

# Community Working Group „Remote-Labore in Deutschland“: Projekte, Gemeinsamkeiten, Unterschiede

TOBIAS R. ORTELT, CLAUDIUS TERKOWSKY

## Abstract

Seit vielen Jahren werden weltweit Remote-Labore zur Unterstützung der Lehre in unterschiedlichsten Bildungseinrichtungen entwickelt. Remote-Labore können ein orts- und zeitunabhängiges Experimentieren über das Internet ermöglichen und dienen sowohl zur Verbreitung vor Ort nicht verfügbarer Laborangebote als auch zur Flexibilisierung der klassischen Präsenzlehre. Die Community Working Group (CWG) „Remote-Labore in Deutschland“ ist ein 2018 mit Unterstützung des Hochschulforums Digitalisierung (HFD) gegründeter informeller Zusammenschluss von derzeit 15 deutschen Hochschulen bzw. Einrichtungen, die es sich zum Ziel gesetzt haben, die Entwicklung und Verbreitung von Remote-Laboren insbesondere in Deutschland zu unterstützen und zu professionalisieren. Der Beitrag gibt hierzu einen Überblick über einige aktuelle Entwicklungsprojekte von Remote-Laboren im Kontext der CWG. Hauptziel ist eine erste Analyse von Gelingensbedingungen und Misserfolgskategorien für eine möglichst nachhaltige Entwicklung von Remote-Laboren für die Lehre. Hierzu werden exemplarisch fünf aus dem Kontext der CWG stammende Remote-Labore mittels verschiedener als kritisch identifizierter Kategorien analysiert. Der Beitrag mündet in eine erste Zusammenschau von Misserfolgskategorien und Gelingensbedingungen für künftige Entwicklungsprojekte und schließt mit einem kurzen Ausblick in die Zukunft der Community Working Group „Remote-Labore in Deutschland.“

**Schlüsselwörter:** Remote-Labore, Experiment, Netzwerke, Digitale Lehre, Labor

## 1 Einleitung

Seit mehr als dreißig Jahren ermöglicht die weltweite Entwicklung und Bereitstellung von Remote-Laboren Lernenden der ingenieur- und naturwissenschaftlichen Fächer in unterschiedlichsten Bildungseinrichtungen ein orts- und zeitunabhängiges Experimentieren über das Internet. Die Bedienung von realen Labor- und Versuchsaufbauten wird dabei mittels geeigneter Hard- und Software automatisiert und interaktiviert. Durch entsprechende Software und weiterer Hardware erfolgt dann der Zugriff durch einen entsprechenden Webdienst. Im Vergleich zu virtuellen Laboren, die rein computer-generierte Simulationen von Laboren darstellen, bedienen

Remote-Labore sich nach wie vor physisch real vorhandener Laborgeräte und liefern dadurch mit ihnen erzeugte reale Messergebnisse und Messreihen. Der eigentliche Versuchsvorgang kann aber über das Internet von praktisch überall und zu jeder Zeit live oder asynchron durchgeführt werden (Ortelt, Sadiki et al., 2016). Inzwischen gibt es weltweit eine Vielzahl an Remote-Labor-Entwicklungen und Systemen, die für die Lehre entwickelt wurden (Auer et al., 2018; Terkowsky, May et al., 2019). In den letzten Jahren entstanden auch in Deutschland an verschiedenen Standorten wieder neue Remote-Labore. Diese in der Regel drittmittelfinanzierten Entwicklungen, insbesondere ihr nachhaltiger Regelbetrieb in der Lehre, sind aber kein Selbstläufer, wie eine Vielzahl nach der Förderphase nicht mehr weiterverfolgter Projekte zeigt.<sup>1</sup> Es bedarf in der Regel umfassender technischer, organisatorischer und labor-didaktischer Expertise, um an der unerwarteten Komplexität des Entwicklungsproblems nicht gänzlich zu scheitern oder nicht unnötig Ressourcen und Mühen beim „reinventing the wheel“ zu verbrauchen – also etwa der Entwicklung von für den Betrieb notwendiger Soft- und Hardware, die bereits von anderen entwickelt und für den Alltagsinsatz hinreichend standardisiert worden ist.

Während sich international seit geraumer Zeit unterschiedliche Organisationen wie etwa die IEEE Education Society<sup>2</sup>, die International Association of Online Engineering (IAOE)<sup>3</sup>, das Global Online Laboratory Consortium (GOLC)<sup>4</sup>, die VISIR Federation<sup>5</sup> innerhalb der IAOE oder LabsLand<sup>6</sup> als Spin-off der Universität von Deusto, ansässig in Bilbao (Spanien) und in Palo Alto (Kalifornien) mit der Entwicklung, Verbreitung, Ökonomisierung und Professionalisierung von Remote Laboren im Bildungsbereich befassen, fehlen solche Akteure bislang in Deutschland. Die Förderung, Weiterentwicklung, Professionalisierung und Verbreitung von Remote-Laboren gehört deshalb zu den Zielen der Community Working Group „Remote-Labore in Deutschland“, einem bislang informellen Zusammenschluss von derzeit 15 deutschen Hochschulen und Einrichtungen. Die Gründung erfolgte im Dezember 2018 während eines ersten gemeinsamen Treffens an der Technischen Universität Dortmund und wurde vom Hochschulforum Digitalisierung (HFD) finanziell unterstützt.<sup>7</sup>

Da viele Entwicklungsprojekte schon an einer unzureichenden technischen und darauf bezogenen organisatorischen Planung scheitern, oft aus Mangel an entsprechendem Know-how, zielt der folgende Beitrag darauf ab, eben genau in diesen beiden Feldern grundlegende Gelingensbedingungen und Misserfolgskriterien mittels einer ersten kategoriebasierten Analyse von für den Betrieb von Remote-Laboren als grundlegend erachteten technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen

---

1 Vgl. u. a. eine Keynote von David Boehringer vom TIK der Universität Stuttgart während des ELLI-Gesamttreffens im Dezember 2018.

2 IEEE Education Society: <https://ieeeducationsociety.org/>.

3 IAOE: [http://online-engineering.org/IAOE\\_about.php](http://online-engineering.org/IAOE_about.php).

4 GOLC: [http://online-engineering.org/GOLC\\_about.php](http://online-engineering.org/GOLC_about.php).

5 VISIR Federation: [http://online-engineering.org/VISIR-Federation\\_about.php](http://online-engineering.org/VISIR-Federation_about.php).

6 LabsLand: [www.labsland.com](http://www.labsland.com).

7 Die Veröffentlichung „Die digitale Zukunft des Lernens und Lehrens mit Remote-Laboren“ der CWG erscheint in Kürze in einem Sammelband des Hochschulforums Digitalisierung.

am Beispiel von fünf Laboren aus der CWG zu ermitteln. Hierzu werden in Abschnitt 2 zunächst alle derzeitigen Mitglieder der Community Working Group „Remote-Labore in Deutschland“ vorgestellt, danach noch einmal grundlegende Eigenschaften von Remote-Laboren skizziert, in der Folge ein kursorischer Überblick über vergangene und gegenwärtige Entwicklungen von Remote-Laboren in Deutschland gegeben und kurz erste wichtige Erfahrungen aus diesen Projekten beschrieben. Danach werden in Abschnitt 3 die fünf zur Ermittlung der Gelingensbedingungen in die Untersuchung einbezogenen Labore der Community Working Group genauer vorgestellt. In Abschnitt 4 werden die Kategorien, die der kritischen Analyse von Gemeinsamkeiten und Unterschieden dienen sollen, genauer expliziert. Die Ergebnisse der kategoriebasierten Analyse werden in Abschnitt 5 dargestellt und schließlich in Abschnitt 6 diskutiert und kritisch bilanziert. Basierend auf den ermittelten Eigenschaften werden erste Empfehlungen für die Entwicklung neuer Remote-Labore skizziert und wird ein Ausblick auf die Zukunft der Community Working Group „Remote-Labore in Deutschland“ gegeben.

## 2 Community Working Group „Remote-Labore in Deutschland“

Die Community Working Group (CWG) „Remote-Labore in Deutschland“ ist ein 2018 mit Unterstützung des Hochschulforums Digitalisierung (HFD) gegründeter informeller Zusammenschluss von derzeit 15 deutschen Hochschulen bzw. Einrichtungen, die es sich zum Ziel gesetzt haben, die Entwicklung und Verbreitung von Remote-Laboren insbesondere in Deutschland zu unterstützen und zu professionalisieren. Folgende Einrichtungen bzw. deren Akteur\*innen sind bislang in der CWG „Remote-Labore in Deutschland“ vertreten: das Cybernetics Lab an der RWTH Aachen University (1), das Lehrgebiet Flugzeug- Elektrik und Elektronik an der FH Aachen – University of Applied Sciences (2), das Zentrum für Innovation und Entwicklung in der Lehre der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg (3), die Arbeitsgruppe Virtualisierung verfahrenstechnischer Prozesse an der Ruhr-Universität Bochum (4), das Fraunhofer IWES (5), die IngenieurDidaktik, das Institut für Umformtechnik und Leichtbau, die Strömungsmechanik sowie das Zentrum für Hochschulbildung an der Technischen Universität Dortmund (6), die Professur für Softwaretechnologie und Robotik an der TU Bergakademie Freiberg (7), die Stabstelle Elektro- und Informationstechnik der FernUniversität in Hagen (8), die Nordakademie – Hochschule der Wirtschaft (9), die Forschungsgruppe Integrierte Kommunikationssysteme an der Technischen Universität Ilmenau (10), die Informationslogistik an der Hochschule für Technik Stuttgart (11), die Technischen Informations- und Kommunikationsdienste (TIK) der Universität Stuttgart (12), die Otto von Guericke Universität Magdeburg (13), die Hochschule Magdeburg-Stendal (14) sowie die Technische Informatik der Hochschule Rhein-Waal (15). Abbildung 1 zeigt die derzeit beteiligten Hochschulen und Institutionen. Als internationale Partner kooperieren LabsLand und das Engineering Education Transformations Institute der University of Georgia

eng mit der Community Working Group „Remote-Labore in Deutschland“. Darüber hinaus sind einige der Teilnehmenden an der Community Working Group auch Mitglieder der in der Einleitung genannten internationalen Organisationen.



Abbildung 1: Beteiligte Institutionen der CWG „Remote-Labore in Deutschland“ (Stand: Juni 2020)



Abbildung 2: Teilnehmende beim Kickoff-Meeting der Community Working Group „Remote-Labore in Deutschland“

Abbildung 2 zeigt die Teilnehmenden des Kickoff-Meetings zur Gründung der CWG „Remote-Labore in Deutschland“. Die Besonderheit dieses Zusammenschlusses besteht darin, dass die drei für den Regelbetrieb von Remote-Laboren in der Lehre entscheidenden Entwicklungslinien Technik, Didaktik und Organisation miteinander verknüpft werden.

## 2.1 Was sind eigentlich Remote-Labore?

Wurde vor Beginn des digitalen Zeitalters unter einem Remote-Labor einfach ein von der Forschungseinrichtung räumlich weit entferntes Labor bezeichnet, so wird der Begriff seit ca. 30 Jahren für die Bezeichnung von realen Versuchsaufbauten verwendet, die über das Internet zur Verfügung gestellt werden können, um so ein orts- und zeitunabhängiges Experimentieren zu ermöglichen. Früher wurden Remote-Labore für die Lehre vor allem im Kontext der „Distance Education“ entwickelt, in klassischen Fernlernländern wie etwa Australien verortet und dienten in erster Linie der Verbreitung digitaler Videoaufzeichnungen von Laborversuchen nebst vorher erhobenen Messwertreihen über das Internet (Nedic et al., 2003). Heute hingegen wird ihr Potential aufgrund der fortschreitenden Digitalisierung und der damit einhergehenden Durchdringung aller Lebensbereiche mit digitalen interaktiven Medientechnologien zunehmend im gesamten Bildungsbereich gesehen. Der hier eingedeutscht verwendete Begriff „Remote-Labore“ geht zurück auf den englischsprachigen Begriff „Remote Laboratories“; er wird gelegentlich auch mit „Fernlabore“ (Thoms, 2019) oder seltener mit „Telelabore“ (Hengsbach & Langmann, 2005) übersetzt.

Im Vergleich zum Remote-Labor werden im traditionellen Hands-On-Labor Maschinen und Geräte manuell durch die Nutzer\*innen vor Ort, also lokal im Labor, bedient. Sie interagieren direkt mit dem Experiment bzw. den Maschinen. Die Nutzenden steuern das Experiment über ihre Eingaben und beobachten über ihre Sinne die Ausgabe. Es findet also ein direkter synchroner Austausch, eine Interaktion in Kopräsenz, zwischen Experiment und Nutzenden statt. Abbildung 3 zeigt, in welcher Form dabei Informationen ausgetauscht werden.

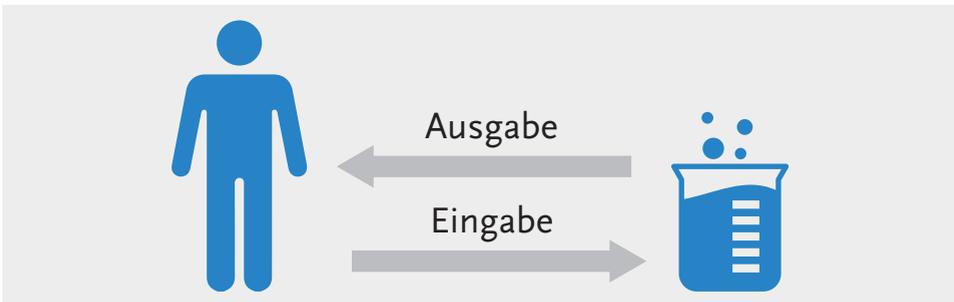
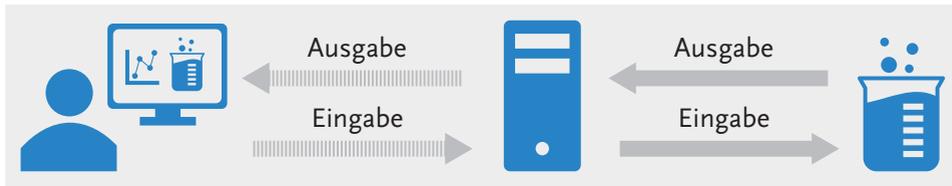


Abbildung 3: Interaktionen im traditionellen Labor

Im Gegensatz dazu steht im Remote-Labore diese direkte Interaktion nicht zur Verfügung, da IT-Hardware genutzt werden muss, um ein ortsunabhängiges Experimentieren zu ermöglichen. Die Nutzenden interagieren nicht mehr direkt mit dem Experiment im Modus Face-to-Machine, sondern nutzen ein User-Interface und interagieren mit dem Experiment im Modus Face-to-Interface. Abbildung 4 zeigt diesen Informationsaustausch im Remote-Labor.



**Abbildung 4:** Interaktionen im Remote-Labor

Dabei werden die für die Laborarbeit grundlegenden Prozesse des Auswählens, Aufbaus, Beobachtens, Messens und Eingreifens zum Zwecke des Experimentierens, Testens, Analysierens oder Konstruierens durch den Einsatz von nun über das Internet computertechnisch ansteuerbaren Platinen, Schaltern, Kameras, Aktoren und Sensoren und ggfls. auch programmierbaren Robotern ermöglicht: Aus Prozessork und Robotik werden Teleprozessork und Telerobotik (Brockers et al., 2005). Medien- bzw. interaktionstheoretisch gwendet bedeutet dies, dass aus Kopräsenz, also der gemeinsamen realen Anwesenheit von Lernobjekten, Lernenden und Lehrenden in der räumlichen Lernumgebung Labor, nun eine verteilte Anwesenheit im Modus von Telepräsenz und Immersion wird (Kasprowicz, 2019). Mehr noch: Im Remote-Labor verschmelzen das IoP (Internet of People) und das IoT (Internet of Things) zum IoE (Internet of Everything) (Hermann et al., 2016; Terkowsky, Frye et al., 2019). Über ein User-Interface konfigurieren die Nutzenden über Eingaben das Experiment aus der Ferne. Durch entsprechende IT-Systeme werden die Eingaben automatisiert auf das Experiment übertragen. Die Ausgabe erfolgt in der Regel über Messdaten und Kamerabilder, die über die entsprechenden IT-Systeme auf das User-Interface übertragen werden. Neben dem klassischen Labor (Hands-On) und dem Remote-Labor gibt es noch virtuelle Labore (reine Simulationen) und Mischformen der verschiedenen Ansätze (Rivera & Petrie, 2016; Zutin et al., 2010; Terkowsky, May & Frye im vorliegenden Sammelband).

Im folgenden Abschnitt werden zunächst zwei Vorläuferprojekte dargestellt, die eine erste Erfahrungsbasis für einige der neueren Entwicklungen innerhalb der CWG darstellten. Danach werden die fünf in die Untersuchung einbezogenen Remote-Labore genauer vorgestellt.

## 2.2 Zwei Vorläuferprojekte der Community Working Group „Remote-Labore in Deutschland“

Exemplarisch für eine Vielzahl von Vorläuferprojekten und ohne Anspruch auf Vollständigkeit für die Entwicklung in Deutschland sollen hier die kollaborativen EU-Projekte LILA und PeTEX genannt werden, an denen einige Mitglieder der CWG mitgewirkt haben und die deswegen hier angeführt werden, da sie zumindest im Kontext der CWG als einer von mehreren Ausgangspunkten der gegenwärtigen Entwicklungen im Bereich Remote-Labore in Deutschland dienen können.

### 2.2.1 LILA – Library of Labs

LILA war ein von der EU im Rahmen des eContentplus- Programmes zwischen Mai 2009 und Dezember 2011 gefördertes Projekt zur Vernetzung von fernsteuerbaren Experimenten und virtuellen Laboren. Ziel des Projektes war der Aufbau einer europaweiten Infrastruktur zur gegenseitigen Nutzung von Experimentalaufbauten und Simulationssoftware zur Verbesserung der Lehre im Grund- bzw. Bachelorstudium der ingenieur- und naturwissenschaftlichen Studienfächer (Richter et al., 2011). Insgesamt waren an dem Konsortium acht Hochschulen aus sieben europäischen Ländern beteiligt. Das Projekt LILA wurde nach Ende der Förderung 2011 nicht fortgesetzt, was auf ein Problem bei der Entwicklung und dem Betrieb von Remote-Laboren deutet: Sobald eine Förderung ausläuft, kann ihr Betrieb nicht mehr gewährleistet werden.

### 2.2.2 PeTEX – Platform for eLearning and Telemetric Experimentation

PeTEX war ein von der EU im Rahmen des Erasmus-Programmes zwischen Dezember 2008 und November 2010 gefördertes kollaboratives Projekt zur Entwicklung von Remote-Laboren für die Fertigungstechnik im Maschinenbau. An den drei Universitätsstandorten Dortmund, Palermo und Stockholm wurden die mit den Fertigungsverfahren Umformen, Fügen und Trennen in Verbindung stehenden Teststände zu Remote-Laboren aufgerüstet, didaktisch und organisatorisch in eine Lernplattform mit fachlichen Lernmodulen eingebunden und einander gegenseitig zur Verfügung gestellt. Der wegweisende partizipatorische Design-Based-Research-Ansatz wurde in einer Vielzahl von Publikationen umfassend dokumentiert (siehe z. B. Terkowsky et al., 2011).

Allerdings zeigte sich neben der für LILA bereits beschriebenen Problematik der auslaufenden Förderung eine weitere grundsätzliche Schwachstelle im Projektdesign: Auch wenn der gemeinsame fachliche Überbau der Fertigungstechnik im Maschinenbau für den Außenstehenden eine inhaltlich sehr enge Nähe der drei beteiligten Einrichtungen unmittelbar erwarten ließ, zeigte sich in der kooperativen Umsetzung schnell, dass die beteiligten Institute mit der Entwicklung des jeweils anderen Instituts in der Lehre des je eigenen Instituts gar nichts anfangen konnten – eben weil die Remote-Labore der anderen Partner gar nicht fachlicher Inhalt der eigenen Lehre waren. Auch zeigten sich die angesprochenen Mitglieder der Scientific Community, die über die gleichen Hands-on-Labore in eigenen Experimentierhallen verfügten, von dem Verfügbarmachen dieser Experimente über das Internet weitgehend unbeeindruckt und stellten sich als potentielle Tester, User und Kunden gar nicht erst zur Verfügung – ein Problem, das sich im Übrigen auch bei LILA einstellte. Schlussendlich bedeutete dies, dass in der kooperativen Gemeinsamkeit des Projektzusammenhangs jede Einrichtung ihr Remote-Labor letztlich für sich selbst entwickelte und ein wirkliches standortübergreifendes Sharing der Ressourcen aus fachlich-inhaltlichen Disparitäten oder zu optimistisch antizipierten Bedarfen der fachlichen Scientific Communities als künftigen Kunden gar nicht stattfinden konnte. Hätte man dies erreichen wollen, hätte man bei der Projektplanung, der Be-

darfsermittlung und der Auswahl der dafür nötigen Projektpartner z. B. wesentlich enger fachlich fokussieren und dementsprechend verschiedene Labore an verschiedenen Standorten nur eines Fertigungsverfahrens wie z. B. der Umformtechnik auswählen und im Anschluss kollaborativ entwickeln müssen. So blieb es dabei, einen ersten lernplattformintegrierten, technisch, labordidaktisch und organisatorisch ausdifferenzierten Prototypen als Machbarkeitsstudie entwickelt zu haben.

Die mit den EU-Projekten LILA und PeTEX gewonnenen Erfahrungen bzgl. der technischen, didaktischen und organisatorischen Umsetzung dienten gleichwohl als eine wichtige Säule für die späteren Remote-Labor-Entwicklungen in dem Projekt „ELLI – Exzellentes Lehren und Lernen in den Ingenieurwissenschaften“, von denen exemplarisch zwei Entwicklungen am Standort Dortmund neben drei anderen Remote-Laboren aus der CWG auch Gegenstand der folgenden Kapitel sind.

### 2.3 Aktuelle Projekte zur Entwicklung von Remote-Laboren in Deutschland

In den letzten Jahren entstanden an verschiedenen Standorten in Deutschland neue Remote-Labore, deren Konzeptionierung und Realisierung in vielen Fällen durch öffentliche Fördermittel realisiert wurde und wird. Dabei kommen sowohl Förderlinien der Europäischen Kommission, des Bundes, der Länder als auch von Stiftungen zum Tragen. Nur in vereinzelten Fällen erfolgte die Finanzierung von Remote-Laboren durch hochschulinterne Mittel.

Das Projekt „ELLI – Exzellentes Lehren und Lernen in den Ingenieurwissenschaften“ wurde innerhalb des Qualitätspakt Lehre durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Von 2011 bis 2020 wurde an den drei beteiligten Hochschulen RWTH Aachen University, Ruhr-Universität Bochum und Technische Universität Dortmund eine Vielzahl an Remote-Laboren entwickelt.<sup>8</sup>

Weitere Beispiele für die Förderung durch das BMBF sind die Projekte Industrial eLab (2017–2020) und DigiLab4U (seit 2019). Neben den großen Programmen des Bundes kann eine Förderung auch durch die Bundesländer (Fellowships zur digitalen Hochschullehre) oder Stiftungen erfolgen. Wie beschrieben, ist zu erkennen, dass die Entwicklung und Realisierung von Remote-Laboren zwar gefördert wird – allerdings zeigt die Erfahrung aus der Vergangenheit auch, dass es schwierig wird, Remote-Labore technisch aktuell zu halten, wenn die Finanzierung erst einmal ausgelaufen ist. Der Wartungsaufwand und die damit in Verbindung stehenden Betriebs- und Aktualisierungskosten sind nicht zu unterschätzen und stellen eine weitere kritische Größe für den nachhaltigen Regelbetrieb dar.<sup>9</sup> Darüber hinaus enden

---

8 Eine detaillierte Darstellung aller ELLI-Labore würde den Rahmen diesen Beitrags sprengen. Deswegen siehe hierzu den ebenfalls bei wbv erschienenen Abschlussband des Projekts ELLI (Isenhardt, Petermann, Schmoor, Tekkaya, Wilkesmann (Hg.). *Lehren und Lernen in den Ingenieurwissenschaften. Innovativ, digital, international*. Bielefeld: wbv).

9 In einem überaus sehenswerten Keynote-Vortrag während der REV-Konferenz 2016 in Madrid führte Javier Garcia-Zubia, Professor an der Deusto Universität in Bilbao und Mitgründer von LabsLand, vor, welches Sammelsurium an Fehlermeldungen und damit Unerreichbarkeiten von Remote-Laboren entstehen kann, wenn allein die Software nicht immer wieder penibel aktualisiert wird, um mit den Updates der vielen beteiligten Software-Applikationen Schritt halten zu können. Auf einer Weltkarte der Remote-Labore zeigte er dann in der Folge nur Angebote, die für ihn auch tatsächlich selbstständig aufrufbar und funktionsfähig waren, was im Auditorium durchaus für einige Adrenalinschübe und peinliche Berührungen sorgte, weil sich einige der Anwesenden als Lab-Provider mit langjähriger Erfahrung nicht auf der Weltkarte wiederfanden.

mit Projektabschluss in der Regel auch die Verträge der beteiligten Wissenschaftler\*innen, sodass bei einer ausbleibenden Weiterbeschäftigung das mühsam erworbene Know-how wieder verloren geht. Das Wissensmanagement allein über während der Projektlaufzeit verfasste wissenschaftliche Publikationen oder über das Berichtswesen an den Projektträger gewährleisten zu wollen, reicht in der Regel nicht aus, um die gewonnene Expertise vor dem Vergessen zu sichern.

### 3 Beschreibung der fünf untersuchten Remote-Labore der CWG

Im Folgenden werden nun die fünf in die Analyse einbezogenen Remote-Labore der CWG genauer beschrieben. Da außer den zwei Remote-Laboren aus dem Projekt ELLI die weiteren drei Remote-Labore auch in diesem Sammelband vertreten sind, werden diese nur kurz beschrieben, um im Anschluss Gemeinsamkeiten und Unterschiede herausarbeiten und kritisch diskutieren zu können.

#### 3.1 Teleoperative Prüfwelle am IUL der TU Dortmund

Am Standort Dortmund wurden Remote-Labore sowohl im Bereich des Maschinenbaus als auch der Elektrotechnik entwickelt bzw. implementiert. Die Remote-Labore im Bereich Maschinenbau wurden innerhalb der Fakultät für Maschinenbau konzipiert und aufgebaut. In der ersten Förderphase von ELLI, 2011 bis 2016, wurde ein Remote-Labor am Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL) mit Fokus auf die Umformtechnik aufgebaut. Mit dem entwickelten Remote-Labor sind derzeit vier verschiedene Experimente durchführbar. Die Abbildung 5 zeigt die sogenannte teleoperative Prüfwelle am Institut für Umformtechnik und Leichtbau. Sie besteht aus zwei Prüfmachines (1, 2), einem optischen Mess-System (3), einem Industrieroboter (4) zum Handling der Proben (Sadiki et al., 2016) und Systemen zur Steuerung und Überwachung des Remote-Labors (5, 6) (Ortelt, Sadiki et al., 2016).

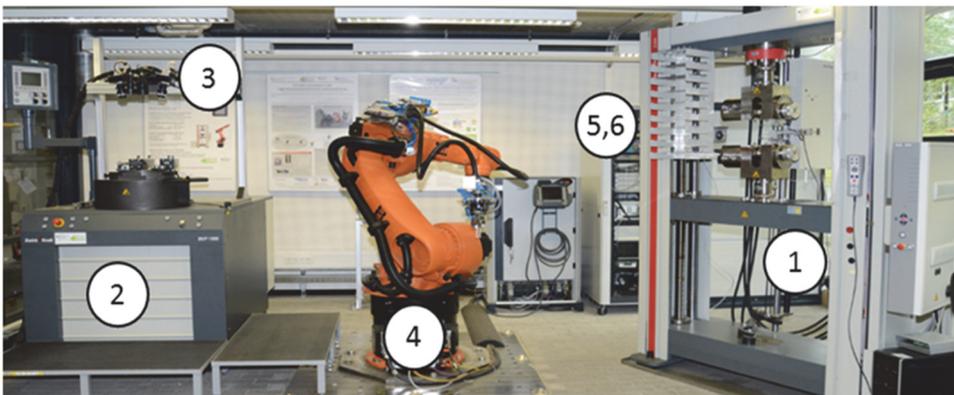


Abbildung 5: Teleoperative Prüfwelle der TU Dortmund (Ortelt, Sadiki et al., 2016)

Innerhalb der teleoperativen Prü fzelle wurden folgende Experimente realisiert:

1. **Einachsiger Zugversuch:** Ein einachsiger Zugversuch, korrespondierend zur DIN EN ISO 6892–1, wurde entwickelt (Ortelt, Sadiki et al., 2016).
2. **Zugversuch bei erhöhten Temperaturen:** In einem weiteren Schritt wurde die Möglichkeit geschaffen, Proben während des Experiments bis auf 1.200 °C zu erwärmen (Grodotzki et al., 2018).
3. **Druckversuch:** Ein Druckversuch wurde entwickelt, um Kennwerte für die Masivumformung aufzunehmen (Selvaggio et al., 2019).
4. **Tiefziehversuch:** Zur Charakterisierung von Werkstoffen für Blechumformung wurde der sogenannte Näpfchenversuch automatisiert (Selvaggio et al., 2016).

Die entwickelte teleoperative Prü fzelle wurde in lokale Vorlesungen (Ortelt, Gies et al., 2016), Übungen und in einen internationalen Onlinekurs (Ortelt, Pekasch et al., 2016) integriert. Innerhalb der zweiten Förderphase wurden weitere Remote-Labore für die Bereiche Additive Fertigung, Rohrumformung, Werkstoffprü ftechnik und spanende Fertigung entwickelt.

### 3.2 VISIR - Virtual Instrumentation System in Reality am zhb der TU Dortmund

Ein weiteres Remote-Labor am Standort Dortmund wurde am Zentrum für Hochschulbildung (zhb) im Rahmen von ELLI2 installiert. In diesem Fall wurde das bereits etablierte Remote-Labor VISIR (Virtual Instrument Systems in Reality) beschafft und vom kommerziellen Anbieter LabsLand vor Ort aufgebaut und in Betrieb genommen. Mit VISIR können Experimente aus den Bereichen Elektronik, Elektrotechnik und Informationstechnik durchgeführt werden. Aktuell sind weltweit 15 VISIR-Systeme installiert (siehe den Beitrag von May, Frye & Terkowsky im vorliegenden Sammelband).

### 3.3 GOLDi – Grid of Online Laboratory Devices Ilmenau

Eine Cloud von Remote-Laboren wurde seit 2005 federführend an der TU Ilmenau aufgebaut. In dem Projekt „GOLDi – Grid of Online Laboratory Devices Ilmenau“ werden Online-Labore für das Design von Steueralgorithm en bereitgestellt. Zum einen stehen echte Hardware-Aufbauten im Sinne von Remote-Laboren zur Verfügung, zum anderen können virtuelle Systeme für das Testen der Steueralgorithm en verwendet werden. Aufgrund dieser Kombination von Remote-Laboren und virtuellen Laboren kann GOLDi als hybrides Online-Labor verstanden werden (Henke et al., 2013). Die eigentliche Cloud wird möglich, da Instanzen von GOLDi an zehn Universitäten installiert und betrieben werden (Henke et al., 2015). Für den Betrieb der Remote-Labore in GOLDi wurde eine eigene Software entwickelt. (siehe Beitrag von Wuttke & Henke im vorliegenden Sammelband).

### 3.4 FPGA Vision Remote Lab

Das FPGA-Remote-Labor der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg richtet sich in erster Linie an Studierende aus den Fachbereichen Elektrotechnik und Informatik. Die Nutzer\*innen des Remote-Labors können Digitalschaltungen programmieren, ein FPGA (Field Programmable Gate Array) entwerfen und anschließend die entwickelte Lösung per Fernzugriff testen. Die Programmierung erfolgt auf den Computern der Studierenden, und der kompilierte Algorithmus wird dann auf das Remote-Labore geladen. Dort kann die erstellte Lösung schließlich getestet werden (Winzker et al., 2018). (siehe Beitrag von Winzker & Schwandt im vorliegenden Sammelband).

### 3.5 Industrial eLab

Das Projekt zum Industrial eLab wurde durch das BMBF gefördert und zwischen 2017 und 2020 gemeinsam durch die Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und die Hochschule Magdeburg-Stendal durchgeführt. Das entwickelte Remote-Labor ist in den Fachbereich Informatik einzuordnen und zielt auf das Thema „Eingebettete Systeme“. Als Experiment werden Roboter programmiert, sodass sie mithilfe von Sensorik und Aktorik ein Labyrinth durchfahren können. Das Remote-Labor ist durch die identische Abbildung des Systems aus Roboter und Labyrinth skalierbar. Die Tatsache, dass 74 Prozent der Zugriffe auf das System in der Zeitspanne zwischen 18 Uhr abends und 8 Uhr morgens registriert wurde, zeigt, dass Studierende das zeitunabhängige Experimentieren per Remote-Labor sehr gut annehmen (Zug et al., 2017). (siehe Beitrag von Hawlitschek, Berndt, Dietrich & Zug im vorliegenden Sammelband).

## 4 Untersuchungsraster zur Analyse von kritischen Gemeinsamkeiten und Unterschieden

Die oben beschriebenen fünf Remote-Labore der CWG werden nun in Anlehnung an Zubía und Alves (2012), Auer et al. (2018) und basierend auf der kritischen Reflexion von Schwierigkeiten und Hemmnissen bei den eigenen bisherigen Laborprojekten der Autoren dieses Beitrags weitergehend untersucht und charakterisiert. Für die hier vorgestellte Analyse wurden aus der Literatur und auf Basis eigener Erfahrungen im Remote-Lab-Development elf Kategorien herausdestilliert, die im Folgenden kurz beschrieben bzw. definiert werden:

- **Fachbereich:** Diese Kategorie gibt an, welchem Fachbereich das Remote-Labor zugeordnet werden kann. Selbstverständlich können die Remote-Labore zumindest prinzipiell auch interdisziplinär eingesetzt werden. Die Analyse dieser zunächst allenfalls formal bedeutsam erscheinenden Kategorie kann bereits erste Aufschlüsse über mögliche Schwierigkeiten beim tatsächlichen gemeinsamen Einsatz von Remote-Laboren innerhalb der Lehre der beteiligten Projektpartner

und innerhalb der übergeordneten fachlichen Scientific Communities geben (siehe die kurzen Schilderungen zu LILA und PeTEX in Abschnitt 2.2.1).

- **Start der Entwicklung:** Es wird der Zeitpunkt angegeben, ab dem das Remote-Labor entwickelt wurde. Daraus lassen sich Rückschlüsse ziehen, welcher Stand der Technik bei der Planung berücksichtigt wurde.
- **Status der Entwicklung:** Der Status der Entwicklung zeigt an, ob das Remote-Labor weiterentwickelt wird, aktuell entwickelt wird oder ob die Entwicklung bereits abgeschlossen wurde.
- **Förderung:** Hier wird beschrieben, durch welche Fördermittel das Remote-Labor entwickelt wurde bzw. wird.
- **Verfügbarkeit:** Die Verfügbarkeit von Remote-Laboren ist entscheidend für ihre Nutzung. Sie kann zwischen den beiden Extremen „jederzeit“ (also 24 Stunden an 365 Tagen im Jahr) und dem anderen („nach Bedarf“ oder „auf Anfrage“) liegen – oder manchmal sogar bei „nie“.
- **Parallele Nutzung:** Remote-Labore ermöglichen eine höhere Auslastung von Labor-Equipment. Allerdings liegt in vielen Fällen weiterhin ein Verhältnis von Nutzer:in zu Remote-Labor von eins zu eins vor. Diese Kategorie dient also als Maß für die Skalierbarkeit und gibt an, wie viele Nutzende das Remote-Labor parallel nutzen können.
- **Zugriff:** Diese Kategorie beschreibt, inwieweit das Remote-Labor auch durch externe Nutzer:innen (also außerhalb der betreibenden Hochschule) genutzt werden kann. Bei teurem und empfindlichem Equipment in Verbindung mit kostenintensiven Experimenten schwinden die Chancen zunehmend, dass Laborbetreiber die anonyme Netzwelt per Fernzugriff blind „auf die Maschine lassen“.
- **Visuelle Beobachtung:** Mittels dieser Kategorie wird erhoben, auf welche Weise die Nutzenden das Experiment in Remote-Labor beobachten können.
- **Einbindung des Remote-Labors:** Diese Kategorie beschreibt die möglichen labor-didaktischen Szenarien, mit denen das Remote-Labor in die Lehre integriert wird.
- **Remote Lab Management System (RLMS):** Diese Kategorie beschreibt die eingesetzte Softwareumgebung, die den Zugriff auf das Remote-Labor realisiert.
- **Interoperabilität:** Diese Kategorie beschreibt, ob das betreffende Remote-Labor mit anderen Remote-Laboren interagieren kann. Eine Interoperabilität ist immer dann gegeben, wenn es Schnittstellen zwischen verschiedenen RLMS gibt oder das identische RLMS eingesetzt wird.

Mithilfe dieser elf Kategorien wurden die fünf Labore nun eingehender hinsichtlich Gemeinsamkeiten und Unterschiede analysiert. Die Daten bzw. Ergebnisse beruhen dabei auf der Sichtung von Publikationen und Webauftreten der verschiedenen Remote-Labore sowie auf Gesprächen der Autoren mit den Betreiber:innen.

## 5 Ergebnisse

Tabelle 1 zeigt die Eigenschaften der einzelnen untersuchten Remote-Labore, bezogen auf die hier beschriebenen Kategorien.

**Tabelle 1:** Eigenschaften der untersuchten Remote-Labore

Kategorie	Untersuchte Remote-Labore				
	ELLI-Remote-Labore		GOLDi	FPGA Vision Remote Lab	Industrial elab
	TU Dortmund		TU Ilmenau	Hochschule Bonn-Rhein-Sieg	Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und Hochschule Magdeburg-Stendal
	Teleoperative Prüfwelle	VISIR			
<b>Fachbereich</b>	Maschinenbau	Elektrotechnik, Elektronik	Elektrotechnik	Elektrotechnik	Informatik
<b>Start der Entwicklung</b>	2011	2019 (Installation)	2005	2016	2017
<b>Status der Entwicklung</b>	laufend	laufend	laufend	laufend	laufend
<b>Förderung</b>	Projektfinanzierung (BMBF)		Projektfinanzierung	Projektfinanzierung	Projektfinanzierung (BMBF)
<b>Verfügbarkeit</b>	nach Bedarf	24 Stunden am Tag	24 Stunden am Tag	24 Stunden am Tag	24 Stunden am Tag
<b>Parallele Nutzung</b>	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja
<b>Zugang</b>	Externe Nutzung möglich	Externe Nutzung möglich	Externe Nutzung möglich	Externe Nutzung möglich	Externe Nutzung möglich
<b>Visuelle Beobachtung</b>	Videostream, Messwerte, Bedienfeld	Messungen, Bedienfeld	Videostream, Messwerte, Bedienfeld	Bild als Input, Bild als Output	Videostream, Messwerte, Bedienfeld
<b>Einbindung des Remote-Labors</b>	Integration in Vorlesungen, Übungen, Fachlabore und Online-Kurse	Integration in Vorlesungen und Übungen	Integration in Vorlesungen und Übungen	Integration in Vorlesungen, Übungen, Fachlabore und Online-Kurse	Integration in Vorlesungen und Übungen
<b>Remote Lab Management System (RLMS)</b>	iLab und Eigenentwicklung HALO	WebLab-Deusto/LabsLand	GOLDi	WebLab-Deusto	Eigene Softwareplattform
<b>Interoperabilität</b>	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein

Für die in die Analyse einbezogenen Remote-Labore können folgende Unterschiede und Gemeinsamkeiten, bezogen auf die oben dargestellten Kategorien, festgehalten werden:

### **5.1 Unterschiede zwischen den exemplarisch untersuchten Remote-Laboren**

- Es ist festzustellen, dass nur zwischen den beiden Remote-Laboren, die ein standardisiertes RLMS nutzen (Weblab-Deusto), eine Interoperabilität abbildbar ist. Dies liegt an der Tatsache, dass in den meisten Fällen ein eigenes RMLS entwickelt wurde und keine Schnittstellen zu weiteren Remote-Laboren bedacht wurden.
- Die untersuchten Remote-Labore sind zum Teil nur auf Bedarf nutzbar und ermöglichen so kein echtes zeitunabhängiges Experimentieren.
- Ein kleiner Teil der gezeigten Remote-Labore ist auch nicht im Sinne von Open Access für Externe nutzbar.

### **5.2 Gemeinsamkeiten der analysierten Remote-Labore**

- Alle untersuchten Remote-Labore wurden mithilfe einer Projektfinanzierung realisiert.
- Alle untersuchten Remote-Labore werden im Regelbetrieb der Lehre zumindest als Ergänzung eingesetzt.
- Alle Remote-Labore werden aktuell weiterentwickelt. Allerdings ist es fraglich, inwieweit diese weiterentwickelt werden, wenn die Projektfinanzierung nicht mehr gegeben ist.
- Alle untersuchten Remote-Laboren wurden in verschiedenen Szenarien in die Lehre eingebettet.

## **6 Diskussion und Ausblick**

Zunächst kann festgehalten werden, dass die in die Analyse einbezogenen Remote-Labore bezogen auf die elf Kategorien mehr Gemeinsamkeiten als Unterschiede aufweisen. Die Entwicklung aller untersuchten Remote-Labore wurden nur durch eine Projektfinanzierung ermöglicht. Dies lässt den Rückschluss zu, dass nur dann weitere Remote-Labore entwickelt werden, wenn weitere Fördermittel in diesem Bereich bereitgestellt werden. Vor diesem Hintergrund muss weiter beobachtet werden, inwieweit Remote-Labore weiter betrieben werden können, wenn die Projektförderung ausgelaufen ist.

Unterschiede in den Remote-Laboren bestehen vor allem in der eingesetzten Softwareumgebung. Leider wurde bei der Entwicklung der Remote-Labore in vielen Fällen ein eigenes RLMS entwickelt, statt bereits entwickelte und damit hinlänglich bekannte und vor allem ausgereifte Lösungen zu verwenden und dabei ggfls. gemeinsam mit deren Entwicklern spezifische Bedarfe zu diskutieren und daraufhin

die Software anzupassen und weiterzuentwickeln. Dieser Aspekt zeigt, wie wichtig der Austausch der handelnden Personen im Bereich der Remote-Labore ist, damit anhand der bereits erzielten Ergebnisse gemeinsame Weiterentwicklungen im Sinne von Best-Practice-Lösungen möglichst optimal durchgeführt werden können.

Folgende Aspekte können die Motivation für die Entwicklung und den Betrieb von Remote-Laboren in Deutschland steigern:

1. Neben der Finanzierung für die Entwicklung sollte auch der Betrieb und die Wartung bzw. Weiterentwicklung von Remote-Laboren gefördert werden. So sollten Fördermittel für entwickelte Remote-Labore nach abgeschlossener Projektförderung in der Nachhaltigkeits- und Konsolidierungsphase mindestens weitere fünf Jahre bereitgestellt werden, sodass sich die Entwicklungskosten auch in einer langen Nutzungsdauer rentieren.
2. Es müssen Schnittstellen zwischen den einzelnen Remote-Laboren entwickelt und etabliert werden, sodass Studierende mit nur einem Login („Single Sign On“) auf verschiedene Remote-Labore zugreifen können – übrigens eine Anforderung, die innerhalb der internationalen Community seit über zehn Jahren zur maßgeblichen Erhöhung der Usability diskutiert und bearbeitet wird.
3. Bei der Entwicklung und Einbindung von Remote-Labor-Management-Systemen (RLMS) ist es unabdingbar, immer wieder einen aktuellen Überblick darüber zu gewinnen, welche Systeme derzeit existieren, wer die Entwickler sind, und vor allem, ob die Systeme noch weiterentwickelt und weiter gepflegt werden, um bei strategischen Entscheidung für oder gegen ein bestehendes System nicht irgendwann unliebsame Überraschungen zu erleben. Dies gilt insbesondere für die Interoperabilität von Remote-Laboren zur unkomplizierten Einbindung in Portalsysteme unterschiedlicher Anbieter.
4. Um insbesondere bei kollaborativen Projekten das Sharing der Remote-Labore zu unterstützen und so einen standortübergreifenden Mehrwert zu erzeugen, sollte bei der Bedarfsermittlung und bei der damit in Verbindung stehenden Auswahl der Projektpartner genau darauf geachtet werden, welchen Nutzen die Entwicklungen der jeweils anderen Partner konkret für die Lehre in der eigenen Einrichtung und der Scientific Community, zu der man gehört, tatsächlich bringen. Auch hier kann es sonst zu unliebsamen Überraschungen kommen.
5. Die Einbindung der Remote-Labore in die Lehre sollte durch Expert\*innen der Labordidaktik unterstützt bzw. begleitet werden. Im besten Fall sollte diese Expertise schon in der Konzeptphase der Erstellung eingebunden werden.
6. Entwickelte Aufgabenstellungen sollten am besten als Content in Form von Open-Educational-Resources (OER) zur Verfügung gestellt werden, sofern es übergeordnete Strategien z. B. auf Länderebene gibt, sodass die Einbindung von Remote-Laboren vereinfacht wird.
7. Langfristig gesehen bedarf es hierzu neuer Modelle der Finanzierung von Betriebs- und Wartungskosten nach der eigentlichen Förderphase. Andere im Entstehen befindliche Geschäftsmodelle von Providern wie Labsland oder Digi-Lab4U favorisieren derzeit Modelle im Sinne der Shared Economy und erheben

Nutzungsgebühren zur Finanzierung der laufenden Kosten der eingebundenen Lab-Provider. Die VISIR-Federation wiederum zielt auf ein Sharing ihrer Systeme untereinander als Open-Educational-Resources (OER) ab, sodass jeder Netzknoten über die Experimente der jeweils anderen verfügen kann. Es ist derzeit nicht entscheidbar, was sich durchsetzen wird.

8. Externen wird durch die CWG der Zugang zur Fachcommunity ermöglicht, sodass jederzeit informeller Austausch erfolgen kann.

Während der Corona-Pandemie zeigte sich, wie wichtig Remote-Labore sein können, da sie trotz Hochschulschließungen die Einbindung von Laboren in die Lehre und damit auch weiterhin die praktische Verknüpfung von Theorie und Empirie ermöglichten. Leider wurde aber auch deutlich, dass interaktive Remote-Labore nicht ad hoc entwickelt werden können, da es noch kein standardisiertes Vorgehen zu ihrer Entwicklung gibt. Viele Laborlehrende behelfen sich mit dem Erstellen von Videoaufzeichnungen von Laborexperimenten, die sie zusammen mit bereits erhobenen Messwerten dann an ihre Studierenden zur weiteren Aufgabebearbeitung streamten. Sie entwickelten also schnell und unkompliziert Remote-Labore auf dem Stand der Entwicklung der neunziger Jahre des letzten Jahrhunderts.

Diese fehlende Standardisierung für das Erstellen wirklich interaktiver Remote-Labore zeigt sich auch in der dargestellten Erhebung zu Remote-Laboren in Deutschland. Für ihren sicheren Betrieb werden in den meisten Fällen eigene (Software-) Lösungen entwickelt, wodurch letztlich unnötig Zeit und Geld, Ressourcen und Mühen verbraucht werden. Deshalb ist ein fundierter, immer wieder aktualisierter Überblick über den Stand der Forschung und Entwicklung von Remote-Laboren für einen möglichst optimalen Einsatz der Ressourcen unabdingbar. Daher versucht die Community Working Group „Remote-Labore in Deutschland“ verstärkt Entwickler\*innen von Remote-Laboren zu beraten und Hilfe anzubieten, damit diese nicht unwissentlich dem „reinventing the wheel“ verfallen und während der Entwicklung neuer Remote-Labore unwissentlich die Fehler ihrer Vorgänger wiederholen.

## Literaturverzeichnis

- Auer, M. E.; Azad, A. K.; Edwards, A. & De Jong, T. (2018). *Cyber-physical laboratories in engineering and science education*. New York. Springer.
- Brockers, R.; Botte, M. & Mertsching, B. (2005). Energy management for the Telepresence system TSR. In A. Rettberg, M. C. Zanella & F. J. Rammig, *From Specification to Embedded Systems Application*. Boston, MA.
- Grododzki, J.; Ortelt, T. R. & Tekkaya, A. E. (2018). Remote and Virtual Labs for Engineering Education 4.0: Achievements of the ELLI project at the TU Dortmund University. *Procedia Manufacturing*, 26, 1349–1360. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.126>.

- Hengsbach, K. & Langmann, R. (2005). Automatisierungstechnik — eine Gemeinschaftsaufgabe von Bildung, Wissenschaft und Industrie. In P. Holleczeck & B. Vogel-Heuser, *Echtzeitaspekte bei der Koordinierung Autonomer Systeme*. Berlin, Heidelberg.
- Henke, K.; Ostendorff, S.; Wuttke, H. & Simon, S. (2013). *Fields of applications for hybrid online labs*. 2013 10th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV).
- Henke, K.; Vietzke, T.; Wuttke, H. & Ostendorff, S. (2015). *GOLDi — Grid of online lab devices Ilmenau: Demonstration of online experimentation*. 2015 3rd Experiment International Conference (exp.at'15).
- Hermann, M.; Pentek, T. & Otto, B. (2016). *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios*. 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS).
- Kasprowicz, D. (2019). *Der Körper auf Tauchstation: Zu einer Wissensgeschichte der Immersion*. Baden-Baden. Nomos Verlag.
- Nedic, Z.; Machotka, J. & Nafalski, A. (2003). *Remote laboratories versus virtual and real laboratories*. 33rd Annual Frontiers in Education, 2003. FIE 2003.
- Ortelt, T. R.; Gies, S.; Traphöner, H.; Chatti, S. & Tekkaya, A. E. (2016). Integration of new Concepts and Features into Forming Technology Lectures. In S. Frerich, T. Meisen, A. Richert, M. Petermann, S. Jeschke, U. Wilkesmann & A. E. Tekkaya (Hrsg.), *Engineering Education 4.0: Excellent Teaching and Learning in Engineering Sciences* (S. 529–545). New York. Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-46916-4\\_40](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46916-4_40).
- Ortelt, T. R.; Pekasch, S.; Lensing, K.; Guéno, P.-J.; May, D. & Tekkaya, A. E. (2016). Concepts of the International Manufacturing Remote Lab (MINTReLab) – Combination of a MOOC and a Remote Lab for a Manufacturing Technology Online Course. In S. Frerich, T. Meisen, A. Richert, M. Petermann, S. Jeschke, U. Wilkesmann & A. E. Tekkaya (Hrsg.), *Engineering Education 4.0: Excellent Teaching and Learning in Engineering Sciences* (S. 547-558). New York. Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-46916-4\\_41](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46916-4_41).
- Ortelt, T. R.; Sadiki, A.; Pleul, C.; Becker, C.; Chatti, S. & Tekkaya, A. E. (2016). Development of a Tele-Operative Testing Cell as a Remote Lab for Material Characterization. In S. Frerich, T. Meisen, A. Richert, M. Petermann, S. Jeschke, U. Wilkesmann & A. E. Tekkaya (Hrsg.), *Engineering Education 4.0: Excellent Teaching and Learning in Engineering Sciences* (S. 265-277). New York. Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-46916-4\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46916-4_21).
- Richter, T.; Boehringer, D. & Jeschke, S. (2011). LiLa: A European Project on Networked Experiments. In S. Jeschke, I. Isenhardt & K. Henning, *Automation, Communication and Cybernetics in Science and Engineering 2009/2010*. New York. Springer International Publishing.

- Sadiki, A.; Ortelt, T. R.; Pleul, C.; Becker, C.; Chatti, S. & Tekkaya, A. E. (2016). The Challenge of Specimen Handling in Remote Laboratories for Engineering Education. In S. Frerich, T. Meisen, A. Richert, M. Petermann, S. Jeschke, U. Wilkesmann & A. E. Tekkaya (Hrsg.), *Engineering Education 4.0: Excellent Teaching and Learning in Engineering Sciences* (S. 449-464). New York. Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-46916-4\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46916-4_34).
- Selvaggio, A.; Sadiki, A.; Ortelt, T. R.; Meya, R.; Becker, C.; Chatti, S. & Tekkaya, A. E. (2016). Development of a Cupping Test in Remote Laboratories for Engineering Education. In S. Frerich, T. Meisen, A. Richert, M. Petermann, S. Jeschke, U. Wilkesmann & A. E. Tekkaya (Hrsg.), *Engineering Education 4.0: Excellent Teaching and Learning in Engineering Sciences* (S. 465-476). New York. Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-46916-4\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46916-4_35).
- Selvaggio, A.; Upadhy, S.; Grodotzki, J. & Tekkaya, A. E. (2019). *Development of a Remote Compression Test Lab for Engineering Education*. 16th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV2019), Bengaluru, India.
- Terkowsky, C.; Frye, S. & May, D. (2019). Online engineering education for manufacturing technology: Is a remote experiment a suitable tool to teach competences for “Working 4.0”? *European Journal of Education*, 54(4), 577–590. <https://doi.org/10.1111/ejed.12368>.
- Terkowsky, C.; May, D. & Frey, S. (2019). Labordidaktik: Kompetenzen für die Arbeitswelt 4.0. In T. Haertel, C. Terkowsky, S. Dany & S. Heix (Hrsg.), *Hochschullehre & Industrie 4.0: Herausforderungen – Lösungen – Perspektiven* (S. 89–103). Bielefeld. wbv.
- Terkowsky, C.; Pleul, C.; Jahnke, I. & Tekkaya, A. E. (2011). Tele-operated laboratories for online production engineering education platform for e-learning and telemetric experimentation (PeTEX). *International Journal of Online Engineering*, 7 (SUPPL.), 37–43. Verfügbar unter <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-80054011909&partnerID=40&md5=ffab7781bc312ab4a674acd67f901a75> [15.06.2020].
- Winzker, M.; Kiessling, R.; Schwandt, A.; Paez, C. S. & Shanab, S. A. (2018). *Teaching Across the Ocean with Video Lectures and Remote-Lab*. 2018 IEEE World Engineering Education Conference (EDUNINE).
- Zubía, J. G. & Alves, G. R. (2012). *Using remote labs in education: two little ducks in remote experimentation* (Vol. 8). Universidad de Deusto.
- Zug, S.; Merkt, M.; Hawlitschek, A.; Goldau, H.; Stolze, R.; Pohlenz, P. & Krenz, T. (2017). *Poster - Industrial eLAB* BMBF-Fachtagung „Hochschule im digitalen Zeitalter“, Berlin, Germany. Verfügbar unter [https://www.wihoforschung.de/\\_medien/downloads/16DHL1033-1034\\_Industrial%20eLab\\_Poster\\_Fachtagung.pdf](https://www.wihoforschung.de/_medien/downloads/16DHL1033-1034_Industrial%20eLab_Poster_Fachtagung.pdf) [15.06.2020].

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Beteiligte Institutionen der CWG „Remote-Labore in Deutschland“ .....	232
Abb. 2	Teilnehmende beim Kickoff-Meeting der Community Working Group „Remote-Labore in Deutschland“ .....	232
Abb. 3	Interaktionen im traditionellen Labor .....	233
Abb. 4	Interaktionen im Remote-Labor .....	234
Abb. 5	Teleoperative Prüfzelle der TU Dortmund .....	237

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Eigenschaften der untersuchten Remote-Labore .....	241
--------	----------------------------------------------------	-----