widerspiegeln, um den Studierenden exemplarisch die damit zusammenhängenden tiefgreifenden technischen und ökonomischen Herausforderungen für Produktions-, aber auch Geschäftsprozesse nachhaltig erfahrbar werden zu lassen (vgl. Grodotzki & Tekkaya, 2019, S. 127). Daraus lässt sich folgern, dass Lernlabore für IoT und I4.0 geeignete Schnittstellen zwischen Hard- und Software bieten müssen, um entsprechende Lernprozesse zu initiieren. Hierzu zählen unter anderem theoretisches und praktisches Wissen über das Zusammenspiel von Hardware (inklusive Cyber-Physischer Systeme/CPS), Software (inklusive Programmierung) und Telekommunikation inklusive drahtloser Übertragungstechniken. Für den Bereich IoT ergeben sich vielfältige Lernanlässe, in denen z. B. theoretische Lösungen in reale Probleme transferiert werden können, um sie dann auf realen Geräten zu überprüfen. Die so generierten Ergebnisse können digital erfasst und ausgewertet werden, um dann ggf. erneut in einen Produktzyklus einzufließen. Für diese und ähnliche Vorgehensweisen und Problemstellungen bedarf es einer Laborinfrastruktur, die eine Kombination aus realen Hands-on-Umgebungen und digitalen Elementen bereithält.

Zweitens öffnet sich der Bereich des laborgestützten Lernens und Lehrens durch die Digitalisierung auch zunehmend für den Einsatz innovativer didaktischer

Methoden. Orduña et al. beschreiben, dass institutionsübergreifend bereitgestellte Labore oft hinter ihren Möglichkeiten bleiben, wenn passende methodisch-didaktische Konzepte fehlen, die mit ihnen zur Verfügung gestellt werden (vgl. Orduña et al., 2017, S. 860). Um Bedarfe und Potentiale für die sinnvolle Integration von Technologien und didaktischer Methoden für laborgestütztes Lernen im Bereich I4.0 und IoT zu identifizieren, wurde im Rahmen des Projektes DigiLab4U eine Bedarfsanalyse durchgeführt, die ausgewählte Lehr-, Lern- und Bewertungsansätze berücksichtigte, wie etwa Learning Analytics, Open Badges, selbstreguliertes Lernen oder kollaboratives Lernen. Im Rahmen der Bedarfsanalyse wurden unter anderem leitfadengestützte Experteninterviews mit Professor*innen und leitfadengestützte Interviews mit Studierenden ingenieurwissenschaftlicher Studiengänge durchgeführt, die mithilfe einer qualitativen Inhaltsanalyse analysiert wurden (vgl. Burghardt et al., 2020, S. 299). Auch wenn die Ergebnisse der Studie noch vorläufig sind, enthalten die hier gesammelten Anforderungen der Lehrenden und Lernenden wichtige Hinweise darauf, welche Aspekte für die sinnvolle Gestaltung einer laborbasierten Lernumgebung hilfreich sein können. Ein kleiner Auszug soll dies hier verdeutlichen:

- Learning Analytics bezeichnet das Sammeln digitaler Daten, die in Lehr- und Lernkontexten anfallen, mit dem Ziel, Lernprozesse und Lernumgebungen zu optimieren (vgl. Ifenthaler & Schumacher, 2016, S. 176). Interviews haben gezeigt, dass dem Thema Learning Analytics im Laborkontext sowohl mit großem Interesse als auch mit Skepsis begegnet wird.
- Open Badges sind digitale Auszeichnungen, die vielfältige Zwecke erfüllen, wie z. B. die Visualisierung erfolgreicher Lernprozesse, die Anerkennung von Lernergebnissen oder die Kommunikation von Leistungen (vgl. Konert et al., 2018, S. 29) . Bislang existiert bei den Interviewpartnern wenig bis keine Erfahrung mit Open Badges, aber eine große Bereitschaft, diese einzusetzen.
- Selbstreguliertes Lernen ist ein aktiver, konstruktiver Prozess, bei dem Lerner*innen sich eigene Lernziele setzen und die Zielerreichung selbst initiieren, organisieren und überwachen (vgl. Otto et al., 2011, S. 34). Aufgrund der heterogenen Lernvoraussetzungen hinsichtlich des selbstgesteuerten Lernens sollten Laborlernprozesse mit Orientierungsmaßnahmen (Scaffolding) unterstützt werden.
- Kollaboratives Lernen wird von den Interviewpartner*innen dann als Verbesserung des Lernprozesses wahrgenommen, wenn geeignete Hilfsmittel zusammen mit einer angemessenen Gruppenzusammensetzung gewährt werden. Im Kontext DigiLab4U heißt kollaboratives Lernen, dass jene Lernende, die mehr oder weniger auf dem gleichen Niveau sind, die gleichen Handlungen ausführen und ein gemeinsames Ziel haben, zusammenarbeiten (vgl. Dillenbourg, 1999, S. 7).

Des Weiteren wurde die persönliche Kommunikation, der Austausch und das Feedback von Studierenden und Professor*innen als zentrale Elemente in laborbasierten Umgebungen betont, speziell mit Blick auf die Motivation.

Laborinfrastruktur im Wandel

Neben den realen, physischen Hands-on-Laboren in entsprechenden Räumlichkeiten haben sich für den Einsatz zu Lehr- und Lernzwecken in den letzten fünfzehn Jahren zunehmend auch remote bedienbare und virtuelle Labore etabliert sowie Augmented Reality und Simulationen allgemein (vgl. Feisel & Rosa, 2005; Orduna et al., 2015; Orduna et al., 2016; Tekkaya et al., 2016). Die letztgenannten Labortypen können gegenüber realen Laboren eine Reihe von Vorteilen für Bildungszwecke bieten, beispielsweise einen barrierefreien Zugriff, die Unterstützung hochschulübergreifender Unterrichtsformen oder die Erhöhung der Sicherheit bei gefährlichen Experimenten (vgl. Heradio et al., 2016, S. 15).

Eine weitere Variante stellen sogenannte Mixed Reality Labore dar (Grodotzki et al., 2018). Mit Mixed Reality wird die Verschmelzung von realen und virtuellen Welten entlang eines „Virtualitätskontinuums" bezeichnet, das reale mit virtuellen Umgebungen verbindet (vgl. Milgram et al., 1994, S. 1).

Abbildung 1: Virtuality Continuum nach Milgram & Kishino (Milgram et al., 1994, S. 3)

Bereits in den neunziger Jahren wurde der virtuellen Realität viel Aufmerksamkeit geschenkt, denn vor allem im industriellen Bereich gab es schon früh entsprechende Demonstrationen und Ansätze, die aber noch wenig praxisgerecht waren (vgl. Brooks, 1999). Heutzutage sind Virtual-Reality-Anwendungen in vielen Industriezweigen zu finden und werden im Arbeitsalltag bereits erfolgreich eingesetzt (vgl. Berg & Vance, 2017). Das Interesse am Einsatz dieser neuen Technologie in der Ingenieurausbildung ist nicht überraschend, denn es kann kreatives Lernen fördern und die Studierenden auf geschäftsrelevante Themen und Prozesse vorbereiten (vgl. Abulrub et al., 2011). Im Bereich Augmented Reality ist ein ähnlicher Trend zu beobachten, und auch hier sind in ingenieurwissenschaftlichen Kontexten bereits vielfältige Anwendungsfelder zu finden (vgl. Huang et al., 2017; van Krevelen & Poelman, 2019; Weshah et al., 2020).

Mit Blick auf die technischen Gegebenheiten, die mit IoT und I4.0 Arbeitskontexten einhergehen, scheint ein Mixed-Reality-Ansatz für die Gestaltung einer laborbasierten Lehr- und Lernumgebung sinnvoll, da die Kombination aus unterschiedlichen Hard- und Softwarekomponenten flexible Lernszenarien zulässt und Anschlussfähigkeit an aktuelle technische Entwicklungen sicherstellt.

*IoT-Kompetenzen für angehende Ingenieur*innen*

Angesichts des Wandels beruflicher Tätigkeitsfelder im Zuge der Digitalisierung erleben wir derzeit eine Diskussion darüber, welche Kompetenzen im Hinblick auf Innovationen im IoT-Bereich erforderlich sind (vgl. acatech, 2016; Haertel et al., 2019). Ein Blick auf Studien zur Ermittlung von IoT-Kompetenzen zeigt ein recht uneinheitliches Bild. Eine von Terkowsky et al. durchgeführte qualitative Analyse von fünf Studien zu ausgewählten Kompetenzprofilen für I4.0 bestätigt diese Einschätzung (vgl. Terkowsky et al., 2019). Ihre Ergebnisse zeigen nur wenig bis keine Übereinstimmung darüber, welche Kompetenzen in Zukunft für den Bereich I4.0 benötigt werden.

In den Studien wird ebenfalls deutlich, dass kein einheitliches Kompetenzverständnis zugrunde liegt. Während etwa im Industriekontext einerseits von Engineering-Kompetenzen gesprochen wird, die entsprechende Bestandteile beinhalten (System-Engineering, Service Engineering, smarte Produkte, Agile Methoden, Embedded Systems, Prozess-, Organisations- und IT-Werkzeug-Kompetenzen), finden sich in den Empfehlungen für die Ingenieurausbildung des Verbandes Deutscher Ingenieure (VDI), des Stifterverbandes oder der acatech eher eine Reihe überfachlicher Kompetenzen wie Kooperationskompetenz, Interdisziplinarität, Problemlösefähigkeit, Data Literacy, Digitalkompetenz bzw. Digitalisierungskompetenz (vgl. Abramovici & Herzog, 2016; acatech, 2016; vgl. Gottburgsen et al., 2019; Salomon et al., 2016; Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e. V., 2016). Die genannten Kompetenzen werden meist nicht näher definiert und lassen sich eher aus dem Kontext erschließen. Dabei muss festgehalten werden, dass die Studien in der Regel nicht den Anspruch verfolgen, Kompetenzprofile zu liefern, sondern vielmehr Anregungen für deren Weiterentwicklung (vgl. Gottburgsen et al., 2019, S. 31). Grundsätzlich empfiehlt der VDI, die Curricula entwicklungsoffen zu gestalten und betont darüber hinaus mehrfach die Wichtigkeit des lebenslangen Lernens (Gottburgsen et al., 2019; Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e. V., 2016).

Vor diesem Hintergrund wurde als Ausgangspunkt für die Kompetenzorientierung in DigiLab4U der Deutsche Qualifikationsrahmen für lebenslanges Lernen (DQR) und sein Pendant für Hochschulen, der Hochschulqualifikationsrahmen (HQR), gewählt. Während der DQR den Akteur*innen im Bildungskontext ein Instrument mit an die Hand gibt, um Kompetenzen, erworbene Fähigkeiten und Fertigkeiten besser einordnen zu können, umfasst der HQR explizit den hochschulischen Bildungsbereich, ist aber in jeder Hinsicht kompatibel mit den Vorgaben des DQR (Tab. 1) (vgl. Bund-Länder-Koordinierungsstelle für den Deutschen Qualifikationsrahmen für lebenslanges Lernen, 2013, S. 9; vgl. Kultusministerkonferenz, 2017, S. 2).

In einem nächsten Schritt wurde pragmatisch der Frage nachgegangen, welche Learning Outcomes für das laborbasierte Lernen zugrunde gelegt werden können. Folgt man hier den Vorgaben des *Accreditation Board for Engineering and Technology* (ABET), findet man 13 formulierte Zielvorgaben für laborbasiertes Lernen in der In-

genieurausbildung, die sich wie folgt im Kompetenzmodell zuordnen lassen (Feisel & Rosa, 2005, S. 127):

Tabelle 1: Zuordnung der ABET-Ziele zu den Kompetenzmodellen DQR und HQR

DQR	**Fachkompetenz**		**Personale Kompetenz**	
	Wissen	**Fertigkeiten**	**Sozialkompetenz**	**Selbstständigkeit**
HQR	**Wissen und Verstehen**	**Einsatz, Anwendung und Erzeugung von Wissen**	**Kommunikation und Kooperation**	**Wissenschaftliches Selbstverständnis/ Professionalität**
ABET Ziele für laborbasiertes Lernen	(1) Einsatz laborbasierter Instrumente (4) Datenanalyse (9) Arbeitssicherheit einhalten können (13) Sensorische Wahrnehmung	(2) Modelle identifizieren (3) Experimente durchführen (5) Produkte designen (7) Kreativität und eigenständiges Denken (8) Konstruktionswerkzeuge auswählen, modifizieren, in Betrieb nehmen können	(10) Kommunikation (11) Arbeiten im Team	(6) Lernen aus Fehlern (12) Ethische Aspekte berücksichtigen
	⬆	⬆	⬆	⬆
	Passung mit IoT-Kompetenzen aus der Ingenieurpraxis			

Im Rückgriff auf die oben im weitesten Sinne genannte IoT-Kompetenzen der diversen Studien kann an dieser Stelle eine Passung versucht werden, um das Kompetenzprofil für laborbasiertes Lernen mit Schwerpunkt IoT zu schärfen. So lässt sich etwa der geforderte Bereich Interdisziplinarität der Sozialkompetenz/Kommunikation und Kooperation zuordnen oder das eigeninitiativ selbstgesteuerte Lernen dem Bereich Selbstständigkeit/Wissenschaftliches Selbstverständnis/Professionalität. In einem nächsten Schritt lassen sich dann, orientiert an den angestrebten Zielen in der spezifischen Laborumgebung, überprüfbare Lernziele operationalisieren. Dieser Bereich befindet sich aktuell noch in Arbeit und wird aus diesem Grund hier nicht weiter ausgeführt.

Zwischenfazit

Mit den digitalen Veränderungen und Neuerungen ergeben sich für die Ingenieurausbildung und hier speziell für den Bereich des laborbasierten Lernens neue Kompetenzanforderungen und damit einhergehend neue Erfordernisse an die Inhalte und nicht zuletzt auch an die Gestaltung der Laborumgebung.

Der nachfolgende Abschnitt beschreibt die (Weiter-)Entwicklung eines mediendidaktischen Designs mit dem Ziel, ein Basiskonzept für die curriculare Einbindung der DigiLab4U-Inhalte sowie erste Erfahrungen aus dem Praxiseinsatz vorzustellen.

(Digi)LabTC – Pilotierung eines labordidaktischen Designs

Konzeptionelles Design

Das mediendidaktische Design für die Durchführung laborbasierter Lehr- und Lernphasen orientiert sich an der Methode des Team Labor Coachings (LabTC) nach Jödicke und Sum (vgl. Jödicke & Sum, 2007). LabTC wird seit einigen Jahren in typischen Laborfächern wie Physik oder Messtechnik erfolgreich genutzt, um gleichermaßen fachliche und überfachliche Kompetenzen wie Teamfähigkeit, Kommunikationsfähigkeit oder Zeitmanagement anzusprechen. Es basiert auf dem Ansatz des klassischen Lernteamcoachings, das als Methode ursprünglich speziell für die Ingenieurwissenschaften entwickelt wurde (vgl. Fleischmann et al., 2007). Im Rahmen von Studienreformprojekten wurde es mehrfach positiv evaluiert – vor allem im Hinblick auf die zeitgleiche Vermittlung von Fachinhalten und fachübergreifender Kompetenzen (ebd.).

Innerhalb von DigiLab4U wurde an der Hochschule für Technik Stuttgart im Sommersemester 2019 erstmals ein erweiterter LabTC-Ansatz zur Unterstützung und curricularen Einbindung laborbasierter Lernsettings in eine Lehrveranstaltung im Bachelorstudiengang Informationslogistik pilotiert. Das bisherige methodische LabTC-Konzept umfasst drei Phasen, die sich wie folgt beschreiben lassen:

Erstens eine *Erarbeitungsphase*, in der die Studierenden in Einzelarbeit bereitgestellte Lernressourcen auf der Lernplattform eigenständig erarbeiten, um sich auf den anschließenden Laborversuch vorzubereiten. Hierzu zählen u. a. interaktive Skripte, Videos, Tests und Feedbackfragen zu Grundlagen eines Arduino-UNO-Systems und zu den technischen Basics der Funktionsweise von RFID-Systemen.

Zweitens eine *Vertiefungsphase*, in der die Studierenden in Zweierteams eine laborpraktische Übung absolvieren. Diese Laborphase erfolgt selbstorganisiert und unter möglichst realen Bedingungen. Die Teams erhalten Zugang zum Labor bzw. zum benötigten technischen Equipment und eine zeitliche Vorgabe, in der die Übung abgeschlossen sein sollte. Ein Assistent betreut die laborpraktische Übung. Er sollte keinerlei Erklärungen übernehmen, sondern kümmert sich bei Bedarf um die Arbeitssicherheit und unterstützt Ablauf und Organisation. Drei Zweierteams bilden anschließend ein Lernteam. In ihm werden gemeinsam erste Ergebnisse vorgestellt und Fragen aus der Erarbeitungsphase und dem Laborversuch diskutiert. Die Ergebnisse und offenen Fragen aus dem Peer-Review werden dokumentiert und in einer anschließenden Coaching-Sitzung mit dem Professor und dem Übungsleiter besprochen.

In der dritten Phase erfolgt die *Auswertung*. Der Lernerfolg zeigt sich zum einen direkt in den praktischen laborbasierten Tätigkeiten, zum anderen – und hier weicht das (Digi)LabTC-Konzept von seiner methodischen Vorlage ab – wird er durch die semesterbegleitende Dokumentation der Ergebnisse auf der Lernplattform sichtbar. Je nach Aufgabenstellung kann es sich um Protokolle der Sitzung, normgerechte Laborberichte, (Video-)Dokumentationen von Laborprojekten oder Screenshots der Nutzung von spezieller IoT-Software handeln. Die Integration der digitalen Lern-

plattform bildet nicht nur als Begleitinstrument, sondern auch im Rahmen der Auswertung eine unterstützende und strukturierende Ressource.

Die Digitale Erweiterung greift konsequenterweise zwei Aspekte auf, die für DigiLab4U von Bedeutung sind: Zum einen unterstützt die Lernplattform die Integration von Themen aus dem Spektrum IoT und I4.0, da spezielle Anwendungen und Software-Zugänge bereitgestellt werden können; zum anderen bietet sie zusätzliche Möglichkeiten der Lehr- und Lernprozessunterstützung etwa durch die Erhebung von Learning-Analytics-Daten (LA).

Die folgende Abb. 2 illustriert die Phasen der Methode LabTC in Anlehnung an Jödicke und Sum und erweitert sie im schraffierten Bereich um digitale Elemente, die für den Einsatz im Kontext des Projektes DigiLab4U geboten sind. Zu diesen zählen unterschiedliche digitale Ressourcen, die über die Lernplattform Moodle bereitgestellt werden, etwa digitale Skripte und Handreichungen, Videos, Test, Online-Feedback und LA-Werkzeuge.

Wie die Abbildung verdeutlicht, wurde die Methode LabTC für die Anforderungen innerhalb der vernetzten Laborumgebung des BMBF-Projektes DigiLab4U um den Bereich „Digitale Erweiterungen“ ergänzt. Dazu zählt die Bereitstellung digitaler Lernressourcen zur Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung der Laborversuche auf der Lernplattform Moodle. Darüber hinaus ermöglicht gerade der Einsatz von Moodle das Erheben von Learning-Analytics-Daten, die den Studierenden und Lehrenden im Semesterlauf regelmäßig Feedback zum individuellen Lernstand, zu den Aktivitäten und zur Nutzung der bereitgestellten Lernressourcen auf der Lernplattform geben (vgl. Leitner & Ebner, 2017).

Abbildung 2: LabTC Methode mit digitaler Erweiterung angelehnt an Jödicke und Sum (2007)

Erste Evaluationsergebnisse

Das Konzept (Digi)LabTC wurde erstmals im Sommersemester 2019 in der Lehrveranstaltung „Aktoren“ im 2. Semester des Bachelorstudiengangs Informationslogistik eingesetzt. An der Lehrveranstaltung nahmen 5 weibliche und 21 männliche Studierende teil. Aufgrund der kleinen Gruppengröße wurde sie mit der qualitativen Methoden Teaching Analysis Poll (TAP) evaluiert (vgl. Hawelka, 2017). Diese bietet sich vor allem dann an, wenn studentische Rückmeldungen zur Fortentwicklung von Lehrveranstaltungen genutzt werden sollen. Für die TAP-Evaluation führten zwei externe Moderatorinnen eine Evaluationsbefragung durch, in der die Studierenden drei Fragen beantworten sollten: Was unterstützte meinen Lernprozess? Welche Aspekte waren hinderlich für meinen Lernprozess? Was würde ich mir als Verbesserung wünschen?

Als sehr hilfreich für den Lernprozess wurde das Feedback und die Coachingsitzungen mit dem Professor gewertet und darüber hinaus die unkomplizierte Kontaktaufnahme und Unterstützung durch den technischen Mitarbeiter, der die Laborübungen mit betreute. Darüber hinaus wurden die praxisnahen Übungen als hilfreich für die Weiterentwicklung des eigenen Lernprozesses empfunden, und hier wurde vor allem das eigenständige Arbeiten und die Verwirklichung eigener Ideen in den Praxisprojekten betont. Die digitale Begleitung durch Moodle wurde überwiegend positiv gewertet; allerdings wurde die teilweise unübersichtliche Kursstruktur kritisiert. Deutliche Verbesserungswünsche wurden bei den Tests zur Wissensüberprüfung geäußert, die u. a. zur Vorbereitung der praktischen Labortätigkeiten eingesetzt wurden. Hier wünschten sich die Studierenden „mehr Denkaufgaben“ statt Memorieraufgaben. Kritisch wurde auch gesehen, wenn das Laborequipment nicht in ausreichender Zahl vorhanden war und sich beispielsweise drei Studierende ein Laborset teilen mussten (beispielsweise beim Einsatz eines Steuerungssystems). Die zeitliche Organisation wurde ebenfalls kritisiert, da die Projektaufgabe gegen Ende sehr zeitintensiv war und zu dicht vor den Prüfungen organisiert werden musste. Aufgrund der externen Moderation und der damit verbundenen direkten Rückfragemöglichkeiten konnten Unklarheiten bei der Interpretation der Antworten unmittelbar geklärt werden. Insgesamt kann die TAP-Evaluation für das Re-Design der Lehrveranstaltung als sehr hilfreich gewertet werden. Ein zweiter Durchlauf wird im Sommersemester 2020 stattfinden.

Fazit und Ausblick

Die Evaluationsergebnisse fließen gemäß des DBR-Ansatzes in die Weiterentwicklung des didaktischen Designs ein. Dabei wird der Einsatz der digitalen Elemente gesondert betrachtet, um Erkenntnisse und Gestaltungsprinzipien für hochschulübergreifende und interdisziplinäre Lern- und Forschungslaborsetting in einer hybriden Lernumgebung zu generieren. Mithilfe der TAP-Evaluation konnte ein persönlicher Lernzuwachs durch die Projektarbeit dokumentiert werden. Eine konkrete

Analyse der erreichten Lernziele auf unterschiedlichen Zielebenen wird in der nächsten Iteration erfolgen. Durch die Coaching- und Präsentationsphasen lassen sich individuelle Entwicklungsverläufe begleiten. Dieser Prozess soll zukünftig mit Learning Analytics unterstützt werden. Erste Auswertungen der im Seminar erhobenen digitalen Lernprozessdaten lassen einen Zusammenhang zwischen der Häufigkeit und der Regelmäßigkeit des Zugriffs auf die bereitgestellten Lernressourcen und den Seminarergebnissen vermuten. Die Datenbasis ist zum jetzigen Zeitpunkt allerdings nicht ausreichend, um über Einzelfälle hinauszuweisen.

Abbildung 3: Geplante Basisstruktur für Lern-, Lehr- und Forschungsprozesse in DigiLab4U

Abb. 3 zeigt die Bausteine und Lernelemente der an LabTC orientierten Laborphasen im Überblick. Es ist geplant, diese künftig auch als Basisstruktur für die Implementierung weiterer laborbasierter Experimente und Übungen für Studium und Lehre einzusetzen. Ein zentrales Forschungsanliegen beschäftigt sich mit der Frage, inwieweit Learning Analytics als Feedback- und Reflexionsinstrument für Lehr-, Lern- und perspektivisch auch Forschungsprozesse integriert werden kann und wie sich zukünftig erbrachte Leistungen im Labor mithilfe digitaler Zertifikate wie Open Badges zertifizieren lassen.

Literaturverzeichnis

Abramovici, M. & Herzog, O. (Hrsg.). (2016). *Engineering im Umfeld von Industrie 4.0. Einschätzungen und Handlungsbedarf* (acatech Studie). München: Herbert Utz Verlag GmbH; acatech.

Abulrub, A.-H. G.; Attridge, A. & Williams, M. A. (2011). Virtual Reality in Engineering Education: The Future of Creative Learning. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET)* 6 (4). doi:10.3991/ijet.v6i4.1766, 4–11.

acatech (acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften in Kooperation mit Fraunhofer IML und equeo, Hrsg.). (2016). *Kompetenzentwicklungsstudie 4.0. Erste Ergebnisse und Schlussfolgerungen*. München: equeo GmbH.

Berg, L. P. & Vance, J. M. (2017). Industry use of virtual reality in product design and manufacturing: a survey. *Virtual Reality 21* (1), 1–17. doi:10.1007/s10055-016-0293-9.

Brooks, F. P. (1999). What's real about virtual reality? *IEEE Computer Graphics and Applications 19* (6), 16–27. doi:10.1109/38.799723.

Bund-Länder-Koordinierungsstelle für den Deutschen Qualifikationsrahmen für lebenslanges Lernen, (Hrsg.). (2013). Handbuch zum Deutschen Qualifikationsrahmen. Struktur – Zuordnungen – Verfahren – Zuständigkeiten. Verfügbar unter https://www.dqr.de/media/content/DQR_Handbuch_01_08_2013.pdf [17.10.2019].

Burghardt, M.; Ferdinand, P.; Pfeiffer, A.; Reverberi, D. & Romagnoli, G. (2020). Integration Of New Technologies And Alternative Methods In Laboratory-Based Scenarios. *REV 2020 International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation,* (S. 297–317).

Dillenbourg, P. (1999). What do you mean by "collaborative learning"? In P. Dillenbourg (Hrsg.), *Collaborative-learning: Cognitive and computational approaches*. Oxford: Elsevier, 1–19.

Euler, D. (2014). Design-Research – a paradigm under development. In D. Euler & P. F. E. Sloane (Hrsg.), *Design-based research* (Zeitschrift für Berufs- und Wirtschaftspädagogik Beiheft, Bd. 27, S. 15–41). Stuttgart: Franz Steiner Verlag.

Feisel, L. D. & Rosa, A. J. (2005). The Role of the Laboratory in Undergraduate Engineering Education. *Journal of engineering Education 94,* 121–130.

Fleischmann, P.; Geupel, H. & Lorbeer, B. (2007). Lernteamcoaching. Methode, Nutzung, Wirtschaftlichkeit und Erfahrung. In B. Berendt, B. Szczyrba, A. Fleischmann, N. Schaper & J. Wildt (Hrsg.), *Neues Handbuch Hochschullehre* (C 2.5, S. 1–18). Berlin: Raabe Fachverlag für Wissenschaftsinformation. Verfügbar unter http://docplayer.org/14402706-Lernteamcoaching-patrick-fleischmann-helmut-geupel-zusammenfassung.html [07.01.2020].

Gottburgsen, A.; Wannemacher, K.; Wernz, J. & Willige, J. (Verein Deutscher Ingenieure e. V.) (Hrsg.). (2019). Ingenieurausbildung für die digitale Transformation. Zukunft durch Veränderung. VDI-Studie April 2019. Verfügbar unter https://www.ft-informatik.de/pdf/FTIV-1901-A-02m-VDI-Studie-Ingenieurausbildung-Digitale-Transformation.pdf [07.01.2020].

Grodotzki, J.; Ortelt, T. R. & Tekkaya, A. E. (2018). Remote and Virtual Labs for Engineering Education 4.0. *Procedia Manufacturing 26,* 1349–1360. doi:10.1016/j.promfg.2018.07.126

Grodotzki, J. & Tekkaya, A. E. (2019). Eine Lehre für die Zukunft? Wie Technologie von heute das Lernen von morgen verändert. In T. Haertel, C. Terkowsky, S. Dany & S. Heix (Hrsg.), *Hochschullehre & Industrie 4.0. Herausforderungen – Lösungen – Perspektiven* (S. 127–136). Bielefeld: W. Bertelsmann Verlag.

Haertel, T.; Terkowsky, C.; Dany, S. & Heix, S. (Hrsg.). (2019). *Hochschullehre & Industrie 4.0. Herausforderungen – Lösungen – Perspektiven*. Bielefeld: W. Bertelsmann Verlag.

Haug, A. (1980). *Labordidaktik in der Ingenieurausbildung.* Berlin: VDE Verlag GmbH.

Hawelka, B. (Universität Regensburg, Hrsg.). (2017). *Handreichung zur Kodierung qualitativer Evaluationsdaten aus Teaching Analysis Poll,* Zentrum für Hochschul- und Wissenschaftsdidaktik. Schriftenreihe: 5. Verfügbar unter https://epub.uni-regensburg.de/35379/1/Kodierleitfaden_maerz17.pdf [12.12.2020].

Heradio, R.; La Torre, L. de; Galan, D.; Cabrerizo, F. J.; Herrera-Viedma, E. & Dormido, S. (2016). Virtual and remote labs in education: A bibliometric analysis. *Computers & Education 98,* 14–38. doi:10.1016/j.compedu.2016.03.010

Heyde, M. v. d.; Auth, G.; Hartmann, A. & Erfurth, C. (2017). Hochschulentwicklung im Kontext der Digitalisierung – Bestandsaufnahme, Perspektiven, Thesen. In M. Eibl & M. Gaedke (Hrsg.), *Informatik 2017. Lecture Notes in Informatics (LNI)*. Bonn: Köllen Druck + Verlag GmbH, 1757–1772.

Huang, J. M.; Ong, S. K. & Nee, A. Y. C. (2017). Visualization and interaction of finite element analysis in augmented reality. *Computer-Aided Design 84,* 1–14. doi:10.1016/j.cad.2016.10.004.

Ifenthaler, D. & Schumacher, C. (2016). Learning Analytics im Hochschulkontext. *WiSt – Wirtschaftswissenschaftliches Studium 45* (4), 176–181. doi:10.15358/0340-1650-2016--4-176.

Jödicke, B. & Sum, J. (Geschäftsstelle für Hochschuldidaktik an Fachhochschulen in Baden-Württemberg, GHD) (Hrsg.). (2007). Team Labor Coaching (LabTC). 7. Tag der Lehre. Verfügbar unter http://www.hochschuldidaktik.net/documents_public/7._TdL_2007_-_Methoden_47.pdf [16.06.2019].

Konert, J.; Buchem, I.; Lewis, L.; Hamilton, G. & Riches, T. (2018). Competency Alignment of Open Badges. In C. M. Stracke, M. Shanks & O. Tveiten (Hrsg.), *Smart Universities. Education's Digital Future: official proceedings of the International WLS and LINQ Conference 2017* (S. 29–36). Berlin: Logos Berlin.

Kortuem, G.; Bandara, A. K.; Smith, N.; Richards, M. & Petre, M. (2013). Educating the Internet-of-Things Generation. *Computer 46* (2), 53–61. doi:10.1109/MC.2012.390.

Kultusministerkonferenz (2017). *Qualifikationsrahmen für deutsche Hochschulabschlüsse.* Verfügbar unter https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2017/2017_02_16-Qualifikationsrahmen.pdf [12.02.2020].

Leitner, P. & Ebner, M. (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.

Milgram, P. Kishino & Fumio (IEICE Transactions on Information Systems, Hrsg.). (1994). A Taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Transactions on Information and Systems* Vol E77-D: 12, 1–15.

Orduna, P.; Rodriguez-Gil, L.; Garcia-Zubia, J.; Dziabenko, O.; Angulo, I.; Hernandez, U. & Azcuenaga, E. (2016). Classifying online laboratories: Reality, simulation, user perception and potential overlaps. In *Proceedings of 2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV). Date and venue: 24–26 February 2016 in Madrid, Spain* (S. 224–230). [Piscataway, New Jersey]: IEEE.

Orduna, P.; Zutin, D. G.; Govaerts, S.; Zorrozua, I. L.; Bailey, P. H.; Sancristobal, E.; Salzmann, C., Rodriguez-Gil, L.; DeLong, K.; Gillet, D.; Castro, M.; Lopez-de-Ipina, D. & Garcia-Zubia, J. (2015). An Extensible Architecture for the Integration of Remote and Virtual Laboratories in Public Learning Tools. *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologias del Aprendizaje 10* (4), 223–233. doi:10.1109/RITA.2015.2486338.

Orduña, P.; Rodriguez-Gil, L.; Garcia-Zubia, J.; Angulo, I.; Hernandez, U. & Azcuenaga, E. (2017). Increasing the Value of Remote Laboratory Federations Through an Open Sharing Platform: LabsLand. In M. E. Auer & D. G. Zutin (Hrsg.), *ONLINE ENGINEERING & INTERNET OF THINGS,* New York: Springer International, Bd. 22, S. 859–873.

Otto, B.; Perels, F. & Schmitz, B. (2011). Selbstreguliertes Lernen. In H. Reinders, H. Ditton, C. Gräsel & B. Gniewosz (Hrsg.), *Empirische Bildungsforschung* (S. 33–44). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Salomon, C.; Glohr, C.; Mainusch, A.; Mense, C.; Sentürk, C. & Stylianou, L. (Detecon International GmbH, Hrsg.). (2016). *Digitalisierung und Internet of Things – Anforderungen an agile Organisationen* Köln: Detecon International GmbH und bitkom.

Sendler, U. (2013). Industrie 4.0 – Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM (Systems Lifecycle Management). In U. Sendler (Hrsg.), *Industrie 4.0* (S. 1–21). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e. V. (2016). *Hochschulbildung für die Arbeitswelt 4.0. Jahresbericht 2016* (Hochschul-Bildungs-Report 2020). Essen: Edition Stifterverband.

Tekkaya, A. E.; Wilkesmann, U.; Terkowsky, C.; Pleul, C.; Radtke, M. & Maevus, F. (Hrsg.). (2016). *Das Labor in der ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung. Zukunftsorientierte Ansätze aus dem Projekt IngLab : acatech Studie* (acatech Studie). München: Herbert Utz Verlag GmbH.

Terkowsky, C.; Jahnke, I.; Pleul, C.; May, D.; Jungmann, T. & Tekkaya, E. A. (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* (Computer-supported collaborative learning series, S. 269–292). New York: Springer.

Terkowsky, C.; May, D. & Frye, S. (2019). Labordidaktik: Kompetenzen für die Arbeitswelt 4.0. In T. Haertel, C. Terkowsky, S. Dany & S. Heix (Hrsg.), *Hochschullehre & Industrie 4.0. Herausforderungen – Lösungen – Perspektiven* (S. 89–104). Bielefeld: wbv.

Uckelmann, D. (2012). The Role of Logistics Labs in Research and Higher Education. In D. Uckelmann, B. Scholz-Reiter, I. Rügge, B. Hong & A. Rizzi (Hrsg.), *The impact of virtual, remote and real logistics labs. First international conference, ImViReLL 2012, Bremen, Germany, Februar 28 - March 1, 2012 : proceedings* (Communications in computer and information science, Bd. 282, S. 1–12). Berlin: Springer.

van Krevelen, D. W. F. & Poelman, R. (2019). A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations. *International Journal of Virtual Reality 9* (2), 1–20. doi:10.20870/IJVR.2010.9.2.2767.

Weshah, A. A.; Alamad, R. & May, D. (2020). Work-in-Progress: Using Augmented Reality Mobile App to Improve Student's Skills in Using Breadboard in an Introduction to Electrical Engineering Course. *REV 2020 International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation* (S. 583–589).

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Virtuality Continuum nach Milgram & Kishino 115

Abb. 2 LabTC Methode mit digitaler Erweiterung angelehnt an Jödicke und Sum (2007) 120

Abb. 3 Geplante Basisstruktur für Lern-, Lehr- und Forschungsprozesse in DigiLab4U 122

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Zuordnung der ABET-Ziele zu den Kompetenzmodellen DQR und HQR 117

Lernort Digitale Umformtechnik – kontinuierliche agile Entwicklung einer Lehr-Lern-Umgebung

Enno Stöver, Benjamin Remmers, Katrin Schillinger

Abstract

Hochschullabore der Zukunft benötigen eine höhere Anpassungsfähigkeit an die aktuellen Trends in der Wirtschaft als in der Vergangenheit. Zudem ist, angestoßen durch den sogenannten Bologna-Prozess, eine Studierendenzentrierung umzusetzen, sodass die Einbindung der Studierenden in die Gestaltung der Labore entscheidend ist. Dies kann durch den Einsatz agilen Projektmanagements erreicht werden, dessen Kernmerkmal die Nutzerzentrierung ist, sodass auch in Laboren des Maschinenbaus in fokussierten Sprintphasen mithilfe von studentischen Projekten die Labore weiterentwickelt werden.

An der HAW Hamburg wurde, basierend auf diesen Prinzipien, seit 2017 das Konzept des Lernorts Digitale Umformtechnik im Bereich der Produktionstechnik entwickelt. Der Megatrend Digitalisierung ist der erste Treiber der fachlichen und methodischen Weiterentwicklung der Laborumgebung, die damit neue Nutzungsmöglichkeiten erhält und eine reale Produktionsumgebung abbildet. Damit werden unterschiedliche Ansätze der Digitalisierung umgesetzt und in die realen Prozesse des Hochschullabors integriert. Das agile Projektmanagement dient der kontinuierlichen Weiterentwicklung des Lernorts. Zusammen mit den Studierenden wurden inzwischen erste Themenbereiche umgesetzt. Eine Kooperation mit Unternehmen ist auf den Weg gebracht. Regelhaft wird in Form von Barcamps die Vernetzung gestärkt.

Schlüsselwörter: Digitalisierung, Lernraumgestaltung, Scrum, agiles Projektmanagement, Industrie 4.0

Einleitung

In der Lehre der Hochschulen für angewandte Wissenschaften (HAW) nimmt das Labor von jeher eine zentrale Stellung ein. Gerade in den Ingenieurwissenschaften unterstützen Laborversuche in Kleingruppen die Vermittlung der theoretischen Grundlagen, die im seminaristischen Unterricht gelehrt werden. Hier spiegelt sich denn auch der starke Praxisbezug der Hochschulen wider, der vor dem Hintergrund

einer geringeren Zahl von Studierenden mit einer abgeschlossenen Berufsausbildung vor dem Studium immer wichtiger wird. Allerdings ist die Lehr- und Lernumgebung Labor als wichtiger Baustein des technischen Studiums an den Hochschulen weiterzuentwickeln vor dem Hintergrund der Digitalisierung, der steigenden notwendigen Interdisziplinarität in den Ingenieursfächern und veränderter didaktischer Anforderungen. Hier wird seit dem Bologna-Prozess und der Einführung der Bachelor- und Master-Abschlüsse eine Verschiebung vom Lehren zum Lernen („Shift from Teaching to Learning") gefordert, die eine Veränderung der Lehr-Lern-Konzepte hin zu einer starken Verankerung des Prinzips der Kompetenzorientierung bedeutet. An der HAW Hamburg werden entsprechende Konzepte von der Arbeitsstelle Studium und Didaktik bereitgestellt, welche die Lehrenden mit didaktischer Unterstützung sukzessive in konkrete Module umsetzen (HAW Hamburg, 2020).

Doch auch inhaltlich sind die Labore zu überarbeiten, da sich gerade im Bereich der Produktion die Digitalisierung als fachliches Thema von „Industrie 4.0" abbildet und Themen wie Energieeffizienz infolge der Klimaschutzdiskussionen wichtige Inhalte der Ingenieursausbildung sein sollten.

Dieser Beitrag zeigt einen Ansatz für neue Lehr-Lern-Konzepte anhand der Weiterentwicklung des Umformtechnik-Labors des Instituts für Produktionstechnik der HAW Hamburg hin zum Lernort Digitale Umformtechnik. Dabei wird von einem kontinuierlichen Veränderungsprozess ausgegangen, der das Labor schrittweise immer dichter an die Abbildung einer industriellen Produktionspraxis heranführt. Methodisch wird dieser Prozess unterstützt durch den Einsatz von agilem Projektmanagement, das den Studierenden der Ingenieurswissenschaften entsprechend der Anforderungen aus der Praxis stärker als in der Vergangenheit vermittelt wird.

Labor als Lehrort im Studium der Ingenieurwissenschaften

Das Institut für Produktionstechnik besitzt mehrere Laborbereiche, die für Laborversuche der Studierenden zur Unterstützung und Vertiefung der Lehre im seminaristischen Unterricht zur Verfügung stehen. Dabei führen die Studierenden in Kleingruppen von vier bis fünf Personen, betreut von einem/r Professor*in oder wissenschaftlichen/r Mitarbeiter*in, festgelegte fertigungstechnische Versuche an den Werkzeugmaschinen durch. Es kommen typische Mess- und Prüfmittel sowie entsprechende Sensorik zum Aufbau von Messketten zum Einsatz, beispielsweise zur Bestimmung von Kräften, Wegen oder Temperaturen. Hieraus wird u. a. mithilfe von Kraft-Weg-Diagrammen die umgesetzte Arbeit bestimmt. Doch auch die geometrische Messtechnik, z. B. Koordinatenmessmaschinen oder digitale Scan-Techniken, werden für die praktische Erfahrung der Qualitätsprüfung genutzt. Die Laborbereiche bilden dabei klassische Fertigungsverfahren der Zerspantechnik, der Umformtechnik und spanlosen Formgebung ab, aber auch neue Ansätze wie die der additiven Fertigung. Außerdem stehen Rechnerarbeitsplätze für CAD-CAM-Übungen sowie

Laborübungen im Bereich der Materialflusstechnik als Teil der Produktionslogistik zur Verfügung.

Die Laborversuche finden über alle Semester des Bachelorstudiums hinweg mit verschiedener inhaltlicher und didaktischer Ausrichtung auf unterschiedlichen Taxonomie-Stufen statt (Bloom, 1972). Während es zu Beginn des Studiums im Kern um das Verständnis fertigungstechnischer Verfahren geht, behandeln die Studierenden in höheren Semestern Aufgaben der Prozessauslegung oder der Festlegung von Werkzeugmaschinen-Kenngrößen. Dabei ist die Anwendung der im seminaristischen Unterricht vermittelten Grundlagen, etwa die Berechnung von Umformkräften oder des Arbeitsvermögens, entscheidend und als Besonderheit dieser Art des ingenieurwissenschaftlichen Studiums anzusehen. Die konsequente Verbindung von Theorie und Praxis in allen Modulen ist die Stärke der Hochschulen für angewandte Wissenschaften. Gerade deshalb findet eine zunehmende Integration von Laboranteilen auch in den Master-Modulen statt.

Die Kleingruppen von vier bis fünf Studierenden sind bei jedem Laborversuch aufgefordert, sich entsprechend einer bereitgestellten Versuchsbeschreibung vorzubereiten. Diese selbstständige Vorarbeit zu den theoretischen Grundlagen, den Versuchszielen und dem Ablauf wird am Anfang des eigentlichen Labortermins durch den Lehrenden überprüft. Die Ergebnisse im praktischen Laborteil werden von der Gruppe ausgewertet und dem Lehrenden in einem Laborprotokoll zur Verfügung gestellt, der es im Anschluss bewertet. Mehrere bestandene Laborversuche führen zum Bestehen des Laboranteils des Gesamtmoduls. Dieser Ablauf zeigt immer noch eine hohe Lehrendenzentrierung. Zudem entspricht dies der Vermittlung eines klassischen Berufsbildes Ingenieur mit starken analytischen und strukturierten Abläufen im Produktionsbetrieb und Ansätzen zu deren Optimierung.

Das Labor für Umformtechnik und spanlose Formgebung, das im Zentrum dieses Beitrags steht, besitzt mehrere Werkzeugmaschinen und Einrichtungen, die für den Laborbetrieb genutzt werden:

- Reibradspindelpresse Fa. Eumuco RSPP 160/250 (Arbeitsvermögen 5.000 Nm)
- Hydraulikpresse Fa. Hymag HDP 7.1–100, max. Umformkraft 1.000 kN
- Erodiermaschine Fa. Agie Charmilles Form 20
- Zugprüfmaschine Fa. Zwick 1454, max. Zugkraft 50 kN
- Tafel- und Rondenschere zur Probenvorbereitung
- Vorrichtungen und halbautomatische Einrichtungen zum Nieten und Clinchen

Für die Umformmaschinen stehen eine Reihe von Werkzeugen zum Stauchen, Tiefziehen, Fließpressen und Pressen von Grünlingen (als Vorbereitung des Sinterns) zur Verfügung. Die Messtechnik zur Aufnahme von Kraft-Weg-Diagrammen ist in die Werkzeuge bzw. Werkzeugmaschinen integriert. Für die Arbeit der Studierendengruppen im Laborversuch sind ausreichend Tische sowie Whiteboards für die Besprechung und Diskussion mit den Lehrenden vorhanden. In Abbildung 1 sind die beiden Umformmaschinen im Lernort Digitale Umformtechnik zu sehen.

Abbildung 1: Umformmaschinen im Lernort Digitale Umformtechnik

Bislang dienten die Laboreinrichtungen im Bereich der Umformtechnik nicht für Forschungsarbeiten; die Durchführung studentischer Projekte wurde nur vereinzelt für die Weiterentwicklung des Labors und der durchgeführten Versuche genutzt.

Anforderungen an das Hochschullabor der Zukunft

In der Vergangenheit leiteten sich die Anforderungen an die Laborumgebung einer Hochschule im Wesentlichen aus der Durchführung von Laborversuchen mit den Studierenden in Kleingruppen zur Unterstützung des Verständnisses der theoretischen Zusammenhänge aus dem seminaristischen Unterricht ab. Dahinter stand neben den fachlichen Inhalten auch die Vermittlung bestimmter Methoden, die sich auf dem klassischen Ingenieurbild gründete. Die Hochschullabore dienten der Vermittlung von Wissen und dem Sammeln erster eigenständiger Erfahrungen. Die Ausrichtung war lehrendenzentriert. Die Einbindung kreativer Methoden und Tools war nicht Teil der ingenieurwissenschaftlichen Labore.

Im Bologna-Prozess zur Einführung von Bachelor- und Masterabschlüssen wurde auch die Überarbeitung didaktischer Konzepte angestoßen. Der sogenannte „Shift from Teaching to Learning“, also der Übergang vom Lehren zum Lernen, be-

deutet denn auch den Wechsel von einer Lehrendenzentrierung hin zu studierendenzentrierten Lehr-Lern-Konzepten. Dies resultiert in neuen Rollen, welche die Lehrenden in den Modulen einnehmen. An der HAW Hamburg wurde in der Folge das sogenannte KOM-Konzept (kompetenzorientiert lehren, lernen und prüfen) entwickelt, das auf den Ansätzen von Oliver Reis basiert (Reis, 2013, 2014). Im Zentrum steht das sogenannte Constructive Alignment, das Lehr- und Lernformen, Learning Outcome und Prüfungsform in Einklang bringen will (Biggs & Tang, 2007). Die kompetenzorientierte Ausrichtung der Hochschullabore sowie die Umgestaltung auf studierendenzentrierte Lernräume verändert maßgeblich die zugrunde liegenden Anforderungen.

Des Weiteren bietet die Digitalisierung neue Möglichkeiten in der Hochschullehre, die in der Neukonzeption von Laboren Niederschlag findet. Zu beachten ist für die Ingenieurwissenschaften, dass die Digitalisierung sowohl Methodik zur Verbesserung der Lehre wie auch fachlicher Themenschwerpunkt ist, Stichwort: Industrie 4.0. Ein Labor im Bereich der Ingenieurwissenschaften hat folglich beide Aspekte zu berücksichtigen. Verschiedene Studien bilden eine Diskussionsgrundlage zum Einfluss der digitalen Transformation auf die Ingenieursausbildung unter Berücksichtigung der methodischen Erweiterung sowie der notwendigen Anpassung der fachlichen Inhalte (VDI, 2019; Heidling et al., 2019). An der HAW Hamburg wurde im Department Maschinenbau und Produktion eine kontinuierliche Curriculumsentwicklung begonnen, welche die fachlichen Aspekte der Digitalisierung in neuen Modulen und Studienrichtungen/-schwerpunkten berücksichtigt.

Für eine nachhaltige Weiterentwicklung scheint die Einbindung der Studierenden vor dem Hintergrund der Studierendenzentrierung, aber auch der gesellschaftlichen Forderung nach partizipativen Beteiligungsprozessen, entscheidend. Die Gestaltung der Lernräume und Labore durch die Studierenden selbst kann ein Alleinstellungsmerkmal einer Hochschule werden. In diesem Kontext bietet sich mit der Verstärkung der Digitalisierungsansätze auch der Einsatz von agilem Projektmanagement als Ansatz aus der Softwareentwicklung an. Gerade vor dem Hintergrund einer kontinuierlichen iterativen Weiterentwicklung unter dem Aspekt der Nutzer- und damit Studierendenzentrierung sowie kurzfristiger Projektzeiträume für Studienleistungen im Rahmen von Semesterzeiten erweist sich diese Art des Projektmanagements als am besten geeignet. Das bedeutet aber auch, dass agiles Projektmanagement, Sprint und Scrum als methodische Ansätze in die Lehre der Ingenieurwissenschaften Einzug halten müssen.

Neben den fachlichen Inhalten im Labor wurde zunehmend mehr Methodenwissen vermittelt. Dies resultiert aus den Anforderungen der industriellen Praxis, die in Akkreditierungsprozessen und im Rahmen von Netzwerktreffen aufgenommen werden. Diese Anforderungen können in folgendem Ingenieurbild zusammengefasst werden (VDI, 2019; Heidling et al., 2019; eigene Evaluation):

- Anwendung fachlich breiter und profunder Kenntnisse
- Analytische Fähigkeiten bis hin zur Problemlösung
- Anwendung wissenschaftlichen Arbeitens

- Umsetzung von Lean-Konzepten (Toyota Production System)
- Kommunikative Fähigkeiten (inkl. Verhandlungstechniken, Empathie, Konfliktkompetenz, Präsentationsfähigkeiten)
- Kenntnis und Umsetzung von Digitalisierungsansätzen
- Agiles Projektmanagement
- Anwendung kreativer Entwicklungsmethoden
- Entscheidungsfähigkeit/Übernahme von Verantwortung
- Selbstorganisation/Zeitmanagement

Hochschullabore müssen folglich in Zukunft erweiterte und zum Teil gänzlich andere Anforderungen erfüllen, um im Sinne eines Lehr-Lern-Konzepts mit Blick auf das Ingenieurbild als Learning Outcome der im Labor durchgeführten Studienleistungen die gewünschten fachlichen Inhalte und Methoden abzubilden. Kurz gesagt, muss insbesondere ein Labor der Produktionstechnik sowohl die fachlichen Inhalte einer Produktion bis hin zur Digitalisierung und Vernetzung von Maschinen umsetzen wie auch in der Lehre die Methodik, die Ingenieure im späteren Berufsleben benötigen. Um diese Anforderungen entsprechend abbilden zu können, bedarf die weitere Entwicklung des Umformtechnik-Labors am Institut für Produktionstechnik auch einer Verbreiterung der möglichen im Laborbereich durchzuführenden Studienleistungen, Lehrformate bzw. Nutzungsmöglichkeiten. Diese sind in Abbildung 2 dargestellt. Grundsätzlich sollen studentische Projekte (Studienarbeiten, Bachelor- und Masterprojekte) und Abschlussarbeiten die Weiterentwicklung der Laborumgebung unterstützen. Laborversuche, die weiterhin den seminaristischen Unterricht begleiten, wandeln sich in Richtung selbstständig durchgeführter Versuche mit veränderter Rolle des Lehrenden. Auch Teile des seminaristischen Unterrichts können zukünftig in der Laborumgebung stattfinden. Hier bedarf es zwar einer Analyse der maximalen Gruppengröße, bietet sich aber die Chance, Vorlesungsinhalte (z. B. im Modul Werkzeugmaschinen) direkt vor Ort sichtbar zu machen. Eine Kooperation mit Unternehmen im Bereich der Digitalisierung ist denkbar, um praxisnahe Inhalte direkt abzubilden. Im weiteren Schritt wird es möglich, Forschungs- und Entwicklungsprojekte mit den Kooperationspartnern zu integrieren und damit den Studierenden einen Zugang zu neuesten Entwicklungen zu verschaffen. Nicht zuletzt sollte das Labor ein Ort der Studierenden werden – ihre persönliche Lernumgebung, zu der sie Zugang unabhängig von Lehrveranstaltungen haben. Denkbar ist es, mindestens eine Lernumgebung offen für einen Teil der Studierenden der Produktionstechnik zu halten, die damit auch eine Bindung an das Institut für Produktionstechnik erhalten. Daneben existieren allgemeine Lernräumlichkeiten für alle Studierende, die aufgrund ihrer Gestaltung nicht den Anforderungen bezüglich Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz einer Produktionsumgebung unterliegen.

Abbildung 2: Veränderte Nutzungsmöglichkeiten von Hochschullaboren

Die Praxisnähe kann verstärkt werden, indem ein solches Labor zukünftig eine reale Produktionsumgebung darstellt und damit neben den Aspekten der Produktionstechnik auch die des Produkt- und Produktionsmanagements abbildet. Dies spiegelt sich auch in dem in Abbildung 2 vorgestellten Wunsch wider, in den Laborversuchen nicht mehr reine Versuchswerkstücke herzustellen, sondern praxisnahe Werkstücke der industriellen Praxis, z. B. von Kooperationspartnern.

Es zeigt sich, dass die Weiterentwicklung der Hochschullabore eine Vielzahl von Anforderungen aufgreifen kann. Ein ganzheitlicher Ansatz müsste die Entwicklung einer realen Produktionsumgebung aufnehmen und bedarf aufgrund der langfristig angelegten kontinuierlichen Adaption inklusive weiterer aufkommender Trends, die zu berücksichtigen sind, eines iterativ wirkenden Projektmanagements.

Konzeption des Lernorts Digitale Umformtechnik

Basierend auf den definierten Anforderungen und insbesondere vor dem Hintergrund der zunehmenden Digitalisierung wurde die Weiterentwicklung des Umformtechnik-Labors an der HAW Hamburg begonnen. Eine Reihe von studentischen Arbeiten im Rahmen von Lehrveranstaltungsmodulen und Projekten führte zu einer neuen Konzeption der Laborumgebung als Lernort Digitale Umformtechnik. Dabei war zunächst eine Klarstellung von Begrifflichkeiten notwendig. Der Begriff „Lernort“ grenzt sich gegenüber „Labor“ im klassischen Sinne wie oben beschrieben ab und versucht die veränderten Anforderungen sowie die damit einhergehenden Nutzungsmöglichkeiten aufzugreifen. Dabei stellt er das Lernen und damit die Studie-

renden als Akteure in den Mittelpunkt. Diskutiert wurde auch eine weitere Abgrenzung zum Begriff „Modellfabrik“. Eine Produktionsumgebung soll praxisnah und realistisch dargestellt werden – allerdings sollen insbesondere die Möglichkeiten der Digitalisierung in den Lehr- und Lernprozessen des Lernorts und damit in der alltäglichen Praxis und den Arbeiten analog eines Produktionsbetriebs Niederschlag finden. Es geht nicht um die modellhafte Darstellung einer Produktionsumgebung, die zu Anschauungszwecken an- und abgeschaltet wird. Vielmehr steht das Lernen der Studierenden im Vordergrund, weshalb eine Integration von bzw. eine Abgrenzung zu den konzeptionellen Aspekten des „Maker Space“ oder des „FabLab“ in Zukunft noch wichtig wird. Hier könnte eine Schärfung in der Weiterentwicklung des Lernorts selbst und nicht in der Entwicklung neuer Produkte liegen. Tabelle 1 stellt die verschiedenen Konzepte anhand ausgewählter Kriterien einander gegenüber.

Tabelle 1: Gegenüberstellung unterschiedlicher Konzepte

	Ausstattung	**Versuche in der Lehre**	**Eigenständiges Arbeiten der Nutzer**	**Modellhafte Produktionsumgebung**	**Integration Lehrinhalte in Labororganisation**	**Unternehmenskooperation und Transfer**	**Öffentlicher Zugang**	**Eigene Ideen/Werkstücke der Nutzer**
Lernort Digitale Umformtechnik	Industrielle Produktionsmaschinen	x	x	x	x	x	(x)	x
Klassisches Hochschullabor	Industrienahe Produktionsmaschinen	x						
Modellfabrik	Spezialisierte Produktionsmaschinen	(x)		x		x		
Maker Space FabLab	Produktionsmaschinen moderner Fertigungsverfahren		x	x	(x)		x	x

Der erste Ansatz entsprang der Integration des Themas „Digitalisierung“ in die Laborumgebung als Methode und fachlicher Themenbereich, doch ein reines „Industrie 4.0“-Labor grenzt die Möglichkeiten der Einbindung zukünftiger neuer Trends ein und wird deshalb der Konzeption nicht gerecht. Nichtsdestotrotz wurde Digitalisierung als erster Treiber angesehen. Deshalb wurde der Leitfaden des VDMA zur Einführung von Industrie 4.0 im Mittelstand als Teil eines Benchmarks genutzt, um erste Umsetzungsthemen zu identifizieren (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau, 2015). Zudem wurden die Digitalisierungsinitiativen an der HAW Hamburg aufgegriffen. Viele Anregungen wurde insbesondere aus der Arbeitsgruppe eines Design-Thinking-Workshops im Rahmen des Dies Academicus der HAW Hamburg 2017 unter dem Leitthema „Digitalisierung“ aufgenommen, die sich der Herausforderung „Wie sehen Lernorte der Zukunft aus?“ widmete (HAW Hamburg, 2017).

Aus all diesen Diskussionen entstand die folgende Vision: Der „Lernort Digitale Umformtechnik“ stellt einen **physischen Raum und eine virtuelle Plattform** für die Lehrenden und Studierenden der HAW Hamburg sowie Unternehmen der Metropolregion Hamburg zum Themenbereich Industrie 4.0 und **Digitalisierung im Bereich der Umformtechnik** dar. **Anwendungsbezogene Lösungen** stehen zum gemeinsamen kompetenzorientierten, forschungsbasierten und digital unterstütztem **Lernen** bereit; **neue Lösungen** werden gemeinsam im Zusammenspiel von Praxis und Lehre entwickelt.

Ausgehend vom Megatrend Digitalisierung bleibt Raum für neue Trends und Themen, die eine weitere Entwicklung des Lernorts Digitale Umformtechnik zulassen. Eine bildhafte Darstellung dieser Vision wird in Abbildung 3 aufgezeigt.

Abbildung 3: Konzeption Lernort Digitale Umformtechnik

Hier erscheint es wichtig, dass auf die einzelnen Player des Lernorts nochmals eingegangen wird. Die Lehrenden (Professor:*innen, wissenschaftliche Mitarbeiter:*innen) bilden das Kernteam und sorgen für die Kontinuität und das Wissensmanagement zwischen den Projekten, die parallel und nacheinander bearbeitet werden. Die Studierenden bringen eigene (Digitalisierungs-)Ideen ein, die sie im Lernort bearbeiten. Hier können auch Kooperationen mit Unternehmen entstehen, die in gemeinsame Projekte, Abschlussarbeiten oder auch Unterstützung von Lehrveranstaltungen münden. Die Studierenden können als Lernende, aber auch als Tutor*innen im Lernort tätig werden. Zudem ist der Aufbau eines Studierenden-Teams „Digital Natives“ geplant, das vonseiten der Studierenden den Lernort und seine Weiterentwicklung begleiten soll. Den Unternehmen bietet der Lernort konsequenterweise die Zusammenarbeit mit Studierenden, die Kooperation mit der HAW Hamburg sowie damit verbunden einen Transfer von Entwicklungsthemen in die Wirtschaft. Der

Lernort soll als Open Space für die Unternehmen die Möglichkeit zum Experimentieren oder Ausprobieren von im Lernort vorhandener (Digitalisierungs-)Lösungen offerieren und damit auch für die Unternehmen ein Ort des Lernens sein. Um Studierende und Unternehmen zusammenzubringen, bieten sich offene Formate mit prägnanten und fokussierten thematischen Ansätzen an wie z. B. ein Barcamp. Wichtig erscheint zudem die Vernetzung mit weiteren Lernorten und Laboren der HAW Hamburg, aber auch darüber hinaus. Dies hilft der inhaltlichen Fokussierung auf den Bereich der Umformtechnik und stärkt die Zusammenarbeit und die Kooperationsmöglichkeiten für Studierende und Unternehmen. Stellvertretend seien hier andere Institute des Departments Maschinenbau und Produktion sowie der Creative Space for Technical Innovations (CSTI) des Forschungs- und Transferzentrums (FTZ) Smart Systems der HAW Hamburg genannt. Damit stellen die Labore zukünftig keine Insellösungen einzelner fachlicher Bereiche dar, sondern ergeben für die Studierenden ein Gesamtbild.

Agile Entwicklungsmethoden im Lernort Digitale Umformtechnik

Die kontinuierliche Weiterentwicklung des Lernorts bedarf eines geeigneten Projektmanagements. Aufgrund des iterativen Vorgehens in den Vorlesungszeiträumen zusammen mit den Studierenden und der Studierendenzentrierung, die einer Nutzerorientierung entspricht, wurde eine Entscheidung für den Einsatz agiler Projektmanagement-Methoden getroffen, wie sie aus der Softwareentwicklung bekannt sind. Elementar sind dabei folgende Bausteine (Rubin, 2015; Schwaber & Sutherland, 2016):

- Nutzung von Product Owner und Scrum Master
- Zusammenstellung interdisziplinärer Teams
- Nutzerzentrierung durch konsequente Formulierung von User Stories als Basis der Aufgabenstellungen studentischer Projekte und daraus resultierender Anforderungen
- Bereitstellung funktionsfähiger Prototypen entsprechend der jeweiligen Aufgabenstellung
- Definition von Sprintphasen, die im Lernort Digitale Umformtechnik umgesetzt werden
- Umsetzung eines iterativen Durchlaufs entsprechend der Scrum-Philosophie (Sprint Planning – Sprint – Sprint Review)

Dabei werden die Grundsätze des sogenannten agilen Manifestes stringent umgesetzt (Beedle et al., 2001): Es geht darum, dass jedes studentische Projekt einen Umsetzungsschritt schafft und somit eine Weiterentwicklung des Lernorts bedeutet.

Der iterative Durchlauf pro Semester (sechs Monate) ist in Abbildung 4 dargestellt. Organisatorisch wird das Lehrendenteam des Lernorts dabei durch eine Stu-

dierende/einen Studierenden unterstützt, der/die als sogenannte Lean Manager*in das agile Projektmanagement während der Vorlesungszeit unterstützt. Damit wurden in den vergangenen Semestern gute Erfahrungen gemacht – nicht zuletzt, weil die Studierenden damit eine hohe Einbindung in der Koordination der Projekte erfahren. Die Rollen des Product Owners und des Scrum Masters werden aus dem Team der Lehrenden heraus übernommen. Wöchentlich findet eine Austauschrunde aller Projekte statt. Dabei wird analog zu einem Daily Scrum pro Projekt ein digitales Scrum Board gepflegt, in dem die User Stories des Projektes im „Backlog" zusammengetragen werden und pro Woche entsprechend nach „In Progress" bzw. „Done" nach Freigabe durch den Product Owner verschoben werden. Die Projekte sollen alle während der Vorlesungszeit abgeschlossen werden, die als Sprintphase der Projekte begriffen wird, wobei ggf. Minisprints pro Projekt eingeschoben werden. Dies bedeutet dann das gezielte Arbeiten des Teams an seinem Projekt, fokussiert über mehrere Tage, am Lernort Digitale Umformtechnik. In der letzten Woche vor den Prüfungen findet der Sprint Review und damit der Abschluss der Projekte statt. Unter Umständen werden bei einzelnen Projekten Restarbeiten nach der Prüfungsphase vereinbart, um einen umsetzbaren funktionsfähigen Prototyp zu erreichen.

Abbildung 4: Einbindung agiles Projektmanagement in die Weiterentwicklung des Lernorts

Während der vorlesungsfreien Zeit nach Abschluss der Projekte findet im Team der Lehrenden ein Review der Projekte und ihrer erreichten Ergebnisse im Abgleich mit der digitalen Roadmap des Lernorts statt. Damit wird der Status des Lernorts verifiziert. Die nicht erfüllten User Stories gehen zurück in den Projekt-Backlog und bilden somit die Basis für die nächste Definition der Projekte für das Folgesemester. Pro Projekt werden dann die Aufgabenstellungen formuliert, wobei auch hier dem Prinzip der Nutzerzentrierung in Form von User Stories gefolgt wird. Zum Ende der vorlesungsfreien Zeit und dem Beginn der Vorlesungszeit werden die anstehenden Projekte den Studierenden zur Bearbeitung in unterschiedlichen Formaten (Studienarbeiten, Bachelor-/Masterprojekt, Abschlussarbeiten) angeboten. Mit der Festlegung der Studierendenteams beginnt der Zyklus erneut.

Die konsequente Umsetzung des agilen Projektmanagements, gepaart mit der studentischen Projektkoordination in der wöchentlichen Austauschrunde, erfährt bei den Studierenden eine hohe Akzeptanz. Erste Erfahrungen mit Minisprints sind sehr positiv. Inzwischen überträgt sich auch die Philosophie des agilen Projektmanagements auf fachliche Themenstellungen wie etwa die modulare Werkzeugentwicklung von neuen Umformwerkzeugen.

Thematische Schwerpunktsetzungen im Lernort Digitale Umformtechnik

Ausgehend von der Vision und der daraus abgeleiteten Konzeption erschien es sinnvoll, thematische Schwerpunkte zu finden und eine strategische Ausrichtung der Umsetzung zu formulieren. Zusammen mit Studierenden und der Unterstützung von Kooperationspartnern aus der Wirtschaft, die Unternehmen im Bereich der Digitalisierung beraten, wurde eine „Digitale Roadmap“ entwickelt, die sich an den im Lernort Digitale Umformtechnik laufenden Prozessen orientiert. Dabei wurde deutlich, dass es nicht nur um eine reine Digitalisierung in allen Ausprägungen gehen kann, sondern die Kernprozesse sich an den Nutzungsmöglichkeiten in Abbildung 2 und der Vision des Lernorts Digitale Umformtechnik orientieren müssen. Zudem ist die Weiterentwicklung des Lernorts als Veränderungsprozess auch im Sinne des Mindsets von Lehrenden, Studierenden und Unternehmen zu sehen, sodass organisatorische Aspekte ebenso anzugehen sind. Kerngestaltungselemente der Digitalisierung wie Vernetzung, Informationstransparenz, technische Assistenz und dezentrale Entscheidungsfindung finden Anwendung, um den Studierenden übergeordnete Ziele von „Industrie 4.0“ wie Reduzierung der Durchlaufzeit, kundenindividuelle Produktion oder Steigerung der Automatisierung näherzubringen (Hermann et al., 2015; Schmidt et al., 2015).

Für den Lernort Digitale Umformtechnik wurde ein Lehr-Lern-Konzept auf Basis der Kompetenzorientierung erarbeitet. Es bildet die Grundlage für die weitere Umsetzung des Constructive Alignments in den Lehrveranstaltungen. In Abbildung 5 sind einige Themenbereiche benannt, an denen derzeit im Rahmen studenti-

scher Projekte und Abschlussarbeiten erste Teilbereiche umgesetzt werden. Neben der Kompetenzorientierung stellen die Grundsätze der Lean Production eine Basis dar. Verschiedene Bausteine wie z. B. Total Productive Maintenance werden konsequent aufgenommen und ebenfalls einer Digitalisierung zugeführt.

Abbildung 5: Thematische Schwerpunkte im Lernort Digitale Umformtechnik

Die digitale Freigabe von Laborprotokollen wurde umgesetzt und kann in die verschiedenen Module integriert werden. Dies bringt die Lehre näher heran an industrielle Digitalisierungslösungen und industrielle Prozesse, sodass die Hochschule besser auf die in der Industrie üblichen Standards vorbereitet ist. Dokumentationen und Videos zu den Werkzeugmaschinen stehen online zur Verfügung und können per QR-Code direkt aufgerufen werden. Zudem sollen Augmented Reality Anwendungen (z. B. AR-Brillen) die Laborversuche unterstützen. Hierdurch lernen Studierende schon im Studium den Umgang mit AR-Methoden in der Produktion. Eine erste Umsetzung wurde bei Sicherheitsunterweisungen vorgenommen und ist beispielhaft in Abbildung 6 für die Erodiermaschine gezeigt.

Abbildung 6: Sicherheitsunterweisung mithilfe von AR-Anwendungen (Foto: Aaron Otto, Tobias Sieroux)

Ausgehend von der ersten Umsetzung einer Datenaufnahme an der Reibradspindelpresse mit Blick auf die Darstellung der Anlagenverfügbarkeit sollen Ansätze der Algorithmisierung auf die Reibradspindelpresse umgesetzt werden. Dies bedeutet die konsequente Aufnahme der Prozessdaten aus den Laborversuchen. Daraus abgeleitet können die Studierenden Voraussagen für die nächsten zu fertigenden Werkstücke treffen und die Einflüsse unterschiedlicher Prozessparameter überprüfen. Hier bedarf es einer Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen der HAW Hamburg (z. B. Forschungs- und Transferzentren 3i und Smart Systems). Diese Anwendung steht dann auch beispielhaft für einen Wissenstransfer in Richtung von Partnerunternehmen zur Verfügung.

Der Lernort Digitale Umformtechnik wird als digitaler Zwilling umgesetzt, um die „Produktion“ (Infrastruktur und Prozesse) digital darzustellen und zu simulieren. Die Weiterentwicklung der Infrastruktur und der Lehrprozesse kann dann digital begleitet werden.

Die von den Mitarbeitern auszuführenden logistischen Prozesse beim Werkzeug- und Werkstückwechsel entsprechen nicht industriellem Standard. Obwohl ein autonomes Transportsystem in Zusammenarbeit mit dem Institut für Produkt- und Produktionsmanagement zur Verfügung steht, lässt es sich bislang nicht mit Hydraulikpresse und Reibradspindelpresse vernetzen. Technische Anpassungen an der

Steuerung der Maschinen sind vorzunehmen, um Kommunikationsschnittstellen einrichten und die Werkzeug-/Werkstücklogistik neu gestalten zu können. Die Vernetzung der Werkzeugmaschinen untereinander ist dann der logische nächste Schritt als Teil eines Internet of Things.

Geplant sind digitale Prozessketten zwischen verschiedenen Laborveranstaltungen, sodass integrierte Fertigungsketten entstehen. Hierbei spielt die Einbindung von CAD/CAM sowie die Simulation der Umformprozesse eine große Rolle.

Eine weitere Herausforderung ist die digitale Vernetzung der Labore untereinander. Für Proben des Fertigungstechnik-Labors könnten die Materialkennwerte (Informationsfluss, aus dem Werkstofftechnik-Labor) gemeinsam mit der jeweiligen Probe (Materialfluss) übergeben werden. Dies setzt eine konsequente Kennzeichnung der Proben, eine strukturierte Speicherung zugehöriger Datensätze in einer Datenbank und die Identifikation mittels moderner Identifikationstechnologien voraus.

Die Zusammenarbeit mit Unternehmen und Institutionen der Metropolregion soll ausgebaut werden. Hierzu wird ein Beirat geschaffen, der Unternehmen, Lehrende und Studierende institutionell zusammenbringt. Ein Kooperationsmodell wird entwickelt und umgesetzt, um die Vision des Lernorts Digitale Umformtechnik gemeinsam voranzutreiben.

Eine Vielzahl von Themen wird nun gemeinsam mit den Studierenden und Kooperationspartnern innerhalb und außerhalb der HAW angegangen, sodass die Vision des Lernorts Digitale Umformtechnik sukzessive Realität wird.

Zusammenfassung

Im Lernort Digitale Umformtechnik der HAW Hamburg findet die konsequente Weiterentwicklung des klassischen Hochschullabors hin zu einer agilen Projektumgebung statt. Dabei steht zum jetzigen Zeitpunkt die Digitalisierung als Schwerpunktthema im Fokus. Die Studierenden sind institutionell in die Adaption ihrer Lernumgebung eingebunden und bauen die Nutzungsmöglichkeiten konsequent aus. Die Erfahrungen mit dem Einsatz agiler Projektmanagement-Methoden sind durchweg positiv, insbesondere, weil die Studierenden mit dem funktionsfähigen Prototyp ein klares Umsetzungsziel vor Augen haben. Ziel ist es, dass nach mehreren Semestern des iterativen Durchlaufs im Projektmanagement im Lernort Digitale Umformtechnik konsequent digitale Methoden und Tools angewendet werden. Erste Schritte der Umsetzung sind begonnen, die entsprechend der digitalen Roadmap fortgesetzt wird. Der Lernort stellt das Spiegelbild einer Produktionsumgebung dar und steht für Kooperationen mit Unternehmen im Bereich der Digitalisierung, aber auch neu aufkommender Trends zur Verfügung. Dabei bleibt der Fokus auf den Lernprozessen der Studierenden im Curriculum des Ingenieurstudiums bei weiterer methodisch und didaktischer Einbindung von Forschungsansätzen. Eine systemati-

sche Evaluierung des Konzeptes Lernort Digitale Umformtechnik ist in den kommenden Semestern vorgesehen.

Ein Dankeschön gilt insbesondere den Studierenden im Department Maschinenbau und Produktion, die mit ihrem persönlichen Einsatz die Realisierung der Vision des Lernorts Digitale Umformtechnik erst möglich gemacht haben.

Literaturverzeichnis

Beedle, M. et al. (2001): *Manifesto for agile software development,* Verfügbar unter www.agilemanifesto.org [31.03.2020].

Biggs, J. B. & Tang, C. (2007). *Teaching for quality learning at university: what the students does* (3. Aufl.). Maidenhead: Open University Press.

Bloom, B. S. (1972): *Taxonomie von Lernzielen im kognitiven Bereich* (4. Aufl.) Weinheim und Basel: Beltz Verlag.

HAW Hamburg (2020). *Kompetenzorientiert lehren, lernen und prüfen*. Verfügbar unter https://www.haw-hamburg.de/hochschule/qualitaet-in-der-lehre/curriculumentwicklung/kom-konzept/ [30.05.2020].

HAW Hamburg (2017). *Der Lernraum der Zukunft – Design Thinking Workshop an der HAW Hamburg*. Prototyp-Video Dies Academicus 2017/Design Thinking Workshop 5.-7.10.2017), Verfügbar unter https://youtu.be/rrClAudYm9U [30.05.2020].

Heidling, E.; Meil, P.; Neumer, J.; Porschen-Hueck, S.; Schmierl, K.; Sopp, P. & Wagner, A. (2019). *Ingenieurinnen und Ingenieure für Industrie 4.0, Studie gefördert von der Impuls-Stiftung des VDMA,* München.

Hermann, M.; Pentek, T. & Otto, B. (2015). *Design principles for industrie 4.0 scenarios: a literature review.* Working paper/Audi-Stiftungslehrstuhl Supply Net Order Management (Bd. 01/2015). Dortmund. Verfügbar unter http://www.iim.mb.tu-dortmund.de/cms/de/forschung/Arbeitsberichte/Design-Principles-for-Industrie-4_0-Scenarios.pdf [02.10.2020].

Reis, O. (2013). *Kompetenzorientierte Prüfungen: Prüfungstheorie und Prüfungspraxis*. Verfügbar unter http://www.wisshom.de/dokumente/upload/e5f25_reis_ice13_beitragkongressband.pdf [25.01.2015].

Reis, O. (2014). *Systematische Theologie für eine kompetenzorientierte Religionslehrer/innenausbildung. Ein Lehrmodell und seine kompetenzdiagnostische Auswertung im Rahmen der Studienreform*. Berlin. LIT Verlag. Diss.

Rubin, K. S. (2015). *Essential Scrum – a practical guide to the most popular agile process* (6. Aufl.). Upper Saddle River NJ, Addison-Wesley.

Schmidt, R.; Möhring, M.; Härting, R.; Reichstein, C.; Neumaier, P. & Jozinović, P. (2015). *Industry 4.0 – Potentials for Creating Smart Products: Empirical Research Results*. In: Business Information Systems Nr. 208. Springer International Publishing.

Schwaber, K. & Sutherland, J. (2016). *The Scrum Guide™ – The definitive guide to scrum: the rules of the game*. Verfügbar unter http://www.scrumguides.org/docs/scrumguide/v2016/2016-Scrum-Guide-US.pdf#zoom=100 [01.10.2016].

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (2015). *Leitfaden Industrie 4.0 – Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand*. Frankfurt: VDMA-Verlag.

Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI) (2019). *Ingenieurausbildung für die digitale Transformation*, Studie, Düsseldorf, www.vdi.de.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Umformmaschinen im Lernort Digitale Umformtechnik 130

Abb. 2 Veränderte Nutzungsmöglichkeiten von Hochschullaboren 133

Abb. 3 Konzeption Lernort Digitale Umformtechnik 135

Abb. 4 Einbindung agiles Projektmanagement in die Weiterentwicklung des Lernorts 137

Abb. 5 Thematische Schwerpunkte im Lernort Digitale Umformtechnik 139

Abb. 6 Sicherheitsunterweisung mithilfe von AR-Anwendungen 140

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Gegenüberstellung unterschiedlicher Konzepte 134

Iterative Adaption eines Remote-Labors unter Berücksichtigung des Feedbacks der Studierenden

Anja Hawlitschek, Sarah Berndt, André Dietrich, Sebastian Zug

Abstract

Bei der Konzeption und Realisierung eines Remote-Labors fehlt es wegen der häufig spezifischen Ausprägung auf technischer und didaktischer Ebene an praktikablen Schablonen. Folglich kann die Inbetriebnahme eines Remote-Labors immer nur der Startpunkt einer kontinuierlichen Weiterentwicklung sein, die auf eine Verbesserung der Features und Konfigurationsparameter, der Lehrkonzepte, aber auch konkreter Aufgabenstellungen abzielt. Zunächst muss dafür eine geeignete Feedbackstrategie entwickelt werden, die die Rückmeldungen und Kritiken der Studierenden systematisch erfasst. In der Analysephase gilt es, entsprechende Stellschrauben zu identifizieren und daraus eine Strategie zur Anpassung des Labors zu entwickeln. Der vorliegende Beitrag beschreibt dieses Vorgehen anhand eines Remote-Labors für eingebettete Systeme, das in einem Zeitraum von drei Jahren ausgehend von einer Vorgängerinstallation weiterentwickelt wurde. Grundlage der Anpassungen waren quantitative Befragungen der Studierenden, qualitative Interviews mit Studierenden und Tutor*innen sowie die Analyse der Nutzer*innendaten. Im Ergebnis zeigte sich, dass neben der Korrektur vermeintlich intuitiver Lösungen auch konzeptionell substanziell adaptiert werden musste.

Schlüsselwörter: Remote-Labor, empirische Untersuchung, Adaptivität

Motivation

Remote-Labore vereinen die Digitalisierung der Lehre und das interaktive Lernerlebnis in einer Laborumgebung. Die Einbettung realweltlicher Versuche in eine webbasierte Lehr-Lern-Umgebung macht diese analog zu klassischen Onlinekursen permanent verfügbar. Anders als in einer Simulationsumgebung bleibt aber die unmittelbare Interaktion mit einer physischen Umgebung erhalten.

Allerdings fehlt es in der Literatur an konkreten Handlungsanweisungen und Vorlagen für die Realisierung eines Remote-Labors. Zwar existieren eine Vielzahl von Beschreibungen unterschiedlicher Installationen sowie Untersuchungen zur spezifischen Wirksamkeit; diese dokumentieren aber eher einen finalen Zustand bzw. – im Zusammenhang mit entsprechenden Evaluationen – eine spezifische Konfiguration (vgl. Alkhaldi, Pranata & Athauda, 2016). Der Entwicklungsprozess, der zur Anpas-

sung der jeweiligen Installation an die didaktischen Erfordernisse führt, ist bislang kaum dokumentiert (vgl. Orduña, García-Zubia, Rodriguez-Gil u. a., 2012). Dies ist umso wichtiger, als erst mit der realweltlichen Nutzung im Lehrbetrieb die Schwächen eines Systems deutlich werden. Ausgehend davon ist dann eine Nachbesserung notwendig, welche die Anforderungen aber möglicherweise wiederum nur in Teilen abdeckt. Die Gründe dafür, dass hier ein iterativer Entwicklungsprozess notwendig wird, sind vielfältig und resultieren häufig aus der Situation, dass ein bestehendes Labor oder das Konzept eines Labors in ein Remote-Setup überführt wird.

Die vorliegende Arbeit stellt diesen mehrstufigen Entwicklungsfluss am Beispiel eines Remote-Labors für mobile Robotersysteme anhand der Grundelemente Laborequipment, IT-Infrastruktur und Nutzer*inneninterface aus Studierendensicht und Nutzer*inneninterface aus der Perspektive des Lehrenden dar. Eine Beschreibung der Konfiguration und der didaktischen Zielstellungen erfolgt in Abschnitt 2.

Bezüglich des ersten Punktes ist zu beachten, dass die Technik intensiver und rund um die Uhr benutzt wird, wobei ein unmittelbarer Eingriff für Korrekturen und Reparaturen fehlt. Während die Standardlaborausstattung in Zeitfenstern außerhalb der Übungen gewartet werden kann, ist das Remote-Labor permanent online. Entsprechend muss die störungsfreie Laufzeit des Equipments höher liegen als bei einer konventionellen Installation.

Ähnliche Herausforderungen betreffen die Infrastruktur des Remote-Labors. Ein während der Designzeit schwierig abzuschätzender Aspekt ist die Frage der automatisierten Überwachung des Betriebes. Neben intuitiven Kontrollen, die z. B. für einen mobilen Roboter Sicherheitszonen definiert, die nicht verlassen werden dürfen, können andere unerwünschte Zustände erst mit zunehmender Betriebserfahrung erkannt werden. Im hier beschriebenen Labor fuhren Roboter aufgrund einer fehlerhaften Programmierung buchstäblich gegen eine Wand und kämpften mit durchdrehenden Rädern minutenlang gegen diese an (Jäger, Zug, Hawlitschek u. a., 2018).

Die nutzerseitige Webanwendung bildet für die Studierenden die Schnittstelle zum Labor. Dabei treffen Studierende, die das reale Laborsystem allenfalls nur einführend kennengelernt haben, auf eine technische Realisierung, die bestimmte Abfolgen der Bedienung (implizit) zwingend definiert. Aus dem Blick des realen Labors mögen die Vorgaben nachvollziehbar sein, aus der Distanz des Remote-Labors sind sie aber über die Schnittstellen gegebenenfalls wenig intuitiv. Entsprechend können konventionelle Usability-Konzepte, die z. B. bei konventionellen Webseiten Anwendung finden, nur bedingt eine Lösung definieren. Darüber hinaus muss die Nutzer*innenschnittstelle auch die notwendige Unterstützung bieten, die in einem realen Labor durch Lehrende abgedeckt wird. Die spezifische Konfiguration kann nur anhand einer entsprechenden Studie abgeleitet werden.

Mit der räumlichen Trennung ist das Remote-Labor nicht mehr „im Blick“ des Lehrenden. Dies macht ein neues Monitoring- und Analysekonzept notwendig. Der erste Punkt betrifft die Möglichkeit, z. B. per Ferneingriff einen Neustart des Systems oder einzelner Komponenten zu ermöglichen. Diese Funktionalitäten werden anhand der Erfahrungen beim Betrieb nachgerüstet.

Die genannten vier Punkte sind zudem untereinander verknüpft, sodass Anpassungen auf der einen Ebene unmittelbare Auswirkungen auf die anderen haben. Entsprechend soll in diesem Artikel die Entwicklungsgeschichte in den Kategorien anhand verschiedener Versionen vorgestellt werden. Die Weiterentwicklung basiert auf Kritikpunkten, die mittels Befragungen und Interviews identifiziert wurden.

Untersuchungsgegenstand – Industrial-eLab „Eingebettete Systeme“

Im Rahmen des Remote-Labors „Eingebettete Systeme“ besteht die Aufgabe der Studierenden darin, kleine Roboter schrittweise in C und C++ zu programmieren, sodass diese am Ende selbstständig in einem Labyrinth navigieren. Dafür wurden zwischen 2017 und 2019 drei Versionen des Remote-Labors implementiert, die aufeinander aufbauend sowohl auf der Hardware- als auch der Softwareebene ein weitreichendes Neudesign darstellen. Die durch die Programme der Lernenden zu adressierenden Elemente (Motortreiber, 3x7 Element Display, Inertial- und Distanzsensorik, Odometrie) blieben dabei erhalten. Bei der Version 1 wurde die Energiezufuhr über Akkumulatoren sichergestellt, während diese in der finalen Implementierung von Version 3, wie in Abbildung 1 und 2 zu sehen, durch eine industrielle

Abbildung 1: Laborinfrastruktur Vers. 1. Auf dem Rechner im Vordergrund ist die zugehörige Bedienoberfläche sichtbar.

Abbildung 2: Laborinfrastruktur Vers. 3 mit insgesamt 6 Robotersystemen

Kabelführung mit Schleifkontakten ersetzt wurde. Zudem wurde in Version 3 die Zahl der Robotersysteme, die parallel im Betrieb waren, auf sechs gesteigert, um die Verfügbarkeit zu erhöhen.

Didaktische Anpassung von Remote-Laboren

Das Lernen mit Remote-Laboren beinhaltet komplexe Herausforderungen für die Lernenden und daraus resultierende besondere Anforderungen an deren didaktische Unterstützung. Neben der Auseinandersetzung mit dem zu programmierenden Code müssen sie sich im Remote-Labor „Eingebettete Systeme" mit Schwierigkeiten beschäftigen, die mit der indirekten Interaktion mit einer komplexen Laborsituation einhergehen. So entstehen beispielsweise „falsche" Sensorwerte dadurch, dass Sonneneinstrahlung den Messprozess stört. Die Studierenden müssen lernen, mit solchen Herausforderungen aus dem Laborkontext, also der Identifikation von Störvariablen und ihrem Handling, auch ohne direkte Interaktionsmöglichkeiten mit dem Labor und den Robotern umzugehen.

Damit die Studierenden erfolgreich im Remote-Labor lernen, müssen vor diesem Hintergrund eine Reihe von Voraussetzungen geschaffen werden – insbesondere die Anpassung des Remote-Labors und zugehöriger Lerninhalte an die Bedarfe der Studierenden. Bedarfe für die Weiterentwicklung und Anpassung eines Remote-Labors können auf unterschiedliche Faktoren zurückgeführt werden. Einfluss auf den Lernerfolg von Studierenden bzw. deren Persistenz in einer Lehrveranstaltung (vgl. Park & Choi, 2009) haben Faktoren, die bereits im Vorfeld des Lernprozesses vorliegen (z. B. lernrelevante Fähigkeiten bzw. das Vorwissen der Lernenden, vgl. Chen, Kalyuga & Sweller, 2017), externale Faktoren, die außerhalb des Lernsetting zu verorten sind (z. B. familiäre zeitliche Belastungen, vgl. Schneider & Preckel, 2017) sowie internale Faktoren. Letztere ergeben sich aus der Auseinandersetzung des Lernenden mit dem Lernsetting, z. B. aus der wahrgenommenen Usability und Nützlichkeit (vgl. Joo, Lim & Kim, 2011). Anpassungsmöglichkeiten betreffen vor diesem Hintergrund:

- Anpassungen des Lernsettings an Lernendencharakteristika, die bereits vor der Lehr-Lern-Situation vorliegen, z. B. eine unterschiedlich intensive didaktische Anleitung, angelehnt an das Vorwissen,
- Anpassungen an Bedarfe der Lernenden, die aus externalen Faktoren erwachsen, z. B. größere zeitliche Flexibilität für Lernende mit Kind sowie
- Anpassungen zur Optimierung des aktuellen Lernens im Lernsetting, z. B. Verbesserungen bei der Bedienbarkeit der Lernumgebung.

Letztere stehen im Folgenden im Fokus. Von der erfolgreichen Interaktion der Lernenden mit dem digitalen Lernsetting hängt der Lernerfolg ab. Eine Vielzahl empirischer Studien beschreibt Variablen, die auf die Interaktion Einfluss nehmen. Dieser Artikel fokussiert die Nutzer*innenfreundlichkeit bzw. Bedienbarkeit („perceived ease of use"), die neben der wahrgenommenen Nützlichkeit – in der Regel vor dem

Hintergrund der theoretischen Rahmung durch das Technology Acceptance Model – als einer der wichtigsten Einflussfaktoren für die Nutzung von IT-Systemen herausgearbeitet wurde (Venkatesh & Davis, 2000). Die Bedienbarkeit bezieht sich in Lehr-Lern-Kontexten auf die Frage, inwieweit digitale Lehr-Lern-Angebote aus Perspektive der Nutzer*innen einfach genug zu bedienen sind, um die Kosten der Nutzung (z. B. zeitliche und kognitive Ressourcen) tief genug und die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Nutzung hoch genug erscheinen zu lassen. Die Wahrnehmung der Bedienbarkeit beeinflusst die Nutzer*innenakzeptanz, die Nutzer*innenzufriedenheit sowie die Art, das Ausmaß und die Persistenz der Nutzung (Legris, Ingham & Collerette, 2003). Für die Adaption von Remote-Laboren wurden im Projekt vier übergeordnete Fragestellungen identifiziert (vgl. Tab. 1).

Tabelle 1: Vorgehen bei der Adaption eines Remote-Labors an Bedarfe der Lernenden

Fragestellung	Ziele
I. Was ist die Zielstellung der Anpassung?	Festlegung der vorrangig mit der Anpassung verfolgten Ziele, z. B. Steigerung des Lernerfolgs, Verringerung von Drop-Out, Steigerung der Motivation
II. Woran wird angepasst?	Identifizierung der Bedarfe der Lernenden zur Ermöglichung der Erreichung der Zielstellung (vgl. Hawlitschek, Krenz & Zug, 2019)
III. Wann wird angepasst?	Identifizierung von Indikatoren für Anpassungsbedarfe (vgl. Hawlitschek, Köppen, Dietrich u. a., 2019)
IV. Wie wird angepasst?	Identifizierung von didaktischen Interventionen, welche die Erreichung der Zielstellung unterstützen können (vgl. Hawlitschek, Dietrich & Zug, 2019)

In diesem Artikel wird auf die Verbesserungsbedarfe der Lernenden hinsichtlich der Bedienbarkeit, die daraus abgeleiteten Veränderungen des Remote-Labors und die Ergebnisse einer Untersuchung zur Wirkung dieser Veränderungen eingegangen. In Bezug auf die Untersuchung weiterführender Fragestellungen, was die Anpassung von Remote-Laboren an die Bedarfe der Lernenden angeht, wird auf die in Tabelle 1 genannten Publikationen verwiesen.

Anpassung als sukzessive Weiterentwicklung eines Remote-Labors

Die Evaluation der Weiterentwicklung des Remote-Labors erfolgte formativ mithilfe eines Mixed-Methods-Ansatzes in Form eines Paralleldesigns. Die Auswahl des Designs liegt der Motivation „additional coverage“ zugrunde, die den Wunsch ausdrückt, durch verschiedene Methoden eine erweiterte Perspektive auf den Untersuchungsgegenstand zu erhalten (vgl. Kuckartz, 2014, S. 66–69). Die vorliegende Untersuchung besteht dabei aus zwei quantitativen Studierendenbefragungen zur Evaluation der ersten Version (Studie 1) und der Weiterentwicklung (Studie 3) des Remote-Labors. Letztere wurde durch die inhaltsanalytische Auswertung von leit-

fadengestützten Interviews mit Studierenden und Tutor*innen ergänzt, um die Bedarfe der Studierenden besser identifizieren zu können (Studie 2). Die Befunde der drei Studien flossen in die schrittweise Weiterentwicklung des Remote-Labors ein.

Studie 1: Evaluation Ausgangssituation

Im Wintersemester 2016/2017 arbeiteten die Studierenden der Informatik in der Lehrveranstaltung „Prinzipien und Komponenten eingebetteter Systeme“ der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg mit der Basisversion des Remote-Labors. Nach Abschluss der Lehrveranstaltung wurden sie per E-Mail gebeten, an einer Befragung zur Evaluation teilzunehmen. Ziel war es, die Ausgangssituation abzubilden und Potential für die Weiterentwicklung des Remote-Labors zu identifizieren. Dabei konnten die Rückmeldungen von 34 Studierenden erfasst werden. Es wurde einerseits die Bedienbarkeit (vgl. Legris, Ingham & Collerette, 2003) sowie die Zuverlässigkeit der Roboter bzw. des Remote-Labors auf einer fünfstufigen Likert-Skala (stimme gar nicht – stimme voll zu) abgefragt (vgl. Tab. 2). Zudem bekamen die Studierenden in einer offenen Frage die Möglichkeit, Probleme und Herausforderungen bei der Nutzung des Remote-Labors zu artikulieren.

Tabelle 2: Items zur Bedienbarkeit und Zuverlässigkeit des untersuchten Remote-Labors

Bedienbarkeit (Cronbachs Alpha: 0,81)	Zuverlässigkeit
Die Bedienung des Remote-Labors ist intuitiv.	Die Roboter haben zuverlässig funktioniert.
Die Interaktion mit dem Remote-Lab-System ist klar und verständlich.	Das Remote-Labor hat zuverlässig funktioniert.
Das Remote-Labor gibt klare und verständliche Rückmeldungen.	
Die Fehlermeldungen des Remote-Labors sind bei der Lösung von Problemen hilfreich.	
Ich finde, dass das Remote-Lab-System insgesamt einfach zu bedienen ist.	

Ergebnisse

Die Bedienbarkeit des Remote-Labors (M: 3,48, SD = 0,73) wird von den Studierenden als mittelmäßig bis eher gut eingeschätzt. Die Zuverlässigkeit der Roboter wird als eher schlecht bis schlecht beurteilt (M = 1,56, SD = 0,66). Das Remote-Labor selbst wird in Bezug auf seine Zuverlässigkeit als mittelmäßig bis eher schlecht eingeschätzt (M = 2,47, SD = 1,31). Die Antworten auf die offene Frage beschreiben am häufigsten (11 Nennungen) Probleme mit Aufgaben, die den Studierenden ohne direkte Interaktion mit den Robotern als unlösbar erschienen und konkrete Probleme mit der Bedienbarkeit (10), z. B. Verbindungsprobleme (3).

Schlussfolgerungen

Aus den Ergebnissen der Evaluation lassen sich folgende Handlungsbedarfe ableiten:

- Die erste Version der Roboterhardware hat sich nicht bewährt und musste ersetzt werden. Die ursprünglich aus Flexibilitätsgründen genutzte „fliegende“ Verdrahtung ist für den Dauerbetrieb ungeeignet.
- Die Aufgabenstellungen ließ es offen, ob die Studierenden die Aufgaben im Remote-Labor-Modus realisieren oder mit zusätzlich bereitgehaltenen (aber nie genutzten) Robotersystemen während der Übungen. Entsprechend waren einige Aufgaben wie die Sensorkalibrierung im Remote-Kontext aufwändiger zu lösen. Dieser hybride Ansatz wurde aufgegeben.
- Mit Blick auf die bessere Nachvollziehbarkeit der internen Abläufe wird das ArduinoView-Konzept in das Remote-Labor integriert, sodass die Studierenden die internen Abläufe besser und individueller aufbereiten und visualisieren können.

Studie 2: Qualitative Evaluation der zweiten Version des Remote-Labors

Das weiterentwickelte Remote-Labor wurde im Wintersemester 2017/2018 erneut eingesetzt und zunächst begleitend evaluiert. Zielstellung der Evaluation war es, die zweite Version des Remote-Labors insbesondere mit Blick auf die Bedarfe der Studierenden zu verbessern. Hierfür wurde im letzten Drittel der Vorlesungszeit eine qualitative Studie mittels leitfadengestützter Interviews mit zwei Studierenden und drei studentischen Tutor*innen durchgeführt, um ihre Einschätzungen in Bezug auf Nachteile und Potentiale der Weiterentwicklung des Remote-Labors zu erheben. Der Erhebungszeitpunkt und die Auswahl der Befragten erfolgten auf Grundlage von forschungspraktischen Überlegungen. So hatten diese bereits im letzten Drittel der Vorlesungszeit Erfahrungen mit dem Remote-Labor gesammelt und waren für die Studie aufgrund der laufenden Präsenzveranstaltung persönlich ansprechbar. Im Gegensatz zu den quantitativen Befragungen wurden auch die Tutor*innen einbezogen, da sie, so die Vermutung, aufgrund ihrer Doppelrolle als Endnutzer*innen und Lehrende zusätzliche Potentiale und Probleme des Remote-Labors würden benennen können. Die durchschnittliche Länge der Interviews betrug ca. 53 min. Die Audioaufnahmen der Befragungen wurden transkribiert und mittels qualitativer inhaltlich-strukturierender Inhaltsanalyse ausgewertet (vgl. Mayring, 2015).

Ergebnisse

Die Reaktionen der Studierenden und Tutor*innen auf die Fragen, welche Schwierigkeiten und Gestaltungspotentiale sie in Bezug auf das Remote-Labor identifizieren, rekurrieren auf die Roboterhardware und das Nutzer*inneninterface des Systems. Wird von den Befragten der Bereich Roboterhardware angesprochen, problematisieren sie meist die häufig auftretenden Motor- und Sensorprobleme, welche die Nutzung der Roboter einschränken oder verhindern. Die Tutor*innen, die auch die erste Version des Remote-Labors kennen, heben zugleich die positive Weiterentwicklung in diesem Bereich hervor. Die erste Version der Roboter hatte oft Funktionsstörun-

gen, z. B. aufgrund von abgedrehten Rädern bei Fehlbedienung durch Lernende, abgerissene Kabel oder veränderte Steckerkonfigurationen.

Steht hingegen hinsichtlich der zweiten Version des Remote-Labors das Nutzer*inneninterface im Fokus der Betrachtung, werden die drei Themenbereiche Inhalte, Didaktisches Design und Usability adressiert. Am kritischsten sehen die Studierenden und Tutor*innen im inhaltlichen Bereich das Maß an Vorwissen, das für die Bearbeitung der Aufgaben vorausgesetzt wird. Gleichfalls wird bemängelt, dass der Unterschied zwischen dem eher abstrakten Programmieren für Desktopanwendungen und dem hardwarenahen Programmieren, wie es für die Implementierung hier gefordert wird, nicht nachvollziehbar dargestellt wird. Im Einklang mit den formulierten Problemen regen die Befragten an, die Inhalte einführend zu erklären und ein vertiefendes Tutorial bereitzustellen, um fehlendes Vorwissen auszugleichen. Die das didaktische Design betreffenden Kritikpunkte beziehen sich primär auf den Umfang des Fließtextes der Lerninhalte und auf die nicht vorgesehene Gruppenarbeit. Darüber hinaus wird bemängelt, dass die eingesetzten Roboter aufgrund der räumlichen Trennung und ihres geschlossenen Aufbaus wie eine Art Black Box funktionieren. In der Konsequenz wünschen sich die Studierenden und Tutor*innen, dass Gruppenarbeit ermöglicht wird und Inhalte didaktisch besser aufbereitet werden, z. B. durch Animationen. Sehr häufig beziehen sich die Ausführungen der Befragten auf den Themenbereich Usability. Die dabei aufgeführten Probleme erstrecken sich von einer eingeschränkten Funktionsfähigkeit des Remote-Labors (z. B. Bugs, ungültige Links) über erschwerte Bedingungen (z. B. schlechte Qualität des Livestreams und verzögerte Bildübertragung, wenig intuitive und schlecht dokumentierte Ansteuerung von ArduinoView) bis hin zu Elementen, die zumindest für Irritationen oder Unklarheiten sorgen (z. B. wenig intuitive Navigation und ungünstiger Aufbau des Remote-Labors oder unverständliches Feedback in Bezug auf die Editoreingaben). Eine Verbesserung könnte aus Sicht der Befragten erreicht werden, indem ein Debugger oder ein ausführlicher Bugreport integriert werden würde. Zudem sollten das Design und der Aufbau sowie die Navigation des Remote-Labors verbessert und intuitiver gestaltet werden. Um die schlechte Bildqualität des Livestreams zu beheben, wird zudem eine Full-HD-Übertragung empfohlen.

Diskussion

Aus den Befunden lassen sich Schlussfolgerungen und Empfehlungen für die Roboterhardware und das Nutzer*inneninterface des Remote-Labors ableiten:

- Die Stabilität des Systems sollte weiter verbessert werden, d. h. Funktionsstörungen aufgrund von z. B. defekten Motoren, Rädern oder Sensoren sollten verhindert werden.
- Die Lerninhalte sollten in ein Tutorial eingebettet werden, um die Heterogenität der Studierenden abzudecken. Dabei ist der Textumfang der Aufgabenstellung zugunsten von Abbildungen, Animationen o. Ä. zu reduzieren. Für diese Umsetzung wird LiaScript[1] entwickelt und eingesetzt (vgl. Dietrich, 2019).

1 Projektwebseite https://liascript.github.io/

- Die mehrfach gewünschte Gruppenarbeit, also das gemeinsame Einwählen auf einem Account und die gemeinsame Arbeit am Code, ist zum gegenwärtigen Stand des Systems nicht umsetzbar.
- Die genannten „unverständlichen Editorausgaben“ sind Standardnachrichten des Kompiler. Diese müssen sich die Studierenden der Informatik als Arbeitsgrundlage schlicht selbst erarbeiten. Gleichwohl wurde in Studien untersucht, inwieweit dieser Lernprozess durch Fehlersammlungen und erweiterte Kommentare unterstützt werden kann (vgl. Hawlitschek, Dietrich & Zug, 2019).
- Um die Benutzer*innenfreundlichkeit des Remote-Labors zu erhöhen, sollte das Design, der Aufbau und die Navigation verbessert und intuitiver gestaltet werden. Zudem sollte die Funktionsweise des Remote-Labors im Allgemeinen detaillierter erläutert werden.

Studie 3: Quantitative Evaluation der zweiten Version des Remote-Labors

Im Wintersemester 2017/2018 wurde nach Abschluss der Lehrveranstaltung eine Befragung mit den Studierenden durchgeführt, um die Beurteilung der zweiten Version des Remote-Labors mit der ersten Version vergleichen zu können. 34 Studierende nahmen teil. Es wurden dieselben Items genutzt, die auch in Studie 1 zum Einsatz kamen.

Ergebnisse

Die Bedienbarkeit der zweiten Version des Remote-Labors (M: 2,81, SD = 0,77) wird von den Studierenden als mittelmäßig bis eher schlecht eingeschätzt. Die Zuverlässigkeit der Roboter wird als gut beurteilt (M = 3,88, SD = 1,12), die des Remote-Labors erneut als mittelmäßig bis eher schlecht (M = 2,35, SD = 1,24). Eine ANOVA zeigt, dass die Studierenden 2016/17, die mit der ersten Version des Remote-Labors gearbeitet hatten, die Bedienbarkeit signifikant besser beurteilten als die Studierenden 2017/18 ($F(1,48) = 8,94$, $p < .01$, $Eta^2 = ,16$). Bei der Zuverlässigkeit des Remote-Labors ergeben sich keine signifikanten Unterschiede ($F(1,66) = 0,04$, $p = ,85$, $Eta^2 = ,00$). Die Zuverlässigkeit der Roboter wird von den Studierenden 2017/18, die mit der zweiten Roboter-Version arbeiteten, als signifikant besser eingeschätzt ($F(1,66) = 108,3$, $p < ,001$, $Eta^2 = ,62$).

Diskussion

Das Ergebnis von Studie 3 erfüllt nicht in allen Punkten die Erwartungen. Zwar ist es gelungen, die Zuverlässigkeit der Roboter signifikant zu steigern, dies lässt sich jedoch nicht bezüglich des Remote-Labors sagen. Die Einschätzung der Bedienbarkeit verschlechterte sich trotz der Verbesserungsbemühungen signifikant.

- Mit der neuen Version des Nutzer*inneninterfaces wuchs die Zahl der Features des Remote-Labors deutlich an. Ausgehend von der dafür notwendigen Programmierarbeit war das System noch nicht ausreichend getestet.
- Die Verdopplung der Zahl der Roboter und die Möglichkeit, auch höhere Auflösungen beim Videostream abzurufen, lastete die Rechentechnik voll aus, was

die angesprochenen Verzögerungen hervorrief. Hier wurde in Version 3 ein leistungsfähigerer Server installiert und die Auflösung reduziert.
- Über Weihnachten gab es einen Fehler im System, der die Funktionalität des Remote-Labors zeitweilig beeinträchtigte. Es ist möglich, dass diese Erfahrung sich auf die studentische Bewertung der Bedienbarkeit auswirkte.

Die Überarbeitung des Remote-Labors brachte eine ganze Reihe von Neuerungen mit sich, die im Vorfeld nicht im Livebetrieb mit den Studierenden getestet werden konnten. Die Gefahr, dass man das Ziel zunächst verfehlt und die Studierenden beispielsweise die Navigation nicht so intuitiv finden, wie von den Entwicklern antizipiert, ist dann natürlich groß. Hier wäre eine kleinteiligere, formative Evaluation wünschenswert gewesen.

Überblick zu den technischen Adaptionsschritten als Reaktion auf die Evaluationsergebnisse

Tabelle 3 gliedert den Entwicklungsfluss über die Versionen des Remote-Labors anhand der in Abschnitt 1 genannten Kategorien. Dabei illustriert die Darstellung, wie die Features und Adaptionen, ausgehend vom Feedback der Studierenden, adaptiert und angepasst wurden. Gleichzeitig unterlag das System insbesondere auf der Back-End-Ebene umfangreichen Anpassungen. So wurden schrittweise Vereinheitlichungen bei den Nutzer*innenschnittstellen vorgenommen und ein transparentes Modell für die Beschreibung der Inhalte definiert. Der Fokus der Darstellung hier lag aber auf der durch die Angaben der Studierenden direkt oder indirekt motivierten Anpassungen.

Fazit

Im vorliegenden Beitrag wird die schrittweise Realisierung eines Remote-Labors im Kontext der Informatikausbildung beschrieben. Ausgehend von den technischen und didaktischen Herausforderungen für die Etablierung dokumentiert er das Vorgehen über drei Versionen hinweg, wobei Teile der notwendigen Anpassung aus den Nutzer*innenfeedbacks der Studierenden und der Tutor*innen getriggert wurden. Im Vordergrund stand dabei die Evaluation eines jeweils angepassten Sets von Features, die für die Studierenden als Nutzende unmittelbar sichtbar wurden. Die parallele Adaption auf der Back-End-Ebene wurde an dieser Stelle nur mittelbar untersucht.

Im Rückblick lassen sich für die Realisierungsstrategie eines Remote-Labors folgende Regeln ableiten:

1. Die Einbettung eines Remote-Labors bedarf einer sorgfältigen Einführung für die Teilnehmer*innen der Veranstaltung. Neben der Darstellung des Gebrauches müssen die Nutzungskonzepte der Implementierung in ihrer Intention vermittelt werden, um die Akzeptanz und Toleranz der Studierenden zu steigern.

2. Der Betrieb eines Remote-Labors bedeutet analog zum allgegenwärtigen Zugriff durch die Studierenden auch fehlende Eingriffs- und Wartungsmöglichkeit vonseiten der Lehrenden. Hier sollten mögliche Ausnahmesituationen und webseitige/örtliche Reaktionsmöglichkeiten während des Entwurfes berücksichtigt werden.
3. Vor dem Hintergrund der intensiveren Nutzung ist die Zuverlässigkeit der gesteuerten Hardware von besonderer Bedeutung. Da hier häufig individuelle Lösungen zum Einsatz kommen, die spezifischen didaktischen Zielen folgen, muss der Langzeitevaluation genügend Vorlauf eingeräumt werden, bevor die Integration erfolgt.
4. Arbeitsgruppen, die ein Remote-Labor konzipieren, sollten keinen „weichen Übergang“ vorsehen. Ein Nebeneinander von Lehre im realen Labor und webbasiertem Zugriff verkompliziert die Umsetzung und generiert zusätzliche Herausforderungen. Dies bedeutet dann aber auch, dass das bestehende Lehr- und Aufgabenset komplett angepasst werden muss.
5. Teile der Entwicklungsarbeit wären vermeidbar gewesen, wenn Kernelemente anderer Plattformen für Remote-Labore genutzt worden wären. Hierbei entscheiden sich die Entwicklerteams häufig zu rasch für eigene, spezifisch zugeschnittene Lösungen, statt unter Tolerierung von Kompromissen auf bestehende Module zurückzugreifen. Gegebenenfalls kann dies auch bedeuten, dass zunächst keine vollständige Integration in eine geschlossene Webseite möglich ist.
6. Das Testen des Gesamtsystems durch Nicht-Entwickler*innen ist für die Sicherstellung einer hinreichenden Zuverlässigkeit von großer Bedeutung. Das hierfür notwendige Zeitfenster sollte ausreichend groß bemessen sein, um eine heterogene Testgruppe anhand realistischer Aufgabenstellungen und Bedingungen zu erfassen. Darüber hinaus muss die Möglichkeit gegeben sein, die Rückmeldungen entsprechend in das System einzupflegen.

Die Systematisierung dieser Fragestellungen in einem Leitfaden für den Entwurfsprozess von Remote-Laboren ist Gegenstand der aktuellen Forschungsaktivitäten der Autor*innen. Dieser soll dann bei der avisierten Umsetzung des Nachfolgelabors für die eLab-Installation angewandt werden.

Tabelle 3: Übersicht der 3 Versionen des Remote-Labors

	Roboterhardware	**Laborumgebung**	**Nutzer*innen-interface**	**Monitoring der Lernenden**
Version 1	Variable Plattform mit individuellem elektrischen Design, das eine Rekonfiguration sicherstellen soll, Batterien zur Energieversorgung	Umsetzung mit drei Robotern, Integration eines adaptiven Lampensystems, um eine homogene Ausleuchtung sicherzustellen, Einbindung eines „Moving Targets“ in das Szenario, Möglichkeit des Sperrens des Onlinezugriffs während Lehrveranstaltungen	Wechsel von der Übermittlung des ausführbaren Programmes hin zur Übersendung des Programmcodes mit Kompilierung auf dem Server	Erstellung von Streak-Modellen, die die Dauer von Fehlerzuständen auswerten, Erfassung der Häufigkeit bestimmter Fehlertypen, die dann in der Vorlesung besprochen wurden
Kritik aus Studie 1	Aufwändige Wartung und Laden der Akkumulatoren, elektrische und mechanische Stabilität der Plattform, Umfallen der Roboter, Flash-Zyklen der Controller als Herausforderung	Mangelnde Verfügbarkeit der Roboter, Schwierigkeiten bei der Abschätzung der Sensorfehler, die Modelleisenbahn als Trigger für die Sensoren wurde als „Spielerei“ betrachtet	Kaum Nutzung der Hilfestellungen (Datenblätter) durch die Studierenden, die als Links im System bereitgestellt wurden	Keine allgemeine API zum Zugriff auf die Datenbank, was die Onlineauswertung erheblich erschwerte
Version 2	Integriertes Robotersystem mit geschlossenem Aufbau, Energieversorgung per Kabel, stabilere Bauweise (z. B. Erhöhung der Anzahl der Rollen), Ansteuerung der Roboter mittels Shift-Register	Vergrößerung der Zahl der Roboter (6), um die gestiegene Auslastung abbilden zu können, es werden keine nicht-remote steuerbaren Roboter mehr vorgehalten, karierter Untergrund zur Abschätzung von Abständen zu Wänden etc.	Integration begleitender Kursmaterialien und eigener Programmierumgebung, variable Kameraauflösung, Multi-File-Projekte erlauben komplexere Programme, Integration des ArduinoView-Konzeptes, Versionsmanagement	Erweiterte Schnittstellen für die Datenakquise der Aktivitäten der Lernenden, Evaluation des übermittelten Codes anhand vordefinierter Muster, Integration von Fehlerbeispielen in die Vorlesungen
Kritik aus Studie 2 und 3	Stabilität der Plattform (sich lösende Räder und Funktionsstörungen der Sensoren), Verschleiß der Motoren bei Fehlbenutzung	Verzögerungen bei der Darstellung des Videosignals	Kritik an den Code-Vorlagen, die aus mehreren Dateien bestehenden Vorlagen erschweren die Integration vorheriger studentischer Codefragmente	
Version 3	Neudesign der Elektronik, insbesondere wurde ein intelligenter Motortreiber-IC verbaut, der Überlastzustände erkennt und das System neu startet, Ersatz einzelner Sensoren	Leistungsfähiger Server für die Videobereitstellung integriert	Verschmelzung von Aufgabenbeschreibung und Eingabemechanismen in einem Format, erweiterte Dokumentation des Labors und multimediale Aufbereitung der Aufgaben	Integration eines Dash-Boards für die Visualisierung des Fortschrittes der Lernenden

Danksagung

Dieses Projekt wurde aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 16DHL1033 und 16DHL1034 gefördert.

Literaturverzeichnis

Alkhaldi, T.; Pranata, I. & Athauda, R. I. (2016). A review of contemporary virtual and remote laboratory implementations: observations and findings. *Computers in Education*, 3(3), 329–351.

Chen, O.; Kalyuga, S. & Sweller, J. (2017). The Expertise Reversal Effect is a Variant of the More General Element Interactivity Effect. *Educational Psychology Review*, 29(2), 393–405. doi: 10.1007/s10648-016-9359-1.

Dietrich, A. (2019). Liascript: A Domain-Specific-Language for Interactive Online Courses. In M. B. Miguel Nunes & P. Isaias (Hrsg.), *Proceedings of the 13th International Conference on e-Learning* (S. 186–194), Lissabon: IADIS Digital Library.

Hawlitschek, A.; Köppen, V.; Dietrich, A. & Zug, S. (2019). Drop-out in programming courses – prediction and prevention. *Journal of Applied Research in Higher Education*, 12(1), 124–136. doi: 10.1108/JARHE-02-2019-0035.

Hawlitschek, 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), New York: Springer.

Hawlitschek, 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. Proceedings der 17. Fachtagung Bildungstechnologien* (S. 335–336), Bonn: Gesellschaft für Informatik e. V.

Jäger, G.; Zug, S.; Hawlitschek, A.; Krenz, T. & Stolze, R. (2018). Chancen und Herausforderungen des Einsatzes von Remote-Laboren in der Lehre: Sicherheitskonzepte. In D. Krömker & U. Schroeder (Hrsg.), *DeLFI 2018 – Die 16. E-Learning Fachtagung Informatik* (S. 271–272). Bonn: Gesellschaft für Informatik e. V.

Joo, Y. J.; Lim, K. Y. & Kim, E. K. (2011). Online university students' satisfaction and persistence: Examining perceived level of presence, usefulness and ease of use as predictors in a structural model. *Computers & Education*, 57(2), 1654–1664. doi: 10.1016/j.compedu.2011.02.008.

Kuckartz, U. (2014). *Mixed Methods. Methodologie, Forschungsdesigns und Analyseverfahren*. Wiesbaden: Springer VS.

Legris, P.; Ingham, J. & Collerette, P. (2003). Why do people use information technology? A critical review of the technology acceptance model. *Information & Management*, 40(3), 191–204. doi: 10.1016/S0378-7206(01)00143-4.

Mayring, P. (2015). *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken*. Weinheim/Basel: Beltz.

Orduña, P.; García-Zubia, J.; Rodriguez-Gil, L.; Irurzun, J.; López-de-Ipiña, D. & Gazzola, F. (2012). Using LabVIEW remote panel in remote laboratories: Advantages and disadvantages. In *Proceedings of the 2012 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)* (1–7).

Park, J.-H. & Choi, H. J. (2009). Factors Influencing Adult Learners' Decision to Drop Out or Persist in Online Learning. *Educational Technology & Society*, 12(4), 207–217.

Schneider, M. & Preckel, F. (2017). Variables associated with achievement in higher education: A systematic review of meta-analyses. *Psychological Bulletin*, 143(6), 565–600. doi: 10.1037/bul0000098.

Venkatesh, V. & Davis, F. D. (2000). A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model: Four Longitudinal Field Studies. *Management Science*, 46(2), 186–204. doi: 10.1287/mnsc.46.2.186.11926.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Laborinfrastruktur Vers. 1. Auf dem Rechner im Vordergrund ist die zugehörige Bedienoberfläche sichtbar. 147

Abb. 2 Laborinfrastruktur Vers. 3 mit insgesamt 6 Robotersystemen 147

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Vorgehen bei der Adaption eines Remote-Labors an Bedarfe der Lernenden . . 149

Tab. 2 Items zur Bedienbarkeit und Zuverlässigkeit des untersuchten Remote-Labors 150

Tab. 3 Übersicht der 3 Versionen des Remote-Labors 156

Virtuelle Realität des Unsichtbaren: Verständnisfördernde Visualisierung und Interaktivierung strömungsmechanischer Phänomene

Konrad E. R. Boettcher, Dana J. Boettcher, Alexander S. Behr

Abstract

Obwohl Strömungsmechanik durch die Allgegenwärtigkeit von Strömungen ein anschaulich zu lernendes Gebiet der Physik sein sollte, fällt vielen Studierenden bereits das Verständnis der Grundlagen schwer. Die Anschauung ist nur auf den ersten Blick gegeben, da lediglich Auswirkungen von Strömungen sichtbar sind – nicht sichtbar sind Strömungen selbst und warum diese die Beobachtungen verursachen. Solche Erklärungen sollten in Laborexperimenten visualisiert werden. Dabei kann zwar bspw. der prinzipielle Strömungsverlauf durch verschiedene Visualisierungsmethoden sichtbar gemacht werden, Geschwindigkeitsfelder, Druckfelder oder Schubspannungen als Ursache der beobachteten Auswirkungen einer Strömung aber sind – wenn überhaupt – ungleich schwieriger und aufwändiger zu visualisieren. Der Fokus eines Versuches würde sich von der Strömungsphysik auf die Messtechnik verschieben. Da zudem häufig deutlich über 100 Studierende die Grundlagenveranstaltung besuchen, sind begleitende, thematisch passende Laborpraktika logistisch kaum durchführbar.

In diesem Beitrag wird eine vor diesem Hintergrund entwickelte virtuelle Laborumgebung vorgestellt.[1] Dabei wird auf die Generierung der Strömungsdaten und die Konstruktion des virtuellen Labors eingegangen. An Beispielen werden die Vorteile der Sichtbarmachung bislang kaum oder nicht sichtbarer Sachverhalte, die Integration vorlesungsbegleitenden, forschenden Lernens in eine Großveranstaltung und bisherige Evaluationsergebnisse erläutert.

Schlüsselwörter: Strömungsmechanik, Virtual Reality, virtuelles Labor, immersives Lernen

1 Das zugrunde liegende Projekt wurde mit Mitteln für Qualitätsverbesserungsmaßnahmen der Lehre der Fakultät Bio- und Chemieingenieurwesen gefördert.

Einleitung

Die Strömungsmechanik beschreibt die Physik sich bewegender Fluide, wozu v. a. Flüssigkeiten und Gase zählen. Nach Laurien & Oertel jr. (2011) können dazu drei gängige Methoden verwendet werden: i. Die theoretische Methode beschreibt die Vorgänge auf mathematischer Ebene und liefert die umfassendsten, allgemeingültigen Aussagen. Sie ist jedoch auf einfache Strömungen beschränkt. ii. Die experimentelle Methode verwendet Versuche mit oft aufwändiger Messtechnik. iii. Die CFD-Methode (computational fluid dynamics) verwendet computergestützte Berechnungsverfahren und verdrängt zunehmend die beiden anderen, da sie auch für deutlich kompliziertere Probleme spezielle Lösungen ermöglicht. Sie liefert häufig günstiger und schneller Ergebnisse als Experimente und zusätzlich einen Einblick in messtechnisch kaum zugängliche Strömungsgebiete und physikalische Größen.

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Frage, welche Möglichkeiten die Integration der Strömungsmechanik in ein Virtual-Reality-Labor (VRLab) für die Lehre eröffnet. Im nächsten Abschnitt wird dazu auf bislang übliche Lehrformen eingegangen, anschließend auf die Realisierung und allgemeine Vor- und Nachteile. Drei VRLabs werden mitsamt den Ergebnissen des Lehreinsatzes vertieft dargestellt. Das Ende bildet eine Zusammenfassung und ein Ausblick.

Lehre der Strömungsmechanik

Die Grundlagen der Strömungsmechanik werden in großen Veranstaltungen auf der mathematisch-physikalischen Ebene gelehrt. Dies stellt viele Studierende vor große Schwierigkeiten, ist aber aufgrund wissenschaftlicher und beruflicher Anforderungen notwendig. Einen anderen Zugang würde die selbstständige Durchführung veranstaltungsbegleitender Experimente bieten, in denen die Studierenden sich forschungsbasierend grundlegende Aspekte der Strömungsmechanik selbst erarbeiten würden. Während sich Laborpraktika nach Jungmann (2011) oft zum forschenden Lernen umgestalten lassen, ist dies bei großen Grundlagenveranstaltungen deutlich schwieriger. So sind nach Tekkaya et al. (2016) Praktika in kleinen Gruppen bei Großveranstaltungen logistisch und finanziell kaum zu bewältigen, was verstärkt gilt, wenn die Veranstaltung wöchentlich begleitet werden soll. Solche Laborpraktika werden kaum, wenn überhaupt, für erfahrungsbasiertes Lernen eingesetzt. Dabei könnten nach Tekkaya et al. (2016) gewonnene Aha-Effekte die Auseinandersetzung mit der Thematik stärken. Eine Verschiebung vom Lehren zum Lernen Barr & Tagg (1995) ist über veranstaltungsbegleitende, forschungsbasierte Laborversuche somit schwierig umzusetzen. Daher werden Experimente, Videos oder CFD-Simulationen meist im Hörsaal vorgeführt.

Studierende führen Experimente üblicherweise erst nach dem Semester der Veranstaltung durch. In semesterbegleitenden Laborpraktika könnten aber theoretische Konstrukte zur Strömungsmechanik erfahren, beobachtet und in eine Hand-

lung überführt werden. Dies wäre nach Reich (2008) vorteilhaft, da möglichst viel konstruktives Lernen im Lehrprozess verwirklicht werden sollte.

Zusätzlich werden in Laborversuchen aufgrund des messtechnischen Aufwands oft nur Gesamtgrößen gemessen, was die physikalische Anschauung nicht verbessert: Werden z. B. die Auftriebs- und Widerstandskraft eines umströmten Körpers gemessen, bleibt deren strömungsmechanische Ursache, nämlich die Verteilung von Druck und Reibung auf der Körperoberfläche, verborgen.

Da Experimente zunehmend durch CFD-Simulationen abgelöst werden, ist die Frage naheliegend, ob eine selbstständige Anwendung dieser Methode dem Lernprozess dienlich ist. Dieser Gedanke scheint konsequent, weil damit alle strömungsmechanischen Größen bestimmbar sind, mit denen die Studierenden physikalische Ursachen erforschen könnten. Für die Lehre bietet sich dieser Ansatz jedoch nicht an, da damit nur eine weitere Lehrform auf mathematisch-physikalischer Ebene bereitgestellt würde. CFD-Simulationen sind nach Laurien & Oertel jr. (2011) von ungeübten Nutzern zudem kaum durchführbar. Kenntnisse in professioneller Software sowie mathematisches und strömungsmechanisches Vorwissen sind zwingend nötig, werden aber erst in Grundlagen- und Vertiefungsveranstaltungen vermittelt. Im nächsten Abschnitt werden technische Aspekte der Erstellung und daraus entstehende Vorteile von VRLabs erläutert, in denen CFD-Ergebnisse für Studierende nutzbar gemacht werden.

Virtuelle Labore Strömungsmechanik

Dieser Abschnitt behandelt die prinzipielle Erstellung von VRLabs und erörtert prinzipielle Aspekte ihres Einsatzes.

Erstellung der Virtuellen Labore

Verschiedene Strömungen werden mit der kommerziellen CFD-Software *Ansys CFX* berechnet. Aus den Lösungen werden wichtige Eigenschaften extrahiert, welche die physikalische Grundlage der VRLabs bilden. Um den Aufwand für die Modellierung und den Datenexport zu minimieren, werden die untersuchten Strömungen im stets gleichen Rechengebiet berechnet, wobei undurchströmbare Bereiche durch einen ausreichend hohen Strömungswiderstand realisiert werden (Khadra et al., 2000). Die so bei allen CFD-Simulationen erzielte identische Geometrie vereinfacht den Datenimport durch die Verwendung gleicher Datenübertragungsskripte. Anschließend wird jedes VRLab mit der Software *Unreal Engine 4* von Epic Games als unabhängig lauffähiges Programm erstellt und den Studierenden zur Verfügung gestellt. Die Labore können aus der Ich-Perspektive frei begangen und durchflogen werden. Die Benutzeroberfläche ist vielen Studierenden aus diversen populären Computerspielen bekannt. Dies soll Widerstände bei ihnen reduzieren, was den Lernzugang verbessern kann (Merkel, 2008).

Es befinden sich verschiedene VRLabs in der Entwicklung, die nach Tekkaya et al. (2016) verschiedenen Labortypen zugeordnet werden können:

- Herleitungslabor: Erfahrung typischer Erhaltungsgleichungen als Lehr-/Lernlabor,
- Ähnlichkeitslabor: Entdeckung der Ähnlichkeitsmechanik im Forschungslabor,
- Visualisierungslabor: Typische Visualisierungsmethoden als integriertes Lehr-/Lernlabor,
- Nachvollziehen spezieller Sachverhalte wie Rotation in verschiedenen Wirbelarten als Mini-Lab,
- GS-Labor: Erfahrung und Entdeckung von Phänomenen einer Grenzschichtströmung als integriertes Forschungslabor.

Aspekte zum Einsatz virtueller Labore in der Strömungsmechanik

Organisatorische Vorteile entstehen durch eine hohe *Zugänglichkeit*. So ist das Labor auf Rechnern der untersten Leistungsklasse bei installierter Software auch offline stets verwendbar. Damit können Versuche auch zu einem späteren Studienabschnitt beliebig oft wiederholt werden. Während bei Remote-Laboren Probleme durch gleichzeitigen Zugriff durch Massive Open Online Labs gemindert werden müssen (Salzmann et al., 2018), ist bei der dezentralen Ausgestaltung des VRLabs dieses Problem nicht vorhanden, da die Studierenden ausschließlich ihre eigenen Geräte verwenden. Das VRLab ist damit von einer hohen *Ausfallsicherheit* geprägt und völlig losgelöst von physischer Wartung. So sind Versuche im VRLab auch bei geschlossenen Hochschuleinrichtungen, bspw. infolge einer Pandemieeindämmung, durchführbar: Eine Präsenz von Studierenden oder Angestellten an einem bestimmten Ort ist unnötig.

Experimentelle Vorteile ergeben sich durch die generelle Einsehbarkeit aller Versuchsstände von jedem Ort aus, da Geometrien (z. B. Rohre) transparent geschaltet werden können und die Bewegung im Labor keinen Beschränkungen unterliegt, was freies Entdecken ermöglicht. Dabei können mitströmende Partikel an *beliebige* Stellen ins Strömungsfeld eingebracht werden. Im VRLab müssen die Physik oder die Kausalität nicht strikt eingehalten werden. So können bspw. im Ähnlichkeitslabor das Fluid oder der gesamte Versuchsstand instantan gewechselt und die a priori bekannten physikalischen Größen ohne Messung und Auswertung sofort dargestellt werden, selbst wenn sie messtechnisch kaum zu erfassen sind. Beeinflussungen und Rückkopplungen, die in der Realität oder in CFD-Software kaum möglich wären, können programmiert werden. So führen Studierende Experimente nicht nur durch, sondern können auch als Probe, d. h. als strömendes Fluid, fungieren. Durch das Mitströmen als Fluidelement werden Phänomene und Kräfte durch programmierte Zwangsbewegungen immersiv erfahren, was bspw. im GS-Labor zum Erfahren der häufig übersehenen Verdrängungswirkung genutzt wird. González et al. (2013) und Price (2008) schreiben immersiven Lernumgebungen ein hohes Potential für die Lehre zu, womit das immersive VRLab die vier Virtualisierungsgrade nach

May (2017) reales Labor, Augmented-Reality-Labor, Remote-Labor und virtuelles Labor ergänzt.

Didaktische Vorteile ergeben sich nach Campbell (1999) schon durch den Einsatz neuer Technologie, was durch den Aha-Effekt die *Motivation* steigern und nebenbei nach Terkowsky et al. (2019) auch die *technische Kompetenz* fördern soll. Die Befangenheit einiger Studierender im realen Experiment im Umgang mit Maschinen aufgrund fehlender Hands-on-Erfahrung und einer Furcht vor Beschädigung oder Verletzung (Tekkaya, et al., 2016) dürfte im VRLab durch den gewohnten und gefahrlosen Umgang mit Computern schwächer ausgeprägt sein.

In realen Laborversuchen führen viele nebensächliche, aber notwendige Arbeitsschritte oft zu klar strukturierten, vorgegebenen Arbeitsabläufen. Nach Spath et al. (2013) erschwert das Abarbeiten von Aufgabenstellungen und Arbeitsschritten aber schöpferisches Denken. Die VRLabs sollen solches Denken unterstützen, indem für das Lernziel irrelevante Arbeitsschritte wie Versuchsstandumbauten, Justierungen oder langwierige Auswertungen entfallen und somit bspw. Vergleiche direkt durchgeführt werden können. Diese *didaktische Reduktion* spart begrenzte Versuchszeit ein, womit in den VRLabs den Studierenden mehr Selbstständigkeit zugemutet wird. Stehen nur kurze Zeiträume zur Verfügung, lassen sich virtuelle Labore einfacher erstellen als integrierte Lehr-/Lernlabore oder auch Forschungslabore. Nach Terkowsky & Haertel (2017) können sich selbstständige Lernfähigkeiten durch eigenständige Entwicklung der Fragestellung ausbilden. Dies könne mit der Entwicklung geeigneter Versuchsdurchführungen zur Bildung eines Forschergeists führen, der eine wichtige Voraussetzung für die Schöpfung kreativer Ideen sei. Daher werden im VRLab die Studierenden durch viele entdeckbare Inhalte darin unterstützt, kreative Fragestellungen zu entwickeln. Nach Bauer et al. (2014) ist dabei selbstbestimmte Flexibilität eine wichtige Anforderung an die Mitarbeiter in der Industrie 4.0. Phänomene und Effekte wie etwa die Verdrängungswirkung im GS-Labor können selbstständig entdeckt und ihre physikalische Ursache bereits vor der mathematischen Erklärung in einer späteren Vorlesung erkannt werden, wodurch ein überlagerter Flipped-classroom-Effekt entstehen kann.

Die Studierenden werden bei der Durchführung der virtuellen Laborversuche auf verschiedene Anforderungen der **Industrie 4.0** vorbereitet, indem Erfahrungen mit den maßgeblichen Organisationsgestaltungsprinzipien nach Herrmann et al. (2016), ausgenommen *dezentrale Entscheidungsabläufe*, automatisch adressiert werden:

Alle Parametereinstellungen, die Datenakquise und Einflussmöglichkeiten erfolgen in der virtuellen *Vernetzung* am digitalen Zwilling des Versuchsstandes. Die Erweiterung des digitalen Zwillings um die Messdaten aus der CFD-Simulation (z. B. Geschwindigkeitsfelder) erhöht die *Informationstransparenz*. Durch die Visualisierung und verständliche Darstellung der in der Simulation aggregierten Daten liefert das VRLab eine *Technische Assistenz* (z. B. Überführung der Geschwindigkeitsfelder in Stromlinien). Entscheidungen sollen so fundiert getroffen und Probleme schneller gelöst werden können, da bspw. der Strömungsverlauf direkt ersichtlich ist. Eine physische Unterstützung findet durch den vermiedenen Umgang mit gefährlichen Stoffen und Geräten statt.

Nachteile des VRLabs sind, wie bei Remote-Laboren, das Fehlen haptischer Erlebnisse und direkter Arbeit an typischen Gerätschaften. Das eigenständig lauffähige VRLab-Programm ermöglicht zwar, dass jeder Studierende Versuche allein durchführen kann. Dies vermindert das in der Praxis häufig beobachtete Verstecken leistungsschwächerer hinter leistungsstärkeren Studierenden. Damit einhergehend aber führen fehlende soziale Interaktionen innerhalb einer Praktikumsgruppe nicht zur Stärkung der Sozialkompetenz. Die didaktische Reduktion verhindert zudem die Erfahrung, dass nebensächlich strukturierte Arbeitsabläufe und Auswertungen zu wissenschaftlichen Laborversuchen gehören und sorgfältig durchgeführt werden müssen, um nicht das Gesamtergebnis zu gefährden.

Gestaltung und Einsatz spezieller VRLabs

Im Folgenden werden drei weitentwickelte VRLabs vorgestellt. Spezifisch werden die Vorteile gegenüber realen Laboren und die bisherigen Ergebnisse beim Lehreinsatz diskutiert.

Ähnlichkeitslabor

Das Lernziel ist hier die Analyse des Einflusses der vier Parameter Dichte, Viskosität, Einströmgeschwindigkeit und Geometriegröße auf das Strömungsfeld. Es soll entdeckt werden, dass nur das Zusammenwirken der Parameter in der Reynolds-Zahl, die das Verhältnis von Trägheits- zur Reibungskraft widerspiegelt, die Strömung bestimmt. Ursächlich für dieses Verhalten ist die Ähnlichkeitsmechanik, ein Grundpfeiler für Experimente, CFD-Simulationen und die mathematische Modellierung (Zierep, 1991), was aktive Bezüge zum Berufsleben herstellt. Die Studierenden können die von ihnen aufzustellende Hypothese mit in der Vorlesung aktuell behandelten Methoden mathematisch zeigen und erhalten damit über einen experimentellen Zugang Kenntnisse auf der mathematischen Ebene.

Das VRLab ist in zwei getrennt steuerbare Versuchsstände angeordnet, s. Abb. 1, links. Jeder Versuchsstand kann zwischen vier Standardformen wie Rohrerweiterungen oder Kanalumlenkung umgeschaltet werden. Dabei können die vier o. g. Parameter jeweils verdoppelt oder halbiert werden, wobei die Werte der Parameter und der Reynolds-Zahl stets sichtbar sind. Die dreidimensionale Strömung kann anhand strömender Partikel und darstellbarer Stromlinien sichtbar gemacht werden, Druck und Geschwindigkeit können als Farbverläufe angezeigt werden. Für forschendes Lernen wird keine Aufgabenstellung vorgegeben.

Abbildung 1: Gleichzeitige Darstellung beider Versuchsstände, hier oben mit transparenter und unten mit opaker Geometrie (links) und Entdeckungstour *im* Kanal (rechts)

Vorteile

In der Realität sind Druckfelder, Geschwindigkeitsfelder und Stromlinien nur aufwendig bestimmbar. Die Parameter sind nicht ohne Weiteres so änderbar, dass gleiche Reynolds-Zahlen vorliegen. Dichte und Viskosität sind nur begrenzt variierbar, eine Änderung der Versuchsstandsgröße nur durch weitere Versuchsstände mit teurer Messtechnik und Platzbedarf realisierbar. Dies alles aber ist für Vergleiche und das Aufstellen der Hypothese maßgeblich. Die technische Assistenz durch Angabe der Reynolds-Zahl und den direkten Vergleich der Strömung im zweiten Versuchsstand unterstützt weiterhin die Hypothesenfindung, da identische Strömungen bei gleicher Reynolds-Zahl direkt sichtbar sind.

Der Zeitgewinn der didaktischen Reduktion durch fehlende Umbauarbeiten, die direkte Visualisierung und Auswertung der Strömungen wird genutzt, um sich mit dem Versuch forschend auseinandersetzen zu können: Die durchströmten Geometrien können virtuell betreten und mitströmende Partikel händisch eingebracht werden, um die lokale Auswirkung von Trägheits- und Reibungskraft zu erforschen, ohne die Strömung durch die physische Anwesenheit zu beeinflussen. Bei Variation der Versuchsstandsgröße wird nur die angegebene Längenskala variiert. Die Partikel bewegen sich darin bei gleicher Geschwindigkeit langsamer wie in Abb. 2 an unterschiedlich weit vorangekommenen Partikeln ersichtlich. Derartiges unerwartetes Verhalten soll nach Terkowsky & Haertel (2017) das kritische Bewusstsein und damit das selbstreflektive, kritische Lernen stärken. Der Einfluss einer Parameteränderung auf die Trägheit kann durch die in Stufen exakt wählbaren anderen Parameter kompensiert werden. Die lebensalterabhängige Farbe der strömenden Partikel stellt die Ursache der sog. Verweilzeitverteilung dar, die für Verfahrenstechniker ein wesentlicher Aspekt in der Reaktorauslegung ist und eine Verbindung zu anderen Kerndisziplinen schafft. Eine Überprüfung der Hypothese an anderen Standardformen ist ebenfalls möglich. Derartige Erforschungsmöglichkeiten wären in einem realen Laborversuch kaum durchführbar oder aus finanziellen Gründen nicht realisierbar.

Abbildung 2: Scheinbar unterschiedlich schnelle Partikel bei dennoch gleichem Strömungsverlauf

Umsetzung

Im WS19/20 wurde in der zum Themengebiet in der Veranstaltung passenden Woche im Tutorium mit bis zu 25 Studierenden an einer vorläufigen Version die Untersuchung der Einflüsse von Trägheits- und Reibungskraft ermöglicht. Das Ergebnis einer freiwilligen anonymen Selbstauskunft zum Nutzen des VRLabs für das Verständnis ist in (Abb. 3) dargestellt. In mehreren Tutorien wurde die Strömung selbst erforscht (blaue Balken, N = 57), in einer Gruppe stellten die Tutoren das VRLab mit Erklärungen vor (grau, N = 19). Bei eigenem Erforschen beurteilten 82 % der Studierenden den Nutzen als gut oder sehr gut; bei reiner Vorstellung durch die Tutoren waren es nur 35 %, wohingegen 58 % nur etwas Nutzen sahen. Diese deutlich schlechtere Bewertung wäre mit der Verhinderung des selbstständigen Erforschens erklärbar.

Abbildung 3: Eingeschätzter Nutzen für Verständnis von Trägheits- und Reibungseinfluss

Herleitungslabor

Im Ingenieurwesen sind Erhaltungsgleichungen allgegenwärtig. Diese werden an dem theoretischen Konstrukt eines differentiellen Volumenelements (dV) hergeleitet, das quasi unendlich klein ist. Vielen Studierenden fällt die Verbindung mit der Realität schwer, was an der Komplexität durch eine teilweise große Anzahl angreifender Kräfte mit verwirrender Zuordnung und auf den ersten Blick undurchsichtigen mathematischen Kniffen liegen kann. Als Lernziel sollen dieses Konstrukt und die zugehörige Mathematik mit Strömungen verbunden werden. Diese Erkenntnis soll Hemmungen der Studierenden abbauen, um weitere differentielle Bilanzierungen selbst durchführen zu können.

Im VRLab sind verschiedene Strömungsformen implementiert, in die ein dV platziert werden kann. Zu Beginn wird ein dV auf sichtbare Größe vergrößert, s. Abb. 4, links. Eine Sequenz stellt die Herleitung stückweise vor, wobei die freie Bewegung des Studierenden die Übersicht verbessert und damit das Verständnis erleichtert. Die wirkenden Kräfte können in die einzelnen Raumrichtungen beliebig an- und abgeschaltet werden, wobei eine farbliche Zuordnung der Kräfte zu den entsprechenden Flächen oder Volumina die intuitive Zuordnung der bis zu 36 Kräfte an bis zu 6 Flächen unterstützt. Das dV kann im Strömungsfeld bewegt werden, wobei die entsprechenden Zahlenwerte der Kräfte angegeben werden, s. Abb. 4, rechts. Die Bewegungen roter, kugelförmiger Partikel betten das dV sichtbar in die Strömung ein. Mit diesen technischen Assistenzen kann das Kräftegleichgewicht am dV in der Strömung untersucht werden.

Abbildung 4: Differentielles Volumenelement (gelb) zur Herleitung von Erhaltungsgleichungen in einer Strömung (links), mit zugeschalteten Kräften und Zahlenwerten (rechts)

Vorteile

Reale Versuche sind am theoretischen Konstrukt nicht durchführbar, da weder quasi unendlich kleine dV noch daran wirkende Kräfte experimentell zugänglich sind. Um die Übersichtlichkeit in Lehrbüchern zu erhöhen, wird ein dV in Oertel jr. et al. (2015) sechsfach dargestellt. Dies ist im VRLab nicht notwendig, da die Kräfte nach Belieben ausgeblendet werden können und die Position gewechselt werden kann.

Umsetzung

Im WS19/20 wurde die Herleitung der Bernoulligleichung mit Unterstützung des VRLabs durchgeführt. Die in eine Richtung fast gleichen Werte gleichartiger Kräfte zeigen anschaulich den Sinn abstrakter mathematischer Oparationen wie der Taylorreihenentwicklung. Der empfundene Nutzen zum Verständnis wurde evaluiert und ist in (Tab. 1) dargestellt. Quasi alle Studierenden empfanden den Zusatznutzen als sehr gut oder gut. Ein Tutor berichtete, er selbst hätte das Prinzip erst mit dem VRLab verstanden.

Tabelle 1: Schulnoten für Verständisförderung von Herleitungen an differenziellen Volumenelementen

	Ich habe alle Visualisierungsformen verstanden und kann *x* erklären			**Ich habe *x* Visualisierungsformen verstanden**				**Stimmen**
Einsatz VRLab/*x*	**3**	**2**	**1**	**3**	**2**	**1**	**0**	
Vorher (Übung)/%	33	18	3	18	20	3	5	95
Nachher (Übung)/%	61	4	4	28	2	2	0	54
Nachher (Tutorium)/%	34	46	18	0	1	0	0	76

Visualisierungslabor

Dieses Labor behandelt die drei typischen Visualisierungsformen: Bahn-, Strom- und Streichlinien, die nur bei zeitabhängigen Strömungen unterschiedlich sind. Als Lernziel sollen diese für ein gegebenes Strömungsfeld skizziert werden, und bei Kenntnis der Linien soll auf die zeitliche Änderung der Strömung geschlossen werden können. Abb. 5 zeigt den Versuchsstand im VRLab mit vier Zugängen. Deren beliebig einstellbare Funktion Eingang, Ausgang und Wand sind intuitiv erfassbar dargestellt. Einblicke in die Strömung liefern mitströmende Partikel, die qualitative Darstellung der Geschwindigkeit (Abb. 5, links) und des Drucks (Abb. 5, rechts) in einer Farbskala. Stromlinien können im gesamten Strömungsgebiet dargestellt werden, Bahn- und Streichlinien entstehen aus einem beliebig ausgewählten Startpunkt.

Vorteile

Zur Sichtbarmachung realer Strömungen müssen Fluide mit kleinen Partikeln wie Aluminiumflittern oder Farbe geimpft werden (Oertel jr., Böhle, & Reviol, 2015). Dabei folgen nur genügend kleine Partikel der Strömung gut. Da sie gleichzeitig groß genug zur einfachen Detektion sein sollen, sind Kompromisse erforderlich. Gleichzeitig sichtbar sind bei einem einfachen Aufbau zudem Partikel im schnellen, kanalmittigen und im langsamen Bereich nahe der dem Beobachter zugewandten durchsichtigen Wand, womit keine klare Geschwindigkeit erkennbar wird. Die Visualisierungsformen müssen für ein intuitives Erfassen ihrer Unterschiede gleichzeitig in einer zeitabhängigen Strömung dargestellt werden, wozu unterschiedliche Bedingungen zur Partikelanzahl und Belichtungszeit gleichzeitig erfüllt sein müssten.

Im VRLab existiert keines dieser Probleme, da alle Strömungsfelder a priori bekannt sind und die Visualisierungsformen damit erstellt werden. Real notwendige, aufwendige Messtechniken und Auswertungen sind nicht erforderlich, die Studierende in der Grundlagenveranstaltung zudem überfordern würden. Eine didaktische Reduktion erfolgt zusätzlich durch einen einfachen Versuchsumbau ohne Pumpen, Anschlüsse und die klare Visualisierung vorliegender Einstellungen, womit in Übungen und Tutorien Experimente selbstständig durchgeführt werden können. Durch Ändern der Zugangsfunktion sind die Unterschiede der drei Visualisierungsformen im direkten Vergleich erkennbar, was durch viele Zugangskombinationen das Überprüfen des bisher erlangten Verständnisses ermöglicht. Weitere Entdeckungsmöglichkeiten wie das Zusammenspiel von Trägheits- und Reibungskräften sowie die Auswirkungen auf das Geschwindigkeits- und Druckfeld sind ebenfalls in diesem VRLab integriert.

Abbildung 5: Versuchstand mit Strom- (schwarz), Bahn- (pink) und Streichlinien (gelb) sowie Geschwindigkeits- (links) und Druckfeld (rechts)

Umsetzung

Das VRLab wurde als integriertes Lehr-/Lernlabor im WS19/20 erstmalig durchgeführt. Die drei Visualisierungsformen wurden in der Übung zunächst klassisch mithilfe von Videos, CFD-Simulationen, Beispielströmungen und Analogien zu Natur und Fußball erklärt. Anschließend wurde in einer kreuzförmigen Strömungsgeometrie, also wie im VRLab, eine stationäre Strömung vorgestellt und wurden drei völlig verschiedene Antwortkombinationen für die sich ausbildende Bahn-, Strom- und Streichlinie vorgegeben. Obwohl die Linienformen durch die stationäre Strömung identisch sein müssten und dies nur bei einer Kombination der Fall war, gaben im Mittel nur 37 % der Studierenden die richtige Antwort (N = 82). Dies liegt nur knapp über der Gleichverteilung, die ahnungslosem Raten entspricht. Die Visualisierungsformen konnten also nicht auf die vorgegebene Strömung übertragen werden. Anschließend wurden die Visualisierungsformen im VRLab vorgestellt und

beeinflusst. Es wurde eine ähnliche Frage gestellt, deren Schwierigkeitsgrad durch eine zeitabhängige Strömung mit sechs ähnlicheren Antwortmöglichkeiten deutlich erhöht wurde. Trotzdem waren im Mittel 53 % (Gleichverteilung: 16,6 %) der Antworten korrekt, bei gleichzeitig gesteigerter Teilnahme (N = 93). Dies zeigt die Vorteile des VRLabs zur Visualisierung und Unterstützung des Verständnisses. Im folgenden Tutorium konnten die Studierenden selbst Entdeckungstouren im VRLab durchführen. Eine anonyme Selbsteinschätzung zur Kompetenz bzgl. der Visualisierungsformen wurde erbeten und mit den Werten vorangegangenen Übung verglichen, s. Tab. 2. Vor dem Übungseinsatz des VRLabs dachte etwa die Hälfte der Studierenden, keine Visualisierungsform erklären zu können. Nach dem Einsatz des VRLabs waren es nur noch 32 %, wobei sich zusätzlich deutlich eine Verschiebung hin zur Erklärung oder zum Verständnis aller drei Visualisierungsformen erkennen lässt. Der ungünstige Zeitpunkt der zweiten Abstimmungsrunde am Ende der bereits abendlichen Übungszeit um 19:20 Uhr sorgte für eine geringere Teilnahme durch bereits einsetzenden Aufbruch. Die selbstständige Beschäftigung im Tutorium führte dazu, dass 99 % der Studierenden meinten, alle Visualisierungsformen erklären zu können. Im Vergleich zur Übung trauen sich weniger Studierende die höchste Kompetenzstufe zu, was durch eine unterschiedliche Formulierung der Frage erklärt werden kann: In der Übung wurde gefragt, ob die Visualisierungsformen grob, im Tutorium, ob die Visualisierungsformen erklärt werden könne. Die im Tutorium erfolgte Verbesserung wäre auch durch die längere Zeit erklärbar, die sich die Studierenden mit den Sachverhalten bereits auseinandergesetzt hatten. Dies erscheint unwahrscheinlich, da die konventionellen Erklärungen in Vorlesung (ca. 30 Minuten) und Übung (ca. 40 Minuten) deutlich länger waren als der VRLab-Einsatz mit ca. 10 Minuten in der Übung und ca. 20 Minuten im Tutorium.

Tabelle 2: Selbsteinschätzung der erlangten Kompetenz zu Visualisierungsformen

	Ich habe alle Visualisierungsformen verstanden und kann *x* erklären			**Ich habe *x* Visualisierungsformen verstanden**				**Stimmen**
Einsatz VRLab / *x*	**3**	**2**	**1**	**3**	**2**	**1**	**0**	
Vorher (Übung) / %	33	18	3	18	20	3	5	95
Nachher (Übung) / %	61	4	4	28	2	2	0	54
Nachher (Tutorium) / %	34	46	18	0	1	0	0	76

Zusammenfassung und Ausblick

Unterschiedliche Strömungen wurden mit der CFD-Software *Ansys CFX* berechnet und die Ergebnisse in die VR-Software *Unreal Engine* importiert. Damit wurden virtuelle Labore zur Unterstützung der Lehre der Strömungsmechanik erstellt, die aus der Ich-Perspektive begangen und beeinflusst werden können. Vorteile gegenüber realen Versuchen sind eine einfache Ermöglichung explorativen, forschenden Lernens durch didaktische Reduktion auf wesentliche Bestandteile der Experimente und die Sichtbarmachung im realen Experiment unsichtbarer physikalischer Größen wie kaum messbarer Druck- und Geschwindigkeitsfelder. Da in virtuellen Laboren die Physik und Kausalität umgangen werden kann, können in der Realität unmögliche Versuche erstellt werden – etwa die Untersuchung differentieller Volumenelemente bei der Herleitung von Bilanzgleichungen oder die gleichzeitige Darstellung verschiedener Visualisierungsformen. Das Handeln in der virtuellen Realität erlaubt es dabei, Effekte immersiv zu erfahren.

Das Arbeiten am digitalen Zwilling mit der technischen Assistenz und die durch didaktische Reduktion ermöglichte Erforschung von Strömungsvorgängen, bei denen Studierende auch selbst Teil des strömenden Fluides sein können, soll die Kreativität und digitale Kompetenz für das Arbeitsleben in der Industrie 4.0 fördern. Die Laborversuche können in die Grundveranstaltung integriert werden, da keine Geräteeinweisung oder messtechnische Vorkenntnisse nötig sind und jeder Studierende ein eigenes Labor auf seinem Rechner installieren kann. Die vorläufige Evaluation erfolgte durch Befragung der Studierenden bezüglich der selbsteingeschätzten Kompetenz und durch Fragen vor und nach Nutzung eines virtuellen Labors. Dabei scheinen VRLabs sich positiv auszuwirken. Aussagekräftigere Klausurergebnisse und weitere Evaluationsergebnisse stehen noch aus. Letztendlich sollte geprüft werden, ob die positiven Aspekte der einfacheren Darstellung und des leichteren Zugangs auch zu negativen Auswirkungen bei der Kompetenzentwicklung führen. So könnte sich die Fähigkeit, unanschauliche Sachverhalte zu interpretieren und physikalisch zu durchdringen, weniger entwickeln.

Zukünftig sollen weitere Versuche erstellt und in den bestehenden die immersiven Bestandteile erhöht werden. Für umfangreichere Versuche können auszuwertende, verrauschte Messwerte integriert und dazu unerwartete Situationen oder ethische Abwägungen programmiert werden. Dazu gehören bspw. defekte Messgeräte mit großer systematischer Abweichung oder ein für den letzten Datenpunkt nötiges Leerpumpen eines Wassertanks mit darin lebenden virtuellen Fischen. Ferner könnten bisherige Nachteile angegangen werden, indem in einer Multiplayerversion mehrere Studierende gleichzeitig kooperativ experimentieren. Mithilfe eines haptischen Handschuhs könnten in fernerer Zukunft fühlbare Rückkopplung und die illusionsgestützte Erfahrung des Arbeitens an typischen Geräten eines Labors integriert werden.

Literaturverzeichnis

Barr, R. B., & Tagg, J. (1995). From Teaching to Learning –A New Paradigm For Undergraduate Education. *Change: The Magazine of Higher Learning*, 12–26.

Bauer, W.; Schlund, S.; Marrenbach, D. & Ganscher, O. (2014). *Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland*. Berlin-Mitte; Stuttgart: BITKOM; Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO.

Campbell, M. E. (1999). Oh, Now I Get it! *Journal of Engineering Education 88(4)*, 381–383.

González, M. M.; Santos, B. S.; Vargas, A. R.; Jorge, M.-G. & Orihuela, A. R. (2013). Virtual Worlds. Opportunities and Challanges in the 21st Century. *Procedia Computer Science 25*, 330–337.

Hermann, M.; Pentek, T. & Otto, B. (2016). Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. *49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, S. 1530–1605.

Jungmann, T. (2011). Forschendes Lernen in der Ingenieurausbildung. In U. Bach, K. Müller & T. Jungmann (Hrsg.), *Praxiseinblicke – Forschendes Lernen in den Ingenieurwissenschaften* (S. 4–11). Aachen, Bochum, Dortmund: TeachING-LearnING.EU.

Khadra, K.; Angot, P.; Parneix, S. & Caltagirone, J.-P. (2000). Fictitious domain approach for numerical modelling of Navier-Stokes equations. *Numerical Methods In Fluids*, 651–684.

Laurien, E. & Oertel jr., H. (2011). *Numerische Strömungsmechanik*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

May, D. (2017). *Globally Competent Engineers. Internationalisierung der Ingenieurausbildung am Beispiel der Produktionstechnik*. Aachen: Shaker.

Merkel, H. (2008). Lernstrategien und Arbeitstechniken. In G. Bovet, & V. Huwendiek, *Leitfaden Schulpraxis –Pädagogik und Psychologie für den Lehrberuf* (S. 256–257). Berlin: Cornelsen Verlag Scriptor.

Oertel jr.; H., Böhle, M. & Reviol, T. (2015). *Strömungsmechanik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Price, C. B. (2008). The usability of a commercial game physics engine to develop physics educational materials: An investigation. *Simulation & Gaming 39(3)*, 319–337.

Reich, K. (2008). Konstruktivistische Didaktik. In G. Bovet & V. Huwendiek, *Leitfaden Schulpraxis – Pädagogik und Psychologie für den Lehrberuf* (S. 56–64). Berlin: Cornelsen Verlag Scriptor.

Salzmann, C.; Halimi, W.; Gillet, D. & Govaerts, S. (2018). Deploying Large-Scale Online Labs with Smart Devices. In M. Auer et al., *Cyber-Physical Laboratories in Engineering and Science Education* (S. 43–78). Cham: Springer.

Spath, D.; Ganschar, O.; Gerlach, S.; Hämmerle, M.; Kruse, T. & Schlund, S. (2013). *Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

Tekkaya, A. E.; Wilkesmann, U.; Terkowsky, C.; Pleul, C.; Monika, R. & Maevus, F. (2016). *Das Labor in der ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung*. München, Berlin, Brüssel: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften.

Terkowsky, C. & Haertel, T. (2017). On Learning Objectives and Learning Activities to Foster Creativity in the Engineering Lab. In S. Frerich; T. Meisen; A. Richert; M. Petermann; S. Jeschke; U. Wilkesmann & A. E. Tekkaya (Hrsg.), *Engineering Education 4.0. Excellent Treaching and Learning in ENgineering Sciences* (S. 923–935). Springer, Cham.

Terkowsky, C.; Frye, S. & May, D. (06 2019). Is a Remote Laboratory a Means to Develop Competences for the 'Working World 4.0'? A Brief Tentative Reality Check of Learning Objectives. *IEEE exp.at'19*, 118–122.

Zierep, J. (1991). *Ähnlichkeitsgesetze und Modellregeln der Strömungslehre*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Gleichzeitige Darstellung beider Versuchsstände, hier oben mit transparenter und unten mit opaker Geometrie (links) und Entdeckungstour *im* Kanal (rechts) 165

Abb. 2 Scheinbar unterschiedlich schnelle Partikel bei dennoch gleichem Strömungsverlauf 166

Abb. 3 Eingeschätzter Nutzen für Verständnis von Trägheits- und Reibungseinfluss . 166

Abb. 4 Differentielles Volumenelement (gelb) zur Herleitung von Erhaltungsgleichungen in einer Strömung (links), mit zugeschalteten Kräften und Zahlenwerten (rechts) 167

Abb. 5 Versuchstand mit Strom- (schwarz), Bahn- (pink) und Streichlinien (gelb) sowie Geschwindigkeits- (links) und Druckfeld (rechts) 169

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Schulnoten für Verständisförderung von Herleitungen an differenziellen Volumenelementen 168

Tab. 2 Selbsteinschätzung der erlangten Kompetenz zu Visualisierungsformen 170

FPGA Remote-Labor als Ergänzung und Alternative zum Präsenzlabor[1]

Marco Winzker, Andrea Schwandt

Abstract

Der Beitrag untersucht, wie ein Präsenzlabor durch ein Remote-Labor ergänzt und ersetzt werden kann. Dazu wird das Laborpraktikum Digitaltechnik der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg betrachtet, bei dem ein Remote-Labor Flexibilität bei der Versuchsdurchführung bietet und Versuche ermöglicht, die allein mit dem Präsenzlabor nicht möglich wären. Neben der Ergänzung der Präsenzversuche können Studierende das Praktikum auch komplett im Remote-Labor durchführen. Durch klare Anforderungen an die Erteilung eines Testats ist dies sowohl für sie als auch für Lehrende praktikabel zu handhaben.

Rückmeldungen der Studierenden und Nutzungszahlen belegen die Akzeptanz des Remote-Labors. Dabei zeigt sich, dass die Studierenden sehr heterogen mit dem Remote-Labor umgehen: Einige von ihnen nutzen das Remote-Labor als zusätzliche Praktikumszeit für Versuche die auch im Präsenzlabor möglich wären; andere nutzen es als Erweiterung der Praktikumsmöglichkeit für Versuche, die nur im Remote-Labor möglich sind und wieder andere arbeiten intensiv im Remote-Labor und reichen auch das Praktikumsprotokoll elektronisch ein. Für Lehrende besteht über das Protokoll und die Auswertung der Nutzungsdaten ausreichende Sicherheit, um aktive Beteiligung am Praktikum zu testieren.

Schlüsselwörter: Remote-Labor, Präsenzlabor, Digitaltechnik, Evaluation, Nutzungsdaten

Laborpraktika in der Digitaltechnik

Die Digitaltechnik hat in den letzten Jahrzehnten bei vielen Anwendungen analoge Techniken abgelöst. Die Speicherung von Audiodaten erfolgt nicht mehr auf Schallplatte und Musikkassette, sondern auf CD und als MP3-Datei, die Fernsehübertragung wurde vom analogen auf das digitale Fernsehen umgestellt und wird durch Streaming mittels digitaler Daten ergänzt und womöglich verdrängt, und für das analoge Telefon kam zunächst ISDN und jetzt Voice over IP (VoIP).

---

1 Gefördert durch ein Fellowship für Innovationen in der digitalen Hochschullehre des Ministeriums für Kultur und Wissenschaft des Landes Nordrhein-Westfalen und des Stifterverbands.

Studierende der Elektrotechnik lernen die technischen Grundlagen dazu in Lehrveranstaltungen mit dem Titel „Digitaltechnik“ oder „Technische Informatik“. Diese werden üblicherweise durch Praktika begleitet, in denen Studierende die theoretischen Kenntnisse der Lehrveranstaltung anwenden und die Konzepte in eine reale Schaltung umsetzen (Zhu, Wenig & Cheng, 2009).

Die digitale Transformation vieler Bereiche bietet die Möglichkeit, Prozesse und Aktivitäten neu zu denken und zu gestalten. In der Hochschullehre wird eine Anreicherung mit und eine Integration von digitalen Lehrformen diskutiert (Froyd, Wankat & Smith, 2012; Handke, 2017). Das in diesem Beitrag beschriebene Remote-Labor wurde eingerichtet, um zu untersuchen, ob die bislang vorherrschenden Präsenzlabore durch Remote-Labore ergänzt und teilweise ersetzt werden können. Aufgrund der Corona-Pandemie hat diese Fragestellung besondere Aktualität erhalten, denn im Sommersemester 2020 waren Präsenzveranstaltungen nicht möglich und das Remote-Labor wurde als Ersatz des Präsenzlabors eingesetzt.

Dieser Beitrag fokussiert auf die optionale Nutzung des Remote-Labors, wenn Studierende eine Wahl der Laborform haben. Dazu werden Ergebnisse aus studentischen Befragungen und Nutzungszahlen vorgestellt. Ergänzt wird diese Betrachtung durch Beobachtungen im Sommersemester 2020 mit alleiniger Nutzung des Remote-Labors.

Lernziele und Laboraufbau

An unserer Hochschule werden im betrachteten Themengebiet zwei Lehrveranstaltungen angeboten:

- Digitaltechnik 1 richtet sich an Studierende im 2. Semester und hat als Lernziele die Kenntnis von Grundbegriffen der Digitaltechnik, Analyse und Entwurf von Digitalschaltungen und den Umgang mit Digitalschaltungen, insbesondere Inbetriebnahme und Fehlersuche bei der Schaltungsentwicklung.
- Digitaltechnik 2 richtet sich an Studierende im 4. Semester, die sich für die Vertiefungsrichtung „Elektronische Systementwicklung“ entschieden haben. Lernziele sind die vertiefte Kenntnis des Schaltungsentwurfs für größere Systeme, insbesondere mit der Verwendung von entsprechenden Komponenten, beispielsweise Halbleiterspeicher. Ebenfalls werden Kenntnisse über Mikroelektronik und Energieverbrauch von Schaltungen vermittelt.

Bestandteil beider Lehrveranstaltungen ist ein Laborpraktikum, in dem Studierende mit der Programmiersprache VHDL eine Schaltung entwerfen und auf einer programmierbaren Digitalschaltung, einem FPGA (Field-Programable-Gate-Array), ausführen.

Labor Digitaltechnik 1

In Digitaltechnik 1 werden zunächst einfache Schaltungen entworfen, in denen Grundprinzipien der Digitaltechnik angewendet werden. Dies ist beispielsweise ein Zähler, der mit jedem Taktsignal eine Stelle weiterzählt und den Wert auf einer 7-Segment-Anzeige ausgibt. Studierende variieren die Schaltung, indem per Schalter zwischen Vorwärts- und Rückwärtszählen unterschieden wird, der Zähler angehalten oder neu gestartet werden kann oder nicht bei jedem Takt, sondern nur auf Tastendruck weitergezählt wird. Diese Schaltungen können auf kostengünstigen Experimentierplatinen programmiert werden, die auch zur Ausleihe bereitstehen.

Labor Digitaltechnik 2

In Digitaltechnik 2 sollen Studierende mit größeren Schaltungen arbeiten und reale Anwendungen für Digitaltechnik kennenlernen. Als Anwendungsfeld wird dazu die Bildverarbeitung ausgewählt, wofür mehrere Gründe sprechen: Bildverarbeitung ist eine Anwendung, für die auch in der Industrie FPGAs eingesetzt werden (Intel Press Release, 2015), es werden sowohl Schaltungselemente für Speicher als auch für Rechenoperationen benötigt, und es bestehen Bezüge zur Lehrveranstaltung Signalverarbeitung. Zudem ist Bildverarbeitung ein für Studierende motivierendes Thema, denn die Ergebnisse der Signalverarbeitung, aber auch eventuelle Fehler, können durch Betrachten des Ausgangssignals der Schaltung einfach erfasst werden.

Zwei weitere Anforderungen an die Experimentierplatine ergeben sich durch die Lernziele „Mikroelektronik“ und „Energieverbrauch von Schaltungen“. Für das erste Lernziel sollen die Studierenden zwei verschiedene FPGAs vergleichen, wozu verschiedene Platinen benötigt werden. Für das Lernziel „Energieverbrauch“ soll die Verlustleistung der FPGAs gemessen werden. Dies gibt zum einen Informationen über die Auslastung und genutzte Rechenleistung des FPGAs, zum anderen sind die Messwerte für den Vergleich verschiedener FPGAs und ihrer Mikroelektronik sinnvoll.

Allerdings sind Experimentierplatinen mit Eingang und Ausgang für Bildverarbeitung relativ teuer und verfügen über keine Möglichkeit der Messung des Energieverbrauchs. Darum wurde eine eigene Versuchsplatine mit Eingang und Ausgang für Bildverarbeitung entwickelt, bei der auch direkt Anschlüsse für die Messung der Verlustleistung des FPGAs integriert sind (Schwandt & Winzker, 2017). Die Platine wird in zehnfacher Ausfertigung für die Präsenzpraktika bereitgehalten. Acht Gruppen können parallel arbeiten, zwei weitere Platinen sind Reserve.

Remote-Labor für Digitaltechnik 2

Für das Präsenzpraktikum ist somit eine sinnvolle Ausstattung vorhanden. Zwei Anforderungen sind jedoch noch nicht erfüllt: Die erste ist, dass Studierende die Möglichkeit erhalten, zwei verschiedene FPGAs zu vergleichen. Hierzu wurde eine zweite Platine entworfen, die prinzipiell ebenfalls in mehrfacher Ausführung erforderlich wäre. Als zweite Anforderung sollen Studierende die Möglichkeit erhalten,

auch unabhängig von den Praktikumszeiten mit der FPGA-Platine zu arbeiten. Diese Möglichkeit wurde in Digitaltechnik 1 von den Studierenden genutzt und soll auch für Digitaltechnik 2 zur Verfügung stehen.

Die beiden Anforderungen werden durch das Remote-Labor erfüllt. Studierende können unabhängig von Praktikumszeiten auf das Laborexperiment zugreifen. Um verschiedene FPGAs zu vergleichen, stehen dort eine Platine mit dem FPGA aus dem Präsenzlabor (Bezeichnung „Cyclone IV“) sowie zwei Platinen mit einem anderen FPGA („Cyclone V“) zur Verfügung. Beide FPGA-Typen stammen vom selben Hersteller (Intel) und sind ausgelegt für gleiche Anwendungsgebiete und Marktsegmente. Das FPGA Cyclone V ist jedoch eine aktuellere Version mit modernerer Schaltungstechnik.

Die Kapazität von insgesamt drei FPGA-Platinen ist ausreichend, da Studierende eine Schaltung zunächst auf dem lokalen Rechner erstellen und mittels einer Entwurfssoftware übersetzen; erst für die Überprüfung der Funktion ist danach das Remote-Labor erforderlich (Bild 1). Für eine Versuchsdurchführung, bestehend aus Upload der Programmierdatei, Ausführung des Versuchs und Rückmeldung der Messwerte, benötigt es weniger als 30 Sekunden. In einem Experiment können Eingangsbilder und Konfigurationsschalter bedient werden, sodass eventuell mehrere Versuchsdurchführungen zu je 30 Sekunden erfolgen.

Abbildung 1: Nutzung des Remote-Labors per Internetzugriff

Die insgesamt benötigten Zeiten variieren je nach Versuch, Komplexität der Schaltung und Vorgehensweise der Studierenden. Ein möglicher Ablauf wäre beispielsweise:

- **Rechner Studierende:** 30 bis 120 Minuten für Schaltungskonzept, Schreiben der VHDL-Programme, Simulation, Übersetzen für FPGA-Entwurf
- **Remote-Labor:** 2 Minuten Experiment
- **Rechner Studierende:** 15 Minuten für Schaltungsänderung oder -korrektur
- **Remote-Labor:** 2 Minuten Experiment

Somit können mehrere Studierende die gleiche FPGA-Platine im Remote-Labor nacheinander nutzen. In unserer Konfiguration beträgt die maximale Nutzungsdauer momentan fünf Minuten. Ist die Platine belegt, kommen Studierende in eine Warteschlange. Ist diese leer, kann man direkt nach Ablauf von fünf Minuten erneut ein Experiment starten.

In Einsatz des Remote-Labors sind bislang keine Kapazitätsengpässe aufgetreten, die zu längeren Wartezeiten geführt hätten. Sollte sich dies ändern, kann die Nutzungsdauer verkürzt und können weitere Platinen zum Remote-Labor hinzugefügt werden.

Einordnung verfügbarer FPGA-Remote-Labore

Für einfache Digitalschaltungen, wie im Abschnitt „Labor Digitaltechnik 1“ genannt, sind Remote-Labore verfügbar (vgl. z. B. Garcia-Zubia et al. (2012), Wuttke, Hamann & Henke (2015), Mayoz et al. (2020)). Hier werden jedoch Schaltungen umgesetzt, für die in der industriellen Praxis nicht unbedingt FPGAs, sondern auch Mikrocontroller verwendet werden. Das hier beschrieben FPGA-Remote-Labor hingegen bietet einen Versuchsaufbau der Signalverarbeitung mit hohen Anforderungen an die Datenrate und Verarbeitungsleistung, die eine Implementierung mit FPGAs oder Integrierten Schaltungen (IC) erfordert.

Einsatz und Aufbau des Remote-Labors

Das Remote-Labor wurde zunächst in einer ersten Implementierung ab 2016 intern an der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg angeboten (AbuShanab, 2018). Nach positivem Feedback der Studierenden wurde die Implementierung grundlegend überarbeitet, insbesondere im Hinblick auf Bedienungsfreundlichkeit und Cyber-Sicherheit (Schwandt & Winzker, 2019). Diese überarbeitete Implementierung ist seit 2018 verfügbar und auch außerhalb unserer Hochschule als offene Bildungsressource weltweit nutzbar (Winzker & Schwandt, 2019).

Bild 2 zeigt das Benutzerinterface, das auf einer Webseite dargestellt wird. Studierende können links oben die Programmierdatei auswählen und rechts oben die Ausführung starten. Darunter werden Eingangsbild und FPGA-Platine dargestellt sowie das durch die Versuchsausführung erzeugte Ausgangsbild. Über der FPGA-Platine wird der gemessene Strom für das FPGA angezeigt, aus dem durch Multiplikation mit der Versorgungsspannung die Verlustleistung berechnet werden kann. Durch Bedienelemente können das Eingangsbild verändert und die Schalter bedient werden.

Das Remote-Labor verwendet einen PC als Steuerrechner; ein Minicomputer Raspberry-Pi dient als Bildgenerator; Amperemeter und Frame-Grabber erfassen die Ergebnisse des Laborversuchs (Winzker, 2018). Als Remote-Lab-Managementplattform wird WebLab-Deusto eingesetzt (Javier Garcia-Zubia et al., 2012).

Abbildung 2: Benutzerinterface für das Remote-Labor

Laborversuche für Präsenzlabor und Remote-Labor

Um den didaktischen Einsatz und die Möglichkeit zur Nutzungsanalyse nachvollziehen zu können, sollen an dieser Stelle die Laborversuche der Lehrveranstaltung erläutert werden. In der Lehrveranstaltung Digitaltechnik 2 werden drei Versuche vorgeschlagen. Bild 3 zeigt ein Eingangsbild und die Ausgangsbilder für die drei Versuche.

Abbildung 3: Eingangsbild und drei Ausgangsbilder für Versuche A, B, C

Versuch A: Invertierung des Bildsignals

In diesem Versuch werden die drei Farbwerte des Bildsignals, Rot, Grün und Blau in ihrem Wert invertiert. Dieser Versuch dient zum Kennenlernen des „Design-Flow“, also der Übersetzung der Programmierdateien in die Sprache VHDL und der Übertragung zum FPGA. Als Abwandlung kann die Invertierung der Farbwerte durch einen Schalter gesteuert werden.

Versuch B: Verzögerung eines Bildes mit Registerkette

In diesem Versuch wird die Bildinformation durch Speicherelemente um mehrere Taktschritte verzögert. Diese Speicherelemente werden als Flip-Flop oder Register bezeichnet; die Verzögerung ist eine Registerkette. Als Ergebnis ist das Ausgangsbild um die Anzahl der Registerstufen verschoben. In Bild 3 wird eine Verzögerung von 800 Registerstufen verwendet, und da die verwendeten Bilder eine Breite von 1280 Bildpunkten haben, wird das Bild hier um etwa zwei Drittel nach rechts verschoben. Bildsignale sind zeilenweise aufgebaut. Darum setzt sich der rechte Teil des Bildes auf der linken Seite des Eingangsbildes fort. Nach der rechten Kante des Eingangsbildes gibt es einen ungenutzten Bildbereich (Austastlücke), in dem die Schaltung den letzten Bildpunkt wiederholt (horizontale Streifen).

Diese Verschiebung entspricht keiner realen Anwendung, sondern soll Ausnutzung und Verlustleistung des FPGAs verdeutlichen. Studierende können aus den im FPGA verfügbaren Speicherelementen die maximal mögliche Verzögerung berechnen und damit die Schaltungskapazität einschätzen. Dann können Registerketten der Länge 100, 200, 300, ... programmiert und die jeweilige Verlustleistung gemessen werden.

Studierende lernen somit Zusammenhänge von Schaltungskomplexität und Verlustleistung. Außerdem erkennen sie den Zusammenhang von Bildsignal und Verlustleistung sowie den zeilenweisen Aufbau eines Bildsignals.

Versuch C: Reale Anwendung Kantenerkennung

Im dritten Versuch wird das Bildsignal mit einer Kantenerkennung bearbeitet. Dies ist eine reale Anwendung aus dem Bereich Computer Vision.

Im Versuch wird die Kamera in der Windschutzscheibe moderner Pkws als konkrete Anwendung angenommen, und dies ist auch der Grund für die Auswahl des Eingangsbildes. Die FPGA-Schaltung erkennt die Kanten in der Bildszene und stellt sie als dunkle Bildpunkte dar; Bereiche ohne Kante bleiben hell. Dies wäre die erste Verarbeitungsstufe einer Anwendung, und danach würden weitere Verarbeitungsschritte für Autonomes Fahren folgen. Ein Lane Departure Warning beispielsweise kann erkennen, ob die aktuelle Fahrspur verlassen wird und eine Warnung ausgeben. Im Versuch wird dazu die Kantenerkennung umgesetzt.

Studierende können die Kantenerkennung an vorgegebenen und eigenen Fotos ausprobieren. Verschiedene Modifikationen werden vorgeschlagen, mit denen Schaltungsressourcen und Verlustleistung reduziert werden können. Je nach Modifikation wird die Qualität der Erkennung verändert, sodass ein Abtausch von Aufwand und Qualität erfahrbar wird.

Praktikumsdurchführung mit Präsenzlabor und Remote-Labor

Randbedingungen und Ziele

Seit dem ersten Einsatz im Sommersemester 2016 wurde das Remote-Labor bislang in fünf Jahrgängen des Studiengangs Elektrotechnik eingesetzt. Dabei wurden folgende Randbedingungen und didaktischen Ziele berücksichtigt:

- Die Verwendung des Remote-Labors ist prinzipiell für Studierende freiwillig.
  - Im Sommersemester 2020 war das Remote-Labor wegen der Corona-Pandemie quasi verpflichtend. Diese noch andauernde, besondere Nutzungssituation wird in einem eigenen Abschnitt diskutiert.
- Flexibilität:
  - Studierende sollen im Semester zeitliche Flexibilität zur Durchführung der Praktikumsaufgaben haben.
  - Studierende können zeitlich eingeschränkt sein, z. B. durch Berufstätigkeit, Kinderbetreuung oder die Pflege von Angehörigen.
  - Als Vorleistung für die Prüfung müssen Studierende jedoch das Praktikum bis Semesterende abschließen.
- Studierende sollen motiviert werden, selbstorganisiert und eigenverantwortlich die Versuche durchzuführen.
- Zeitumfang:
  - Interessierte Studierende sollen die Möglichkeit für zusätzliche Laborversuche erhalten.
  - Studierende haben mehrere Lehrveranstaltungen und sollen das Praktikum in angemessener Zeit bearbeiten können.

Aufgabenstellung und Voraussetzungen für Testat

Der im vorherigen Kapitel beschriebene Versuch A dient zum Kennenlernen der Laborumgebung und des Design-Flow und soll von allen Studierenden durchgeführt werden. Entsprechend der Ziele Flexibilität, Selbstorganisation und Eigenverantwortung dürfen sich Studierende danach aussuchen, welche Aufgabenstellung sie bearbeiten möchten. Sie können beide Versuche B und C durchführen oder sich auf einen Versuch konzentrieren und dort mehrere Optionen untersuchen, beispielsweise die Bildverarbeitung verändern oder die zwei FPGA-Bausteine miteinander vergleichen.

Im Präsenzlabor finden vier Termine zu je 90 Minuten statt. Am letzten Labortag erläutern die Studierenden der Laborbetreuung, welche Versuche sie durchgeführt haben, welche Messwerte gemessen wurden und welche Schlussfolgerungen und Erkenntnisse sie dabei erlangt haben. Daraufhin erhalten sie das Testat für aktive Beteiligung am Praktikum.

Ergänzung durch Remote-Labor

Das Remote-Labor ermöglicht es den Studierenden, die Versuche eigenständig ohne den Besuch der vier Labortermine durchzuführen. Im bisherigen Einsatzes hat sich gezeigt, dass die Elemente des Präsenzpraktikums auf folgende Weise sinnvoll durch das Remote-Labor abgebildet werden können (vgl. Franuszkiewicz, Frye, Terkowsky & Heix, 2019):

Das Kennenlernen der Laborumgebung mit Versuch A ist weiterhin im Präsenzlabor vorgesehen. Dadurch können Fragen zum Design-Flow und zu Bedingungen für das Testat persönlich geklärt werden. Nach Rücksprache wird auf den ersten Versuch A in Präsenz verzichtet, wenn Studierende sich durch das Praktikum im zweiten Semester bereits genug vorbereitet fühlen.

Die weiteren Versuche B und/oder C können dann unabhängig von den Präsenzterminen im Remote-Labor durchgeführt werden.

Die Diskussion der Versuchsergebnisse erfolgt als Bericht im PDF-Format. Hierfür wird ein Umfang von zwei bis vier Seiten vorgegeben. Die Abgabe erfolgt als Upload im Learning Management System (LMS), und die Abgabefrist wird im System programmiert. Danach ist kein Upload mehr möglich, was dazu führt, dass Studierenden eine solche Frist ernst nehmen und beachten.

Für das Testat kann außerdem über den Nutzernamen im Remote-Labor die aktive Beteiligung nachvollzogen werden.[2] Es sind auch Mischformen möglich – beispielweise, wenn Studierende einzelne Praktikumstermine durch das Remote-Labor ersetzen möchten, für das Abschlussgespräch und Testat jedoch wieder persönlich ins Präsenzlabor kommen.

Die Flexibilität in der Organisation ist bewusst gewählt, um Studierende zur mündigen Nutzung der Laboreinrichtung anzuhalten. Durch die Überprüfung der Zugriffsdaten und die Abgabe des PDF-Berichts wird die Arbeit der Studierenden sichtbar und kann formell überprüft werden. Gleichzeitig besteht wertschätzende Freiheit in der Wahl der konkreten Aufgabenstellung und in der Zeiteinteilung.

Das Remote-Labor fördert somit technische Lernziele, klassische überfachliche Lernziele wie Selbstorganisation, Selbststeuerung und Eigenverantwortung und digitale Grundfähigkeiten wie „Digital Learning“ (Kirchherr, Klier, Lehmann-Brauns & Winde, 2019, S. 6).

2 Auch eine anonyme Nutzung des Remote-Labors ist möglich.

Evaluation durch studentische Befragung

Eine quantitative und qualitative Untersuchung der Nutzung des Remote-Labors erfolgte im Sommersemester 2018 durch eine studentische Befragung. Das Remote-Labor wurde dort in einem Wahlpflichtfach im 6. Semester Elektrotechnik eingesetzt. Die Befragung erfolgte anonym mit einem Fragebogen in Papierform. 16 Fragebögen wurden abgegeben.

Akzeptanz

Die Akzeptanz des Remote-Labor wurde abgefragt durch: „Die Hochschule kann Praktikumsversuche als Remote-Lab und als Präsenzpraktikum (klassisch im Labor der Hochschule) anbieten. Wenn Sie an ihr komplettes Studium denken, was ist eine gute Verteilung?“ Fast zwei Drittel der befragten Studierenden könnten auf einige Präsenzpraktika verzichten (Bild 4), was zeigt, dass sie mit dem Konzept eines Remote-Labor zufrieden sind.

Abbildung 4: Studentische Befragung zur Akzeptanz des Remote-Labors (n = 16)

Auswahl der Versuchsoptionen

Studierende können in den Praktikumsversuchen verschiedene Optionen untersuchen und damit verschiedene Aspekte der Digitaltechnik vertiefen. Sie konnten zu vier Bereichen (siehe Bild 5) eine Bewertung von „sehr wichtig“ bis „überhaupt nicht wichtig“ abgegeben.

Die Rückmeldungen zeigen, dass Studierende insbesondere das Arbeiten mit einer realen FPGA-Anwendung schätzen. Der Vergleich verschiedener FPGAs wird als weniger wichtig angesehen, wobei sich zeigt, dass die Bewertungen fast das gesamte Spektrum umfassen, sodass es auch Studierende gibt, die verschiedene FPGAs miteinander vergleichen.

Abbildung 5: Studentische Befragung zur Wichtigkeit der Versuchsoptionen (n = 16)

Fragen mit Freitextantworten

In Freitexten können die Studierenden angeben, was ihnen am Remote-Labor gefällt. Genannt wurden zeitliche Flexibilität bei der Versuchsdurchführung, zusätzliche Versuche für besonders interessierte Studierende und erneute Versuchsdurchführung bei weniger erfolgreichem Präsenztermin.

Außerdem wurde nach Verbesserungsvorschlägen gefragt. Hier wurde vor allem Feedback zur Bedienung des Remote-Labors genannt, das im Rahmen der Systempflege teilweise berücksichtigt werden konnte (Schwandt & Winzker, 2019).

Analyse von Nutzungszahlen des Remote-Labors

Eine quantitative Analyse der Nutzung erfolgt durch die Protokollierung der Anmeldevorgänge und der Aktivitäten bei der Nutzung des Remote-Labor. In diesem Kapitel wird die Nutzung im Sommersemester 2019 analysiert.

Praktikumsteilnahmen und Registrierung für Remote-Labor

Insgesamt wurden 61 Testate vergeben, und dies wird als Grundgesamtheit der aktiv teilnehmenden Studierenden gerechnet. Daraus erfolgten 16 Registrierungen für das

Remote-Labor.[3] Da Studierende in Zweier-Gruppen am Praktikum teilnehmen, können je Registrierung zwei Personen die Versuche durchführen.

Um eine Abschätzung der Nutzung zu errechnen, wird angenommen, dass pro Registrierung im Mittel 1,5 Studierende mit dem Remote-Labor arbeiten. Daraus ergibt sich, dass etwa 40 Prozent der Studierenden auf das Remote-Labor zugegriffen haben:

$$\frac{16\ Registrierungen\ \cdot 1{,}5\ Studierende/Registrierung}{61\ \text{Studierende}} * 100\ \% = 39\ \%$$

Systemanmeldungen und Upload von Binärdateien

Insgesamt wurde von den 16 Nutzerkonten 227mal eine Reservierung vorgenommen, also der Zeitraum von fünf Minuten für Laborexperimente gestartet. Dabei wurde 263mal eine Binärdatei hochgeladen. Pro Reservierung können mehrere Binärdateien hochgeladen werden; es ist jedoch auch möglich, dass keine Binärdatei hochgeladen wird, beispielsweise, wenn lediglich die Reservierung ausprobiert wird.

Die Auswahl des FPGAs erlaubt Rückschlüsse auf die Art des Experiments. Im Präsenzpraktikum wird das ältere Cyclone IV FPGA verwendet, und wenn auch im Remote-Labor dieses FPGA genutzt wird, werden vermutlich Versuche aus dem Präsenzlabor vor- oder nachbereitet. Bei Verwendung des neueren Cyclone V FPGAs erfolgt wahrscheinlich ein Vergleich der beiden FPGAs.

Die Auswertung zeigt, dass beide FPGAs fast gleich häufig verwendet wurden: 128mal wurde das Cyclone IV verwendet und damit Experimente aus dem Präsenzlabor ins Remote-Labor verlagert, und 135mal wurde das Cyclone V verwendet und somit ein Versuch durchgeführt, der nur mit dem Remote-Labor möglich ist.

Zur genaueren Analyse wird unterschieden, welche Bausteine durch die 16 Nutzerkonten verwendet wurden. Einem Nutzerkonto entsprechen, wie erläutert, ein oder zwei Studierende.

- 4 Nutzerkonten verwenden nur das Cyclone IV und somit **Versuche aus dem Präsenzlabor**,
- 4 Nutzerkonten verwenden nur das Cyclone V und somit **Versuche zusätzlich zum Präsenzlabor**,
- 3 Nutzerkonten verwenden beide FPGAs und arbeiten **umfassend mit dem Remote-Labor**,
- 5 Nutzerkonten haben keine Binärdatei hochgeladen und somit **den Zugriff auf das Remote-Labor ausprobiert**.

3 Ein Zugriff direkt aus dem Lernmanagementsystem (LMS) der Hochschule ist prinzipiell möglich, wurde aber zunächst nicht umgesetzt. Studierende registrieren sich direkt im Remote-Labor.

Nutzungszeiten des Remote-Labors

Ebenfalls wurde betrachtet, zu welchen Zeiten Studierende das Remote-Labor nutzen. Dabei wurde erneut gezählt, wie oft eine eigene Binärdatei hochgeladen wurde und neben der Uhrzeit (in Stundenschritten) zusätzlich zwischen den Wochentagen Montag bis Freitag und dem Wochenende unterschieden.[4]

Bild 6 zeigt die Verteilung der insgesamt 263 Uploads auf Uhrzeiten und Tage. Bezüglich der Uhrzeiten arbeiten Studierende hauptsächlich am Abend mit Schwerpunkt um 20 Uhr mit dem Remote-Labor. Aber auch vormittags mit Schwerpunkt um 11 Uhr sowie am späten Abend mit Schwerpunkt um 1 Uhr wird das Remote-Labor häufig genutzt. Bezogen auf die Wochentage kann festgestellt werden, dass Studierende hauptsächlich in der Woche (243 Uploads) und weniger am Wochenende (20 Uploads) arbeiten.

Abbildung 6: Aktive Nutzung des Remote-Labors nach Uhrzeit und Tagen (263 Uploads)

Bei der Interpretation der Nutzungszeiten muss beachtet werden, dass durch E-Learning unterstützte Lehrangebote noch kein Standard sind und insbesondere das hier betrachtete Remote-Labor das momentan einzige unserer Hochschule ist. Wenn zukünftig ein höherer Anteil an digital angereicherten Lehrveranstaltungen angeboten wird (Handke, 2017) und weitere Remote-Labore im Studienverlauf genutzt werden, wird sich das Nutzungsverhalten der Studierenden möglicherweise ändern.

Wahl der Laborversuche

Das Remote-Labor kann nicht direkt erkennen, welcher der Versuche (A, B, C) durchgeführt wird. Der Quellcode für die Versuche wird auf dem Rechner der Studierenden in eine Binärdatei übersetzt, und dieses Binärformat ist vom FPGA-Her-

4 Die Auswertung erfolgt entsprechend des Stundenwerts beim Start des Experiments, das heißt die Zeiten 19:00 bis 19:59 Uhr werden zum Stundenwert 19 Uhr.

steller nicht dokumentiert. Zur Analyse kann jedoch das Verhalten des FPGAs im Experiment genutzt werden. Zum einen erzeugen die Laborversuche Ausgangsbilder mit unterschiedlichen Charakteristiken (vergleiche Bild 3), zum anderen ergeben die Laborversuche unterschiedliche Verlustleistungen, die eine Identifikation ermöglichen.

Im vorliegenden Labor wird die Stromaufnahme des FPGA protokolliert. Aus diesem Wert in der Einheit Milliampere (mA) berechnet sich durch Multiplikation mit der Spannung die Verlustleistung. Die beiden FPGAs haben unterschiedliche Stromaufnahmen und Verlustleistungen, und hier soll das Cyclone IV betrachtet werden.

Für Versuch A beträgt die Stromaufnahme etwa 10 mA, für Versuch C etwa 40 bis 45 mA. Bei Versuch B variiert sie abhängig von der Anzahl der Registerstufen. Die Zuordnung von Versuch zu Stromaufnahme ist somit nicht eindeutig, aber dennoch eine gute Indikation für die durchgeführten Versuche.

Für die 135 Binärdateien, die auf dem Cyclone IV programmiert wurden, erfolgten 479 Messungen. Messungen erfolgen direkt nach dem Upload der Binärdatei, nach Änderung des Eingangsbildes, Betätigung eines Schalters oder durch eine Schaltfläche zum Wiederholen der Messung. Bild 7 zeigt die Verteilung der Messwerte in Bereichen mit Schrittweite von jeweils 15 mA.

Abbildung 7: Häufigkeit der Messwerte im Remote-Labor (479 Messungen)

Das wichtigste Ergebnis ist, dass eine große Bandbreite an Messwerten auftritt. Daraus folgt, dass Studierende Versuche mit unterschiedlicher Stromaufnahme und somit unterschiedlicher Schaltungskomplexität durchgeführt haben.

Der erste Bereich (5–19 mA) tritt am häufigsten auf und enthält Experimente mit Versuch A. Der dritte Bereich (35–49 mA) enthält Experimente mit Versuch C und ist ebenfalls häufig verwendet. Messwerte für Versuch B sind in allen Bereichen enthalten, und die Werte von 80 mA und größer zeigen, dass Studierende versuchen, das FPGA mit hoher Anzahl an Registerstufen zu programmieren.

Nutzung während der Corona-Pandemie

Im Sommersemester 2020 kehrte sich durch die Corona-Pandemie das Verhältnis von Präsenzlehre und Online-Lehre um und die Praktikumsdurchführung per Remote-Labor wurde der Normalfall. Studierende können dabei sowohl eine Betreuung per Videokonferenz zu festen Zeiten nutzen als auch unabhängig von Betreuungszeiten arbeiten.

Um Studierende ohne eigenen Computer nicht auszuschließen, wird für einen späteren Zeitpunkt auch ein Praktikum im Präsenzlabor mit besonderen Hygienemaßnahmen angeboten. Zum momentanen Zeitpunkt (Ende Mai 2020) haben 19 Studierende am Remote-Labor teilgenommen, nur 1 Student hat sich für Präsenztermine angemeldet. Die Beteiligung von 95 Prozent zeigt eine hohe Akzeptanz des Remote-Labors. Da das Semester noch nicht abgeschlossen ist, ist es für eine weitergehende Beurteilung noch zu früh.

Fazit

Der Beitrag zeigt, wie ein Remote-Labor als Ergänzung zum Präsenzlabor eingesetzt und die zeitliche Beschränkung für die Arbeit im Praktikum aufgehoben wird. Studierende können jederzeit auf die Versuchsanordnung zugreifen, wodurch Selbstorganisation und Eigenverantwortung ermöglicht werden. Außerdem können Studierende verschiedene Bauelemente der Digitaltechnik vergleichen und somit Lernziele erreichen, die ohne Remote-Labor nur mit hohem Aufwand erreichbar wären.

Die Befragung der Studierenden zeigt, dass diese Art der Praktikumsdurchführung von den Studierenden akzeptiert wird. Eine Mehrzahl der Befragten könnte sich vorstellen, dass einige Praktikumsversuche im Studienverlauf komplett in ein Remote-Labor verlagert werden. Und auch die Nutzungszahlen belegen die Akzeptanz von Remote-Laboren.

Für den didaktischen Einsatz in einer Lehrveranstaltung wird aufgezeigt, wie die Aufgabenstellung eine sich ergänzende Nutzung von Präsenzlabor und Remote-Labor ermöglicht. Dabei sind insbesondere transparente Anforderungen an die Studierenden sinnvoll. Die Teilnahme an einem einführenden Präsenztermin, Überprüfung von Login-Zeiten und ein kurzer Bericht belegen die aktive Teilnahme am Praktikum und werden durch Testat bestätigt.

Während der Corona-Pandemie wurde das bislang optionale Remote-Labor zum Ersatz des Präsenzlabors. Nach den noch vorläufigen Erfahrungen ist dieses Einsatzszenario sehr gut umsetzbar und wird von den Studierenden akzeptiert. Es ist daher gut möglich, zukünftig vermehrt Remote-Labore einzusetzen, auch, wenn nach dem Ende der Corona-Pandemie Präsenzlabore wieder ohne Einschränkungen möglich sein werden.

Literaturverzeichnis

AbuShanab, S. (2018). *Remote and on-site laboratory system for low-power digital circuit design*. Siegen. https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:467-13459 URN: urn:nbn:de:hbz:467-13459

Franuszkiewicz, J.; Frye, S.; Terkowsky, C. & Heix, S. (2019). Flexibles und selbstorganisiertes Lernen im Labor – Remote-Labore in der Hochschullehre. *Zeitschrift für Hochschulentwicklung* 14 (3), 273–285. doi: 10.3217/zfhe-14-03/16.

Froyd, J. E.; Wankat, P. C. & Smith, K. A. (2012). Five Major Shifts in 100 Years of Engineering Education. *Proc. IEEE 100 (Special Centennial Issue)*, 1344–1360. doi: 10.1109/JPROC.2012.2190167.

García-Zubía, J.; Angulo, I.; Orduna, P.; Lopez-de-Ipina, D.; Hernández, U.; Rodríguez, L.; Dziabenko, O. & Canivell, V. (2012). Weblab-Deusto-CPLD: A Practical Experience. International *Journal of Online and Biomedical Engineering (IJOE)*, 8(S1), 17–18.

Handke, J. (2017). *Handbuch Hochschullehre Digital. Leitfaden für eine moderne und mediengerechte Lehre*. 2., überarbeitete Auflage. Baden-Baden: Tectum Verlag. doi: 10.5771/9783828867819.

Intel Press Release (2015). *Audi Selects Altera SoC FPGA for Production Vehicles with 'Piloted Driving' Capability*. Verfügbar unter https://newsroom.intel.com/news-releases/audi-selects-altera-soc-fpga-production-vehicles-piloted-driving-capability/ [29.05.2020]

Kirchherr, J.; Klier, J.; Lehmann-Brauns, C. & Winde, M. (2019). *Future Skills: Welche Kompetenzen in Deutschland fehlen*. Berlin: Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e. V.

Mayoz, C. A.; da Silva Beraldo, A. L.; Villar-Martinez, A.; Rodriguez-Gil, L.; de Souza Seron, W. F. M.; de Oliveira, T. & Orduña, P. (2020). FPGA Remote Laboratory: experience in UPNA and UNIFESP . In: Auer M., May D. (eds) Cross Reality and Data Science in Engineering. REV 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1231. Springer, Cham. doi: 10.1007/978-3-030-52575-0_9

Schwandt, A. & Winzker, M. (2017). Modular evaluation system for low-power applications: Educating undergraduate students in advanced digital design. In I*CECS 2017. 24th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, S. 364–367. doi: 10.1109/ICECS. 2017.8292111.

Schwandt, A. & Winzker, M. (2019). Make it Open – Improving Usability and Availability of an FPGA Remote Lab. In: *Proceedings of 2019 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, S. 232–236. doi: 10.1109/EDUCON.2019.8725098.

Winzker, M. (2018). *Behind the Scenes of the FPGA Remote Lab*. Verfügbar unter https://youtu.be/RjiaqSRyPuw [29.05.2020].

Winzker, M. & Schwandt, A. (2019). Open Education Teaching Unit for Low-Power Design and FPGA Image Processing. In *Proceedings of 2019 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*. doi: 10.1109/FIE43999.2019.9028694.

Wuttke, H.-D.; Hamann, M. & Henke, K. (2015). Integration of Remote and Virtual Laboratories in the Educational Process. In *Proceedings of 2015 12th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV)*. doi: 10.1109/REV.2015.7087283.

Zhu, Y.; Weng, T. & Cheng, C.-K. (2009). Enhancing Learning Effectiveness in Digital Design Courses Through the Use of Programmable Logic Boards. *IEEE Trans. Educ.* 52 (1), S. 151–156. doi: 10.1109/TE.2008.921796.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Nutzung des Remote-Labors per Internetzugriff 178

Abb. 2 Benutzerinterface für das Remote-Labor 180

Abb. 3 Eingangsbild und drei Ausgangsbilder für Versuche A, B, C 180

Abb. 4 Studentische Befragung zur Akzeptanz des Remote-Labors 184

Abb. 5 Studentische Befragung zur Wichtigkeit der Versuchsoptionen 185

Abb. 6 Aktive Nutzung des Remote-Labors nach Uhrzeit und Tagen 187

Abb. 7 Häufigkeit der Messwerte im Remote-Labor 188

Architektur und Einsatz eines hybriden Online-Labors in der MINT-Grundlagenausbildung

Heinz-Dietrich Wuttke, Karsten Henke

Abstract

Der folgende Beitrag beschreibt ein hybrides Online-Labor, das an der TU Ilmenau entwickelt wurde und in der Grundlagenausbildung zur Technischen Informatik sowie in der Weiterbildung eingesetzt wird. Anhand der Aufgaben, die mit seiner Hilfe gelöst werden können, wird ein Überblick über Lernszenarien gegeben, in denen das Labor Anwendung findet, und es wird gezeigt, welchen Nutzen Studierende insbesondere in Bezug auf die neuen Kompetenzanforderungen der Industrie 4.0 aus ihm ziehen können. Die dem Labor als Plattform zugrundeliegende Hardware- und Softwarearchitektur wird kurz beschrieben. Besonderheiten sind dabei die auf Web-Services aufgebaute Kommunikationsstruktur und die zum Labor gehörenden interaktiven Werkzeuge, die als interaktive Inhaltsobjekte auch in Lernmanagementsysteme eingebunden werden können. Eine cloudbasierte Vernetzung garantiert die einfache Wartbarkeit der auf zurzeit zehn internationale Universitäten verteilten Instanzen des GOLDi-Labors (GOLDi – Grid of Online Devices Ilmenau). Der Austausch in diesem internationalen Netzwerk führt zu neuen Ideen der Weiterentwicklung des Labors, die in einem abschließenden Abschnitt dargestellt werden.

Schlüsselwörter: hybrides Online-Labor, interaktive Inhaltsobjekte, Cloud-Architektur, Entwurf digitaler Systeme, Online-Lernszenarien

1 Einleitung

Nachdem das Internet nahezu in alle Bereiche des täglichen Lebens vorgedrungen ist und zahlreiche neue Kommunikationsformen zwischen Menschen in Sozialen Netzwerken ermöglicht hat, wird seine inzwischen weitgehend erreichte allgemeine Verfügbarkeit verstärkt zur direkten Kommunikation von Geräten („Dingen“) untereinander genutzt (Bullinger & Hompel, 2007). Idee der als „Internet der Dinge“ (Internet of Things/IoT) bezeichneten Basistechnologie ist es, dass Dinge über Sensorwerte und andere Informationen verfügen und diese als Daten im Internet für andere Dinge zur Verfügung stellen. Das kann z. B. ein Parkplatz sein, der einem Auto seine Verfügbarkeit mitteilt, eventuell versehen mit zusätzlichen Eigenschaften wie Größe oder Reservierungsbedingungen. Bezogen auf Produktionsprozesse führt dieser Denkansatz zu völlig neuen Organisationsstrukturen und Verantwortlichkeiten. Produktionsanlagen können z. B. den Verschleiß ihrer Werkzeuge überwachen

oder Teile, die eine Fertigungsstraße durchlaufen, können den Maschinen mitteilen, welche Bearbeitung sie von der Maschine „erwarten“. Derartige Konzepte treiben eine umfassende Digitalisierung voran, da alle hier benötigten Informationen digital vorhanden sein müssen und eine vernetzte Infrastruktur permanent, zuverlässig und sicher zur Verfügung stehen muss. Anwendungsfelder dieser neuen Arbeitswelten finden sich z. B. beschrieben in (Botthof, 2009).

Aus dem beschriebenen Hintergrund ergeben sich eine Reihe neuer Anforderungen an künftige Ingenieurabsolvent*innen, die auf veränderte Arbeitswelten vorbereitet werden müssen, die geprägt sind durch Teamarbeit, interdisziplinäres Arbeiten, globales Agieren und das agile Bearbeiten von Projekten (Winde & Schröder, 2018). Die alle Bereiche durchdringenden neuen Technologien und Konzepte im Zusammenhang mit dem Internet der Dinge verlangen von den künftigen Ingenieur*innen vielfältige Kompetenzen, Kreativität im sicheren Umgang mit permanent verfügbarer multimodaler Sensorik und nicht zuletzt den verantwortungsvollen Einsatz künstlicher Intelligenz bei der Analyse der daraus resultierenden Datenmengen.

Der praktische Umgang mit virtuellen, über das Internet erreichbaren interaktiven Ressourcen soll derartige Kompetenzen fördern. In der Ausbildung Studierender leisten Online-Laboratorien hierzu einen wichtigen Beitrag (Haertel, Terkowsky, May, & Pleul, 2017). Sie lassen sich einteilen in virtuelle Laboratorien, die auf Simulationen und virtuellen Objekten beruhen und in ferngesteuerte Laboratorien, sogenannte Remote-Labs, die das Experimentieren mit realen Objekten an entfernten Orten über das Internet erlauben. Eine Kombination aus beiden Varianten wird als hybrides Online-Labor bezeichnet (Zutin, Auer, Maier, & Niederstatter, 2010).

Der folgende Beitrag diskutiert den Einsatz eines hybriden Online-Labors in der Informatik-Grundlagenausbildung von Studierenden technischer Fachrichtungen. Es wird beschrieben, in welchen Lernszenarien es vorteilhaft eingesetzt werden kann und wie seine Architektur diese vielseitigen Anwendungen unterstützt. Dabei werden auch die Vorteile cloudbasierten Arbeitens und die Instanziierungs- und Fernwartungsmöglichkeiten des Labors erörtert.

2 Aufgabenstellungen in der Informatik-Grundlagenausbildung

Mit dem in den folgenden Kapiteln beschriebenen Labor sollen Themengebiete der Technischen Informatik, wie sie im Grundlagenstudium der TU Ilmenau für alle ingenieurtechnischen Studiengänge angeboten werden, unterstützt werden. Hier werden die Grundlagen für das Verständnis, den systematischen Entwurf und die formale Verifizierung digitaler Systeme gelegt.

Das Lernziel der Lehrveranstaltung besteht darin, Studierende zu befähigen, selbstständig digitale Steuerungen zu entwerfen, aufzubauen und ihre korrekte Funktion nachzuweisen. Studierende sollen dazu Kompetenzen erlangen, um Sensorwerte mithilfe einer digitalen Schaltung zu erfassen und so zu verarbeiten, dass

bestimmte Aktoren in einer in der Aufgabenstellung vorgegebenen Weise reagieren. Dies kann z. B. die Steuerung einer Fußgängerampel sein oder einer einfachen Transporteinrichtung.

Auf dem Weg zu diesem Ziel werden zunächst mathematische Grundlagen der Booleschen Algebra vermittelt. Darauf aufbauend erfolgt die Vermittlung von Kenntnissen zur systematischen, formal begründbaren Funktionsbeschreibung von Elementen digitaler Steuerungen wie etwa die Formulierung von Abhängigkeiten von Sensorwerten in Form von Ausdrücken in Boolescher Algebra. Die Überführung dieser Beschreibungen und ihre Optimierung bzgl. des Ressourcenverbrauchs bilden das nächste Teilziel im Lernprozess. Als weiteres theoretisches Konzept, das insbesondere für den Aufbau sequenzieller Schaltungen von Bedeutung ist, wird das Prinzip endlicher Automaten (sog. Finite State Machines, FSM) vermittelt. Aufbauend auf diesen theoretischen Voraussetzungen wird gezeigt, wie diese Beschreibungen in digitale Schaltungen umgesetzt werden können. Um ihr korrektes Funktionieren nachzuweisen, ist ihr praktischer Aufbau durch Zusammenschalten elementarer Grundschaltungen, die in ihrer Funktion den Grundelementen der Booleschen Algebra entsprechen, erforderlich. Dies wird herkömmlich in einem Laborexperiment durchgeführt. Nachfolgend wird beschrieben, wie dieses Lehrkonzept mithilfe der Komponenten des hybriden Online-Labors „GOLDi“ begleitet und unterstützt wird.

In das Online-Labor sind eine Reihe von Online-Werkzeugen integriert, die den Studierenden während der einzelnen Lerneinheiten die Möglichkeit eines internetgestützten Experimentierens mit dem in der Theorie vermittelten Wissen geben. Diese auf den Ausbildungsprozess zugeschnittenen Online-Werkzeuge sind als interaktive Inhaltsobjekte (Interactive Content Objects, ICOs) gestaltet. So können etwa Gesetzmäßigkeiten der Booleschen Algebra mithilfe des Werkzeugs „SANE“ (Schaltsysteme im Netz) interaktiv untersucht werden (Wuttke, Hutschenreuter, & Henke, 2019). Abb. 1 zeigt einen Screenshot des SANE-Werkzeuges, der die Anwendung der Booleschen Algebra auf die Minimierung von digitalen Schaltungen verdeutlicht.

Studierende können mit vorgegebenen Aufgaben oder frei mit beliebigen Ausdrücken der Algebra experimentieren und sich so in der Interaktion Zusammenhänge der algebraischen Gesetzmäßigkeiten erarbeiten und erklären. Zu diesem Zweck sind die Werkzeuge so gestaltet, dass sie Berechnungen ausführen und die Ergebnisse in unterschiedlichen frei wählbaren Sichten und Zusammenhängen präsentieren – z. B. Boolesche Ausdrücke in unterschiedlichen Normalformen oder deren Wertverlauf als Wertetabelle.

Für sequenzielle Schaltungen und Steueralgorithmen, die auf der theoretischen Basis von Finite State Machines systematisch entworfen werden, steht das Werkzeug „GIFT“ (Grafisches interaktives FSM- Tool) zur Verfügung (Henke, Fäth, Hutschenreuter & Wuttke, 2017). Mithilfe eines Grafik-Editors können hier Steueralgorithmen als Automatengraphen entworfen und analysiert werden. Die Analyse wird dabei anhand von auswählbaren animierten Kurvenverläufen der Eingangs- und Ausgangssignale des Entwurfes oder durch Experimentieren im hybriden Online-Labor GOLDi vorgenommen.

Abbildung 1: Minimierung Boolescher Ausdrücke

Den Bezug zwischen der Booleschen Algebra, schaltalgebraischen Ausdrücken und ihrer schaltungstechnischen Umsetzung stellt das Online-Werkzeug „BEAST“ (Blockdiagramm-Bearbeitungs- und Simulations-Tool) (Wuttke, Henke & Hutschenreuter, 2020) her. Hier können Studierende virtuell digitale Schaltungen erstellen und in der Animation ihr Verhalten anhand von Kurvenverläufen und farbig gekennzeichneten Verbindungen beobachten, die stromführende und inaktive virtuelle Leitungen symbolisieren. Abbildung 2 zeigt einen Screenshot dieses Werkzeugs.

Die vorgestellten Werkzeuge SANE, GIFT und BEAST dienen dem praktischen Experimentieren auf Basis der Kompetenzen, die in einzelnen Abschnitten des Ausbildungskonzeptes erworben wurden. Damit können die Studierenden problemorientiert Teilaufgaben auf dem jeweiligen Kenntnisstand interaktiv lösen. Da die Lösungen dieser Teilaufgaben auch wesentliche Bestandteile von Steueralgorithmen sind, können die Werkzeuge auch bei der Vorbereitung der Laborexperimente im GOLDi-Labor genutzt werden.

Hiermit können sowohl einfache kombinatorische Schaltungen als auch, darauf aufbauend, komplexere sequenzielle Schaltungen als Steueralgorithmen entwickelt werden.

Abbildung 2: Multiplexer-Schaltung mit dem Werkzeug „BEAST“

Der Schwierigkeitsgrad der Aufgabenstellungen kann im Verlauf des Semesters dem jeweiligen Kenntnisstand angepasst werden. So sind zu Beginn des Semesters nur einfache Aufgaben wie das Arbeiten mit Booleschen Konstanten und Variablen möglich, die aber umgehend im Online-Labor durch das Setzen von Variablen (Aktoren) auf konstante Werte getestet werden können und eine unmittelbare Reaktion im Labor auslösen. Entsprechende Schutzeinrichtungen im Labor und Feedbackmeldungen schützen dabei die Laborgeräte vor Fehlbedienungen (z. B. das Ansteuern von Motoren über bestimmte Endkontakte hinaus). Im nächsten Ausbildungsschritt folgen dann Aufgaben zu Booleschen Ausdrücken, mit deren Hilfe komplexere Abhängigkeiten von Sensorsignalen zur Steuerung der Aktoren berücksichtigt werden können. Um aufeinanderfolgende Abläufe zu steuern, sind schließlich Kompetenzen zum Entwurf sequenzieller Schaltungen bzw. endlicher Automaten (FSM) erforderlich, die mit den oben beschriebenen Onlinewerkzeugen ebenfalls bearbeitet und in das GOLDi-Lab exportiert werden können.

Zum Nachweis der erworbenen Kompetenzen für einen selbstständigen Entwurf digitaler Steuerungen ist die Funktionsfähigkeit und Korrektheit eines entworfenen Steueralgorithmus im Laborversuch nachzuweisen. Im GOLDi-Lab besteht die Aufgabe der Studierenden entsprechend darin, einen Steueralgorithmus für ein elektromechanisches Modell, das sogenannte Steuerobjekt, zu entwerfen. Je nach

Kenntnisstand im Ausbildungsprozess können als Steuereinheiten dabei unterschiedliche Plattformen verwendet werden.

In der Grundlagenausbildung kommen als Steuergeräte zunächst virtuelle Interpreter zum Einsatz, die mit den in der Theorie erworbenen Kompetenzen einfach zu bedienen sind. Die Variablen der Booleschen Ausdrücke werden im Labor an die entsprechenden Sensoren bzw. Aktoren gekoppelt und mithilfe eines Interpreters taktgesteuert berechnet. Über eine Web-Kamera können das Verhalten des Steuerobjektes sowie die Belegung der Eingangs- und Ausgangsvariablen, d. h. die aktuellen digitalen Sensor- und Aktorwerte, beobachtet werden.

In höheren Semestern kommen dann als Steuergeräte Mikrokontroller, programmierbare Schaltkreise (FPGAs) oder industrielle speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) zum Einsatz. Die hierfür notwendigen Kompetenzen zum Programmieren in höheren Programmiersprachen (z. B. C#) oder in Hardware-Beschreibungssprachen (z. B. VHDL), wie sie zur Programmierung von FPGAs erforderlich sind, werden in separaten Lehrveranstaltungen erworben. Anspruchsvolle Aufgaben, die mit diesen Kenntnissen gelöst werden können, sind z. B. parallele Steueralgorithmen für eine Fahrstuhlsteuerung einschließlich der Steuerung der Bedienfelder innerhalb und außerhalb des Fahrstuhlmodells. Interessant für die Ausbildung in höheren Semestern ist dabei auch der Vergleich der Realisierung von Steueralgorithmen für Mikrokontroller als Softwarelösung mit der Realisierung als Hardwarelösung auf FPGA-Basis oder der Lösung mit industriellen Steuerungen (SPS). Für das Editieren der Quelltexte im Browser und deren Kompilierung stehen als Cloud-Service professionelle Entwurfswerkzeuge zur Verfügung, die über die für alle Programmiersprachen einheitliche Webschnittstelle WIDE (Web-Integrated Design Environment) angesteuert werden können (Henke, Nau, Hutschenreuter, Bock & Wuttke, 2020).

Die Realisierung und Weiterentwicklung des Labors erfolgt stets unter Einbeziehung von Studierenden höherer Semester im Rahmen von Softwareprojekten und Studienjahresarbeiten sowie in Bachelor- und Masterabschlussarbeiten. Insbesondere dabei werden Kompetenzen für die Herausforderungen, wie sie das Konzept der Industrie 4.0 an künftige Absolventen stellt, herausgebildet. Um die Vielfältigkeit derartiger Aufgaben zu umreißen, soll im folgenden Abschnitt die Architektur des GOLDi-Labs beschrieben werden.

3 Architektur

3.1 Hardware

Das hybride Online-Labor „GOLDi“ besteht in seinem Hardwarekern aus einem Laborserver, einer Anzahl parallel betreibbarer Steuerobjekte (elektromechanische Modelle wie z. B. ein Fahrstuhl, ein Hochregallager, eine Fertigungszelle mit Transportbändern) sowie unterschiedlichen Steuereinheiten (z. B. speicherprogrammierbare Steuerung (SPS), Mikrokontroller, FPGA-Board), die ebenfalls in mehreren real

existierenden Exemplaren zur Verfügung stehen. Jedes Steuerobjekt verfügt über eine Interfacekarte (PSPU), die für die Protokollverarbeitung des Netzes und den Schutz des jeweiligen Objektes vor Fehlbedienungen verantwortlich ist und eine Webcam. Die Umsetzung der Ethernet-Protokolldaten auf die Ein-/Ausgabeanschlüsse (GPIO) der Steuereinheiten erfolgt ebenfalls über je eine spezielle Interfacekarte (BPU). Abbildung 3 gibt einen Überblick über die Hardwarekomponenten und -struktur.

Abbildung 3: Hardwarestruktur des GOLDi-Labs

Steuerobjekte und Steuereinheiten sind über einen internen Ethernet-Switch verbunden und können beliebig für Experimente, bestehend aus je einem Steuerobjekt und einer Steuereinheit, gekoppelt werden. Diese flexible Architektur erlaubt eine einfache Erweiterung der verfügbaren Steuerobjekte und -einheiten, ohne dass an der Gesamtarchitektur Hardwareänderungen vorgenommen werden müssten. Auch bei Ausfall einzelner Steuerobjekte oder -einheiten bleibt das restliche System arbeitsfähig. Welche Geräte aktuell verfügbar sind, wird von der Verwaltungssoftware kontinuierlich überwacht.

3.2 Software

Die Software des GOLDi-Labs wird über eine Datenbank verwaltet. In ihr sind die Werkzeuge und die Management-Software für Nutzer*innen und Experimente sowie Dokumente abgelegt. Die Nutzer*innenschnittstellen der Services werden über eine

Cloud verwaltet und als HTML-V-Seiten über Java-Skript erzeugt. Dadurch sind sie auch auf mobilen Geräten lauffähig. Folgende Web-Services stehen zur Verfügung:

- Benutzer*innenschnittstelle zur Durchführung von Experimenten (Experiment Control Panel (ECP)) einschließlich virtueller Steuerobjekte und -einheiten
- Buchung und Vorplanung von Experimentierzeitfenstern
- Benutzer*innenverwaltung
- GOLDi-Dokumentation für Steuereinheiten und elektromechanische Modelle
- SANE für Steueralgorithmen auf Basis Boolescher Ausdrücke
- BEAST für Steueralgorithmen auf Basis digitaler Schaltungen
- GIFT für Finite-State-Machine-basierte Steueralgorithmen
- WIDE für das Editieren und Kompilieren von Algorithmen in höheren oder Hardware-Programmiersprachen

Die Abbildung 4 zeigt die Softwarestruktur des GOLDi-Labs.

Abbildung 4: Softwarestruktur des GOLDi-Labs

Basierend auf diesen Webservices und entsprechender Hardware vor Ort sind weitere zehn Instanzen des GOLDi-Labs an verschiedenen Standorten in der Ukraine, in Georgien sowie in Armenien installiert. Die cloudbasierte Softwarearchitektur erlaubt eine effiziente Fernwartung und Aktualisierung der Laborsoftware. Alle Änderungen in der Cloud stehen sofort allen Partnern zur Verfügung, ohne dass vor Ort Installationen oder Updates vorgenommen werden müssten. Steuereinheiten und Steuerobjekte unterscheiden sich an den einzelnen Standorten und sind an die ört-

lichen Erfordernisse der Lehre angepasst. Sie stehen allen Nutzer*innen der GOLDi-Cloud entsprechend der verfügbaren Kapazitäten zur Verfügung.

3.3 Experimentieren mit dem hybriden Online-Labor GOLDi

Labore können unterteilt werden in ferngesteuerte, virtuelle und hybride Labore. Remote Labs ermöglichen ferngesteuerte Experimente. Virtuelle Labore arbeiten ausschließlich in virtuellen künstlichen Welten. Hybride Labore kombinieren beide Ansätze, indem sie zusätzlich zu ferngesteuerten Experimenten mittels Simulation auch die Arbeit mit virtuellen Geräten ermöglichen, die in ihren wesentlichen Eigenschaften den realen Geräten entsprechen.

Das GOLDi-Labor setzt alle Varianten flexibel um. So wird es möglich, alle Experimente entweder vollständig virtuell oder an realen Geräten oder in einer Kombination aus beidem durchzuführen. Dieser Ansatz folgt der Idee der digitalen Zwillinge (Digital Twins), die für die Entwicklung von Industrie 4.0-Arbeitswelten künftig vermutlich große Bedeutung haben wird.

In den Experimenten haben die Studierenden die Aufgabe, einen Steueralgorithmus für ein bestimmtes Steuerobjekt zu entwerfen, der auf einer bestimmten Steuereinheit läuft. Als Steuerobjekte sind physikalische Systeme (elektromechanische Modelle eines Aufzugs, einer Produktionszelle, einer Pumpstation und weitere Objekte) verfügbar. Für jedes Steuerobjekt existiert ein digitaler Zwilling als virtuelles Steuerobjekt (vSO). Mikrokontroller, FPGAs (Field Programmable Gate Arrays) und industrielle speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) als reale Steuereinheiten sowie ein Interpreter als virtuelle Steuereinheit (vSE) sind verfügbar.

Die virtuelle Steuereinheit interpretiert und simuliert dabei eine abstrakte Beschreibung des Steueralgorithmus auf Basis eines endlichen Automaten (Finite State Machine (FSM)). Diese abstrakte Form des Steueralgorithmus ist unabhängig von einer konkreten Implementierung. Auf diese Weise kann der Steueralgorithmus in Experimenten getestet werden, ohne ihn auf einer realen Steuereinheit zu implementieren. Wie diese Flexibilität des hybriden Labors in unterschiedlichen Lernszenarien genutzt wird, ist Gegenstand von Abschnitt 4. Hier erfolgt zunächst eine allgemeine Beschreibung des Experimentierens im GOLDi-Lab.

Bevor ein Experiment gestartet wird, müssen Studierende entscheiden, wie es durchgeführt werden soll, mit realen oder virtuellen Geräten. Dazu wählt er/sie aus den verfügbaren Geräten per Mausklick eine reale oder virtuelle Steuereinheit (erste zwei Zeilen in Abbildung 5) und ein reales oder virtuelles Steuerobjekt (letzte zwei Zeilen in Abbildung 5, „Physikalisches System“ genannt). Danach kann er/sie das Experiment starten, d. h. den Steueralgorithmus eingeben, auf die gewählte Steuereinheit laden und in Aktion testen. Fehler im Steueralgorithmus werden durch Fehlverhalten des Steuerobjektes sichtbar oder über Fehlermeldungen mitgeteilt, falls der fehlerhafte Algorithmus Aktoren zu Bewegungen veranlasst, die das Steuerobjekt zerstören würden. Iterativ und interaktiv kann so die korrekte Lösung erarbeitet werden.

Abbildung 5: Konfigurierbare reale und virtuelle Geräte

Die Architektur des GOLDi-Labors erlaubt eine beliebige Kombination von realen und virtuellen Geräten. Während virtuelle Steuereinheiten und Steuerobjekte JAVA-Skripte sind und im Browser der Nutzer*innen laufen, sind die realen Geräte als Hardware im Labor vorhanden.

Abbildung 6 gibt einen Überblick über die digitalen Zwillinge und die Ankopplung der Aktor-/Sensorsignale.

Steuereinheiten (SE)		**Steuerobjekte (SO)**	
virtuell	real	virtuell	real
Finite State Machine Interpreter	Mikrokontroller FPGA Siemens SPS	Digitaler Zwilling der realen SO	Portalkran, Fahrstuhl, ...
browser-basiert	Hardware Geräte	browser-basiert	Hardware Geräte
Sensor → SE + SA → Aktor		Aktor → SO → Sensor	

Abbildung 6: Digitale Zwillinge des GOLDi-Lab

Die Steuereinheit (SE) empfängt Sensorsignale vom Steuerobjekt (SO) und setzt sie entsprechend dem Steueralgorithmus (SA) in Aktorsignale um, die an das Steuerobjekt gesendet werden.

Den Gesamtaufbau des GOLDi-Labs mit realen und virtuellen Geräten zeigt Abbildung 7. Virtuelle Geräte sind als JAVA-Skripte realisiert und laufen in einem Browser. Virtuelle Steuerobjekte bestehen dabei aus einem Animationsteil, der für die Visualisierung der Bewegungen der Steuerobjekte verantwortlich ist und einem Simulationsteil, der das Bewegungsverhalten des realen Steuerobjektes und dessen Sensor-/Aktorreaktionen nachbildet. Virtuelle Steuereinheiten beinhalten die virtu-

elle Steuerhardware (vSH) und den virtuellen Steueralgorithmus (vSA), der von den Studierenden in Form Boolescher Gleichungen für endliche Automaten (FSM) zu entwerfen ist. Als virtuelle Steuereinheit dient ein Interpreter für FSM-Gleichungen, der zyklisch die Werte der Steuersignale für die Aktoren aus den Gleichungen und aktuellen Sensorwerten berechnet. Die realen Geräte befinden sich im Labor und sind über ein lokales Ethernet (LAN) mit dem Laborserver verbunden. Dieser realisiert die Kommunikation mit den Browsern auf den Client-Geräten (PCs, Laptops oder mobile Geräte) über Web-Sockets. Der Laborserver ist mit den realen Steuerobjekten und Steuereinheiten (SE) über ein Ethernet LAN verbunden. Auf die Hardware der Steuereinheit (SH) wird der Steueralgorithmus (SA) der Studierenden mithilfe des Programmers geladen und während des Experimentes abgearbeitet.

Abbildung 7: Räumliche Anordnung realer und virtueller Geräte

Durch die Konfiguration des Experiments entscheiden Studierende zwischen vier Arten von Experimenten:

A) Virtuelle Experimente (SO virtuell, SE virtuell, SA abstrakt)
B) Abstrakte Experimente (SO real, SE virtuell, SA abstrakt)
C) Echte Fernexperimente (SO real, SE real, SA implementiert auf realer SH) und
D) Implementierungstest-Experimente (SO virtuell, SE real, SA implementiert auf realer SH)

Details der Realisierung dieser Experimentkonfigurationen sind in (Wuttke, Henke & Hutschenreuter, 2020) beschrieben. An dieser Stelle soll im nächsten Abschnitt nur auf die Nutzung der unterschiedlichen Konfigurationen in Lernszenarien eingegangen werden.

4 Gegenwärtige und künftige Lehrmethoden

Die Aufgabe in einem Experiment ist es, ein Steuerobjekt mit einem selbst entworfenen Steueralgorithmus zu steuern, sodass es einen gegebenen Bewegungsablauf vollzieht. Dazu ist ein Steueralgorithmus zu entwickeln, d. h. es sind Regeln zu formulieren, die Ausgangssignale für die Aktoren des Steuerobjekts erzeugen und dabei den letzten Steuerzustand sowie die Eingangssignale berücksichtigen, die durch Sensoren des Steuerobjekts verursacht werden. Dies ist ein sogenannter FSM-basierter Entwurf eines Steueralgorithmus und ist unabhängig von der späteren Implementierung in Hard- oder Software. Die Verwendung des Digital-Twin-Konzepts ermöglicht die Erforschung von Nebenwirkungen, die bei falschen Entwürfen auftreten können, bereits während der Entwurfsphase. Dabei können Teilkonzepte des Steueralgorithmus an virtuellen Steuerobjekten unabhängig von der späteren Implementierung ausprobiert werden. Die virtuellen Steuerobjekte verhalten sich auf die gleiche Weise wie die realen Objekte. Sobald der (Teil-)Algorithmus auf dem digitalen Zwilling funktioniert, wird er auch in der realen Umgebung funktionieren.

In den folgenden Beispielen wird erörtert, welche der in Abschnitt 3.3 beschriebenen Experimentkonfigurationen A) ... D) für welches Lernszenario sinnvoll anwendbar ist.

4.1 Hörsaal

Zur Demonstration des Entwurfsprozesses im Hörsaal eignet sich Konfiguration B), weil mit abstrakten Experimenten die schrittweise Erarbeitung FSM-basierter Steueralgorithmen gezeigt werden kann. Beginnend mit Konzepten der Booleschen Konstanten, Variablen und Ausdrücke wird schrittweise das Verständnis für das Konzept der endlichen Zustandsmaschinen geschaffen. Dazu wird gezeigt, wie man eine virtuelle Steuereinheit mit Grundelementen von Steueralgorithmen programmiert. Beispielsweise werden Aktoren y durch das Setzen auf konstante Boolesche Werte (0,1) in Bewegung gesetzt (z. B. y2 = 1, setze Aktor y2 auf logisch "1") bzw. in Abhängigkeit von Sensorwerten x oder deren logischer Verknüpfung die Bewegung wieder angehalten. So bewirkt z. B. die Gleichung y2 = x1&!x2, dass die Bewegung von Aktor y2 nur solange fortgesetzt wird, wie der Sensor x1 aktiv und x2 nicht aktiv ist. Die Auswirkungen auf die realen Steuerobjekte können auf diese Weise unmittelbar im Experiment während der Vorlesung demonstriert werden. Für Studierende im ersten Jahr ist es sehr motivierend, auf diese Weise eine Anwendung dessen zu sehen, was sie in der Theorie vermittelt bekommen.

4.2 Reflexion/„Flipped Classroom“

Sowohl für das Selbststudium als auch für Flipped-Classroom-Szenarien sind virtuelle Experimente (Konfiguration A) vorteilhaft. Diese Art von Experimenten laufen offline im Browser, sobald sie konfiguriert und gestartet wurden. Dadurch können die Studierenden ihre Experimente auch unabhängig von der Internetverbindung durchführen und Fragen für die Diskussion mit dem Trainer in den Seminaren vor-

bereiten. Sie können verschiedene Varianten von Steueralgorithmen oder Teilen davon ausprobieren und die Unterschiede erforschen oder die im Hörsaal gezeigten Experimente wiederholen. Da die virtuellen Experimente vollständig auf den Client-Rechnern laufen, können viele Studierende gleichzeitig Experimente durchführen. In Verbindung mit einem Lernmanagementsystem (LMS) kann der Kursinhalt direkt mit den in Abschnitt 2 beschriebenen Werkzeugen (SANE, BEAST, GIFT) und virtuellen Experimenten gekoppelt werden, sodass es möglich ist, das Gelesene unmittelbar interaktiv auszuprobieren. Auch für Übungs- und Testaufgaben werden die interaktiven Inhaltsobjekte im LMS genutzt – bislang allerdings nur mit wenigen Beispielen.

4.3 Geführte Konstruktion

In Workshops für die berufliche Bildung mit 10 bis 20 Personen verwenden Lehrende zunächst virtuelle Experimente (Konfiguration A) und lassen die Lernenden jeden der demonstrierten Schritte auf ihrem eigenen Computer nachvollziehen. Dies erfolgt zunächst unabhängig von einer späteren Implementierung auf der abstrakten Ebene der FSM, die auch in der Theorie vermittelt wurde. Auf diese Weise werden die Lernenden mit dem Designprozess und der Bedienung des GOLDi-Labs vertraut gemacht. Danach erhalten sie eine ähnliche Aufgabe, die sie selbstständig lösen sollen. Verschiedene von den Lernenden vorgeschlagene Lösungen dienen als Diskussionsgrundlage an einer Präsentationstafel und zur Auswahl der besten Lösung. Sie wird nach Wechsel in Konfiguration B) genutzt, um das reale Steuerobjekt damit zu steuern. Die Erfahrung zeigt, dass dies die Lernenden motiviert und sie dazu ermuntert, im Wettbewerb mit den anderen ihr Bestes zu geben.

In weiteren Verlauf des Workshops erfolgt die Implementierung der Steueralgorithmen in Hardware und Software. Um sicher zu sein, dass die Implementierung erfolgreich war, können die Lernenden zunächst in der Testkonfiguration D) mit virtuellen Steuerobjekten arbeiten. Schließlich wird das reale Experiment in Konfiguration C) verwendet.

4.4 Laborübungen

Um reale Experimente durch den Einsatz von Online-Laboren zu ersetzen, ist Konfiguration C) die adäquate Wahl. Das GOLDi-Buchungssystem ermöglicht die Reservierung einer dedizierten Konfiguration für ein bestimmtes Zeitfenster. Die Architektur des Labors erlaubt den Anschluss mehrerer gleicher Steuerobjekte und Steuereinheiten, ohne dass dies beim Konfigurieren des Experimentes beachtet werden muss. Bei der Reservierung von Experimenten wird dynamisch auf verfügbare Geräte zugegriffen. Sind z. B. drei Instanzen desselben Steuerobjekts installiert, ist dies für Benutzer*innen transparent. Sie sehen nicht, welches konkrete Gerät an das Experiment angeschlossen ist. Nur, wenn alle Geräte belegt sind, müssen sie nach einem anderen Zeitfenster suchen. Bei der Reservierung gibt es verschiedene Prioritätsklassen, sodass gewährleistet ist, dass Lehrende garantiert die für ihre Lehrveranstaltung notwendigen Reservierungen durchführen können.

4.5 Internationale Kooperation

Im Rahmen von ERASMUS-Projekten (ICo-op project Website, 2012) (DesIRE project Website, 2013) wurden Instanzen des GOLDi-Labs an Universitäten in der Ukraine, in Armenien und in Georgien aufgebaut und an die GOLDi-Cloud angeschlossen. Damit ist es möglich, für Experimente immer jenes Labor auszusuchen, das aktuell am jeweiligen Standort die beste Internetverbindung aufweist und bei Ausfällen oder Überlastungen auf Alternativen auszuweichen. Darüber hinaus können neue Konzepte des kollaborativen Arbeitens in internationalen Studententeams durchgeführt werden. So ist es z. B. denkbar, dass internationale Teams höherer Semester gemeinsam einen modularen Steueralgorithmus entwickeln, einzelne Module zunächst virtuell testen und dann zu einem gemeinsamen Ergebnis zusammenführen. Die dabei notwendigen Absprachen und Konzeptdiskussionen sowie das Arbeiten mit realen und virtuellen Geräten unterstützen die Studierenden bei der Entwicklung von Kompetenzen, wie sie für die von der Industrie 4.0 getriebene Entwicklung neuer Arbeitswelten erforderlich sind.

5 Weiterentwicklung

Künftige Schwerpunkte der Weiterentwicklung des GOLDi-Labs zielen in drei Richtungen:

1. Weitere Integration der ICOs und Experimente in ein LMS,
2. Erheben von anonymisierten Daten bei der Bearbeitung von Experimenten für Feedback- und Analysezwecke zur Verbesserung des Labors sowie
3. Nutzung der Daten zur Entwicklung von Konzepten für ein formatives Assessment der Studierenden und zur stärkeren Individualisierung der Ausbildung.

Lernmanagementsysteme haben in den letzten Jahren Einzug in die Hochschulausbildung gehalten. Sie bieten die Möglichkeit, beliebige Aktionen der Studierenden am Computer zu verfolgen und den Wissensstand zu überprüfen, den diese z. B. bezüglich der Taxonomie von Bloom und Krathwohl erreicht haben (Anderson, 2009). In derzeit üblichen LMS werden dazu Multiple-Choice-Fragen, Lückentexte und Ähnliches genutzt. Diese Prüfungsmethoden können aber nur niedrigere Niveaus der erwähnten Taxonomie, sogenannte LOTS (lower order thinking skills), verifizieren. Dazu gehören Erinnern, Verstehen und Anwenden von Gelerntem. Höhere Wissensniveaus wie Analyse, Synthese und Bewertung von Sachverhalten werden als „higher order thinking skills“ (HOTS) bezeichnet. Ziel der Weiterentwicklungen des GOLDi-Labs ist es, Ansätze zur Verifizierung dieser höheren Wissensniveaus in Verbindung mit interaktiver Lehrsoftware und Online-Laboren, die an ein LMS gekoppelt sind, zu erreichen. Als ein erstes Beispiel zeigt Abb. 8 die Integration von Aufgaben aus dem SANE-Werkzeug in Moodle.

Abbildung 8: Einbindung von ICOs in das LMS Moodle

Zur Erfassung der Daten wurde im PANDA-Projekt (Personalisierung von Lernprozessen durch Adaptivität, Nutzer*innenmodellierung und Datenanalyse der Lerner-Aktionen) ein Konzept entwickelt, wie Lernerdaten aus unterschiedlichen Onlinequellen sicher und anonymisiert in einem zentralen Datentresor gespeichert und für Lernanalyse Algorithmen bereitgestellt werden können (Hamann, Saul & Wuttke, 2015), (Wuttke, Hamann & Henke, 2015). Dafür werden im GOLDi-Lab entsprechende Schnittstellen zur Verfügung gestellt, über die die Aktionen der Studierenden sowie Fehlermeldungen während des Experimentierens aufgezeichnet werden können. Fehlermeldungen beziehen sich dabei insbesondere auf Meldungen der Schutzeinrichtungen der Steuerobjekte, die ansprechen, wenn die Steueralgorithmen unzulässige Bewegungen der Aktoren verursachen würden. Diese sind nur ein erster, einfach durchzuführender Ansatz. Für eine genauere Untersuchung der Fehler in den Algorithmen der Studierenden sind weitere Untersuchungen notwendig. Damit verbunden wird auch eine stärker individualisierte Ausbildung möglich, wie sie etwa in (Deimann, 2016) beschrieben wird.

Eine weitere Richtung der Weiterentwicklung des GOLDi-Labs ist die Gestaltung neuer Aufgabentypen, die sich nicht nur auf den Entwurf von Steueralgorithmen beziehen, sondern auch komplexere Aufgaben wie z. B. eine Ressourcenoptimierung und Aufgaben, die das Einbinden virtueller und realer Steuerobjekte zum Gegenstand haben. Hier bieten sich z. B. auch Aufgabenstellungen an, die nicht einen kompletten Algorithmus zum Ziel haben, sondern die Fehler- oder Verhaltensanalyse vorgegebener Algorithmen mit der Black-Box-Methode in den Vordergrund stellen (Poliakov, Wuttke & Henke, 2018).

6 Zusammenfassung

Mit dem in diesem Beitrag beschriebenen GOLDi-Lab steht ein hybrides Online-Labor zur Verfügung, das mit modernen Web-Technologien realisiert wurde und für die Ausbildung von Studierenden technischer Fachrichtungen eingesetzt werden kann. Im Labor ausführbare Experimente beziehen sich auf den systematischen Entwurf digitaler kombinatorischer und sequenzieller Schaltungen und Steueralgorithmen zur Steuerung von virtuellen und/oder realen Steuerobjekten mithilfe verschiedener programmierbarer Hardware-Steuereinheiten wie Mikrokontroller, Schaltkreise und SPS. Die Gestaltung des Online-Labors erlaubt vielfältige Einsatzszenarien in der Aus-und Weiterbildung, bei der in den Experimenten sowohl reale als auch virtuelle Geräte kombiniert werden können. Ein internationales Netzwerk aus mehreren Instanzen ermöglicht künftig vielfältige Kooperationsmöglichkeiten in der fach- und kulturübergreifenden Zusammenarbeit.

Literaturverzeichnis

Anderson, L. W. (Hrsg.). (2009). *A taxonomy for learning, teaching, and assessing* (Abridged ed., [Nachdr.] Ausg.). New York: Longman.

Botthof, A. (2009). *Das "Internet der Dinge" – die Informatisierung der Arbeitswelt und des Alltags.* Hans-Böckler-Stiftung.

Bullinger, H.-J. & Hompel, M. (Hrsg.). (2007). *Internet der Dinge*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Deimann, M. (2016). *Stärkere Individualisierung der Lehre durch Neue Medien*. (Geschäftsstelle Hochschulforum Digitalisierung, Herausgeber) Abgerufen am 25. 10 2018 von Arbeitspapier Nr. 26. Verfügbar unter http://www.che.de/cms/index.php?get Object=270&name=E-Learning&pk_eintrag=108&jahr=alle [25.10.2018].

DesIRE (Development of Embedded System Courses with implementation of Innovative Virtual approaches for integration of Research, Education and Production in UA, GE, AM), project Website (2013). Verfügbar unter http://www.tempus-desire.eu/ [7.10. 2020].

Fäth, T.; Henke, K.; Seidel, F.; Wuttke, H. D. & Hutschenreuter, R. (2018). On Effective Maintenance of Distributed Remote Laboratories. In *International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation, – Proceedings of 2018 15th REV.* Springer International Publishing, S. 80–89.

Haertel, T.; Terkowsky, C.; May, D. & Pleul, C. (2017). Entwicklung von Remote-Labs zum erfahrungsbasierten Lernen. In F. S. et al., *Engineering Education 4.0.* Cham: Springer. doi:10.1007/978-3-319-46916-4_9.

Hamann, M.; Saul, C. & Wuttke, H.-D. (2015). PANDA – A Platform for Open Learning Analytics. *Proceedings of the 7th International Conference on Computer Supported Education (CSEDU-2015)*, 467–473. doi:10.5220/0005489804670473.

Henke, K.; Fäth, T.; Hutschenreuter, R. & Wuttke, H.-D. (2017). Gift – An Integrated Development and Training System for Finite State Machine Based Approaches. *International Journal of Online Engineering (iJOE), 13*(08), 147–162.

Henke, K.; Nau, J.; Hutschenreuter, R.; Bock, R.-N. & Wuttke, H.-D. (2020). "Hidden" Integration of Industrial Design-Tools in E-Learning Environments. *REV2020 17th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation, – Proceedings of 2020 17th REV.* Springer International Publishing, S. 437–455.

ICo-op - (Industrial Cooperation and Creative Engineering Education based on Remote Engineering and Virtual Instrumentation), project Website (2012). Verfügbar unter http://www.ico-op.eu/ (ICo-op project Website) [30.03.2020].

Poliakov, M.; Wuttke, H.-D. & Henke, K. (2018). *FSM in the Black Box for the Remote Lab*. 2018 IEEE World Engineering Education Conference (EDUNINE), Buenos Aires, 2018, pp. 1–5, doi: 10.1109/EDUNINE.2018.8450993.

Wuttke, H. D.; Hutschenreuter, R. & Henke, K. (2019). Interactive Content Objects for Learning Digital Systems Design. In M. Auer, & T. Tsiatsos, *Mobile Technologies and Applications for the Internet of Things* (S. 59–69). Cham: Springer.

Wuttke, H.-D.; Hamann, M. & Henke, K. (2015). Integration of Remote and Virtual Laboratories in the Educational Process. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE), 11*(3), S. 62–67. Verfügbar unter https://online-journals.org/index.php/i-joe/article/view/4558 [7.10.2020].

Wuttke, H.-D.; Henke, K. & Hutschenreuter, R. (2020). Digital Twins in Remote Labs. In M. E. Auer, & K. R. Bhimavaram, *Cyber-physical Systems and Digital Twins* (S. 289–297). Cham: Springer International Publishing.

Wuttke, H.-D.; Henke, K. & Hutschenreuter, R. (2021). Virtual Control Units in Remote Labs. In M. Auer, & D. May (Hrsg.), *Cross Reality and Data Science in Engineering* (S. 223–231). Cham: Springer Publisher.

Zutin, D. G.; Auer, M. E.; Maier, C. & Niederstatter, M. (2010). *Lab2go — A repository to locate educational online laboratories*. Piscataway, NJ: IEEE.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Minimierung Boolescher Ausdrücke 196

Abb. 2 Multiplexer-Schaltung mit dem Werkzeug „BEAST“ 197

Abb. 3 Hardwarestruktur des GOLDi-Labs 199

Abb. 4 Softwarestruktur des GOLDi-Labs 200

Abb. 5 Konfigurierbare reale und virtuelle Geräte 202

Abb. 6 Digitale Zwillinge des GOLDi-Lab 202

Abb. 7 Räumliche Anordnung realer und virtueller Geräte 203

Abb. 8 Einbindung von ICOs in das LMS Moodle 207

Die Eignung von Remote-Laboren zur Förderung von Kompetenzen für die Industrie 4.0 am Beispiel von VISIR

Dominik May, Silke Frye, Claudius Terkowsky

Abstract

Mit der VISIR-Plattform existiert seit über zehn Jahren ein Remote-Labor im Fachgebiet Elektrotechnik, das an mehreren Standorten weltweit betrieben und für die Lehre genutzt wird. In vielen Bereichen hat es eine Vorreiterrolle im Bereich der Forschung zu Remote-Laboren eingenommen. Dennoch, so scheint es, ist das Thema der Remote-Labore in der Breite der Diskussion zu digitalem Lehren und Lernen, vor allem in den Ingenieurwissenschaften, noch nicht angekommen. Die vorliegende Arbeit untersucht daher am Beispiel von VISIR mittels des Vergleichs von geforderten Kompetenzen und verfolgten Lehr-Lernzielen das Potential von Remote-Laboren zur zukunftsorientierten Ausbildung von Ingenieurinnen und Ingenieuren. Dabei wird eine Verknüpfung zur Industrie 4.0 hergestellt. Das Ergebnis zeigt, dass das Remote-Labor VISIR zwar grundsätzlich Potential hinsichtlich der für die Industrie 4.0 geforderten Kompetenzen aufweist, es bislang aber von der VISIR-Community nur im geringen Maße und weniger im Bereich der fachspezifischen, sondern vor allem der fachübergreifenden Kompetenzen ausgeschöpft wird. Zur Lösung dieses Problems wird ein Austausch innerhalb der Community vorgeschlagen, um wechselseitig von den Erfahrungen der jeweils anderen zu profitieren und so das gesamte Potential der VISIR-Technologie nutzen zu können.

Schlüsselwörter: VISIR, Remote-Labore, Labordidaktik, Industrie 4.0, Lehr-Lernziele

1 Einleitung

Obwohl Remote-Labore (online fernsteuerbare Laboreinrichtungen) seit einigen Jahrzehnten in der Ingenieurausbildung eingesetzt werden, sind sie als digitales Tool nur begrenzt an Hochschulen verbreitet. So gibt es zwar eine feste internationale Community, die sich unter anderem in der International Association of Online Engineering (IAOE)[1] organisiert, dennoch haben sich entsprechende Labore in der Breite bislang nicht durchgesetzt (siehe hierzu insbesondere Ergebnisse der Ex-

1 Vgl. http://online-engineering.org/

pert*inneninterviews im finalen Kapitel des Sammelbands). Darüber hinaus handelt es sich bei den wissenschaftlich dokumentierten Laboren in vielen Fällen um maßgeschneiderte technologische Entwicklungen einzelner Einrichtungen, ohne über den Heimatstandort hinaus zu wirken (siehe hierzu auch den Beitrag von Ortelt und Terkowsky in diesem Band zur Motivation und Entstehung der Community Working Group „Remote-Labore" in Deutschland). Die VISIR-Plattform (Virtual Instrument Systems in Reality) ist in diesem Zusammenhang eine Ausnahme (Alves et al., 2018). Inzwischen verwenden internationale Hochschulen das gleiche Equipment, teilen darüber Ressourcen und treiben das gemeinsame Beforschen dieses Remote-Labors voran (Lima et al., 2017; Viegas, Lima, Alves, & Gustavsson, 2014). Unter der Prämisse, dass Remote-Labore Standort-, Zeit- und Kapazitätsbeschränkungen in der Laborausbildung lösen können, stellt VISIR im besonderen Maße sowohl didaktisch als auch wirtschaftlich eine interessante Lösung dar.

VISIR ist ein Remote-Labor für das Lehren und Lernen von Grundlagen der Elektronik, Elektrotechnik und Informationstechnik in Bildungseinrichtungen wie Schulen und Hochschulen. Mit dem vorliegenden Beitrag werden VISIR und seine Potentiale vor dem Hintergrund der Industrie 4.0 genauer beleuchtet. Auf den ersten Blick ergibt dieser Zusammenhang sich nicht unmittelbar, da es sich bei VISIR um ein Labor zur Grundlagenausbildung der Elektrotechnik und bei der Industrie 4.0 um das Thema digital vernetzte Produktion handelt. Dennoch treffen beide Bereiche sich in dem Punkt der Digitalisierung im Allgemeinen und der Fernsteuerbarkeit von technischem Equipment im Speziellen. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, welchen Beitrag aktuelle Entwicklungen in der Laborausbildung leisten können, um Studierende technischer Fächer auf eine durch Industrie 4.0 geprägte Produktion vorzubereiten. Dieser Beitrag widmet sich daher der folgenden Forschungsfrage:

Inwiefern bieten Remote-Labore einen geeigneten Kontext, um Kompetenzen für die Industrie 4.0 auszubilden, und in welchem Maße wird dies am Beispiel von VISIR bereits dokumentiert?

Auf Basis wissenschaftlicher Publikationen wird in einem ersten Schritt untersucht, welche Lehr-Lernziele beim Einsatz des Remote-Labors VISIR adressiert werden. In einem zweiten Schritt werden diese Ziele dann den Anforderungen der Industrie 4.0 an Hochschulabsolventinnen und -absolventen gegenübergestellt. Ausgehend davon werden abschließend Herausforderungen, aber auch Potentiale abgeleitet, welche die Nutzung von Remote-Laboren für eine Ausbildung im Kontext von Industrie 4.0 bieten.

2 Das Remote-Labor VISIR

Die VISIR-Plattform wurde zwischen 1999 und 2005 an der Technischen Hochschule Blekinge in Südschweden entwickelt (Gustavsson, Zackrisson, & Olsson, 2004). Ziel war es, allen Studierenden der Elektro- und Informationstechnik einen Lernarbeitsplatz zu ermöglichen – ungeachtet der möglicherweise beschränkten Ausstattung der jeweiligen Institution. VISIR gilt derzeit als das am weitesten entwickelte und verbreitete Remote-Labor und wurde 2015 vom Global Online Laboratory Consortium (GOLC) als weltweit bestes Remote-Labor ausgezeichnet.[2] Aktuell existieren eigenständige VISIR-Systeme an sechzehn Hochschulen auf vier Erdteilen, darunter etwa die Universidad Deusto in Spanien, die University of Georgia in den USA sowie die Technische Universität Dortmund in Deutschland.

2.1 VISIR-Technik

VISIR ermöglicht das Aufbauen von grundlegenden Schaltungen bzw. Schaltkreisen, bestehend aus Komponenten wie Widerständen, Kondensatoren, Dioden, Operationsverstärkern oder Transistoren, deren Verhalten per Multimeter und Oszilloskop beobachtet und gemessen werden kann. Über Computermaus oder Touchpad können die Schaltungen auf einem grafischen User-Interface (GUI) virtuell gesteckt werden, das einen typischen Versuchsplatz zur Realisierung elektronischer Schaltkreise nachbildet (siehe Abb. 1).

Abbildung 1: Grafisches User-Interface des VISIR-Remote-Labors mit Steckbrett und Multimeter

Während die Benutzeroberfläche auf Basis von LabView einen computergenerierten Versuchsplatz darstellt, werden die eigentlichen Schaltungen durch Relais auf der sogenannten „Matrix“ real umgesetzt (siehe Abb. 2).

2 www.online-lab.org/GOLC_about.php.

Ein Batch-Algorithmus ermöglicht es, dass viele Nutzende gleichzeitig auf das Equipment zugreifen und experimentieren können. Da das Experiment mit VISIR in Bruchteilen von Sekunden durchgeführt wird, kann die Zahl parallel experimentierender Personen hoch sein. Erfahrungen zeigen, dass eine VISIR-Instanz in der Lage ist, einen Kurs von 40 Lernenden gleichzeitig zu bedienen, ohne dass diese eine Verzögerung erkennen. Die Auswahl der elektronischen Komponenten ist durch die jeweilige Bestückung der Matrix vorkonfiguriert und damit limitiert. Durch Einbindungen weiterer VISIR-Instanzen anderer Standorte lassen sich die Varianten der realisierbaren Schaltkreise erhöhen, die mit einer einzelnen Instanz nicht ohne manuellen Umbau der Matrix umsetzbar wären. Damit ist die Basis für ein Ressource Sharing zwischen den verschiedenen Standorten gegeben.

Abbildung 2: VISIR-Matrix

Da bereits zahlreiche Publikationen über die technische Ebene von VISIR existieren, wird an dieser Stelle auf die vorhandene Literatur verwiesen (Gustavsson et al., 2009; Gustavsson et al., 2006).

2.2 Forschung zu VISIR

Die bisherige Forschung zu VISIR konzentrierte sich auf die technische Entwicklung. Die Hauptmotivation für die Entwicklung von VISIR war es, die Möglichkeiten Lernender zu erweitern, ihr eigenes Experiment durchzuführen, entweder im physisch realen Klassenzimmer oder in digital umgesetzter Distanzlehre (Gustavsson et al., 2004). Die frühen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten konzentrierten sich daher darauf, die Immersion während der Nutzung der Plattform zu verbessern und Wege zu finden, VISIR als kollaboratives Remote-Labor für Lernende aus verschiedenen Ländern zu nutzen (Gustavsson et al., 2009; Nafalski, Machotka, & Nedic, 2011). VISIR wurde von Hochschulen in verschiedenen Ländern adaptiert, sodass sich der Forschungsbereich diversifizierte (Alves et al., 2016; Castro, Tawfik, Garcia-Loro, et al., 2014; Evangelista et al., 2017; Kulesza et al., 2017). Nichtsdestotrotz bleibt die technische Entwicklung und Evaluation von VISIR im Klassenzimmer der Kern der Arbeit einer inzwischen globalen Forschungsgemeinschaft. In den letzten Jahren haben weitere Studien gezeigt, wie VISIR zur Verbesserung der analytischen Fähigkeiten und zur Kontextualisierung der Mathematik in ingenieurwissenschaftlichen Studiengängen eingesetzt werden kann (Lima et al., 2017). Andere Forschungsgruppen konzentrierten sich auf die Frage, wie Online-Labore im Vergleich zu realen und virtuellen Laboren in der Wahrnehmung und Leistung der Lernenden abschneiden

(Viegas et al., 2014). Die technische Umsetzung des Labors (real oder virtuell) und die Art der Integration in den Lehrplan sind dabei von zentraler Bedeutung. Hier knüpft dieser Beitrag an und stellt sich der Frage, wie die Nutzung von VISIR mit Hinblick auf aktuelle Ausbildungsziele erfolgt bzw. erfolgen kann.

3 Industrie 4.0 als Kontext der ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung

Allgemein wird unter der vierten industriellen Revolution (Industrie 4.0) die zunehmende wechselseitige Annäherung von industriellen Produktionstechniken (operational technology, OT) und digitalen Informationstechniken (information technology, IT) verstanden. Dabei konvergieren virtuelle und reale Prozesse auf der Basis sogenannter cyber-physischer Systeme (CPS) (Broy, 2011; Lee, Bagheri, & Kao, 2015). Dies sind technische Systeme aus vernetzten Geräten, Maschinen und beweglichen Gegenständen, die mithilfe von IT und einem kontinuierlichen Datenaustausch zwischen allen am Produktionsprozess beteiligten Entitäten und Komponenten gesteuert werden bzw. sich sogar autonom und dezentral selbst steuern. Geräte und Objekte sind dazu mit Sensoren ausgestattet, die kontinuierlich Daten über Zustand, Standort, Prozessfortschritt, aber auch Nutzungsverhalten produzieren (Hirsch-Kreinsen, 2014; Spath et al., 2013).

3.1 Lernen 4.0 im Labor

Die digitale Transformation hin zu einer Arbeitswelt 4.0 im industriellen Kontext hat weitreichende Konsequenzen für das Lehren und Lernen und im Speziellen für labordidaktische Formate (Haertel, Terkowsky, Dany, & Heix, 2019; Kommer, 2020). Unter den Stichworten „Laboratory as a Service“ (LaaS) und „smart devices“ spielen die für die Industrie 4.0 genannten Gestaltungsprinzipien bei der Planung, Entwicklung und Inbetriebnahme von Laboren als cyber-physische Systeme – sog. cyber-physische Labore – eine zunehmende Rolle (Tawfik et al., 2014). Daher stellen cyber-physische Labore einen Spezialfall von cyber-physischen Systemen dar, die in der Lehre unter anderem als Remote-Labore zum Einsatz kommen (Auer, Azad, Edwards, & De Jong, 2018). Fast alle Definitionen von cyber-physischen Laboren umfassen entweder die Überwachung, Steuerung oder Erstellung eines digitalen Zwillings eines Objekts aus der physischen Welt mithilfe von Softwarealgorithmen, die kabelgebunden oder drahtlos über Computersysteme die dynamische Interaktion zwischen diesem Objekt und der realen Welt ermöglichen (Auer & Ram B., 2019).

3.2 Kompetenzen für die Arbeitswelt 4.0

Für die vorliegende Untersuchung ist es von Bedeutung, Kompetenzen zu identifizieren, die im besonderen Maße relevant für ein erfolgreiches Arbeiten im Kontext der Industrie 4.0 sind und daher eine besondere Relevanz für die Ausbildung im Labor haben. Grundlage hierfür bilden Studien, die auf unterschiedlichem Abstraktionsniveau Hinweise darauf geben, welche Kompetenzen von zukünftigen Inge-

nieur*innen erwartet werden. Auf Basis des „Hochschul-Bildungs-Reports 2020“ des Stifterverbandes (Dauchert et al., 2017), des Positionspapiers „Kompetenzen für die Industrie 4.0 – Qualifizierungsbedarfe und Lösungsansätze“ der Akademie der Technikwissenschaften (acatech, 2016), einer Studie des Fraunhofer-Instituts für Arbeitswissenschaft und Organisation (Schlund & Pokorni, 2016), einer Interviewstudie „Industrie 4.0 – Qualifizierung 2025“ des Verbandes Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (Pfeiffer, Lee, Zirnig, & Suphan, 2016) sowie einer Metaanalyse über 24 Studien aus den Jahren 2014 bis 2016 (Hartmann, 2017) kann eine Zusammenfassung der benötigten Kompetenzen gegeben werden. Die Darstellung und Gliederung der Kompetenzen in Tabelle 1 orientiert sich am Rahmenmodell des Deutschen Qualifikationsrahmens für lebenslanges Lernen (DQR, 2011). Demzufolge ergibt sich das folgende Raster (Tabelle 1) der 18 im Kontext von Industrie 4.0 besonders relevanten Kompetenzen (K1 bis K18).

Tabelle 1: Kompetenzraster für die Arbeitswelt 4.0

Im Kontext der **fachspezifischen und fachübergreifenden technischen Kompetenzen** sollten Lernende in Bezug auf die Anforderungen der Industrie 4.0 in der Lage sein.
• *(K1)* ... interdisziplinär zu denken, zu handeln und zusammenzuarbeiten. • (K2) ... Unternehmensprozesse sich verändernden Rahmenbedingungen flexibel anzupassen (z. B. in Bezug auf den Einsatz neuer Technologien wie etwa der additiven Fertigung oder Augmentation). • (K3) ... IT-Prozesse im Kontext von Produktion zu gestalten sowie IT-Komponenten zur Mensch-Maschine-Interaktion zu nutzen. • (K4) ... ganzheitliche und komplexe Produktionsprozesse und vernetzte Produktionsstrukturen zu gestalten und zu steuern sowie entsprechende Schnittstellen zu managen (inkl. der Umsetzung von Problemlösungs- und Optimierungsprozessen). • (K5) ... einen Zusammenhang zwischen einem digitalen Abbild und einer physischen Realität herzustellen. • (K6) ... mit großen Datenmengen umzugehen und entsprechende statistische Fähigkeiten einzusetzen (inkl. dem Erkennen der Bedeutung von Algorithmen und dem Management sensibler Daten). • (K7) ... Systemkompetenz zu zeigen, indem sie Funktionselemente erkennen, Systemgrenzen identifizieren und Vorhersagen über Systemverhalten treffen. • (K8) ... Innovationsprozesse anzustoßen und umzusetzen. • (K9)... den rechtlichen Kontext der unternehmerischen Handlung zu beherrschen. • (K10) ... unternehmensbezogen strategisch zu denken bzw. zu handeln und in komplexen Entscheidungssituation entsprechende Tools zur Bewertung nutzen.
Im Kontext der **Sozialkompetenz** sollten Lernende in Bezug auf die Anforderungen der Industrie 4.0 in der Lage sein ...
• *(K11)* ... sowohl intern (in Bezug auf Prozessabläufe) als auch extern (In Bezug auf Kunden und Zulieferer) sicher zu kommunizieren und zu kooperieren. • (K12) ... in sozialen (auch interkulturellen) Kontexten sicher und effektiv zu agieren. • (K13) ... Produktionseinheiten und Teams zielorientiert zu führen. • (K14) ... digital gestützte Interaktions- und Kooperationsprozesse zu gestalten.
Im Kontext der **Selbstkompetenz** sollten Lernende in Bezug auf die Anforderungen der Industrie 4.0 in der Lage sein ...
• *(K15)* ... den Wert des eigenen subjektiven Erfahrungswissen realistisch einzuschätzen und entsprechend in die eigene Handlung mit einzubeziehen. • (K16) ... selbstbestimmt und selbstorganisiert zu handeln. • (K17) ... auf Basis der eigenen Offenheit und Kreativität zu handeln. • (K18) ... eigenes lebenslanges Lernen zu gestalten und umzusetzen.

4 Förderung von Kompetenzen für die Industrie 4.0 mit VISIR

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurde eine Analyse von wissenschaftlichen Publikationen zu VISIR vorgenommen. Dabei wurde untersucht, welche Lehr-Lernziele von der Community mit der Nutzung von VISIR in der Lehre verknüpft werden und in entsprechenden Veröffentlichungen einschlägiger Publikationsorgane der internationalen Engineering Education Community dokumentiert sind. Aufbauend darauf wurde untersucht, welche Industrie-4.0-spezifischen Kompetenzen mit den dokumentierten Lehr-Lernzielen in Zusammenhang gebracht und somit potentiell mithilfe von VISIR gefördert werden können. An dieser Stelle soll ausdrücklich festgehalten werden, dass die Datenbasis für das Vorgehen ausschließlich aus wissenschaftlichen Publikationen zu VISIR besteht. Auf Einschränkungen, welche dieses Vorgehen hinsichtlich der Belastbarkeit der Forschungsergebnisse impliziert, wird im Fazit eingegangen. Gleichwohl lassen sich mithilfe dieses Vorgehens Rückschlüsse darauf ziehen, in welcher Tiefe die VISIR-Community ihre eigene Praxis vor dem Hintergrund ingenieurdidaktischer Theorien und Modelle beschreibt, analysiert und publiziert. Ein vergleichbares Vorgehen wurde von den Autorinnen und Autoren dieses Beitrags bereits bei der Analyse eines Labors aus der Umformtechnik erfolgreich umgesetzt. Dabei konnte gezeigt werden, dass Remote-Labore Potential aufweisen, die Komplexität der Arbeitswelt 4.0 didaktisch reduziert in der hochschulischen Ausbildung zu berücksichtigen (Terkowsky, Frye, & May, 2019; Terkowsky, May, & Frye, 2019). Im Folgenden werden das methodische Vorgehen und die Ergebnisse im Detail vorgestellt.

4.1 Methode – Analytisches Vorgehen in zwei Schritten

Die Identifikation der mit dem Einsatz von VISIR adressierten Lehr-Lernziele erfolgt in einem qualitativ orientierten inhaltsanalytischen Vorgehen. Es handelt sich konkret um eine Kategorien entwickelnde und kategoriengeleitete Textanalyse, bei der schriftsprachliches Material systematisch zusammengefasst und theorie- und regelbasiert eng am Text analysiert wird (Mayring, 2015). Als Datenbasis wird auf eine offene Mendeley-Plattform zugegriffen, in der in einer gemeinsamen Forschungsbibliothek wissenschaftliche Publikationen der VISIR-Community gesammelt und geteilt werden (Salah, Alves, Abdulazeez, Guerreiro, & Gustavsson, 2015). Gegenstand der Analyse sind ausschließlich englischsprachig publizierte Konferenz- und Journalbeiträge.[3] Ausgewertet wurden insgesamt 97 Publikationen aus den Jahren 2006 bis 2018. Keiner der untersuchten Beiträge thematisierte den Themenbereich Industrie 4.0 explizit.

In einem ersten Schritt wurde eine strukturierende Inhaltsanalyse angewendet, um in den Texten explizit und implizit genannte Lehr-Lernziele mit unmittelbarem

3 Mendeley Public Group VISIR SIG (Researchers and Contributions), https://www.mendeley.com/community/visir-sig (researchers-and-contributions)/, Stand: 16.05.2019.

Bezug zum Einsatz von VISIR zu identifizieren. In 35 der 97 untersuchten Publikationen wurden Aussagen zu Zielsetzungen des Einsatzes von VISIR in der Lehre gefunden. Insgesamt wurden 162 inhaltlich relevante und eindeutig allein auf die Zielsetzungen des Einsatzes von VISIR bezogene Textstellen generalisiert, aus denen nach einer ersten Reduktion 30 Lehr-Lernziele kodiert werden konnten (Z1 bis Z30; siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Adressierte Lehr-Lernziele und Zielsetzungen des Einsatzes von VISIR (Anzahl der Nennungen)

Fachbezogene (elektrotechn.) Grundlagen	**Allgemeine technische Aspekte**
• (Z1) Aufbau/Entwicklung elektr. Schaltkreise (28x) • (Z2) Auswahl elektronischer Bauteile (3x) • (Z3) Funktionen von elektronischen Bauteilen (1x) • (Z4) Arbeit mit echten Schaltungen (6x) • (Z5) Durchführung von Messungen (18x) • (Z6) Schaltungen testen (2x) • (Z7) Verhalten elektrotechn. Basisschaltungen (11x) • (Z8) Schaltungen berechnen (2x)	• (Z18) Einsatz neuer Technologien (2x) • (Z19) Berücksichtigung sicherheitstechnischer Aspekte (1x) • (Z20) Technische Kommunikation (1x) • (Z21) Interesse für MINT wecken (1x)
Experimentelles Arbeiten	**Fachübergreifende Ziele**
• (Z9) Naturwissenschaftliche Arbeitsweise (4x) • (Z10) Entwicklung eines experimentellen Vorgehens (12x) • (Z11) Verwendung von Labormaterial und Equipment (8x) • (Z12) Vorbereitung auf Hands-on-Arbeiten (1x)	• (Z22) Selbstständiges Arbeiten (9x) • (Z23) Orts- und zeitunabhängiges Arbeiten (5x) • (Z24) Selbstorganisation (4x) • (Z25) Motivation (7x) • (Z26) Teamwork und Kooperation (6x) • (Z27) Kommunikation (1x) • (Z28) Lernen aus Fehlern (3x) • (Z29) Kritisches Denken (4x) • (Z30) Fähigkeiten zur Problemlösung (1x)
Mathematische Aspekte und Umgang mit Daten	
• (Z13) Datenaufnahme, -analyse und -interpretation (6x) • (Z14) Vergleich mathem. Modelle mit Experiment (7x) • (Z15) Evaluation mathematischer Modelle (4x) • (Z16) Unterschiede zwischen Simulation und Realität erkennen (3x) • (Z17) Vergleich von Tabellen- und Messwerten (1x)	

In einem zweiten Schritt wurde untersucht, inwieweit die im Rahmen der Analyse identifizierten Lehr-Lernziele und Zielsetzungen bereits eine Vorbereitung der Studierenden auf die Arbeitswelt 4.0 erkennen lassen, also inwiefern die Ziele den Kompetenzen zuzuordnen sind beziehungsweise diese explizit adressieren. Als Basis hierfür dient die Zusammenfassung der Kompetenzen für ein erfolgreiches Handeln in der der Arbeitswelt 4.0 (K1 bis K18), wie sie bereits im vorherigen Abschnitt in Tabelle 1 dargelegt wurde.

4.2 Ergebnisse – Lehr-Lernziele und Kompetenzen mit VISIR fördern

In den untersuchten Publikationen werden besonders häufig Zielsetzungen zu fachbezogenen, also elektrotechnischen Grundlagen formuliert. Diesem Bereich können

insgesamt 8 Codes zugeordnet werden. Am häufigsten angeführt (28 Textstellen) wird der „Aufbau und die Entwicklung von elektrischen Schaltkreisen“:

> “VISIR has also been used twice as the practical part of the first completely free MOOC **dedicated to learn how building electrical and electronics circuits** (3,000 students).” (Kulesza et al., 2017)

Als weitere fachbezogene Grundlagen werden u. a. die korrekte „Durchführung von Messungen“ (18 Textstellen) und das Verständnis des „Verhaltens elektrotechnischer Basisschaltungen“ (11 Textstellen) angeführt:

> “Visualizing waves and **performing measurements in VISIR** and in the Falstad simulator, using the function generator and the oscilloscope.” (Lima, Alves, Viegas, & Gustavsson, 2015)

> “Making students gain competence in **interpretation of the behavior of basics circuits and electronic components** in different experimental condition.” (Evangelista et al., 2018)

Insgesamt sind 71 der 162 generalisierten Textstellen dem Bereich der elektrotechnischen, also rein fachlichen Grundlagen zuzuordnen.

Als weitere Gruppe können vier Codes zusammengefasst werden, die sich auf das experimentelle Arbeiten mit VISIR beziehen. Beispielsweise wird in zwölf Textstellen die „Entwicklung eines experimentellen Vorgehens“ als Zielsetzung formuliert:

> “It is helpful for **developing experimental competences** and for fostering autonomous work as well as for arousing enthusiasm about learning DC Circuits topics.” (Evangelista et al., 2018)

Fünf Codes beziehen sich auf mathematische Aspekte und den Umgang mit Daten. Beispiele hierfür sind die „Aufnahme, Analyse und Interpretation von Daten“

> “... **demonstrate the ability to collect, analyse and interpret data**, and to form and support conclusions.” (García-Zubía, Henandez-Jayo, Gustavsson, & Alves, 2011)

oder der „Vergleich von Tabellen- und Messwerten“:

> “The experiments enable: [...] **using manufacturers’ datasheets and comparing them with measured values** [...].” (Castro, Tawfik, & Tovar, 2014)

Darüber hinaus können vier Codes weiteren allgemeinen, aber technisch orientierten Zielsetzungen zugeordnet werden. Dazu gehört etwa der „Einsatz neuer Technologien“:

> “In sum, this experience brings together several important aspects of science teaching: motivation, teamwork, active learning, experimentation and **the use of new technologies**.” (Evangelista et al., 2018)

Abschließend konnten neun Codes identifiziert werden, die sich nicht konkret auf technische Elemente und Arbeitsweisen beziehen, sondern fachübergreifende Dispositionen abbilden. Dazu gehören u. a. das „selbstständige Arbeiten“

> “It is helpful for developing experimental competences and for **fostering autonomous work** as well as for arousing enthusiasm about learning DC Circuits topics.” (Evangelista et al., 2018)

und das „orts- und zeitunabhängige Arbeiten“ als typisches und häufig angeführtes Merkmal von Remote-Laboren:

> “With VISIR, the students **can do their activities when is most convenient for them, from their homes or mobile devices**; with teachers’ support via email or during classroom consulting.” (Marchisio et al., 2018)

Die 30 identifizierten Lehr-Lernziel-Codes *(Z1 bis Z30)* sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Zusammenfassung in fünf Gruppen dient dabei ausschließlich der Strukturierung und für einen Überblick über die Schwerpunkte im analysierten Material. Zu jedem Code ist die Anzahl der identifizierten Textstellen angegeben, die diesem zuzuordnen sind.

Die identifizierten Lernziel-Codes erlauben es, im Vergleich mit den aufgezeigten Kompetenzen für die Industrie 4.0 (Tabelle 1) Rückschlüsse zu ziehen, inwiefern VISIR potentiell genutzt werden kann, um Lernende auf eine Arbeitswelt 4.0 vorzubereiten (Tabelle 3). Ob dies in der Lehrpraxis auch wirklich geschieht, kann auf Basis dieser Daten nicht nachgewiesen werden. Allerdings besteht, ausgehend vom allgemeinen Grundsatz einer „guten wissenschaftlichen Praxis“, eine berechtigte Hoffnung zu der Annahme, dass ein in einer Publikation dokumentiertes Lehr-Lernziel in der Lehrpraxis auch verfolgt wird. Dennoch muss an dieser Stelle einschränkend angemerkt werden, dass dieser Vergleich ausschließlich auf Basis der in den Publikationen sprachlich formulierten Lehr-Lernziele stattfindet. Dies schließt auf der einen Seite nicht aus, dass ein anderes Codieren bzw. Clustern zu abweichenden Ergebnissen führen könnte; auf der anderen Seite finden im Rahmen des Labors verfolgte, aber nicht ausdrücklich in den wissenschaftlichen Publikationen dargelegte Lehr-Lernziele ebenfalls keine Berücksichtigung.

Tabelle 3: Vergleich von Kompetenzen für die Industrie 4. mit den identifizierten Lehr-Lernzielen

Kompetenzen	Lehr-Lernziele
K3	Z1–Z8, Z18, Z20
K5	Z16
K6	Z13, Z14
K11 + K12	Z26, Z27
K15 + K18	Z28 – Z30
K16	Z22 – Z24

Beim Vergleich der formulierten Lehr-Lernziele und der Industrie-4.0-spezifischen Kompetenzen zeigt sich, dass lediglich drei der zehn fachspezifischen und fachübergreifenden technischen Kompetenzen (K3, K5 und K6) entsprechende Zielsetzungen zugeordnet werden können. Dazu gehören der Einsatz neuer Technologien (Z18) und die technische Kommunikation (Z20), welche bspw. der Gestaltung von Mensch-Maschine-Interaktionen zugeordnet werden kann (K3). Als notwendige Basis für die Gestaltung kann auch die gesamte Gruppe der fachbezogenen elektrotechnischen Grundlagen (Z1–Z8) dieser Kompetenz zugeordnet werden. Das Erkennen von Unterschieden zwischen Simulation und Realität (Z16) entspricht der Kompetenz, einen Zusammenhang zwischen einem digitalen Abbild und einer physischen Realität herzustellen (K5). Die Datenaufnahme, -analyse und -interpretation (Z13), der Vergleich mathematischer Modelle mit Experimenten (Z14) sowie der Vergleich von Tabellen- und Messwerten können als Zielsetzung der Kompetenz zugeordnet werden, mit Daten umzugehen und statistische Fähigkeiten einzusetzen (K6).

Ebenfalls nur im begrenzten Maße, mit zwei von vier Kompetenzen, wird der Bereich der Sozialkompetenzen adressiert (K11 und K12). Hier werden Kommunikation und Kooperation (K11) sowie das sichere Agieren in sozialen Kontexten (K12) durch Zielsetzungen wie etwa Teamwork und Kooperation (Z26) oder die Förderung der Kommunikation (Z27) angesprochen. Offen bleiben jedoch das zielorientierte Führen von Teams (K13), und auch der Aspekt der digital gestützten Interaktion und Kommunikation (K14) kann keine der identifizierten Zielsetzungen zugeordnet werden.

Darüber hinaus zeigt sich, dass mit den formulierten Zielsetzungen des Einsatzes von VISIR der Bereich der Selbstkompetenz mit drei von vier adressierten Kompetenzen angesprochen wird (K15, K16 und K18). Dem selbstbestimmten und selbstorganisierten Handeln (K16) können z. B. die Zielsetzungen des selbstständigen Arbeitens (Z22), des orts- und zeitunabhängigen Arbeitens (Z23) und der Selbstorganisation (Z24) zugeordnet werden. Auch dem Einschätzen und Berücksichtigen des Werts des eigenen Erfahrungswissen (K15) und dem Bereich des Gestaltens und Umsetzens des eigenen lebenslangen Lernens (K18) können mit dem Lernen aus Fehlern (Z28), dem kritischen Denken (Z29) sowie der Fähigkeit zur Problemlösung (Z30) einige identifizierte Zielsetzungen zugeordnet werden. Lediglich auf Basis der eigenen Offenheit und Kreativität zu handeln, wird nicht explizit als Lehr-Lernziel des Einsatzes von VISIR in der untersuchten Literatur ausgewiesen.

Abschließend ist festzuhalten, dass 19 der codierten Ziele keiner der Kompetenzen für die Industrie 4.0 zugeordnet werden konnten. Dabei handelt es sich insbesondere um alle Zielsetzungen, die in der Gruppe des experimentellen Arbeitens (Z9–Z12) zusammengefasst wurden. Dies verwundert jedoch nicht, da diese Lehr-Lernziele sich vor allem aus dem didaktischen Kontext von VISIR als Remote-Labor zum aktiven Experimentieren motivieren. Je nach Freiheitsgrad der Experimente lassen sich hier noch Verbindungen zur Kompetenz, auf Basis der eigenen Offenheit und Kreativität zu handeln (K17), herstellen, allerdings lässt sich dies auf Basis der analysierten Publikation nicht hinreichend fundiert beurteilen.

5 Diskussion und Fazit

Die Diskussion der oben aufgezeigten Ergebnisse erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird auf die im Rahmen der analysierten Publikationen identifizierten Lehr-Lernziele Bezug genommen. In einem zweiten Schritt wird dann die eigentliche Forschungsfrage erörtert und es werden hierfür die identifizierten Lehr-Lernziele mit den Kompetenzen für die Industrie 4.0 in Bezug gesetzt.

Bei der Betrachtung der Lehr-Lernziele und ihrer Häufigkeit fällt auf, dass von allen 162 identifizierten relevanten Textstellen bzw. den 30 definierten Codes lediglich sechs Codes für über die Hälfte der Nennungen in den Publikationen verantwortlich sind. Dies sind in Abhängigkeit der absteigenden Häufigkeit ihrer Nennung die Codes Z1, Z5, Z10, Z7, Z22 sowie Z11. Bis auf eine sind alle Nennungen den Bereichen der fachbezogenen elektrotechnischen Grundlagen und dem experimentellen Arbeiten zuzuordnen. Dies scheint wenig zu überraschen, da diese Bereiche als Fokus für den Einsatz von VISIR gesehen werden können. Interessant ist jedoch das andere Ende der Auflistung nach Häufigkeit der Nennungen: 19 Lehr-Lernziele werden in den 97 untersuchten Publikationen lediglich fünfmal oder seltener erwähnt. Das heißt, dass diese zwar vereinzelt mit VISIR in Verbindung gebracht, aber nicht in der Breite adressiert werden. VISIR hat also grundsätzlich das Potential, eine Fülle der genannten Lehr-Lernziele zu adressieren, allerdings nutzt die VISIR-Community dies bislang nicht in der Breite. Sie bleibt weitgehend bei den klassischen, praktisch orientierten Lehr-Lernzielen. Hier wäre ein stärkerer, z. B. hochschuldidaktisch moderierter Austausch innerhalb der Community notwendig, um wechselseitig von den Erfahrungen der jeweils anderen zu profitieren und so das gesamte Potential der VISIR-Technologie nutzen zu können.

Die Beantwortung der Forschungsfrage muss zweigeteilt geschehen. Der Vergleich der mit VISIR verbundenen Lehr-Lernziele und den aufgezeigten Kompetenzen für die Industrie 4.0 wirkt ernüchternd, da lediglich drei der zehn technischen Kompetenzen mit VISIR in Verbindung gebracht werden konnten. Das bedeutet, dass sieben fachspezifisch technische Kompetenzen gar nicht berücksichtigt oder zumindest nicht in den wissenschaftlichen Publikationen entsprechend dokumentiert werden. Daher wäre es denkbar, die Forschungsfrage negativ zu beantworten und Remote-Laboren am Beispiel von VISIR kein hohes Potential zur Vorbereitung auf die Arbeitswelt 4.0 zu attestieren. Allerdings werden im Bereich der Sozial- und Selbstkompetenzen jeweils die Hälfte der ausgewiesenen Kompetenzen angesprochen. Auch hier gilt jedoch die Einschränkung, dass die Anzahl der gefundenen relevanten Textstellen, die auf die jeweiligen Kompetenzen hinweisen, gering ist und daher eher von Potential zur Ausbildung denn von bereits gängiger Praxis die Rede sein kann.

Ein Blick in die bislang nicht adressierten Kompetenzen macht weitere Potentiale deutlich. Exemplarisch kann hier die Kompetenz „interdisziplinär zu denken, zu handeln und zusammenzuarbeiten“ genannt werden. Hier wäre es bspw. möglich, nicht nur den fachlichen Kontext, sondern auch den technischen Aufbau der

Labore zu thematisieren. Am Beispiel von VISIR können nicht nur der Aufbau elektrischer Schaltungen, sondern auch deren IT-technische Repräsentation in der Web-Nutzungsoberfläche sowie die Kommunikation zwischen Versuchsequipment und Webserver gezielt in die Lehre eingebunden werden. Auch für die weiteren, bisher nicht angesprochenen Industrie-4.0-spezifischen Kompetenzen erscheint es möglich, durch eine geeignete didaktische Einbettung eine entsprechende Zielorientierung zu schaffen.

Abschließend lässt sich feststellen, dass Remote-Labore durchaus einen geeigneten Kontext für die Ausbildung von Kompetenzen für die Industrie 4.0 bieten, auch wenn sie nicht unter dieser Prämisse entwickelt wurden. Nicht zuletzt die Eigenschaft, dass es sich um tele-operativ nutzbares Equipment handelt, das in der Web-Nutzungsoberfläche eine digitale Entsprechung des Equipments aufweist, bietet Anknüpfungspunkte für aktuelle und zukünftige Arbeitsrealitäten. Allerdings, so zeigt auch das untersuchte Beispiel, hängt die Anbindung im Bereich der technischen Kompetenzen stark von der jeweiligen fachlich-technischen Ausrichtung des Labors selbst ab.

Bei der vorgelegten Studie handelt es sich auch um den Ansatz, auf Basis von wissenschaftlichen Publikationen die Verbindung von industrieseitig benötigten Kompetenzprofilen und in der aktuellen Bildungspraxis verfolgten Lehr-Lernzielen herzustellen und diese abzugleichen. Unter der Prämisse, dass die untersuchten Publikationen ein realistisches Abbild der gängigen Lehrpraxis mit dem entsprechenden Remote-Labor bieten, kann das methodische Vorgehen als erfolgreich erachtet werden. Allerdings hinterlässt diese induktive Vorgehensweise auch deutliche Erkenntnislücken. So ist z. B. nicht zu klären, ob weitere Lehr-Lernziele bzw. Kompetenzen im Rahmen der Labornutzung adressiert werden, diese jedoch keine Erwähnung in den untersuchten Publikationen gefunden haben. Es ist umgekehrt ebenso denkbar, dass im Rahmen der untersuchten Publikationen Lehr-Lernziele formuliert wurden, diese aber keinen Eingang in die konkrete Lehrpraxis fanden. Das hier vorgestellte Vorgehen kann also nur einen ersten Einblick in den Zusammenhang zwischen Lehr-Lernzielen in Remote-Laboren und Kompetenzen für die Industrie 4.0 bieten. Das weitere Vorgehen bedarf einer tiefergehenden qualitativen Auseinandersetzung, etwa in Form von Interviews mit den Betreuenden der Labore. Diese Fragen gilt es in weiteren Untersuchungen zu erörtern, um Erkenntnislücken in Bezug auf die hier betrachte VISIR-Plattform und auch auf weitere Remote-Labore zu schließen.

Literaturverzeichnis

acatech (Ed.) (2016). *Kompetenzen für die Industrie 4.0. Qualifizierungsbedarfe und Lösungsansät-ze* München: Herbert Utz Verlag.

Alves, G. R., Fidalgo, A., Marques, A., Viegas, C., Felgueiras, M. C., Costa, R., . . . Ruiz, E. S. C. (2016). *Spreading remote lab usage a system—A community—A Federation*. Paper presented at the 2016 2nd International Conference of the Portuguese Society for Engineering Education (CISPEE).

Alves, G. R., Fidalgo, A. V., Marques, M. A., Viegas, M. C., Felgueiras, M. C., Costa, R. J., . . . SanCristóbal-Ruiz, E. (2018). International cooperation for remote laboratory use. In *Contributions to Higher Engineering Education* (pp. 1–31): Springer.

Auer, M. E., Azad, A. K., Edwards, A., & De Jong, T. (Eds.). (2018). *Cyber-physical laboratories in engineering and science education*. New York: Springer.

Auer, M. E., & Ram B., K. (Eds.). (2019). *Cyber-physical Systems and Digital Twins: Proceedings of the 16th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation* (Vol. 80): Springer.

Broy, M. (2011). *Cyber-physical systems: Innovation durch softwareintensive eingebettete Systeme*: Springer-Verlag.

Castro, M., Tawfik, M., Garcia-Loro, F., Sancristobal, E., Mur, F., & Diaz, G. (2014). *Combining Remote Laboratories and Massive Open Online Courses (MOOCs) for Teaching Electronics*. Paper presented at the Society for Information Technology & Teacher Education International Conference.

Castro, M., Tawfik, M., & Tovar, E. (2014). *Internationalization & globalization of engineering*. Paper presented at the Twelfth LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology,(LACCEI 2014).

Dauchert, A., Krempkow, R., Krume, J., Meyer-Guckel, V., Schneider, M., Schröder-Kralemann, A.-K., . . . Ana, N. (2017). *Hochschul-Bildungs-Report 2020: Höhere Chancen durch höhere Bildung? Jahresbericht 2017/18 – Halbzeitbilanz 2010 bis 2015*.

DQR, A. (2011). *Deutschen Qualifikationsrahmens für lebenslanges Lernen* Retrieved from https://www.dqr.de/media/content/Der_Deutsche_Qualifikationsrahmen_fue_lebenslanges_Lernen.pdf

Evangelista, I., Cadierno, M., Farina, J., Roldán, G., Pozzo, M. I., Dobboletta, E., . . . Concari, S. (2018). *Active learning of DC circuits: spreading the use of the VISIR remote lab in Argentina*. Paper presented at the 2018 IEEE World Engineering Education Conference (EDUNINE).

Evangelista, I., Farina, J. A., Pozzo, M. I., Dobboletta, E., Alves, G. R., García-Zubía, J., . . . Gustavsson, I. (2017). *Science education at high school: A VISIR remote lab implementation*. Paper presented at the 2017 4th Experiment@ International Conference (exp. at'17).

García-Zubía, J., Henandez-Jayo, U., Gustavsson, I., & Alves, G. R. (2011). *Academic Effectiveness of VISIR remote lab in analog electronics*. Paper presented at the 1st Experiment@ International Conference (expat2011).

Gustavsson, I., Nilsson, K., Zackrisson, J., Garcia-Zubia, J., Hernandez-Jayo, U., Nafalski, A., . . . Pettersson, M. I. (2009). On objectives of instructional laboratories, individual assessment, and use of collaborative remote laboratories. *IEEE transactions on learning technologies, 2*(4), 263–274.

Gustavsson, I., Zackrisson, J., Bartunek, J. S., Åkesson, H., Håkansson, L., & Lagö, T. L. (2006). *An instructional electronics laboratory opened for remote operation and control.* Paper presented at the International Conference on Engineering Education.

Gustavsson, I., Zackrisson, J., & Olsson, T. (2004). *Traditional lab sessions in a remote laboratory for circuit analysis.* Paper presented at the 15th EAEEIE Annual Conference on Innovation in Education for Electrical and Information Engineering.

Haertel, T., Terkowsky, C., Dany, S., & Heix, S. (Eds.). (2019). *Hochschullehre & Industrie 4.0.* Bielefeld: wbv Publikation.

Hartmann, F. (2017). Zukünftige Anforderungen an Kompetenzen im Zusammenhang mit Industrie 4.0 - Eine Bestandsaufnahme. *Facharbeit und Digitalisierung*, 19.

Hirsch-Kreinsen, H. (2014). Wandel von Produktionsarbeit–„Industrie 4.0 “. *WSI-Mitteilungen, 67*(6), 421–429.

Kommer, S. (2020). Lernen 4.0. In W. Frenz (Ed.), *Handbuch Industrie 4.0: Recht, Technik, Gesellschaft* (pp. 1261–1272). Berlin: Springer.

Kulesza, W., Gustavsson, I., Garbi-Zutin, D., Auer, M., Marques, A., Fidalgo, A., . . . Hernandez-Jayo, U. (2017). *A federation of VISIR remote laboratories through the PILAR Project.* Paper presented at the 2017 4th Experiment@ International Conference (exp. at'17).

Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing letters, 3*, 18–23.

Lima, N., Alves, G., Viegas, C., & Gustavsson, I. (2015). *Combined Efforts to develop students experimental competences.* Paper presented at the 2015 3rd Experiment International Conference (exp. at'15).

Lima, N., Zannin, M., Viegas, C., Marques, A., Alves, G., Felgueiras, M. C., . . . Pozzo, M. I. (2017). *The VISIR+ project-helping contextualize math in an engineering course.* Paper presented at the 2017 4th Experiment@ International Conference (exp. at'17).

Marchisio, S. T., Crepaldo, D., Del Colle, F., Lerro, F., Concari, S. B., Leon, D., . . . Plano, M. A. (2018). *VISIR lab integration in Electronic Engineering: An institutional experience in Argentina.* Paper presented at the 2018 XIII Technologies Applied to Electronics Teaching Conference (TAEE).

Mayring, P. (2015). Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken. 12., überarbeitete Auflage. Beltz. In: Weinheim.

Nafalski, A., Machotka, J., & Nedic, Z. (2011). Collaborative remote laboratory NetLab for experiments in electrical engineering. *Using Remote Labs in Education. Two Little Ducks in Remote Experimentation*, 177–199.

Pfeiffer, S., Lee, H. S., Zirnig, C., & Suphan, A. (2016). *Industrie 4.0: Qualifizierung 2025.* Frankfurt am Main: VDMA.

Salah, R. M., Alves, G. R., Abdulazeez, D. H., Guerreiro, P., & Gustavsson, I. (2015). Why VISIR? Proliferative activities and collaborative work of VISIR system. *EDULEARN15*.

Schlund, S., & Pokorni, B. (2016). *Industrie 4.0–Wo steht die Revolution der Arbeitsgestaltung*. Stuttgart.

Spath, D., Ganschar, O., Gerlach, S., Hämmerle, M., Krause, T., & Schlund, S. (2013). *Produktionsarbeit der Zukunft-Industrie 4.0* (Vol. 150). Stuttgart: Fraunhofer Verlag Stuttgart.

Tawfik, M., Salzmann, C., Gillet, D., Lowe, D., Saliah-Hassane, H., Sancristobal, E., & Castro, M. (2014). Laboratory as a service (LaaS): a novel paradigm for developing and implementing modular remote laboratories. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE), 10*(4), 13–21.

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.

Terkowsky, C., May, D., & Frye, S. (2019). Labordidaktik: Kompetenzen für die Arbeitswelt 4.0. In T. Haertel, C. Terkowsky, S. Dany, & S. Heix (Eds.), *Hochschullehre & Industrie 4.0 - Herausforderungen, Lösungen, Perspektiven* (pp. 89–103). Bielefeld: wbv Publikation.

Viegas, C., Lima, N., Alves, G., & Gustavsson, I. (2014). *Improving students experimental competences using simultaneous methods in class and in assessments*. Paper presented at the Proceedings of the Second International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Grafisches User-Interface des VISIR-Remote-Labors mit Steckbrett und Multimeter 213

Abb. 2 VISIR-Matrix 214

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Kompetenzraster für die Arbeitswelt 4.0 216

Tab. 2 Adressierte Lehr-Lernziele und Zielsetzungen des Einsatzes von VISIR 218

Tab. 3 Vergleich von Kompetenzen für die Industrie 4. mit den identifizierten Lehr-Lernzielen 220

Teil III:
Organisation und digitale Infrastruktur

Community Working Group „Remote-Labore in Deutschland“: Projekte, Gemeinsamkeiten, Unterschiede

Tobias R. Ortelt, Claudius Terkowsky

Abstract

Seit vielen Jahren werden weltweit Remote-Labore zur Unterstützung der Lehre in unterschiedlichsten Bildungseinrichtungen entwickelt. Remote-Labore können ein orts- und zeitunabhängiges Experimentieren über das Internet ermöglichen und dienen sowohl zur Verbreitung vor Ort nicht verfügbarer Laborangebote als auch zur Flexibilisierung der klassischen Präsenzlehre. Die Community Working Group (CWG) „Remote-Labore in Deutschland“ ist ein 2018 mit Unterstützung des Hochschulforums Digitalisierung (HFD) gegründeter informeller Zusammenschluss von derzeit 15 deutschen Hochschulen bzw. Einrichtungen, die es sich zum Ziel gesetzt haben, die Entwicklung und Verbreitung von Remote-Laboren insbesondere in Deutschland zu unterstützen und zu professionalisieren. Der Beitrag gibt hierzu einen Überblick über einige aktuelle Entwicklungsprojekte von Remote-Laboren im Kontext der CWG. Hauptziel ist eine erste Analyse von Gelingensbedingungen und Misserfolgsfaktoren für eine möglichst nachhaltige Entwicklung von Remote-Laboren für die Lehre. Hierzu werden exemplarisch fünf aus dem Kontext der CWG stammende Remote-Labore mittels verschiedener als kritisch identifizierter Kategorien analysiert. Der Beitrag mündet in eine erste Zusammenschau von Misserfolgsfaktoren und Gelingensbedingungen für künftige Entwicklungsprojekte und schließt mit einem kurzen Ausblick in die Zukunft der Community Working Group „Remote-Labore in Deutschland.“

Schlüsselwörter: Remote-Labore, Experiment, Netzwerke, Digitale Lehre, Labor

1 Einleitung

Seit mehr als dreißig Jahren ermöglicht die weltweite Entwicklung und Bereitstellung von Remote-Laboren Lernenden der ingenieur- und naturwissenschaftlichen Fächer in unterschiedlichsten Bildungsreinrichtungen ein orts- und zeitunabhängiges Experimentieren über das Internet. Die Bedienung von realen Labor- und Versuchsaufbauten wird dabei mittels geeigneter Hard- und Software automatisiert und interaktiviert. Durch entsprechende Software und weiterer Hardware erfolgt dann der Zugriff durch einen entsprechenden Webdienst. Im Vergleich zu virtuellen Laboren, die rein computer-generierte Simulationen von Laboren darstellen, bedienen

Remote-Labore sich nach wie vor physisch real vorhandener Laborgeräte und liefern dadurch mit ihnen erzeugte reale Messergebnisse und Messreihen. Der eigentliche Versuchsvorgang kann aber über das Internet von praktisch überall und zu jeder Zeit live oder asynchron durchgeführt werden (Ortelt, Sadiki et al., 2016). Inzwischen gibt es weltweit eine Vielzahl an Remote-Labor-Entwicklungen und Systemen, die für die Lehre entwickelt wurden (Auer et al., 2018; Terkowsky, May et al., 2019). In den letzten Jahren entstanden auch in Deutschland an verschiedenen Standorten wieder neue Remote-Labore. Diese in der Regel drittmittelfinanzierten Entwicklungen, insbesondere ihr nachhaltiger Regelbetrieb in der Lehre, sind aber kein Selbstläufer, wie eine Vielzahl nach der Förderphase nicht mehr weiterverfolgter Projekte zeigt.[1] Es bedarf in der Regel umfassender technischer, organisatorischer und labordidaktischer Expertise, um an der unerwarteten Komplexität des Entwicklungsproblems nicht gänzlich zu scheitern oder nicht unnötig Ressourcen und Mühen beim „reinventing the wheel“ zu verbrauchen – also etwa der Entwicklung von für den Betrieb notwendiger Soft- und Hardware, die bereits von anderen entwickelt und für den Alltagseinsatz hinreichend standardisiert worden ist.

Während sich international seit geraumer Zeit unterschiedliche Organisationen wie etwa die IEEE Education Society[2], die International Association of Online Engineering (IAOE)[3], das Global Online Laboratory Consortium (GOLC)[4], die VISIR Federation[5] innerhalb der IAOE oder LabsLand[6] als Spin-off der Universität von Deusto, ansässig in Bilbao (Spanien) und in Palo Alto (Kalifornien) mit der Entwicklung, Verbreitung, Ökonomisierung und Professionalisierung von Remote Laboren im Bildungsbereich befassen, fehlen solche Akteure bislang in Deutschland. Die Förderung, Weiterentwicklung, Professionalisierung und Verbreitung von Remote-Laboren gehört deshalb zu den Zielen der Community Working Group „Remote-Labore in Deutschland“, einem bislang informellen Zusammenschluss von derzeit 15 deutschen Hochschulen und Einrichtungen. Die Gründung erfolgte im Dezember 2018 während eines ersten gemeinsamen Treffens an der Technischen Universität Dortmund und wurde vom Hochschulforum Digitalisierung (HFD) finanziell unterstützt.[7]

Da viele Entwicklungsprojekte schon an einer unzureichenden technischen und darauf bezogenen organisatorischen Planung scheitern, oft aus Mangel an entsprechendem Know-how, zielt der folgende Beitrag darauf ab, eben genau in diesen beiden Feldern grundlegende Gelingensbedingungen und Misserfolgsfaktoren mittels einer ersten kategoriebasierten Analyse von für den Betrieb von Remote-Laboren als grundlegend erachteten technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen

1 Vgl. u. a. eine Keynote von David Boehringer vom TIK der Universität Stuttgart während des ELLI-Gesamttreffens im Dezember 2018.
2 IEEE Education Society: https://ieee-edusociety.org/.
3 IAOE: http://online-engineering.org/IAOE_about.php.
4 GOLC: http://online-engineering.org/GOLC_about.php.
5 VISIR Federation: http://online-engineering.org/VISIR-Federation_about.php.
6 LabsLand: www.labsland.com.
7 Die Veröffentlichung „Die digitale Zukunft des Lernens und Lehrens mit Remote-Laboren“ der CWG erscheint in Kürze in einem Sammelband des Hochschulforums Digitalisierung.

am Beispiel von fünf Laboren aus der CWG zu ermitteln. Hierzu werden in Abschnitt 2 zunächst alle derzeitigen Mitglieder der Community Working Group „Remote-Labore in Deutschland“ vorgestellt, danach noch einmal grundlegende Eigenschaften von Remote-Laboren skizziert, in der Folge ein kursorischer Überblick über vergangene und gegenwärtige Entwicklungen von Remote-Laboren in Deutschland gegeben und kurz erste wichtige Erfahrungen aus diesen Projekten beschrieben. Danach werden in Abschnitt 3 die fünf zur Ermittlung der Gelingensbedingungen in die Untersuchung einbezogenen Labore der Community Working Group genauer vorgestellt. In Abschnitt 4 werden die Kategorien, die der kritischen Analyse von Gemeinsamkeiten und Unterschieden dienen sollen, genauer expliziert. Die Ergebnisse der kategoriebasierten Analyse werden in Abschnitt 5 dargestellt und schließlich in Abschnitt 6 diskutiert und kritisch bilanziert. Basierend auf den ermittelten Eigenschaften werden erste Empfehlungen für die Entwicklung neuer Remote-Labore skizziert und wird ein Ausblick auf die Zukunft der Community Working Group „Remote-Labore in Deutschland“ gegeben.

2 Community Working Group „Remote-Labore in Deutschland“

Die Community Working Group (CWG) „Remote-Labore in Deutschland“ ist ein 2018 mit Unterstützung des Hochschulforums Digitalisierung (HFD) gegründeter informeller Zusammenschluss von derzeit 15 deutschen Hochschulen bzw. Einrichtungen, die es sich zum Ziel gesetzt haben, die Entwicklung und Verbreitung von Remote-Laboren insbesondere in Deutschland zu unterstützen und zu professionalisieren. Folgende Einrichtungen bzw. deren Akteur*innen sind bislang in der CWG „Remote-Labore in Deutschland“ vertreten: das Cybernetics Lab an der RWTH Aachen University (1), das Lehrgebiet Flugzeug- Elektrik und Elektronik an der FH Aachen – University of Applied Sciences (2), das Zentrum für Innovation und Entwicklung in der Lehre der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg (3), die Arbeitsgruppe Virtualisierung verfahrenstechnischer Prozesse an der Ruhr-Universität Bochum (4), das Fraunhofer IWES (5), die IngenieurDidaktik, das Institut für Umformtechnik und Leichtbau, die Strömungsmechanik sowie das Zentrum für HochschulBildung an der Technischen Universität Dortmund (6), die Professur für Softwaretechnologie und Robotik an der TU Bergakademie Freiberg (7), die Stabstelle Elektro- und Informationstechnik der FernUniversität in Hagen (8), die Nordakademie – Hochschule der Wirtschaft (9), die Forschungsgruppe Integrierte Kommunikationssysteme an der Technischen Universität Ilmenau (10), die Informationslogistik an der Hochschule für Technik Stuttgart (11), die Technischen Informations- und Kommunikationsdienste (TIK) der Universität Stuttgart (12), die Otto von Guericke Universität Magdeburg (13), die Hochschule Magdeburg-Stendal (14) sowie die Technische Informatik der Hochschule Rhein-Waal (15). Abbildung 1 zeigt die derzeit beteiligten Hochschulen und Institutionen. Als internationale Partner kooperieren LabsLand und das Engineering Education Transformations Institute der University of Georgia

eng mit der Community Working Group „Remote-Labore in Deutschland“. Darüber hinaus sind einige der Teilnehmenden an der Community Working Group auch Mitglieder der in der Einleitung genannten internationalen Organisationen.

Abbildung 1: Beteiligte Institutionen der CWG „Remote-Labore in Deutschland“ (Stand: Juni 2020)

Abbildung 2: Teilnehmende beim Kickoff-Meeting der Community Working Group „Remote-Labore in Deutschland“

Abbildung 2 zeigt die Teilnehmenden des Kickoff-Meetings zur Gründung der CWG „Remote-Labore in Deutschland“. Die Besonderheit dieses Zusammenschlusses besteht darin, dass die drei für den Regelbetrieb von Remote-Laboren in der Lehre entscheidenden Entwicklungslinien Technik, Didaktik und Organisation miteinander verknüpft werden.

2.1 Was sind eigentlich Remote-Labore?

Wurde vor Beginn des digitalen Zeitalters unter einem Remote-Labor einfach ein von der Forschungseinrichtung räumlich weit entferntes Labor bezeichnet, so wird der Begriff seit ca. 30 Jahren für die Bezeichnung von realen Versuchsaufbauten verwendet, die über das Internet zur Verfügung gestellt werden können, um so ein orts- und zeitunabhängiges Experimentieren zu ermöglichen. Früher wurden Remote-Labore für die Lehre vor allem im Kontext der „Distance Education“ entwickelt, in klassischen Fernlernländern wie etwa Australien verortet und dienten in erster Linie der Verbreitung digitaler Videoaufzeichnungen von Laborversuchen nebst vorher erhobenen Messwertreihen über das Internet (Nedic et al., 2003). Heute hingegen wird ihr Potential aufgrund der fortschreitenden Digitalisierung und der damit einhergehenden Durchdringung aller Lebensbereiche mit digitalen interaktiven Medientechnologien zunehmend im gesamten Bildungsbereich gesehen. Der hier eingedeutscht verwendete Begriff „Remote-Labore“ geht zurück auf den englischsprachigen Begriff „Remote Laboratories“; er wird gelegentlich auch mit „Fernlabore“ (Thoms, 2019) oder seltener mit „Telelabore“ (Hengsbach & Langmann, 2005) übersetzt.

Im Vergleich zum Remote-Labor werden im traditionellen Hands-On-Labor Maschinen und Geräte manuell durch die Nutzer*innen vor Ort, also lokal im Labor, bedient. Sie interagieren direkt mit dem Experiment bzw. den Maschinen. Die Nutzenden steuern das Experiment über ihre Eingaben und beobachten über ihre Sinne die Ausgabe. Es findet also ein direkter synchroner Austausch, eine Interaktion in Kopräsenz, zwischen Experiment und Nutzenden statt. Abbildung 3 zeigt, in welcher Form dabei Informationen ausgetauscht werden.

Abbildung 3: Interaktionen im traditionellen Labor

Im Gegensatz dazu steht im Remote-Labore diese direkte Interaktion nicht zur Verfügung, da IT-Hardware genutzt werden muss, um ein ortsunabhängiges Experimentieren zu ermöglichen. Die Nutzenden interagieren nicht mehr direkt mit dem Experiment im Modus Face-to-Machine, sondern nutzen ein User-Interface und interagieren mit dem Experiment im Modus Face-to-Interface. Abbildung 4 zeigt diesen Informationsaustausch im Remote-Labor.

Abbildung 4: Interaktionen im Remote-Labor

Dabei werden die für die Laborarbeit grundlegenden Prozesse des Auswählens, Aufbauens, Beobachtens, Messens und Eingreifens zum Zwecke des Experimentierens, Testens, Analysierens oder Konstruierens durch den Einsatz von nun über das Internet computertechnisch ansteuerbaren Platinen, Schaltern, Kameras, Aktoren und Sensoren und ggfls. auch programmierbaren Robotern ermöglicht: Aus Prozessorik und Robotik werden Teleprozessorik und Telerobotik (Brockers et al., 2005). Medien- bzw. interaktionstheoretisch gewendet bedeutet dies, dass aus Kopräsenz, also der gemeinsamen realen Anwesenheit von Lernobjekten, Lernenden und Lehrenden in der räumlichen Lernumgebung Labor, nun eine verteilte Anwesenheit im Modus von Telepräsenz und Immersion wird (Kasprowicz, 2019). Mehr noch: Im Remote-Labor verschmelzen das IoP (Internet of People) und das IoT (Internet of Things) zum IoE (Internet of Everything) (Hermann et al., 2016; Terkowsky, Frye et al., 2019). Über ein User-Interface konfigurieren die Nutzenden über Eingaben das Experiment aus der Ferne. Durch entsprechende IT-Systeme werden die Eingaben automatisiert auf das Experiment übertragen. Die Ausgabe erfolgt in der Regel über Messdaten und Kamerabilder, die über die entsprechenden IT-Systeme auf das User-Interface übertragen werden. Neben dem klassischen Labor (Hands-On) und dem Remote-Labor gibt es noch virtuelle Labore (reine Simulationen) und Mischformen der verschiedenen Ansätze (Rivera & Petrie, 2016; Zutin et al., 2010; Terkowsky, May &Frye im vorliegenden Sammelband).

Im folgenden Abschnitt werden zunächst zwei Vorläuferprojekte dargestellt, die eine erste Erfahrungsbasis für einige der neueren Entwicklungen innerhalb der CWG darstellten. Danach werden die fünf in die Untersuchung einbezogenen Remote-Labore genauer vorgestellt.

2.2 Zwei Vorläuferprojekte der Community Working Group „Remote-Labore in Deutschland“

Exemplarisch für eine Vielzahl von Vorläuferprojekten und ohne Anspruch auf Vollständigkeit für die Entwicklung in Deutschland sollen hier die kollaborativen EU-Projekte LILA und PeTEX genannt werden, an denen einige Mitglieder der CWG mitgewirkt haben und die deswegen hier angeführt werden, da sie zumindest im Kontext der CWG als einer von mehreren Ausgangspunkten der gegenwärtigen Entwicklungen im Bereich Remote-Labore in Deutschland dienen können.

2.2.1 LILA – Library of Labs

LILA war ein von der EU im Rahmen des eContentplus- Programmes zwischen Mai 2009 und Dezember 2011 gefördertes Projekt zur Vernetzung von fernsteuerbaren Experimenten und virtuellen Laboren. Ziel des Projektes war der Aufbau einer europaweiten Infrastruktur zur gegenseitigen Nutzung von Experimentalaufbauten und Simulationssoftware zur Verbesserung der Lehre im Grund- bzw. Bachelorstudium der ingenieur- und naturwissenschaftlichen Studienfächer (Richter et al., 2011). Insgesamt waren an dem Konsortium acht Hochschulen aus sieben europäischen Ländern beteiligt. Das Projekt LILA wurde nach Ende der Förderung 2011 nicht fortgesetzt, was auf ein Problem bei der Entwicklung und dem Betrieb von Remote-Laboren deutet: Sobald eine Förderung ausläuft, kann ihr Betrieb nicht mehr gewährleistet werden.

2.2.2 PeTEX – Platform for eLearning and Telemetric Experimentation

PeTEX war ein von der EU im Rahmen des Erasmus-Programmes zwischen Dezember 2008 und November 2010 gefördertes kollaboratives Projekt zur Entwicklung von Remote-Laboren für die Fertigungstechnik im Maschinenbau. An den drei Universitätsstandorten Dortmund, Palermo und Stockholm wurden die mit den Fertigungsverfahren Umformen, Fügen und Trennen in Verbindung stehenden Teststände zu Remote-Laboren aufgerüstet, didaktisch und organisatorisch in eine Lernplattform mit fachlichen Lernmodulen eingebunden und einander gegenseitig zur Verfügung gestellt. Der wegweisende partizipatorische Design-Based-Research-Ansatz wurde in einer Vielzahl von Publikationen umfassend dokumentiert (siehe z. B. Terkowsky et al., 2011).

Allerdings zeigte sich neben der für LILA bereits beschriebenen Problematik der auslaufenden Förderung eine weitere grundsätzliche Schwachstelle im Projektdesign: Auch wenn der gemeinsame fachliche Überbau der Fertigungstechnik im Maschinenbau für den Außenstehenden eine inhaltlich sehr enge Nähe der drei beteiligten Einrichtungen unmittelbar erwarten ließ, zeigte sich in der kooperativen Umsetzung schnell, dass die beteiligten Institute mit der Entwicklung des jeweils anderen Instituts in der Lehre des je eigenen Instituts gar nichts anfangen konnten – eben weil die Remote-Labore der anderen Partner gar nicht fachlicher Inhalt der eigenen Lehre waren. Auch zeigten sich die angesprochenen Mitglieder der Scientific Community, die über die gleichen Hands-on-Labore in eigenen Experimentierhallen verfügten, von dem Verfügbarmachen dieser Experimente über das Internet weitgehend unbeeindruckt und stellten sich als potentielle Tester, User und Kunden gar nicht erst zur Verfügung – ein Problem, das sich im Übrigen auch bei LILA einstellte. Schlussendlich bedeutete dies, dass in der kooperativen Gemeinsamkeit des Projektzusammenhangs jede Einrichtung ihr Remote-Labor letztlich für sich selbst entwickelte und ein wirkliches standortübergreifendes Sharing der Ressourcen aus fachlich-inhaltlichen Disparitäten oder zu optimistisch antizipierten Bedarfen der fachlichen Scientific Communities als künftigen Kunden gar nicht stattfinden konnte. Hätte man dies erreichen wollen, hätte man bei der Projektplanung, der Be-

darfsermittlung und der Auswahl der dafür nötigen Projektpartner z. B. wesentlich enger fachlich fokussieren und dementsprechend verschiedene Labore an verschiedenen Standorten nur eines Fertigungsverfahrens wie z. B. der Umformtechnik auswählen und im Anschluss kollaborativ entwickeln müssen. So blieb es dabei, einen ersten lernplattformintegrierten, technisch, labordidaktisch und organisatorisch ausdifferenzierten Prototypen als Machbarkeitsstudie entwickelt zu haben.

Die mit den EU-Projekten LILA und PeTEX gewonnenen Erfahrungen bzgl. der technischen, didaktischen und organisatorischen Umsetzung dienten gleichwohl als eine wichtige Säule für die späteren Remote-Labor-Entwicklungen in dem Projekt „ELLI – Exzellentes Lehren und Lernen in den Ingenieurwissenschaften“, von denen exemplarisch zwei Entwicklungen am Standort Dortmund neben drei anderen Remote-Laboren aus der CWG auch Gegenstand der folgenden Kapitel sind.

2.3 Aktuelle Projekte zur Entwicklung von Remote-Laboren in Deutschland

In den letzten Jahren entstanden an verschiedenen Standorten in Deutschland neue Remote-Labore, deren Konzeptionierung und Realisierung in vielen Fällen durch öffentliche Fördermittel realisiert wurde und wird. Dabei kommen sowohl Förderlinien der Europäischen Kommission, des Bundes, der Länder als auch von Stiftungen zum Tragen. Nur in vereinzelten Fällen erfolgte die Finanzierung von Remote-Laboren durch hochschulinterne Mittel.

Das Projekt „ELLI – Exzellentes Lehren und Lernen in den Ingenieurwissenschaften“ wurde innerhalb des Qualitätspakt Lehre durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Von 2011 bis 2020 wurde an den drei beteiligten Hochschulen RWTH Aachen University, Ruhr-Universität Bochum und Technische Universität Dortmund eine Vielzahl an Remote-Laboren entwickelt.[8]

Weitere Beispiele für die Förderung durch das BMBF sind die Projekte Industrial eLab (2017–2020) und DigiLab4U (seit 2019). Neben den großen Programmen des Bundes kann eine Förderung auch durch die Bundesländer (Fellowships zur digitalen Hochschullehre) oder Stiftungen erfolgen. Wie beschrieben, ist zu erkennen, dass die Entwicklung und Realisierung von Remote-Laboren zwar gefördert wird – allerdings zeigt die Erfahrung aus der Vergangenheit auch, dass es schwierig wird, Remote-Labore technisch aktuell zu halten, wenn die Finanzierung erst einmal ausgelaufen ist. Der Wartungsaufwand und die damit in Verbindung stehenden Betriebs- und Aktualisierungskosten sind nicht zu unterschätzen und stellen eine weitere kritische Größe für den nachhaltigen Regelbetrieb dar.[9] Darüber hinaus enden

8 Eine detaillierte Darstellung aller ELLI-Labore würde den Rahmen diesen Beitrags sprengen. Deswegen siehe hierzu den ebenfalls bei wbv erschienenen Abschlussband des Projekts ELLI (Isenhardt, Petermann, Schmohr, Tekkaya, Wilkesmann (Hg.). *Lehren und Lernen in den Ingenieurwissenschaften. Innovativ, digital, international*. Bielefeld: wbv).

9 In einem überaus sehenswerten Keynote-Vortrag während der REV-Konferenz 2016 in Madrid führte Javier Garcia-Zubia, Professor an der Deusto Universität in Bilbao und Mitgründer von LabsLand, vor, welches Sammelsurium an Fehlermeldungen und damit Unerreichbarkeiten von Remote-Laboren entstehen kann, wenn allein die Software nicht immer wieder penibel aktualisiert wird, um mit den Updates der vielen beteiligen Software-Applikationen Schritt halten zu können. Auf einer Weltkarte der Remote-Labore zeigte er dann in der Folge nur Angebote, die für ihn auch tatsächlich selbstständig aufrufbar und funktionsfähig waren, was im Auditorium durchaus für einige Adrenalinschübe und peinliche Berührungen sorgte, weil sich einige der Anwesenden als Lab-Provider mit langjähriger Erfahrung nicht auf der Weltkarte wiederfanden.

mit Projektabschluss in der Regel auch die Verträge der beteiligten Wissenschaftler*innen, sodass bei einer ausbleibenden Weiterbeschäftigung das mühsam erworbene Know-how wieder verloren geht. Das Wissensmanagement allein über während der Projektlaufzeit verfasste wissenschaftliche Publikationen oder über das Berichtswesen an den Projektträger gewährleisten zu wollen, reicht in der Regel nicht aus, um die gewonnene Expertise vor dem Vergessen zu sichern.

3 Beschreibung der fünf untersuchten Remote-Labore der CWG

Im Folgenden werden nun die fünf in die Analyse einbezogenen Remote-Labore der CWG genauer beschrieben. Da außer den zwei Remote-Laboren aus dem Projekt ELLI die weiteren drei Remote-Labore auch in diesem Sammelband vertreten sind, werden diese nur kurz beschrieben, um im Anschluss Gemeinsamkeiten und Unterschiede herausarbeiten und kritisch diskutieren zu können.

3.1 Teleoperative Prüfzelle am IUL der TU Dortmund

Am Standort Dortmund wurden Remote-Labore sowohl im Bereich des Maschinenbaus als auch der Elektrotechnik entwickelt bzw. implementiert. Die Remote-Labore im Bereich Maschinenbau wurden innerhalb der Fakultät für Maschinenbau konzipiert und aufgebaut. In der ersten Förderphase von ELLI, 2011 bis 2016, wurde ein Remote-Labor am Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL) mit Fokus auf die Umformtechnik aufgebaut. Mit dem entwickelten Remote-Labor sind derzeit vier verschiedene Experimente durchführbar. Die Abbildung 5 zeigt die sogenannte teleoperative Prüfzelle am Institut für Umformtechnik und Leichtbau. Sie besteht aus zwei Prüfmaschinen (1, 2), einem optischen Mess-System (3), einem Industrieroboter (4) zum Handling der Proben (Sadiki et al., 2016) und Systemen zur Steuerung und Überwachung des Remote-Labors (5, 6) (Ortelt, Sadiki et al., 2016).

Abbildung 5: Teleoperative Prüfzelle der TU Dortmund (Ortelt, Sadiki et al., 2016)

Innerhalb der teleoperativen Prüfzelle wurden folgende Experimente realisiert:

1. **Einachsiger Zugversuch**: Ein einachsiger Zugversuch, korrespondierend zur DIN EN ISO 6892–1, wurde entwickelt (Ortelt, Sadiki et al., 2016).
2. **Zugversuch bei erhöhten Temperaturen**: In einem weiteren Schritt wurde die Möglichkeit geschaffen, Proben während des Experiments bis auf 1.200 °C zu erwärmen (Grodotzki et al., 2018).
3. **Druckversuch**: Ein Druckversuch wurde entwickelt, um Kennwerte für die Massivumformung aufzunehmen (Selvaggio et al., 2019).
4. **Tiefziehversuch**: Zur Charakterisierung von Werkstoffen für Blechumformung wurde der sogenannte Näpfchenversuch automatisiert (Selvaggio et al., 2016).

Die entwickelte teleoperative Prüfzelle wurde in lokale Vorlesungen (Ortelt, Gies et al., 2016), Übungen und in einen internationalen Onlinekurs (Ortelt, Pekasch et al., 2016) integriert. Innerhalb der zweiten Förderphase wurden weitere Remote-Labore für die Bereiche Additive Fertigung, Rohrumformung, Werkstoffprüftechnik und spanende Fertigung entwickelt.

3.2 VISIR - Virtual Instrumentation System in Reality am zhb der TU Dortmund

Ein weiteres Remote-Labor am Standort Dortmund wurde am Zentrum für HochschulBildung (zhb) im Rahmen von ELLI2 installiert. In diesem Fall wurde das bereits etablierte Remote-Labor VISIR (Virtual Instrument Systems in Reality) beschafft und vom kommerziellen Anbieter LabsLand vor Ort aufgebaut und in Betrieb genommen. Mit VISIR können Experimente aus den Bereichen Elektronik, Elektrotechnik und Informationstechnik durchgeführt werden. Aktuell sind weltweit 15 VISIR-Systeme installiert (siehe den Beitrag von May, Frye & Terkowsky im vorliegenden Sammelband).

3.3 GOLDi – Grid of Online Laboratory Devices Ilmenau

Eine Cloud von Remote-Laboren wurde seit 2005 federführend an der TU Ilmenau aufgebaut. In dem Projekt „GOLDi – Grid of Online Laboratory Devices Ilmenau“ werden Online-Labore für das Design von Steueralgorithmen bereitgestellt. Zum einen stehen echte Hardware-Aufbauten im Sinne von Remote-Laboren zur Verfügung, zum anderen können virtuelle Systeme für das Testen der Steueralgorithmen verwendet werden. Aufgrund dieser Kombination von Remote-Laboren und virtuellen Laboren kann GOLDi als hybrides Online-Labor verstanden werden (Henke et al., 2013). Die eigentliche Cloud wird möglich, da Instanzen von GOLDi an zehn Universitäten installiert und betrieben werden (Henke et al., 2015). Für den Betrieb der Remote-Labore in GOLDi wurde eine eigene Software entwickelt. (siehe Beitrag von Wuttke & Henke im vorliegenden Sammelband).

3.4 FPGA Vision Remote Lab

Das FPGA-Remote-Labor der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg richtet sich in erster Linie an Studierende aus den Fachbereichen Elektrotechnik und Informatik. Die Nutzer*innen des Remote-Labors können Digitalschaltungen programmieren, ein FPGA (Field Programmable Gate Array) entwerfen und anschließend die entwickelte Lösung per Fernzugriff testen. Die Programmierung erfolgt auf den Computern der Studierenden, und der kompilierte Algorithmus wird dann auf das Remote-Labore geladen. Dort kann die erstellte Lösung schließlich getestet werden (Winzker et al., 2018). (siehe Beitrag von Winzker & Schwandt im vorliegenden Sammelband).

3.5 Industrial eLab

Das Projekt zum Industrial eLab wurde durch das BMBF gefördert und zwischen 2017 und 2020 gemeinsam durch die Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und die Hochschule Magdeburg-Stendal durchgeführt. Das entwickelte Remote-Labor ist in den Fachbereich Informatik einzuordnen und zielt auf das Thema „Eingebettete Systeme“. Als Experiment werden Roboter programmiert, sodass sie mithilfe von Sensorik und Aktorik ein Labyrinth durchfahren können. Das Remote-Labor ist durch die identische Abbildung des Systems aus Roboter und Labyrinth skalierbar. Die Tatsache, dass 74 Prozent der Zugriffe auf das System in der Zeitspanne zwischen 18 Uhr abends und 8 Uhr morgens registriert wurde, zeigt, dass Studierende das zeitunabhängige Experimentieren per Remote-Labor sehr gut annehmen (Zug et al., 2017). (siehe Beitrag von Hawlitschek, Berndt, Dietrich & Zug im vorliegenden Sammelband).

4 Untersuchungsraster zur Analyse von kritischen Gemeinsamkeiten und Unterschieden

Die oben beschriebenen fünf Remote-Labore der CWG werden nun in Anlehnung an Zubía und Alves (2012), Auer et al. (2018) und basierend auf der kritischen Reflexion von Schwierigkeiten und Hemmnissen bei den eigenen bisherigen Laborprojekten der Autoren dieses Beitrags weitergehend untersucht und charakterisiert. Für die hier vorgestellte Analyse wurden aus der Literatur und auf Basis eigener Erfahrungen im Remote-Lab-Development elf Kategorien herausdestilliert, die im Folgenden kurz beschrieben bzw. definiert werden:

- **Fachbereich**: Diese Kategorie gibt an, welchem Fachbereich das Remote-Labor zugeordnet werden kann. Selbstverständlich können die Remote-Labore zumindest prinzipiell auch interdisziplinär eingesetzt werden. Die Analyse dieser zunächst allenfalls formal bedeutsam erscheinenden Kategorie kann bereits erste Aufschlüsse über mögliche Schwierigkeiten beim tatsächlichen gemeinsamen Einsatz von Remote-Laboren innerhalb der Lehre der beteiligten Projektpartner

und innerhalb der übergeordneten fachlichen Scientific Communities geben (siehe die kurzen Schilderungen zu LILA und PeTEX in Abschnitt 2.2.1).

- **Start der Entwicklung:** Es wird der Zeitpunkt angegeben, ab dem das Remote-Labor entwickelt wurde. Daraus lassen sich Rückschlüsse ziehen, welcher Stand der Technik bei der Planung berücksichtigt wurde.
- **Status der Entwicklung:** Der Status der Entwicklung zeigt an, ob das Remote-Labor weiterentwickelt wird, aktuell entwickelt wird oder ob die Entwicklung bereits abgeschlossen wurde.
- **Förderung**: Hier wird beschrieben, durch welche Fördermittel das Remote-Labor entwickelt wurde bzw. wird.
- **Verfügbarkeit**: Die Verfügbarkeit von Remote-Laboren ist entscheidend für ihre Nutzung. Sie kann zwischen den beiden Extremen „jederzeit“ (also 24 Stunden an 365 Tagen im Jahr) und dem anderen („nach Bedarf“ oder „auf Anfrage“) liegen – oder manchmal sogar bei „nie“.
- **Parallele Nutzung:** Remote-Labore ermöglichen eine höhere Auslastung von Labor-Equipment. Allerdings liegt in vielen Fällen weiterhin ein Verhältnis von Nutzer:in zu Remote-Labor von eins zu eins vor. Diese Kategorie dient also als Maß für die Skalierbarkeit und gibt an, wie viele Nutzende das Remote-Labor parallel nutzen können.
- **Zugriff**: Diese Kategorie beschreibt, inwieweit das Remote-Labor auch durch externe Nutzer:innen (also außerhalb der betreibenden Hochschule) genutzt werden kann. Bei teurem und empfindlichem Equipment in Verbindung mit kostenintensiven Experimenten schwinden die Chancen zunehmend, dass Laborbetreiber die anonyme Netzwelt per Fernzugriff blind „auf die Maschine lassen“.
- **Visuelle Beobachtung:** Mittels dieser Kategorie wird erhoben, auf welche Weise die Nutzenden das Experiment in Remote-Labor beobachten können.
- **Einbindung des Remote-Labors:** Diese Kategorie beschreibt die möglichen labordidaktischen Szenarien, mit denen das Remote-Labor in die Lehre integriert wird.
- **Remote Lab Management System (RLMS)**: Diese Kategorie beschreibt die eingesetzte Softwareumgebung, die den Zugriff auf das Remote-Labor realisiert.
- **Interoperabilität:** Diese Kategorie beschreibt, ob das betreffende Remote-Labor mit anderen Remote-Laboren interagieren kann. Eine Interoperabilität ist immer dann gegeben, wenn es Schnittstellen zwischen verschiedenen RLMS gibt oder das identische RMLS eingesetzt wird.

Mithilfe dieser elf Kategorien wurden die fünf Labore nun eingehender hinsichtlich Gemeinsamkeiten und Unterschiede analysiert. Die Daten bzw. Ergebnisse beruhen dabei auf der Sichtung von Publikationen und Webauftritten der verschiedenen Remote-Labore sowie auf Gesprächen der Autoren mit den Betreiber:innen.

5 Ergebnisse

Tabelle 1 zeigt die Eigenschaften der einzelnen untersuchten Remote-Labore, bezogen auf die hier beschriebenen Kategorien.

Tabelle 1: Eigenschaften der untersuchten Remote-Labore

Kategorie	**Untersuchte Remote-Labore**				
	ELLI-Remote-Labore		GOLDi	FPGA Vision Remote Lab	Industrial elab
	TU Dortmund		TU Ilmenau	Hochschule Bonn-Rhein-Sieg	Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und Hochschule Magdeburg-Stendal
	Teleoperative Prüfzelle	VISIR			
Fachbereich	Maschinenbau	Elektrotechnik, Elektronik	Elektrotechnik	Elektrotechnik	Informatik
Start der Entwicklung	2011	2019 (Installation)	2005	2016	2017
Status der Entwicklung	laufend	laufend	laufend	laufend	laufend
Förderung	Projektfinanzierung (BMBF)		Projektfinanzierung	Projektfinanzierung	Projektfinanzierung (BMBF)
Verfügbarkeit	nach Bedarf	24 Stunden am Tag	24 Stunden am Tag	24 Stunden am Tag	24 Stunden am Tag
Parallele Nutzung	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja
Zugang	Externe Nutzung möglich	Externe Nutzung möglich	Externe Nutzung möglich	Externe Nutzung möglich	Externe Nutzung möglich
Visuelle Beobachtung	Videostream, Messwerte, Bedienfeld	Messungen, Bedienfeld	Videostream, Messwerte, Bedienfeld	Bild als Input, Bild als Output	Videostream, Messwerte, Bedienfeld
Einbindung des Remote-Labors	Integration in Vorlesungen, Übungen, Fachlabore und Online-Kurse	Integration in Vorlesungen und Übungen	Integration in Vorlesungen und Übungen	Integration in Vorlesungen, Übungen, Fachlabore und Online-Kurse	Integration in Vorlesungen und Übungen
Remote Lab Management System (RLMS)	iLab und Eigenentwicklung HALO	Weblab-Deusto/ LabsLand	GOLDi	Weblab-Deusto	Eigene Softwareplattform
Interoperabilität	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein

Für die in die Analyse einbezogenen Remote-Labore können folgende Unterschiede und Gemeinsamkeiten, bezogen auf die oben dargestellten Kategorien, festgehalten werden:

5.1 Unterschiede zwischen den exemplarisch untersuchten Remote-Laboren

- Es ist festzustellen, dass nur zwischen den beiden Remote-Laboren, die ein standardisiertes RLMS nutzen (Weblab-Deusto), eine Interoperabilität abbildbar ist. Dies liegt an der Tatsache, dass in den meisten Fällen ein eigenes RMLS entwickelt wurde und keine Schnittstellen zu weiteren Remote-Laboren bedacht wurden.
- Die untersuchten Remote-Labore sind zum Teil nur auf Bedarf nutzbar und ermöglichen so kein echtes zeitunabhängiges Experimentieren.
- Ein kleiner Teil der gezeigten Remote-Labore ist auch nicht im Sinne von Open Access für Externe nutzbar.

5.2 Gemeinsamkeiten der analysierten Remote-Labore

- Alle untersuchten Remote-Labore wurden mithilfe einer Projektfinanzierung realisiert.
- Alle untersuchten Remote-Labore werden im Regelbetrieb der Lehre zumindest als Ergänzung eingesetzt.
- Alle Remote-Labore werden aktuell weiterentwickelt. Allerdings ist es fraglich, inwieweit diese weiterentwickelt werden, wenn die Projektfinanzierung nicht mehr gegeben ist.
- Alle untersuchten Remote-Laboren wurden in verschiedenen Szenarien in die Lehre eingebettet.

6 Diskussion und Ausblick

Zunächst kann festgehalten werden, dass die in die Analyse einbezogenen Remote-Labore bezogen auf die elf Kategorien mehr Gemeinsamkeiten als Unterschiede aufweisen. Die Entwicklung aller untersuchten Remote-Labore wurden nur durch eine Projektfinanzierung ermöglicht. Dies lässt den Rückschluss zu, dass nur dann weitere Remote-Labore entwickelt werden, wenn weitere Fördermittel in diesem Bereich bereitgestellt werden. Vor diesem Hintergrund muss weiter beobachtet werden, inwieweit Remote-Labore weiter betrieben werden können, wenn die Projektförderung ausgelaufen ist.

Unterschiede in den Remote-Laboren bestehen vor allem in der eingesetzten Softwareumgebung. Leider wurde bei der Entwicklung der Remote-Labore in vielen Fällen ein eigenes RLMS entwickelt, statt bereits entwickelte und damit hinlänglich bekannte und vor allem ausgereifte Lösungen zu verwenden und dabei ggfls. gemeinsam mit deren Entwicklern spezifische Bedarfe zu diskutieren und daraufhin

die Software anzupassen und weiterzuentwickeln. Dieser Aspekt zeigt, wie wichtig der Austausch der handelnden Personen im Bereich der Remote-Labore ist, damit anhand der bereits erzielten Ergebnisse gemeinsame Weiterentwicklungen im Sinne von Best-Practice-Lösungen möglichst optimal durchgeführt werden können.

Folgende Aspekte können die Motivation für die Entwicklung und den Betrieb von Remote-Laboren in Deutschland steigern:

1. Neben der Finanzierung für die Entwicklung sollte auch der Betrieb und die Wartung bzw. Weiterentwicklung von Remote-Laboren gefördert werden. So sollten Fördermittel für entwickelte Remote-Labore nach abgeschlossener Projektförderung in der Nachhaltigkeits- und Konsolidierungsphase mindestens weitere fünf Jahre bereitgestellt werden, sodass sich die Entwicklungskosten auch in einer langen Nutzungsdauer rentieren.
2. Es müssen Schnittstellen zwischen den einzelnen Remote-Laboren entwickelt und etabliert werden, sodass Studierende mit nur einem Login („Single Sign On“) auf verschiedene Remote-Labore zugreifen können – übrigens eine Anforderung, die innerhalb der internationalen Community seit über zehn Jahren zur maßgeblichen Erhöhung der Usability diskutiert und bearbeitet wird.
3. Bei der Entwicklung und Einbindung von Remote-Labor-Management-Systemen (RLMS) ist es unabdingbar, immer wieder einen aktuellen Überblick darüber zu gewinnen, welche Systeme derzeit existieren, wer die Entwickler sind, und vor allem, ob die Systeme noch weiterentwickelt und weiter gepflegt werden, um bei strategischen Entscheidung für oder gegen ein bestehendes System nicht irgendwann unliebsame Überraschungen zu erleben. Dies gilt insbesondere für die Interoperabilität von Remote-Laboren zur unkomplizierten Einbindung in Portalsysteme unterschiedlicher Anbieter.
4. Um insbesondere bei kollaborativen Projekten das Sharing der Remote-Labore zu unterstützen und so einen standortübergreifenden Mehrwert zu erzeugen, sollte bei der Bedarfsermittlung und bei der damit in Verbindung stehenden Auswahl der Projektpartner genau darauf geachtet werden, welchen Nutzen die Entwicklungen der jeweils anderen Partner konkret für die Lehre in der eigenen Einrichtung und der Scientific Community, zu der man gehört, tatsächlich bringen. Auch hier kann es sonst zu unliebsamen Überraschungen kommen.
5. Die Einbindung der Remote-Labore in die Lehre sollte durch Expert*innen der Labordidaktik unterstützt bzw. begleitet werden. Im besten Fall sollte diese Expertise schon in der Konzeptphase der Erstellung eingebunden werden.
6. Entwickelte Aufgabenstellungen sollten am besten als Content in Form von Open-Educational-Resources (OER) zur Verfügung gestellt werden, sofern es übergeordnete Strategien z. B. auf Länderebene gibt, sodass die Einbindung von Remote-Laboren vereinfacht wird.
7. Langfristig gesehen bedarf es hierzu neuer Modelle der Finanzierung von Betriebs- und Wartungskosten nach der eigentlichen Förderphase. Andere im Entstehen befindliche Geschäftsmodelle von Providern wie Labsland oder DigiLab4U favorisieren derzeit Modelle im Sinne der Shared Economy und erheben

Nutzungsgebühren zur Finanzierung der laufenden Kosten der eingebundenen Lab-Provider. Die VISIR-Federation wiederum zielt auf ein Sharing ihrer Systeme untereinander als Open-Educational-Resources (OER) ab, sodass jeder Netzknoten über die Experimente der jeweils anderen verfügen kann. Es ist derzeit nicht entscheidbar, was sich durchsetzen wird.

8. Externen wird durch die CWG der Zugang zur Fachcommunity ermöglicht, sodass jederzeit informeller Austausch erfolgen kann.

Während der Corona-Pandemie zeigte sich, wie wichtig Remote-Labore sein können, da sie trotz Hochschulschließungen die Einbindung von Laboren in die Lehre und damit auch weiterhin die praktische Verknüpfung von Theorie und Empirie ermöglichten. Leider wurde aber auch deutlich, dass interaktive Remote-Labore nicht ad hoc entwickelt werden können, da es noch kein standardisiertes Vorgehen zu ihrer Entwicklung gibt. Viele Laborlehrende behalfen sich mit dem Erstellen von Videoaufzeichnungen von Laborexperimenten, die sie zusammen mit bereits erhobenen Messwerten dann an ihre Studierenden zur weiteren Aufgabenbearbeitung streamten. Sie entwickelten also schnell und unkompliziert Remote-Labore auf dem Stand der Entwicklung der neunziger Jahre des letzten Jahrhunderts.

Diese fehlende Standardisierung für das Erstellen wirklich interaktiver Remote-Labore zeigt sich auch in der dargestellten Erhebung zu Remote-Laboren in Deutschland. Für ihren sicheren Betrieb werden in den meisten Fällen eigene (Software-) Lösungen entwickelt, wodurch letztlich unnötig Zeit und Geld, Ressourcen und Mühen verbraucht werden. Deshalb ist ein fundierter, immer wieder aktualisierter Überblick über den Stand der Forschung und Entwicklung von Remote-Laboren für einen möglichst optimalen Einsatz der Ressourcen unabdingbar. Daher versucht die Community Working Group „Remote-Labore in Deutschland“ verstärkt Entwickler*innen von Remote-Laboren zu beraten und Hilfe anzubieten, damit diese nicht unwissentlich dem „reinventing the wheel“ verfallen und während der Entwicklung neuer Remote-Labore unwissentlich die Fehler ihrer Vorgänger wiederholen.

Literaturverzeichnis

Auer, M. E.; Azad, A. K.; Edwards, A. & De Jong, T. (2018). *Cyber-physical laboratories in engineering and science education*. New York. Springer.

Brockers, R.; Botte, M. & Mertsching, B. (2005). Energy management for the Telepresence system TSR. In A. Rettberg, M. C. Zanella & F. J. Rammig, *From Specification to Embedded Systems Application*. Boston, MA.

Grodotzki, J.; Ortelt, T. R. & Tekkaya, A. E. (2018). Remote and Virtual Labs for Engineering Education 4.0: Achievements of the ELLI project at the TU Dortmund University. *Procedia Manufacturing, 26*, 1349–1360. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.126.

Hengsbach, K. & Langmann, R. (2005). Automatisierungstechnik — eine Gemeinschaftsaufgabe von Bildung, Wissenschaft und Industrie. In P. Holleczek & B. Vogel-Heuser, *Echtzeitaspekte bei der Koordinierung Autonomer Systeme*. Berlin, Heidelberg.

Henke, K.; Ostendorff, S.; Wuttke, H. & Simon, S. (2013). *Fields of applications for hybrid online labs*. 2013 10th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV).

Henke, K.; Vietzke, T.; Wuttke, H. & Ostendorff, S. (2015). *GOLDi — Grid of online lab devices Ilmenau: Demonstration of online experimentation*. 2015 3rd Experiment International Conference (exp.at'15).

Hermann, M.; Pentek, T. & Otto, B. (2016). *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios*. 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS).

Kasprowicz, D. (2019). *Der Körper auf Tauchstation: Zu einer Wissensgeschichte der Immersion*. Baden-Baden. Nomos Verlag.

Nedic, Z.; Machotka, J. & Nafalski, A. (2003). *Remote laboratories versus virtual and real laboratories*. 33rd Annual Frontiers in Education, 2003. FIE 2003.

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). New York. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46916-4_40.

Ortelt, T. R.; Pekasch, S.; Lensing, K.; Guéno, P.-J.; May, D. & Tekkaya, A. E. (2016). Concepts of the International Manufacturing Remote Lab (MINTReLab) – Combination of a MOOC and a Remote Lab for a Manufacturing Technology Online Course. 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. 547-558). New York. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46916-4_41.

Ortelt, T. R.; Sadiki, A.; Pleul, C.; Becker, C.; Chatti, S. & Tekkaya, A. E. (2016). Development of a Tele-Operative Testing Cell as a Remote Lab for Material Characterization. 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. 265-277). New York. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46916-4_21.

Richter, T.; Boehringer, D. & Jeschke, S. (2011). LiLa: A European Project on Networked Experiments. In S. Jeschke, I. Isenhardt & K. Henning, *Automation, Communication and Cybernetics in Science and Engineering 2009/2010*. New York. Springer International Publishing.

Sadiki, A.; Ortelt, T. R.; Pleul, C.; Becker, C.; Chatti, S. & Tekkaya, A. E. (2016). The Challenge of Specimen Handling in Remote Laboratories for Engineering Education. 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. 449-464). New York. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46916-4_34.

Selvaggio, A.; Sadiki, A.; Ortelt, T. R.; Meya, R.; Becker, C.; Chatti, S. & Tekkaya, A. E. (2016). Development of a Cupping Test in Remote Laboratories for Engineering Education. 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. 465-476). New York. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46916-4_35.

Selvaggio, A.; Upadhya, S.; Grodotzki, J. & Tekkaya, A. E. (2019). *Development of a Remote Compression Test Lab for Engineering Education*. 16th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV2019), Bengaluru, India.

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.; May, D. & Frey, S. (2019). Labordidaktik: Kompetenzen für die Arbeitswelt 4.0. In T. Haertel, C. Terkowsky, S. Dany & S. Heix (Hrsg.), *Hochschullehre & Industrie 4.0: Herausforderungen – Lösungen – Perspektiven* (S. 89–103). Bielefeld. wbv.

Terkowsky, C.; Pleul, C.; Jahnke, I. & Tekkaya, A. E. (2011). Tele-operated laboratories for online production engineering education platform for e-learning and telemetric experimentation (PeTEX). *International Journal of Online Engineering, 7* (SUPPL.), 37–43. Verfügbar unter http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-80054011909&partnerID=40&md5=ffab7781bc312ab4a674acd67f901a75 [15.06.2020].

Winzker, M.; Kiessling, R.; Schwandt, A.; Paez, C. S. & Shanab, S. A. (2018). *Teaching Across the Ocean with Video Lectures and Remote-Lab*. 2018 IEEE World Engineering Education Conference (EDUNINE).

Zubía, J. G. & Alves, G. R. (2012). *Using remote labs in education: two little ducks in remote experimentation* (Vol. 8). Universidad de Deusto.

Zug, S.; Merkt, M.; Hawlitschek, A.; Goldau, H.; Stolze, R.; Pohlenz, P. & Krenz, T. (2017). *Poster - Industrial eLAB* BMBF-Fachtagung „Hochschule im digitalen Zeitalter“, Berlin, Germany. Verfügbar unter https://www.wihoforschung.de/_medien/downloads/16DHL1033–1034_Industrial%20eLab_Poster_Fachtagung.pdf [15.06.2020].

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Beteiligte Institutionen der CWG „Remote-Labore in Deutschland“ 232

Abb. 2 Teilnehmende beim Kickoff-Meeting der Community Working Group „Remote-Labore in Deutschland“ 232

Abb. 3 Interaktionen im traditionellen Labor 233

Abb. 4 Interaktionen im Remote-Labor 234

Abb. 5 Teleoperative Prüfzelle der TU Dortmund 237

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Eigenschaften der untersuchten Remote-Labore 241

weblablib: Ein neuer Ansatz zur Einrichtung von Remote-Laboren

Pablo Orduña, Luis Rodriguez-Gil, Ignacio Angulo, Unai Hernandez, Aitor Villar, Javier Garcia-Zubia

Abstract

Remote-Labore bestehen aus Hard- und Softwarekomponenten, die es Studierenden ermöglichen, über das Internet auf reale Geräte zuzugreifen. Remote-Labor-Management-Systeme (RLMS) sind Software-Tools, die speziell dafür entwickelt wurden, Remote-Labore auf einfachere Weise einzurichten. RLMS bieten dafür Querschnittsfunktionen, die inzwischen in den meisten Remote-Laboren üblich sind (z. B. Authentifizierung, Autorisierung, Zugriffsmanagement oder Administration), sowie einige für den Zugang zu den Laboren notwendige Protokolle oder APIs (Application Programming Interfaces). WebLab-Deusto ist ein verbreitetes Open-Source-RLMS, das in verschiedenen Hochschulen zur Einrichtung und Administration von Remote-Laboren verwendet wird und dabei zwei Ansätze verfolgt: *gemanagt* (die gesamte Kommunikation läuft über WebLab-Deusto) und *nicht gemanagt* (die Kommunikation wird von den Betreibenden des Remote-Labors selbst verwaltet). Der *gemanagte* Ansatz besaß ursprünglich eine Reihe von Vorteilen gegenüber dem *nicht gemanagten*. Doch im Laufe der Zeit wurde es notwendig, passenden Support auch für *nicht gemanagte* Remote-Labore anzubieten, da sich die Webentwicklungstechnologien heutzutage schnell ändern und ihre Leistungsfähigkeit kontinuierlich zunimmt. Vor diesem Hintergrund entwickelte LabsLand das Open-Source-Framework *weblablib*. Der vorliegende Artikel stellt dieses neue Framework ebenso wie die Herausforderungen vor, mit denen sich die Entwickler*innen von Remote-Laboren im Zuge der Implementierung konfrontiert sehen.

Schlüsselwörter: Remote-Labor, Remote-Labor-Management-Systeme (RLMS), weblablib, WebLab-Deusto

1 Einleitung

Ein Remote-Labor im Lehr-Lernkontext ist eine Software- und Hardwarelösung, die es Studierenden ermöglicht, über einen Standard-Webbrowser so auf reale Laboreinrichtungen ihrer Hochschule zuzugreifen, als befänden sie sich vor Ort. In der Regel werden solche Labore von den Hochschulen selbst oder von Forschungszentren betrieben.

Ein Schlüsselfaktor von Remote-Laboren besteht darin, dass sich ihre Nutzungsmöglichkeiten deutlich erweitern, sobald sie nicht nur im hochschuleigenen

Intranet, sondern auch über das Internet verfügbar sind und somit ebenfalls von Lernenden anderer Einrichtungen genutzt werden können. So können sich zwei oder mehr Institutionen Equipment teilen, das häufig nur wenige Stunden am Tag oder an bestimmten Tagen im Jahr genutzt wird, und ihre Kosten dadurch senken. Darüber hinaus wird dadurch der Einstieg in eine Sharing Economy befördert, in der mehrere Einrichtungen einander gegenseitig – kostenfrei oder gegen Entgelt – den Zugang zu ihren Laboren gewähren.

Die Forschungsliteratur beschreibt eine große Vielfalt an Remote-Laboren, etwa in den Bereichen Robotik, Elektronik, Physik oder Chemie. Spezielle Software-Frameworks (z. B. RLMS wie WebLab-Deusto[1] [Orduña et al., 2014], iLab Shared Architecture[2], RemLabNet[3] [Schauer et al., 2016] und Labshare Sahara[4] [Lowe, Machet & Kostulski, 2012]) machen deren Entwicklung erschwinglicher und Tools wie gateway4labs[5] (Orduña et al., 2015) ermöglichen ihre Integration in Learning-Management-Systeme (LMS) wie Moodle oder Sakai – sowohl mittels Ad-hoc-Lösungen als auch durch Standards wie IMS LTI[6]. Darüber hinaus wurden Repositorien geschaffen, die Remote- und virtuelle Labore miteinander verbinden (z. B. Go-Lab [de Jong, Linn & Zacharia, 2013; Gillet, de Jong, Sotirou & Salzmann, 2013], LiLa [Richter, Boehringer & Jeschke, 2011] und iLabCentral).

Den meisten der genannten Technologien liegt die Idee zugrunde, Remote-Labore im Hinblick auf ein gemeinsames Wachstum zu nutzen: Bei gemeinsamer Nutzung stünden zwei Hochschulen mit jeweils drei eigenen Remote-Laboren theoretisch insgesamt sechs Labore zur Verfügung. Dieses Szenario ist allerdings mit einer Reihe organisatorischer Herausforderungen verbunden, z. B. im Hinblick auf die Betriebszuverlässigkeit oder das Nutzer*innenvertrauen. Wie können sich beispielsweise die Lehrenden sicher sein, dass die Remote-Labore der jeweils anderen Hochschule auch mehrere Jahre Bestand haben? In kleinen Verbünden, z. B. innerhalb eines geförderten Projekts oder in langjährigen, intensiven Partnerschaften zwischen Hochschulen, lassen sich in der Regel Antworten finden – in einem größeren Kontext werden diese Herausforderungen jedoch schnell zum Problem.

Vor diesem Hintergrund und mit dem erklärten Ziel, den Bereich Remote-Labore auf eine neue Ebene zu heben, gründete das Team von WebLab-Deusto *LabsLand*[7] als Spin-off der Universität Deusto (Bilbao, Spanien), um aktuellen und künftigen Netzwerkpartnern jederzeit die erforderliche Betriebszuverlässigkeit sowie ein professionelles wirtschaftliches Fundament zu garantieren. Mehrere Institutionen in verschiedenen Ländern stellen bereits Ressourcen für die Einrichtung neuer Remote-Labore zur Verfügung oder nutzen die gut geführten Labore des LabsLand-

1 http://weblab.deusto.es.
2 http://ilab.mit.edu.
3 http://www.remlabnet.eu.
4 https://remotelabs.eng.uts.edu.au.
5 http://gateway4labs.readthedocs.org.
6 Learning Tools Interoperability (LTI) ist ein vom IMS (Instructional Management Systems) Global Learning Consortium entwickelter Standard für Bildungstechnologie.
7 https://labsland.com.

Netzwerks. Dabei kommen verschiedene RLMS zum Einsatz, nicht nur WebLab-Deusto.

Für den Erfolg der Idee hinter LabsLand ist es jedoch notwendig, dass im Netzwerk eine Vielzahl von Remote-Laboren zur Verfügung steht, die ein breites Spektrum an Fachgebieten abdecken. Um dies sicherzustellen, wurden Tools zur schnelleren und zuverlässigeren Einrichtung von Remote-Laboren entwickelt. Während einige von ihnen proprietär sind, handelt es sich bei *weblablib* um ein neuartiges Open-Source-Framework zur Einrichtung von Remote-Laboren, das auf WebLab-Deusto basiert.

Der Schwerpunkt des vorliegenden Beitrags liegt auf der Beschreibung von weblablib. Zu diesem Zweck werden zunächst die Grundlagen von RLMS und im Besonderen von WebLab-Deusto thematisiert und es wird geschildert, welchen Einschränkungen das Design von WebLab-Deusto vor der Entwicklung von weblablib unterlag. Schließlich richtet sich der Fokus auf weblablib selbst, um dessen Funktionen, Einsatzmöglichkeiten und Grenzen zu beschreiben.

2 Aktuelle Lösungen zur gemeinsamen Nutzung von Remote-Laboren

In diesem Abschnitt werden die Konzepte von Remote-Laboren, RLMS, Remote-Labor-Verbünden und Portalen zur gemeinsamen Nutzung von Remote-Laboren vorgestellt.

2.1 Remote-Labore

Ein Remote-Labor ist eine Hardware- und Softwarelösung, die es Studierenden ermöglicht, über das Internet auf reale Geräte in ihrer Hochschule zuzugreifen, als wären sie vor Ort im Labor. Abbildung 1 veranschaulicht dieses Prinzip: Sie zeigt ein mobiles kostengünstiges Roboterlabor, wie es in Pumezo et al. (2020) und Buitrago et al. (2020) beschrieben wird.

Die Studierenden lernen, einen Arduino-Microcontroller zu programmieren, schreiben zu Hause den Code, kompilieren ihn mit passenden Werkzeugen und senden die binäre Datei über das Internet an den realen Roboter. Anschließend können sie über das Internet beobachten, wie sich der Roboter auf Basis ihres Programms in einer realen Umgebung verhält und er z. B. wie gewünscht der schwarzen Linie folgt. In der Forschungsliteratur finden sich zahlreiche Beispiele für ein solches Verfahren (Gomes & Bogosyan, 2009; Gravier et al., 2008).

Tatsächlich wurden erste Remote-Labore schon vor mehr als zwei Jahrzehnten entwickelt (Carisa et al., 1995; Aktan et al., 1996; Henry, 1996). Seither fanden sie Anwendung in einer Vielzahl von Kontexten: Chemie (Coble et al., 2010; Cedazo et al., 2006), Physik (Del Alamo et al., 2002; Gillet et al., 2001), Elektronik (Gustavsson et al., 2007; Nedic, Machotka & Nafalski, 2008), Robotik (Šafarič et al., 2005; Torres et al., 2006), Akustik (Zappatore, Longo & Bochicchio, 2016) und sogar Nukleartechnik (Hardison et al., 2008).

Abbildung 1: Roboterlabor zur Programmierung eines Arduino (Pumezo et al., 2020; Buitrago et al., 2020)

2.2 Remote-Labor-Management-Systeme

Jedes gängige Remote-Labor verwendet, unabhängig von seinem speziellen Einsatzgebiet, zumindest mehrere der folgenden allgemeinen Systemfunktionen: Authentifizierung, Autorisierung, Zugriffsmanagement (typischerweise mittels Warteschlange oder terminbasierten Buchungen), User Tracking und Administration. So finden sich beispielsweise ein Authentifizierungswerkzeug und ein Warteschlangensystem sowohl in Elektronik- als auch in Chemielaboren.

Remote-Labor-Management-Systeme (RLMS) setzen genau hier an – u. a. MIT iLabs[8], WebLab-Deusto[9] oder Labshare Sahara[10]. Sie stellen Toolkits zur Einrichtung neuer Remote-Labore ebenso wie Management-Tools und allgemeine Dienste für Remote-Labore zur Verfügung (z. B. zur Authentifizierung, Autorisierung oder Zeitplanung). Dabei besteht die Grundidee darin, dass alle Labore, die vom RLMS verwaltet werden, bei Hinzufügen einer neuen Funktion (etwa Zugriff per LDAP [Lightweight Directory Access Protocol] oder Learning Analytics Panel [Orduña et al., 2014]) automatisch die jeweilige Funktion unterstützen.

2.3 Zusammenschluss von Remote-Laboren

Wie eingangs erwähnt, besteht ein Schlüsselaspekt von Remote-Laboren darin, dass sie von verschiedenen Institutionen gemeinsam genutzt werden können, sobald sie über das Internet verfügbar gemacht wurden. Insgesamt gibt es drei Ansätze zur Nutzung von Remote-Laboren:

- Offene Nutzung: Der Zugang zu den Laboren bleibt völlig offen und die Labore sind frei nutzbar. Dies geht jedoch womöglich zulasten der zur Verfügung ge-

8 http://ilab.mit.edu.
9 http://weblab.deusto.es.
10 http://github.com/saharalabs

stellten Learning Analytics und der Nachverfolgbarkeit bzw. Zuordnung. Auch kann es in diesem Rahmen schwierig werden, die Nutzung des Remote-Labors durch Studierende verschiedener Institutionen zu priorisieren. Das Ergebnis ist ein Kompromiss zwischen freier Nutzbarkeit und erweiterter Funktionalität (Orduña et al., 2015).

- Gegenseitiges Bereitstellen von Laboren: Es erfolgt eine gemeinsame Nutzung von Konten zwischen den verschiedenen RLMS. Möchte Hochschule A Labore von Hochschule B nutzen, stellt Hochschule A Hochschule B eine Liste mit User-Namen zur Verfügung. Die Studierenden greifen daraufhin mit den Anmeldedaten von Hochschule B auf das System zu. Im Idealfall wird eine gemeinsame Authentifizierung verwendet, um die Bereitstellung von Anmeldedaten in verschiedenen Domänen (Shibboleth, OAuth o. Ä.) zu vermeiden. Dies ist normalerweise jedoch nicht der Fall.
- Laborverbund: Unterstützt ein RLMS einen Laborverbund und ist das System an zwei Hochschulen eingerichtet (z. B. an Hochschule A und Hochschule B), greifen die Studierenden der Hochschule A auf das RLMS der Hochschule A zu und nutzen durchlässig die Labore der Hochschule B. Sie arbeiten also in einem Institutionsverbund, sodass Hochschule B keine Liste der Studierenden von Hochschule A benötigt, sondern sich auf die gemeinsame hochschulübergreifende Vereinbarung verlassen kann.

Der fortschrittlichste unter den oben genannten Ansätzen ist der Zusammenschluss von Remote-Laboren durch Protokolle, die sich an marktähnlichen Situationen orientieren. Dabei werden Verbundprotokolle zur Förderung der Interoperabilität zwischen RLMS verwendet (Orduña et al., 2014). Diese kompatiblen Verbindungen zwischen verschiedenen Systemen können weiter verbessert werden, wenn Eigenschaften wie Transitivität oder gekoppelte Lastverteilung zur Verfügung stehen (Orduña, 2013).

3 WebLab-Deusto-Software

WebLab-Deusto ist ein Open-Source-RLMS, das die Entwicklung von Remote-Laboren ermöglicht – frei von den normalerweise damit verbundenen Problemen und Herausforderungen. Insbesondere bietet es folgende Funktionen:

- innovativer Warteschlangenmechanismus, der sowohl einen lokalen als auch einen gekoppelten Lastausgleich unterstützt (die Warteschlange wird z. B. automatisch aufgeteilt, wenn zwei Instanzen desselben Labors existieren und verfügbar sind)
- verschiedene Administrationstools und Dashboards für Learning Analytics (Administrator*innen und Lehrende können nachvollziehen, wer das Labor wie verwendet hat und auf welche Komponenten zugegriffen wurde)

- gemeinsame Nutzung von Laboren mit anderen WebLab-Deusto-Systemen anderer Institutionen – ohne Verwendung geteilter Zugangsdaten oder Duplizierung von Profilen
- verschiedene Authentifizierungsmechanismen; über gateway4labs erfolgt darüber hinaus Unterstützung für LTI, sodass WebLab-Deusto auch integriert in Learning Management Systems (LMS) genutzt werden kann
- native Unterstützung im LabsLand-Netzwerk sowie im Smart Gateway des Go-Lab-Projekts (Orduña et al., 2015)

WebLab-Deusto wurde auf Basis folgender Überlegungen konzipiert:

- Die Entwickler*innen von Remote-Laboren kommen aus den unterschiedlichsten Arbeitsgebieten und weisen ein ausgesprochen heterogenes Kompetenzprofil auf. Daraus resultieren auch durchaus divergierende Vorlieben für verschiedene Technologien. Im Hinblick auf eine breite Akzeptanz muss WebLab-Deusto deshalb mehrere Technologien unterstützen.
- Es gibt Entwickler*innen von Remote-Laboren, die keine umfassenden IT-Kenntnisse besitzen und es sollte ihnen auch nicht zugemutet werden, sich intensiver mit der Materie zu befassen. Für sie sollte WebLab-Deusto ein gewisses Abstraktionslevel bereitstellen. Andere Entwickler*innen wiederum besitzen ausgeprägte IT-Skills und sind in der Lage, uneingeschränkt mit den neuesten Technologien zu arbeiten.

Aus den oben geschilderten Gründen kamen bei der Entwicklung von WebLab-Deusto zwei Ansätze zum Tragen: Der *gemanagte* und der *nicht gemanagte* Ansatz.

Der *gemanagte Ansatz* ermöglicht die Entwicklung von Remote-Laboren, ohne dass sich die Verantwortlichen dabei im Detail mit Netzwerken oder Sicherheitssystemen auseinandersetzen müssen. Er baut auf einem Grundmodell auf, bei dem ein Code auf Client-Seite (z. B. in JavaScript) Befehle oder Meldungen über ein API sendet, ohne Kommunikationsprotokolle berücksichtigen zu müssen. WebLab-Deusto gewährleistet, dass diese Befehle oder Meldungen bis zum Experiment gesendet werden, wo ein anderer Code mittels einer einfachen Schnittstelle zur Programmierung von Anwendungen (API) ausgeführt wird. Die Entwickler*innen müssen nicht wissen, wie viele Instanzen des Remote-Labors es gibt, wo sie sich befinden, wie Zugriff und Zertifizierung konfiguriert sind usw. – sie senden und empfangen lediglich Daten. Das Protokoll wurde in vielen Programmiersprachen implementiert, darunter Python, C, C++, LabVIEW (Code), .NET, Java und Node.js. Remote-Labor-Entwickler*innen, die mit einem dieser Systeme vertraut sind, können somit direkt mit der Implementierung ihres Labors beginnen.

Der *nicht gemanagte Ansatz* bietet eine Web-Schnittstelle zur Einrichtung von Remote-Laboren. WebLab-Deusto gibt lediglich diese Schnittstelle vor, Bereitstellung, Adressierung, Datenschutz etc. liegen danach in der Verantwortung der Remote-Labor-Entwickler*innen, was für ein einfaches Remote-Labor im Vergleich zum gemanagten Ansatz ein erhebliches Mehr an Aufwand bedeutet. Der nicht ge-

managte Ansatz bietet versierten Entwickler*innen jedoch eine flexibel anpassbare Schnittstelle, die in jedem Web-Framework erweitert und mit jeder Webtechnologie verwendet werden kann.

Abbildung 2 zeigt die grundlegende lokale Architektur von WebLab-Deusto am Beispiel einer einzelnen Hochschule im Vergleich zur Verbundstruktur.

Abbildung 2: Aufbau von WebLab-Deusto

Verschiedene User greifen über dieselbe WebLab-Deusto-Schnittstelle auf verschiedene Labore an unterschiedlichen Standorten der Hochschule zu. Dies ermöglicht es den Entwickler*innen von Remote-Laboren, einen oder mehrere WebLab-Deusto-„Kernserver“ (betreut von den jeweiligen IT-Abteilungen) auf dem Campus zu betreiben und verschiedene Remote-Labore, die kostengünstige Technologien wie Raspberry Pi nutzen können, an unterschiedlichen Standorten einzusetzen. In den gemanagten Laboren werden sämtliche Befehle bzw. Meldungen über die „Kern-“ oder „Laborserver“ gesendet, während bei den nicht gemanagten Laboren lediglich der Reservierungsprozess über WebLab-Deusto erfolgt. Im Anschluss werden die User direkt an das entsprechende Labor weitergeleitet.

4 weblablib

Wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, unterstützt WebLab-Deusto sowohl den *gemanagten* als auch den *nicht gemanagten Ansatz*. Beim gemanagten Ansatz werden Bibliotheken für verschiedene Sprachen bereitgestellt. Beim nicht gemanagten Ansatz ist dies unmöglich, da die von Entwickler*innen hierfür potentiell genutzten Web-Frameworks zu vielfältig sind und sich zu häufig ändern. Das Web-Interface ist aus diesem Grund bewusst quelloffen gehalten, sodass Entwickler*innen anderer Frameworks es implementieren können (kleinere Beispiele für PHP und Python werden bereitgestellt). Darüber hinaus ist eine vollständige Implementierung mit Unterstützung für viele Bibliotheken verfügbar: weblablib. weblablib basiert auf dem weitverbreiteten Python-Framework Flask sowie dessen Erweiterungen (Datenbank, Vernetzung, Authentifizierung etc.), wird für die meisten neuen WebLab-Deusto-Labore verwendet und ist speziell darauf ausgerichtet, den Entwicklungsprozess von Remote-Laboren zu beschleunigen.

4.1 Eigenschaften

weblablib bietet folgende Funktionen:

- Flask-Plug-in: Flask ist ein viel genutztes Open-Source-Python-Web-Microframework, das leicht zugänglich und umfassend erweiterbar ist. weblablib lässt sich unkompliziert in Flask integrieren und interagiert auf einfache Weise mit dessen weiteren Komponenten. Die detaillierte Dokumentation der Flask-Umgebung liefert Entwickler*innen wertvolle Informationen zur Einbindung und zum Betrieb des Systems.
- vereinfachtes Modell: Entwickler*innen von Remote-Laboren müssen sich nicht mehr mit Anmeldedaten befassen, da die User bereits in WebLab-Deusto (oder Moodle bzw. einem anderen LMS über LabsLand oder gateway4labs) authentifiziert sind. WebLab-Deusto übermittelt die relevanten Daten an weblablib. Dasselbe gilt für die Terminierung oder Autorisierung: WebLab-Deusto verwaltet Gruppen, User oder den Zugriff auf die Laborkopien, tritt aber nur dann in Aktion, wenn das User-Profil gültig ist.
- User-Informationen: weblablib ist ins Flask-Log-in integriert. Auf diese Weise kann die Anwendung bei jeder Nutzung des Labors einfach auf das User-Profil und den GUID (Globally Unique Identifier) zugreifen. Darüber hinaus lässt sich weblablib in Flask-SQLAlchemy integrieren, um Daten in einer lokalen SQL-Datenbank zu speichern.
- WebSocket: weblablib integriert Flask-SocketIO nativ, was Entwickler*innen von Remote-Laboren dazu befähigt, WebSocket auf sichere Weise zu implementieren (z. B. durch eine entsprechende Authentifizierung). Bei WebSocket handelt es sich um ein modernes HTML5-Protokoll, das es dem Server ermöglicht, Informationen asynchron an die User zu senden – ein Feature, das im Hinblick auf den Betrieb von Remote-Laboren besondere Bedeutung besitzt.

- Multitasking und Aufgabenmanagement: Das System ermöglicht die einfache Einrichtung einer Schnittstelle zum Starten von Hintergrundaufgaben (z. B. Programmierung eines Geräts), die zwar auf die weiteren Funktionen (z. B. User-Identifikation) zugreifen, aber im Batch-Betrieb verarbeitet werden können.
- Internationalisierung (i18n): Das System erkennt, welche Sprache (Englisch, Spanisch ...) WebLab-Deusto anfordert, und unterstützt mittels Flask-Babel bei der Internationalisierung des Remote-Labors.

Darüber hinaus unterstützt das Framework sein eigenes Debugging-System, was Entwickler*innen das Aufrufen oder die Konfigurierung von WebLab-Deusto erspart. Das Ergebnis ist ein unkomplizierter, schneller Entwicklungsprozess. Und sobald das Labor einsatzbereit ist, kann es im laufenden Betrieb in WebLab-Deusto konfiguriert werden.

4.2 Beispiele

Die Dokumentation von weblablib[11] enthält eine Reihe von Anwendungsbeispielen. Abbildung 3 zeigt einen sehr einfachen Code zur Einbindung von weblablib.

```
from flask import Flask, url_for
from weblablib import WebLab, weblab_user, requires_active

app = Flask(__name__)

weblab = WebLab(app)

@weblab.on_start
def on_start(client_data, server_data):
    # ...
    print("Starting user")

@weblab.on_dispose
def on_dispose():
    # ...
    print("Ending user")

@weblab.initial_url
def initial_url():
    return url_for('index')

@app.route('/')
@requires_active
def index():
    return "Hello, {}".format(weblab_user.username)
```

Abbildung 3: weblablib-Musterlabor

11 https://developers.labsland.com/weblablib/

Hierbei wird zum einen festgelegt, welche Funktionen aufgerufen werden sollen, wenn die Nutzung beginnt (z. B.: Wo sollen Aufgaben zur Vorbereitung der Sitzung ausgeführt werden?). Zum anderen wird festgelegt, was zu geschehen hat, wenn die Nutzung endet (z. B. Stopp laufender Motoren und Freigabe verwendeter Ressourcen bei Ablauf der Zugriffszeit oder automatische Überprüfung und Rückführung des Labors in den Ausgangszustand für die nächsten User). Des Weiteren wird gezeigt, wie es möglich ist, Standard-Flask-Webmethoden (*@app.route('/')*) zu verwenden und gleichzeitig Authentifizierungsmechanismen (*@requires_active*) zu unterstützen, die sicherstellen, dass Fremdzugriffe auf diese Website scheitern – es sei denn, WebLab-Deusto hat User umgeleitet und Informationen über sie unter Verwendung des nicht gemanagten HTTP-Protokolls gesendet. Globale Variablen wie *@weblab_user.username* liefern darüber hinaus bei jedem Aufruf auf einfache Weise Daten über aktuelle Nutzer*innen. Das Beispiel in Abbildung 4 zeigt, wie Aufgaben definiert werden können.

```
@weblab.task()
def program_device(contents):
    """ Programs a device. Typically takes 5-10 seconds """
    if weblab_user.time_left < 10:
        raise Exception("Error: user does not have "
                        "enough time to run it!")

    arduino.program("my_file.bin") # In this case
    return len(contents)
# This other code runs it in a different
# process
task = program_device.delay(code)

# The following is a string that you can store in
# Flask session or in weblab_user.data
task.task_id

# a string 'submitted', 'running' or 'failed'/'done' if finished.
task.status

task.submitted  # bool: not yet started by a worker
task.running    # bool: started by a worker, not yet finished
task.done       # bool: finished successfully
task.failed     # bool: finished with error
task.finished   # task.failed or task.done

# These two attributes are None while 'submitted' or 'running'
task.result # the result of the function
task.error # the exception data, if an exception happened

# Join operations
task.join(timeout=5, error_on_timeout=False) # wait 5 seconds
```

Abbildung 4: Verwendung von weblablib-Aufgaben

@weblab.task legt fest, ob eine Funktion wie üblich oder im Hintergrund ausgeführt werden soll. Dabei wird ein Objekt ausgegeben, das definiert, ob die Aufgabe noch läuft, welche Kennung und welchen Status sie hat und ob das System in der Lage ist, gegebenenfalls auf sie zu warten. Ist eine Aufgabe lang, wartet weblablib standardmäßig ihre Beendigung ab, bevor die Ressourcen in den Ausgangszustand zurück-

gesetzt werden. Das dargestellte Beispiel ist sehr einfach und gibt deshalb keine Auskunft darüber, wie die Kommunikation mit der Aufgabe unterstützt wird, um diese zu stoppen oder Informationen über ihren Status zu bekommen. Auch wird nicht deutlich, wie Entwickler*innen innerhalb der Aufgabe Zugang zu Informationen über aktuelle User erhalten (z. B. User-Name, vollständiger Name der Person oder Sprache). Abbildung 5 veranschaulicht, wie WebSocket mit weblablib verwendet werden kann.

```
from weblablib import socket_requires_active

@socketio.on('connect', namespace='/mylab')
@socket_requires_active
def connect_handler():
    emit('board-status', hardware_status(), namespace='/mylab')

@socketio.on('lights', namespace='/mylab')
@socket_requires_active
def lights_event(data):
    switch_light(data['number'] - 1, data['state'])
    emit('board-status', hardware_status(), namespace='/mylab')
```

Abbildung 5: WebSocket-Nutzung mit weblablib

Bestimmte Methoden wie *@socket_requires_active* wurden hier so angepasst, dass sichergestellt ist, dass WebSocket nur von berechtigten Usern mit gültigem Zugriffs-Slot geöffnet werden kann – sowohl bei der Verbindung als auch beim Ausgeben von Daten. Auf diese Weise stellt weblablib bereits direkt nach Beendigung des Zugriffs standardmäßig einen Sicherheitsmechanismus bereit, der verhindert, dass der Client Informationen an die Hardware versendet.

Anhand des Codes in Abbildung 6 wird deutlich, wie das System auch eine native Integration von Datenbanken unter Verwendung der Flask-SQLAlchemy-Bibliothek unterstützt.

```
# Using Flask-SQLAlchemy ( http://flask-sqlalchemy.pocoo.org/ )
from .models import LabUser

@weblab.user_loader
def load_user(username_unique):
    return LabUser.query.filter_by(username_unique=username_unique)

 @app.route('/files')
 @requires_active
 def files():
     user_folder = weblab_user.user.folder
     return jsonify(files=os.listdir(user_folder))
```

Abbildung 6: Nutzung der weblablib-Datenbank

Das globale *weblab_user*-Objekt unterstützt den Aufruf von *user*-Objekten, um intern Zugriff auf ein Datenbankobjekt zu erhalten, das wiederum bestimmte Informationen (z. B. einen Ordner mit Dateien) enthalten könnte.

Die vollständige Struktur dieses API ist in der weblablib-Dokumentation festgehalten.

5 Zusammenfassung und Ausblick auf zukünftige Entwicklungen

Die Entwicklung eines Remote-Labors ist eine komplexe Aufgabe, die aufseiten der Programmierenden erheblichen Aufwand und großes Sachverständnis erfordert. WebLab-Deusto verfolgt in diesem Kontext zwei verschiedene Ansätze, um den unterschiedlichen Entwickler*innen-Typen gerecht zu werden. Die erste Option ist der gemanagte Ansatz mit einer Vielzahl von APIs für verschiedene Programmiersprachen. Der nicht gemanagte Ansatz – die zweite Option – ist zwar grundsätzlich komplizierter, eröffnet erfahrenen Entwickler*innen jedoch auch mehr Handlungsspielraum. Er unterstützt eine Web-Schnittstelle, bietet aber auch weblablib als Open-Source-Framework. Damit steht Entwickler*innen ein einfach zu implementierendes Toolkit zur Verfügung, was den Aufwand zur Integration des Frameworks (Flask für Python und dessen Erweiterungen) erheblich reduziert.

Literaturverzeichnis

Aktan, B.; Bohus, C.; Crowl, L. & Shor, M. (1996). Distance learning applied to control engineering laboratories. *Education, IEEE Transactions on* 39(3), 320–326.

Buitrago, P. A.; Camacho, R.; Pérez, H.- E.; Jaramillo, O.; Villar, A.; Rodríguez-Gil, L. & Orduna, P. (2020). Mobile Arduino Robot Programming Using a Remote Laboratory in UNAD: Pedagogic and Technical Aspects. In *Proceedings of 17th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV2020)*, 26–28 February 2020, University of Georgia, Athens, GA, USA, S. 637–651.

Carisa, B.; Burain, A.; Molly, H. S. & Lawrence, C. (1995). *Running control engineering experiments over the internet*. Oregon State University, Corvallis, OR, USA.

Cedazo, R.; Sanchez, F.; Sebastian, J.; Martinez, A.; Pinazo, A.; Barros, B. & Read, T. (2006). Ciclope chemical: a remote laboratory to control a spectrograph. *Advances in Control Education* 39(6), 517–522.

Coble, A.; Smallbone, A.; Bhave, A.; Watson, R.; Braumann, A. & Kraft, M. (2010). Delivering authentic experiences for engineering students and professionals through e-labs. *Education Engineering* (EDUCON), 2010 IEEE, 1085–1090.

Del Alamo, J.; Brooks, L.; McLean, C.; Hardison, J.; Mishuris, G.; Chang, V. & Hui, L. (2002). The MIT microelectronics weblab: A web-enabled remote laboratory for microelectronic device characterization. In: *World Congress on Networked Learning in a Global Environment*, Berlin, Germany.

Gillet, D.; Latchman, H.; Salzmann, C. & Crisalle, O. (2001). Hands-on laboratory experiments in flexible and distance learning. *Journal of Engineering Education* 90(2), 187–191.

Gillet, D.; de Jong, T.; Sotirou, S. & Salzmann, C. (2013). Personalised learning spaces and federated online labs for stem education at school. In: *Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 2013 IEEE, S. 769–773.

Gomes, L. & Bogosyan, S. (2009). Current trends in remote laboratories. *Industrial Electronics,* IEEE Transactions on 56(12), 4744–4756.

Gravier, C.; Fayolle, J.; Bayard, B.; Ates, M. & Lardon, J. (2008). State of the art about remote laboratories paradigms-foundations of ongoing mutations. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)* 4(1), 19–25.

Gustavsson, I.; Zackrisson, J.; Håkansson, L., Claesson; I. & Lagö, T. (2007). The VISIR project – an open source software initiative for distributed online laboratories. In: *Proceedings of the REV 2007* Conference, Porto, Portugal.

Hardison, J.; DeLong, K.; Bailey, P. & Harward, V. (2008). Deploying interactive remote labs using the ilab shared architecture. In: *Frontiers in Education Conference, 2008.* FIE 2008. 38th Annual. pp. S2A–1. IEEE.

Henry, J. (1996). Running laboratory experiments via the world wide web. In: *ASEE Annual Conference.*

Jong, T. de; Linn, M. C. & Zacharia, Z. C. (2013). Physical and virtual laboratories in science and engineering education. *Science 340*(6130), 305–308.

Kwinana, P. M.; Nomnga, P.; Rani, M. & Lekala, M. L. (2020). Real laboratories available online: Establishment of ReVEL as a conceptual framework for implementing remote experimentation in South African Higher Education Institutions and rural-based schools – A case study at the University of Fort Hare. In: *Proceedings of 17th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation* (REV2020), 26–28 February 2020, University of Georgia, Athens, GA, USA, S. 402–414.

Lowe, D.; Machet, T. & Kostulski, T. (2012). Uts remote labs, labshare, and the sahara architecture. In: García-Zubía, J. & Alves, G. R. (Hrsg.), *Using Remote Labs in Education: Two Little Ducks in Remote Experimentation* (Vol. 8) (S. 403–424). Universidad do Deusto, Bilbao, Spain.

Nedic, Z.; Machotka, J. & Nafalski, A. (2008). Remote laboratory netlab for effective interaction with real equipment over the internet. In: *Human System Interactions,* 2008 Conference on, S. 846–851. IEEE.

Orduña, P. (2013). Transitive and Scalable Federation Model for Remote Laboratories. Ph.D. thesis, Universidad de Deusto, Bilbao, Spain. Verfügbar unter https://more lab. deusto.es/people/members/pablo-orduna/phd_dissertation/ [09.10.2020].

Orduña, P.; Almeida, A.; Ros, S.; López-de-Ipiña, D. & García-Zubia, J. (2014). Leveraging Non-explicit Social Communities for Learning Analytics in Mobile Remote Laboratories. *Journal of Universal Computer Science* 20(15), 2043–2053.

Orduña, P.; Bailey, P.; DeLong, K.; López-de-Ipiña, D. & García-Zubia, J. (2014). Towards federated interoperable bridges for sharing educational remote laboratories. *Computers in Human Behavior* 30, 389–395. Verfügbar unter http://www.sciencedirect. com/ science/article/pii/S0747563213001416. [09.10.2020].

Orduña, P.; Garbi Zutin, D.; Govaerts, S.; Lequerica Zorrozua, I.; Bailey, P. H.; Sancristobal, E.; Salzmann, C.; Rodriguez-Gil, L.; DeLong, K.; Gillet, D. et al. (2015). An extensible architecture for the integration of remote and virtual laboratories in public learning tools. *Tecnologias del Aprendizaje, IEEE Revista Iberoamericana de* 10(4), 223–233.

Richter, T.; Boehringer, D. & Jeschke, S. (2011). Lila: A european project on networked experiments. *Automation, Communication and Cybernetics in Science and Engineering* 2009/2010, 307–317.

Šafarič, R.; Truntič, M.; Hercog, D. & Pačnik, G. (2005). Control and robotics remote laboratory for engineering education. *International Journal of Online Engineering* (iJOE) 1(1), 1–8.

Schauer, F.; Krbecek, M.; Beno, P.; Gerza, M.; Palka, L.; Spilakov, P. & Tkac, L. (2016). Remlabnet iii – federated remote laboratory management system for university and secondary schools. In: *2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV)*., S. 238–241. IEEE (2016).

Torres, F.; Candelas, F.; Puente, S.; Pomares, J.; Gil, P. & Ortiz, F. (2006). Experiences with virtual environment and remote laboratory for teaching and learning robotics at the university of alicante. *International Journal of Engineering Education* 22(4), 766–776.

Zappatore, M.; Longo, A. & Bochicchio, M. A. (2016). Enabling MOOL in acoustics by mobile crowd-sensing paradigm. In: *2016 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*. S. 733–740. IEEE (2016).

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Roboterlabor zur Programmierung eines Arduino 252

Abb. 2 Aufbau von WebLab-Deusto 255

Abb. 3 weblablib-Musterlabor 257

Abb. 4 Verwendung von weblablib-Aufgaben 258

Abb. 5 WebSocket-Nutzung mit weblablib 259

Abb. 6 Nutzung der weblablib-Datenbank 259

Künstliche Intelligenz im Lehr-Lernlabor

Karsten Lensing

Abstract

Der Beitrag widmet sich technischen und didaktischen Entwicklungslinien, aus denen sich Perspektiven zur Integration von Künstlicher Intelligenz im Umfeld hochschulischer Lehr-Lernlabore ableiten lassen. Ausgehend von einer Desk Research zu den technologischen Entwicklungslinien der KI, den Funktionen digitaler Assistenzsysteme und aktuellen Nutzungsszenarien für KI in der Hochschulbildung, skizziert der Beitrag Anknüpfungspunkte zur Integration von KI-Technologien in technische Lehr-Lernumgebungen. Hierzu werden tätigkeitsbezogene Kompetenzansprüche und qualifikatorische Herausforderungen für die Nutzenden der KI-basierten Technologien identifiziert, erste Konzeptionen für KI-Labore vorgestellt und Perspektiven für die Integration von KI im Umfeld ingenieurwissenschaftlicher Lehr-Lernlabore entwickelt. In erster Analyse der Nutzungsszenarien für KI-basierte Systeme im Kontext des Lehrens und Lernens bestätigt sich zunächst die besondere Relevanz der datenbezogenen und metakognitiven Kompetenzen für eine Weiterentwicklung der ingenieurwissenschaftlichen Hochschulausbildung. Zudem zeigt sich, dass insbesondere kognitive Assistenzfunktionen im Zusammenspiel mit einer Individualisierung der Lehr-Lernprozesse bedeutsam erscheinen, um eine reflektive Auseinandersetzung mit KI-bezogenen Kompetenzen zu fördern. Hierzu wird es notwendig sein, Lernende wie Lehrende in handlungsorientierten Szenarien mit Auswirkungen einer zunehmenden Nutzung von KI-Technologien zu konfrontieren. Zukünftig sollten hierzu verstärkt auch die normativen Aspekte von KI reflektiert werden, um die Integration von KI im Umfeld der ingenieurwissenschaftlichen Lehr-Lernlabore erfolgreich zu gestalten.

Schlüsselwörter: Assistenzsysteme, Künstliche Intelligenz (KI), Lehr-Lernlabor

1 Einleitung

Im Rahmen der ingenieurwissenschaftlichen Hochschulausbildung nimmt der Lern- und Arbeitsraum Labor eine zentrale Rolle für die berufsfeldorientierte Kompetenzentwicklung ein (Tekkaya et al., 2016). Obwohl labordidaktische Lehr-Lernformate gekennzeichnet sind durch eine große Heterogenität, eint sie doch, dass auch sie den Auswirkungen des umfassenden digitalen Wandels ausgesetzt sind (vgl. Terkowsky, May & Frye in diesem Band). Die zunehmende Nutzung digitaler Assistenzsysteme etwa wird die Tätigkeiten im ingenieurwissenschaftlichen Lehr-Lernlabor,

wie beispielsweise die computergestützte Datenanalyse oder die (remote) Manipulation von Laborequipment, weiter verändern und neuartige Lehr-Lernaktivitäten notwendig machen (siehe bspw. Lensing, 2021). Vor dem Hintergrund der fortschreitenden Digitalisierung ist insbesondere das Forschungsfeld Künstliche Intelligenz (KI) für die Innovation der Hochschulausbildung von hoher Relevanz (Holmes et al., 2019). Lernende wie Lehrende in der Hochschulbildung sollen zukünftig mit KI-basierten Feedback-, Empfehlungs- und Vorhersagesystemen begleitet, unterstützt und entlastet werden können (Baker et al., 2019). Demnach erschließt die Integration KI-basierter Technologien im Kontext des hochschulischen Lehrens und Lernens eine wichtige technologische (Teil-)Antwort für die Individualisierung von Lehr-Lernprozessen im Umfeld ingenieurwissenschaftlicher Lehr-Lernlabore.

Die Forschung zu Künstlicher Intelligenz erfährt seit Mitte 2016 eine neue Welle der Aufmerksamkeit. Dies zeigt sich zum Beispiel in Hinblick auf die Vielzahl von Strategiepapieren und Förderlinien, die sich derzeit auf die Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu KI und eine branchenübergreifende Integration von KI-Technologien, -methoden, und -anwendungen fokussieren (u. a. acatech, 2020; BReg, 2019). Insbesondere im Hinblick auf die zuletzt erreichten Ergebnisse in den Forschungsfeldern Deep Learning und Natural Language Processing (NLP) wird deutlich, dass eine (Teil-)Antwort auf die qualifikatorischen Herausforderungen mit Unterstützung durch multimodale Mensch-Maschine-Schnittstellen mittelfristig realisierbar erscheint (Abele & D'Onofrio, 2020; Wahlster, 2019). Neu sind weder die Bemühungen in Bezug auf die Integration datengetriebener KI-Methoden noch das interdisziplinäre Forschungsfeld KI selbst (Russell & Norvig, 2009) – in neuer Qualität präsentiert sich jedoch der niedrigschwellige Zugang zu KI-basierten Werkzeugen für die Industrie, der erst zuletzt im Zuge von Big Data (Verfügbarkeit von hoher Daten- und Rechenleistung) und Algorithm Wave (Automation computergestützter Analyseaufgaben) möglich wurde (Hatiboglu et al., 2019; Schuh & Scholz, 2019). In der Folge ist ein zunehmender Einsatz KI-basierter Technologien in der industriellen Praxis feststellbar, der u. a. eine Umgestaltung arbeitsorganisatorischer und qualifikatorischer Begleitmaßnahmen nach sich zieht (u. a. Maschler et al., 2020; Rammer et al., 2019; Seifert et al., 2018). Aus den Kompetenzansprüchen der Industrie im Hinblick auf das Thema KI (Gottburgsen et al., 2019) wiederum erwächst der Auftrag zur Innovation der hochschulischen Berufsausbildung (Heidling et al., 2019). Aktuelle Studien zum Thema KI in der Hochschulbildung bestätigen die Bedeutung von KI zur Unterstützung der Lehr-Lernprozesse und skizzieren einen Bedarf an Ansätzen zur Integration von KI im ingenieurwissenschaftlichen Curriculum (vgl. Zawacki-Richter et al., 2019; Lindner & Romeike, 2019; Keller et al., 2019a; Bhaduri, 2018). Erste lehr-lernbezogene Umsetzungen unter Einsatz von KI-Technologien können im Rahmen des BMBF-Förderschwerpunkts *Transwork* oder im KI-Schwerpunktprogramm der Bundesregierung *„Einrichtung von KI-Laboren zur Qualifizierung im Rahmen von Forschungsvorhaben im Gebiet Künstliche Intelligenz"* verortet werden. Diese und weitere Umsetzungen sollen im Folgenden genauer betrachtet werden, um Perspektiven zur Integration von KI-Technologien in die ingenieurwissenschaftlichen

Lehr-Lernlabore abzuleiten. Vor diesem Hintergrund widmet sich der Beitrag der Beantwortung folgender Fragen:

(1) Wie verbreitet ist der Einsatz von KI-Technologie in hochschulischen Lehr-Lernumgebungen?
(2) Welcher Kompetenzanspruch besteht hinsichtlich der Nutzung KI-basierter Assistenzsysteme?
(3) Wie können KI-Technologien im ingenieurwissenschaftlichen Lehr-Lernlabor integriert werden?

Zu diesem Zweck werden zunächst die labordidaktischen und technologischen Grundbezüge dargestellt (Abschnitt 2 und 3); anschließend widmet sich der Beitrag der Aufarbeitung von hochschulischen und laborbezogenen Einsatzszenarien für KI-Technologien sowie den inhaltlichen Schwerpunkten für eine lehr-lernbezogene Auseinandersetzung mit KI (Abschnitt 4). Daraufhin werden in einem letzten Schritt die Perspektiven für eine labordidaktisch fundierte Gestaltung der Integration von KI-Assistenzsystemen im ingenieurwissenschaftlichen Labor antizipiert (Abschnitt 5).

2 Bedeutung der ingenieurwissenschaftlichen Lehr-Lernlabore

Der Lern- und Arbeitsraum Labor kann als ein integraler Bestandteil der ingenieurwissenschaftlichen Hochschulausbildung verstanden werden (Tekkaya et al., 2016). Die gemeinhin mit dem Begriff Labor assoziierten Konzeptionen wie etwa das Experimentieren oder die Kommunikation wissenschaftlicher Erkenntnisse liefern erste Hinweise auf die Heterogenität laborbezogener Umsetzungen. Bei genauerer Betrachtung hochschulischer Labore zeigt sich das Lehr-Lernlabor als ein Raum für die Grundlagenarbeit, für die Anwendung und die Entwicklung neuer Methoden und Technologien, aber auch als ein Ort für (Gedanken-)Experimente und die Reflexion der individuellen Kompetenzentwicklung. Für eine umfassendere Diskussion zu Wesen und Funktion des Lern- und Arbeitsraums Labor sei an dieser Stelle auf den Beitrag von Berendes und Gutmann in diesem Sammelband verwiesen.

Aus der Perspektive der Studierenden kontrastieren die Laborerfahrungen mit ihren oft instruktional ausgelegten und somit unmittelbar begreifbaren Handlungsabläufen das opake Bildungsziel einer ingenieurwissenschaftlichen Hochschulausbildung (vgl. Terkowsky, May & Frye in diesem Band). Einerseits vermitteln Listen von Eingangs- und Ausgangsgrößen, Vorgaben zu relevanten Methoden sowie gekapselte Maschinen und Anlagen in den Grundlagenlaboren den Studierenden den Eindruck, die Abläufe und Prozesse in Lehr-Lernlaboren seien stets klar definiert – auf der anderen Seite werden sie in Entwicklungs- und Konstruktionslabore mit komplexen Technologien und ersten selbstgesteuerten Arbeitsprozessen konfrontiert, deren Umsetzung mit einer Reflexion individueller Lern- und Kompetenzentwicklungsprozesse begleitet werden sollte. Damit die Lernenden sich mit eigenen

Projektideen und Handlungsprodukten selbst verwirklichen können, sind zusätzlich labordidaktische Konzeptionen im vielen Freiheitsgraden notwendig – wie sie beispielsweise im Kontext von Projekt- und Walk-in-Laboren zu finden sind. In diesen Formaten besteht für die Lernenden die Gelegenheit, über forschendes Lernen auch metakognitive Kompetenzspektren weiterzuentwickeln (ebd.). Zwischen diesen drei Polstellen hochschulischer Lehr-Lernlabore können eine Vielzahl didaktischer Formate mit Bezügen zum Labor identifiziert werden, beispielsweise Forschungslabore, Mini-Labs, Game-Based Learning, Cross-Reality Labs etc. Darüber hinaus lassen sich auch Fab Labs, Makerspaces (Lensing et al., 2018) und Lernfabriken (Pittich et al., 2019a) sowie viele weitere integrierte Umsetzungen, ihrer konzeptionell bedingten Abgrenzungsneigung gegenüber dem klassischen Lehr-Lernlabor zum Trotz, als labordidaktisch verankerte Formate begreifen (ebd.). Für einen Strukturierungsvorschlag zu den aufgeführten Erscheinungsformen moderner Lehr-Lernlabore sei an dieser Stelle erneut auf den Beitrag von Terkowsky, May & Frye in diesem Band und auf das dort explizierte Stufenmodell zur Kompetenzentwicklung im Lehr-Lernlabor verwiesen.

In der höchsten Taxonomiestufe labordidaktischer Lehr-Lernformate intendieren die Lernziele eine berufsfeldorientierte Kompetenzentwicklung anhand unvollständiger Problemdefinition (Feisel & Rosa, 2005). Sie sind somit auf eine Integration berufspraxisrelevanter Technologien angewiesen, um solche Lehr-Lernszenarien zu antizipieren, die eine zukünftige berufliche Wirklichkeit mit dazu passenden Kompetenzentwicklungsmöglichkeiten abbilden. Der berufsfeldübergreifende Einsatz von digitalen Assistenzsystemen, u. a. im Rahmen von Wissens- und Innovationsarbeit, gilt damit als relevante Perspektive und kann ein adäquates Vehikel zur Integration von KI-Technologien im Umfeld der ingenieurwissenschaftlichen Lehr-Lernlabore darstellen (acatech, 2020; Apt et al., 2018). In Abgleich der intendierten Lehr-Lernziele (Feisel & Rosa, 2005) mit den relevanten Anwendungsfeldern aktueller KI-Technologien (u. a. Seifert et al., 2018) erscheint es nachvollziehbar, dass eine zunehmende Nutzung von KI (auch, aber eben nicht nur) im Lehr-Lernlabor unmittelbare und mittelbare Implikationen für die involvierten Tätigkeiten ausprägen wird. Als Beispiele für die unmittelbar betroffenen Tätigkeiten lassen sich hier die Datenanalyse, die Manipulation von Laborequipment oder die Begründung des Quell- und Methodeneinsatzes anführen. Insbesondere im Hinblick auf die Auswirkungen einer KI-Unterstützung von Tätigkeiten im Zuge der Manipulation von Laborequipment oder der Datenauswertung liegen derzeit keine empirischen Befunde im Umfeld ingenieurwissenschaftlicher Lehr-Lernlabore vor. Erste Hinweise auf die Auswirkungen von KI-Technologie im Kontext des Lehrens und Lernens konnten zuletzt in Analyse industrieller Einsatzszenarien skizziert werden (Lensing, 2021). Im Rahmen dieses Beitrags sollen darauf aufbauend erste lehr-lernbezogene Gestaltungsempfehlungen antizipiert werden. Darüber hinaus stellt die Lehr-Lernumgebung Labor aufgrund ihrer curricularen Integration einen wichtigen Reflexionsraum für Fragestellungen mit Bezügen zur technologiegestützten Gestaltung des Lehrens und Lernens dar.

3 Darstellung der technologischen Entwicklungen

Der vorliegende Abschnitt beschreibt die technologischen Entwicklungen im Forschungsfeld KI, skizziert die Bedeutung des Themas Explainable AI und widmet sich den relevanten Funktionen digitaler Assistenzsysteme.

3.1 Entwicklungsschritte der Künstlichen Intelligenz

Mit der Übertragung menschlicher Entscheidungsfindung auf technische Gegenstände, der Abgrenzung von maschineller gegenüber menschlicher Intelligenz (Turing, 1937) und Studien zur Science-Fiction (Asimov, 1950) beschäftigten sich vielfältige Disziplinen, bevor 1956 (McCarthy) das Forschungsfeld KI generiert wurde (McCorduck, 1979). Die Auseinandersetzung mit KI war bis in die 1970er Jahre geprägt von manueller Programmierarbeit auf Basis symbolbasierter Programmiersprachen und heuristischer Algorithmen. Anschließend dominierte eine logikorientierte bzw. funktionale Programmierung im Rahmen regelbasierter Systeme (Abele & D'Onofrio, 2020, S. 45). Mehrfach ebbte das Interesse an KI ab, weil Erwartungshaltungen, etwa in Bezug auf wissensbasierte Systeme, nicht erfüllt werden konnten (Kirste & Schürholz, 2019). Lernende Systeme prägten zuletzt die dritte Phase, in der Deep Learning Algorithmik eine breite Aufmerksamkeit erhielt. Im Zuge der aktuell ablaufenden vierten Phase dieser Entwicklungen wird prognostiziert, dass kognitive Systeme die jeweils notwendigen Kontextanpassungen selbst erkennen und Lernverfahren zur Aktualisierung ihrer Wissensbasis einsetzen. In einem nächsten Schritt (Phase 5) erscheint insbesondere der Fokus auf die Mensch-Maschine-Interaktion von Bedeutung, um die KI-Assistenz zu co-kreativer Zusammenarbeit mit menschlichen Entscheider*innen zu motivieren. Die hier skizzierten Phasen dieser KI-Technologieentwicklung sind in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

Abbildung 1: KI-Entwicklungsphasen, eigene Darstellung nach Bitkom & DFKI (2017) sowie Wahlster (2016)

Im Hinblick auf die aktuelle wissenschaftliche Auseinandersetzung mit KI lassen sich zwei Schwerpunkte feststellen: (1) das Deep Learning und (2) das Natural Language Processing (Abele & D'Onofrio, 2020). Deep Learning Algorithmik (DL) stellt dabei eine Weiterentwicklung des maschinellen Lernens dar, in der künstliche

neuronale Netze in Schichten angeordnet und anschließend mit umfangreichen Datenmengen trainiert werden – beispielsweise, um Bildmaterial oder Begriffe zu klassifizieren (LeCun et al., 2015). Das Natural Language Processing (NLP) beschreibt angewandte Forschung- und Entwicklungsarbeit mit dem Ziel, Maschinen in die Lage zu versetzen, menschliche Sprachen zu lesen, zu verarbeiten und zu generieren sowie enthaltene Informationen zu verstehen (Couto, 2015). NLP verbindet Erkenntnisse aus der Informatik und Computerlinguistik mit den aktuellen Methoden des maschinellen Lernens. Neue technische Konzeptionen im Kontext der Neuralen Netzwerke wie etwa die Fehlerrückführung oder das sogenannte Long Short-Term Memory (Schmidhuber, 2015) befeuerten die Erwartungen zuletzt weiter und sind entscheidend für die Entwicklung NLP-basierter Mensch-Maschine-Schnittstellen (Schmidhuber, 2019). In der KI-Forschung wird darüber hinaus unterschieden zwischen rationalen Ansätzen, die auf eine Objektivität der Messkriterien angewiesen sind (u. a. für Navigation, Objekt- und Mustererkennung etc.), und verhaltensorientierten Ansätzen (bspw. für Text-zu-Sprache (NLP), kognitive Systeme etc.), die eine Unvorhersehbarkeit der Anforderungen beinhalten (vgl. Seifert et al., 2018, S. 15; Stone et al., 2016).

Neben den technologischen Fragestellungen rücken verstärkt auch normativ-ethische Fragestellungen in den Fokus der Diskussionen zum Thema KI (vgl. HEG-KI, 2019; Mah & Büching, 2019). Hier zeigt sich, dass vertrauenswürdige und nachvollziehbare Entscheidungen für die Akzeptanz der KI-Anwendungen von zentraler Bedeutung sind (vgl. Kirste, 2019; Niehaus, 2017) und die didaktische Reduktion – auch aufgrund der Komplexität des Themas KI – entscheidend für den Erfolg lehrlernbezogener Umsetzungen ist (Lindner & Romeike, 2019). In diesem Zusammenhang sind fachwissenschaftlich fundierte Konzepte wie etwa Explainable AI (XAI) hilfreich, da sie darauf abzielen, KI so zu gestalten, dass sie leicht verständliche und nachvollziehbare Gründe für ihre Funktionsweise von Beginn an mitliefern (vgl. Gunning, 2017; Arrieta, 2020). Vor diesem Hintergrund sind Lernende wie Lehrende wiederum verstärkt auf datenbezogene Kompetenzen angewiesen, wie sie beispielsweise im Rahmen der Data Literacy eingefordert werden (Schüller et al., 2019).

3.2 Funktionen von digitalen Assistenzsystemen

Assistenzfunktionen sind heute für alle Typen und Arten von menschlicher Arbeit verfügbar (Apt et al., 2018). Dabei reichen Anwendungen von physischer Assistenz mechanischer Hebevorrichtungen wie Seilzügen bis hin zu komplexen Systemen wie Exoskeletten. Darüber hinaus existiert auch im Hinblick auf die Unterstützung kognitiver und kreativer Tätigkeiten ein breites Spektrum an Einsatzbeispielen (vgl. PLS, 2019, Bauer et al., 2019). Digitale Assistenzsysteme durchdringen alle Lebens- und Unternehmensbereiche und sind sowohl in der Form sprachbasierter Assistenz im privaten Fahrzeug als auch in produktionstechnischen Konzepten der Industrie 4.0 (Pick-by-light, Guided Maintenance etc.) längst allgegenwärtig (Ahlborn et al., 2019). Im Rahmen dieses Beitrags werden digitale Assistenzsysteme (dAsys) definiert als „[...] rechnerbasierte Systeme, die Menschen bei der Informationsauf-

nahme, Informationsverarbeitung und Arbeitsausführung unterstützen“ (Link & Hamann, 2019, S. 684; Bauer et al., 2019). Ein dAsys realisiert eine präventive, kompensatorische oder fähigkeitserweiternde Unterstützung von Menschen über die Fähigkeiten von technischen Entitäten (bspw. über Einbringen einer höheren Geschwindigkeit, Kraft, Präzision, Ermüdungsfreiheit oder kognitiven Leistungsfähigkeit) im Rahmen von soziotechnischen Arbeitssystemen (Apt et al. 2018). Abbildung 2 illustriert vor diesem Hintergrund die relevanten Funktionen von dAsys, die sich zunächst in einen sensorischen und einen kognitiven Zweig aufteilen lassen. Die physischen Assistenzfunktionen werden im Rahmen des Beitrags nicht genauer betrachtet, da Assistenzfunktionen, die ausgerichtet sind auf eine Unterstützung von Wahrnehmung, Handlungsanweisung und Analyse im Zusammenspiel mit KI-Technologien derzeit ein signifikant höheres Entwicklungspotential zuzuschreiben ist (vgl. Ahlborn et al., 2019; Bauer et al., 2019).

Abbildung 2: Funktionen Digitaler Assistenzsysteme (Bayer et al., 2020)

Auf der unteren Funktionsebene zeigt sich, dass dAsys in der Regel verschiedene Funktionen vereinen und die Funktionsmodule (Wahrnehmung, Analyse und Anweisung) auf die Funktionen anderer Module angewiesen sind. Aktuelle Studien zum Potential von dAsys und die Veröffentlichungen der Transwork-Schwerpunktgruppe „Assistenzsysteme und Kompetenzentwicklung“ unterstreichen jedoch die besondere Relevanz der Assistenzfunktionen im Feld von Lernen und Einüben (vgl. Klapper et al., 2019; Bauer et al., 2019). Darüber hinaus lassen sich die kognitionsunterstützenden Assistenzsysteme weiter in Hilfesysteme, adaptive und tutorielle Assistenzsysteme untergliedern (Apt et al., 2018). Hilfesysteme stellen relevante Informationen in Form digitaler Handbücher, Lernvideos oder Qualifikations- und Wissensmanagementsystemen bereit. Adaptive Assistenzsysteme zeichnen sich durch die Anpassung an individuelle Nutzungskontexte aus – beispielsweise über Bereitstellung kontextsensitiver Informationen oder die Individualisierung von Bedienoberflächen. Die (intelligenten) tutoriellen Assistenzsysteme (ITS) fokussieren speziell situiertes Lernen (im Prozess der Arbeit) und treten u. a. in Form von portablen Lernplattformen, Augmented- oder Cross-Reality-Anwendungen in Erscheinung. Eine Charakterisierung der dAsys generieren Apt et al. über den Unterstützungsgrad, die Unterstützungsart und -ziele (2018). Des Weiteren liegen verschiedene morphologische Kästen zur Clusterung von dAsys vor (Keller et al., 2019b; Niehaus, 2017). Die Gestaltung von dAsys kann u. a. über die Taxonomie digital

assistierter Arbeit kategorisiert werden: (1) der Arbeitssystemkontext, das meint bspw. die Anforderungscharakteristik (niedrig bis hoch und variabel), sowie (2) der tutorielle Charakter des Systems (Apt et al., 2018).

In Bezug auf die lehr-lernbezogene Forschungsarbeit zu dAsys bzw. ITS lässt sich feststellen, dass über die letzten Fortschritte im Kontext der NLP-basierten Kommunikationsschnittstellen mittelfristig eine neue Qualität der Mensch-Maschine-Interaktion ermöglicht werden kann (vgl. Maedche et al., 2019; PLS, 2019). Bei der Analyse der aktuellen Implementierungen von dAsys zeigt sich jedoch, dass eine Auseinandersetzung mit Aspekten der Lernförderlichkeit derzeit maßgeblich unter Heranziehung einer allgemeinen Didaktik sowie in Bezug auf Usability stattfindet (vgl. Lensing, 2021; Apt et al., 2018, S. 24 f.; Haase et al., 2017). In diesem Zusammenhang erscheint (auch) die labordidaktische Perspektive auf die Gestaltung von KI-basierten Assistenzsystemen relevant, da für die nahe Zukunft erwartet werden darf, dass entsprechende KI-Technologien (auch) im Kontext der hochschulischen Lehr-Lernlabore Einzug halten werden.

4 KI im hochschulischen Lehr-Lernlabor

Nachdem die Bedeutung des Labors für die ingenieurwissenschaftliche Hochschulausbildung und die technologischen Entwicklungen im Feld KI skizziert wurden, widmet dieser Abschnitt sich einer ersten Bilanzierung des Themas KI in der Hochschule (vgl. Frage (1)). Hierzu wurden aktuelle Veröffentlichungen zum Thema KI in der Hochschulbildung analysiert und Einsatzszenarien für KI-Technologien im Umfeld der laborbezogenen Lehr-lernumgebungen identifiziert. Abschnitt 4.1 skizziert zunächst den aktuellen Stand der wissenschaftlichen Diskussion zum Thema KI in der Hochschulbildung. Anschließend stellt Abschnitt 4.2 fachbezogene Konzepte für KI-Labore vor. Daran anknüpfend skizziert Abschnitt 4.3 die übergreifenden Querschnittsfunktionen von KI im Kontext ingenieurwissenschaftlicher Labore und benennt erste Prämissen für eine erfolgreiche Integration von KI im Lehr-Lernlabor.

4.1 KI in der Hochschulbildung

Zum Thema KI in der Hochschulbildung liegen Analysen und Studien unterschiedlicher Ausrichtung vor. Die im Folgenden skizzierten Publikationen sind Teil einer umfassenderen Desk Research und sollen einen ersten Anhaltspunkt für die neue Aktualität des Themas KI im Kontext des Lehrens und Lernens liefern. Die Analyse von Ilkka (2018) skizziert den Einfluss von KI auf das Lehren und Lernen aus einer europäischen Perspektive. Pedró et al. (2019) beschreiben Anknüpfungspunkte für KI in der Bildung aus der Perspektive des Themas Nachhaltigkeit (UN SDGs). Seufert et al. (2020) legen Augmentationsstrategien für den Einsatz von Data Analytics und KI in der Hochschulbildung vor. Zawacki-Richter et al. (2019) setzten im Zuge einer systematischen Literaturanalyse zu einer umfassenden Bilanzierung von KI-Anwendungen im Kontext der internationalen Hochschulforschung an. Keller et al.

(2019a) triangulieren KI-Strategiepapiere deutscher Hochschulen und Experteninterviews, um im Einsatz befindliche und geplante KI-Systeme zu identifizieren. Mah und Büching (2019) erfassen die nationalen KI-Professuren und -studiengänge überblicksartig als Entscheidungsgrundlage für das BMBF. Lindner und Romeike (2019) dokumentieren speziell den Blick von Lehrenden auf KI. Bhaduri (2018) demonstriert den Nutzen von NLP-Anwendungen speziell für die ingenieurwissenschaftliche Ausbildung.

Unabhängig von den unterschiedlichen Schwerpunktsetzungen unterstreichen die Studien und Analysen die Relevanz der KI-Technologien für die Innovation der (ingenieurwissenschaftlichen) Hochschulbildung. Die lehr-lernbezogenen KI-Anwendungen der verknüpften Einsatzszenarien lassen sich darüber hinaus wie folgt kategorisieren (vgl. Seufert et al., 2020; Zawacki-Richter et al., 2019): Vorhersagemodelle im Kontext von Studienberatung und Profilbildung (bspw. Studienabbruchrate), Mentoring-Systeme (u. a. automatisiertes Feedback, Chatbots etc.), Bewertungssysteme (u. a. Automated Grading), Adaptive Systeme im Kontext einer Individualisierung von Lernpfaden (u. a. das Thema Learning Analytics), Intelligente Tutoren Systeme (ITS) sowie das automatisierte Kuratieren von Lerninhalten. An dieser Stelle wird deutlich, dass der Lehr-Lernraum Labor mit Sicherheit nicht der alleinige Anwendungsraum zur Integration von KI-basierten Technologien bleiben sollte, sondern vielmehr hochschulweite Strategien zum Thema KI notwendig sind. Auch im Hinblick auf die Schwerpunktsetzung der relevanten Konferenzen und Workshopangebote auf internationaler (bspw.: AIED, ACL – BEA-Workshop; SEFI, DELFI, LAK, CLF etc.) und auf nationaler Ebene (bspw. die Themendossiers von HFD, dghd, DINI, die etc.) zeigt sich, dass der Einsatz von KI-Technologie im Kontext der Hochschulbildung kein neues Phänomen beschreibt, sondern die KI-Unterstützung von Lehr-Lernprozessen ein in Wellen wiederkehrendes Thema ist. Im Hinblick auf die technologische Reife insbesondere der kognitiven Assistenzsysteme zeigt sich, dass eine kritische Auseinandersetzung mit den Auswirkungen der Nutzung von KI-basierten Anwendungen im Kontext des Lehren und Lernens zunehmend notwendig erscheint (Apt et al., 2018). Für den Einstieg in eine vertiefte Auseinandersetzung mit den lehr-lernbezogenen Implikationen von KI-Technologie sei hier auf das Whitepaper des KI-Campus zum Thema KI in der Hochschulbildung (De Witt et al., 2020) oder auch auf das Special Issue des International Journal of Educational Technology in Higher Education hingewiesen (Bates et al., 2020).

4.2 Fachwissenschaftliche KI-Labore

Wie zu Beginn dieses Beitrages angeführt, wurden zuletzt vielfältige Förderprogramme zum Thema KI aufgelegt (Breg, 2019). Im Zuge des BMBF-geförderten KI-Schwerpunktprogramms *„Einrichtung von KI-Laboren zur Qualifizierung im Rahmen von Forschungsvorhaben im Gebiet Künstliche Intelligenz“* werden derzeit rund zehn Konzepte für fachbezogene KI-Labore mit dem Ziel gefördert, eine fundierte und laborbezogene Aus- und Weiterbildung zum Thema KI zu ermöglichen. Hierzu soll KI anhand von praktischen Beispielen für Masterstudierende und Industrieanwender*innen erfahrbar gemacht werden. Neben den hier skizzierten Projekten konnten

die folgenden Labore zugeordnet werden: KI-LAB-ITSE, KI-LAB Lübeck, KISS, MetaDL, KI-LiveS, HAISEM-Lab, KI-Lab-EmCo, DISL. Dieser Abschnitt stellt je eine Kurzbeschreibung ausgewählter Konzepte vor, um erste Hinweise auf relevante Anknüpfungspunkte im Kontext ingenieurwissenschaftlicher KI-Labore zu erhalten (DLR 2020):

- Das Projekt **Agile-AI** (Agile Entwicklung von Systemen der Künstlichen Intelligenz) entwickelt neben einer eine formalen Spezifikationssprache für Experimente eine Cloudplattform sowie eine Suchmaschine für KI-Experimente.
- Das Projekt AIA (**AI Arena**) realisiert ein interdisziplinäres Qualifizierungs- und Weiterbildungskonzept für Forschende und Studierende in Bezug auf die kollaborative Weiterentwicklung von Roboter-Schwarmverhalten und Mensch-Technik-Interaktion.
- Das Projekt **AIMEE** (AI-based Monitoring and Experimenting Evaluation) ermöglicht es Lernenden, anhand von Beispielen KI-Methoden mit definierten Datensätzen anzuwenden, die Erfordernisse der KI-Methodenentwicklung zu systematisieren und KI-Anwendungen selbst zu entwickeln.
- Das Projekt **AISEL** (Artificial Intelligence Systems Engineering Laboratory) entwickelt einen Ansatz für die Ausbildung zur KI-System-Ingenieur*in als Praktikumsangebot auf Masterebene unter Einbeziehung von Start-ups und Industriepartnern.
- Das **KI-Lernlabor** strebt den Aufbau eines Weiterbildungszentrums für den Mittelstand an, das in ein bestehendes Data-Science-Zertifizierungsprogramm eingebettet ist.
- Das **KD²Lab** bietet Möglichkeiten zur Analyse des menschlichen Entscheidungsverhaltens auf Basis von Hardware zur Überwachung kognitiver und affektiver Prozesse.

Darüber hinaus lassen sich Anknüpfungspunkte für die Bilanzierung fachwissenschaftlicher Lehr-Lernlabore im Umfeld von Forschungsgruppen feststellen, zu denen beispielsweise folgende gehören: das *Competence Center Machine Learning Rhine-Ruhr* (ML2R) der TU Dortmund, das *Language Technology Lab* der Universität Duisburg Essen, das *Artificial Intelligence and Machine Learning* (AIML) Lab der TU Darmstadt, das *Center for Explainable and Efficient AI Technologies* (CEE AI) der TU Dresden, das *Machine Learning and Data Analytics* (MaD) *Lab* der FAU, das *AI Lab* der Frankfurt School, das *Educational Technology Lab* des DFKI, das *UCL Knowledge Lab* der University of London, das *Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory* (CSAIL) des MIT und das *Artificial Intelligence Laboratory* (SAIL) in Stanford. Darüber hinaus existieren beispielsweise das CLAIRE Research Network, die Society des European Lab for Learning and Intelligent Systems (ELLIS) sowie weitere kommerziell verankerte Lernumgebungen, u. a. Microsoft, Zalando, VW, Bosch, Siemens etc. An dieser Stelle soll keinesfalls der Eindruck einer umfassenden Bilanzierung fachbezogener Lehr-Lernlabore zum Thema KI erweckt werden. Die aufgelisteten Forschungsgruppen, Labore und Netzwerke bieten mit ihren Kursangeboten jedoch fachlich fundierte Umsetzungen und eine erste plausible Evidenz zur Motivation

einer inhaltlichen Ausrichtung etwaiger Lehr-Lernlabore zum Thema KI in den Ingenieurwissenschaften.

4.3 Ingenieurwissenschaftliche Lehr-Lernlabore & KI

Im Hinblick auf die Auswirkungen einer zunehmenden Nutzung von KI-Assistenzsystemen bestätigt sich, dass die Datenanalyse (Data Science) für angehende Ingenieur*innen weiter an Bedeutung gewinnen und sich die Vermischung der Fachdisziplinen (bspw.: Statistik, Informatik, Ingenieurwissenschaften) fortsetzen wird (vgl. Gottburgsen et al., 2019; Gallenkämper et al., 2018). Dies begründet sich u. a. darin, dass KI-Projekte auf eine fachbereichsübergreifende Partizipations- und Entwicklungsarbeit angewiesen sind und KI-basierte Systeme unternehmensweite Querschnittsfunktionen integrieren (Bauer et al., 2019). Deutlich wird in diesem Zusammenhang, dass die technologische Komplexität weiter zugenommen hat. Während eine laborbezogene Auseinandersetzung mit KI zuvor auf Ebene basaler Excel-Automation stattfand, fokussieren heutige Szenarien etwa die Integration maschineller Lernverfahren in der Datenanalyse (vgl. Samarakou et al., 2014; Villages-Ch et al., 2020). Die erst kürzlich identifizierten Potentiale KI-basierter Technologien werden zunehmend schneller im Lehren und Lernen umgesetzt, und angehende Ingenieur*innen werden heute im Rahmen von Projektlaboren mit problem- und praxisorientierten Aufgabenstellungen zur Nutzung von KI-Technologien ermutigt (Pillay, Maharaj & van Eeden, 2018; Tsai et al., 2018). Dass in Bezug auf die labordidaktische und technologische Umsetzungsqualität von Lehr-Lernszenarien bei dem Thema KI eine neue Evolutionsstufe erreicht ist, zeigt sich auch im Rückblick auf das, was vor wenigen Jahren noch als State of the Art handlungsorientierter Laborlehre zu KI verstanden wurde (Kumar & Meeden, 1998). Die Labordidaktik in den Ingenieurwissenschaften wird sich u. a. daran messen lassen müssen, ob es gelingt, Konzeptionen für eine Entwicklung datenbezogener Kompetenzen, das KI-gestützte Kuratieren von Lerninhalten, die Automatisierung der Arbeit und die Verwaltung algorithmischer Vorurteile zu integrieren (Johri, 2020).

In Rückblick auf die Abschnitte 4.1 bis 4.3 lässt sich festhalten, dass insgesamt vielversprechende Perspektiven für die Integration von KI-Technologien im Umfeld ingenieurwissenschaftlicher Lehr-Lernlabore und dem hochschulischen Raum vorliegen. Erste curriculare Analysen und Abfragen des Vorwissens im Rahmen von interdisziplinären KI-Workshops weisen auf eine fehlenden Aktivierung der mathematisch-statistischen Methodengrundlagen hin, die bisweilen nicht anwendungsorientiert mit dem Thema KI in Verbindung gebracht werden können. Ein aktuell denkbares Vehikel zur lehr-lernbezogenen Integration findet sich unter anderem in der interdisziplinären Konzeptions- und Entwicklungsarbeit an KI-basierten Assistenzsystemen, einer ITS-gestützten Individualisierung der Lehr-Lernprozesse sowie in einer Fokussierung auf datenbezogene und metakognitive Kompetenzen (Lensing & Haertel, 2020).

5 Kompetenzen und Perspektiven für KI-Technologie im Lehr-Lernlabor

Dieser Abschnitt trägt die Erkenntnisse der bisherigen Analysen zusammen und benennt relevante Kompetenzen in Hinblick auf das Thema KI (vgl. Frage (2)) sowie Ansatzpunkte und Prämissen für eine Integration von KI-Technologien in ingenieurwissenschaftlichen Lehr-Lernlaboren (vgl. Frage (3)).

Die hochschulischen Lehr-Lernlabore durchlaufen derzeit einen Wandel, der sich beispielsweise in einer zunehmenden Verbreitung von Remote- und Cross-Reality-Laboren zeigt (Terkowsky & May in diesem Band). Dieser steigende Anteil an selbstgesteuerten Lehr-Lernformaten im Kontext der Digitalisierung erfordert Lehr-Lernaktivitäten, die zur Entwicklung metakognitiver Kompetenzen (Leistungsmotivation, Selbstregulation, Reflexion etc.) auffordern. Der themenbezogene Impuls aus dem Feld KI (DL & NLP) lässt sich für die Ingenieurwissenschaften im Wesentlichen als eine Spezifizierung bereits bekannter Kompetenzansprüche formulieren. Bereits in der Ausgestaltung von Angeboten zu den KI-Basistechnologien (IoT, Big Data etc.) wurde deutlich, dass hier – neben den fachlich-methodischen – speziell metakognitive und datenbezogene Kompetenzen bedeutsam sind (vgl. Lensing, 2016; Lensing & Friedhoff, 2018). Darüber hinaus wurden zuletzt die bereits bekannten Kompetenzansprüche erneuert, ohne dass sich hier gänzlich neue Kompetenzfacetten oder -gewichtungen feststellen ließen (vgl. Gallenkämper et al., 2019; Steil & Wrede, 2019; Gottburgsen et al., 2018). Letztlich bleiben, wie etwa am Beispiel der beruflichen Bildung gezeigt werden könnte (Pittich et al., 2019b), einige wenige (Kern-)Entwicklungslinien im Kontext der Digitalisierung übrig, die es zu beachten gilt. Hier sind insbesondere die überfachlichen Kompetenzen, das Thema Wissensarbeit und die Prozessorientierung hervorzuheben (Tenberg & Pittich, 2017). Die anhaltende Bedeutung der Wissens- und Innovationsarbeit im Zusammenhang mit dem Thema KI (Hacker, 2016) sowie die besondere Relevanz datenbezogener Kompetenzen (bspw. Informationskompetenz, Data Literacy, Explainable AI etc.) sind dabei unbestritten. Etwaige Perspektiven einer Algorithmierung der Innovationsarbeit über digitale Assistenzsysteme (Patscha, 2017) erscheinen nur bedingt tragfähig, da der Mensch weiterhin als Entscheidungs- und Bewertungsinstanz auftreten wird (Ganz et al., 2019). Wichtig wird daher eine Integration von Konzepten wie etwa Human-Centric oder auch Explainable AI als eine wesentliche Prämisse für die Akzeptanz KI-basierter Systeme (Niehaus, 2017). Über verschiedene Anwendungsbereiche, Schwerpunkt- und Zielsetzungen KI-basierter Systeme hinweg zeigen sich daher Kompetenzen im Kontext von Komplexitätsbewältigung und Informationsverwertung von besonderer Bedeutung (Lensing, 2021). Letzteres bezieht sich speziell auf die datenbezogenen Kompetenzen im Kontext der Wissens- und Innovationsarbeit (Data Literacy) sowie auf die Möglichkeiten zur (Weiter-)Entwicklung von überfachlichen (metakognitiven) Kompetenzen.

Die Bilanz zum Stand der Implementierung KI-basierter Systeme in hochschulische Lehr-Lernlabore fällt zum aktuellen Zeitpunkt ernüchternd aus (vgl. Frage (1)).

Abseits der fachbezogenen KI-Labore finden sich kaum strategisch verankerte Konzeptionen für eine Integration KI-basierter Technologien in der Hochschulbildung (u. a. Seufert et al., 2020). Der Blick richtet sich somit zunächst auf industrielle Einsatzszenarien mit einem Fokus auf die lernförderliche Gestaltung (Senderek & Geisler, 2015) sowie Ansätze zur partizipativen Entwicklung (Ullrich et al., 2018; Koczy et al., 2020). Die KI-basierten Systeme bieten mit ihren Feedback- und Empfehlungssystemen technologisch reife Lösungen an, um die Komplexität der Informations- und Kommunikationssysteme in ingenieurwissenschaftlichen Laboren zu reduzieren und die Lernenden kognitiv zu entlasten. Im Ergebnis stehen neue zeitliche und kognitive Spielräume für die Reflexion der Prozesse zur Verfügung (u. a. Krüger et al., 2019; Apt et al., 2018).

Vor diesem Hintergrund wird klar, dass die reflexive Auseinandersetzung mit den normativen Einflüssen der zunehmenden Nutzung von KI-basierten Assistenzsysteme unabdingbar erscheint (vgl. Frage (3)). Das gilt für die Lernenden gleichermaßen wie für die Lehrenden, um auch deren Lernprozesse in Hinblick auf die Entwicklung metakognitiver Kompetenzen weiter zu schärfen. Darüber hinaus sollten lehr-lernbezogene Umsetzungen zum Thema KI das Lehren und Lernen mit ebendiesen KI-Technologien begleiten, um sich somit an realen Prozessen zu orientieren und die Lernenden anhand konkreter Einsatzszenarien an die Aufgabenbewältigung im Kontext KI-basierter Assistenzsysteme heranzuführen. In Berücksichtigung der bisherigen Erkenntnisse und unter Heranziehung weiterer Analyseergebnisse kann festgestellt werden, dass insbesondere Kontrolle und Autonomie im Rahmen von Assistenz eine Barrierefunktion darstellen, die Entscheidungsfähigkeit und Flexibilität des Lernenden daher priorisiert werden muss und hierzu Fortschritte in der Verbesserung multimodaler Schnittstellen (NLP) notwendig erscheinen (Lensing, 2021). In den Lehr-Lernlaboren sollten ebendiese Aspekte in Bezug auf die individuelle Informations- und Handlungsautonomie reflektiert werden (Lensing & Haertel, 2020). Die KI-basierten Assistenzsysteme bieten, über eine partizipative Entwicklung von Assistenzfunktionen im Zuge des Lernens und Einübens, Möglichkeiten, Kompetenzentwicklungsprozesse mithilfe adaptiver und tutorieller Assistenzfunktionen zu begleiten. Lernende und Lehrende in den ingenieurwissenschaftlichen Lehr-Lernlaboren sollten daher ermutigt werden, ihr Selbstvertrauen hinsichtlich ihrer lebenslangen Lernfähigkeiten mithilfe KI-gestützter Assistenzsysteme auf- bzw. auszubauen, die Notwendigkeit kompetenzorientierter Weiterbildung in einer komplexen Welt zu begreifen und ihre individuellen Lernpfade mithilfe der entsprechenden Community des Lernens nachhaltig zu dokumentieren (Hadgraft & Kolmos, 2020).

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Beitrags wurden Nutzungsszenarien für eine Integration von KI-Technologien im Umfeld der ingenieurwissenschaftlichen Lehr-Lernlabore vorgestellt. Hierzu wurde auf die Bedeutung der Lehr-Lernlabore im Kontext ingenieur-

wissenschaftlicher Hochschulausbildung, auf die Entwicklungen im Forschungsfeld KI und auf die relevanten Funktionen digitaler Assistenzsysteme eingegangen. Darüber hinaus wurden die Auswirkungen einer zunehmenden Nutzung KI-basierter Technologien und aktuelle Veränderungen der Kompetenzansprüche in den Ingenieurswissenschaften betrachtet. Im Hinblick auf den lehr-lernbezogenen Einsatz von KI-Assistenzsystemen wurde anschließend ein erster wesentlicher Anknüpfungspunkt zur Integration von KI-Technologien identifiziert. Abschließend wurden die Erkenntnisse der bisherigen Analysen in Bezug zueinander gesetzt, um den Einsatz von KI-basierten Assistenzsystemen im Umfeld ingenieurwissenschaftlicher Lehr-Lernlabore als relevante Perspektive für die Integration von KI in der Hochschulbildung herauszustellen, obwohl klar geworden ist, dass KI als wichtige Querschnittstechnologie eine lernortübergreifende Integrationsstrategie notwendig macht.

Abschließend lässt sich feststellen, dass kognitive Assistenzfunktionen im Zusammenspiel mit KI-Technologien eine spannende Perspektive bieten – beispielsweise zur Individualisierung von Lehr-Lernprozessen. Vor diesem Hintergrund formulieren KI-basierte Assistenzsysteme eine technologische Teilantwort auf die qualifikatorischen Herausforderungen im Umfeld der ingenieurwissenschaftlichen Lehr-Lernlabore, indem sie datenbezogene Kompetenzen in prozessorientierter Anwendung adressieren, dazu beitragen Komplexität zu reduzieren und so Freiräume zur Reflexion der eigenen Informations- und Handlungsautonomie schaffen. Darüber hinaus zeigt sich, dass labordidaktisch fundierte Konzeptionen zur Integration von KI nur randständig nachweisbar sind und die Konfrontation mit KI-Technologien für Lehrende und Lernende in den Ingenieurwissenschaften noch immer ein Desiderat darstellt.

Literatur

Abele, D & D'Onofrio, S. (2020). Artificial Intelligence – The Big Picture. In: E. Portmann & S. D'Onofrio (2020). *Cognitive Computing*. Edition Informatik Spektrum. Wiesbaden: Springer Vieweg.

acatech (2020). *Künstliche Intelligenz in der Industrie*. München: acatech: HORIZONTE.

Ahlborn, K.; Bachmann, G.; Biegel, F.; Bienert, J.; Falk, S.; Fay, A.; Gamer, T.; Garrels, K.; Grotepass, J.; Heindl, A.; Heizmann, J.; Hilger, C.; Hoffmann, M.; Hoffmeister, M.; Jochem, M.; Kalhoff, J.; Kamp, M.; Kramer, S.; Kosch, B.; Legat, C.; Michels, J. S.; Mildner, A.; Nettsträter, A.; Pant, R.; Pittschellis, R.; Schauf, T.; Schlinkert, H.-J.; Ulrich, M. & Zinke, G. (2019). *Technologieszenario „Künstliche Intelligenz in der Industrie 4.0“*. Working Paper. Plattform Industrie 4.0. BMWi. Berlin.

Apt, W.; Bovenschulte, M.; Priesack, K.; Weiss, C. & Hartmann, E. (2018). *Einsatz von digitalen Assistenzsystemen im Betrieb*. Forschungsbericht/Bundesministerium für Arbeit und Soziales: Bd. 502. Bundesministerium für Arbeit und Soziales (bmas). Berlin.

Arrieta, A. (2020). Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, Taxonomies, Opportunities and Challenges Toward Responsible AI. *Info: Fusion*, vol. 58, 2020, 82–115.

Asimov, I. (1950). *I, Robot*. Fawcett Publications, Greenwich.

Baker, T.; Smith, L. & Anissa, N. (2019). *Educ-AI-tion Rebooted? Exploring the future of artificial intelligence in schools and colleges. Nesta*. Verfügbar unter https://media.nesta.org.uk/documents/Future_of_AI_and_education_v5_WEB.pdf [01.04.2020].

Bates, T.; Cobo, C.; Mariño, O. & Wheeler, S. (2020). Can artificial intelligence transform higher education? *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 17(1), 61. https://doi.org/10.1186/s41239-020-00218-x.

Bauer, W.; Stowasser, S.; Mütze-Niewöhner, S.; Zanker, C. & Brandl, K. H. (2019). *Arbeit in der digitalisierten Welt: Stand der Forschung und Anwendung im BMBF-Förderschwerpunkt TransWork*. Fraunhofer IAO, Stuttgart.

Bayer, C.; Makhlouf, R. & Metternich, J. (2020). Digitale Assistenzsysteme in der Produktion. *Werkstatttechnik online*: wt (3)110, 103–107.

Bitkom & DFKI (2017). *Entscheidungsunterstützung mit Künstlicher Intelligenz – Wirtschaftliche Bedeutung, gesellschaftliche Herausforderungen, menschliche Verantwortung*. Gipfelpapier. Berlin.

Bundesregierung (BReg) (2019). *Zwischenbericht zur KI-Strategie*. Verfügbar unter https://www.ki-strategie-deutschland.de/home.html?file=files/downloads/Zwischenbericht_KI-Strategie_Final.pdf [04.04.2020].

Couto, J. (2015). *definitive-guide-natural-language-processing*. Verfügbar unter https://monkeylearn.com/blog/definitive-guide-natural-language-processing/, [03.02.2020].

De Witt, C., Rampelt, F., Pinkwart, N. (Hrsg.) (2020). *Künstliche Intelligenz in der Hochschulbildung*. Whitepaper. Berlin: KI-Campus. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.4063722.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) (2020). *Einrichtung von KI-Laboren zur Qualifizierung im Rahmen von Forschungsvorhaben im Gebiet Künstliche Intelligenz*. Verfügbar unter https://www.softwaresysteme.pt-dlr.de/de/ki-labore.php [21.04.2020].

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.

Gallenkämper, J.; Eckert, N.; Heiß, H.-U.; Kreulich, K.; Mooraj, M.; Müller, C.; Müller, G.; Schumann, C.-A.; Sowa, T. & Spiegelberg, G. (2018). *Smart Germany. Ingenieurausbildung für die Digitale Transformation*. Diskussionspapier zum VDI-Qualitätsdialog. VDI, Düsseldorf.

Ganz, W.; Dworschak, B. & Schnalzer, K. (2019). Competences and Competence Development in a Digitalized World of Work. In I Nunes (Hrsg.), *Advances in Human Factors and Systems Interaction*. AHFE 2018. 312–320. Springer, Cham.

Gottburgsen, A.; Wannemacher, K.; Wernz, J. & Willige, J. (2019). *Ingenieurausbildung für die digitale Transformation. Zukunft durch Veränderung*. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.). VDI, Düsseldorf.

Gunning, D. (2017). *Explainable artificial intelligence (XAI).Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)*. Verfügbar unter https://www.darpa.mil/attachments/XAIProgramUpdate.pdf [11.07.2020].

Haase, T.; Termath, W.& Berndt, D. (2019). Integrierte Lern- und Assistenzsysteme für die Produktion. *Industrie 4.0 Management* 32 (3), S. 19–22.

Hacker, W. (2016). *Vernetzte künstliche Intelligenz – Internet der Dinge am deregulierten Arbeitsmarkt: Psychische Arbeitsanforderungen*. Projektberichte/Technische Universität Dresden, Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften, Fachrichtung Psychologie, Institut für Psychologie I, Arbeitsgruppe „Wissen - Denken – Handeln“: Heft 89/9. Technische Universität Dresden, S. 4–21.

Hatiboglu, B.; Schuler, S.; Bildstein, A. & Hämmerle, M. (2019). *Einsatzfelder von künstlicher Intelligenz im Produktionsumfeld. Kurzstudie im Rahmen von 100 Orte für Industrie 4.0 in Baden-Württemberg*. Fraunhofer IOA und IPA. Stuttgart. Verfügbar unter http://publica.fraunhofer.de/documents/N-549107.html [12.04.2020].

Hochrangige Expertengruppe für künstliche Intelligenz (HEG-KI) (2019). *Ethik-Leitlinien für eine vertrauenswürdige KI*. Europäische Kommission. Verfügbar unter https://ec.europa.eu/newsroom/dae/document.cfm?doc_id=60425 [06.05.2020].

Heidling, E.; Meil, P.; Neumer, J.; Porschen-Hueck, S.; Schmierl, K.; Sopp, P. & Wagner, A. (2019). *Ingenieurinnen und Ingenieure für Industrie 4.0. VDMA: Hochschulen stehen vor gewaltigem Change-Prozess*. IMPULS-Stiftung, Frankfurt am Main.

Holmes, W.; Bialik, M. & Fadel, C. (2019). *Artificial intelligence in education: Promises and implications for teaching and learning*. Center for Curriculum Redesign, Bosten.

Johri, A. (2020). Artificial intelligence and engineering education. *Journal of Engineering Education,* 109(3), 358–361. https://doi.org/10.1002/jee.20326.

Keller, B.; Baleis, J.; Starke, C. & Marcinkowski, F. (2019a). *Machine Learning and Artificial Intelligence in Higher Education: A State-of-the-Art Report on the German University Landscape*. In Working Paper Series: Fairness in Artificial Intelligence Reasoning, Düsseldorf.

Keller, T.; Bayer, C.; Metternich, J.; Schmidt, S.; Saki, M.; Straeter, O.; Hartwich, H. D. & Anlauft, W. (2019b). *Evaluationskonzept zur Nutzenbewertung digitaler Assistenzsysteme am Montagearbeitsplatz*. In: GfA Frühjahrskongress 2019, Dresden – Arbeit interdisziplinär analysieren – bewerten – gestalten, GfA, Dortmund (Hrsg.). Beitrag: C.9.5.

Kirste, M. (2019). Augmented Intelligence – Wie Menschen mit KI zusammen arbeiten. In V. Wittpahl (Hrsg.), *Künstliche Intelligenz*. 58–71. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.

Kirste, M. & Schürholz, M. (2019). Einleitung: Entwicklungswege zur KI. In V. Wittpahl (Hrsg.), *Künstliche Intelligenz*. 21–35. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.

Klapper, J.; Gelec, E.; Pokorni, B.; Hämmerle, M. & Rothenberger, R. (2019). *Potenziale digitaler Assistenzsysteme – Aktueller und zukünftiger Einsatz digitaler Assistenzsysteme in produzierenden Unternehmen*. Stuttgart: Fraunhofer IAO.

Koczy, A.; Stahn, C. & Hartmann, V. (2020). Untersuchung der Veränderung von Kompetenzanforderungen durch Assistenzsysteme im Projekt AWA. In: GfA (Hrsg.), *Digitale Arbeit, digitaler Wandel, digitaler Mensch? Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft März 2020.*, GfA-Press, Dortmund, Beitrag A.15.3.

Krüger, J.; Fleischer, J.; Franke, J. & Groche, P. (2019). *KI in der Produktion – Künstliche Intelligenz erschließen für Unternehmen*. Standpunktepapier. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktion. Hannover.

Kumar, D. & Meeden, L. (1998). A robot laboratory for teaching artificial intelligence. *ACM SIGCSE Bulletin,* 30(1), 341–344. https://doi.org/10.1145/274790.274326.

LeCun, Y.; Bengio, Y. & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature,* 521 (7553), S. 436–444. https://doi.org/10.1038/nature14539.

Lensing (2016). *Entwicklung eines kompetenzorientierten Lehr-Lernszenarios zur Digitalen Fabrik*. Masterarbeit. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30187.49446.

Lensing (2021). Zum Einsatz KI-basierter Assistenzsysteme in der Industrie 4.0: Eine Bewertung aktueller Einsatzszenarien aus technikdidaktischer Perspektive. In B. Vogel-Heuser; T. Bauernhansl & M. ten Hompel (Hrsg.), *Handbuch Industrie 4.0, Bd. 4.* Springer Reference Technik. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (in Review).

Lensing, K.; Haertel, T. (2020). How AI in Engineering Education can Help to Foster Data Literacy and Motivation. In: *Proceedings of Society for Engineering Education (SEFI) Annual Conference 2020.* Enschede, Niederlande.

Lensing, K. & Friedhoff, J. (2018). Designing a curriculum for the Internet-of-Things-Laboratory to foster creativity and a maker mindset within varying target groups. *Procedia Manufacturing*, 23, 231–236. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.022.

Lensing, K.; Schwuchow, B.; Oehlandt, S. & Haertel, T. (2018). *How Makerspaces Help to Participate in Technology: Results of a Survey to Gain Data about Learners' Activities in Makerspaces*. In 2018 World Engineering Education Forum – Global Engineering Deans Council (WEEF-GEDC) (S. 1–5). IEEE. https://doi.org/10.1109/WEEF-GEDC.2018.8629611.

Lindner, A. & Romeike, R. (2019). Teachers' Perspectives on Artificial Intelligence. In E. Jasutė & S, Pozdniakov (Hrsg.), ISSEP 2019–12th International conference on informatics in schools: Situation, evaluation and perspectives, Local Proceedings, 22–29. Larnaca, CY.

Link, M. & Hamann, K. (2019). Einsatz digitaler Assistenzsysteme in der Produktion. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF),* 114 (10). 683–687.

Maedche, A.; Legner, C.; Benlian, A.; Berger, B.; Gimpel, H.; Hess, T.; Hinz, O.; Morana, S. & Söllner, M. (2019). AI-Based Digital Assistants. *Business & Information Systems Engineering,* 61(4), 535–544. https://doi.org/10.1007/s12599-019-00600-8.

Mah, D.-K. & Büching, C. (2019). *Künstliche Intelligenz in Studium und Lehre – Überblickstudie zu Professuren und Studiengängen der Künstlichen Intelligenz in Deutschland*. VDI/VDE. Berlin.

Maschler, B.; White, D. & Weyrich, M. (2020). *Anwendungsfälle und Methoden der künstlichen Intelligenz in der anwendungsorientierten Forschung im Kontext von Industrie 4.0.* Verfügbar unter https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23768.65289 [01.04.2020].

McCorduck, P. (1979). *Machines Who Think*. Freeman. New York.

Niehaus, J. (2017). *Mobile Assistenzsysteme für Industrie 4.0: Gestaltungsoptionen zwischen Autonomie und Kontrolle*. FGW-Studie Digitalisierung von Arbeit: Bd. 04. Forschungsinstitut für gesellschaftliche Weiterentwicklung (FGW). Düsseldorf.

Patscha, C.; Glockner, H.; Störmer, E. & Klaffke, T. (2017). *Kompetenz- und Qualifizierungsbedarfe bis 2030: Ein gemeinsames Lagebild der Partnerschaft für Fachkräfte. Bundesministerium für Arbeit und Soziales (bmas). Berlin.*

Pillay, N.; Maharaj, B. T. & van Eeden, G. (2018). *AI in Engineering and Computer Science Education in Preparation for the 4th Industrial Revolution: A South African Perspective.* In 2018 World Engineering Education Forum – Global Engineering Deans Council (WEEF-GEDC) (S. 1–5). IEEE. https://doi.org/10.1109/WEEF-GEDC.2018.8629703.

Pittich, D.; Tenberg, R. & Lensing, K. (2019a). Learning factories for complex competence acquisition. *European Journal of Engineering Education*, 45 (2), 196–213. https://doi.org/10.1080/03043797.2019.1567691.

Pittich, D.; Tenberg, R. & Lensing, K. (2019b) Technikdidaktische Herausforderungen im Übergang zu Industrie 4.0. In T. Haertel; C. Terkowsky, S. Dany & S. Heix (Hrsg.), *Hochschullehre und Industrie 4.0. Herausforderungen – Lösungen – Perspektiven* (S. 167–182). Bielefeld: wbv.

Plattform Lernende Systeme (PLS) (2019). *Arbeit, Qualifizierung und Mensch-Maschine-Interaktion: Ansätze zur Gestaltung Künstlicher Intelligenz für die Arbeitswelt*. Whitepaper der AG2. München.

Rammer, C.; Bertschek, I.; Schuck, B.; Demary, V. & Goecke, H. (2019). *Einsatz von Künstlicher Intelligenz in der Deutschen Wirtschaft – Stand der KI-Nutzung im Jahr 2019.* BMWi (Hrsg.). Mannheim.

Russell, S. J. & Norvig, P. (2009). *Artificial intelligence: a modern approach* (3. Aufl.). Prentice Hall: Englewood Cliffs.

Rzepka, C. & Berger, B. (2018). User Interaction with AI-enabled Systems: A Systematic Review of IS Research. In *Proceedings of the 39th International Conference on Information Systems* (ICIS 2018), San Francisco (USA).

Samarakou, M.; Fylladitakis, E. D.; Prentakis, P. & Athineos, S. (2014). *Implementation of artificial intelligence assessment in engineering laboratory education*. Int. Conf. E-Learn. (2014), S. 299–303.

Schmidhuber, J. (2015). Deep learning in neural networks: An overview. *Neural Networks*, 61, 85–117. https://doi.org/10.1016/j.neunet.2014.09.003.

Schmidhuber, J. (2019). Vorwort „Die Intelligenz der Maschinen". In M. Ford (2019). *The Intelligence of Machines*. Bonn: MITP.

Schuh, G. & Scholz, P. (2019). *Development of a Framework for the Systematic Identification of AI Application Patterns in the Manufacturing Industry.* In 2019 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET), Portland, OR, USA.

Schüller, K.; Busch, P. & Hindinger, C. (2019). *Future Skills: Ein Framework für Data Literacy.* Hochschulforum Digitalisierung (Arbeitspapier 47/2019). Berlin.

Seifert, I.; Bürger, M.; Wangler, L.; Christmann-Budian, S.; Rohde, M.; Gabriel, P. & Zinke, G. (2018). *Potenziale der Künstlichen Intelligenz im produzierenden Gewerbe in Deutschland. Eine Studie im Auftrag des BMWi im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm PAiCE*. Berlin.

Senderek, R. & Geisler, K. (2015). Assistenzsysteme zur Lernunterstützung in der Industrie 4.0. In Rathmayer, S. & Pongratz, H. *Proceedings der Pre-Conference Workshops der 13. E-Learning Fachtagung Informatik* (S. 36–46). München.

Seufert, S.; Guggemos, J. & Sonderegger, S. (2020). Digitale Transformation der Hochschullehre: Augmentationsstrategien für den Einsatz von Data Analytics und Künstlicher Intelligenz. *Zeitschrift für Hochschulentwicklung* (ZFHE). 15 (1). 81–101.

Steil, J. & Wrede, S. (2019). Maschinelles Lernen und lernende Assistenzsysteme. In: BWP (3/2019) Digitalisierung und künstliche Intelligenz. 48(3). Verfügbar unter https://www.bwp-zeitschrift.de/en/bwp.php/de/publication/download/10011 [28.03.2020].

Stone, P.; Brooks, R.; Brynjolfsson, E.; Calo, R.; Etzioni, O.; Hager, G.; Hirschberg, J.; Kalyanakrishnan, S.; Kamar, E.; Kraus, S.; Leyton-Brown, K.; Parkes, D.; Press, W.; Saxenian, A. L.; Shah, J.; Tambe, M. & Teller, A. (2016). *Artificial Intelligence and Life in 2030. One Hundred Year Study on Artificial Intelligence*: Report of the 2015–2016 Study Panel, Stanford University.

Tekkaya, A. E.; Terkowsky, C.; Radtke, M.; Wilkesmann, U.; Pleul, C. & Maevus, F. (Hrsg.). (2016). *Acatech Studie. Das Labor in der ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung: Zukunftsorientierte Ansätze aus dem Projekt IngLab*. Herbert Utz Verlag GmbH.

Tenberg, R. & Pittich, D. (2017). Ausbildung 4.0 oder 1.2? Analyse eines technisch-betrieblichen Wandels und dessen Implikationen für die technische Berufsausbildung. *Journal of Technical Education (JOTED)*, 5(1), 27–46.

Tsai, Y.-T.; Wang, C.-C.; Peng, H.-S.; Huang, J. H. & Tsai, C.-P. (2018). Construction of Artificial Intelligence Mechanical Laboratory with Engineering Education Based on CDIO Teaching Strategies. In T.-T. Wu; Y.-M. Huang; R. Shadiev; L. Lin & A. I. Starčič (Hrsg.), *Lecture Notes in Computer Science. Innovative Technologies and Learning* (Bd. 11003, S. 81–87). Springer International Publishing, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99737-7_8.

Turing, A. M. (1936). *On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem*. Proceedings of the London Mathematical Society, Series 2, 41, S. 230–267.

Ullrich, C.; Hauser-Ditz, A.; Kreggenfeld, N.; Prinz, C. & Igel, C. (2018). Assistenz und Wissensvermittlung am Beispiel von Montage- und Instandhaltungstätigkeiten. In S. Wischmann & E. A. Hartmann (Hrsg.), *Zukunft der Arbeit – Eine praxisnahe Betrachtung* (S. 107–122). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-49266-6_8.

Villegas-Ch, W.; Román-Cañizares, M. & Palacios-Pacheco, X. (2020). Improvement of an Online Education Model with the Integration of Machine Learning and Data Analysis in an LMS. *Applied Sciences*, 10(15), 5371. https://doi.org/10.3390/app10155371.

Wahlster, W. (2019). Künstliche Intelligenz: Digitales Verstehen. *Naturwissenschaftliche Rundschau*, 72. Jg., Heft 9/10, 451–459.

Wahlster, W. (2016). *Die Speerspitze der Digitalisierung – Künstliche Intelligenz und ihre Entwicklung*. Verfügbar unter http://www.wolfgang-wahlster.de/wordpress/wp-content/uploads/20160923_Character_Bethmann_KI_Entwicklung.pdf [06.03.2020].

Zawacki-Richter, O.; Marín, V. I.; Bond, M. & Gouverneur, F. (2019). Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education – where are the educators? *Int J Educ Technol High Educ 39*(16), https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 KI-Entwicklungsphasen 267

Abb. 2 Funktionen Digitaler Assistenzsysteme 269

Ausblick: Welche Rolle spielen Online-Labore für die Zukunft der Laborlehre?

*Antworten einer internationalen Expert*innenbefragung zur fortschreitenden Digitalisierung des Lehrens und Lernens in und mit Laboren*

Dominik May, Claudius Terkowsky, Gustavo R. Alves, Michael E. Auer, Kalyan Ram Bhimavaram, Manuel Castro, Alexander A. Kist, Pablo Orduña, Valerie Varney

Abstract

Für den Abschluss des vorliegenden Sammelbandes „Labore in der Hochschullehre" wurden sieben einschlägige internationale Expert*innen zu ihren Erfahrungen und Visionen in Bezug auf die Zukunft des Lehrens und Lernens im Labor befragt. In diesem Beitrag kommen sie und ihre persönliche Perspektive weitgehend ungefiltert zu Wort. Daher stellen ihre konkreten Antworten den Kern des vorliegenden Kapitels dar. Ein besonderer Fokus der Befragung lag auf dem Lehren und Lernen mit Online-Laboren. In der Rückschau auf in vielen Jahren gesammelte Erfahrungen zeigt sich, dass der Aufbau und Betrieb von Online-Laboren – sei es im Remoteformat oder virtuell – eine fachlich komplexe und kostenintensive Herausforderung darstellt. Insbesondere darin wird von den Expert*innen einer der Hauptgründe für die bis dato mangelnde Verbreitung entsprechender Lösungen in der Lehre gesehen. Es wird jedoch auch deutlich, dass – nicht nur in Zeiten der aktuellen Krise durch COVID-19 – eine zunehmende Nachfrage nach Online-Laboren besteht und sich damit auch ein entsprechender Markt entwickelt. Zwar belegen einzelne Studien, dass die Nutzenden von Online-Laboren zunächst eine beträchtliche Eingewöhnungszeit benötigen, danach jedoch gute Lernergebnisse erreichen. Für die Zukunft von Online-Laboren kommt es nach Auffassung der Expert*innen vor allem darauf an, einen zielführenden Mix aus Vor-Ort-Laboren und Online-Laboren anzubieten, um die Vorteile beider Welten zu kombinieren. Für einen zuverlässigen Regelbetrieb bedarf es neben einer fundierten didaktischen Weiterbildung der Lehrenden und einer entsprechenden labordidaktischen Begleitforschung zur ständigen Optimierung des Lehrens und Lernens insbesondere technologischer Weiterentwicklungen und nachhaltiger Finanzierungs- bzw. Fördermodelle.

Schlüsselwörter: Laborlehre, Online-Labore, Hybride Laborlehre, Cross-Reality-Labore, Expert*innenbefragung

1 Zielsetzung dieses Kapitels

Dieses Kapitel bildet den Abschluss des vorliegenden Sammelbandes und verfolgt mehrere Ansätze: Einerseits blicken Expert*innen aus ihrer jeweiligen internationalen Perspektive zurück auf die letzten Jahrzehnte der Entwicklung von Lehren und Lernen im Labor und unterziehen auf Basis eigener Erfahrungen die Entwicklung des Labors als Lehr-Lernort einer kritischen Betrachtung. Andererseits blicken sie aber auch nach vorn, um Einschätzungen bezüglich künftiger Entwicklungen abzugeben. Auf dieser Basis wiederum lassen sich technische, didaktische und organisatorische Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Implementierung von Online-Laboren ableiten. Ziel des Kapitels ist es, einen inhaltlichen Abschluss für den vorliegenden Sammelband und zugleich einen Anstoß zu weiterem Nachdenken zu bieten. Daher kommen die Expert*innen hier weitgehend unkommentiert zu Wort, um die Lesenden dazu anzuregen, sich auf Grundlage ihrer Aussagen und der weiteren Kapitel dieses Bandes ein eigenes Bild zu machen. Eine kurze inhaltliche Einordnung und Zusammenfassung sei der weiteren Beschreibung des methodischen Vorgehens und den Expert*innenaussagen hier dennoch vorangestellt.

Da das Labor als Lehr-Lernort aufgrund seiner historischen Entwicklung und seiner vielschichtigen didaktischen, technischen und organisatorischen Erscheinungsformen zu komplex ist, um alle seine bisherigen und zukünftigen Entwicklungslinien in einem einzigen Kapitel zu beleuchten, haben wir uns an dieser Stelle für eine Fokussierung entschieden: Wir werfen einen zukunftsorientierten Blick ausschließlich auf online basierte Lehr-Lernlabore, also die Online-Labore. Ihnen ist gemein, dass sie alle auf die eine oder andere Art und Weise auf Onlinetechnologien zur Durchführung von Versuchen basieren, sei es auf Basis teleoperativer Nutzungsformen wie bei den Remote-Laboren oder von Virtual-Reality-Ansätzen wie bei den virtuellen Laboren (siehe hierzu auch den ersten Beitrag dieses Bandes: „Forschendes Lernen im Labor: Labordidaktische Ansätze zwischen Hands-on und Cross-Reality“).

Schon der Rückblick auf die Texte dieses Sammelbandes zeigt, dass die Entwicklung und vor allem der Regelbetrieb von Online-Laboren eine fachlich komplexe, multidisziplinäre und kostenintensive Aufgabe ist. So sehen es auch die befragten Expert*innen. Es zeigt sich, dass sich ein Bedarf und ein entsprechender Markt langsam, aber stetig entwickeln. Diese Entwicklungen deuteten sich bereits in den letzten Jahren im Zuge der allgemeinen Digitalisierung der Lehre an, wurde jedoch durch die Herausforderungen im Kontext der COVID-19-Pandemie verstärkt. Zwar belegen einzelne Studien, dass Online-Labore sowohl Lehrende als auch Lernende vor technische und methodische Herausforderungen stellen, nach einer Eingewöhnungszeit jedoch gute Ergebnisse in Bezug auf die Erreichung von Lehr-Lernzielen erreicht werden. Die Zukunft des Lehrens und Lernens im Labor besteht darüber hinaus nicht in einem Entweder-oder – also entweder hands-on im realen Labor oder virtuell im Online-Labor. Die Expert*innen sind vielmehr der Meinung, dass sich je nach didaktischer Zielsetzung Mischformen, d. h. unterschiedliche

Cross-Reality-Formate, auch hybride Laborformate genannt, durchsetzen werden. Sie integrieren die physische und virtuelle Realität von Laboren in vernetzte, simulierende, immersive, erweiterte oder gemischte Umgebungen. In diesen Cross-Reality-Laborformaten werden die Vorteile beider Welten in unterschiedlich komplexen Lehr-Lernszenarien kombiniert. Studierende können sich etwa in realen Laboren durch einführende Aufgabenstellungen zunächst mit dem Equipment vertraut machen, es physisch erleben und erfahren, um anschließend mithilfe des Remote-Labors online von überall aus und zu jeder Zeit vertiefend Aufgabenstellungen zu lösen. Sie können aber auch mit der Simulation eines Laborversuchs erst die Theorie und konkrete Arbeitsschritte einüben, um anschließend mit dem realen Equipment hands-on weiterzuarbeiten und dabei bereits auf Vorerfahrungen aus dem Online-Labor zurückzugreifen. Cross-Reality-Laborformate werden zudem in einer Shared Economy von unterschiedlichen Institutionen geteilt, genutzt und vermarktet. Bildungsanbieter, die ohne solche Angebote über keine Laborkapazität verfügen würden, können so entsprechende Angebote für ihre Studierenden aufbauen.

2 Methodisches Vorgehen

Bei unserem Blick in die Vergangenheit und Zukunft von Online-Laboren war es uns ein Anliegen, eine möglichst breite, internationale Perspektive einzunehmen. Hierzu haben wir sieben international ausgewiesene Expert*innen der weltweiten Forschungscommunity ausgewählt und für ihre Mitwirkung an Expert*inneninterviews eingeladen. Bei der Auswahl wurde neben Internationalität und Diversität vor allem auf eine ausgewiesene Expertise im betrachteten Forschungsbereich geachtet, dokumentiert durch entsprechende Publikationen. Dementsprechend an diesem Beitrag mitgewirkt haben (in alphabetischer Reihenfolge):

- *Gustavo Ribeiro Alves,* Professor am Polytechnic of Porto in Portugal, Präsident der Portugiese Society of Engineering Education (SPEE) und Leiter der internationalen Forschungsgruppe VISIR Federation,
- *Michael E. Auer,* CEO der International Association of Online Engineering (IAOE) und ehemaliger Präsident der International Federation of Engineering Education Societies (IFEES),
- *Kalyan Ram Bhimavaram,* Präsident der International Association of Online Engineering (IAOE) und CEO von Electrono Solutions Pvt Ltd.,
- *Manuel Castro,* Professor an der National Distance Education University (UNED) in Spanien und ehemaliger Präsident der Education Society des Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE),
- *Alexander A. Kist,* Associate Professor, Associate Head (Learning, Teaching and Student Success) und Academic Board Member an der School of Mechanical and Electrical Engineering der University of Southern Queensland in Australien,

- *Pablo Orduña,* Mitgründer und CEO von LabsLand, einem der weltweit ersten kommerziellen Unternehmen zur Entwicklung und zum Vertrieb von Remote Labs und ausgezeichnet als Top-Ten-Innovator in Spanien durch das MIT Technology Review sowie
- *Valerie Varney,* Forscherin am Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (IPK) der Technischen Hochschule Köln und ehemalige Leiterin der Forschungsgruppe „Digital Learning Environments" am Cybernetics Lab IMA & IfU der RWTH Aachen.

In der Folge haben wir die Expert*innen per E-Mail gebeten, uns schriftlich vier Leitfragen zu beantworten. Sie werden in den jeweiligen Abschnitten im Detail genannt. Im Kern drehen sie sich um die Geschichte von Online-Laboren, damit verbundene Forschungsergebnisse und einen Zukunftsausblick. Die schriftlichen Antworten wurden für den vorliegenden Beitrag gesichtet, übersetzt, redaktionell gekürzt und inhaltlich in einen Zusammenhang gebracht.

Anstelle einer paraphrasierenden, kategorienbildenden und interpretativen Textanalyse haben wir die Antworten in der Form der wörtlichen Rede gelassen. Als Ergebnis dieses Vorgehens ist ein gemeinsam verfasster Text nach Art einer E-Mail-basierten moderierten Podiumsdiskussion entstanden. Wir haben dieses Vorgehen anstelle einer methodisch geleiteten Inhaltsanalyse gewählt, weil wir als Abschluss des Sammelbandes die Expert*innen quasi live und in Wechselrede zu Wort kommen lassen wollten, um ihren unterschiedlichen Perspektiven und Positionen Raum zu bieten. Sie als Leser*in sind an dieser Stelle daher von einer eigenen Meinungs- und Positionsbildung auf Basis des Gelesenen keineswegs entbunden, sondern ausdrücklich dazu aufgefordert. Daher nun viel Vergnügen bei der folgenden Lektüre!

3 Online-Labore und ihre Entwicklung in den letzten Jahrzehnten

Frage 1: Online-Labore und Versuche existieren als Konzept seit mittlerweile rund dreißig Jahren. Es scheint jedoch, dass sie noch immer eine Art Nischenprodukt für eine relativ kleine Community sind. Der Ausbau von Online-Laboren hat nicht mit der Entwicklungsgeschwindigkeit von Onlinelehre als Ganzes Schritt gehalten. Mit Blick auf die vergangenen drei Jahrzehnte: Was sind Ihrer Meinung nach die Gründe für diese Entwicklung? Wie erklären Sie diese?

M. Castro: Entwicklung und Ausstattung von Remote-Laboren sind kostspielige Angelegenheiten und erfordern ein fundiertes Fachwissen zu Hardware und Software sowie spezifische Kenntnisse zu den fachwissenschaftlichen Themenbereichen, die im Labor behandelt werden sollen. Zudem muss das Labor zuverlässig laufen und wartungsarm sein, um in einem 24-Stunden-365-Tage-Modus eingesetzt werden zu

können. Das war in den letzten Jahrzehnten die größte Herausforderung für Online-Labore.

V. Varney: Das kann ich leider bestätigen. Leider haben es Online-Labore bislang nicht geschafft, so verbreitet und zugleich so sichtbar zu werden wie andere Online-Lehrformate. Es kann sein, dass es am vermeintlich höheren Aufwand liegt, den man betreiben muss, um die formulierten Lernziele adressieren zu können. Gleichzeitig ist es je nach Disziplin auch ein wenig schwierig – eine Dozentin aus der Chemie sagte mir einmal: „Meine Studierenden müssen riechen, wenn etwas schiefgeht. Das kann kein Online-Labor leisten." Tatsächlich, so weit sind wir leider noch nicht – beziehungsweise vielleicht muss man akzeptieren, dass Online-Labore nicht in jedem Kontext Sinn ergeben. Dennoch gibt es zahlreiche Anwendungsfälle, bei denen Online-Labore ein echter Gewinn sind – zur Visualisierung von Industrie 4.0 in der Produktion etwa kann ich mir kaum ein besseres Format vorstellen. Trotzdem wird es immer noch zu selten genutzt. Hier bedarf es mehr interdisziplinärer Schnittstellen, mehr Kommunikation zwischen den Disziplinen und mehr Selbstbewusstsein, Dinge auszuprobieren, die sich vielleicht auch erst einmal negativ auf die Evaluation der Lehre auswirken können.

G. Alves: Meiner Meinung nach gibt es zwei Hauptursachen: Verbreitung und Kosten, die in einem Wort zusammengefasst werden können: *Impact*. Mit Verbreitung meine ich, dass Online-Labore nur für eine bestimmte Gruppe in der Hochschule nützlich sind: Diejenigen, die mit der Lehre in den MINT-Fächern befasst sind. Onlinelehre als Ganzes betrachtet richtet sich hingegen prinzipiell an alle Bildungsbereiche, von den Geistes- bis hin zu den Sozialwissenschaften. Was die Kosten betrifft, so möchte ich die Investitionen hervorheben, die getätigt werden müssen, um alle bestehenden MINT-Labore innerhalb einer traditionell ausgerichteten Hochschule per Fernzugriff zugänglich zu machen. Es ist sicherlich diskutierbar, ob *alle* Labore an jeder Hochschule aus der Ferne zugänglich sein müssen, da auch andere Lösungen in Betracht gezogen werden können – wie z. B. die von dem Unternehmen LabsLand vorgestellten Lösungen. Mit diesen Lösungen meine ich unter anderem das Prosumer-Konzept, bei dem eine Institution ein Remote-Labor für andere Hochschulen zur Verfügung stellt und im Gegenzug auch die Remote Labore der anderen Hochschulen nutzt. Der Kernpunkt ist hier, dass nicht nur mit der Einrichtung, sondern auch mit der Instandhaltung von Online-Laboren beträchtliche Kosten verbunden sind, die im Prosumer-Konzept aufgeteilt werden können. Das führt mich wieder zurück zu Impact. Im Zusammenhang mit Online-Laboren und den damit verbundenen Kosten muss eine Universitätsleitung zwischen der vergleichsweise kleinen Gruppe an Nutzenden, die von Online-Laboren profitieren, und den vergleichsweise hohen Kosten, welche Online Labore sowohl im Aufbau als auch während des Betriebes für die Gesamtheit der akademischen Community verursachen, abwägen – dies alles unter der Berücksichtigung, dass Online-Labore traditionelle Präsenzlabore nicht vollständig ersetzen, sondern vielmehr ergänzen sollen.

P. Orduña: Remote-Labore sind Versuchsaufbauten, die für die Entwicklung, den Ausbau und den Betrieb ein multidisziplinäres Team mit Kernkompetenzen in verschiedenen Bereichen wie z. B. Didaktik, Labortechnik, Hardwareautomatisierung und Softwareentwicklung erfordern. Jede dieser Kompetenzen ist essenziell. Eine davon nicht einzubinden birgt die Gefahr, ein Labor aufzubauen, das am Ende scheitern wird – so oder so. Um mit einem bestehenden Labor ein größeres Publikum zu erreichen, sind weitere Kompetenzen erforderlich. Für den reinen Aufbau eines Labors sind diese jedoch zunächst nicht entscheidend und man kann auch ohne sie ein nützliches und didaktisch wirksames Labor erstellen. Fehlen jedoch bereits die oben genannten Kernkompetenzen entwickelt man ein Labor, das mehr oder weniger häufig ausfällt, nicht skalierbar ist (ohne die entsprechenden Kompetenzen in den Bereichen Hard- und Softwareentwicklung) oder didaktisch nicht wirksam ist (ohne didaktische und labortechnische Kompetenzen). Darüber hinaus wecken Remote-Labore sehr hohe, manchmal unrealistische Erwartungen. Sie suggerieren, dass man sie 24 Stunden am Tag nutzen kann. Allerdings sind sie oft nur sehr schwierig zu warten und zu skalieren. Die dafür notwendigen Ressourcen und Herangehensweisen werden bei der Planung und Umsetzung oft nicht mitgedacht. Es kommt deshalb häufig vor, dass die Reparatur eines Labors aufgrund größerer Hardwareprobleme Wochen oder sogar Monate in Anspruch nehmen kann, was für jeden, der versucht, mit diesem Labor zu lehren, nicht akzeptabel ist. Nur sehr wenige Initiativen legen bisher den Schwerpunkt darauf, sicherzustellen, dass alle Remote-Labore, die den Nutzer*innen angeboten werden sollen, mit der gleichen Konfiguration und vorzugsweise an mehr als einem Standort dupliziert werden müssen. Aus diesem Grund können Projekte zu Remote-Laboren erfolgreicher verlaufen, wenn sie, anstelle eigene Remote-Labore zu entwickeln, sich entweder der Entwicklung von Softwarelösungen für Remote-Labore widmen (wie dies zum Beispiel bei den Remote Labor Management Systemen iLab oder WebLab-Deusto der Fall ist) oder mit der Duplikation bereits bestehender Systeme befassen (wie dies insbesondere bei VISIR geschieht).

K. Bhimavaram: Neben technischen Überlegungen spielen auch andere Faktoren wie Vertrauen und Sicherheit eine große Rolle und gehen Hand in Hand mit technischen Herausforderungen. Zum Beispiel kann es Zweifel an der Authentizität der Ergebnisse geben, wenn Nutzer*innen ihren Mentor*innen, Prüfer*innen oder Kund*innen etwas präsentieren wollen, da verschiedenste Technologien zur Manipulation von Onlineinhalten existieren. Daher ist es erforderlich, Transparenz und Glaubwürdigkeit für Online-Labore sicherzustellen. Da die Anbindung an das Internet mehrere Onlinesicherheitsrisiken mit sich bringt, ist es wichtig, eine angemessene Infrastruktur für Cybersicherheit zu gewährleisten, die mit dem entsprechenden Fachpersonal ausgestattet ist und wiederum Kosten verursacht.

A. Kist: Online-Labore bieten für Studierende großartige Möglichkeiten, praktische Fertigkeiten zu entwickeln, ihre Vorstellungen über die Natur zu hinterfragen und

ihnen den Umgang mit Hardware zu ermöglichen. Zu den Hindernissen, die einer breiten Einführung im Wege stehen, gehört jedoch, dass Schulen und Hochschulen traditionell konservativ ausgerichtet sind, die Unterhaltung von Online-Laboren kostspielig ist und die Gestaltung praktischer Onlineaktivitäten eine bewusstere pädagogisch-didaktische Herangehensweise erfordert. Praktische Online-Lernaktivitäten benötigen eine sorgfältige Berücksichtigung pädagogisch-didaktischer Faktoren, und Lernaufgaben müssen *wirklich* gewissenhaft konzipiert und angemessen unterstützt werden, um von Wert zu sein. Dies gilt natürlich ebenso für die Präsenzlehre, doch oft wird dort der Mangel an pädagogisch-didaktischen Vorüberlegungen durch qualifizierte, enthusiastische Lehrende ausgeglichen. Das ist nicht möglich, wenn Studierende während ihres Studiums von zu Hause aus Remote-Labore für Laborübungen nutzen. Remote-Labore für die Lehre stellen daher komplexe Herausforderungen an die eingebundene Informations- und Kommunikationstechnologie dar. Dabei müssen Cybersicherheit, Netzwerke, Infrastruktur und Betriebssysteme berücksichtigt werden. Diese werden oft zentral verwaltet und haben Auswirkungen auf das Budget. Viele der erfolgreichsten Online-Labore werden von Lehrenden vorangetrieben, die diese selbst entwickeln und nutzen – oft außerhalb der zentral bereitgestellten IT-Systeme der Hochschule. Schließlich ist es auch schwierig, kontinuierliche (finanzielle) Unterstützung zu finden. Initiativen werden oft durch zeitlich begrenzte Projekte finanziert. Laufende Unterstützung ist dagegen viel schwieriger zu finden. Normalerweise wären für Betrieb und Wartung der Systeme entsprechende Mittel erforderlich. Ein ähnlicher Betrag wird nochmal für die methodisch-didaktische Entwicklung der Lernaktivitäten rund um das Experiment benötigt. Dies impliziert ein 1 + 1 + 1-Finanzierungsmodell für den nachhaltigen Einsatz von Remote-Laboren in der Lehre.

M. Auer: Die meisten Anbieter von Online-Laboren sind Universitäten. Aber sie sind in dieser Hinsicht a priori nicht zukunftsfähig, da der Großteil der Entwicklungsarbeit von Doktorand*innen geleistet wird, technisches Unterstützungspersonal nur selten verfügbar ist und die finanziellen Ressourcen begrenzt sind. Förderprogramme auf der ganzen Welt waren bislang nicht ausreichend nachhaltig. Es wurden zwar hervorragende Lösungen entwickelt, aber nach einigen Jahren sind viele davon wieder verschwunden. Beispiele hierfür sind das iLab Consortium (MIT), das LabShare-Projekt (Australien), das Go-Lab in Europa und andere. Hinzu kommt, dass auch Standardisierungsfragen nicht ausreichend gelöst sind. Daher ist es schwierig, Experimente von verschiedenen Standorten aus zu einem komplexen Labor zu verbinden und erfolgreiche Remote-Labore wiederzuverwenden. Infolgedessen kann es für Benutzer*innen bzw. Lernende aufgrund unterschiedlicher User Interfaces, unterschiedlicher Designs oder Zeitreservierungssysteme schwierig sein, flexibel auf Online-Labore zuzugreifen und diese zu nutzen. Darüber hinaus kann es schwierig sein, Online-Labore in E-Learning-Materialien, -plattformen usw. zu integrieren, da die Handhabung sehr komplex ist, zum Beispiel bei der Herstellung einer sicheren Verbindung, der Verwendung eines Tokens, der Anordnung von

Fenstern, dem Ausführen verschiedener Anwendungen oder dem Öffnen einer Videoverbindung. Schließlich erlebt der Bereich der Online-Labore gerade eine sehr dynamische Entwicklung. Denken Sie zum Beispiel an die Pocket Labs, die auf Datenerfassungskarten (siehe: DAQ) verschiedener Hersteller für weniger als 100 US-Dollar basieren. Mit ihrer Hilfe ist es leicht möglich, ein Heimlabor zu schaffen – zumindest in Bereichen wie der Elektro- oder Kommunikationstechnik. Auf der anderen Seite werden auf dieser Technologie basierend auch völlig neue Lösungen wie Cloud Labs denkbar.

4 Forschungsergebnisse zu Online-Laboren

Frage 2: Welche Ergebnisse Ihrer Forschung über das Online-Experimentieren waren besonders positiv, ermutigend, überraschend oder vielversprechend?

A. Kist: Wir haben eine Studie über die Qualität der Erfahrungen mit Onlinelernaktivitäten wie Remote-Laboren durchgeführt. Unser anfänglicher Schwerpunkt lag auf technischen Parametern wie Zugangsbandbreite oder Latenzzeit. Wir verwendeten Onlineaktivitäten, die sowohl Hardwarekomponenten aus dem Bereich der Hydraulik als auch Softwarekomponenten aus der Datenverarbeitung umfassten. Es stellte sich dabei heraus, dass bei Lernaktivitäten, die gut unterstützt wurden und ein gutes didaktisches Design aufwiesen, die Studierenden auch dann gerne weitermachten, wenn die Netzwerkbedingungen schwierig wurden. Umgekehrt wurden in Situationen, in denen die Studierenden den Zweck einer Aktivität nicht erkennen konnten oder die Lernaktivitäten nicht gut unterstützt wurden, die Remote-Laborsitzungen von ihnen schneller abgebrochen. Im Nachhinein scheinen diese Ergebnisse trivial zu sein, aber sie haben uns damals tatsächlich die Augen geöffnet.

G. Alves: Ich begann meine Forschung über Onlineexperimente Ende 1999 mit dem PEARL-Projekt. Die überraschende Tatsache ist, dass sich die für die Einrichtung eines Online-Labors erforderlichen Hardware-Komponenten seit diesen Tagen bis heute nicht viel weiterentwickelt hat. Den gegenteiligen Sachverhalt sehen wir auf der Softwareseite, d. h. die Softwarelösungen und -werkzeuge, die für die Einrichtung eines Online-Labors und dessen Zugänglichmachung für fast alle Client-Plattformen (Standard-PC, Smartphones usw.) benötigt werden, haben sich stark weiterentwickelt und entwickeln sich immer noch weiter. Das vielversprechendste Ergebnis ergibt sich aus der (evidenzbasierten) Schlussfolgerung, dass Online-Labore den Studierenden helfen, sich mehr (und höherwertiges) Wissen anzueignen und es länger zu behalten – insbesondere, wenn Online-Labore in Kombination mit traditionellen Hands-on-Laboren eingesetzt und mit klar definierten Lernzielen und einem Bezug zur abschließenden Leistungsbeurteilung in den Lehrplan integriert werden.

M. Castro: UNED und meine Abteilung, die Abteilung für Elektro- und Computertechnik, sind seit dem Ende des 20. Jahrhunderts an Remote-Laboren und -Experimenten beteiligt. Der Übergang zum 21. Jahrhundert bringt uns neue Ideen und Modelle, und wir haben uns auf die didaktische Forschung an der Schnittstelle zwischen neuen Entwicklungen und didaktischem Handeln konzentriert. Forschung und didaktische Innovation konzentrieren sich inzwischen mehr auf die Benutzer*innen als auf die eingesetzte Technologie, so wie wir es auch in mehreren Minerva-, Leonardo-, Erasmus- und Erasmus-Plus-Projekten sowie innerhalb der Projekte des 7th European Framework und des Horizon 2020-Rahmenprogramms selbst realisiert haben. All diesen Projekten war gemein, dass sie auf Benutzer*innenfreundlichkeit und ein nutzer*innenorientiertes Design sowie auf die Bereitstellung offener Bildungsressourcen abzielten. Projekte wie RIPLECS, s-Labs, MECA, Go-Lab, VISIR+ oder PILAR sind ein Beweis für die Entwicklung von Forschung und Innovation auf nationaler und internationaler Ebene. Die Zusammenarbeit mit den besten Institutionen und Laboren der Welt ermöglicht uns darüber hinaus eine Erweiterung der Perspektive und erzeugt Synergien für unsere Arbeit.

P. Orduña: Als wir mit LabsLand begannen, standen noch viele Fragen im Raum: Wird die Kapazität ausreichend sein, um zu skalieren? Wird es genug Interesse und genug Vertrauen geben? Und so weiter. Nach einigen Jahren des Aufbaus einer LabsLand-Community, der Entwicklung der dafür erforderlichen Technologien und der Kapazitätserweiterung zur Verwaltung vieler Studierender (in Partnerschaft mit 24 Universitäten in 14 Ländern auf allen Kontinenten) sind die Ergebnisse ermutigend. Ein stetiger Anstieg der Nutzer*innen, der Laborsitzungen und der Zufriedenheit der Nutzer*innen mit einem robusten System ist zu verzeichnen. Selbst, wenn einige Labore vorübergehend ausfallen, stehen immer Kopien dieser Labore zur Verfügung, sodass die Studierenden die technische Störung gar nicht bemerken. Darüber hinaus haben wir während der COVID-19-Krise beschlossen, dass wir zur Unterstützung aller Lehrenden (und das ist das eigentliche Ziel von LabsLand!) in der Zeit von Anfang März bis September allen Personen freien Zugang gewähren. Aufgrund dessen konnten wir eine Zunahme um Tausende von Studierenden aus einigen hundert neuen Institutionen verzeichnen, die mehrere zehntausend Laborsitzungen nutzten, und wir konnten dies in den meisten Fällen ohne Warteschlangen und nur in Ausnahmefällen mit einer maximalen Wartezeit von wenigen Minuten bewerkstelligen. Insgesamt war das Feedback sehr gut. Bei einigen Laboren wie etwa dem FPGA berichteten die Lehrenden, dass sie die Labore sehr schnell in ihre Lehre einbinden konnten.

V. Varney: Überraschend war zum Beispiel, dass der Einsatz neuer Technologien sich zunächst einmal negativ auf die Leistung der Studierenden auswirkte und somit an der einen oder anderen Stelle zu Reibungsverlusten führte. Wir haben aber daraus gelernt, dass einfache, kurze Tutorials und Zeit zur Eingewöhnung in neue

digitale Lernwelten essenziell für die Motivation und die Leistung sind. Das mag jetzt für den einen oder anderen trivial klingen, hat jedoch enorme Effekte.

Frage 3: Was waren die größten Rückschläge?

G. Alves: Der größte Rückschlag kam, wenn man so will, sowohl vom akademischen Personal selbst als auch aus den Leitungsgremien. Noch immer betrachten viele Kolleg*innen Online-Labore als vernachlässigbaren Beitrag zum Ausbildungsprozess von Ingenieur- und Naturwissenschaftler*innen, selbst wenn man außergewöhnliche Situationen wie jetzt unter COVID-19 in Betracht zieht. Institutsleiter*innen fehlt immer noch eine klare Perspektive, wie ein Aktionsplan für ein generelles Angebot und eine Unterstützung von Online-Laboren aussehen kann. Unternehmen wie LabsLand, die den Zugang zu Remote-Laboren bieten, stellten während der Pandemie jedoch ein zunehmendes Interesse an ihren Lösungen fest – nicht nur vonseiten der Hochschulen, sondern auch von Schulen. Die Diskussion über Lernziele und Fertigkeiten, die mit Laborumgebungen verbunden werden, und wie darüber hinaus Online-Labore in traditionellen (hands-on) und nicht-traditionellen (rein onlinebasiert oder im Blended Learning) Lernsituationen effektiv genutzt werden können, erfordert jedoch weiterhin Forschungsarbeit. Diese kann dazu beitragen, alle beteiligten Interessengruppen – Lehrende, Studierende, Leitungsgremien, Akkreditierungsagenturen, Arbeitgeber und die Gesellschaft – davon zu überzeugen, dass Online-Labore keine extravagante Bildungstechnologie sind, sondern das Gegenteil: Sie sind eine äußerst notwendige und nützliche Bildungsressource.

M. Castro: Das wichtigste Hemmnis bei Remote-Laboren und -experimenten ist die Notwendigkeit, den Wartungsaufwand zu minimieren und eine 24-Stunden-365-Tage-Betriebszeit automatisiert zu ermöglichen. Dies stellt eine Herausforderung für jede akademische Einrichtung dar. Aus dieser enttäuschenden Schlussfolgerung heraus sorgt die Gründung einiger neuer technologiebasierter Unternehmen – und deren professionelle Vision des Betriebs und Managements – bei der Verbreitung von Remote-Laboren für neuen, frischen Wind. LabsLand und andere Ausgründungen aus universitären Forschungsgruppen haben diese Arbeit geleistet und sind hier Multiplikatoren der neuen Möglichkeiten für Hochschulen und Unternehmen, die ein erschwingliches und professionell gewartetes Remote-Labor für ihre tägliche Arbeit benötigen. Sie setzen die Zusammenarbeit, Forschung und Verbesserung neuer Entwicklungen fort, wie etwa die Entwicklung von Remote-Laboren auf Basis aufgezeichneter Laborversuche (ultraconcurrent labs) und weiterer neuer praktikabler Ansätze.

A. Kist: Seit über zehn Jahren versuchen wir, in unserer Abteilung Remote-Labore zu etablieren. Die Unterstützung durch die Leitungsgremien hat in dieser Zeit stark geschwankt. Manchmal war es schwierig, ein Gleichgewicht zwischen den Forschungsaspekten rund um die Remote-Labore (was Pluspunkte schafft und befriedigend ist)

und der Zeit, die für die Instandhaltung und Aufrechterhaltung des laufenden Betriebs nötig ist, zu finden. Letzteres wird oft nicht anerkannt oder vergütet. Ironischerweise zeichnet sich das zunehmend als Industrie gedachte Bildungssystem gleichwohl durch eine gewisse Behäbigkeit in Bezug auf den Wandel aus. Wir wissen zum Beispiel heute, dass traditioneller Unterricht und Vorlesungen nicht die beste Art des Lernens für Studierende sind. Die meisten Institutionen folgen jedoch weiterhin diesen Modellen. Das Online-Learning hat es inzwischen in den Bildungsmainstream geschafft. Es nutzt und modelliert dabei hauptsächlich Technologien, die von anderen Bereichen der Gesellschaft genutzt werden, aber es hinkt trotzdem hinterher. Innovation findet statt, wird aber oft nur von kleinen Gruppen und Einzelpersonen vorangetrieben.

P. Orduña: Eines der erfolgreichsten Projekte in diesem Bereich war das Go-Lab-Projekt unter der Leitung von Ton de Jong und mit Denis Gillet als technischem Leiter. Das Projekt war sehr erfolgreich und hatte Nachfolgeprojekte wie Next-Lab und viele andere Projekte, die in verschiedenen Ländern gestartet wurden – etwa das Go-GA in einigen afrikanischen Ländern. Heute wird es von über einhunderttausend Studierenden und einer begeisterten Community genutzt. Was den Bereich der Remote-Labore angeht, möchte ich dieses Projekt jedoch auf der weniger positiven Seite einordnen. Go-Lab bietet zwar Zugang zu Remote- und virtuellen Laboren (Simulationen), die Remote-Labore entsprachen jedoch nicht den Erwartungen der Lehrenden und wurden deshalb nur sehr wenig genutzt. Das war jedoch kein Problem des Go-Lab-Ökosystems an sich, da es bei Go-Lab im Kern nicht darum ging, Labore selbst zu entwickeln oder bereitzustellen, sondern bereits existierende Labore in neue Angebote für forschendes Lernen zu integrieren. Zwar wurden viele Initiativen angestoßen, aber aus mehreren Gründen waren die Remote-Laborlösungen sogar innerhalb des Projekts selbst ein Nischenprodukt. Ich empfand dies immer als ein Symptom der tieferliegenden Probleme des Stands der Technik von frei zugänglichen Remote-Laboren.

V. Varney: Was mich als Forschungsperspektive noch immer reizt, ist die Tatsache, dass es bislang kaum gesicherte Erkenntnisse zur Wirksamkeit von Online-Laboren gibt. Auswertungen bewegen sich häufig auf einem sehr niedrigen Erkenntnislevel. In der Regel sucht man bisher vergeblich nach übertragbaren Ergebnissen zu User Experience, Leistung, Motivation oder zum Lernen mit Online-Laboren. Zwar gibt es zahlreiche Studien, die zu konkreten Anwendungsfällen spannende Erkenntnisse liefern. Aber flächendeckende Standards zur Evaluation und eine Aussicht auf eine echte Vergleichbarkeit von Ergebnissen gibt es bislang nur in Ausnahmen.

5 Die Zukunft von Online-Laboren

Frage 4: Wenn wir in die Zukunft blicken, welche Richtungen müssen Ihrer Meinung nach die Forschung und die Entwicklung rund um Online-Labore einschlagen? Wo sehen Sie die Zukunft des Online-Experimentierens in zehn Jahren?

P. Orduña: Wie bei den meisten Bildungstechnologien wäre das Wichtigste, was entwickelt werden müsste, die richtige Einbeziehung von Mixed-Reality und KI-basierten personalisierten Tutoringsystemen. Ich erachte die Remote-Labore in all ihren Erscheinungsformen als geeignete Lösung zur Steigerung des erfahrungsbasierten Lernens in Schulen, Hochschulen, weiteren traditionellen Bildungseinrichtungen und auch in der beruflichen Weiterbildung, die für die Zukunft der Arbeit, in der Menschen immer häufiger neue Fähigkeiten lernen müssen, von entscheidender Bedeutung sein wird. Für betriebliche Fortbildungen sind reine Onlineangebote sehr interessant, da sie von den Teilnehmenden zeitlich flexibel belegt und genutzt werden können.

M. Castro: In diesem Jahr wurde die Zukunft plötzlich und disruptiv auf den Kopf gestellt: Von morgens bis abends finden sich Industrie, Hochschule, Schule und Familie plötzlich am selben Ort wieder, nämlich zu Hause. Und sie alle sind, ebenso wie alle anderen weltweiten Aktivitäten, weitestgehend auf Onlineaktivitäten angewiesen. Doch diese Veränderung ist nicht kontinuierlich und evolutionär, sondern ein abrupter und großer Sprung in jenen unbekannten Raum, in dem die Zukunft anders aussehen wird als die Gegenwart. Diese Zukunft ist meiner Meinung nach hybrid: hybrid in der Forschung, hybrid in der Arbeit, hybrid im Meeting, hybrid im Leben. All unser Handeln wird zwar weiterhin mit einem großen Anteil an traditionellen, präsenzbasierten Aktivitäten stattfinden, aber künftig zunehmend mit Onlineaktivitäten kombiniert werden. Auf dieser Basis wird die Entwicklung des nächsten Schrittes erfolgen. Wir werden die Nutzung von Online- und Remoteexperimenten ebenso wie den Anteil an Onlinelehre in Hochschulen und Schulen weiter erhöhen. Dazu müssen wir aber unsere Didaktik und Methodik sowie unsere Bildungsressourcen verbessern, um eine möglichst hohe Qualität zu erreichen. Qualität und einsatzfähige Ausstattung sind die Zukunft, und neue Entwicklungen, neue Standards sowie offene Bildungsressourcen sind Teil dieses Rahmenplans. Diese müssen gemeinsam und in enger Zusammenarbeit von allen Akteur*innen aus Forschung, Industrie und Hochschule geschaffen werden, um eine bessere Zukunft zu gestalten.

A. Kist: Wenn unser Ziel eine umfassendere Nutzung und Akzeptanz ist, muss sich die Forschung mit den Herausforderungen von Einführung, Schulung und Support befassen. Dies könnte auch bedeuten, dass mehr Arbeit für die Entwicklung von Businessplänen und Geschäftsmodellen für den nachhaltigen Betrieb von Online-Laboren erforderlich ist. Häufig entspricht dies nicht den Interessen und Fähigkei-

ten der Entwickler*innen, die oft einen eher technischen Schwerpunkt haben. Es gibt sicherlich viele Möglichkeiten, über dieses enge Feld hinaus mit Kolleg*innen zusammenzuarbeiten, die über entsprechende Fachkenntnisse verfügen. Die didaktische Vermittlung von spezifischen Fähigkeiten und Fertigkeiten ist oft von zentraler Bedeutung für Lernaktivitäten in Laborübungen. Für Online-Labore wurde diese bislang noch nicht hinreichend behandelt. Es ist jedoch entscheidend, die didaktischen Möglichkeiten und Grenzen von Online-Laboren zu identifizieren, zu artikulieren und zu quantifizieren. Dies gilt sowohl für Remote-Labore als auch für virtuelle Labore. Dies führt zur Notwendigkeit von mehr Forschung zu Didaktik und Bildung.

G. Alves: Ich würde sagen, dass jeder Entwicklungsplan prüfen muss, wie Online-Labore in allen Bereichen der ingenieur- und naturwissenschaftlichen Lehre bereitgestellt werden können. Dieser Entwicklungsplan muss die menschliche Komponente mit einbeziehen. Das heißt: Inwieweit werden Lehrende bereit sein, Online-Labore in ihre Curricula aufzunehmen? Wie werden sie diese in der alltäglichen Lehre verwenden und mit ihnen das Lernen der Studierenden unterstützen? Der Entwicklungsplan muss sich mit der optimalen Mischung aus traditionellen (hands-on) und nicht-traditionellen Laboren (sowohl virtuelle als auch Remote-Labore) befassen, um eine ganzheitliche Ausbildung von Ingenieur*innen und Naturwissenschaftler*innen zu ermöglichen.

V. Varney: In zehn Jahren möchte ich sagen können: Online Lab Education ist ein Forschungsfeld, das neben fachlich exzellenten Laboren auch eine exzellente Begleitforschung hat. Meine Hoffnung ist, dass unsere Bemühungen, den Bereich Engineering Education Research in Deutschland zu etablieren, bis dahin Früchte getragen haben und neuer Raum für interdisziplinäre Forschung entstanden ist, der sich kontinuierlich weiterentwickelt.

K. Bhimavaram: Die grundlegende Infrastruktur, die für Online-Labore benötigt wird, ist das Internet, das sich seit seinen Anfängen enorm entwickelt hat. Die Nachfrage nach einer besseren Internetanbindung wächst entsprechend. Um in Online-Laboren ein echtzeitnahes Erlebnis zu ermöglichen, ist vor allem eine zuverlässige Internetverbindung erforderlich, die nahtlos, stabil und durchgängig ist. Das ist durchaus eine Herausforderung für viele Teile der Welt. Es gibt auch sozioökonomische Probleme, die in Zukunft gelöst werden müssen. Da die Einrichtung von Online-Laboren Investitionen erfordert und Wartungskosten mit sich bringt, muss ein angemessener ROI (Return on Investment) ermittelt werden. Auch, wenn die Online-Labore im akademischen Bereich als gemeinnützige Initiative betrachtet werden, ist es unerlässlich, einen Mechanismus der wirtschaftlichen Nachhaltigkeit zu etablieren. Da die Entwicklung von Online-Laboren die Schaffung eines vollständigen entsprechenden Ökosystems erfordert, ist es notwendig, dass die Bildungs-

ministerien, Fördergeber, Forschungseinrichtungen und andere private Unternehmen diese Initiativen finanzieren.

M. Auer: In zehn Jahren werden interessierten Nutzer*innen standardisierte Werkzeuge zur Entwicklung von Onlineexperimenten und ihrer Integration in Onlinelernumgebungen zur Verfügung stehen. Vor allem in den Ingenieurwissenschaften werden wir eine enge Partnerschaft zwischen Industrie und Hochschulen haben, um die Ausbildung zu Ingenieur*innen mit der neuesten und besten Ausstattung zu gewährleisten. Dies erfordert allerdings die Bereitschaft der Industrie und ein Umdenken in den Bildungseinrichtungen auf allen Ebenen. Letztlich wird das Onlineexperimentieren durch den Trend zur Virtualisierung und Simulation gekennzeichnet sein. Nichtsdestotrotz haben wir mit Unternehmen wie Quanser, EMONA oder LabsLand vielversprechende Ansätze zur Vermarktung von realen Onlineexperimentierlösungen, und in zehn Jahren werden wir noch viel mehr Unternehmen haben, die Online-Labore als Dienstleistung anbieten werden.

6 Wie es weitergeht

Mit diesen Antworten zur Zukunft der Online-Labore schließt nicht nur dieser Beitrag, sondern auch der vorliegende Sammelband zur Laborlehre in den Ingenieurwissenschaften. Selbstverständlich endet die Debatte zum Lernen und Lernen im realen wie im digitalen Labor nicht an dieser Stelle. Die Antworten der Expert*innen deuten vielmehr darauf hin, dass es noch viel zu tun, weiterzuentwickeln und zu erforschen gibt.

Vor allem auf internationaler Ebene nimmt die Entwicklung und Beforschung von Online-Laboren wieder zusehends an Fahrt auf. Neben den durch unterschiedliche Institutionen geförderten Forschungsprojekten – etwa das bis 2016 von der EU geförderte Projekt Go-Lab[1] oder das aktuelle Nachfolgerprojekt NextLab[2], das sich vornehmlich an Grundschulen und weiterführende Schulen richtet – sind vor allem die IEEE Education Society, die International Association of Online Engineering (IAOE) und das Global Online Laboratory Consortium (GOLC) darum bemüht, Beteiligte aus Forschung, Entwicklung und Anwendung von Online-Laboren zu verbinden. Unter dem Schirm der IOAE findet sich auch die VISIR Federation, in der sich internationale Institute zusammengeschlossen haben, die das in diesem Band beschriebene VISIR-Labor am eigenen Standort nutzen, um Equipment und Forschungsergebnisse zu teilen. Auf der jährlichen International Conference on Remote Engineering & Virtual Instrumentation (REV) der IAOE und der GOLC oder der Global Engineering Education Conference (EDUCON) der IEEE tauschen sich Forscher*innen zu neuesten Erkenntnissen im Bereich der Online-Labore mit Vertre-

1 Vgl. https://www.golabz.eu.
2 Vgl. https://nextlab.golabz.eu/initiative.

ter*innen aus Hochschule und Wirtschaft aus. Im angloamerikanischen Bereich findet der wissenschaftliche Austausch vor allem im Rahmen des Online Learning Consortiums und auf der jährlichen Konferenz der American Society for Engineering Education und den dort vertretenen Fachgruppen wie der ASEE Division of Experimentation and Laboratory-Oriented Studies (DELOS) statt. Darüber hinaus existieren zahlreiche Fachzeitschriften, in denen Online-Labore und ihre Nutzung aus unterschiedlicher Perspektive betrachtet werden. Dazu zählen die Publikationen der IEEE, diverse Engineering Education Journals (z. B. das Journal of Engineering Education der ASEE oder das European Journal of Engineering Education der SEFI) sowie die unterschiedlichen Zeitschriften von Online-Journals.org (ebenfalls Teil der IAOE).

Natürlich stellen die oben genannten Fachverbände, Konferenzen und Fachzeitschriften nur einen Ausschnitt der aktuellen Forschungslandschaft in diesem Bereich dar. Wenn Sie als Leser*in weitergehendes Interesse am Austausch haben, freuen sich die in diesem Sammelband vertretenen Autor*innen über Anfragen und Kontakt. Wir hoffen, dass die Lektüre Ihnen nicht nur interessante Einblicke, sondern auch produktive Denkanstöße für Ihre eigene Lehre und vielleicht sogar Forschung hat geben können.

Autorinnen und Autoren

Ignacio Angulo ist Mitbegründer von LabsLand und lehrt seit 2002 am Institut für Informationstechnologie, Elektronik und Kommunikation der Universität Deusto (Spanien). Seine Doktorarbeit trägt den Titel: „Open Architecture for the Deployment of Remote Laboratories on Embedded Systems“. In seinen Forschungsarbeiten fokussiert er Fragestellungen zur Entwicklung von Mikroprozessoren, Embedded Systems und Tele-Control bzw. Tele-Maintenance.

Gustavo Ribeiro Alves ist Professor am Polytechnic of Porto in Portugal und Präsident der portugiesischen Society of Engineering Education (SPEE). Zudem leitet er die internationale Forschungsgruppe VISIR Federation und arbeitet seit vielen Jahren in EU-geförderten Projekten im Bereich der Ingenieurausbildung.

Michael E. Auer ist CEO der International Association of Online Engineering (IAOE), ehemaliger Präsident der International Federation of Engineering Education Societies (IFEES) und Editor zahlreicher Online-Journals. Zudem war er Vizerektor und Professor an der Fachhochschule Kärnten im Bereich Elektrotechnik.

Anna B. Bauer ist wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Didaktik der Physik der Universität Paderborn. Sie hat die wissenschaftliche Leitung des Beratungsangebots „Physiktreff“ für Lehrende und Lernende des Departments Physik inne und wirkt mit an dem Projekt „Entwicklung eines kompetenzorientierten Paderborner Physik Praktikums 3P“.

Alexander S. Behr studierte Chemieingenieurwesen an der TU Dortmund und arbeitete als wissenschaftliche Hilfskraft in der Arbeitsgruppe Strömungsmechanik. Er ist zurzeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Apparatedesign an der Fakultät Bio- und Chemieingenieurwesen der TU Dortmund tätig.

Jochen Berendes ist seit 2011 wissenschaftlicher Mitarbeiter der Geschäftsstelle der Studienkommission für Hochschuldidaktik (GHD) an der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft im QPL-Projekt SKATING. Er promovierte 2005 zum Dr. phil. und studierte zuvor Germanistik und Philosophie. Publikation und Lehre in den Bereichen Literaturwissenschaft, Ethik, Wissenschaftsethik, Wissenschaftliches Schreiben, Schlüsselqualifikationen und Hochschuldidaktik.

Sarah Berndt ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Hochschulforschung und Professionalisierung der akademischen Lehre der Universität Magdeburg. Sie forscht im Bereich Hochschulbildung, Evaluation von digitalen Lehr-/Lernsettings und Methoden der empirischen Sozialforschung.

Kalyan Ram Bhimavaram ist aktueller Präsident der International Association of Online Engineering (IAOE), Mitbegründer und CEO von Electrono Solutions Private Limited. Darüber hinaus verfügt er über eine langjährige Expertise in System Control Design, Remote Engineering und IoT-Anwendungen.

Dana J. Boettcher studierte Bioingenieurwesen an der TU Dortmund und arbeitete in der Arbeitsgruppe Bioverfahrenstechnik. Momentan arbeitet sie als Berufsschullehrerin für *Umwelttechnische Berufe* und ist Bildungsgangleiterin für den Bereich Wasserversorgungstechnik am Hans-Schwier-Berufskolleg in Gelsenkirchen.

Konrad E. R. Boettcher studierte an der TU Karlsruhe Maschinenbau, promovierte in der Arbeitsgruppe *Strömungsmechanik* an der Fakultät Bio- und Chemieingenieurwesen der TU Dortmund zum Dr. Ing. und ist dort als Akademischer Rat tätig. Für diverse Lehrverbesserungsprojekte wurde er 2019 mit dem Lehrpreis der TU Dortmund ausgezeichnet.

Manuel Castro ist Professor an der National Distance Education University (UNED) in Spanien und ehemaliger Präsident der Education Society des Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Er forscht und lehrt in den Bereichen Elektrotechnik und digitale Lehr-Lernlabore.

André Dietrich ist promovierter Wissenschaftler an der TU Bergakademie Freiberg. Durch sein Interesse an Programmierparadigmen und der Unzufriedenheit mit heutigen E-Learning-Lösungen begann er mit der Entwicklung von LiaScript, einer Sprache für die Gestaltung freier und interaktiver Onlinekurse.

Judyta Franuszkiewicz ist Rehabilitationswissenschaftlerin und wissenschaftliche Mitarbeiterin im Zentrum für HochschulBildung an der TU Dortmund in dem Projekt „ELLI – Exzellenten Lehren und Lernen in den Ingenieurwissenschaften“ mit dem Schwerpunkt Labordidaktik sowie Dozentin an der IngenieurDidaktik der TU Dortmund.

Silke Frye ist seit 2011 wissenschaftliche Mitarbeiterin der IngenieurDidaktik sowie seit 2018 am Zentrum für HochschulBildung der TU Dortmund. Ihre Forschungsschwerpunkte sind Nachhaltigkeit als Thema in der Ausbildung von Ingenieur*innen, Labordidaktik und Internationalisierung im ingenieurwissenschaftlichen Studium.

Javier García-Zubía ist Professor an der Universität Deusto (Spanien) und leitet die Forschungsgruppe WebLab-Deusto. Seine Forschung konzentriert sich auf Design, Implementierung und Evaluation von Remote-Laboren. Darüber hinaus ist er als Autor und Co-Autor an unzähligen Publikationen in indexierten Fachzeitschriften und internationalen Konferenzen beteiligt und wurde für seine Forschungsarbeit bereits mehrfach ausgezeichnet.

Luis Rodríguez Gil ist Mitbegründer und technischer Direktor von LabsLand. Er promovierte zum Thema: "Improving the remote laboratory experience through augmented characteristics beyond the experiment core" und verfügt über langjährige Erfahrung in der Forschung und Entwicklung von Remote-Laboren.

Mathias Gutmann ist seit 2008 Professor für Technikphilosophie am Institut für Philosophie des Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Zwischen 2003 und 2008 war er Juniorprofessor für Anthropologie zwischen Biowissenschaften und Kulturforschung am Institut für Philosophie der Philipps-Universität Marburg. Seine Hauptarbeitsgebiete sind Technikphilosophie, Wissenschaftstheorie sowie Natur- und Technikhermeneutik.

Tobias Haertel ist Leiter der IngenieurDidaktik an der Fakultät Maschinenbau der TU Dortmund. Seine Forschungsinteressen beinhalten die Förderung von Kreativität und Entrepreneurship in der Lehre, Kompetenzbedarfe in Zeiten von Industrie 4.0 sowie die Digitalisierung im Technikunterricht.

Anja Hawlitschek ist promovierte Wissenschaftlerin am Lehrstuhl für Hochschulforschung und Professionalisierung der akademischen Lehre der Uni Magdeburg. Ihre Forschung fokussiert auf das didaktische Design des Lehrens und Lernens mit digitalen Medien. In dem BMBF-Projekt „DiP-iT" erforscht sie kollaboratives Lernen in der Informatik.

Sabrina Heix war als wissenschaftliche Mitarbeiterin u. a. in der Forschungsgruppe Ingenieurdidaktik der Technischen Universität Dortmund tätig. Zurzeit arbeitet sie als Wirtschaftswissenschaftlerin im Team Investor Support der Wirtschaftsförderung Dortmund.

Karsten Henke ist promovierter wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Integrierte Kommunikationssysteme an der TU Ilmenau. Er verfügt über langjährige Erfahrung und Expertise in e-Learning sowie web-basierten Aus- und Weiterbildungssystemen (insbesondere Remote-Labore), Methoden und Werkzeugen für den Entwurf und die Verifikation eingebetteter Steuerungssysteme.

Unai Hernandez-Jayo lehrt am Institut für Informationstechnologie, Elektronik und Kommunikation der Universität Deusto (Spanien). Er hat in Informations- und Kommunikationstechnik promoviert und forscht als Mitglied der Forschungsgruppe WebLab-Deusto zu Remote-Laboren.

Anja Höschel ist Sicherheits- und Umweltingenieurin und arbeitet seit 2014 in der Stabsstelle Sicherheitstechnische Dienste und Umweltschutz (SDU) an der TU Berlin. Zuvor war sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin tätig und sammelte dabei mehrjährige Lehrerfahrung mit Studierenden im Labor.

Birgit Kanngießer hat Physik, Astronomie und Philosophie an der Universität Bonn studiert, 1995 an der Universität Bremen promoviert und 2004 an der TU Berlin habilitiert. Seit 2004 leitet sie die Arbeitsgruppe Analytische Röntgenspektroskopie und gründete als Stiftungsprofessorin das Berlin Laboratory for innovative X-ray Technologies. Im Herbst 2019 übernahm sie die wissenschaftliche Leitung des Projektlabors am Institut für Optik und Atomare Physik der TU Berlin.

Alexander A. Kist ist Associate Professor an der University of Southern Queensland in Australien. Zudem fungiert er an seiner Hochschule auch als Associate Head for Learning, Teaching, and Student Success und ist Academic Board Member an der School of Mechanical and Electrical Engineering.

Karsten Lensing ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der IngenieurDidaktik, Fakultät Maschinenbau, sowie am Zentrum für HochschulBildung der TU Dortmund. Seine Forschungsthemen sind Ingenieur- und Technikdidaktik, Lernfabriken, Learning Innovation sowie KI in der Lehre.

Dominik May ist Assistant Professor für Engineering Education Research an der University of Georgia (USA). Er forscht zu digitalen Medien und zur Labordidaktik in der Ingenieurausbildung. Zudem ist er Vize-Präsident der International Association of Online Engineering (IAOE) und Editor-in-Chief für das International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET).

Andrea Merli hat Physik an der FU Berlin studiert und dort 2008 promoviert. Es folgte eine Post-Doc-Phase in der Fachdidaktik an der FU Berlin. Seit 2011 ist sie wissenschaftliche Mitarbeiterin an der TU Berlin, forscht auf dem Gebiet der Spektroskopie von Clustern und Nanokristallen und ist in der Lehre für die organisatorische Leitung des physikalischen Anfängerpraktikums „Projektlabor“ zuständig.

Thomas Möller hat Physik und Astronomie an der Universität Hamburg studiert, dort 1986 promoviert und sich 1991 habilitiert. Anschließend wurde er Arbeitsgruppenleiter und Koordinator der Experimente im weichem Röntgenbereich bei DESY Hamburg. Seit 2004 ist er Professor am Institut für Optik und Atomare Physik der TU Berlin. Neben seiner erfolgreichen Forschung auf dem Gebiet der Cluster und Nanokristalle leitete er das Projektlabor Physik über 15 Jahre.

Pablo Orduña ist Mitbegründer und Geschäftsführer von LabsLand. Er promovierte an der Universität Deusto (Spanien), hatte einen Forschungsaufenthalt am Massachusetts Institute of Technology (USA) und ist ein Absolvent des Global Solutions Programms der Singularity University. Im Rahmen seiner Arbeiten am Forschungsinstitut DeustoTech hat er mehr als 150 wissenschaftliche Beiträge veröffentlicht und war beteiligt an EU Wissenschaftsprojekten wie Go-Lab (FP7) und Next-Lab (H2020). Für seine Forschungsleistungen wurde er mit verschiedenen internationalen Preisen ausgezeichnet, darunter der MIT TR35 Spain des MIT Technology Review, das die Top 10 Innovatoren in Spanien listet.

Tobias R. Ortelt studierte Maschinenbau und ist Digital Learning Expert an der IngenieurDidaktik der Technischen Universität Dortmund. Er war maßgeblich an der Entwicklung von Remote-Laboren im Projekt „ELLI – Exzellentes Lehren und Lernen in den Ingenieurwissenschaften“ beteiligt. Er ist Sprecher der Community Working Group (CWG) „Remote-Labore in Deutschland“.

Anke Pfeiffer arbeitet als Akademische Mitarbeiterin im Projekt DigiLab4U an der Hochschule für Technik Stuttgart. Zu ihren Forschungsschwerpunkten zählen der Einsatz von digitalen Medien und Learning Analytics für die Gestaltung realer, remote und virtueller laborbasierter Lernumgebungen.

Benjamin Remmers ist als Geselle und Ingenieur dicht an den Studierenden und den Maschinen im Lernort digitale Umformtechnik an der HAW Hamburg. Wenn er einen Versuch zu oft durchführt, versucht er, eine neue didaktische Methode zu finden – im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP) für die Lehre.

Monika Rummler ist promovierte wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Zentraleinrichtung Wissenschaftliche Weiterbildung und Kooperation (ZEWK) der TU Berlin und seit vielen Jahren zuständig für das Weiterbildungsprogramm für das wissenschaftliche Personal der TU Berlin mit Schwerpunkt auf Hochschuldidaktik/Lehren und Lernen (dghd-akkreditiert).

Marc D. Sacher leitet als akademischer Direktor die physikalischen Grundpraktika an der Universität Paderborn. Er ist promovierter Experimentalphysiker, Fellow für Innovationen in der Hochschullehre des Stifterverbands und gibt seine Ideen für zeitgemäße Laborpraktika in hochschuldidaktischen Workshops weiter.

Katrin Schillinger ist Referentin für Lernraumentwicklung an der HAW Hamburg. Parallel ist sie Dozentin für agiles Projektmanagement und Beraterin für Unternehmen in Transformationsprozessen. Im Spielraum zwischen Wirtschaft und Lehre sind Agilität und kollaboratives Arbeiten und Lernen im digitalen Umfeld ihre Schwerpunktthemen.

Andrea Schwandt ist wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg im Bereich Digitaltechnik und Schaltungstechnik. Sie hat maßgeblich das FPGA Vision Remote Lab entwickelt und beschäftigt sich mit Learning Analytics für Online Learning.

Enno Stöver ist als Professor für Produktionstechnik / Umformtechnik an der HAW Hamburg berufen. Mit Leidenschaft für agiles Projektmanagement entwickelt er neue didaktische Formate und hybride Lehr- und Lernräume. Der Lernort Digitale Umformtechnik ist dabei die zentrale Experimentierumgebung.

Claudius Terkowsky ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für Hochschul-Bildung (zhb) der Technischen Universität Dortmund. Er ist Leiter der interdisziplinären Forschungsgruppe Ingenieurdidaktik und forscht und publiziert seit vielen Jahren zu Labordidaktik und innovativen Lehr-Lernszenarien an den Schnittstellen von Mensch, Technik und Medien. Als zertifizierter hochschuldidaktischer Trainer befasst er sich in der Weiterbildung mit Labordidaktik und Kreativitätsförderung in der Lehre.

Dieter Uckelmann ist Professor für Informationslogistik an der Hochschule für Technik Stuttgart. Er leitet das BMBF geförderte Forschungsprojekt DigiLab4U. Seine Forschung konzentriert sich auf Anwendungen des Internets der Dinge in den Bereichen Industrie 4.0, Logistik und intelligente Gebäude.

Valerie Varney ist promovierte Forscherin am Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (IPK) der Technischen Hochschule Köln und ehemalige Leiterin der Forschungsgruppe „Digital Learning Environments“ am Cybernetics Lab IMA & IfU der RWTH Aachen.

Aitor Villar-Martinez ist derzeit Doktorand an der Universität Deusto (Spanien). Er arbeitet seit mehr als drei Jahren im Forschungsfeld der Remote-Labore und hat in dieser Zeit 12 Forschungsbeiträge in indexierten Fachzeitschriften veröffentlicht.

Marco Winzker ist Professor für Elektrotechnik an der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg und dort Direktor des Zentrums für Innovation und Entwicklung in der Lehre. Er erhielt den Lehrpreis der IEEE Education Society, ist Teilnehmer von Lehre-hoch-n und Fellow für Innovationen in der digitalen Hochschullehre.

Heinz-Dietrich Wuttke promovierte an der TH Ilmenau in Ingenieurwissenschaften und arbeitete in Lehre und Forschung auf Gebieten der Technischen Informatik. Er leitete nationale und internationale Projekte im Bereich des technologiegestützten Lehrens und Lernens an der Fakultät für Informatik und Automatisierung der TU Ilmenau.

Sebastian Zug ist Professor für Softwareentwicklung und Robotik an der TU Bergakademie Freiberg. Zuvor koordinierte er an der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg das BMBF-geförderte Projekt „Industrial-eLab“, das die Implementierung und didaktische Evaluation eines Remote-Labors für eingebettete Systeme umfasste.

Das Labor als Raum des praxisorientierten Lehrens und Lernens ist in der Hochschullehre gerade in den technischen Fächern ein zentraler Bestandteil der Curricula. Untersuchungen zeigen, dass sich das forschende Lernen im Labor positiv auf die Kompetenzentwicklung auswirken kann. Allerdings bedarf es hierfür der Beachtung didaktischer, organisatorischer und technischer Gestaltungsfaktoren. Vor diesem Hintergrund stellen sich vielfältige Fragen: Welche Laborangebote gibt es und was ist ihr Nutzen? Was brauchen Labore, um effektive Lernorte zu sein? Wie muss sich Laborlehre weiterentwickeln, um die Möglichkeiten der Digitalisierung im Kontext von Lernen und Arbeiten 4.0 aufzunehmen?

Die Beiträge widmen sich diesen Themen in drei übergeordneten Abschnitten: Sie zeigen erstens, wie sich Labordidaktik unter den veränderten Kompetenzerwartungen neu aufstellen kann und muss. Im zweiten Abschnitt geben sie Einblicke in aktuelle und zukünftige Entwicklungen von Cross-Reality-Laboren. Im abschließenden Teil nehmen sie die übergeordnete Frage in den Blick, welche Voraussetzungen zukünftig nötig sind, um Labore technisch verlässlich und ökonomisch nachhaltig in die Lehre zu integrieren.

ISBN: 978-3-7639-6216-7

wbv Publikation

wbv.de

View publication stats