

Digitalisierung der praktischen Ingenieurausbildung – Betrachtungen zu digitalen Praktika und virtuellen Experimenten nach dem Krisenmodus der Covid-19-Pandemie



Philipp Wabnitz¹ und Janine Funke²

Abstract

Als Folge der Einschränkungen durch die Covid-19-Pandemie in den Jahren 2020/2021 ist der praktische Anteil des Studiums in den Ingenieurwissenschaften stark zurückgegangen. Laborpraktika konnten im Gegensatz zu Vorlesung und Übung aufgrund der Komplexität und der auf diesem Gebiet fehlenden Kompetenzen der Lehrenden nicht ad hoc digitalisiert werden. Da absehbar scheint, dass auch in Zukunft ein Zugang zu Laborhallen nicht immer gewährleistet werden kann, könnten digital durchgeführte Praktika und virtuelle Experimente eine Lösungsstrategie sein. Zudem können einige Vorteile gegenüber traditionellen Präsenzkonzepten festgestellt werden, was eine zukünftige curriculare Integration solcher Formate bewirken könnte. Im Beitrag werden Möglichkeiten und Beispiele aufgezeigt, wie digitale Praktika gestaltet sein können. Weiterhin werden Chancen und Risiken einer Umsetzung benannt und entsprechende Forderungen an eine künftige Hochschulpolitik abgeleitet.

Keywords

Digitalisierung; Praktikum; Virtualisierung; Ingenieurdidaktik

- 1 Philipp Wabnitz, TU Chemnitz, Professur Montage- und Handhabungstechnik
philipp.wabnitz@mb.tu-chemnitz.de
- 2 Janine Funke, TU Chemnitz, Digital Learning Manager
janine.funke@verwaltung.tu-chemnitz.de

1 Krisenmodus der praktischen Ingenieurausbildung

Während des Sommersemesters des Jahres 2020 entstand eine völlig neuartige Situation: Studierende durften den Universitätscampus nicht mehr betreten und die Lehre musste fortan virtuell stattfinden. Ohne zeitlichen Vorlauf übernahmen Webkonferenzsysteme die Rolle des Vorlesungssaals und neue Formate wie Videoaufnahmen fanden vermehrt Einzug in die Lerngestaltung. Ebenso fanden Übungen, Seminare und Prüfungen ihren Weg in den digitalen Raum. Nur ein zentraler curricularer Bestandteil wurde in der virtuellen Lehre kaum bedacht: die Praktika. Zugversuche in der Werkstofftechnik, Bewegungsstudien an Produktionsanlagen in der Getriebetechnik oder Programmierarbeit direkt am Roboter – praktische Tätigkeiten im Labor wurden aufgrund der geltenden Hygiene- und Anwesenheitsregelungen faktisch unmöglich.

Projekte an diversen Universitätsstandorten, die eine digitale Praktikumsdurchführung ermöglichten, bspw. das [Virtuelle Physikalische Praktikum für Physik](#) an der TU Dresden oder das Remotepraktikum zur Veranstaltung [Hardware Acceleration Using FPGAs](#) an der TU Chemnitz, bildeten die Ausnahme. Die Digitalisierung von praktischen Lehrinhalten kann man für das Sommersemester 2020 also durchaus als gescheitert betrachten. Und im Wintersemester 2020/2021 sah die Situation kaum anders aus.

Dieser Beitrag bezieht sich auf die Möglichkeiten digitaler Praktika und virtueller Experimente im Be-

reich der Ingenieurausbildung. Dabei steht das Laborpraktikum im Zentrum der Analyse. Neben einer kurzen Einführung in die generelle Rolle von Praktika im hochschuldidaktischen Kontext wird vor allem auf die Form des Laborpraktikums eingegangen. Der Beitrag zielt darauf ab, die Möglichkeiten und Vorteile einer Digitalisierung der praktischen Ingenieurausbildung aufzuzeigen. Dabei werden Handlungsmöglichkeiten für eine künftige Gestaltung außerhalb des Krisenmodus erläutert.

2 Praktika im hochschuldidaktischen Kontext

Der Begriff des Praktikums leitet sich von „Praxis“ (altgriechisch für „Tat“ oder „Handlung“) ab und rekurriert im Studium auf das Verhältnis von Theorie und Praxis. Dabei ist die Dimension des „Praxisbezuges“ in unterschiedlichen Fachbereichen anders geregelt, weshalb sich auch – z. B. bezogen auf ein im Zuge der Bologna-Reform angestrebtes Verhältnis zwischen Theorie und Praxis – kontroverse Fachdebatten beobachten lassen. Generell kann vermerkt werden, dass das Praktikum eine Vermittlungsinstanz zwischen Studium und Beruf, also Theorie und Praxis übernimmt. Daneben bietet das Praktikum die Möglichkeit, eine authentische Lernumgebung herzustellen, in der Wissen eigenständig oder in Gruppen erarbeitet (vgl. Hasselhorn & Gold 2017) und Gelerntes gezielt angewendet und analysiert wird (vgl. Bloom 1956). Dabei kann je

nach Curriculum zwischen Laborpraktikum, Projektpraktikum und dem Betriebs- oder Institutspraktikum unterschieden werden. Auch die Anfertigung von Qualifikationsarbeiten in einem externen Betrieb oder einer Institution kann hier erwähnt werden.

In anderen Studienbereichen, z. B. im Bereich der Natur- und Ingenieurwissenschaften, ist der Erwerb von Praxiserfahrung zwar essentiell für die Verknüpfung von Theorie und Praxis, jedoch in unterschiedlichem Umfang tatsächlich obligatorisch für den Erwerb eines Abschlusses. Dies hat verschiedene Auswirkungen auf die finanziellen und personellen Möglichkeiten der Umsetzung digitaler Praktika. Nicht selten müssen beispielsweise Laborpraktika auf Grund von zeitlichen Beschränkungen der Lehrenden reduziert werden (vgl. Schubardt et al. 2011, 30). Im Falle des Praktikums im Labor stellt sich zudem die Herausforderung einer spezifischen räumlichen Umgebung. So involviert ein solches gerade auch im Bereich der Ingenieurausbildung die Vermittlung von theoretischem Wissen zu den Bedingungen der Nutzbarkeit der Laborausstattung sowie des Arbeitsschutzes. Eine Digitalisierung dieser Praktikumsform steht somit vor zahlreichen räumlichen, finanziellen und personellen Barrieren.

3 Digitalisierung von Praktika und Experimenten in der Lehre

Die Digitalisierung von Materialien oder anderen Teilen einer Lehrveranstaltung ist seit vielen Jahren Bestandteil der Hochschuldidaktik – wenn nicht in einem integrativen Konzept dann zumindest als Anreicherung (vgl. Hochschulforum Digitalisierung 2016, vgl. Handke 2019). Hierbei spielten in der Vergangenheit verschiedene Erwägungen eine Rolle, welche die Probleme der Hochschullehre abmildern sollten (vgl. Handke 2020, 19). Seit dem Beginn der Covid-19-Pandemie wurden dann jedoch allein aus dem Fehlen von Alternativen heraus Maßnahmen zur Digitalisierung getroffen.

Digitalisierung von Praktika soll im Folgenden verstanden werden als die Umsetzung der Teilschritte eines Präsenzpraktikums (bspw. Praktikumsvorbereitung, Arbeitsschutzbelehrung, Versuchsdurchführung, Protokollierung etc.) mit E-Learning-Elementen. Entgegen dem Virtualisierungskonzept nach Wannemacher et al. (2016, 15) soll Virtualisierung in diesem Artikel als Teilbereich der Digitalisierung verstanden werden und beinhaltet den Einsatz von virtuellen Welten als Abbildung realer Umgebungen und Szenarien, das Ermöglichen von virtuellen Erlebnissen durch das Ansprechen vielfältiger Wahrnehmungs- und Interaktionskanäle und damit das Schaffen von Immersion als Grundlage für eine glaubhafte Darstellung der Realität (vgl. Dörner et al. 2019, 6–7). Die in diesem Artikel erwähnten virtuellen Experimente bezeichnen

dabei teilweise oder vollständig abgebildete experimentelle Untersuchungen im virtuellen Raum. Es wird versucht, die Umgebungsbedingungen und Parameter eines Versuches möglichst realistisch durch digitale Elemente nachzubilden. Der Einsatz von zweidimensionalen und dreidimensionalen Inhalten bis zu Techniken von Cross Reality Applikationen ist dabei genauso fließend wie die Umsetzung von Gamification und Serious Games (vgl. Strahringer & Leyh 2017, 4–6) oder sogenannter Remote Labs (vgl. Ortelt & Terkowsky 2020). Eine trennscharfe Definition virtueller Praktikumsinhalte ist dementsprechend nicht möglich.

Die Motivation von Lehrenden, sich mit diesen ineinandergreifenden Gebieten zu beschäftigen, deckt im Groben also zwei Kernziele ab:

- I. Die Weiterentwicklung der Lehre als kontinuierliche Aufgabe der universitären Ausbildung. Dies umfasst neben der Digitalisierung als solches auch die damit verbundenen Effekte wie bspw. Flexibilisierung des Studiums, Barrierenabbau, Beachtung von Diversität und die Anwendung der Prinzipien von Open Science im Lehrumfeld.
- II. Die Notwendigkeit zur Digitalisierung, die durch die Covid-19-Pandemie 2020 entstand. Diese gründete sich darauf, dass Lehrveranstaltungen wie Vorlesungen, Übungen und auch Praktika Teil der Modulkataloge sind und somit eine Verpflichtung der Lehrenden zur Durchführung besteht – sowohl rechtlich als auch im Sinne des Constructive Alignments.

Insbesondere Punkt (II) offenbarte die Lücken der auf Präsenz fokussierten universitären Lehre. Dies wird im besonderen Maße am Beispiel von Praktikumsplänen deutlich, nämlich viele Studierende bei möglichst wenig Terminen abzuarbeiten sowie eine Anwesenheit im Labor zu fordern und dabei keine Alternative aufgrund der oftmals für das Praktikum benötigten, hochspezialisierten Labortechnik anbieten zu können. Demgegenüber stehen seit 2020 Hygienekonzepte, die Forderung nach Fernlehre sowie sehr strenge Einreisebestimmungen. Und so verwundert es nicht, dass Bestrebungen hinsichtlich einer Digitalisierung von Laborpraktika mittlerweile an Beachtung gewonnen haben.

4 Probleme des aktuellen Forschungsstandes

Ein Gesamtüberblick über die wissenschaftliche Bewertung digitaler Praktika und virtueller Experimente ist aufgrund der zuvor angesprochenen enormen Bandbreite kaum möglich. Einzelprojekte und Meta-Studien zu bestimmten Teilkonzepten bieten jedoch einen guten Einblick in den aktuellen Stand der Technik.

Beispielsweise deuten die Gesamtergebnisse einer Metastudie von Smetana & Bell (2012) darauf hin, dass Simulationen genauso effektiv und in vielerlei Hinsicht effektiver sein können als traditionelle (d. h. vorlesungsbasierte, lehrbuchbasierte und/oder physisch-praktische) Unterrichtspraktiken, wenn es darum geht, naturwissenschaftliches Inhaltswissen zu fördern,

Prozessfähigkeiten zu entwickeln und konzeptionelle Änderungen zu erleichtern. Es wurden auch positive Auswirkungen in der Variation des Lehrgeschehens beobachtet, jedoch in unterschiedlichem Ausmaß je nach Art und Weise, wie Informationen visualisiert werden, wie der Unterricht unterstützt wird und wie Computersimulationen in das Unterrichtsszenario eingebettet sind (Rutten et al. 2012). Dem Effekt von computergeneriertem Feedback, was bei asynchroner Lehre eine große Rolle spielt, wird ebenso eine positive Bilanz ausgestellt (Van der Kleij et al. 2015).

Demgegenüber stehen die Metaanalysen von Renken & Nunez (2013), welche in Computersimulationen und reinen Beobachtungen keine Garantie für den Erwerb eines konzeptionellen Verständnisses erkennen lassen. Insbesondere die bei derartigen Projekten oftmals einsetzende Übersimplifizierung und der Fokus auf algorithmisches Denken stellen eine Gefahr dar, Wissenschaftsdidaktik als bloße Inhaltsübertragung zu betreiben (Chen 2010). Ohnehin erscheint die Studienlage an sich problematisch, da oftmals nur der reine Wissensgewinn verglichen wird und viele der Untersuchungen Quizzes und Tests beinhalteten, während typische Aufgaben des wissenschaftlichen Arbeitens, wie bspw. das Erstellen von Laborberichten, nur selten virtuell abgebildet und im Sinne des Kompetenzerwerbs verglichen wurden (Brinson 2015).

Die im Allgemeinen auf traditionelle „hands-on“ Praktika ausgerichtete universitäre Lehre steht also einem Umsetzungsrisiko gegenüber, sollte sich herausstellen, dass Studierende durch virtuelle Praktika nicht die Kom-

petenzen erwerben können, welche im Sinne der Lernziele für das Konzept der Lehrveranstaltung oder des gesamten Studiums gefordert werden. Der Zwang zur Onlinelehre führt nun also zu einem Dilemma: Entweder man führt digitale Praktika durch, ohne zu wissen, wie sie sich lehrdidaktisch eignen, oder man streicht Praktika aus dem Lehrbetrieb, was wiederum das Constructive Alignment konterkariert. Der Zwang zur Digitalisierung (II) lässt an dieser Stelle allerdings kaum eine Wahl, deshalb sollten Umsetzungsmöglichkeiten kennengelernt und für die eigene Lehre evaluiert werden. Zukünftig könnte dies auch dazu beitragen, den Forschungsstand insoweit auszubauen, dass eine abschließende Bewertung dieser Maßnahmen möglich wird.

5 Umsetzung digitaler Praktika und virtueller Experimente

Einen guten Überblick über weite Teile der aktuellen virtuellen Laborlandschaft in Deutschland gibt der von Terkowsky et al. (2020) herausgegebene Sammelband „Labore in der Hochschullehre“. Dem aktuellen Stand der Technik folgend bieten sich drei Varianten zur Digitalisierung von Praktika an:

a. *Remote Labs*: Maschinen werden über eine Netzwerkschnittstelle bedienbar gemacht (Teleoperation) und erlauben somit die Praktikumsdurchführung im realen Labor aus der Ferne (vgl. Ortelt & Terkowsky 2020).

b. *Branching Scenarios*: Vorgegebene Entscheidungsbäume werden mittels Video Branching Szenarien oder Textadventures von den Studierenden interaktiv durchlaufen (vgl. Joubel 2021).

c. *Simulationen*: Die Kombination aus vorgegebenen Parametern und der Eingabe der Studierenden führt zu einem simulierten Output, welcher bspw. visuell zwei- oder dreidimensional dargestellt werden kann (vgl. Wabnitz & Berger 2020).

Bei den Pilotversuchen an Universitätsstandorten, welche vor und während der Covid-19-Pandemie stattfanden, kristallisierten sich mehrere Kennwerte für die Beschreibung und Bewertung der Umsetzungsmöglichkeiten von digitalen Praktika heraus:

- Zugangsmodalitäten
- Synchronität
- Virtualisierungsgrad
- Sonstige

Die *Zugangsmodalitäten* beschreiben den örtlichen und technischen Zusammenhang von Praktikumsangebot und Durchführung. Bei Präsenzpraktika existiert hierbei kein Unterschied – das Praktikum wird dort durchgeführt, wo es angeboten wird (bspw. im Labor), da allein dort die benötigten Geräte zur Verfügung stehen. Sogenannte Remote Labs hingegen trennen den Ort des Praktikumsangebots (das Labor) vom Ort der Durchführung (bspw. Homeoffice). Ein Zugang erfolgt oftmals über eine Schnittstelle im Webbrowser. Bei

Simulationen und Branching Scenarios gibt es keine räumliche Beziehung der Praktikumsinhalte (mehr). Ein Zugang stellt hier teilweise hohe Leistungsanforderungen an die genutzte Hardware der Studierenden (bspw. PC/Laptop oder Tablet).

Die *Synchronität* ist ein Maß, welches die Kopplung von Durchführung eines Praktikums mit der Anwesenheit bzw. Teilnahme einer Lehrperson beschreibt. Bei Präsenzpraktika ist die Anwesenheit einer Lehrperson durchgehend erforderlich. Im Falle von digitalen Praktika mit computergeneriertem Feedback ist dies nicht der Fall, weswegen Studierende hier die Möglichkeit haben, zeitlich flexibel agieren zu können. Bei Ersterem spricht man von synchronen, bei Letzterem von asynchronen Praktika. Durch automatisierte Prozesse sind asynchrone Praktika bspw. auch bei Remote Labs umsetzbar. Simulationen und Branching Scenarios sind per se asynchron, können aber synchron von Lehrenden begleitet werden.

Der *Virtualisierungsgrad* gibt an, zu welchem Anteil ein Praktikum virtualisiert, d. h. nur noch digital abgebildet ist. Im Rahmen von Präsenzpraktika werden bereits virtuelle Materialien zur Vorbereitung oder Online-Testate als Zulassungsvoraussetzung eingesetzt – der Rest ist nur real im Labor durchführbar. Simulationen als rein digitale Abbildung haben einen sehr hohen Virtualisierungsgrad, wohingegen man bei Remote Labs von Teilvirtualisierung sprechen kann, da hierbei reale Labore in Verbindung mit digitalen Schnittstellen zum Einsatz kommen.

Neben den drei explizit erwähnten Kennwerten, gibt es auch noch weitere Faktoren, die bei der Entwicklung einer Umsetzungsstrategie betrachtet werden sollten. Genannt sei hierbei bspw. die Kollaborationsmöglichkeit – also Funktionalitäten zur Interaktion der Praktikumssteilnehmer:innen untereinander – oder die Terminierung, welche im Rahmen von synchronen Präsenzpraktika in der Regel nur semesterweise oder gar jährlich gegeben ist, bei digitalen Praktika hingegen Spielraum für eine Flexibilisierung des Studiums ermöglicht.

Das Ziel sollte sein, die Zugangsmodalitäten an die aktuellen Beschränkungen anzupassen und ggf. für die Zukunft zu vereinfachen, eine asynchrone Durchführung zu ermöglichen und einen möglichst hohen Virtualisierungsgrad zu erreichen. Die oben genannten Varianten finden sich in folgender Auswahl an Beispielprojekten wieder, welche eine Übersicht über verschiedene Ansätze gibt, diese Anforderungen zu erfüllen, und gleichzeitig aufzeigen soll, dass ein fächerübergreifender Einsatz möglich ist:

- Industrial-eLab „Eingebettete Systeme“ der TU Bergakademie Freiberg, Robotik/Informatik (Variante a) (Hawlitschek et al. 2020)
- MINTTool der Justus-Liebig-Universität Gießen und Philipps-Universität Marburg, Pharmazie (Variante b) (Brüßler & Graulich 2021)
- MikiE der Technischen Universität Hamburg und der Beuth Hochschule für Technik Berlin, Techni-

sche Mikrobiologie (Variante c) (Technische Universität Hamburg 2020)

- LEIFPhysik der Joachim-Herz-Stiftung, Physik (Variante c) (Joachim Herz Stiftung 2021)
- VR-Klassenzimmer der Universität Potsdam, Lehramt (Variante c) (Wiepke et al. 2019)

Eine Hürde stellen die zur Umsetzung benötigten Kompetenzen der Lehrenden dar, da diese äußerst umfangreich ausfallen, aber deren Erwerb selten Gegenstand von Weiterbildungen an den Hochschulen und nicht Teil der Ausbildung während des Studiums waren. Dazu zählt zum einen eine Wissensbasis aus dem Bereich praktischer Informatik und Mediendidaktik, um Teilaspekte eines Praktikums insoweit klassifizieren zu können, dass eine Auswahl an geeigneten Werkzeugen zur Virtualisierung stattfinden kann. Zum anderen benötigt die Anwendung dieser Tools umfangreiches Methodenwissen und es müssen im Sinne der veranschlagten Lernziele passende Konzepte entwickelt und hinsichtlich des Lernoutcomes evaluiert und anschließend optimiert werden. Diese Lücke in der Hochschuldidaktiklandschaft wird seit Längerem bereits durch externe Anbieter wie bspw. LabsLand gefüllt, welche fertige Remote Labore anbieten oder bei der Konzeption und dem Aufbau derartiger Praktikumsformen unterstützend tätig sind (vgl. LabsLand 2021). Allerdings ist die Externalisierung dieser Ressourcen und der damit einhergehende Souveränitätsverlust der Hochschullehre kritisch zu hinterfragen.

6 Chancen, Risiken und Forderungen an die Hochschulpolitik

Die Chancen digitaler Lehrformen, welche es für die eigene Veranstaltung auszuloten gilt, um entsprechend Entscheidungen zur Nutzung zu treffen, bilden sich vielfältig ab. Da wäre zum einen die Ermöglichung didaktischer Konzepte wie Blended Learning oder Flipped Classroom auch für praktische Tätigkeiten und zum anderen der Schritt hin zu einer zukünftig vollständig asynchronen Lehre. Die mögliche Wiederholung von Praktika unterstützt die Studierenden beim Selbststudium und in Präsenzzeiten bieten virtualisierte Materialien Chancen zur Verbesserung der Vorbereitung von realen Laborversuchen. Es lassen sich auch neue Konzepte ausprobieren und Grenzen der traditionellen Lehre überschreiten, wie bspw. das Prinzip von Versuch und Irrtum zu nutzen und den Studierenden zu ermöglichen, Fehler zu machen – ohne dabei die Unversehrtheit der Studierenden zu gefährden.

Demgegenüber stehen Risiken wie bspw. die heterogene Technikausstattung der Studierenden und auch die stellenweise ungeeignete Universitätsinfrastruktur, welche hohe technische Hürden bei der Umsetzung mit sich bringen. Kurzfristig werden Umstellungen in diesem Bereich einen hohen Zeit- und Kostenaufwand bedeuten. Fehlende Kompetenzen der Lehrenden und ein fehlender Support seitens der Hochschulen könnten das Vorhaben behindern. Perspektivisch werden Verantwortliche und Wissensträger:innen die Hochschulen verlassen und eine Weiterentwicklung von be-

gonnenen Projekten wird möglicherweise nicht finanziert. Dies stellt die Nachhaltigkeit solcher Konzepte generell vor große Herausforderungen (vgl. Nölting & Dembski 2021).

Zusammenfassend gibt es zahlreiche Beispiele, die für Versäumnisse in der Entwicklung digitaler Formate für Praktika sprechen, welche durch die Covid-19-Pandemie schlagartig offenbart wurden. Auch trotz des Digitalisierungsschubs des letzten Jahres hängt die Entwicklung innerhalb der Hochschulen noch hinterher, worauf der wachsende Markt von externen Anbietern schließen lässt.

Die Weiternutzung der Erfahrungen aus den digitalen Semestern und der jetzt erstellten Materialien bietet vor allem eines: keinen Weg mehr zurück. In Präsenzzeiten werden virtuelle Materialien und Formate zur Vorbereitung und Wiederholung eines Praktikums eingesetzt und dadurch vielleicht auch die vollständig asynchrone Lehre und Flipped Classroom Modelle ermöglicht. Cross-Reality-Labore mit Gamification-Elementen könnten die Regel werden und im internationalen Wettbewerb der Hochschulen eine große Rolle spielen.

Daraus leiten sich implizit vier Forderungen ab:

1. Mehr über das Thema sprechen: Foren und Konferenzen sollten auch nach der Pandemie weiterhin auf das Thema Digitalität der Lehre ausgerichtet werden
2. Mehr Weiterbildungen für den benötigten Kompetenzerwerb der Lehrenden
3. Absicherung der Finanzierung von Projekten und umfangreichen Untersuchungen zur Evaluation digitaler Laborpraktika
4. Verstetigung der Stellen in den E-Learning- und Hochschuldidaktik-Abteilungen, um dem Verlust von aktuell hohem Expertenwissen vorzubeugen

Literatur

Bloom, B. S. (1956). *Taxonomy of Educational Objectives, Handbook: The Cognitive Domain*. New York: David McKay. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1428-6_141

Brinson, J. R. (2015). Learning outcome achievement in non-traditional (virtual and remote) versus traditional (hands-on) laboratories: A review of the empirical research. *Computers & Education*, 87, 218–237. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2015.07.003>

Brüßler, J. & Graulich, N. (2020). MINT-Tool – Ein Baukasten für interaktive Videoexperimente. Justus-Liebig-Universität Gießen. <https://www.uni-giessen.de/fbz/zentren/zfbk/digll/digll-juu-projekte-2/zentrale-foerderprojekte/minttool> (05.03.2021)

Chen, S. (2010). The view of scientific inquiry conveyed by simulation-based virtual laboratories. *Computers & Education*, 55(3), 1123–1130. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2010.05.00910>

Dörner, R., Broll, W., Grimm, P. & Jung, B. (2019). *Virtual und Augmented Reality (VR/AR): Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität (2., erweiterte u. aktualisierte Aufl.)*. Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-58861-1>

Handke J. (2019). Nicht Anreichern, sondern Integrieren: neue Mehrwerte durch Digitalisierung. In: S. Kauffeld & J. Othmer (Hrsg.). *Handbuch Innovative Lehre*. Wiesbaden: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-22797-5_3

Handke, J. (2020). *Handbuch Hochschullehre Digital: Leitfaden für eine moderne und mediengerechte Lehre (3., aktualisierte u. erweiterte Aufl.)*. Baden-Baden: Tectum Wissenschaftsverlag. <https://doi.org/5771/9783828875302>

Hasselhorn, M. & Gold, A. (2017). *Pädagogische Psychologie, Erfolgreiches Lernen und Lehren (4., erweiterte Aufl.)*. Stuttgart: Kohlhammer.

Hawlichscek, A., Berndt, S., Dietrich, A., Zug, S. (2020). Iterative Adaption eines Remote-Labors unter Berücksichtigung des Feedbacks der Studierenden. In: C. Terkowsky et al. (Hrsg.). *Labore in der Hochschullehre – Didaktik, Digitalisierung, Organisation*. Bielefeld: wbv Media GmbH & Co. KG. <https://doi.org/10.3278/6004804w145>

Hochschulforum Digitalisierung (2016). *The Digital Turn – Hochschulbildung im digitalen Zeitalter*. Arbeitspapier Nr. 27. Berlin: Hochschulforum Digitalisierung. <https://hochschulforumdigitalisierung.de/de/abschlussbericht/geschaeftsstelle> (10.09.2021)

Joachim Herz Stiftung (2021). LEIFphysik. Internetportal. <https://www.leifiphysik.de/> (05.03.2021)

Joubel A. S. (2019). Branching Scenario (beta). H5P. <https://h5p.org/branching-scenario> (05.03.2021)

LabsLand Experimentia S.L. (2021). Labsland Laboratory Browser. Real laboratories, on the Internet. <https://labsland.com/en> (05.03.2021)

Nölting, B. & Dembski N. (2020). Digitalisierung und nachhaltiges Wirtschaften zusammendenken – Eine Herausforderung für die Lehre. In: W. F. Leal (2020). *Digitalisierung und Nachhaltigkeit. Theorie und Praxis der Nachhaltigkeit*, 23–43. Berlin/Heidelberg: Springer Spektrum. https://doi.org/10.1007/978-3-662-61534-8_2

Ortelt, T. R. & Terkowsky, C. (2020). Community Working Group Remote-Labore in Deutschland: Projekte, Gemeinsamkeiten, Unterschiede. In: C. Terkowsky et al. (2020). *Labore in der Hochschullehre – Didaktik, Digitalisierung, Organisation*. Bielefeld: wbv Media GmbH & Co. KG. <https://doi.org/10.3278/6004804w229>

Renken, M. D. & Nunez, N. (2013). Computer simulations and clear observations do not guarantee conceptual understanding. *Learning and Instruction*, 23, 10–23. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2012.08.006>

Rutten, N., van Joolingen, W. R. & van der Veen, J. T. (2012). The learning effects of computer simulations in science education. *Computers & Education*, 58(1), 136–153. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.07.017>

Schubarth, W., Speck, K., Seidel, A., Gottmann, C., Kamm, C. & Krohn, M. (Hrsg.) (2011). *Studium nach Bologna: Praxisbezüge stärken?! Praktika als Brücke zwischen Hochschule und Arbeitsmarkt*. Wiesbaden: Springer VS.

Smetana, L. K. & Bell, R. L. (2012). Computer Simulations to Support Science Instruction and Learning: A critical review of the literature. *International Journal of Science Education*, 34(9), 1337–1370. <https://doi.org/10.1080/09500693.2011.605182>

Strahinger, S. & Leyh, C. (2017). *Gamification und Serious Games: Grundlagen, Vorgehen und Anwendungen (Edition HMD) (1. Aufl. 2017)*. Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-16742-4>

Technische Universität Hamburg (TUHH) – Institut für Technische Mikrobiologie (2021). MikiE – Mikroben im Einsatz. Das Virtuelle Labor. <https://miki.hou.tuhh.de/virtuellesLabor.html> (05.03.2021)

Terkowsky C., May, D., Frye, S., Haertel, T., Ortelt, T. R., Heix, S., Lensing, K. (Hrsg.) (2020). *Labore in der Hochschullehre – Didaktik, Digitalisierung, Organisation*. Bielefeld: wbv Media GmbH & Co. KG. <https://doi.org/10.3278/6004804w>

Van der Kleij, F. M., Feskens, R. C. W. & Eggen, T. J. H. M. (2015). Effects of Feedback in a Computer-Based Learning Environment on Students' Learning Outcomes. *Review of Educational Research*, 85(4), 475–511. <https://doi.org/10.3102/0034654314564881>

Wabnitz, P. & Berger, M. (2020). Möglichkeiten digitaler Praktika und virtueller Experimente (in der Ingenieurausbildung). 1. HDS.Forum Digital am 12. November 2020. https://bildungsportal.sachsen.de/portal/wp-content/uploads/2020/10/201015_Flyer_HDS.Forum2020.pdf (10.09.2021)

Wannemacher, K., Jungermann, I., Scholz, J., Tercanli, H., & Villiez, A. (2016). *Digitale Lernszenarien im Hochschulbereich*. Arbeitspapier Nr. 15. Hochschulforum Digitalisierung. <https://hochschulforumdigitalisierung.de/de/digitale-lernszenarien-arbeitspapier-15> (10.09.2021)

Wiepke A., Richter, E., Zender, R. & Richter, D. (2019). Einsatz von Virtual Reality zum Aufbau von Klassenmanagement-Kompetenzen im Lehramtsstudium. In: N. Pinkwart & J. Konert (Hrsg.): *Die 17. Fachtagung Bildungstechnologien. Lecture Notes in Informatics (LNI)*. Bonn: Gesellschaft für Informatik.

Zitiervorschlag:

Wabnitz, P. & Funke, J. (2022). Digitalisierung der praktischen Ingenieurausbildung. Betrachtungen zu digitalen Praktika und virtuellen Experimenten nach dem Krisenmodus der Covid-19 Pandemie. In: *Perspektiven auf Lehre. Journal for Higher Education and Academic Development*, 2(1), 21–27.

DOI: 0.55310/jfhead.21

