

# 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: „Forschen des 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 Portugiesische 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 unbekanntem 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 Fähigkeiten

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 Online-Lernumgebungen 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<sup>1</sup> oder das aktuelle Nachfolgerprojekt NextLab<sup>2</sup>, 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 IOAE 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.