

# 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<sup>1</sup>-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:

---

<sup>1</sup> 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 Modells 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, Kanngießner 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 Hauptproblem 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 ersetzt 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

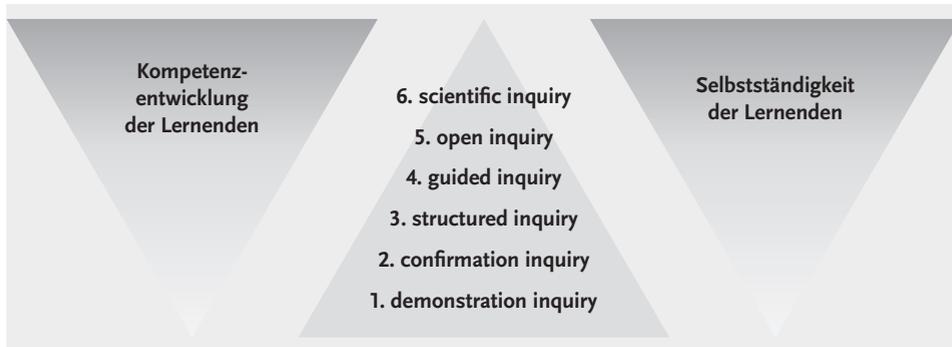
Schwab (1960)	Herron (1971)	Tafaya, Sunal & Knecht (1980)	Kirschner & Meester (1988)	Bruchmüller & Haug (2001)	Sheppard et al. (2009)	Terkowsky et al. (2013)
		[ <i>demonstration inquiry</i> ]		<b>Integriertes Labor</b> (Vorlesung plus vertiefende Laborübung)	<b>demonstrations and controlled 'cookbook' experiments</b> (combined lecture and laboratory course; learning the fundamental concepts by following a set of clearly defined steps to arrive at a predicted outcome)	<b>instruction-based approach</b> (for beginner-level students: scripted guidelines and pre-defined experiments to solve interpolation problems)
0	confirmation inquiry (teacher presents concept or principle and student performs some exercise to confirm or re-enact it)	<b>academic or formal laboratory</b> (traditional, structured, convergent or cookbook laboratories to illustrate laws and concepts)	...	... Stufe I Übungs- und Praktikumsversuche (Durchführung nach starrer Vorschrift ohne Freiheitsgrade)	...	...
...	...	...	<b>divergent lab</b> (from a common start)	...	...	...
1	structured inquiry (teacher defines task or problem to be solved by student; procedure, activities and materials are given)	...	...	Stufe II Schrittweises Hinführen zu mehr selbstständiger, kreativer, innovativer Laborarbeit; z.B. Übungsversuche mit Varianten; kleine selbstständige Aufgaben; Versuche mit open end	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)	<b>problem-based learning</b> (for intermediate-level students: self-directed learning to solve subject-specific real-world synthesis problems)
...	...	...	<b>experimental lab</b> (open-ended, discovery oriented, unstructured project or undergraduate research laboratories)	...	...	...
2	guided inquiry (teacher defines task or problem to be solved by student)	...	...	Stufe III Selbstständiges wissenschaftliches Arbeiten (z. B. Semester- und Qualifikationsarbeiten)	project-based and open-ended experiments (learning to work with complex systems; minimal guidance, students take the lead in the investigation)	<b>research-based learning</b> (advanced-level learners design own research questions and conduct own experimental research to solve dialectic problems)
...	...	...	<b>experimental research</b> (plus experimental seminar to prepare skills & procedures)	...	...	...
3	open inquiry (student define task or problem to solve; teacher supports)	...	...	...	...	...
...	third level: problem, answer, and method are left open: the student is confronted with a raw phenomenon.	...	...	...	...	...
		[ <i>scientific inquiry</i> (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 Studierenden-zentrierung, 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 durchgeführt. 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 durchgeführt 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** (Durfée 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 Übermittlung 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 Prozessork (Sensorik und Aktorik) geht mit der menschlichen Prozessork (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](http://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 Studententexte, 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 17<sup>th</sup> 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 13<sup>th</sup> 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 125<sup>th</sup> 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