

# Remote-Labore in der Ingenieurausbildung – Leitlinien für Erstellung und Betrieb

OLIVER WEISHAUPT, NATASCHA STRENGER, MARCUS PETERMANN, SULAMITH FRERICH, JOSHUA GRODOTZKI, ALESSANDRO SELVAGGIO, A. ERMAN TEKKAYA

## Auf einen Blick

- ❖ In Zeiten großer Studierendenkohorten und pandemiebedingter geschlossener Campusse ist das Anbieten von Experimenten in realen Versuchslaboren eine Herausforderung für die Laborbetreibenden.
- ❖ Remote-Labore, also über das Internet kontrollierbare Versuchseinrichtungen, bieten die Möglichkeit, diese Probleme zu lösen. Dazu wurden an der RUB und der TU Dortmund verschiedenste Remote-Labore in den Ingenieurwissenschaften geplant, errichtet und betrieben.
- ❖ Aus Experteninterviews mit den Laborbetreibenden lassen sich die Gelingensbedingungen eine erfolgreiche Erstellung und Betrieb solcher Remote-Labore ableiten. Dabei spielen nicht nur technische, sondern auch personelle und finanzielle Voraussetzungen eine Rolle sowie die didaktisch aufbereitete Einbindung in die Lehre.

## 1 Problemstellung

Remote-Labore sind in Zeiten digitaler Lehre ein entscheidender Grundpfeiler, um die elementar wichtige Laborausbildung in den verschiedenen Ingenieurdisziplinen zu digitalisieren. In diesem Beitrag wird der Begriff Remote-Labore als die Art eines Labors verstanden, bei der Studierende und Lehrende eine reale, physische Maschine oder Apparatur per Internetzugriff ansteuern und so aus der Ferne Experimente durchführen können. Ihren Ursprung haben Remote-Labore in der Elektrotechnik, wo oft skalierte Varianten komplexerer Versuche fundamentale Zusammenhänge anschaulich erfahrbar machen. Im Gegensatz dazu fußt dieser Beitrag auf acht Jahren Planung, Implementierung und Betrieb von Remote-Laboren aus den Bereichen Maschinenbau, Bauingenieurwesen und Elektrotechnik und ermöglicht daher die Bewertung von Remote-Laboren sehr unterschiedlicher Größenordnungen [1, 2]. Somit sind Lehrende aller Ingenieurwissenschaften und anderer Studiengänge angesprochen, in denen physische Labore Teil der Ausbildung bzw. des Studiums sind.

Remote-Labore haben viele Vorteile gegenüber der klassischen Variante, sogenannten Hands-on-Laboren, bei denen die Lernenden physisch in der Laborumgebung anwesend sein müssen. Dominierend ist die Möglichkeit, zeit- und ortsunabhängig Experimente über das Internet durchführen zu können. Hierdurch entfällt die Notwendigkeit, dass der Arbeitsplatz des Experimentierenden zugleich der Ort des realen Labors ist. Nicht zuletzt in Zeiten einer globalen Pandemie gewinnt dieser Aspekt stetig an Bedeutung. Auch zuvor war der Trend des Lernens und Arbeitens aus der Ferne, z. B. von zu Hause aus, schon deutlich sichtbar. Zusätzlich können Remote-Labore Lernenden zur Verfügung gestellt werden, ohne dass diese eine Sicherheitseinweisung für die Maschine und den Arbeitsplatz benötigen. Dies spart Zeit und Personalkosten gleichermaßen. Darüber hinaus entfällt die Verpflichtung, die Nutzenden eines Labors mit einer entsprechenden Sicherheitsausrüstung auszustatten. Hierdurch können über mehrere Jahre des Betriebs und bei immer größeren Studierendenzahlen auch Kosten sowie Personaleinsatz bei der Vorbereitung und Durchführung des Labors eingespart werden. Schließlich kann ein Remote-Labor einen großen Beitrag zur Ressourcenschonung leisten, indem es von mehreren Orten aus gemeinsam genutzt werden kann und so eine Mehrfachnutzung einzelner Maschinen durch unterschiedliche Universitäten ermöglicht.

Den zahlreichen Vorteilen stehen jedoch auch einige Nachteile bzw. Hürden gegenüber, die es zu beachten gilt, sofern man sich als Laborbetreibende\*r für die Remotisierung, d. h. die Überführung eines bestehenden Labors in ein Remote-Labor, entscheidet. Neben dem hohen initialen Zeit- und Personaleinsatz gilt es die Frage zu beantworten, ob Remote-Labore zur Erreichung der definierten Lernziele das bestmögliche Tool darstellen und somit die Anfangsinvestitionen rechtfertigen. Zudem ist es bei Remote-Laboren notwendig, die experimentelle Freiheit zu limitieren, was eine Anpassung der Lernziele erfordern kann. Konkret bedeutet dies, dass die Studierenden in der Remote-Variante nur auf einen eingeschränkten Funktionsumfang des Labors zurückgreifen können.

Um die Entscheidung von Laborbetreibenden, ein Labor in ein Remote-Labor umzurüsten, zu unterstützen und ihnen bei der Planung, Umsetzung und dem Betrieb eines solchen Labors nützliche Hilfestellung zu geben, ist es das Ziel dieses Beitrags, drei Leitfragen rund um das Thema Remote-Labore zu beleuchten:

- I) Was spricht für, was gegen die Remotisierung eines bestehenden Labors? Was sind mögliche Alternativen?
- II) Wenn die Eignung eines Remote-Labors festgestellt wurde, welche Aspekte und möglichen Stolperfallen gibt es beim Aufbau zu beachten?
- III) Wie müssen Einsatz und Betrieb in Lehre und Forschung gestaltet werden, um ein einmal erstelltes Remote-Labor erfolgreich zu erhalten?

Hierzu wurden Experteninterviews von erfahrenen Remote-Laborbetreibenden durchgeführt, die anschließend systematisch analysiert wurden. Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse wurden kategorisiert und als Grundlage zur Beantwortung der o. g. Leitfragen herangezogen.

Im folgenden Kapitel werden die an der Ruhr-Universität Bochum (RUB) und der Technischen Universität Dortmund (TUD) entwickelten und untersuchten Remote-Labore den beteiligten Ingenieurdisziplinen zugeordnet. Anhand zweier exemplarisch ausgewählter Labore wird eine detailliertere Beschreibung des Aufbaus und Einsatzes in der Lehre gegeben. Diese Labore wurden aufgrund ihres fortgeschrittenen Entwicklungsstandes und des vielfältigen erprobten Einsatzes in der Lehre ausgewählt. In Kapitel 3 wird der gewählte Lösungsansatz vorgestellt. Dieser besteht aus der Durchführung von Experteninterviews und einer qualitativen Inhaltsanalyse. Anschließend werden in Kapitel 4 die durchgeführten Experteninterviews ausgewertet und darauf aufbauend die Erfahrungen und Erkenntnisse aus acht Jahren Aufbau und Betrieb verschiedener Remote-Labore geschildert. In Kapitel 5 werden die Erkenntnisse zu elementaren Stichpunkten zusammengefasst, um die drei o.g. Leitfragen zu beantworten.

## 2 Untersuchte Remote-Labore

Für einen kurzen Überblick der im ELLI-Projekt entwickelten Remote-Labore werden für diese zehn Remote-Labore die zugehörigen Fakultäten und Forschungsbereiche in Tabelle 1 vorgestellt. Für die zwei ausgewählten Labore „Teleoperative Prüfstelle zur Materialcharakterisierung“ und „Strömungsmessung“, die aufgrund ihres technologischen Entwicklungsstandes und des vielfältigen Einsatzes in der Lehre ausgewählt wurden, wird nachfolgend eine detailliertere Beschreibung gegeben. Eine umfangreichere Übersicht aller Remote-Labore mit zugehörigen Beschreibungen, Aufgabenstellungen und Ansprechpartnern ist im Internet zu finden [3].

**Tabelle 1:** Übersicht über die entwickelten Remote-Labore

| Fachbereich                      | Labor                                        | Symbol                                                                              | Lehrstuhl                                                                           | Forschungsfeld                                                                        |
|----------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Bau- und Umwelt-ingenieurwesen   | Laborkläranlage                              |  | Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik                                         | Siedlungswasserwirtschaft                                                             |
| Elektro- und Informationstechnik | Fahrsimulator                                |  | Eingebettete Systeme der Informationstechnik                                        | Elektro- und Informationstechnik, Angewandte Informatik                               |
| Maschinenbau                     | Scheitelrollenprüfstand für Elektrofahrzeuge |  | Energiesysteme und Leistungsmechatronik                                             | Elektromobilität                                                                      |
|                                  | Sil-O-Lab                                    |  | Hochfrequenzsysteme, Elektronische Schaltungstechnik und Feststoffverfahrenstechnik | Hochfrequenztechnik, Elektronische Schaltungstechnik<br>Mechanische Verfahrenstechnik |

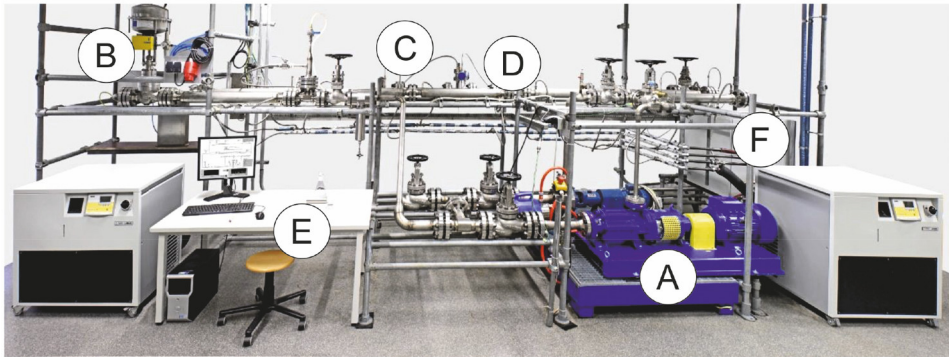
(Fortsetzung Tabelle 1)

| Fachbereich  | Labor                                           | Symbol                                                                            | Lehrstuhl                                                    | Forschungsfeld                                                  |
|--------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Maschinenbau | Strömungs-<br>messung                           |  | Feststoffverfahrens-<br>technik                              | Verfahrenstechnik,<br>Strömungsmechanik,<br>Messtechnik         |
|              | Geräusch-<br>messung                            |  | Industrie- und Fahr-<br>zeugantriebstechnik                  | Getriebetechnik,<br>Akustik, Messtechnik,<br>Signalverarbeitung |
|              | Teleoperative<br>Prüfzelle                      |  | Umformtechnik und<br>Leichtbau                               | Materialcharakterisie-<br>rung in der Umform-<br>technik        |
|              | Temperaturprofil<br>im Wärmeüber-<br>trager     |  | Fluidverfahrenstechnik                                       | Energie- und Verfah-<br>renstechnik                             |
|              | Thermophysika-<br>lische Stoffdaten             |  | Experimentelle Thermo-<br>dynamik der Verfahrens-<br>technik | Verfahrenstechnik,<br>Thermodynamik                             |
|              | Virtuelles Labor<br>für SPS-Pro-<br>grammierung |  | Produktionssysteme                                           | Produktions-<br>automatisierung                                 |

## 2.1 Remote-Labor zur Strömungsmessung am FVT der Ruhr-Universität Bochum

Das Remote-Labor „Strömungsmessung“ dient der Untersuchung des auftretenden Druckverlustes innerhalb der Einbauten einer verfahrenstechnischen Anlage bzw. einer Partikelschüttung. Der Aufbau ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Anlage umschließt ein Volumen von ca. 45 m<sup>3</sup>, ist für einen Druck von 16 MPa und für Temperaturen bis zu 200 °C ausgelegt. Innerhalb der Anlage wird von einem Kreislumpenmodul (A) mit 18 kW Leistung kinetische Energie auf die Strömung übertragen. Die durch diese Energie in Bewegung gesetzte Strömung verliert beim Durchlaufen der Anlage einen Teil ihrer enthaltenen Energie, was als Verringerung des vorliegenden Drucks messbar ist und daher als Druckverlust bezeichnet wird. Dieser Druckverlust tritt in allen Anlagen auf – von allgegenwärtigen Heizungskreisläufen in Gebäuden bis hin zum großen Industriemaßstab eines Chemieparks. Dementsprechend wichtig ist es für Studierende der Verfahrenstechnik, die Auswirkungen von Rohreinbauten auf den Druckverlust und den sich einstellenden Betriebspunkt einer Kreislumpenpumpe zu verstehen. Dazu dienen z.B. die pneumatisch regelbare Drossel (B) sowie die Kugelschüttung (C), die je nach angewähltem Strömungspfad untersucht werden können. Anhand einer Veränderung der Anlagenkennlinie, welche durch die Drossel beeinflusst wird, lernen Studierende die Abhängigkeit des optimalen Betriebspunkts der Pumpe vom Druckverlust kennen. Anhand des Differenz-

drucksensors (D) wird der Druckverlust über der Kugelschüttung gemessen und die Gültigkeit verschiedener Vorhersagemodelle untersucht.



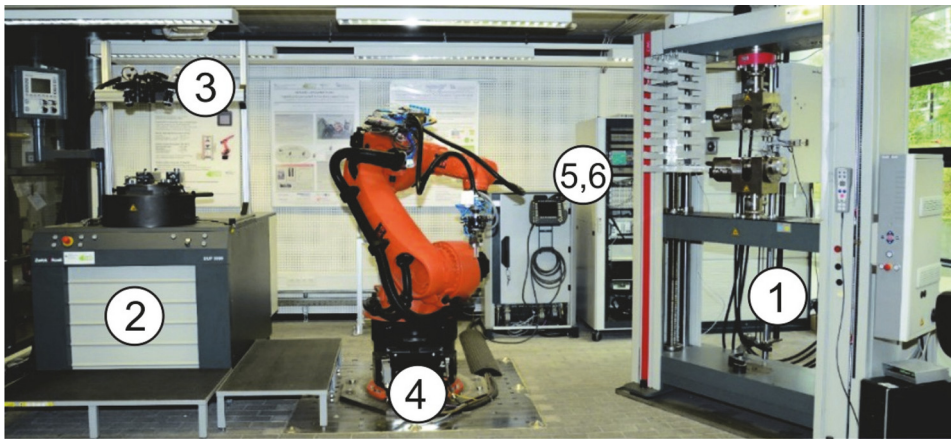
**Abbildung 1:** Remote-Labor „Strömungsmessung“

Der Aufbau wird mittels eines auf dem Labor-PC (E) installierten LabVIEW-2014-Programms gesteuert, das mit einer übergeordneten Nutzer-Verwaltungsplattform verbunden ist und den Aufbau softwareseitig absichert. Entsprechend können Studierende den Strömungsweg und die Leistung der Pumpe nur innerhalb der von der Software vorgegebenen Grenzen beeinflussen. Die Kommunikation zwischen dem Labor-PC und der Anlage erfolgt über ein NI-cDAQ-System, das zur Erfassung und Ausgabe der verschiedenen Mess- und Steuergrößen mit mehreren NI-Modulen bestückt ist. Mittels der im Schaltschrank (F) verbauten Sicherheitstechnik, z. B. in Form einer Watch-Dog-Schaltung zur automatischen Abschaltung, wird die hardwareseitige Absicherung des Prüfstandes realisiert. Zusätzlich wird die Anlage über das Nutzer-Verwaltungssystem vor Fremdzugriffen auf die Software abgeschirmt. Das Labor ist einerseits in einem Messtechnik-Laborpraktikum im Bachelorstudiengang einsetzbar mit dem Ziel, die allgemeine Arbeitsweise von Kreiselpumpen kennenzulernen, andererseits im Masterstudium zur Analyse des Druckverlusts infolge komplexer Strömungsformen, die bspw. in reaktiven Festbettschüttungen entstehen.

## **2.2 Remote-Labor zur Materialcharakterisierung in der Umformtechnik am IUL der TU Dortmund**

Dieses Remote-Labor ermöglicht, wie in Abbildung 2 gezeigt, die Durchführung verschiedener Experimente mit einer Universal-Prüfmaschine (1) für Remote-Zug- und Druckversuche sowie einer Blechprüfmaschine (2) für Näpfchen-Versuche (Tiefziehen). Beide Maschinen und die an ihnen durchführbaren Experimente sind von grundlegender Bedeutung in der Umformtechnik. Sie liefern Materialkennwerte, die für analytische Berechnungen der Prozesskräfte, Computersimulationen oder Bauteilauslegungen genutzt werden. Die Maschinen, der Roboter (4), der die Proben automatisiert in die Maschinen einlegt, und der Mikrocontroller (5), sind durch ein übergeordnetes Steuerungs- und Sicherheitssystem (6) miteinander verbunden, das

auf der Software LabVIEW NXG basiert. Im Falle der Blechprüfmaschine kann das Experiment neben den im Raum verbauten Webcams noch über ein hochauflösendes optisches Messsystem (3) beobachtet und ausgewertet werden. Der Zugriff auf das Remote-Labor erfolgt über eine selbst entwickelte Steuerungs- und Benutzerverwaltungsplattform. Aufgrund der hohen Anzahl an Livestreams musste ein neuer Breitbandanschluss in die Versuchshalle gelegt werden, um die Daten performant verarbeiten zu können. Über den gesamten Entwicklungszeitraum hinweg bestand das multidisziplinäre Team aus Fertigungsingenieuren, Elektrotechnikingenieuren und Automatisierungs- und IT-Spezialisten.



**Abbildung 2:** Automatisierte, teleoperative Prüfszelle zur Materialcharakterisierung

In den Grundlagenvorlesungen des Bachelorstudiums wird das Remote-Labor für Live-Demonstrationen während Vorlesungen und Übungen genutzt. Die Dozierenden erfragen mit Hilfe von Audience-Response-Systemen die von den Studierenden erwarteten Ergebnisse, z. B. die aufzubringende Kraft oder die erreichte Spannung im Bauteil, die dann direkt live überprüft werden. Im späteren Bachelorstudium wird die Remote-Prüfszelle für selbstständig durchzuführende Experimente von den Studierenden direkt genutzt. Hierbei stehen neben Parametereinflüssen der generelle Ablauf und die Auswertung sowie der Umgang mit experimentellen Messdaten im Vordergrund. Dank des Remote-Labors konnte eine solche Form des selbstständigen Experimentierens erstmals im Bachelorstudium verankert werden. Im Masterstudium wird das Remote-Labor im Zuge der Vorbereitung für die internationalen Studierenden genutzt. Sie nutzen das Equipment von ihren Ländern aus, um ihre erste ingenieurwissenschaftliche Aufgabe noch vor ihrer Ankunft in Deutschland zu bewältigen. Über die letzten sieben Jahre gab es daher Zugriffe aus mehr als zwei Dutzend Ländern weltweit.

### 3 Lösungsansatz

Zur Sicherung der Erfahrungen, Herausforderungen und Ergebnisse auf den Gebieten der Erstellung und des Betriebs von Remote-Labore wurde eine systematische Befragung der Laborentwickler\*innen bzw. der aktuellen Laborbetreiber\*innen durchgeführt. In diesen Experteninterviews, in denen die Befragten nicht aufgrund ihrer Person, sondern aufgrund ihres Fachwissens bezüglich des relevanten Fachbereichs befragt werden [4], wurde ein semistrukturierter Interviewleitfaden mit offenen Fragen verwendet. Er wurde unter Einbezug von ehemaligen Studierenden, die jetzt als Mitarbeitende der Lehrstühle arbeiten, optimiert. In einem abschließenden Test wurde der Interviewleitfaden in einem Gespräch mit einem ehemaligen Mitarbeiter, der selbst ein Remote-Labor aufgebaut und Experimente damit durchgeführt hat, erprobt. Die resultierenden fünf Themenfelder des Interviewleitfadens sind in Tabelle 2 aufgeführt. Somit werden alle Phasen von der anfänglichen Planungsphase bis hin zur dauerhaften Implementierung in der Ausbildung abgedeckt. Aufgrund der offenen Fragestellungen wurden immer dann Folgefragen gestellt, wenn nach Meinung der Interviewenden bestimmte Aspekte unerwähnt geblieben waren oder die Antworten weiterer Erklärungen bedurften. Die Interviews wurden sowohl an der RUB als auch an der TUD mit zwei bis drei Interviewpartner\*innen, bestehend aus Professor\*innen und beteiligten Mitarbeitenden, über einen Zeitraum von 60 bis 90 Minuten durchgeführt. Alle Interviews wurden mit einem Diktiergerät aufgezeichnet, transkribiert und mittels der strukturierenden qualitativen Inhaltsanalyse ausgewertet. Dazu wurden im Vorfeld analytische Kategorien gebildet, denen die Interviewinhalte zugeordnet werden konnten. Infolge der Zuordnungen zu den Hauptkategorien wurden weitere thematische Unterkategorien gebildet, um innerhalb der Kategorien Differenzierungen zu ermöglichen. Diese Kategorien blieben jedoch während der Interviews und der Analyse neu entstehenden Kategorien und Themenfeldern gegenüber offen, um eine dynamische Strukturierung zu ermöglichen [5].

**Tabelle 2:** Themenfelder des Interviewleitfadens

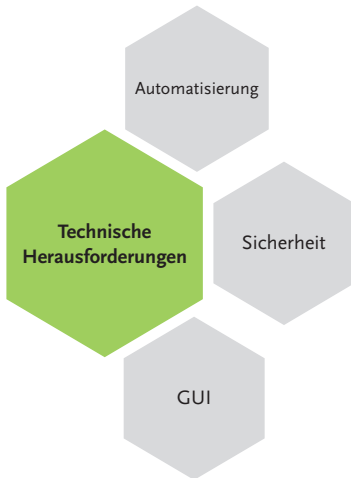
|              |                                                    |
|--------------|----------------------------------------------------|
| Themenfeld 1 | Allgemeine Fragen und Geschichte des Remote-Labors |
| Themenfeld 2 | Planungsphase des Labors                           |
| Themenfeld 3 | Entwicklung und Implementierung                    |
| Themenfeld 4 | Durchführung von Experimenten                      |
| Themenfeld 5 | Schlussfolgerungen und Ausblick                    |

Im Rahmen der durchgeführten Auswertung der Remote-Labore beider Universitäten wurden vier Hauptkategorien erstellt, anhand derer die „Lessons Learned“ gegliedert wurden.

## 4 Auswertung der Experteninterviews

Die Kategorisierung der Ergebnisse erfolgte zuerst gemäß den Bereichen: „Technische Herausforderungen“, „Didaktisches Konzept und Lernziele“ und „Projektmanagement“ [7]. Aufgrund der Untersuchungen an der TUD wurde im Rahmen der dynamischen Analyse die vierte Kategorie „Verstetigungsbedingungen“ hinzugefügt, deren Inhalte nicht durch die drei bestehenden Kategorien abgedeckt wurden. Die Ergebnisse bezüglich der teleoperativen Prü fzelle zur Materialcharakterisierung am IUL der TUD werden nachfolgend vorgestellt und mit den Ergebnissen aus der an der RUB durchgeführten Befragung verglichen. Dadurch werden Gemeinsamkeiten und Unterschiede bei der Erstellung mehrerer Remote-Labore im Vergleich zum Fokus auf ein einzelnes, komplexeres Labors aufgezeigt [6].

### 4.1 Technische Herausforderungen



**Abbildung 3:** Die wichtigsten technischen Herausforderungen bei der Implementierung von Remote-Laboren

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse und Erfahrungen mit der implementierten Technologie vorgestellt. Die wichtigsten technischen Herausforderungen, die in den Interviews benannt wurden, bezogen sich einerseits auf die Automatisierung und Steuerung der Hardwarekomponenten, die zu den Maschinen, Kameras sowie Steuereinheiten gehören, andererseits auf die Softwarekomponenten, die grafische Darstellung des Labors sowie die Sicherheitskonzepte.

Die physischen Komponenten der teleoperativen Prü fzelle wurden aus kommerziell erhältlicher Hardware ausgewählt. Daher wurde die Entwicklung auf die erforderliche Software und Steuerung konzentriert, die in ihrem heutigen Zustand eine mehrjährige Entwicklungszeit beinhaltet. Die Interviewten gaben an, dass die

Programmierung der automatisierten Fernsteuerung, insbesondere an den Kommunikationsschnittstellen zwischen den Geräten, stellenweise durch Ausprobieren erfolgen musste, obwohl die installierten Kommunikationsprotokolle bekannt waren. In diesen Fällen waren die Speicherorte bestimmter Daten auf den vorhandenen Steuergeräten nicht bekannt. Dies führte zu individualisierten und hochkomplexen Systemen, welche die Eigenentwicklung einer Verwaltungsplattform verlangten. Diese neu entwickelte Plattform, getauft HALO – **H**aus der **L**abore, fungiert einerseits als Benutzerverwaltungs- und Zeitplanungssystem und ermöglicht andererseits die Kommunikation mit einer beliebigen Anzahl von Experimenten. Für die Interviewten war vor allem die Sicherheit von Mensch und Maschine von Bedeutung. Dazu wurde das Labor unter hohem Aufwand mit einem Sicherheitssystem zur

Vermeidung von Sach- oder Personenschäden ausgestattet. Die Software limitiert ausführbare Befehle innerhalb sicherer Betriebsgrenzen und genehmigter Bewegungsabläufe und dient der Vermeidung von Sachschäden. Zusätzlich ist eine Notabschaltung implementiert. Hardwareseitig wird ein Laservorhang verwendet, um die Sicherheit von Personen zu garantieren. Dieser ist von der Steuerung getrennt und erlaubt die Verwendung des Labors nur bei einem kontinuierlich eingehenden Signal, sodass ein Ausfall oder Bewegungen in der Nähe der Maschinen eine Notabschaltung auslösen. Nach einer Notabschaltung durch eines der beiden Systeme ist eine Analyse der Fehlerquelle und ein manueller Neustart erforderlich. Dies ist nach Meinung der Experten\*innen ein wichtiges Merkmal, um den unsachgemäßen Weiterbetrieb nach einer Störung zu unterbinden.

Beim Vergleich der Ergebnisse der Experteninterviews beider Universitäten zeigte sich, dass die Komplexität der Remote-Labore eine Herausforderung darstellt. Dabei wurde zwischen der Komplexität der Benutzerschnittstelle und der Komplexität des zugrunde liegenden Steuerungssystems unterschieden. Um ein stabiles System zu schaffen, mussten an beiden Universitäten Einschränkungen und Vereinfachungen vorgenommen werden. Besonders deutlich wurde dies bei einigen Laboren an der RUB, die ursprünglich konzipiert wurden, um „übliche“ Experimente ferngesteuert durchführen zu können. Diese mussten im Vergleich zu den vor Ort durchgeführten Experimenten verändert bzw. in ihrem Umfang reduziert werden. Das Labor an der TUD wurde explizit aufgrund seiner leichteren Remotisierbarkeit gewählt, da der Messvorgang bereits hochautomatisiert war, sodass fast keine sensorische Rückmeldung verloren ging und es dadurch weniger Anpassungen gegenüber dem realen Labor bedurfte. Dies erlaubte den Erhalt des hohen Realitätsgrades und des Lernpotentials. An der RUB sind die meisten Labore auf eine gewisse Abstraktion der GUI angewiesen, während an der TUD eine GUI gewählt wurde, die den Studierenden unter Einbezug von Videostreams und experimenteller Rohdaten eine möglichst realistische Laborerfahrung ermöglichen sollte. Rückblickend gaben die meisten an der RUB befragten Expert\*innen an, sie würden heute auch empfehlen, mehr sensorisches Feedback in die Interfaces zu integrieren. An beiden Universitäten wurden die implementierten Sicherheitskonzepte sowohl auf der Hardware- als auch der Softwareseite umgesetzt. Für alle Labore erlegten diese Konzepte dem Versuchsaufbau Einschränkungen und Restriktionen auf, um die Sicherheit und Stabilität im Remote-Betrieb zu gewährleisten. Die Stabilität der Systeme wurde jeweils durch eine Einschränkung der auswählbaren Parameter erreicht.

## 4.2 Didaktisches Konzept und Lernziele



**Abbildung 4:** Die wichtigsten didaktischen Herausforderungen bei der Implementierung von Remote-Laboren

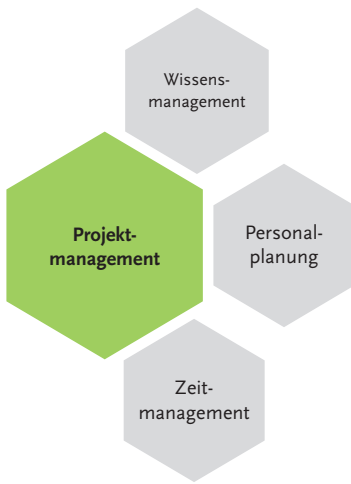
Die in diesem Kapitel vorgestellten didaktischen Elemente berücksichtigen die Einbeziehung der Perspektive der Studierenden, die Zusammenarbeit mit Fachdidaktikern, die für die Lernzielerreichung erforderliche grafische Darstellung, die Vorbereitung der Studierenden auf die Experimente sowie die Nutzung des Remote-Experiments als Lehrmittel.

Die Zielgruppe des Remote-Labors an der TUD sind primär Bachelor-Studierende der Fachrichtungen Maschinenbau, Maschinenbauinformatik, Logistik und Wirtschaftsingenieurwesen. Die Perspektive der Studierenden wurde nur durch die Reflexion und Erfahrung der Entwicklerteams berücksichtigt, da die meisten Mitglieder des Entwicklungsteams mindestens einen vergleichbaren Studiengang belegt hatten. Dennoch empfahl das Team der TUD, mindes-

tens für den letzten Schliff der Entwicklung die Meinung der Studierenden einzuholen. Von Anfang an unterstützte ein fachdidaktisches Team das technische Team, indem es Lernziele analysierte und den Nutzen des Remote-Labors durch eine kontinuierliche Evaluation erhöhte. Dabei wurde die Fähigkeit der eigenständigen Planung und Auswertung von Experimenten zur Beantwortung wissenschaftlicher Fragen als wichtigstes Lernziel definiert, anstatt die Bedienung der Geräte in den Vordergrund zu stellen. Diese letztgenannte Fähigkeit setzt eine haptische Mensch-Maschine-Interaktion voraus und kann nur durch Hands-on-Labore erworben werden. Für die Remotisierung des Labors wurde ein Aufbau gewählt, der hinsichtlich des Funktionsumfanges nur geringfügige Unterschiede zum Hands-on-Labor aufweist. Der Wegfall der manuellen Interaktion lenkt die Konzentration auf die Lernziele, indem nur Aktionen ermöglicht werden, die zur Erreichung dieser Ziele förderlich sind. Darüber hinaus wurde die GUI so getreu wie möglich an das praktische Experiment angelehnt, um einen realistischen Eindruck vom „Arbeiten im Labor“ zu vermitteln. Den Studierenden stehen für die Nutzung des Labors nur begrenzte Zeitfenster zur Verfügung; daher müssen die Gruppen einen Versuchsplan aufstellen und relevante Daten im Team kombinieren, sodass das Erreichen des Lernziels sichergestellt ist. Alle Interviewten empfahlen, erforderliches Hintergrundwissen aus den Vorlesungen vor Beginn der Experimente in einem digitalen Quiz zu überprüfen. Hierzu wird zusätzlich vor der Durchführung des Experiments eine Einführung in die Steuerungs- und Benutzerverwaltungsplattform und die GUI durch Präsentationen und Video-Tutorials angeboten. An der TUD werden diese Einführungen zukünftig durch eine interaktive Demo ersetzt, um Studierende mit der Bedienung des Remote-Labors vertraut zu machen.

Die anfängliche Zielgruppe für das Remote-Labor an der TUD waren ausschließlich Studierende im Bachelor-Studiengang, während die anfängliche Zielgruppe an der RUB auch Studierende im Master-Studiengang einschloss. Das Remote-Labor an der TUD wurde jedoch aufgrund der kleineren Gruppengröße zunächst zu Testzwecken in einem internationalen Master-Vorkurs genutzt. Die Teams an beiden Universitäten bezogen nur selten die Perspektive der Studierenden für die Erstellung der GUI ein – dies führte rückblickend zu einer Erhöhung des Arbeitsaufwandes. Ein Unterschied wurde bei der Zusammenarbeit mit Fachdidaktiker\*innen festgestellt. Die Mitarbeiter\*innen der RUB gaben an, dass sie selbst ihre Expertise in der Lehre für ausreichend hielten und das erforderliche Verständnis für hochkomplexe Messtechniken für die Entwicklung geeigneter Lehransätze am wichtigsten sei. Dementsprechend wurden kaum Didaktiker\*innen zur Erstellung des didaktischen Konzepts einbezogen. Demgegenüber arbeitete das Entwicklungsteam an der TUD von Beginn des Projekts an eng mit einem Team von Fachdidaktiker\*innen derselben Universität zusammen. Das didaktische Team unterstützte bei der Auswahl der Experimente, der Definition von Lernzielen und der Formulierung von Aufgaben sowie beim generellen Verständnis der Unterschiede zwischen vor Ort durchgeführten Experimenten und Remote-Experimenten. Der erforderliche Grad an Automatisierung und Benutzerfreundlichkeit war an beiden Universitäten ähnlich hoch. Dies erlaubt es erfahrenen Internetnutzer\*innen, Experimente durchzuführen, ohne die beteiligten Mechanismen des Remote-Labors an sich verstehen zu müssen. An der RUB ergab sich daher teilweise im Nachhinein die Notwendigkeit, die Komplexität einiger Laboraufbauten zu reduzieren. Die ursprünglichen Lernziele wurden angepasst, und der Schwerpunkt verlagerte sich weg vom Verständnis und der Durchführung einer Messtechnik hin zum Erzeugen von experimentellen Daten und die anschließende Auswertung. Letztere sind Lernziele, die an der TUD bereits zu Beginn für die schon hoch automatisierte Ausrüstung und weniger anspruchsvollen Messtechniken definiert wurden. Als letzter Punkt wurde von einigen Entwicklern an der RUB geäußert, es sei unwahrscheinlich, dass ein Remote-Experiment ein vor Ort durchgeführtes Experiment vollständig ersetzen könne. Als Gründe wurden die Bedeutung der umfassenderen, aber meist unbemerkten Sicherheitskonzepte, die fehlende Förderung manueller Fertigkeiten und ein falsches Zeitempfinden genannt. Das Team an der TUD betrachtet sein Labor als validen und umfassenden Ersatz, der jedoch am besten in Kombination mit zusätzlichen praktischen Experimenten genutzt werden kann, da nur so alle Lernziele bestmöglich erreicht werden können.

### 4.3 Projektmanagement



**Abbildung 5:** Die wichtigsten Herausforderungen für das Projektmanagement bei der Implementierung von Remote-Laboren

Erkenntnisse zum Projektmanagement, d.h. insbesondere zur Teamarbeit, zum Wissensmanagement, zum Zeitmanagement und zu unvorhergesehenen Verzögerungen, werden in diesem Abschnitt zusammengefasst.

Die Auswertung aller Interviews zeigte, dass sich während der Entwicklungsphasen sowohl an der RUB als auch an der TUD die Teamarbeit weg von überwiegend individueller Arbeit hin zu gemeinsamer Projektarbeit wandelte. Regelmäßige Teamsitzungen wurden genutzt, um aktuelle und anstehende Entwicklungen zu besprechen. Dies hat sich besonders in Zeiten als nützlich erwiesen, in denen Mitarbeiter\*innen wegen auslaufender Verträge das Team verlassen oder andere sich ihm neu angeschlossen haben. Darüber hinaus haben einige Teammitglieder nahezu von Anfang an das Pro-

jekt bearbeitet. Das so verfügbare Wissen erlaubte es, nur erfolgreiche Ideen zu dokumentieren und Ideen auszulassen, die sich wegen ihres zu hohen Aufwandes als nicht realisierbar erwiesen hatten. Das Zeitmanagement wurde oft durch externe Faktoren beeinträchtigt, was manchmal die Reduzierung selbst gesteckter Ziele erforderte, um den Zeitplan einzuhalten. Viele Interviewte gaben an, dass insbesondere nachträgliche Anpassungen des Sicherheitskonzepts zu Verzögerungen im Projektplan geführt hatten. Nach Angaben der Befragten wurde ein volles Arbeitsjahr benötigt, bis das jeweilige Labor mit seinen Basisfunktionen genutzt werden konnte. Im Hinblick auf das Gesamtprojektmanagement musste stets die Verhältnismäßigkeit des Aufwands jedes Entwicklungsschritts sorgfältig geprüft werden. Änderungen an ursprünglichen Konzepten waren nur durchführbar, wenn sie für eine hohe Anzahl von Remote-Experimenten einen reduzierten Aufwand während des Betriebs ermöglichten, sich also rechneten. Teilweise konnte die Entwicklung in Form von wissenschaftlichen Abschlussarbeiten ausgelagert werden, wodurch der Aufwand aufseiten der Mitarbeitenden reduziert wurde. Dabei erhielten Studierende die Möglichkeit, an einem realen Projekt zu arbeiten und zusätzliche Fähigkeiten im interdisziplinären Kontext von Wissenschaft, Didaktik und Industrie 4.0 zu erlangen.

Bei allen Laboren kam es aufgrund unvorhergesehener Herausforderungen in der Entwicklungsphase zu Verzögerungen im ursprünglichen Zeitplan. Die Anforderungen an die Entwicklung von Hardware- oder Softwarelösungen wurden von den Forschungsmitarbeitern oft unterschätzt und führten bei den meisten Projekten zu erheblichen Verzögerungen. Für einige der komplexeren Laboratorien an der RUB mussten sowohl die Lerninhalte als auch die Hardware während der Entwicklung mehrfach angepasst werden. Die Wahl eines technisch und didaktisch geeigne-

ten Labors an der TUD machte diese Iterationen überflüssig. Der Aufbau eines dezentralen Labors erfordert generell ein interdisziplinäres Zusammenwirken von Kompetenzen aus dem jeweiligen Fachgebiet jener Ingenieurdisziplin, in der das Remote-Labor genutzt werden soll, mit der Elektro- und Regelungstechnik, Automatisierungstechnik sowie der Informatik. Die Befragten erwähnten oft, dass deshalb zusätzliches Fachwissen erworben werden musste. In den Interviews an der RUB wurde empfohlen, dass mindestens eine Person das Projekt während der gesamten Entwicklungszeit betreut und daran arbeitet, um Kenntnisse in den erforderlichen Bereichen zu erwerben und zusätzlich als eine Form der Dokumentation zu dienen. Als Gegenbeispiel dient das Remote-Labor an der TUD, da das gemischte Team hier aus Maschinenbauern, Informatikern sowie Automatisierungs- und Elektrotechnikern keine derartigen Probleme meldete. Das multidisziplinär aufgestellte Team ermöglichte einen einfacheren Aufbau der Experimente und eine striktere Konzentration auf das Steuerungssystem und didaktische Aspekte. Für alle Labore erwähnten die Befragten, dass Standardverfahren für die Dokumentation ungeeignet waren und angepasst werden mussten.

#### 4.4 Verstetigungsbedingungen



**Abbildung 6:** Die wichtigsten Verstetigungsbedingungen bei der Implementierung von Remote-Laboren

Dieser vierte und letzte Absatz enthält die Erkenntnisse, die aus dem Übergang zu einem dauerhaft betriebenen und gewarteten Remote-Labor gewonnen wurden sowie andere nützliche Aspekte hinsichtlich der Entwicklung und Synergien.

Das voll ausgebaute Remote-Labor, das anfänglich einen enormen Aufwand erforderte, reduziert die Arbeitsbelastung des Personals und die Betriebskosten erheblich, da keine Sicherheits- und Betriebsanweisungen und keine persönliche Schutzausrüstung für die Teilnehmenden erforderlich sind. Aufgrund seiner Einschränkungen bezüglich der Sicherheitskonzepte und Lernziele erwies sich das Remote-Labor als alleiniges Mittel zur Durchführung wissenschaftlicher Forschung jedoch als ungeeignet. Dennoch wird die Ausrüstung in ihrer Vor-Ort-Version, die nur geringfügige Modifikationen erfordert, im großen Umfang für wissenschaftliche Forschung und Studienarbeiten genutzt. Dadurch entstehen Synergieeffekte bzw. ein „zweiter Anwendungsfall“. Dieser trägt dazu bei, das Remote-Labor über die Finanzierungsphase hinaus zu erhalten, da die Geräte auch in ihrer normalen, nicht ferngesteuerten Betriebsart einen wissenschaftlichen Mehrwert generieren. Daher müssen Vereinbarungen zwischen Auszubildenden und Forschenden bezüglich der Abstimmung von Remote-Experimenten und wissenschaft-

licher Forschung getroffen werden. Dazu muss die Remote-Konfiguration des Labors nach jeder Forschungsphase wiederhergestellt werden. Die Interviewten empfehlen, das Wechseln zwischen der Remote-Konfiguration für die Ausbildung von Studierenden und der regulären Konfiguration zum Einsatz im wissenschaftlichen Forschungsbetrieb, von Anfang an zu berücksichtigen. Nach ihrer Meinung sollte die Beantragung von Forschungsgeldern mit der Nutzung im Ausbildungskontext kombiniert werden, um die Erfolgsaussichten zu erhöhen. Die Entwicklung eines Remote-Labors auf der Basis bereits vorhandener Ausrüstung sollte sich auf solche Geräte konzentrieren, die wissenschaftlich genutzt werden, gleichzeitig aber eine ausreichende Stillstandzeit aufweisen und über Steuereinheiten verfügen, die leicht für die Remote-Steuerung konfiguriert werden können.

## 5 Lessons Learned

Die Erkenntnisse aus acht Jahren Entwicklung, Betrieb und Beforschung von Remote-Laboren an den Standorten Dortmund und Bochum werden im Folgenden zusammengefasst. Als Grundlage dient die Auswertung der Experteninterviews, die im vorangegangenen Kapitel erläutert wurden. Dabei wird auf die drei eingangs definierten Leitfragen Bezug genommen. Die allgemeingültigen Vor- und Nachteile von Remote-Laboren wurden bereits im ersten Kapitel behandelt.

*Was spricht für, was gegen die Remotisierung meines bestehenden Labors? Was sind mögliche Alternativen?*

Für die Remotisierung spricht, wenn ...

- die Lernziele klar definiert und durch Wegfall der physischen Anwesenheit nicht gefährdet sind. Es sollten frühzeitig Ingenieurdidaktiker\*innen konsultiert werden, um diese Diagnose zu bestätigen und ggf. beim Feinschliff der Lernziele zu unterstützen.
- Sicherheitsbedenken seitens der Studierenden in Bezug auf die physische Durchführung der Labore vorliegen.
- Ressourcen durch gemeinsame, ortsübergreifende Nutzung der Labore gespart werden sollen.
- die Kapazität des klassischen Labors mit ca. 6 Stunden/Tag nicht ausreicht bzw. Personalengpässe bestehen (durch einen 24-Stundentag im Remote-Betrieb wird die Kapazität ohne zusätzliches Personal vervierfacht).
- die Maschine bzw. das Labor entsprechende technische Voraussetzungen liefert, z. B. Schnittstellen. Daher sollten neue Remote-Labore mit Hardware entwickelt werden, die bereits viele Funktionen für einen Remote-Betrieb unterstützt. Es muss generell bewertet werden, wie hoch der technische Aufwand der Remoti-

sierung ist. Die Automatisierung der Prozesskette muss auch das Nachlegen, Einlegen und Herausnehmen von Proben(-material) beinhalten.

- ❖ finanzielle Mittel für Personal (bspw. Entwickler\*innen) sowie Hard- und Software vorhanden ist und eine Person mit dauerhafter Position der Entwicklung vorsteht. Nutzen Sie ggf. bei der Beantragung von Mitteln das Einsatzszenario als Remote-Labor als besonderen Synergieeffekt zwischen Lehre und Forschung: Maschinen können dank eines Remote-Labors gleichzeitig für die Forschung im Nicht-Remote-Betrieb und die Lehre im Remote-Betrieb genutzt werden.

Gegen die Remotisierung spricht, wenn ...

- ❖ die Maschine bzw. das Labor nicht fernsteuerbar ist oder nicht zu jedem Zeitpunkt ein Übergang in einen sicheren Betriebszustand gewährleistet werden kann, z. B. bei einem Stromausfall oder Netzwerkproblemen.
- ❖ der Aufwand und die Kosten gegenüber den Vorteilen überwiegen. Damit sind auch potentielle Einsparungen im Dauerbetrieb gemeint, sofern sich das Remote-Labor mit deutlich weniger Personalaufwand betreiben lässt.
- ❖ es eine herunterskalierte Version bzw. Variante des Versuchs gibt. Dann sollte vorzugsweise die skalierte Variante als Basis des Remote-Labors dienen, da hierdurch hohe Anschaffungskosten gespart werden. Oft ist die Anschaffung inkl. Remotisierung einer skalierten, kleinen Version eines Versuches immer noch günstiger als die Remotisierung der großen, bestehenden Anlage. Hierdurch wird die Lernzielerreichung ebenfalls nicht gefährdet.

Alternativen sind:

- ❖ eine Videodatenbank von Versuchen an realen Maschinen. Dieses Konzept ist nur dann zu erwägen, wenn die Lernziele eindeutig keine unerwarteten Ergebnisse voraussetzen sowie keine Anforderungen an das Experimentieren (im analogen oder digitalen Raum) haben.
- ❖ die Live-Übertragung des Experimentierenden, welche\*r den Versuch durchführt und z. B. mit Hilfe einer HoloLens einen Videostream erstellt, der aufgezeichnet wird. Über ein Audio-Interface können die Studierenden dem bzw. der Experimentierenden dann etwa Anweisungen zu gewünschten Parametersätzen geben. Aufgrund der Erfahrung der Lehrperson wird ein sicherer Betrieb der Anlage gewährleistet. Die Interaktion der Studierenden mit dem Versuchsstand ist in diesem Szenario nicht mehr zeitunabhängig, da nur über den Livestream interagiert werden kann. Dennoch entfallen jedwede Entwicklungskosten zur Remotisierung des Labors. Zudem entfällt der Aufwand, eine Videodatenbank im Vorfeld der Veranstaltung zu erstellen. Die aufgezeichneten Streams können über mehrere Jahre hinweg zu einer Videodatenbank zusammengeführt werden. Die Ortsunabhängigkeit ist damit weiterhin gegeben.

*Wenn die Eignung eines Remote-Labors festgestellt wurde, welche Aspekte und mögliche Stolperfallen gibt es beim Aufbau zu beachten?*

- Das Sicherheitskonzept für den Remote-Betrieb muss frühzeitig mit der Universität in Bezug auf Arbeitssicherheitsaspekte kommuniziert werden. Es sollte Sicherheitsmechanismen auf der Hard- und Softwareebene umfassen, um Anlagen- sowie Personensicherheit zu gewährleisten. Entsprechende IT-Security zur Vermeidung einer mutwilligen Fehlbedienung muss heutzutage mitbedacht werden.
- Es sollte geprüft werden, ob die zu treffenden Sicherheitsmaßnahmen den Umfang des Remote-Labors einschränken, z. B., weil bestimmte Features nicht per Remote-Zugriff angeboten werden können oder dürfen. Ein Beispiel ist etwa die Nutzung von Hochtemperatur-Versuchen, die bei Fehlbedienung eine erhebliche Gefahr für die Maschinen darstellen und generell Brandgefahr bedeuten können.
- Das Remote-Labor muss in der Lage sein, sich selbstständig in einen sicheren Grundzustand zu bringen, sobald es durch Probleme bei der Nutzung zu einer Notabschaltung gekommen ist. Es kann zudem überlegt werden, nach einer Notabschaltung eine manuelle Intervention erforderlich zu machen, um einen Störbericht zu erstellen und zukünftig Fehlervermeidungsstrategien zu implementieren.
- Eine Reduktion der von den Nutzenden wählbaren Prozessparameter bzw. die generelle Simplifizierung des Versuchsstands erhöht insgesamt die Prozessstabilität beim Remote-Betrieb, da weniger Faktoren berücksichtigt werden müssen. Dadurch wird auch erheblicher Arbeitsaufwand bei der Erstellung des Sicherheitskonzeptes sowie der Implementierung eingespart. Dieser Aspekt muss aber im Einklang mit den definierten Lernzielen abgestimmt werden.
- Die Benutzeroberfläche sollte möglichst viele Informationen des realen Labors widerspiegeln können. So sollten neben einer Liveübertragung der relevanten Messgrößen auch ein Video- sowie Audiostream zur Verfügung gestellt werden. Dies erhöht die Akzeptanz der Studierenden nachhaltig und erhöht so den Ausblick, Lernziele erfolgreich zu erlangen. Zugleich sollte die Benutzeroberfläche so gestaltet werden, dass sie die Erreichung der Lernziele unterstützt. Durch gezielte Simplifizierung gegenüber der realen Bedienoberfläche können beispielsweise unerfahrene Anwendende unterstützt werden.
- Die Perspektive der späteren Zielgruppe sollte von Anfang an mitberücksichtigt werden. Dies umfasst das Design der Benutzeroberfläche, aber auch die generelle Einbettung des Remote-Labors in das Lehr-/Lernszenario. Es ist von Vorteil, wenn die entwickelnden Personen früher Mitglieder der Zielgruppe waren.
- Mindestens eine Person sollte während der gesamten technischen Entwicklung an dem Projekt beteiligt sein, um eine effektive Wissensvermittlung und -dokumentation des Projektes zu gewährleisten.
- Es wird empfohlen, zunächst eine einfache Version des Remote-Labors mit reduzierten Basisfunktionen zu erstellen und anzubieten. Diese kann beispiels-

weise von den Lehrenden in Vorlesungen und Übungen integriert oder von kleinen Studierendengruppen für spezielle Anwendungszwecke genutzt werden. Komplexere Aspekte sollten dann schrittweise unter kontinuierlichem Feedback der Studierenden implementiert werden. Bei ausreichendem Entwicklungsfortschritt und stabilem Betrieb des Remote-Labors kann es dann einer zunehmenden Anzahl von Studierenden angeboten werden, z. B. in Rahmen von Laborpraktika.

- ❖ Um Funktionen der Hardwaresteuerung und Laborverwaltung getrennt entwickeln zu können, sollte ein Benutzer- und Versuchsdatenmanagement verwendet werden, analog zur HALO-Plattform. Diese wird als Open-Source-Plattform anderen Betreibenden zur Verfügung gestellt.
- ❖ Entwicklungsschritte können an Studierende mittels Abschlussarbeiten ausgelagert werden: An der Schnittstelle zwischen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik erleben Studierende anregende Themenfelder im Bereich Industrie 4.0. Gleichzeitig werden dadurch Entwicklungskosten gesenkt.

*Wie müssen Einsatz und Betrieb in Lehre und Forschung gestaltet werden, um ein einmal erstelltes Remote-Labor erfolgreich zu erhalten?*

- ❖ Kontinuierliche Konsultation der Ingenieurdidaktiker\*innen zur Sicherstellung eines erfolgreichen Einsatzes in der Lehre.
- ❖ Nahtlose Integration in das geplante Lehr-/Lernszenario.
- ❖ Ist der Zugriff pro Studierenden zeitlich begrenzt (meist der Fall), empfiehlt sich ein Demo-Modus, in dem sich die Studierenden vorab mit der Benutzeroberfläche vertraut machen können.
- ❖ Kommunikation der Lernziele, die direkt oder indirekt an das Remote-Labor geknüpft sind. Demgegenüber können auch offen die Lernziele kommuniziert werden, die eben nicht durch das Remote-Labor abgedeckt werden können.
- ❖ Kommunikation der Einschränkungen gegenüber dem echten Labor: Welche Prozessparameter sind wählbar und welche nicht? Hierdurch können die Studierenden ihren Zeitslot bestmöglich vorbereiten.
- ❖ Das Remote-Labor bzw. seine Maschinen sollten stets auch für Forschungszwecke genutzt werden; so werden Stillstandzeiten reduziert.
- ❖ Nationale und internationale Promotion des Remote-Labors: Die Community freut sich über jedes neue Mitglied! Die Lehre wird somit auch außerhalb des eigenen Lehrbetriebs verbessert.

Remote-Labore sollten allgemein als ein modernes didaktisches Werkzeug gesehen werden, welches das Spektrum in der Lehre erheblich bereichern kann, sofern es korrekt angewendet wird. Dies gilt insbesondere dann, wenn Remote-Labore den Studierenden ergänzend zu klassischen Hands-on-Laboren zur Verfügung stehen. Zugleich spielen insbesondere komplexe Remote-Labore dann ihr volles Potential aus, wenn sie in einer Doppelfunktion für Forschung und Lehre agieren. Dies gewährleistet den langfristigen Erhalt des Remote-Labors und reduziert zugleich die Stillstandszeiten der Anlagen.

## Literatur

- [1] S. C. Frerich, T. Meisen, A. S. Richert, M. Petermann, S. Jeschke, W. Wilkesmann, A. E. Tekkaya, *Engineering Education 4.0: Excellent Teaching and Learning in Engineering Sciences* (English and German Edition). Springer, 2016.
- [2] J. Grodotzki, T. R. Ortelt, A. E. Tekkaya, “Remote and Virtual Labs for Engineering Education 4.0 – Achievements of the ELLI project at the TU Dortmund University”, *Procedia Manufacturing*, Vol. 26, pp. 1349–1360, 2018.
- [3] R. Kuska (2016). *ELL-ELLI Lab Library* [Online]. Available: <http://www.elli-lab-library.de/index.php/de/>.
- [4] R. Kaiser, *Qualitative Experteninterviews: Konzeptionelle Grundlagen und praktische Durchführung (Elemente der Politik)* (German Edition) (2014. Aufl.). Springer VS, 2014.
- [5] P. Mayring, *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken* (11., aktual. und überarb. Aufl.). Beltz Verlag, 2010.
- [6] D. Kruse, S. Frerich, M. Petermann, T. R. Ortelt, A. E. Tekkaya, “Remote labs in ELLI: Lab experience for every student with two different approaches”. In *2016 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 2016, pp. 469–475. <https://doi.org/10.1109/educon.2016.7474595>.
- [7] N. Strenger, S. C. Frerich, “How To Design Digitalized Laboratories? Lessons Learned From Implementing Virtual and Remote Labs”, *Proceedings of the 17th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation* (1. Aufl.). Springer Publishing, 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-52575-0>.