

**Virtualisierung eines verfahrenstechnischen
Prozesses als remote Labor für die
Aus- und Weiterbildung in Industrie 4.0**

Dissertation

Zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

der Fakultät für Maschinenbau

der Ruhr-Universität Bochum

von

Daniel Kruse

aus Hagen

Bochum 2017

Dissertation eingereicht am:	22.08.2017
Tag der mündlichen Prüfung:	26.09.2017
Erstgutachter:	Jun.-Prof. Dr.-Ing. Sulamith Frerich
Zweitgutachter:	Prof. Dr. -Ing Marcus Petermann

für Alexandra

Vorwort

Die Ihnen vorliegende Dissertationsschrift beschäftigt sich mit den Auswirkungen der Veränderungen der alltäglichen Arbeitswelt auf Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten. Meine Forschung im Bereich der virtuellen Lernwelten wurde im Rahmen des Projektes Exzellentes Lehren und Lernen in den Ingenieurwissenschaften (ELLI) möglich, welches ab dem Jahr 2011 vom Bundesministerium für Forschung und Bildung gefördert wurde. Durch meine Beschäftigung in der Arbeitsgruppe der Virtualisierung verfahrenstechnischer Prozesse an der Ruhr-Universität Bochum und in Kooperation mit der TU Dortmund sowie der RWTH Aachen gelang die komplexe Transformation ausgewählter Elemente der Hochschullehre in eine virtuelle Lernwelt. Im Rahmen des ELLI-Projektes wurden verschiedene Initiativen zur Virtualisierung der Lehre in den Ingenieurwissenschaften untersucht, wobei der Fokus meiner Untersuchung auf dem Einsatz fernbedienbarer, realer Laborexperimente zur Aus- und Weiterbildung liegt. Von Mai 2013 bis Juni 2017 habe ich die hierfür notwendigen Grundlagen angelegt, eine IT-Infrastruktur eingerichtet und ein verfahrenstechnisches remote Labor zu Demonstrationszwecken entwickelt. Dabei vereint meine Forschung unter anderem die Disziplinen der Ingenieurwissenschaften, Elektronik und Elektrotechnik, IT- und Kommunikationssysteme, aber auch die Didaktik für Aus- und Bildungsangebote. In Zusammenarbeit mit meinen Betreuern Jun.-Prof. Dr.-Ing. Sulamith Frerich und Dr.-Ing. Stefan Pollak wurden die Rahmenbedingungen und die Fragestellung für diese Arbeit entwickelt. Im Verlauf meiner Arbeit haben mich meine beiden Betreuer, aber auch meine Kollegen Robert Kuska und Dirk Lämmerhirt, mit ihrer Expertise bei vielen Diskussionen und Entwicklungen unterstützt.

Ich möchte mich weiterhin bei Jun.-Prof. Dr.-Ing. Sulamith Frerich und Prof. Dr.-Ing. Marcus Petermann für das in mich gesetzte Vertrauen und die weitreichende Unterstützung bedanken. Ihrem interdisziplinären Interesse an technischen und didaktischen Fragestellungen sowie dem Einsatz für die Kooperation mit allen Projektpartnern ist es zu verdanken, dass ich die Anwendung von remote Laboren zur Aus- und Fortbildung im Hochschulumfeld erfolgreich implementieren konnte. Großer Dank gilt auch Prof. Dr.-Ing. Dieter Kreimeier für die Übernahme des Vorsitzes meiner Promotionskommission sowie Jun.-Prof. Dr.-Ing. Katja Laurischkat für einen regen Gedankenaustausch. Auch für die Unterstützung aller Kolleginnen und Kollegen möchte ich danken, die im Zusammenspiel unserer Forschungs- und Arbeitsgemeinschaft an unzähligen Stellen stets hilfreich zur Hand gegangen sind. Ein großer Dank gilt auch meinen studentischen Hilfskräften und Studienarbeitern, welche ihren jeweiligen Teil zum Gesamtprojekt meiner Forschung beigetragen haben. Ein besonderer Dank gilt meiner liebevollen Ehefrau Alexandra, welche mich in den letzten vier Jahren bei der Anfertigung meiner Arbeit unterstützt hat. Zu großem Dank bin ich auch meiner Familie verpflichtet, welche mich immer tatkräftig unterstützt hat.

Ich hoffe, dass Ihnen das Lesen der vorliegenden Arbeit Freude bereitet und Ihnen einen Einblick in die Herausforderungen der modernen Aus- und Bildungsangebote ermöglicht.

Inhalt

Abkürzungen	i
Nomenklatur	iv
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Industrie 4.0: Chancen, Risiken und Herausforderung	3
2.1.1 Industrie 4.0 in der Verfahrenstechnik	6
2.1.2 Qualifikationsbedarf für Arbeitsumfelder in Industrie 4.0	7
2.2 Grundlagen von eLearning-Qualifizierungsprogrammen	9
2.2.1 Anforderungen der Industrie 4.0 an eLearning-basierte Mitarbeiterqualifizierung	9
2.2.2 Methoden, Konzepte und Parameter für eLearning-Szenarien	12
2.2.3 Beschreibung ausgewählter eLearning-Tools	16
2.2.4 Mitarbeiterqualifizierung mit eLearning in Unternehmen	24
2.3 Grundlagen virtueller und remote Labore	26
2.3.1 Grundlagen der Laborlehre	27
2.3.2 Grundlagen der virtuellen Labore	33
2.3.3 Grundlagen der remote Labore	36
2.4 Das Potential virtueller und remote Labore für die Aus- und Weiterbildung	40
3 Das Lehren und Lernen mit virtuellen und remote Laboren	43
3.1 Der VRL-Lernprozess	43
3.1.1 Orientierungsphase	44
3.1.2 Vorbereitungsphase	48
3.1.3 Reflexionsphase	51
3.1.4 Durchführungsphase	54
3.1.5 Auswertungsphase	57
3.1.6 Präsentationsphase	58
3.1.7 Bewertungsphase	59
3.2 Einsatz des VRL-Lernprozesses in der universitären Laborlehre	60
4 Verfahrenstechnische Untersuchung von Strömungen und Druckverlusten	61
4.1 Grundlagen der Druckverlustmessung in durchströmten Partikelsystemen	61
4.1.1 Festbettschüttungen	62
4.1.2 Strömungen	64
4.1.3 Berechnung des Druckverlustes	65
4.2 Prüfstand zur Untersuchung von Strömungen und Druckverlusten	67
4.2.1 Aufbau	67
4.2.2 Aktoren: Pumpen und Drossel	69
4.2.3 Sensoren: Druck, Durchfluss und Temperatur	73
4.2.4 Trägersystem für Festbettschüttungen	77
4.2.5 Bedienkonzept als lokales Labor	78
4.3 Erweiterung des Prüfstands zum remote Experiment	81

4.3.1	Modifikation des Bedienkonzeptes	82
4.3.2	Modifikation der mechanischen Systeme.....	83
4.3.3	Modifikation der elektrischen Systeme	84
4.3.4	Modifikation des Labor-PCs und der Software	85
5	Betrachtung des Druckverlustes durchströmter Festbettschüttungen.....	88
5.1	Experimentelle Erfassung des Druckverlusts	88
5.1.1	Prozessfluide	88
5.1.2	Festbettschüttung.....	89
5.1.3	Messmethode.....	91
5.1.4	Ergebnisse	92
5.2	Simulation der Strömung in einer Festbettschüttung	97
5.2.1	Motivation	97
5.2.2	Ablauf einer Simulation mit ANSYS Workbench und ANSYS Fluent	97
5.2.3	Geometrisches Modell.....	99
5.2.4	Netzgenerierung und Netzunabhängigkeitsstudie	100
5.2.5	Mathematische Modelle und Simulationsbedingungen.....	103
5.2.6	Ergebnisse	104
6	Diskussion und Bewertung.....	111
6.1	Bewertung des VRL-Lernprozesses nach den Anforderungen von Industrie 4.0	111
6.2	Bewertung des Strömungsprüfstands für den Einsatz als remote Experiment	113
6.3	Bewertung der Simulation für den Einsatz im VRL-Lernprozess.....	116
6.4	Empfehlungen für die Einrichtung eines VRL-Lernprozesses.....	117
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	121
8	Literaturverzeichnis.....	125
9	Anhang	134
9.1	Anforderungen für Aus- und Weiterbildung von Industrie 4.0 (Fortsetzung).....	134
9.2	LabVIEW-VI des remote Prüfstands.....	137
9.3	Viskositätsmessung verschiedener Wasser-Glyzerin-Gemische.....	139
9.4	Druckverluste der Wasser und Wasser-Glyzerin Messungen	141
9.5	Evaluation des VRL-Lernprozess (Fragenkatalog)	142
9.6	CT-Scan einer Festbettschüttung für die Strömungssimulation	145

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
AA	Abschlussarbeit
AR	Augmented Reality
AV	Augmented Virtuality
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CAD	Computer-Aided Design
CBT	Computer-Based-Training
cDAQ	compact-Data-Acquisition-System
CFD	Computational Fluid Dynamics
CLT	Cognitive Load Theory
CMS	Content-Management-System
CPS	Cyber-physischen Produktion Systeme
CPU	Central-Processing-Unit
DCOM	Distributed Component Object Model
DNS	Direkte Numerische Simulation
EDUCON	Global Engineering Education Conference
ELL	ELLI-Lab-Library
ELLI	Exzellentes Lehren und Lernen in den Ingenieurwissenschaften
E-Modul	Elastizitäts-Modul
ERP	Enterprise-Resource-Planning
ESS	Experimental-Storage-Service
FL	Forschungslabor
FU	Frequenzumrichter
GB	Gigabyte
GUI	Graphical User Interface
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement

Abkürzung	Beschreibung
HD	Hochdruck
HMI	Human-Machine-Interface
HTML	Hypertext Markup Language
ICL	Interactive Collaborative Learning and Engineering Pedagogy
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IIS	Internet-Information-Service
IL	Integriertes Labor
ILS	Interactive-Lab-Server
ISB	Interactive-Service-Broker
IT	Informationstechnologie
KTML	Kognitive Theorie des Multimedialen Lernens
Lab	Labor
LES	Large-EDDY-Simulation
LL	Lehr-Lernlabor
LMS	Learning-Management-Systeme
LOM	Learning-Objects-Metadata
LSS	Lab-Side-Scheduling
LV	LabVIEW
lvm	LabVIEW Measurement Datei
MMS	Mensch-Maschine-Schnittstelle
MOOC	Massive Open Online Course
ND	Niederdruck
NI	National Instruments
PA	Projektarbeit
PDF	Portable Document Format
PID	Proportional–Integral–Derivative-Controller
PL	Projektlabor

Abkürzung	Beschreibung
QR-Code	Quick-Response-Code
RAM	Random-Access-Memory
RANS	Reynolds-Averaged-Navier-Stokes
REV	Remote Engineering and Virtual Instrumentation
RFID	Radio-Frequency-Identification
SCROM	Sharable-Content-Object-Reference-Model
SQL	Structured-Query-Language
SST	Shear-Stress-Transport
STEP	Standard for the Exchange of Product-Model-Data
TB	Terrabyte
TTL	Transistor-Transistor-Logik
USB	Universal-Serial-Bus
USS	User-Side-Scheduling
VI	Virtual Instrument
VPN	Virtual Private Network
VPS	Virtuelles Prozessschema
VR	Virtual Reality
VRL	Virtuelles und remote Labor
WBT	Web-Based-Training

Nomenklatur

Symbol	Einheit	Beschreibung
A_p	m^2	Partikeloberfläche
$L_{Festbett}$	mm	Länge Festbett
$L_{Strompfad}$	mm	Länge Strompfad
S_v	$\frac{1}{m}$	spezifische Oberfläche
V_l	m^3	Volumen, leer
$V_{p ges}$	m^3	Volumen, alle Partikel
V_p	m^3	Partikelvolumen
c_w	–	Widerstandskoeffizient
d_{32}	mm	Sauterdurchmesser
d_h	mm	Hydraulischer Durchmesser
$d_{Festbett}$	mm	Durchmesser Festbett
d_s	mm	Durchmesser einer oberflächengleichen Kugel
d_s	mm	Durchmesser einer volumengleichen Kugel
f_k	–	Reibungsbeiwert
\dot{m}	$\frac{kg}{s}$	Massenstrom
w_0	$\frac{m}{s}$	Leerrohrgeschwindigkeit
DN	Mm	Nenndurchmesser
Δp	$mbar$	Druckdifferenz

Symbol	Einheit	Beschreibung
A	m^2	Oberfläche
D	mm	Rohrinnendurchmesser
$Eu_{Festbett}$	–	Eulerzahl des Festbett
L	mm	Länge
N	min^{-1}	Drehzahl
PN	Bar	Nenndruck
Re_p	–	Partikel Reynoldszahl
Re_i	–	Interstitial Reynoldszahl
Re	–	Reynoldszahl
T	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
T	–	Tortuosität
V	m^3	Volumen
d	mm	Partikeldurchmesser
k	–	spezifische kinetische Energie
p	bar	Druck
r	mm	Radius
δ	mm	Charakteristisches Längenmaß
η	mPas	Viskosität
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	Dichte

Symbol	Einheit	Beschreibung
ω	–	charakteristische Frequenz der energietragenden Wirbel
ϵ	–	mittlere Dissipation turbulenter kinetischer Energie (Simulation)
ϵ	–	Porosität (Festbett)

1 Einleitung

Menschen lernen von Geburt an. Umfassen die ersten Lektionen in unserem Leben die Entwicklung der eigenen Motorik und das Erlernen von Sprache, so folgen bald die Einführungen in die Grundzüge der sozialen Interaktion und in die gesellschaftlichen Normen. Im Grundschulalter werden grundlegende Fähigkeiten für das weitere Leben vermittelt. Gelernt wird jedoch auch außerhalb der Schule beispielsweise durch Sport, Freunde, Hobbies und weitere Freizeitaktivitäten. Mit der ersten schulischen Qualifikation eröffnen sich jugendlichen Menschen viele neue Perspektiven. Hierzu gehören die praktischen Berufsausbildungen, höhere Schulabschlüsse und ggf. ein Studium. Der Übergang von der Schule oder der Universität ins Berufsleben bedeutet für gewöhnlich eine gewisse Umstellung. Hier geht es nun um das kompetente Einsetzen alles Wissens und aller Erfahrungen, die im bisherigen Werdegang erlangt wurden. Die Annahme, von nun an wäre Lernen nicht mehr notwendig, ist in einer sich kontinuierlich verändernden Welt nicht haltbar. Neben den niederschweligen Lernprozessen des alltäglichen Arbeitslebens wird auch die aktive Weiterbildung jedes Arbeitnehmers immer wichtiger. Die jüngsten Veränderungen im Bereich des industriellen Arbeitsumfeldes führen zu einer Transformation von Arbeits- und Produktionswelt und zeigen den Bedarf an fortwährender Weiterbildung. Bisherige Arbeitsorganisation ist vorwiegend linear ausgeprägt, wird jedoch durch die Entwicklungen rund um das Thema Digitalisierung der Arbeitswelt sukzessiv zu vernetzten Arbeitsstrukturen weiterentwickelt. Dieser Wandel wird als 4. industrielle Revolution bezeichnet und stellt neben der Aussicht auf neue Geschäftsfelder auch neue Anforderungen an die Mitarbeiter der sich im Wandel befindlichen Unternehmen [Roth 2016, S. 5]. Die neuen Strukturen bringen Arbeitsbereiche und Menschen auf neue Art und Weise zusammen. Um die Arbeitnehmer für die neuen Strukturen der Industrie 4.0 qualifizieren zu können, muss das Aus- und Weiterbildungsangebot in Betrieben, Universitäten und Schulen auf die Anforderungen der Industrie 4.0 ausgerichtet werden [Gebhardt et al. 2015, S. 47]. Der Einsatz von eLearning-Konzepten zur Mitarbeiter- und Personalentwicklung ist weit verbreitet. Im Bereich digitaler Produkte und Services erlauben eLearning-Konzepte flexible und individuelle Aus- und Weiterbildungsangebote. So können die notwendigen Fachkompetenzen für Installation, Einrichtung und Betrieb der komplexen Telekommunikations- und Informationstechnologien, auf deren Basis die Industrie 4.0 aufbaut, bereits heute praktisch durch eLearning-Konzepte vermittelt werden. Außerhalb dieses Bereichs werden eLearning-Konzepte hauptsächlich für die Vermittlung theoretischer Inhalte eingesetzt [MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung 2016, S. 8]. Hier stellt der Aufbau praktischer Kompetenzen durch flexible eLearning-Konzepte eine große Herausforderung dar. Für die erfolgreiche Transformation der Aus- und Weiterbildung für Industrie 4.0 muss auch der Aufbau von nicht digitalen, praktischen Kompetenzen durch eLearning-Konzepte ermöglicht werden. Für das vernetzte Arbeitsumfeld in der Industrie 4.0 entsteht zudem der Bedarf nach sogenannten Querkompetenzen an den Schnittstellen der neu verbundenen Arbeitsbereiche. Mitarbeiter, die solche Kompetenzen quer zu ihrem fachlichen Hintergrund aufbauen, werden in Zukunft benötigt, um die Auswirkungen lokaler Aktivitäten auf einen vernetzten Arbeits- und Produktionsprozess abschätzen zu können [Bothhof und Hartmann

2015, S. 4]. Für zukünftige Arbeitnehmer ist die Einführung neuer Berufsbilder, wie z.B. dem Mechatroniker, dem Chematroniker oder dem Maschinenbauinformatiker, eine Möglichkeit sich für das Arbeitsumfeld Industrie 4.0 zu qualifizieren [Stephan 2016, S. 9]. Um den sofortigen Bedarf nach qualifizierten Mitarbeitern mit einem hohen Maß an Querkompetenz zu decken, müssen öffentliche und betriebliche Aus- und Weiterbildungsangebote neue, praxisorientierte eLearning-Konzepte entwickeln [Gebhardt et al. 2015, S. 52]. Hierbei gilt es die Individualität, Flexibilität und Skalierbarkeit theoriebasierter eLearning-Konzepte auch für ein praxisorientiertes eLearning-Konzept umzusetzen. Die vorliegende Arbeit ergründet zunächst die Anforderungen an eLearning-Konzepte für die Aus- und Weiterbildung für das Arbeitsumfeld Industrie 4.0. Auf Basis dieser Anforderungen wird ein eLearning-Konzept entwickelt, mit dessen Hilfe praxisorientiertes Lernen möglich ist. Dieses Konzept soll unabhängig sowohl für präsenzbasierte aber auch vollständig digitale Lernveranstaltungen einsetzbar sein. Die Virtualisierung einer praxisorientierten Lernumgebung geschieht durch den Einsatz von virtuellen und remote Laboren. Ein flexibler Lernprozess begleitet den Aufbau praktischer Kompetenzen in virtuellen und remote Laboren inhaltlich und gibt die Möglichkeit, die individuelle Leistung zu reflektieren. Am Beispiel eines verfahrenstechnischen Strömungsprüfstandes zu Untersuchung von Festbettschüttungen werden die notwendigen Maßnahmen zur Bereitstellung eines remote Labors demonstriert. Dabei werden organisatorische und technische Maßnahmen erläutert, die den sicheren und zuverlässigen Betrieb von remote Laboren ermöglichen. Ergänzend liefert eine numerische Strömungssimulation durch die Visualisierung der vorherrschenden Strömungszustände einen Einblick in die komplexen Strömungsvorgänge einer durchströmten Festbettschüttung. Die untersuchten Elemente werden zu einem neuartigen eLearning-Konzept zusammengeführt, welches sich eigenständig oder in Kombination mit bereits bestehenden eLearning-Formaten nutzen lässt. Auf diese Weise entsteht die Möglichkeit des individuellen und praxisnahen Aufbaus von Fach- und Querkompetenzen durch ein eLearning-Konzept für die neuen Arbeitsfelder in der Industrie 4.0.

2 Stand der Technik

Dieses Kapitel widmet sich den aktuellen Entwicklungen der industriellen Arbeitswelt, dem Einsatz von eLearning für Aus- und Weiterbildung und dem Potential von alternativen Zugängen zu Laborexperimenten. Im Umfeld von Industrie 4.0, Internet und Telekommunikationstechniken sowie eLearning-Methoden ist dieses Anliegen jedoch mit einer gewissen Unschärfe behaftet. Wird der aktuelle Standard beschrieben, ist er bei Veröffentlichung dieser Arbeit möglicherweise bereits überholt. Der Fortschritt ist bei technischen Produkten jedoch gut dokumentiert, sodass ein anknüpfender Ansatz bei gleichzeitiger Beobachtung der Entwicklungen möglich ist. Als die drei Eckpfeiler dieser Arbeit werden die Veränderung des industriellen Arbeitsumfeldes im Sinne von Industrie 4.0, die Anwendung von eLearning-Tools und die Verwendung von virtuellen und remote Laboren betrachtet. Diese drei Bereiche unterliegen alle einem raschen technischen Fortschritt, sind erst partiell etabliert und auch erst teilweise evaluiert. Die Verwendung der vorgestellten Techniken und Methoden bietet attraktive neue Chancen, besonders durch die Kombination von bisher einzeln bestehenden Elementen. Dies birgt aber zugleich auch Risiken, deren Abschätzung und Eindämmung stets bedacht werden müssen. Im Folgenden werden die Eckpfeiler dieser Arbeit erläutert und charakterisiert.

2.1 Industrie 4.0: Chancen, Risiken und Herausforderung

Die Diskussionen und Arbeitskreise um das Thema Industrie 4.0 sind oft technikgetrieben und fokussieren meist auf klassische, industrielle Produktionsprozesse. Häufig sind die Gegenstände dieser Diskussionen die Standardisierung technischer und organisatorischer Abläufe, die Sicherheit für Daten und Prozesse sowie die möglichen neuen Geschäftsfelder durch die digitale Transformation. Die Diskussion über Aus- und Weiterbildung zur Deckung des Bedarfs an qualifiziertem Personal rücken zunehmend in den Fokus der Diskussionen. Die Konzepte und Ideen aus diesen Diskussionen werden nicht nur den Bereich des industriellen Arbeitens verändern, sondern auch zu einer Neugestaltung des Bildungssektors führen.

Effizienz und Produktivität sind Attribute, die im deutschen Inland und weltweit mit Produkten und Herstellungsprozessen aus Deutschland assoziiert werden [ebd., S. 47]. Die Herkunftsangabe „Made in Germany“ verspricht ausgereifte Produkte, die unter Einhaltung präziser Herstellungsbedingungen ihren Weg zum Endverbraucher überall auf der Welt finden. Dieses Grundvertrauen in die Kompetenz deutscher Unternehmen ist das aktuelle Resultat verantwortungsbewusster Qualitätssicherung und vorausschauender Forschung und Entwicklung der vergangenen Jahre. Mit der fortschreitenden Entwicklung von Mikroelektronik und dem massiven Ausbau von Telekommunikationsnetzen wird nun eine neue Ära der Herstellungs- und Produktionsverfahren in Aussicht gestellt. Wird die industrielle Entwicklung ab dem Ende des 18. Jahrhunderts betrachtet, so lassen sich rückblickend verschiedene industrielle Revolutionen erkennen. Die erste industrielle Revolution fand mit der Einführung des mechanischen Webstuhls zum Ende des 18. Jahrhunderts statt. Das rasche Herstellungstempo der Stoffproduktion, im Vergleich zur Handarbeit, revolutionierte die Textilbranche der damaligen Zeit. Die

schnelle Fortentwicklung mechanischer Konstruktionen und das Bedürfnis nach noch effizienteren Produktionsabläufen bescherte der Fließbandfertigung als zweiter industrieller Revolution im Übergang vom 19. ins 20. Jahrhundert großen Erfolg. Die Einführung der Automatisierung in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts erhöht die Effizienz wiederkehrender Abläufe der Herstellungsprozesse und wird als dritte industrielle Revolution bezeichnet. Die neuste Entwicklung hin zur ganzheitlichen Vernetzung von automatisierten Herstellungsprozessen zu einem Gesamtsystem, wird als vierte industrielle Revolution gesehen.

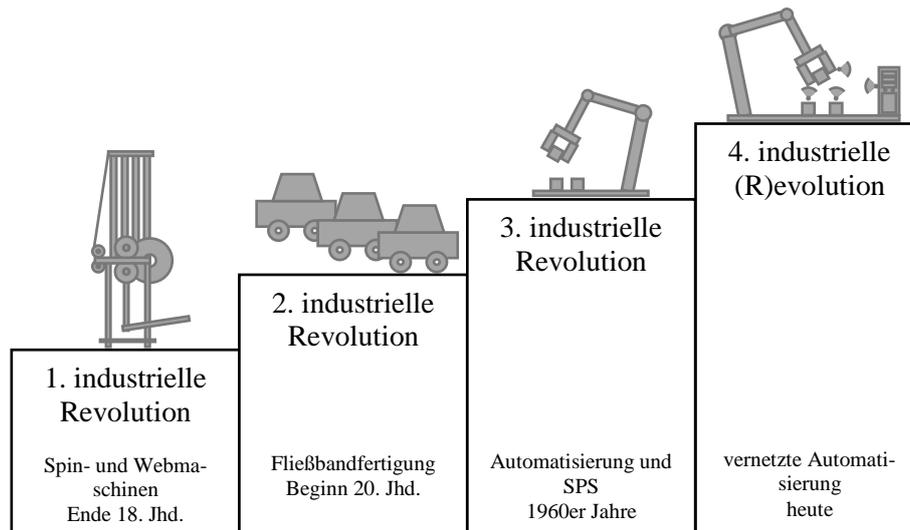


ABBILDUNG 2-1 ZEITSTRAHL DER INDUSTRIELLEN REVOLUTIONEN VOM ENDE DES 18. JAHRHUNDERTS BIS HEUTE [BOTTHOF UND HARTMANN 2015, S. 4]

Die in Abbildung 2-1 dargestellte vierte Stufe ist jedoch mehrheitlich ein Ausblick und nicht unumstritten. Hierbei wird die Frage gestellt, ob aus heutiger Sicht die Industrie 4.0 nicht eher eine Evolution der dritten Stufe der industriellen Revolution ist [Botthof und Hartmann 2015, S. 24]. Dabei kommt die Frage auf, wie die Industrie 4.0 charakterisiert wird, bzw. was die Chancen dieser Entwicklung sind. Für die Charakterisierung einer Produktion nach Industrie 4.0 definiert Siepmann fünf Paradigmen für Herstellungsprozesse in der produzierenden Industrie [Siepmann 2016, S. 37–42]. Diese Paradigmen adressieren die ganzheitliche Integration aller Vorgänge, das Vertrauen in dezentrale Intelligenz und eine dezentrale Steuerung, sowie das durchgängig digitale Engineering und die Entstehung von ganzheitlich vernetzten Produktionssystemen.

Herstellungsprozesse in Unternehmen können in vertikaler und horizontaler Richtung betrachtet werden. In vertikaler Richtung wird hierbei der Datenaustausch zwischen der Maschinenebene der Herstellung über alle Hierarchiestufen eines Unternehmens betrachtet. Dabei erfolgt der digitale Informationsaustausch von der Produktionsebene bis hin zur Leitungsebene des Unternehmens in beide Richtungen. Die horizontale Ebene erstreckt sich über alle Stationen entlang der Wertschöpfungs- und Lieferkette bis hin zum Endkunden und dem Recycling. Für eine möglichst breite Datenbasis, auf deren Grundlage Prozessentscheidungen getroffen werden, ist ein strukturierter, intensiver Datenaustausch zwischen den Elementen dieser beiden Richtungen notwendig. Zudem betrifft dieser Austausch nicht

nur das produzierende Unternehmen, sondern auch den automatischen Datenaustausch mit Zulieferern und Kunden [Siepmann 2016, S. 37].

Durch moderne Kommunikationstechnik (RFID, Bar- oder QRCode, etc...) und Sensoren (Temperatur, Feuchtigkeit, etc...) können Werkstücke in der Produktion Informationen direkt mit der bearbeitenden Produktionsmaschine austauschen. Dieser Austausch kann Informationen über den Zustand oder Angaben zu bisherigen Bearbeitungsschritten des Werkstücks umfassen, aber auch besondere Anforderungen an die weitere Bearbeitung beinhalten. Ohne Kommunikation über zentrale, ggf. nur bedingt kompatible Systeme wird auf diese Weise die dezentrale Steuerung ermöglicht [ebd., S. 39].

Mit dem Ziel, qualitativ hochwertige Produkte herzustellen, kann eine klassische, zentralgesteuerte Produktion innerhalb eines Bearbeitungsschritts ins Stocken geraten, wenn beispielsweise bei der Qualitätskontrolle ein Produktionsparameter abweicht. Um auf solche und ähnliche Einflüsse individuell reagieren zu können, muss die zentrale, ganzheitliche Produktionssteuerung durch eine dezentrale, individuelle Steuerung ersetzt werden. In diesem Fall trifft die bearbeitende Produktionsmaschine eine individuelle Entscheidung für die Korrektur des abweichenden Produktionsparameters. Die dezentrale Steuerung sorgt so idealerweise für einen reibungslosen Produktionsablauf bei gleichzeitiger Qualitätssteigerung [ebd., S. 40].

Ein Produktionsprozess wird aus Produkt und Prozesssicht betrachtet. Viele Produkte werden schon heute überwiegend oder ganzheitlich am Computer entwickelt. In Kombination mit einem digitalen Abbild des Produktionsprozesses kann der Ablauf einer Fertigung effizient geplant und umgesetzt werden. Die hierbei entstehende Fülle an Informationen und Zusammenhängen hilft, den Produktionsprozess optimal einzurichten und zu steuern sowie zuverlässige Aussagen über Auslastung, Ausschuss und Kosten zu treffen [ebd., S. 41].

Ein Produktionssystem, das den oben beschriebenen Paradigmen entspricht, wird als Cyber-physisches Produktionssystem (CPS) bezeichnet. Das Potential eines solchen Produktionssystems liegt in seiner Flexibilität im Umgang mit individuellen Produkten oder Produktionsverfahren. Zudem werden die permanente Visualisierung des Ist-Zustandes sowie zuverlässige Prognosen zu einem künftigen Soll-Zustand ermöglicht [ebd., S. 42].

In einem solchen Arbeitsumfeld arbeiten klassischerweise eher separat betrachtete Disziplinen eng vernetzt. Disziplinen übergreifendes und ganzheitliches Denken erschließt hier viele Chancen für die produzierende Industrie und ihre Partner in der Wertschöpfungskette [BITKOM 2015, S. 4]. Zu diesen Chancen gehört ein Trend, der nicht zuletzt seit dem Einzug der 3D-Drucker in die Bastelstuben von Privatpersonen, auch im industriellen Kontext, immer weiter in den Vordergrund rückt. Mit der Individualisierung von Produkten und Produktionsprozessen kann die Zielgruppe für ein Produkt erweitert oder verändert werden. Durch die Verwendung von CPS können Produzenten flexibel mit Losgrößen

und Auftragslagen umgehen. Die Wirkung hiervon entfaltet sich in steigender Produktivität. Die besondere Qualifizierung der Belegschaft eines Industrie-4.0-Betriebes steigert die Einsatzfähigkeit der Mitarbeiter durch ihre Fähigkeit, interdisziplinär zu denken. Durch Querkompetenzen ist es den Mitarbeitern möglich, die vernetzten Produktionsprozesse ganzheitlich zu erfassen. Die Bündelung all dieser Chancen erlaubt die Erweiterung des Geschäftsmodells. Hierbei treten an die Produkte gebundene Dienstleistungen in den Vordergrund und heben das Unternehmen von Wettbewerbern ab [Roth 2016, S. 6–8].

Auch wenn die Definition von Industrie 4.0 unterschiedlich aufgefasst werden kann, gibt es bei Diskussionen in diesem Kontext bestimmte, immer wiederkehrende Konzepte. Ein solches Konzept ist die Smart Factory. Durch die vollständige horizontale und vertikale Integration aller Instanzen und Prozesse entsteht ein CPS. Aus dem CPS lässt sich ein vollständiges, virtuelles Abbild der realen Produktionsanlage ableiten, welches als Virtual Twin oder Digital Twin bezeichnet wird. Durch die ganzheitliche Vernetzung reagiert die reale Produktionsanlage individuell auf die Auftragslage, Lieferengpässe oder Qualitätsprobleme. Dadurch optimiert sich die Produktion anhand der zugrundeliegenden Datenlage ständig selbst. Um die Smart Factory möglichst flexibel zu realisieren, werden Smart Products benötigt. Dies bedeutet, dass das herzustellende Gut individuell identifiziert werden kann. Die Dokumentation aller bisherigen Bearbeitungsschritte und alle individuellen Prozessanweisungen jedes einzelnen Produkts sind immer und für jede Produktionsmaschine sofort verfügbar. Je nach Produkt oder Prozess können Sensoren am Produkt zusätzliche Prozessinformationen beisteuern. Neben dem Nutzen für die Produktions- und Prozessoptimierung können Virtual Twins auch für Predictive Maintenance genutzt werden. Dabei lernt das CPS aus der Gesamtheit der Datengrundlage (Big Data), den Verschleiß und das Versagen der einzelnen Komponenten des realen Produktionssystems vorauszusagen. Diese Verknüpfungen ermöglichen Vorhersagen über Anlagenauslastung und Wartungsintervalle, welche wiederum die Verfügbarkeit der gesamten Produktion und somit die Produktivität steigern.

2.1.1 Industrie 4.0 in der Verfahrenstechnik

Firmen der Prozess- und Verfahrenstechnik interessieren sich ebenfalls für das Potential und die Chancen von Industrie 4.0. Einige Unternehmen der Branche, insbesondere die Pharma- und Lebensmittelproduzenten, verfügen oft schon über eine fundierte Datenbasis entlang ihres Produktionsprozesses. Dennoch steht die Branche vor einem „strukturellen Wandel der Arbeitsorganisation“ [Wühr 2016, S. 13]. Das produzierte Gut ist hier oftmals kein Stückgut, sondern liegt flüssig, gasförmig oder als Pulver in unterschiedlichsten Gebinden vor. Etablierte verfahrenstechnische Prozesse bieten zudem wenig bis keine Möglichkeiten für einen raschen Wechsel des Produktes oder des Herstellungsverfahrens [Holm 2016, S. 42]. Es ist nicht davon auszugehen, dass die Branche ihre etablierten, verfahrenstechnischen Prozesse zu CPS aufrüstet. Vielmehr wird das Potential in erweiterter Transparenz, Effizienzsteigerung und Flexibilisierung durch die Verwendung der ohnehin notwendigen Leittechnik gesehen [Otten 2016, S. 6; Gebhardt et al. 2015, S. 47]. Für neue und in Planung befindliche, verfahrenstechnische Produktionsanlagen sind einzelne Elemente eines CPS oder einer Smart Factory

bereits umgesetzt. Das Erreichen der zusätzlichen Flexibilität wird hierbei über mobile, modulare und skalierbare Produktionsprozesse angestrebt [Holm 2016, S. 43]. Hierbei werden einzelnen Verfahrensschritte eines komplexen verfahrenstechnischen Prozesses modularisiert und zu „Inseln geringer Komplexität“ aufgeteilt [ebd.]. Diese können dann entweder mobil konstruiert (Europalette bis Container) oder flexibel verbunden (schaltbare Verrohrungsmatrix) werden. Auf diese Weise können Änderungen im Produktionsablauf schneller umgesetzt werden als bei herkömmlichen verfahrenstechnischen Anlagen mit einem begrenzten Einsatzspektrum. Besondere Herausforderungen liegen hier in der Realisierung der dezentralen Intelligenz und der entsprechenden Integration in die horizontalen und vertikalen Systeme der produzierenden Firma [ebd.]. Gelingt dies, kann eine neue Anlagenkonfiguration zunächst digital vorbereitet und anschließend real umgesetzt werden [ebd.]. Weiterhin werden die Konzepte des „Predictive Maintenance“ und der Erweiterung des Produktes um Service und Dienstleistungen auch für den Bereich der Verfahrenstechnik angestrebt.

2.1.2 Qualifikationsbedarf für Arbeitsumfelder in Industrie 4.0

Die Diskussion über das Thema der Qualifikation für Arbeitsumfelder nach Industrie 4.0 ist mindestens genauso vielseitig wie die Diskussion über das eigentliche Konzept von Industrie 4.0. Neben der Frage, an welche Zielgruppe sich ein Qualifizierungsangebot richten soll, steht auch die Frage im Raum, wie es angelegt wird und wer für die Umsetzung Sorge zu tragen hat. Dabei betreffen die Veränderungen nicht nur einzelne Bereiche der Arbeitswelt, sondern alle Berufsfelder in ihrer gesamten Breite und Vielfalt [BMAS 2015, S. 6–7]. Es ist abzusehen, dass das Arbeiten in Strukturen der Industrie 4.0 vernetzter, digitaler und flexibler sein wird [ebd., S. 35]. Für diese neue Arbeitswelt wird gelegentlich auch der Begriff Arbeit 4.0 verwendet. Gleichwohl ist zu beachten, dass durch den Wandel zu Industrie 4.0 auch das Verhältnis von Arbeit und Privatleben beeinflusst wird. Viele Tätigkeiten, die als Arbeit 4.0 zu beschreiben sind, lassen örtliche und zeitliche Souveränität seitens der Arbeitnehmer zu [ebd., S. 19]. Arbeit 4.0 hat das Potential, den bislang festen Taktgeber Arbeitszeit flexibler in das eigene Leben zu integrieren und so andere Freiräume für Familie und Freizeit zu schaffen [ebd., S. 64]. Die Diskussion ist jedoch nicht ausschließlich positiv besetzt. Jeder Veränderungsprozess führt die Beteiligten zu der Frage nach ihrem Platz in den neuen, veränderten Strukturen. Nicht nur die Art der Arbeit in Produktionsprozessen nach der Idee von Industrie 4.0 ändert sich, sondern auch die Art, wie über den Herstellungsprozess gedacht und gesprochen wird. Es besteht die Aussicht auf hochwertige Arbeitsplätze, mit Mehrwert für die Arbeitnehmer und die Unternehmen, bei gleichzeitigem Risiko der Verdrängung bestehender Arbeitsplätze durch die zunehmende Automatisierung [Gebhardt et al. 2015, S. 47].

Die allgemeinen Anforderungen an die Qualifikation von Personen, die in der Industrie 4.0 arbeiten, führen oder planen, haben gewisse Parallelen. Alle Beteiligten müssen in der Lage sein, komplexe, vernetzte Produktionsprozesse über die Grenzen der klassischen Disziplinen hinweg zu begreifen [Wühr 2016, S. 13]. Dabei dürfen weder allgemeine noch rollenspezifische Kompetenzen in den Hintergrund

rücken [Haarmann et al. 2016, S. 34]. Wird ein auf theoretischen Inhalten basierendes Qualifizierungskonzept nicht ausgewogen mit praktischen Übungen ergänzt, besteht das Risiko des „Engineering by Powerpoint“, also einer praxisfernen Herangehensweise von Akteuren ohne ausreichende Praxiserfahrung in ihrem Berufsfeld [Pfeifer et al. 2016, S. 15]. Das Erlangen einer kompetenten, interdisziplinären Arbeitsweise gewinnt im Vergleich zu Erfahrungswissen und einem großen Fachwissen einer bestimmten Disziplin an Bedeutung. In einer Zeit, in der das Wissen online verfügbar ist und Erfahrungen ebenso flexibel dokumentiert werden können, liegt der Fokus nun mehr auf den Fähigkeiten der Mitarbeiter, sich im diversen, flexiblen, interdisziplinären Arbeitsumfeld zu orientieren und individuelle Entscheidungen zu treffen [Haarmann et al. 2016, S. 34]. Um die viel gepriesene Flexibilität der Arbeitsprozesse entsprechend zu nutzen, müssen die Mitarbeiter in der Lage sein, Signale, Risiken und Potentiale von Veränderungen in Prozessen, Strukturen oder der Organisation eines Unternehmens wahrzunehmen und entsprechend zu kommunizieren [ebd.]. Dies gilt für alle Bereiche und Hierarchiestufen entlang der Wertschöpfungskette. Durch die permanente Weiterentwicklung der Technologien und der flexiblen Marktsituationen ist die Qualifizierung von Mitarbeitern keine abgeschlossene Aufgabe, sondern vielmehr ein kontinuierlicher Prozess. Auch ist dieser Qualifizierungsprozess der fortwährenden Anpassung an die Rahmenbedingungen der Zielgruppe und des qualifizierenden Unternehmens ausgesetzt. Daher wird das lebenslange Lernen nun auch betrieblich zu einer der wichtigsten Grundvoraussetzungen der Arbeit 4.0 [Stephan 2016, S. 9; Haarmann et al. 2016, S. 33].

Neben der intensiven Diskussion der technischen, organisatorischen und rechtlichen Aspekte in der Industrie 4.0, die normalerweise im Fokus stehen, wird nun zunehmend auch der Aspekt der Aus- und Weiterbildung besetzt [Bothof und Hartmann 2015, S. 3]. Im Kontext der Auswirkungen von Industrie 4.0 und Arbeit 4.0 werden vermehrt Qualifizierungsinitiativen für die betriebliche und hochschulgebundene Aus- und Weiterbildung empfohlen [ebd., S. 4]. Dabei sorgt die zunehmende Komplexität der zukünftigen Aufgaben für die Verschmelzung von Fachwissen und Kompetenzen unterschiedlicher Disziplinen [Gebhardt et al. 2015, S. 51–52]. Eine Möglichkeit, dieser Herausforderung zu begegnen, ist die Einrichtung von interdisziplinären Ausbildungen, z.B. eines Chematronikers oder eines Maschinenbauinformatikers [Stephan 2016, S. 9; Haarmann et al. 2016, S. 34; BITKOM 2015, S. 4]. Es ist nicht zu erwarten, dass eine Einzelperson die Gesamtkompetenz für den Betrieb, die Wartung oder Führung einer Produktion nach Industrie 4.0 in sich vereint. Dies unterstreicht die Notwendigkeit eines ganzheitlichen Aus- und Weiterbildungskonzeptes [BITKOM 2015, S. 5; Haarmann et al. 2016, S. 33]. Durch das Aufeinandertreffen der Anforderungen zur Qualifizierung für die Industrie 4.0 stoßen konventionelle Strategien zur Personalentwicklung an ihre Grenzen [Haarmann et al. 2016, S. 34]. Besonders die digitalen Lernwege gewinnen durch ihre Flexibilität an Bedeutung [Pfeifer et al. 2016, S. 13]. Dies bezieht sich nicht nur auf den Einsatz von eLearning-Tools, sondern auch auf die zunehmende Verwendung von mobilen Endgeräten und die Einbindung praktischer Erfahrungen in eLearning-Konzepte. Im Hinblick auf die disruptive Veränderung der Arbeitsorganisation für Industrie 4.0 kann eine engere Kooperation von Personalentwicklung und der Forschungs- und Entwicklungsabteilung eines

Unternehmens die künftige Einsatzfähigkeit der Mitarbeiter durch einen direkten Wissenstransfer und ein besseres Prozess- und Produktverständnis steigern [Pfeifer et al. 2016, S. 9]. Zukünftig müssen nicht nur Unternehmen, sondern auch öffentliche Bildungseinrichtungen innovative Konzepte zur aus- und weiterbildenden Qualifizierung entwickeln und anwenden [Botthof und Hartmann 2015, S. 6]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein Vorschlag für solch ein innovatives Konzept als Kombination aus eLearning und der Anwendung von virtuellen und remote Laboren entwickelt und vorgestellt.

2.2 Grundlagen von eLearning-Qualifizierungsprogrammen

Die Qualifizierung in der beruflichen Aus- und Weiterbildung wird von den Veränderungen der Industrie 4.0 erfasst. In vielen Bereichen, egal ob für Schüler, Studenten oder Mitarbeiter, werden konventionelle Lernmethoden bereits sukzessive durch digitale Angebote ergänzt oder gar ersetzt. In der modernen, schnelllebigen Welt, in der das Smartphone und eine zunehmende Anzahl an Assistenzsysteme unser Leben begleiten, ist der Mensch als Nutzer dieser Systeme in einem lebenslangen Lernprozess. Um mit diesen neuen Systemen und den Entwicklungen Schritt zu halten, kommt ein Lernkonzept immer häufiger zum Einsatz: Das eLearning.

Mittlerweile ist der Begriff eLearning auch im deutschen Sprachraum akzeptiert. Oftmals wird er für eine alternative Art des Lernens verwendet, wobei er nicht selten rein technische Lösungen in Abwesenheit eines Kontextes oder eines didaktischen Konzeptes beschreibt. Die Gemeinsamkeiten der meisten Definitionen von eLearning liegen jedoch in der räumlichen und häufig auch in der zeitlichen Souveränität der individuell gestalteten Lernphasen. Im Vergleich zu klassischen Formaten bietet die räumliche, aber auch die zeitliche Flexibilität von eLearning-Konzepten den Lernenden die Möglichkeit einer flexiblen und individuellen Qualifizierung im Einklang mit den Verpflichtungen und Gewohnheiten ihres alltäglichen Lebens.

2.2.1 Anforderungen der Industrie 4.0 an eLearning-basierte Mitarbeiterqualifizierung

Die Auswirkungen der komplexen Veränderungen im Wandel zur Industrie 4.0 auf die Arbeitsorganisation sind vielfältig und nicht endgültig absehbar [IHK 2014, S. 3; Universität Bremen 2016, S. 21, 2016, S. 46; Gensicke et al. 2016, S. 73]. Etablierte Hierarchien werden durch die Vernetzung aufgebrochen und neu verbunden (siehe Abbildung 2-2). An den Schnittstellen dieser neu verbundenen Bereiche werden disziplinübergreifende Querkompetenzen benötigt. Als Querkompetenzen werden diejenigen Kompetenzen beschrieben, welche eine Fachkraft in die Lage versetzen, Methoden und Konzepte anderer Disziplinen zur Lösung eines komplexen Problems anzuwenden [Pfeifer et al. 2016, S. 13]. Dabei wird der Mensch in Zukunft zwar seltener zur Behebung von Störungen im Produktionsablauf eingreifen müssen, dabei jedoch die Zusammenhänge des vernetzten Produktionssystems begreifen müssen [Pfeifer und Suphan 2015, S. 30].

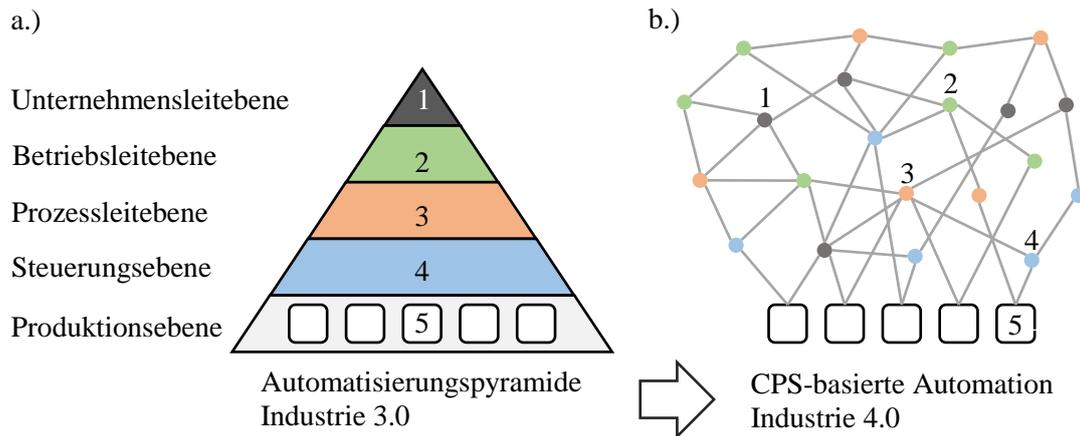


ABBILDUNG 2-2 VERÄNDERUNG DER ARBEITSORGANISATION DURCH DIE DIGITALE TRANSFORMATION VON INDUSTRIE 4.0, GRAFIK A ZEIGT DIE KLASSISCHE HIERARCHIE STRUKTUR UND LINEARE KOMMUNIKATION (BEDARF: KLASSISCHE FACHKOMPETENZ), GRAFIK B ZEIGT DYNAMISCH VERNETZTE HIERARCHIE (BEDARF: FACHÜBERGREIFENDE QUERKOMPETENZ) [UNIVERSITÄT BREMEN 2016, S. 46]

Die Frage nach dem Qualifizierungsbedarf des Menschen im Umfeld der Industrie 4.0 geht einher mit der Frage nach seiner Rolle in selbigem. Eine Umfrage der Universität Bremen in ausgewählten Unternehmen der Metall- und Elektroindustrie, Hochschuleinrichtungen und Berufsbildungseinrichtungen zum Thema: „Auswirkungen der Transformation zur Industrie 4.0 auf die Aus- und Weiterbildung für die Industrie 4.0“ (n = 123), beleuchtet zwei mögliche Szenarien für den Menschen nach der vierten industriellen Revolution [Universität Bremen 2016, S. 48]:

1. Der Mensch als zentraler, nicht ersetzbarer Bestandteil der Herstellungsprozesse
2. Die Technik als zentrales Element der Herstellungsprozesse

Für diese Ansätze gibt es eine jeweils korrespondierende Form der Arbeitsorganisation. Die Organisationsstruktur im ersten Szenario entspricht der Schwarmorganisation. Die Basis hierzu bilden stark vernetzte und hochqualifizierter Mitarbeiter mit einem hohen Maß an Querkompetenz (siehe Grafik b.) in Abbildung 2-2). Im zweiten Szenario würde der Zentrierung auf die Technik mit einer polaren Organisationsform begegnet (nicht abgebildet). Hierbei hat der Mensch nur noch eine kompensatorische Rolle bei der Aufgabenzuweisung [ebd.]. Letzteres wäre jedoch im starken Gegensatz zur aktuellen Entwicklung konventioneller Produktionsprozesse und dem zunehmend verbreiteten Gedanken der Lean Production, bei welchen die Mitarbeiter aller Hierarchiestufen an der Prozessevaluation beteiligt sind. Ausgehend von der Annahme, dass die Innovationsfähigkeit eines Unternehmens von der Qualifikation aller Mitarbeiter abhängig ist, wird der Bedarf an Qualifizierungsmöglichkeiten für Mitarbeiter im Rahmen der anstehenden Innovationen durch die Umstellungen auf Industrie 4.0 steigen [Botthof und Hartmann 2015, S. 15–16]. Zudem tritt mit zunehmendem Grad an Digitalisierung die Sorge vor dem Rückgang der Praxiserfahrungen in den Vordergrund [Universität Bremen 2016, S. 47]. Zur Bewältigung dieser Herausforderungen müssen zukünftige Bildungskonzepte die Anforderungen an individuelles Lernen erfüllen und eine allgemein anerkannte Kultur des berufs begleitenden und lebenslangen Lernens schaffen. [BMBF 2016, S. 3; Botthof und Hartmann 2015, S. 27–28]. In Tabelle 2-1

werden die Anforderungen an ein Bildungskonzept für die Mitarbeiterqualifizierung in Hinblick auf Industrie 4.0 aufgeführt.

TABELLE 2-1 ANFORDERUNGEN AN DIE MITARBEITERQUALIFIKATION IM SINNE DER INDUSTRIE 4.0

Anforderung	Quelle
1. Lernen im Prozess der Arbeit ermöglichen	[Botthof und Hartmann 2015, S. 27; Universität Bremen 2016, S. 99; eBusiness-Lotse Mecklenburg-Vorpommern 2015, S. 12–13; Institut für Erziehungswissenschaft 2015, S. 24, 2015, S. 29; Gebhardt et al. 2015, S. 51, 2015, S. 51]
2. Individualität des Lernens	[MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung 2010, S. 4, 2011, S. 9, 2011, S. 8; Institut für Erziehungswissenschaft 2015, S. 22]
3. Flexibel im Lernort	[eBusiness-Lotse Mecklenburg-Vorpommern 2015, S. 29; Gensicke et al. 2016, S. 42; MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung 2011, S. 9]
4. Flexibel in Lernzeit/Tempo	[eBusiness-Lotse Mecklenburg-Vorpommern 2015, S. 29; Gensicke et al. 2016, S. 42; MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung 2011, S. 9]
5. Möglichst geringe Kosten (pro Qualifizierung)	[MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung 2010, S. 4; eBusiness-Lotse Mecklenburg-Vorpommern 2015, S. 12–13]
6. Möglichst geringer Zeitaufwand (pro Qualifizierung)	[MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung 2010, S. 4; eBusiness-Lotse Mecklenburg-Vorpommern 2015, S. 12–13, 2015, S. 12–13]
7. Individualität der Angebote (Berücksichtigung bestehender Kompetenzen)	[eBusiness-Lotse Mecklenburg-Vorpommern 2015, S. 10–11; MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung 2011, S. 8]
8. Handeln in realen, praktischen Situationen entwickelt Kompetenzen	[Botthof und Hartmann 2015, S. 14]
9. Lebenslanges Lernen ermöglichen	[Botthof und Hartmann 2015, S. 25; Paul 2016, S. 11]
10. Querkompetenzen und Diversität im Fachwissen vermittelbar machen	[Pfeifer et al. 2016, S. 13]

Die bisher etablierten Strukturen der konventionellen Aus- und Weiterbildung sind nicht geeignet, weiterhin die ökonomisch herausragende Position Deutschlands zu sichern [Gebhardt et al. 2015, S. 47]. Oft sind diese nicht flexibel genug oder nicht ganzheitlich umgesetzt und lassen das Potential der zugrunde gelegten Technik bzw. Konzepte ganz oder in Teilen brach liegen [Kerres und Jechle 2000, S.

260]. Es gibt jedoch auch eine Reihe etablierter Lernmodule und Konzepte des eLearning, die sich eignen, um die Anforderungen der Qualifikation für Industrie 4.0 zu erfüllen [Pfeifer et al. 2016, S. 11].

2.2.2 Methoden, Konzepte und Parameter für eLearning-Szenarien

Der Begriff eLearning setzt sich aus zwei Teilen zusammen. Das „e“ als Attribut für den Begriff „Learning“ beschreibt eine Art des Lernens, die früher auch als „Computergestütztes Lernen“ bezeichnet wurde [Ebner und Schön 2013, S. 13]. So steht das „e“ in „eLearning“ zwar für den Einsatz elektronischer Geräte, der Begriff „Learning“ wird dabei gelegentlich jedoch vernachlässigt. Grundsätzlich ist eLearning keine Technologie, sondern viel mehr ein Konzept aus inhaltlichen, formalen und technischen Komponenten. Die raschen Entwicklungen des technischen und gesellschaftlichen Umfeldes führen zu einem kontinuierlichen Anpassungsbedarf bei der Bereitstellung von eLearning-Angeboten. Ausgehend von klassischen Fernlernangeboten, bei denen Lerninhalte z.B. auf dem Postweg zwischen Lehrendem und Lernenden verbreitet werden, wird manchmal allein die Verwendung von modernen Kommunikationsmedien wie Email oder auch der Einsatz von Lernmanagement-Systemen als eLearning bezeichnet. Im Folgenden werden allgemeine Charakteristika und Begrifflichkeiten zur Beschreibung von eLearning-Konzepten erläutert.

Um das Lernen ganz allgemein, aber auch für den Einsatz von Medien im eLearning zu beschreiben, wurden in der Disziplin der Psychologie verschiedene Theorien entwickelt. Ein Überblick hierzu gestaltet sich wie folgt [Rey 2009, S. 32]:

- Der Behaviorismus setzt Sinnesreize und Verhaltensreaktionen in Zusammenhang, ohne dabei das Bearbeitungsvermögens des Individuums zu berücksichtigen.
- Der Kognitivismus setzt Sinnesreize und Verhaltensreaktionen in Zusammenhang und berücksichtigt dabei das Bearbeitungsvermögens des Individuums.
- Der Konstruktivismus versteht das Individuum im Lernprozess als aktiven, selbstverantwortlichen Teil eines Lernprozesses.

Aus dem Kognitivismus gehen dabei verschiedene Theorien zur Beschreibung des Lernprozesses hervor. Im Kontext dieser Arbeit und der vorgestellten eLearning-Konzepte werden hierbei insbesondere die „Cognitive Load Theory“ und die „Kognitive Theorie multimedialen Lernens“ betrachtet. Die beiden Ansätze beschreiben die Belastung der menschlichen Wahrnehmung im Lernprozess wie sie z.B. durch den Einsatz von digitalen Medien im eLearning auf den Lernenden wirkt.

Die „Cognitive Load Theory“ (CLT, deutsch = kognitive Belastungs-Theorie) geht von der Aufteilung des Gedächtnisses in ein begrenztes Arbeits- und ein leistungsfähiges Langzeitgedächtnis aus. Zudem wird die kognitive Belastung in drei einzelne Belastungen, nämlich intrinsic (intrinsisch), extraneous (extrinsisch) und germane (lernrelevant) cognitive load, unterteilt. Während die intrinsic cognitive load die Belastung durch das Speichern von Elerntem beschreibt, stellt die extraneous cognitive load die Belastung durch die Art und Weise der Vermittlung dar. Die Belastung durch die Interaktion mit den

lernrelevanten Elementen wird durch die germane cognitive load beschrieben. Demzufolge ist der Lernerfolg eines Individuums im Lernprozess abhängig von der Balance dieser drei kognitiven Belastungen [Rey 2009, S. 36–48].

Die „Kognitive Theorie multimedialen Lernens“ (KTML) geht von drei grundlegenden Annahmen aus. Demnach ist die simultane Vermittlung von Lerninhalten auf zwei Kanälen (auditiv und visuell) möglich. Hierbei ist die Verarbeitungskapazität jedoch begrenzt. Dies führt dazu, dass das Aufgenommene zunächst selektiert, dann organisiert und anschließend integriert wird. Wenn diese drei Annahmen berücksichtigt werden, kann sich der Lernerfolg einstellen [ebd., S. 49–59].

Beide Theorien erklären die individuelle Belastung eines Lernenden durch die Aufnahme von Inhalten und geben Hinweise auf Belastungsgrenzen. Der Einsatz sich ergänzender Medien, wie z.B. Bild und Ton, ist günstig, solange das Bearbeitungsvermögen nicht überstiegen wird. Lehr- und Lernkonzepte des eLearning profitieren besonders von der Individualität der Lerngeschwindigkeit und der Anzahl der Wiederholungen von thematischen Abschnitten zur Erreichung des individuellen Lernerfolges.

Die beteiligten Akteure in eLearning-Szenarien können dafür grob in zwei Seiten eingeteilt werden. Die Nutzer einer eLearning-Veranstaltung können als eher heterogene Gruppe aufgefasst werden. Dabei zählen sowohl die Lernenden als auch die Lehrenden zu der Gruppe der Nutzer. Die Lernenden nutzen eine eLearning-Veranstaltung zur individuellen Qualifikation. Gerade im Umfeld der beruflichen Weiterbildung ist eine große Diversität der Lernenden zu erwarten. Dies betrifft unter anderem das Alter, die Qualifikationen, aber auch die Medienkompetenz. Besonders hier ist die Wahl der Lernmethoden, der Lernmedien und des zeitlichen Lernmodus sorgfältig durchzuführen, um die Zielgruppe komplett in den Lernprozess einzubinden oder individuelles Lernen zu ermöglichen [Zawacki-Richter 2013, S. 69]. Die Konzeptionierung, die Planung, der Aufbau und die Durchführung von eLearning-Veranstaltungen liegen in der Regel in der Hand von Dozierenden oder Dienstleistungsunternehmen für den Qualifizierungsbereich. In letzter Zeit gewinnen individuell erstellte eLearning-Angebote zunehmend an Bedeutung. Unter den Urhebern von eLearning-Angeboten gibt es eine große Bandbreite von Lehrern, Professoren, wissenschaftlichen Mitarbeitern oder Spezialisten, welche sich aus unterschiedlichsten Gründen mit dem Thema eLearning befassen. Es gibt eine Reihe von Initiativen und Förderprogrammen, die Schulen und Universitäten, aber auch Unternehmen bei dem Aufbau von eLearning-Veranstaltungen und ganzheitlichen eLearning-Konzepten fachlich und finanziell unterstützen. Genauso existieren aber auch in der Wirtschaft Bereiche, in denen die Einrichtung von eLearning-Angeboten eine zunehmende Rolle spielt. Den verschiedenen Aspekten des eLearning widmet sich eine Reihe von Forschungsprogrammen, aber auch Konferenzen und Fachtagungen (REV, EDUCON, ICL, etc.). Hier diskutiert und erörtert die Gemeinschaft der Lehrenden und der Lernenden die Potentiale und Herausforderungen aktueller eLearning-Konzepte.

Die Rahmenbedingungen eines Lernprozesses in klassischen oder eLearning-Veranstaltungen werden unter anderem durch den Lernmodus unterschieden. Der Lernmodus wird dabei in formales, non-formales und informelles Lernen unterteilt. Der Grad der Individualität des Lernens nimmt in Richtung informellen Lernens zu. Das Formale Lernen beschreibt den Lernprozess in definierten Bildungseinrichtungen mit mehr oder weniger festgelegten Randbedingungen, wie beispielsweise Schulen, Berufsschulen oder Universitäten. Hier geht es in der Regel um den Erwerb einer definierten und anerkannten Qualifikation durch das Absolvieren eines festgelegten Pensums [Reglin 2012, S. 1]. Das non-formale Lernen oder nicht-formale Lernen findet in Strukturen statt, die nicht unmittelbar als Bildungssystem deklariert sind. Als Beispiele hierfür gelten ehrenamtliche oder gemeinnützige Tätigkeiten sowie das Ausüben von Freizeitaktivitäten [ebd.]. Der Begriff des Informellen Lernens beschreibt einen nicht klar definierten Zugang zu Lerninhalten als viel niederschwelligeren Lernprozess des alltäglichen Lebens. Als Beispiel hierfür gilt die Lösung alltäglicher Probleme oder das permanente Optimieren alltäglicher Prozesse. Über diesen Lernprozess ist sich der Lernende hierbei oft nicht bewusst [ebd.]. Der Einsatz von eLearning-Elementen ist in formalen, non-formalen und informellen Lernangeboten möglich und erlaubt, durch die Flexibilität von eLearning-Elementen, die Auflockerung von formal angelegten Lernveranstaltungen.

Neben dem Lernmodus kann eine Lernveranstaltung auch durch ihre Kommunikationsform charakterisiert werden. Dabei kann es innerhalb einer eLearning-Veranstaltungen unterschiedliche Kommunikationsformen geben. Typisch für z.B. den Frontalunterricht ist eine dozentenbasierte Kommunikation. Hier übernimmt eine einzelne Person die Organisation der Kommunikation (einer zu allen) und vermittelt den Großteil der Informationen oftmals selbst. Diese Form stellt eine Extremform dar, die in der Vergangenheit nicht zuletzt im formalen Lernprozess an Schulen oder Universitäten in großen Klassenverbänden oder Hörergruppen angewendet wurde. Das Gegenteil hierzu bildet die rege Kommunikation zwischen den Lernenden (alle zu allen). Wahlweise mit oder ohne Moderation des Lehrenden wird dies auch als didaktisches Element zur Aktivierung der Lernenden genutzt [Kerres und Jechle 2000, S. 261; Medosch 2011, S. 69–70]. Neben der Anzahl der an der Kommunikation beteiligten Personen kann auch nach der Menge der übermittelten Informationen differenziert werden. Ist das Verhältnis der kommunizierten Informationen symmetrisch, bringen alle beteiligten Personen etwa gleich viele Informationen ein. Das Gegenteil stellt die asymmetrische Kommunikation dar, bei der eine Person oder eine Personengruppe einen Großteil der Informationen bereitstellt [Ebner et al. 2013; Medosch 2011, S. 69–70]. Für die Kommunikationsformen spielt auch der zeitliche Aspekt eine Rolle. Es wird zwischen synchronem und asynchronem Informationsaustausch unterschieden. Bei der synchronen Kommunikation existiert eine direkte, bidirektionale Interaktionsmöglichkeit. Bei der asynchronen Kommunikation hingegen gibt es eine unter Umständen große zeitliche Verzögerung innerhalb des Informationsflusses [Kerres und Jechle 2000, S. 261; Medosch 2011, S. 69–70]. In einigen der genannten Sozial- und Kommunikationsformen bekommen die Lehrenden eine neue Rolle. Gemessen an der auf die Lehrperson gerichteten Aufmerksamkeit, ist die Funktion des Lehrenden als Instruktor eine eher

traditionelle Rolle. Der Instruktor gestaltet und führt die Lerneinheit maßgeblich. Mit steigender Interaktivität unter den Lernenden wandelt sich die Funktion des Lehrenden vom Instruktor hin zu einem Moderator. Für Fälle, in denen für die Lernenden ein nahezu selbstständiger und individueller Lernprozess angeboten wird, bekommen Lehrende die Rolle eines Trainers oder Kurators. Dabei sind diese dann weniger für Kommunikations- und Informationsfluss verantwortlich, sondern für die Bereitstellung des Lernumfeldes, geeigneter Tools und Methoden [Medosch 2011, S. 69–70]. Die Kommunikationsformen in Veranstaltungen, welche eLearning nutzen, hängen stark vom Gesamtkonzept des Lernangebotes und der hierfür vorgesehenen Sozialform ab.

Für Lehrveranstaltungen auf Basis von eLearning sind verschiedene Sozialformen denkbar. Die Sozialform beschreibt dabei das Zusammenspiel der Akteure, den Lernmodus und die Kommunikationsform für eine Lernveranstaltung, unabhängig ob für eine klassische Lernveranstaltung oder eine eLearning-Veranstaltung. Bei Frontalveranstaltungen liegt sämtliche Aufmerksamkeit nahezu permanent auf dem Lehrenden. Hier gibt es eine Reihe von Möglichkeiten die Lernenden zu aktivieren, um der Monotonie und dem ausschließlich passiven Konsum entgegen zu wirken. Das Seminar, oder im eLearning-Umfeld das Webinar (internetbasiertes Seminar), zeichnet sich durch eine flexible Struktur und größere Interaktivität unter den Teilnehmern aus [eBusiness-Lotse Mecklenburg-Vorpommern 2015, S. 29]. Das Lernziel oder der Zweck eines Seminars sind in der Regel bekannt, die Zielgruppe ist aber häufig heterogen, was dem interaktiven Charakter eines Seminars jedoch oft zugutekommt. Als intensivere Betreuungsart wird die Einzelbetreuung oder auch das Tutoring betrachtet [Medosch 2011, S. 69–70]. Hierbei werden in Sprechstunden oder zu verabredeten Terminen fachliche Hilfestellungen gegeben. Auch die Unterstützung von persönlichen Projekten, Berichten oder Abschlussarbeiten, kann hier individuell geplant werden. Das Selbstlernen ist die flexibelste, aber auch am wenigsten intensiv betreute Form des Lernens. Ein gutes Konzept und geeignete Materialien erfordern eine individuelle Zeitplanung und ermöglichen ein nahezu beliebiges Lerntempo. Das Potential von eLearning-Technologien erlaubt die einfache Kombination verschiedener Sozialformen und Kommunikationsformen in einem Lernangebot.

Die letzte Charakterisierung von eLearning wird über den räumlichen Abstand zwischen Lehrenden und Lernenden beschrieben. Während die lokale Betreuung einer Lerngruppe im Klassen- oder Kursverband an Schulen oder Universitäten über Jahrhunderte hinweg nur wenig Veränderung erfahren hat, begünstigt die rasante Entwicklung von Computern, Tablets, Smartphones und dem Internet die Massentauglichkeit von eLearning-Angeboten in unterschiedlichster Form. Die genannten Klassen- oder Kursverbände sind längst nicht mehr auf räumliche Nähe und das gleichzeitige Besuchen eines Unterrichtsraumes angewiesen, sondern können digital kommunizieren und auf diese Weise in virtuellen Klassenräumen gemeinsame oder individuelle Lernziele erreichen. Solche virtuellen Klassenräume haben das Potential, trotz des Fehlens räumlicher Nähe, soziales Lernen und die Bildung von Lerngruppen zu ermöglichen [Kerres und Jechle 2000, S. 259].

Lehrveranstaltungen und Qualifizierungsprogramme, welche eLearning anwenden, erfreuen sich allgemein einer hohen Beliebtheit [MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung 2010, S. 4]. Die damit verknüpften Erwartungen sind oft hoch, können aber nicht in jedem Fall erfüllt werden. In manchen Fällen wird die alleinige Substitution eines Mediums, z.B. eines Buchs durch ein digitales Medium, oder die Änderung der Kommunikations- und Sozialform, beispielsweise durch die Bereitstellung von Inhalten über ein Learning-Management-System anstelle des Austeilens von Arbeitsblättern, bereits als eLearning-Konzept deklariert. Die Annahme, eLearning wäre eine Technologie und ließe sich, ähnlich wie Fachbücher kaufen und anwenden, ist jedoch nicht haltbar. Gerade bei der Umstellung eines etablierten, konventionellen, formalen Lernangebotes, wie es an Schulen, Universitäten oder Einrichtungen zur beruflichen Qualifizierung besteht, ist die Umstellung auf ein sinnvolles eLearning-Konzept mit höherem Zeit- und Kostenaufwand verbunden. Um einen konventionellen Lernprozess sinnvoll auf einen eLearning-Prozess umzustellen, ist grundlegende Planung, vorausschauendes Denken und die Einbeziehung sowohl der lernenden als auch der lehrenden Nutzer notwendig. Auch die Frage der zur Verfügung stehenden Kompetenz und Kapazität ist zu berücksichtigen. Es darf nicht vernachlässigt werden, dass die Einrichtung eines eLearning-Angebotes kein abgeschlossener Vorgang ist, sondern vielmehr einen kontinuierlichen Prozess darstellt. Dieser mag unterschiedlich intensive Phasen haben, aber durch die permanenten Veränderungen der Umgebungsbedingungen ist das Aufgeben der Betreuung und Fortentwicklung eines eLearning-Angebotes mit Stillstand und damit dem Absterben des selbigen gleichzusetzen. Ein eLearning-Angebot ist also als Symbiose aus Methoden, Technologie und einer Organisationsstruktur zur Informations- und Kompetenzvermittlung zu verstehen.

2.2.3 Beschreibung ausgewählter eLearning-Tools

Der Einsatz von digitalen Technologien und Medien in jedweder Form von Qualifizierungsmaßnahmen entspricht nicht automatisch einem eLearning-Konzept, Technologie spielt dabei jedoch für gewöhnlich eine zentrale Rolle. Im Folgenden werden sowohl ausgewählte technische Elemente des eLearning als auch einige Einsatzszenarien aufgezeigt, welche für moderne Konzepte zur Aus- und Weiterbildung von Bedeutung sind.

Für den Zugriff auf ein eLearning-Angebot benötigen die Nutzer digitale Endgeräte, welche sich für die Interaktion mit den jeweiligen eLearning-Inhalten eignen. Ein etabliertes und akzeptiertes Endgerät ist der Computer. Seit einiger Zeit verschiebt sich der Trend bei der Neuanschaffung von PCs zu Notebooks, welche oft durch ihre Flexibilität und ihre Abmessungen überzeugen. Um zusätzliche Mobilität bei gleichzeitig hohem Bedienkomfort zu erhalten, erfreuen sich Tablet-PCs seit einigen Jahren zunehmender Beliebtheit. Steht bei einem Endgerät neben der Flexibilität auch die permanente Verfügbarkeit im Fokus, so fällt die Wahl auf ein Smartphone. Die genannten Gerätetypen prägen das Bild der modernen eLearning-Endgeräte. In der Vergangenheit gab es auch eine Reihe von speziellen Endgeräten für die Nutzung von digitalen Lerninhalten. Hierbei ist jedoch das gleichzeitige Pflegen und Warten verschiedener, ggf. spezieller Endgeräte ein Ausschlusskriterium für die Nutzung in einem modernen eLearning-Angebot. Die Hard- und Software spezieller Endgeräte wird selten im gleichen Rhythmus

mit den Rahmenbedingungen des geplanten Einsatzszenarios entwickelt. Als Folge hiervon sind diese Geräte nach einigen Jahren bereits veraltet und für modernere eLearning-Anwendung unbrauchbar. Die eLearning-Angebote sind stattdessen zunehmend darauf ausgelegt, für das lebenslange Lernen und informelle Lernprozesse flexibel von allen möglichen privaten Endgeräten der Nutzer erreichbar zu sein. Dies verringert den Investitionsbedarf für die Anschaffung, Wartung und die Modernisierung spezieller eLearning-Endgeräte, auf Seiten der eLearning-Anbieter. Die Annahme, jeder Nutzer verfüge über ein passendes Endgerät, ist jedoch auch problematisch, da so einzelne Personen von eLearning-Angeboten ausgeschlossen werden können. War die Kommunikation und Vernetzung der Endgeräte in den 90er Jahren noch eine Herausforderung und mit vergleichsweise hohen Kosten verbunden, so spielt dies in unserer heutigen Gesellschaft eine untergeordnete Rolle. Kommerzielle Internetanbieter und günstige Angebote für die gesamte Bevölkerung haben zu einer drastischen Zunahme des Vernetzungsgrades geführt. Zudem bemüht sich die Bundesregierung durch verschiedene Maßnahmen um den flächendeckenden Ausbau der Breitband-Internet-Versorgung im ganzen Land [BMVI 2017, S. 1]. Durch die Vernetzung der Vielzahl von unterschiedlichen Endgeräten mit einem eLearning-Angebot liegen die Herausforderungen der heutigen Zeit eher in der Wahl einer für alle Endgeräte geeigneten eLearning-Plattform zur Darstellung des Angebotes.

Als zentrale Plattform für eLearning-Veranstaltungen wird häufig ein Learning-Management-System (LMS) verwendet. Unter dem Begriff Learning-Management-System werden Software-Lösungen für dieses Aufgabenfeld entwickelt. Der Einsatz von Webtechnologien erlaubt das digitale Abbilden administrativer und kurstypischer Aufgaben von Bildungseinrichtungen. Schon in den frühen 90er Jahren wurden Computersysteme für die Verwaltung und den Zugriff auf Daten für administrative Zwecke verwendet. Für moderne eLearning-Angebote ist die Administration von Veranstaltungen und die Organisation von Daten weiterhin eine wichtige Voraussetzung. Die Verwaltung von Informationen, wie der Nachweis einer Qualifikation für eine erbrachte Leistung oder das gezielte Bereitstellen fachlicher Inhalte, gehört zu den zentralen Aufgaben von LMS [Siemens und Tittenberger 2009, S. 14]. Seit der Einführung der LMS als zentrales Element von eLearning-Konzepten steigt jedoch der Bedarf an Schnittstellen zwischen LMS und extern entwickelten eLearning-Elementen. Wie Abbildung 2-3 zeigt, stellt ein LMS den Ausgangspunkt für viele eLearning-Konzepte dar. Für die Interaktion mit einem LMS werden die Bereiche Administration, Lernumgebung und Autorenumgebung unterschieden. Die Datenbasis einer LMS lässt sich in Daten für Administrative Zwecke und Inhaltliche Daten für z.B. die Lern- oder Autorenumgebung differenzieren. Durch Schnittstellen zu internen und externen eLearning-Angeboten eignet sich ein LMS als zentrales Tool für eLearning-Konzepte.

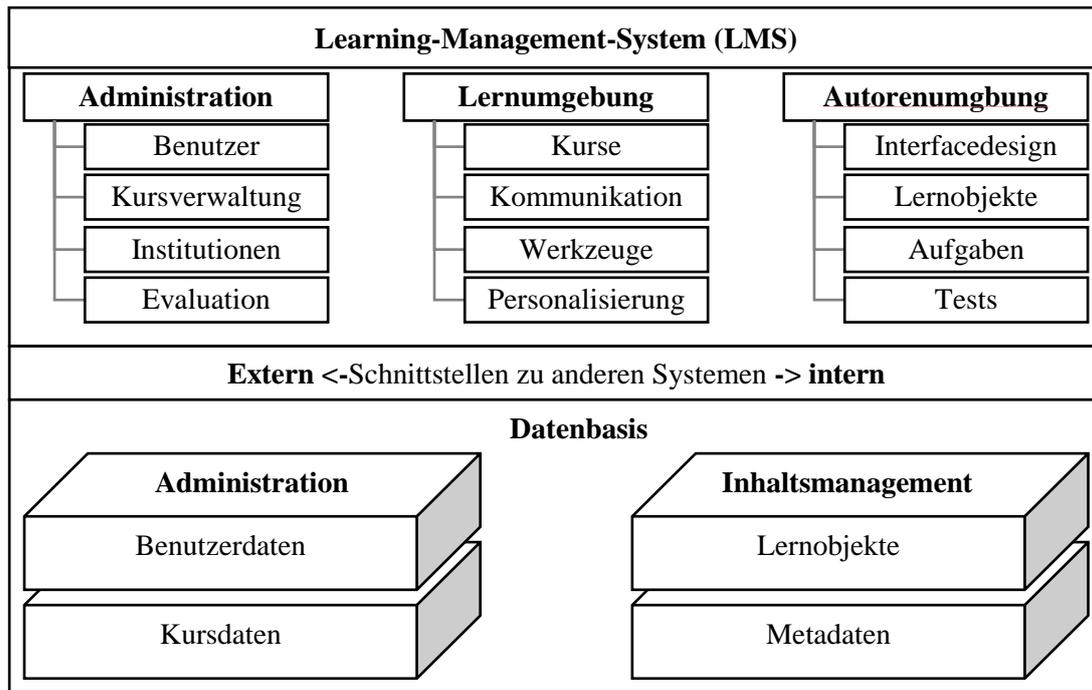


ABBILDUNG 2-3 KOMPONENTEN UND AUFGABEN EINES LEARNING-MANAGEMENT-SYSTEMS (LMS) [SCHULMEISTER 2003, S. 11].

Die Palette der LMS-Produkte reicht von kommerziellen Systemen wie Blackboard über Open Source Lösungen wie Moodle oder Ilias, die durch eine Community betreut werden, bis hin zu individuell angefertigten Lösungen. Der Unterschied zwischen den beiden genannten Beispielen Blackboard und Moodle, liegt in der Urheberschaft der Produkte. Blackboard wird als Softwareprodukt mit einem definierten Funktionsumfang kommerziell vermarktet (<http://de.blackboard.com/>). Kunden erhalten neben dem Produkt den Kundenservice für Betrieb und Wartung des Systems. Im Unterschied dazu gehen die LMS Moodle (<https://moodle.de/>) und Ilias (<http://www.ilias.de/>) aus einer Online-Community hervor. Der Produkt-Support wird hier von einer Betreiber- und Entwicklercommunity geleistet. Verschiedene Gruppen aus unterschiedlichen Disziplinen entwickeln dieses quelloffene Produkt. Ein LMS bietet eine Vielzahl von Schnittstellen zur individuellen Verbindung oder Erweiterung mit beliebigen Softwarebausteinen zur Erhöhung des Funktionsumfangs. Sowohl Blackboard als auch Moodle sind für den globalen Betrieb in einer Bildungseinrichtung ausgelegt. In diesem Anwendungsfall sind alle Lehrenden und Lernenden in der Lage, das LMS über das Internet zu nutzen. Dabei sieht die Architektur gängiger LMS-Lösungen die Verwendung individueller Benutzerkonten vor. Um den reibungsfreien Betrieb eines LMS zu gewährleisten, werden Benutzer in Hierarchiestufen gemäß ihren Befugnissen eingeteilt. Lehrende können ihre Veranstaltung, unabhängig ob klassische Präsenzkonzepte oder rein virtuelle eLearning-Angebote, anlegen und den Lernenden exklusiv Zugriff gewähren. Auf diese Weise entsteht in einer quasi öffentlichen Umgebung ein abgeschlossener Bereich, beispielsweise ein Kurs. Dies ist nicht nur für die bessere Strukturierung der Inhalte und der Kommunikation, sondern an vielen Stellen auch für die Einhaltung des Urheberrechts der bereitgestellten Inhalte notwendig. Die Nutzergruppe der Lernenden stellt sich aus dem vielfältigen Kursangebot die individuellen Kurs- und Lernpläne zusammen. Die Nutzergruppe der Lehrenden kann in den angebotenen Kursen neben Kursmaterial auch

Informationen, Arbeitsanweisungen oder Tests zur Leistungsabfrage bereitstellen. Den Lehrenden wird es ermöglicht, Inhalte vorzubereiten, veranstaltungsbegleitend zu veröffentlichen oder Inhalte individuell strukturiert bereitzustellen [eBusiness-Lotse Mecklenburg-Vorpommern 2015, S. 20]. Darüber hinaus unterstützen moderne LMS Schnittstellen zu verschiedenen externen Elementen des eLearning- oder bieten diese als interne Module an. Der Funktionsumfang reicht von z.B. ePortfolios, Kurs-Wikis, Foren und Chatboxen bis hin zu interaktiven Tests zur Selbstreflexion oder Leistungsabfrage. Mit e-Portfolios können die Lernenden individuelle Zusammenstellungen von zusammengetragenen oder selbsterstellten Inhalten anlegen. Ein Kurs-Wiki ermöglicht allen Nutzern Fachinhalte in individuell erstellten Artikeln anzulegen und sie untereinander so zu vernetzen, dass eine umfangreiche Wissensbasis zum Kursthema entsteht. Die Kommunikation in LMS kann asynchron durch ein Kursforum oder synchron durch eine Chatbox ermöglicht werden. Interaktive Test, z.B. als Multiple Choice oder in Form anderer Leistungsabfragen können im LMS direkt bewertet und die jeweiligen Ergebnisse direkt dem Nutzerkonto eines Lernenden zugeordnet werden. Die Möglichkeiten eines LMS erstrecken sich also beinahe über die gesamte Bandbreite der in Kapitel 2.2.2 genannten Sozial- & Kommunikationsformen.

Die Inhalts- und Kompetenzvermittlung kann auch auf andere Weise digitalisiert und über das Internet angeboten werden. Mit einem Web Based Trainig (WBT) können Informationen und Kompetenzen für einen bestimmten Bereich über das Internet vermittelt werden. Organisation und Administration sind, im Gegensatz zu einem LMS, nicht Teil eines WBT. Das Erlernen von Sprachen und die Vorbereitung auf z.B. die Führerscheinprüfung oder schulische Abschlussprüfungen, sind aktuelle Beispiele für Einsatzgebiete von WBTs. Diese aus dem Computer Based Training (CBT) hervorgegangene Form eines eLearning-Angebotes folgt den Entwicklungstrends benachbarter Bereiche wie Spiel- und Unterhaltungsangebote. Die Anbindung an einen zentralen Server, welcher Dienste und Informationen bereitstellt, erlaubt das einfache Pflegen und Aktualisieren von Inhalten und Funktionen [ebd., S. 15–16]. Hierfür ist häufig eine permanente Internetverbindung notwendig, was nicht immer gewährleistet werden kann. Immer mehr Angebote arbeiten daher mit modular aufgebauten Inhalten, welche teilweise heruntergeladen werden und anschließend auch offline zur Verfügung stehen. Viele Anwendungen für WBTs folgen einem linearen Verlauf bei Inhalts- und Kompetenzvermittlung. Mit einem definierten Ziel wird zunächst abschnittsweise grundlegendes Wissen vermittelt und später in allgemeinen oder speziellen Anwendungsfällen vertieft. Die digitalen Inhalte von WBTs, die an Computer, Tablet oder Handy abgerufen werden, profitieren von den audiovisuellen Ein- und Ausgabemöglichkeiten dieser Endgeräte. Einige Angebote sind speziell für die Verwendung mit Touchbildschirmen optimiert. Inhalte eines WBTs können klassisch in Form von Textpassagen dargestellt werden. Ein großes Potential liegt auch in der Verwendung multimedialer Elemente wie z.B. Videos oder Animationen zur Visualisierung komplexer Zusammenhänge. Unter Berücksichtigung der kognitiven Belastung der Lernenden (siehe Kapitel 2.2.2) erlaubt der gezielte Einsatz von Video- und Tonaufnahmen eine realitätsnahe Präsentation der darzustellenden Inhalte [Rey 2009, S. 36–48]. Neben der multimedialen Darstellung von Inhalten

bedienen sich WBTs auch der interaktiven Eingaben der Lernenden. Diese Eingaben können über Tastatur und Maus, aber auch über ein Mikrofon oder Kameras erfolgen. Lückentexte und Zuordnungsaufgaben stellen in diesem Kontext eher klassische, auch in der nicht digitalen Welt mögliche Aufgaben dar. Einige eLearning-Konzepte setzen bei der Nutzung von Kurztests oder Zuordnungsaufgaben auf aussagekräftiges Feedback, um durch direkte Rückmeldungen das Lernerlebnis zu individualisieren. Der Ablauf von WBTs kann linear, wie z.B. ein Fachbuch, oder dynamisch angelegt sein. Für das lineare Absolvieren eines Pensums innerhalb eines WBTs werden die zur Verfügung stehenden Möglichkeiten der Inhaltsdarstellung an den jeweiligen Lerninhalt angepasst, jedoch nicht ohne ein geeignetes Maß an Abwechslung. Ein attraktives WBT-Angebot reflektiert die zu vermittelnden Elemente in regelmäßigen Abständen durch Rückfragen und interaktive Sequenzen. Dies hilft, den eigenen Lernstand besser zu begreifen und bestimmte Sequenzen ggf. erneut zu absolvieren. In dynamischen WBTs ist der Ablauf nicht unmittelbar vorgegeben. Der Nutzer erhält die Kontrolle über die Ablaufsteuerung des WBTs, sodass das Tempo und die Wiederholung von Elementen individuell bestimmt werden können. Im Unterschied zu Angeboten im Format eines Frontalunterrichts mit einer zentralen Lehrperson können Lernende Inhalte von WBTs in der passenden Intensität bearbeiten und sind nicht dem kontinuierlichen Input einer klassischen Vorlesung oder Unterrichtsstunde ausgesetzt (siehe CLT [Rey 2009, S. 36–48]).

Soll die Erarbeitung von Inhalten in Gruppen oder Kursen erfolgen, eignen sich Webinare und Virtual Classrooms (virtuelles Klassenzimmer) zur Einrichtung eines gemeinsamen, virtuellen Lernraums. Ein Webinar ist ein internetbasiertes Seminar mit definiertem Ablauf und einem Lernziel. Die einzelnen Lehrveranstaltungen eines Webinars werden für gewöhnlich über digitale Medien absolviert. Neben dem möglichen Einsatz der bereits genannten eLearning-Elemente wird hier auch die Präsenzphase digitalisiert. In einem Virtual Classroom verkörpern die Teilnehmer die unterschiedlichen Rollen (siehe Kapitel 2.2.2) einer Lehrveranstaltung [eBusiness-Lotse Mecklenburg-Vorpommern 2015, S. 17–18]. Hierzu gibt es verschiedene Softwarelösungen, die das Einrichten eines Virtual Classroom ermöglichen. Neben der Kommunikation mit Videobild und Ton bieten viele Systeme, wie z.B. Adobe Connect oder Blackboard Collaboration auch seminartypische Funktionen. Eine gemeinsame Präsentationsfläche gibt den Teilnehmern die Möglichkeit, das aktuelle Geschehen zu verfolgen. Zudem kann die Veranstaltung schriftlich (Chat) oder durch Symbole (Handzeichen und Emojis) kommentiert werden. Dieses Format erlaubt kleinen Gruppen eine sehr gute bidirektionale Kommunikation. Mit steigender Gruppengröße sinkt die Übersichtlichkeit der Kommunikation, da paralleler Informationsaustausch stattfinden kann und eine zu große Zahl gleichzeitiger Dialoge schnell unverständlich ist. Dabei ist die Richtung des Informationsaustauschs nicht strikt festgelegt. Eine Lehrperson kann z.B. einen Impulsvortrag geben und anschließend zur Mitarbeit auffordern.

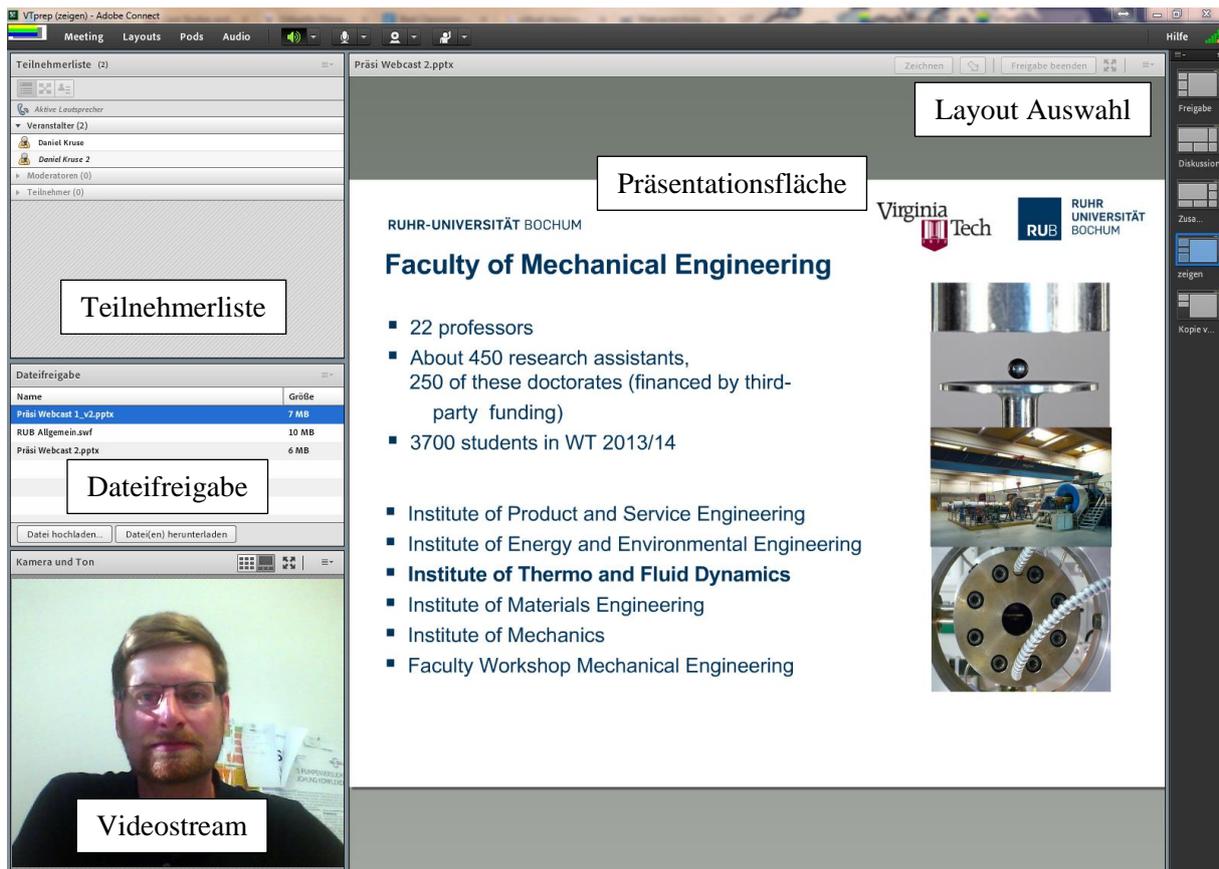


ABBILDUNG 2-4 BEISPIEL EINES VIRTUAL CLASSROOM MIT ADOBE CONNECT MIT: TEILNEHMERLISTE, DATEIFREIGABE, VIDEOSTREAM UND PRÄSENTATIONSFLÄCHE.

Zur Kollaboration kann die gemeinsame Arbeits- und Präsentationsfläche (siehe Abbildung 2-4) auch für Lernende freigegeben werden, sodass entweder alle gleichzeitig oder zeitlich gestaffelt ihren Beitrag abgeben können. Oft kann das Layout der virtuellen Klassenräume an die jeweilige Lernsituation angepasst werden, sodass z.B. der Fokus von einer Präsentation auf einen Videostream verlagert werden kann (siehe Abbildung 2-4). Die Teilnehmerliste enthält alle Nutzernamen und Informationen über die Rolle der jeweiligen Person. Über die Dateifreigabe können die Nutzer bereitgestellte oder selbsterstellte Dateien austauschen. Die Präsenzphasen eines Webinars können durch ein LMS unterstützt werden. Dies ist besonders bei wiederkehrenden Sitzungen oder bei mehrteiligen Webinar-Reihen mit definiertem Lernziel sinnvoll und ergänzt das Angebot um die Möglichkeiten der individuellen Nach- bzw. Vorbereitung und der asynchronen Kommunikation mit anderen Webinar Teilnehmern [Strenger et al., S. 7]. Auf diese Weise sind Aus- und Weiterbildungsprogramme ohne gemeinsame physische Präsenz möglich, was dieses Format gerade für die fachliche Qualifizierung einer orts- und zeitgebundenen Zielgruppe attraktiv macht. Die Teilnehmerzahl liegt dabei für gewöhnlich im Rahmen präsenzbasierter Seminare.

Die zunehmende Vernetzung der Gesellschaft und die steigende Nachfrage an Qualifizierungsmöglichkeiten hat ein neues, non-formales Lernformat hervorgebracht; den Massive Open Online Course (MOOC = offener Massen-Online-Kurs). Ein solcher MOOC ist ein offenes Lehrkonzept für

große Nutzerzahlen. Ähnlich wie bei einem Webinar handelt es sich hierbei um ein virtuelles Lehrangebot aus verschiedenen eLearning-Elementen. Die Grundidee beruht auf dem Wunsch, einen breiten Zugang zu Lernangeboten zu schaffen, die ansonsten ggf. nur einem geschlossenen Personenkreis zugänglich wären [Institut für Erziehungswissenschaft 2015, S. 28]. Die ersten MOOCs entstanden im Rahmen der zunehmenden Fortentwicklung der Informations- und Telekommunikationssysteme zunächst in den USA. Einer der ersten MOOCs im Jahr 2011 wurde von Thrun und Norvig zum Thema künstliche Intelligenz angeboten. Für diesen Kurs gab es etwa 150.000 Anmeldungen [Pappano 2012, S. 1]. Im Unterschied zum Webinar sind MOOCs nicht in ihrer Teilnehmerzahl begrenzt. Besonders bei IT-basierten Disziplinen ist diese Form des Lehrens bzw. Lernens beliebt, da hier viele Themen ohnehin im virtuellen Raum oder mit digitalen Tools bearbeitet werden. Das Angebot reicht von der Einzelveranstaltung bis hin zu wiederkehrenden Veranstaltungsreihen. Aufwändige digitale Veranstaltungen werden durch LMS begleitet und erlauben den Erwerb eines Zertifikates für die erfolgreiche Teilnahme. Mittlerweile gibt es verschiedene Abwandlungen und Unterkategorien, welche jedoch oft entweder das „massive“ oder das „open“ von MOOCs anders definieren. Das Format wird als vielversprechend angesehen, sodass es neben den teilweise schnell entworfenen MOOCs der Hype-Phasen mittlerweile auch kommerzielle Anbieter von MOOCs gibt. Es existieren auch hybride Geschäftsmodelle für MOOCs, bei denen das Absolvieren des Programms ohne Gebühr möglich ist, eine fachliche Unterstützung und die Ausstellung eines Zertifikates jedoch mit Kosten verbunden sind (siehe university, OpenCourseWorld, Coursera oder Udacity).

Neben den rein virtuellen eLearning-Konzepten existieren auch etliche hybride Veranstaltungskonzepte. Diese als Blended Learning bezeichneten Konzepte, beschreiben somit alle Lehr- und Lernformate, bei denen Lehrende die Elemente klassischer, präsenzbasierter Lehre mit Elementen des eLearning kombinieren [Universität Bremen 2016, S. 107]. Für gewöhnlich dient eine formale, präsenzbasierte Lehrveranstaltung als Vorlage. Der Einsatz von eLearning-Elementen wie Web Based Trainings, Kurs-Wikis, Foren oder Chats führt dazu, dass der Lernprozess in seiner Geschwindigkeit und Intensität individualisiert werden kann [MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung 2011, S. 16]. Die Elemente der formalen, präsenzbasierten Lehrveranstaltung helfen, den individuellen Lernstand sowie den Grad der Erreichung des Lernziels zu verdeutlichen. Dies kann z.B. in Form regelmäßiger Präsenzphasen, klassischer Vorträge oder durch das Einreichen von Lernberichten geschehen. Verfügt ein Blended Learning Angebot über die Möglichkeit einer LMS-Integration, so können Aufgaben ganz oder teilweise mit Hilfe der vom LMS bereitgestellten Funktionen und Modulen absolviert werden. Fordern Lehrende z.B. zur Anfertigung eines Berichtes oder einer Präsentation in Einzel- oder Gruppenarbeit auf, so kann das LMS zur Koordination der Teilaufgaben und Zwischenergebnisse genutzt werden. Das Ergebnis dieser Arbeit wird dann wieder im klassischen Kurs- oder Klassenverband vorgestellt. Ein weiteres Beispiel für ein Blended Learning ist die Verwendung von online-Tests innerhalb des LMS. Hierbei besuchen die Lernenden ein klassisches präsenzbasiertes Lernangebot und haben später die

Möglichkeit, innerhalb eines LMS Fragen bezüglich des zuvor bearbeiteten Inhalts zu beantworten. Idealerweise werden die im klassischen Lernangebot verwendeten Medien wie Präsentationen, Bücher, Texte, Grafiken, Bilder und Videos auch über ein LMS zur Verfügung gestellt, um ein individuelles Nachbereiten zu ermöglichen.

Unter dem Begriff Inverted oder Flipped Classroom wird ein Format verstanden, welches für mehr Interaktion zwischen Lernenden und Lehrenden eintritt. Hier werden klassische Präsenzveranstaltungen mit individuellen Selbstlernphasen kombiniert. Der Grundgedanke basiert auf der Annahme, dass ein Großteil der Inhaltsvermittlung auf individueller Basis und nicht in den gemeinsamen Präsenzphasen erfolgt. Dabei werden die Präsenzphasen für vermehrte Interaktion zwischen den Lernenden und mit den Lehrenden genutzt [van Treeck et al. 2013, S. 294]. Die individuellen Lernprozesse außerhalb der Präsenzveranstaltung sind dabei nicht zwingend ausschließlich aus eLearning-Elementen gestaltet, doch liegt hier großes Potential. Werden diese Formate jedoch mit Hilfe von eLearning-Elementen umgesetzt, gelten sie als Blended Learning. Mit eLearning-Elementen kann den Studierenden der fachliche Inhalt auf unterschiedliche Weise angeboten werden, sodass individuelles Lernen möglich wird. Informationen können in Präsentationen, Texten, WBTs, Videos und Animationen vermittelt werden [ebd., S. 297]. Wird dieses Format durch ein LMS unterstützt, kann neben der Bereitstellung von Inhalten auch die Kommunikation der Lernenden in ihren individuellen Lernprozessen angeregt werden. Dies hilft den Lernenden, individuelle Hürden im Lehrstoff durch die Gemeinschaft der Lernenden zu überwinden. Als mögliche Tools hierfür können Foren, Wikis oder Chats sowie Emails verwendet werden [Kerres und Jechle 2000, S. 259].

Auch wenn es sich bei den oben vorgestellten eLearning-Tools nur um einen Auszug handelt, erlauben diese Elemente die Gestaltung von individuellen eLearning-Szenarien, wie sie in Tabelle 2-1 gefordert werden. Durch die genannten eLearning-Tools können insbesondere der Zeitpunkt und die Dauer der Nutzung, oftmals sogar der Ort des Zugriffs auf digitale Inhalte individuell gewählt werden. Auf diese Weise wird ein individueller und flexibler Zugang zur Vermittlung theoretischer, fachspezifischer Inhalte erreicht. Die Möglichkeit der Nutzung praxisnaher Elemente ist stark abhängig von der betrachteten Disziplin.

Seit der Einrichtung des Bildungssystems gibt es schon immer Konstellationen, in denen nicht jede Person einen günstigen Zugang zu einer Bildungseinrichtung und damit zu den gewünschten oder benötigten Bildungsinhalten hat. Beginnend mit rein textbasierten Unterrichtseinheiten für den postalischen Unterricht über die Einrichtung von „Busch-Schulen“ via Amateurfunk oder den ersten Fernuniversitäten in Großbritannien und Deutschland haben technologische Entwicklungen stets das Lernen und Lehren sowie die Zugangsmöglichkeiten zu Bildungsinhalten erweitert [Zawacki-Richter 2013, S. 67]. War auch die Kreidetafel bei ihrer Einführung stark umstritten, so haben Medien wie das Telefon, Bildschirmtextanwendungen oder der moderne Computer in Verbindung mit dem Internet, neben ihrem großen Potential, immer auch große Diskussionen mit sich gebracht [ebd., S. 66].

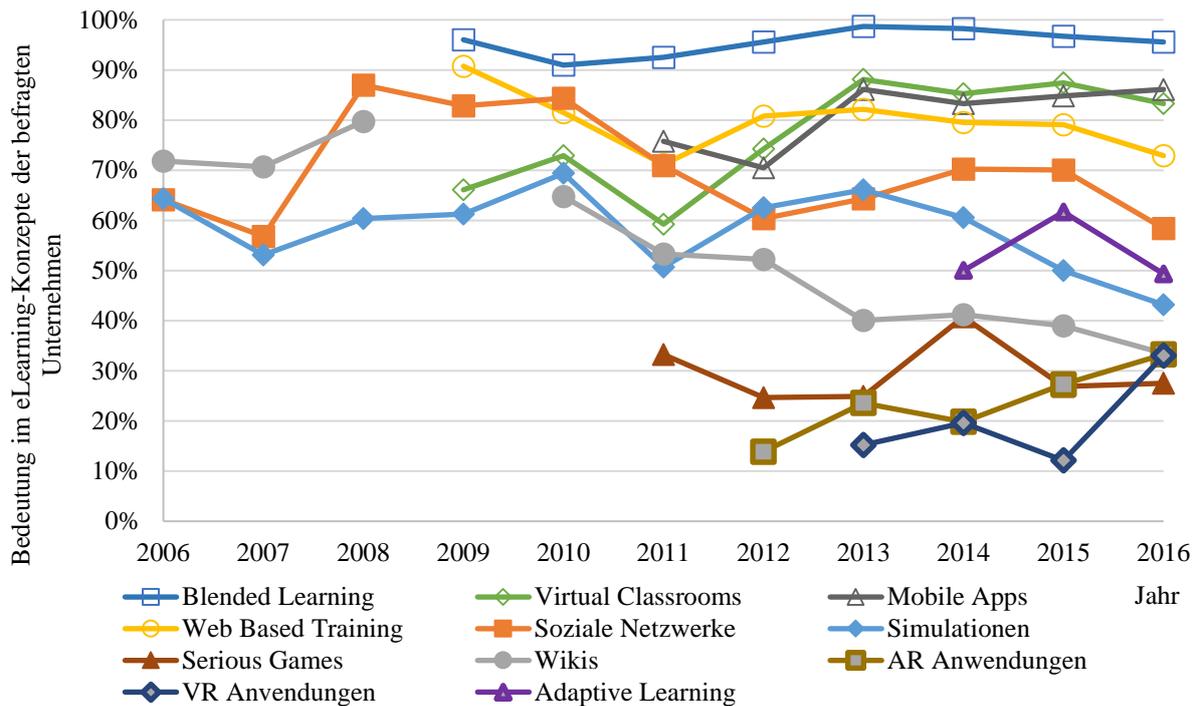


ABBILDUNG 2-5 ENTWICKLUNG AUSGEWÄHLTER eLEARNING-TRENDS ÜBER DIE FRAGE: WAS SCHÄTZEN SIE – WERDEN DIE FOLGENDEN ANWENDUNGEN IN DEN KOMMENDEN DREI JAHREN EINE ZENTRALE BEDEUTUNG ODER EINE GERINGE BEDEUTUNG ALS LERNFORM FÜR DAS BETRIEBLICHE LERNEN IN UNTERNEHMEN HABEN? ANGABEN IN %, ALLE ANTWORTEN "NUTZUNG WIRD STEIGEN" BZW. "ZENTRALE BEDEUTUNG ALS LERNFORM" [MMB-INSTITUT FÜR MEDIEN- UND KOMPETENZFORSCHUNG 2017, S. 6]

In jüngerer Zeit wandelt sich das technologiegestützte Lernen erneut. Dieser Wandel vollzieht sich vom lokalen CBT zum vernetzten WBT, wobei neben der Aktualität der Inhalte auch soziale und kollaborative Aspekte von steigendem Interesse sind. In Abbildung 2-5 ist zu erkennen, dass Virtual Classrooms und Mobile Apps an Bedeutung gewinnen. Gerade im Zusammenhang mit der Vermittlung von komplexen Inhalten sind Kommunikation und Diskussion dem Lernerfolg des Einzelnen förderlich [Kerres und Jechle 2000, S. 259]. In diesem Zusammenhang postuliert Schulmeister: „Kommunikation ist Dialog, Dialog impliziert Rückmeldung, Lernen basiert auf Verstehen, Verstehen benötigt Rückmeldung. Ohne Rückmeldung ist demnach Lernen nicht möglich“ [Schulmeister 2006, S. 1]. In Zukunft werden die hohe Verfügbarkeit mobiler Endgeräte mit Internetzugang und der steigende Bedarf nach lebenslangem Lernen das Smartphone zu einem wichtigen Medium für Lehr- und Lerninhalte machen. Zu guter Letzt wird „Blended Learning“ über den Zeitraum von 2006 bis 2016 als das wichtigste Konzept beschrieben. Die vielseitigen Gestaltungsmöglichkeiten von „Blended Learning“ bescheren dem Format eine hohe Einsatzfähigkeit in nahezu allen Bereichen der betrieblichen Aus- und Weiterbildung.

2.2.4 Mitarbeiterqualifizierung mit eLearning in Unternehmen

Der Einsatz von eLearning zur Mitarbeiterqualifizierung ermöglicht den Angehörigen eines Unternehmens das Lernen im Einklang mit ihren privaten und beruflichen Bedürfnissen [Böhler 2013, S. 489]. Weiterhin ist der Einsatz von eLearning in Aus- und Weiterbildung ein Teil der Antwort auf die Frage: Wie lässt sich lebenslanges Lernen realisieren? In einer sich permanent verändernden Umgebung verdrängen informelles und non-formales Lernen mit eLearning-Tools die formalen Bildungsformate und erlauben auf diesem Wege sogar gesetzlich vorgeschriebene Unterweisungen [Kerres und Jechle 2000,

S. 259; eBusiness-Lotse Mecklenburg-Vorpommern 2015, S. 23]. Wurden in der Vergangenheit vermehrt theoretische Inhalte vermittelt, so steigt nicht zuletzt im Kontext der Qualifizierung für Industrie 4.0 die Nachfrage nach Tools zur praktischen Kompetenzentwicklung anhand von Problemstellungen aus der beruflichen Praxis [Böhler 2013, S. 491].

Um Mitarbeitern ausreichend Gelegenheit zur Aus- und Weiterbildung zu geben, gleichzeitig aber die Ausfallzeiten durch formale Weiterbildungsprogramme zu verringern, integrieren die Unternehmen den Lernprozess zunehmend in die Arbeitsumgebung [eLearning Journal 2015, S. 7]. Laut einer Umfrage des Bundesinstitutes für Berufsbildung unter 3006 Unternehmen haben 92 % der Arbeitnehmer an ihrem Arbeitsplatz Zugriff auf einen Desktop-PC (siehe Abbildung 2-6)

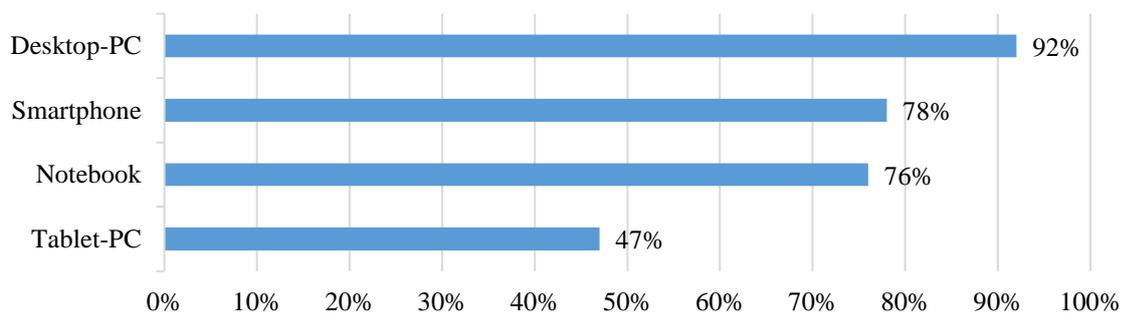


ABBILDUNG 2-6 NUTZUNG BZW. VERFÜGBARKEIT DIGITALER ENDGERÄTE AM ARBEITSPLATZ (N=3006) [GENSICKE ET AL. 2016, S. 25]

Bei der Frage nach den zu vermittelnden Inhalten wurden in der Vergangenheit zunächst die Einführung und Weiterbildung in IT-Themen wie Softwareprodukte oder neue Arbeitsprozesse, aber auch Sprachtraining und kaufmännische Fachschulungen genannt [MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung 2010, S. 18]. Besonders im Fokus der Vorbereitung auf Industrie 4.0 werden nun auch immer individuellere eLearning-Angebote umgesetzt [eBusiness-Lotse Mecklenburg-Vorpommern 2015, S. 29]. Hier rücken Industrie 4.0-relevante Themen wie praxisnahe Schulungen und wirklichkeitsgetreue Lernumgebungen in den Vordergrund [Universität Bremen 2016, S. 99]. In Zukunft wird der Fokus für eLearning-Inhalte, laut einer Umfrage des MMB-Institutes für Medien und Kompetenzforschung (n = 68), auf der Vermittlung der Unternehmenskultur, Anwendungsschulungen, Produktschulungen sowie Arbeitsschutz und Arbeitssicherheit liegen [MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung 2016, S. 10; eLearning Journal 2015, S. 5]. Auch der elektronische Austausch von Knowhow unter den Mitarbeitern und die eLearning-basierte Schulung für die Bedienung neuer Anlagen und Prozesse sind von Interesse [Universität Bremen 2016, S. 100].

Auch wenn für die vorgestellten Themen bereits ein entsprechendes eLearning-Angebot besteht, muss dieses nicht unbedingt auf Akzeptanz in der Zielgruppe stoßen [Institut für Erziehungswissenschaft 2015, S. 29]. Bei der Planung eines eLearning-Programmes ist die Diversität der Zielgruppe unter dem Gesichtspunkt der Zielgruppenorientierung zu berücksichtigen [MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung 2011, S. 16]. Hierfür sind eine ganze Reihe von Aspekten wie z.B. der allgemeine

Bildungsstand, die Medienkompetenz der Nutzer und der durch den Nutzer vermutete Aufwand einer eLearning-Weiterbildung zu beachten. Wird dies berücksichtigt, schätzen die lernenden Nutzer den Kompetenzerwerb und sehen sich nicht als bloße Teilnehmer einer Maßnahme [Universität Bremen 2016, S. 100]. Der Vergleich zweier Umfragen (siehe Abbildung 2-7) des MMB-Institutes für Medien und Kompetenzforschung aus 2010 und 2017 zeigt bereits eine Verschiebung des Trends hin zum informellen Lernen.

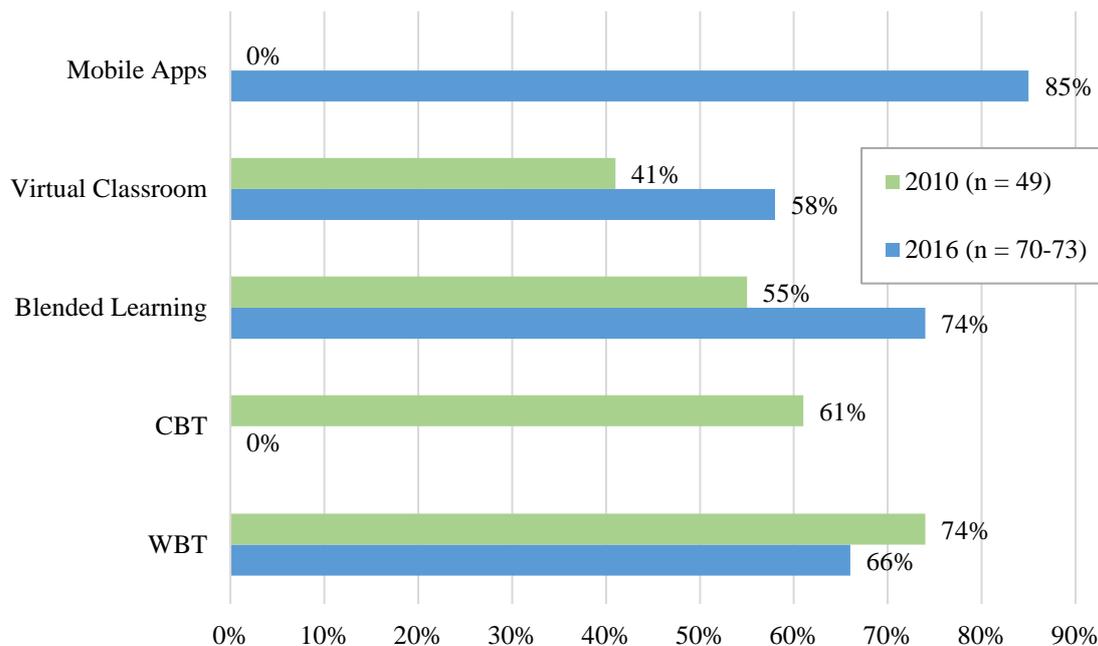


ABBILDUNG 2-7 BEDEUTUNG AUSGEWÄHLTER eLEARNING-TOOLS IM VERGLEICH VON 2010 ZU 2016 [MMB-INSTITUT FÜR MEDIEN- UND KOMPETENZFORSCHUNG 2010, S. 17, 2017, S. 7]

In 2010 wurden viele Qualifizierungsmaßnahmen mit statischen CBTs und linearen WBTs umgesetzt, wohingegen in 2016 der Trend eher zu mobilem Lernen und Blended Learning ging [MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung 2010, S. 17, 2017, S. 7].

Die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten eLearning-Tools und -Konzepte eignen sich für die Vermittlung von theoretischen Inhalten. Das Abbilden der geforderten arbeitsplatznahen Praxiserfahrung im wirklichkeitsnahen Umfeld ist mit den vorgestellten Tools, je nach Disziplin, nur eingeschränkt möglich. Für den Aufbau praxisnaher Fach- und Querkompetenz werden neue Technologien und neue eLearning-Konzepte benötigt.

2.3 Grundlagen virtueller und remote Labore

Die im vorangegangenen Kapitel vorgestellte Auswahl an eLearning-Elementen ist nicht vollständig. Der folgende Abschnitt widmet sich Konzepten, bei denen praxisnahes Arbeiten und Interaktion mit realen oder simulierten Prozessen ermöglicht wird. Wo das Erarbeiten von Wissen aus Fachliteratur oder das aufmerksame Verfolgen von Lehrvorträgen an die Grenzen der Veranschaulichung stoßen,

erweitert das Labor seit Jahrhunderten den didaktischen Spielraum. Die Definition des Begriffes Experiment hängt von der betrachteten Disziplin ab. Traditionell arbeiten Naturwissenschaftler, Ingenieure und Mediziner mit Experimenten zur Datengewinnung. Experimente dienen aber auch den Geisteswissenschaften und weiteren Disziplinen zunehmend als Arbeitsraum, um aussagekräftige Untersuchungen durchzuführen.

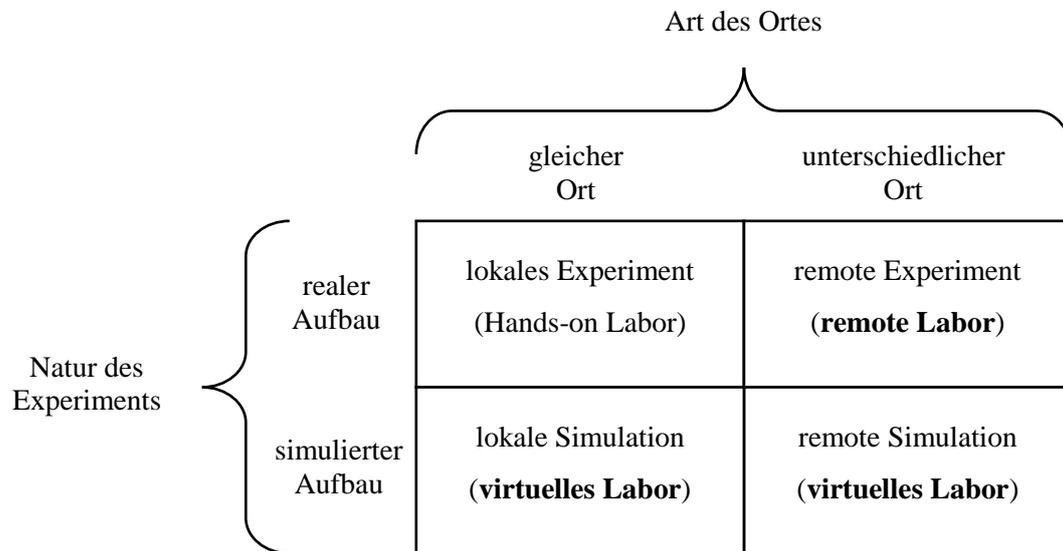


ABBILDUNG 2-8 EINTEILUNG VON LABOREN NACH ORT UND NATUR DES EXPERIMENTES [GOMES UND BOGOSYAN 2009, S. 4745]

Experimente werden über zwei Parameter charakterisiert (siehe Abbildung 2-8): die Natur und den Ort des Experimentes [Gomes und Bogosyan 2009, S. 4745]. Die Natur des Experiments wird in real oder simuliert unterschieden. Der Ort wird in lokal oder remote unterschieden. Befinden sich Experimentator und physikalisches Experiment im gleichen Raum, handelt es sich um ein Hands-on-Experiment. Sind Experimentator und das physikalische Experiment räumlich getrennt, handelt es sich um ein **remote Labor**. Für die simulierten Experimente wird ebenfalls zwischen der lokalen Simulation (z.B. auf einem lokalen PC) und der remote Simulation (z.B. auf einem entfernten Server) unterschieden, welche im Folgenden zusammengefasst als **virtuelles Labor** bezeichnet werden [ebd.]. Die folgenden Kapitel führen zunächst an die Grundlagen der Laborlehre heran, um sie dann auf digitale Konzepte, wie simulierte oder ferngesteuerte Experimente für den Einsatz als eLearning-Tool, zu übertragen.

2.3.1 Grundlagen der Laborlehre

Um auch im eLearning eine wirklichkeitsnahe Kompetenzentwicklung zu erreichen, bedarf es einer gesicherten Umgebung, in der die Auswirkungen eigener Interaktionen mit Gerätschaften, Prozessen und Methoden untersucht werden können. Das praktische Arbeiten und Bedienen technischer Geräte und Prozesse sowie die praktische Anwendung von zuvor in der Theorie erarbeiteten Inhalten wird in konventionell durchgeführten Präsenzveranstaltungen im Rahmen von Laborübungen oder Vorlesungsversuchen behandelt. In Abbildung 2-9 ist der allgemeine Ablauf eines Experiments zu sehen. Mit dem Ziel des Kompetenzgewinns wird den Lernenden zunächst eine Frage- oder

Problemstellung vorgestellt. Die Lernenden bilden dann eine Hypothese auf der Basis dieser Problemstellung und der bisher vermittelten Inhalte. Für die Überprüfung dieser Hypothese wird ein Experiment herangezogen. In der Vorbereitung hierauf wird das notwendige Hintergrundwissen erarbeitet und ein Aufbau sowie der Ablauf eines geeigneten Experimentes geplant. Mit der Durchführung des Experimentes erfolgt die Überprüfung der aufgestellten Hypothese unter kontrollierbaren Umständen. Abschließend werden die Daten des Experimentes ausgewertet und Schlussfolgerungen in Bezug auf die Hypothese gezogen [Bruchmüller und Haug 2001, S. 103].

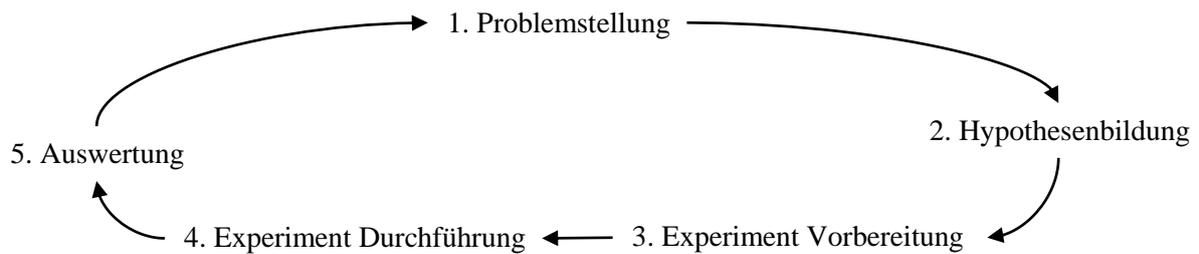


ABBILDUNG 2-9 ABLAUF DER EXPERIMENTIERPHASEN IM KONTEXT VON AUS- UND WEITERBILDUNG [BRUCHMÜLLER UND HAUG 2001, S. 103]

Der vorgestellte Ablauf von Laborexperimenten bedarf geeigneter Rahmenbedingungen, um die Sicherheit und die Reproduzierbarkeit aller Arbeitsschritte zu gewährleisten [Bruchmüller und Haug 2001, S. 59]. Im Folgenden werden die wichtigsten Elemente eines Laborexperiments vorgestellt. Der Begriff Labor kann sowohl physikalisch einen Ort (siehe Abbildung 2-10), als auch einen organisatorischen Rahmen beschreiben, in welchem Experimente durchgeführt werden können [Gomes und Bogosyan 2009, S. 4745].

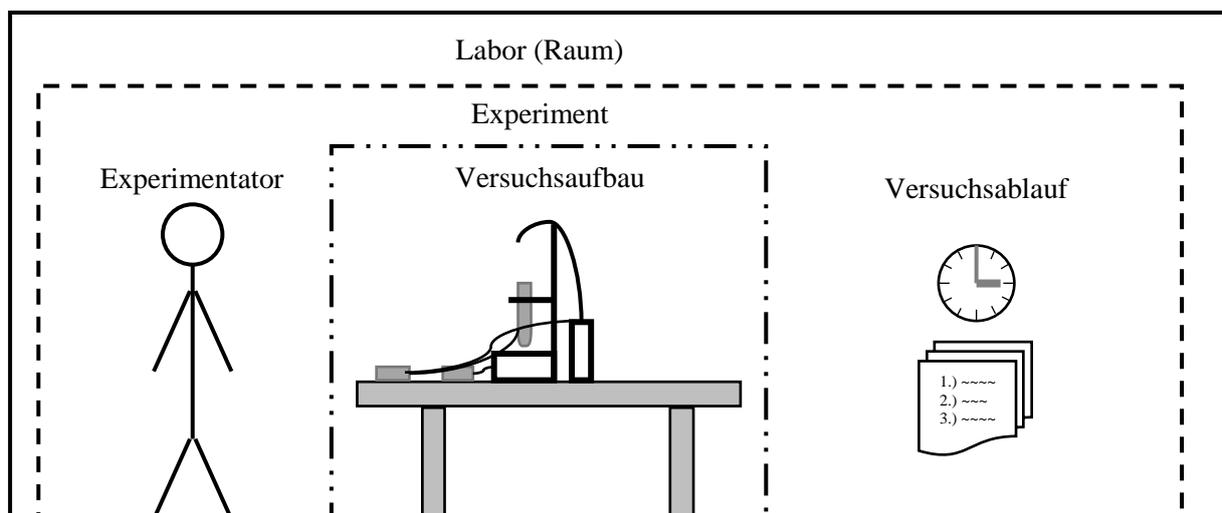


ABBILDUNG 2-10 DAS LABOR UND SEINE BETRACHTETEN BESTANDTEILE

Besonders in der Medizin sowie den Ingenieur- und Naturwissenschaften werden dedizierte Räumlichkeiten als Labore deklariert. Dies dient der Einhaltung aller notwendigen Sicherheitsmaßnahmen und entsprechenden Standards bei der Durchführung von Experimenten. Über den Begriff Experiment

schreibt der Duden: „wissenschaftlicher Versuch, durch den etwas entdeckt, bestätigt oder gezeigt werden soll“ [Duden 2013], Römpf schreibt hierzu: „Bezeichnung für einen willkürlich herbeigeführten natürlichen Vorgang, mit dem man je nach Ausfall eine unbekannte Größe bestimmen oder eine Gesetzmäßigkeit erkennen oder demonstrieren will, die den Ablauf des Vorganges bestimmt“ [Römpf 2017]. Im Folgenden wird ein Experiment entsprechend der Experimentierphasen nach Haug betrachtet [Bruchmüller und Haug 2001, S. 103]. Das Ergebnis eines Experimentes kann neben quantisierten Beobachtungsgrößen auch eine qualitative Aussage über das Verhalten eines Systems sein. Im Lehr- und Weiterbildungskontext können zudem das Erlernen eines bestimmten Habitus sowie das Erlangen von Laborerfahrung im Fokus stehen.

Die ausführende Person eines Experimentes wird als Experimentator bezeichnet. Aus Sicht der klassischen Laborlehre finden sich in dieser Rolle für gewöhnlich Schüler, Auszubildende oder Studierende wieder. Die Person des Lehrenden nimmt dann eine beobachtende Rolle ein. In bestimmten Situationen kann es jedoch angebracht sein, dass die Rolle des Experimentators durch einen Lehrenden bekleidet wird und die Lernenden sich in der Rolle der Beobachtenden wiederfinden.

Als Versuchsaufbau oder Versuchsanordnung werden die für das Experiment ausgewählten Gerätschaften und ihre Installation bezeichnet. Die Installationen können flexibel, jedoch immer unter Einhaltung der Sicherheitsvorschriften ausgeführt sein. Neben Behältern, Leitungen und Schläuchen zählen auch Mess- und Analysegeräte sowie andere technische Vorrichtungen zum Versuchsaufbau.

Der Versuchsablauf beschreibt die Organisation und die zeitliche Abfolge der Zustände, die ein Versuchsaufbau planmäßig durchlaufen soll. Der Versuchsablauf wird in der Regel so gewählt, dass die Reproduktion eines Zustandes gewährleistet ist. Zudem soll der Versuchsablaufplan auch diejenigen Zustände des Versuchsaufbaus beinhalten, bei denen das in der Hypothese vorhergesagte Verhalten nicht eintritt (Gegenbeweis).

Labore werden jedoch nicht ausschließlich zu Forschungszwecken benötigt. In vielen technischen Anwendungen ist ein Labor mit definierten Bedingungen notwendig, um sensible technische Bauteile zu kalibrieren. Neben dem Einsatz in Forschung und Technik wird das Labor auch als Raum zum Lehren und Lernen genutzt. Dabei können zwei Aspekte im Vordergrund stehen. Das Labor kann als Raum für Demonstrationen vor einer Gruppe oder für individuelle Versuche zum Erkenntnis- und Kompetenzerwerb der Lernenden genutzt werden. Der Erkenntnisgewinn liegt dabei nicht unbedingt in der Erweiterung des Wissensvorrats der Disziplin, sondern in der intensiven Konfrontation zwischen Experimentator und den aufgestellten Hypothesen [ebd., S. 59]. Die aus einem Experiment hervorgehende Erfahrung aus der Manipulation oder Beobachtung eines bestimmten Systems hilft den Lernenden, Theorie und Praxiswissen miteinander zu verknüpfen. Unter diesem Aspekt eignet sich der Einsatz von praxisorientierten Laboren zur Mitarbeiterqualifikation für die Anforderungen von Industrie 4.0.

Ein Bereich, in dem Forscher die Laborlehre als Teil der praktischen Aus- und Weiterbildung untersuchen, ist die Hochschulausbildung. Die Hochschulausbildung lässt sich in verschiedene Bereiche aufteilen. Hierbei dienen Vorlesungen der Vermittlung von Grundlagen und Hintergrundinformationen für einzelne oder diverse Themenkomplexe [Bruchmüller und Haug 2001, S. 46]. Für das Erlangen eines tiefen Verständnisses und den Aufbau von Kompetenz für einen solchen Themenkomplex wird die praktische Erfahrung im Umgang mit dem Thema benötigt. Nach Bruchmüller und Haug setzt sich die Menge des insgesamt behaltenen Wissens in den Ingenieur- und Naturwissenschaften zu 50 % aus Vorlesungen (20 % Hören und 30 % sehen) und zu 50 % aus Laborarbeit (erfahren/erleben) zusammen [ebd., S. 57]. Aufgrund unterschiedlicher Ausrichtungen wird das Labor als didaktisches Element in verschiedene Kategorien eingeteilt. Dabei wird das Labor für gewöhnlich im Kontext der Hochschulausbildung gesehen. Das Integrierte Labor (IL) ist in eine Vorlesung eingebunden und steht in direktem Kontext zu den Vorlesungsinhalten [ebd., S. 48]. Die übrigen Laborarten können ohne eine begleitende Lehrveranstaltung betrachtet werden (siehe Abbildung 2-11).

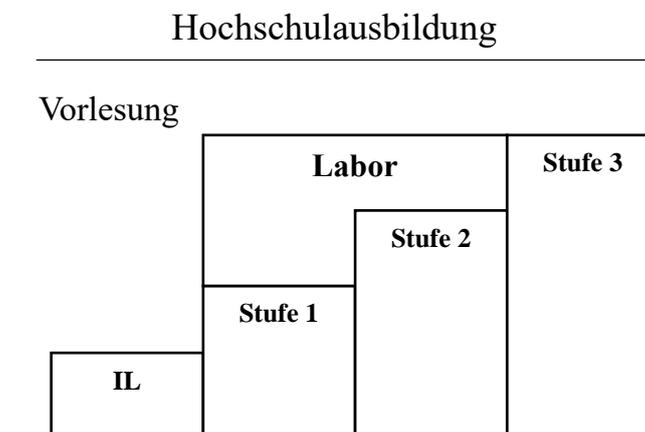


ABBILDUNG 2-11 DAS INTEGRIERTE LABOR (IL) ALS DIDAKTISCHES ELEMENT IN VORLESUNGEN, WEITERFÜHRENDE LABORE FÜR DIE ZUNEHMEND SELBSTÄNDIGE KOMPETENZENTWICKLUNG (STUFEN 1-3) [BRUCHMÜLLER UND HAUG 2001, S. 69]

Dabei gehen Bruchmüller und Haug von verschiedenen Laborstufen, mit entsprechenden Zielsetzungen und zunehmendem Schwierigkeitsgrad, aus. Die Zielsetzung der Labore beginnt mit der Vermittlung der Grundlagen von Laborarbeit und endet mit der eigenverantwortlichen Nutzung eines Labors zur Erreichung individueller Ziele. Mit jeder weiteren Stufe steigt die notwendige Selbstständigkeit des Labornutzers, die zum Erreichen des jeweiligen Lernziels notwendig ist [Bruchmüller und Haug 2001, S. 69]. Bruchmüller und Haug sowie Feisel und Rosa betrachten das didaktische Element des Labors anhand seiner Ausrichtung für die Ausbildung der Kompetenz für die Industrie- bzw. die Wissenschaftspraxis.

Labor für die Industriepraxis (Bruchmüller und Haug):

Unter der Annahme, dass die Hochschulen die zukünftigen Mitarbeiter industrieller Betriebe ausbilden, sehen Bruchmüller und Haug die Hochschullabore als praxisnahe Vorbereitung für die spätere industrielle Arbeitswelt. Bei ihren Betrachtungen identifizieren sie verschiedene intensive Formen des Labors als didaktisches Element (siehe Abbildung 2-12).

Erste Eindrücke der Laborarbeit werden in verschiedenen Stufen der Lehr-Lernlabore (LL) vermittelt. Das integrierte Labor (IL) und die Stufen des LL dienen dem Lehrenden zu Demonstrationszwecken oder erlauben Lernenden den ersten Kontakt mit Experimenten und Versuchsaufbauten [Bruchmüller und Haug 2001, S. 70]. Der Fokus liegt hier auf der Gewinnung erster Praxiskompetenz im Laborumfeld.

Für die Vorbereitung auf eine industrielle Tätigkeit wird die Laborlehre entsprechend angepasst. Die Labore werden in diesem Kontext als praxisorientierte Projektlabore (PL) bezeichnet und behandeln für die Industriepraxis relevante Aspekte und Themen. Analog zu den LL entwickelt sich das PL über drei Stufen hin zur ganzheitlich selbstständigen Laborarbeit, wie es für Projekt- oder Abschlussarbeiten vorausgesetzt wird [ebd., S. 84].

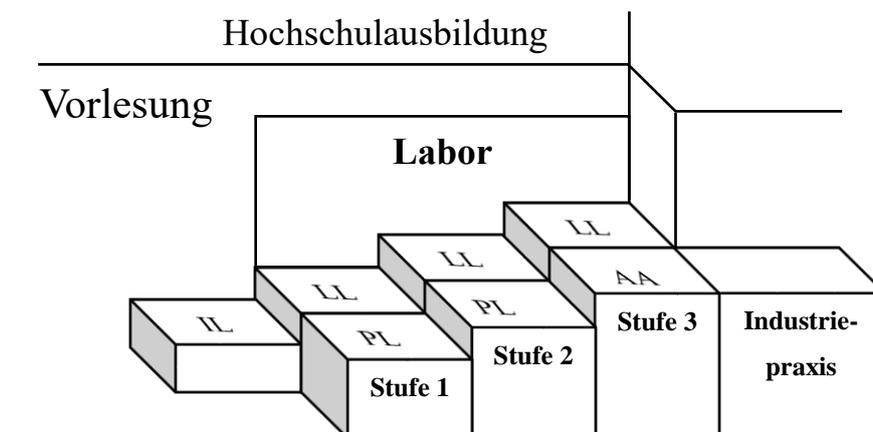


ABBILDUNG 2-12 DIE DREI STUFEN DER LABORARBEIT FÜR DIE VERMITTLUNG PRAKTISCHER KOMPETENZEN [BRUCHMÜLLER UND HAUG 2001, S. 84]

Die erste Stufe im PL stellen Übungs- und Praktikumsversuche dar. Der Ablauf ist i.d.R. linear vorgegeben und lässt das Experiment sicher gelingen. Der Fokus der Kompetenzbildung liegt hier im Umgang mit Laborgeräten und dem allgemeinen Arbeiten in Laboren [ebd., S. 70–71]. Dies ist als Vorbereitung auf die zukünftig selbstständige Arbeit an praktischen Problemen zu sehen. Die Stufen zwei und drei zeichnen sich durch zunehmende Freiheit bei der Gestaltung der Experimente und auch der individuellen Zielsetzung aus. Die Problemstellung und Methodik dieser Stufen ist an den Anforderungen der Industriepraxis orientiert. Die dritte Stufe mündet in der Anfertigung einer Projekt- oder Abschlussarbeit (PA bzw. AA) [ebd., S. 71–72].

Labor für die wissenschaftliche Praxis (Feisel und Rosa):

Feisel und Rosa haben den Fokus ihrer Untersuchung stärker auf die wissenschaftliche Ausbildung gelegt [Feisel und Rosa 2005, S. 121]. Die Labore werden in diesem Kontext als forschungsorientiertes Labor bezeichnet (siehe Abbildung 2-13). Die gesamtheitliche Ausrichtung der Laborerfahrungen kommt hier jedoch primär dem Erlernen der wissenschaftlichen Arbeitsweise zugute [ebd., S. 122]. Dies geschieht über die Auswahl der Fragestellungen, den Anspruch an die Selbstständigkeit der Labornutzer und die Vermittlung der wissenschaftlichen Arbeitsweise.

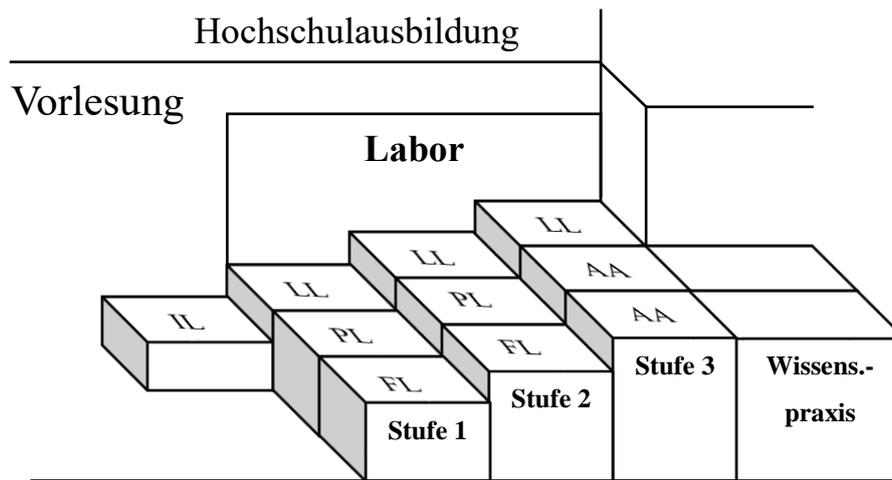


ABBILDUNG 2-13 DIE DREI STUFEN DER LABORARBEIT ZUR VERMITTLUNG FORSCHUNGSORIENTIERTER PRAXISERFAHRUNG

Die Einteilung der Labore in Stufen erfolgt analog zu Bruchmüller und Haug. Auch hier steigt mit jeder weiteren Stufe die notwendige Selbstständigkeit der Lernenden, der Fokus liegt jedoch auf der Vorbereitung einer wissenschaftlichen Forschungspraxis.

Curriculare Integration von Laborlehre:

Der Lerneffekt von Praxiserfahrungen wie Laborexperimenten ohne passende Vor- oder Nachbereitung ist anzuzweifeln. Wird die Vor- und Nachbereitung jedoch auf geeignete Art und Weise in eine Präsenzveranstaltung integriert, ist dies förderlich für das Gesamterlebnis. Zur Demonstration eingesetzte Laborexperimente (z.B. als IL oder LL) werden oft nur mit eingeschränkter Vor- und Nachbereitung seitens der Lernenden durchgeführt [Bruchmüller und Haug 2001, S. 70–71]. Es ist zudem nicht zwingend notwendig, sämtliche theoretischen Grundlagen im Vorfeld zu vermitteln. Das Anpassen von Hypothesen im Verlauf eines Laborversuches ist oftmals genauso lehrreich wie das Bestätigen einer Annahme.

Die Verwendung von realen Versuchsaufbauten in Lernveranstaltungen ist, je nach Sicherheitsbedarf oder Komplexität des Aufbaus, mit erheblichem Aufwand verbunden. Auch die individuelle Bedienung durch die Lernenden ist in diesem Rahmen oft nicht für jeden Lernenden möglich. Um individuelle Laborerfahrung anzubieten, muss auf alternative Strategien zurückgegriffen werden.

2.3.2 Grundlagen der virtuellen Labore

Um virtuelle Labore in einer virtuellen Realität zu beschreiben, ist zunächst die Frage zu klären: Was ist die virtuelle Realität? Im Kontext der aktuellen Entwicklung von Augmented-Reality- (AR) und Virtual-Reality-Anwendungen (VR) lässt sich dies aus Sicht des Nutzers beschreiben. Hierzu hat Milgram das Modell des Realität-Virtualität-Kontinuum vorgestellt (siehe Abbildung 2-14).

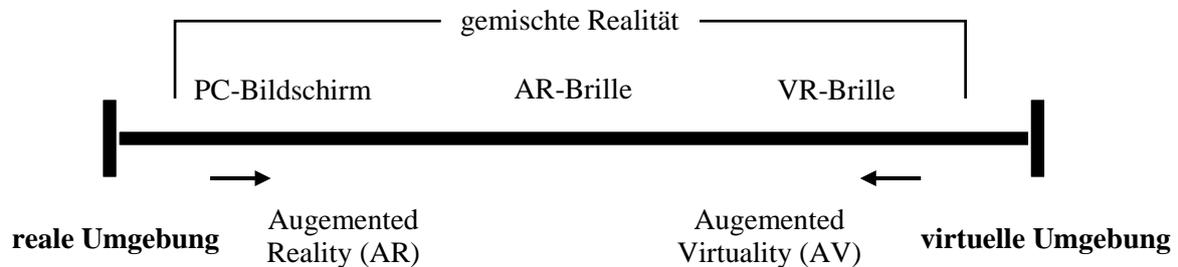


ABBILDUNG 2-14 CHARAKTERISIERUNG DER REALEN UND DER VIRTUELLEN UMGEBUNG [MILGRAM ET AL. 1994, S. 284]

Dabei stellt die linke Seite eine natürliche und die rechte Seite eine fiktive Wirklichkeit dar. Die Realität wird von einem Menschen jedoch individuell als Konstrukt von Beobachtungen, Interaktionen und Analysen der natürlichen Wirklichkeit wahrgenommen [Hesse 2000, S. 5]. Die virtuelle Realität entsteht aus der Beobachtung und Interaktion mit einer fiktiven Wirklichkeit, die nicht gezwungenermaßen aus dem Vorbild der natürlichen Wirklichkeit entspringt [ebd.]. Die Tiefe der Modellierung einer fiktiven Welt verhält sich proportional zu ihrem Abstand zur Realität [Milgram et al. 1994, S. 288]. Je präziser die virtuelle Realität abgebildet werden soll, umso aufwendiger ist ihre Modellierung und Darstellung. Wird eine fiktive Wirklichkeit über einen PC-Bildschirm betrachtet, stellt dieser Zugang eine eher geringe Präsenz der Person in der virtuellen Realität dar. Für eine bessere Immersion im Umgang mit virtuellen Umgebungen eignen sich Endgeräte wie AR- oder VR-Brillen [ebd., S. 290]. Für virtuelle Labore sind Aufwand und Tiefe der Modellierung stark vom jeweiligen Verwendungszweck und den verfügbaren Ressourcen abhängig. Zwar wäre eine maximal immersive Darstellung einer perfekt nachgebildeten Laborwelt unter Umständen wünschenswert, bei dem heutigen Stand der Technik jedoch nur unter großem Aufwand und für wenige Einzelfälle realisierbar.

Das allgemeine Verständnis des Begriffs „virtuell“ ist oftmals abhängig von seinem Kontext und wird häufig als Synonym für eine simulierte oder einfach digitale Abbildung von Prozessen oder Gegenständen verwendet [Bruchmüller und Haug 2001, S. 194]. Die Beschreibung für Virtualisierung oder Prozesse im virtuellen Bereich ist aus Sicht der Technikphilosophie, z.B. durch Hubig, wie folgt denkbar: „...jeder Einsatz von Technik ist gleich Virtualisierung, da er die Möglichkeit gibt, Zustände und Vorgänge erfassbar zu machen, für die ein menschlicher Nutzer keine Sinnesorgane hat oder aus Gründen natürlicher oder technischer Abgrenzung keine direkte Interaktionsmöglichkeit besitzt...“ [Hubig 2011, S. 3].

Ein virtuelles Experiment stellt einen Sonderfall der Laborlehre dar, in dem simulierte Zusammenhänge untersucht werden können [Gomes und Bogosyan 2009, S. 4745]. Sind Labore im traditionellen Sinne

als dedizierte Versuchsräume in der natürlichen Wirklichkeit beschrieben, so erlaubt die steigende Rechenleistung moderner Computer zunehmend auch das Abbilden von Laborumgebungen und Interaktionsmöglichkeiten in einer fiktiven Wirklichkeit. Grundsätzlich wird hierbei ein aus der natürlichen Welt bekannter Zusammenhang modelliert [Bruchmüller und Haug 2001, S. 197]. Dabei lässt sich die Komplexität der Abbildung unter verschiedenen Aspekten betrachten. Die Präzision einer solchen Modellierung hängt von der Qualität der verwendeten Daten und der Modellierungsmethode ab. Einfache Zusammenhänge lassen sich über binäre oder lineare Gleichungen beschreiben. Die Virtualisierung komplexerer Zusammenhänge, die beispielsweise über Differentialgleichungen beschrieben werden, erfolgt iterativ über numerische Simulationsprogramme. Die etablierten Darstellungsweisen der fiktiven Wirklichkeit reichen von textbasierter oder einfacher zweidimensionaler Darstellung bis hin zu realitätsnahen dreidimensionalen Darstellung am Bildschirm. Die Interaktionsmöglichkeiten mit der virtuellen Realität werden über geeignete Mensch-Maschine-Schnittstellen ermöglicht. Die weite Verbreitung des PCs hat Tastatur und Maus für die Interaktion in vielen Szenarien etabliert. Für AR- und VR-Szenarien können spezielle Eingabegeräte notwendig sein [ebd., S. 199]. Die aktuelle technische Entwicklung erweitert dieses Spektrum um moderne Hardware wie die Oculus Rift (VR) oder Microsoft HoloLens (AR) [Restivo et al. 2015, S. 2; Kalles 2017, S. 26].

Ein virtuelles Labor stellt eine virtuelle Umgebung zur kontrollierten Untersuchung von simulierten Zusammenhängen bereit. Die in dieser Arbeit betrachteten virtuellen Labore beschränken sich auf zwei- oder dreidimensionale Bildschirmdarstellungen, welche über einen PC-Bildschirm mit Tastatur und Maus bedient werden.

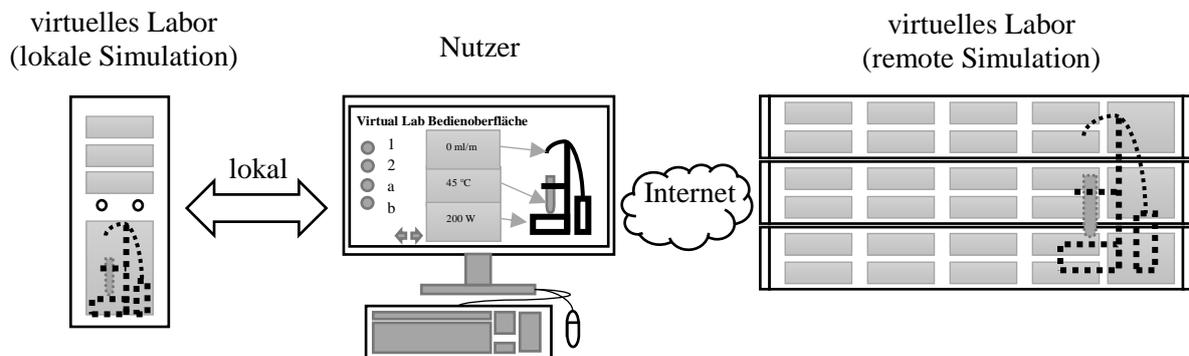


ABBILDUNG 2-15 MÖGLICHKEITEN DES ZUGRIFFS AUF VIRTUELLE LABORE, VIRTUELLES LABOR AUF EINEM PC (LOKALE SIMULATION) ODER ALS SERVERBASIERTES VIRTUELLES LABOR (REMOTE SIMULATION)

Die Grafik in Abbildung 2-15 zeigt zwei Möglichkeiten der Bereitstellung eines virtuellen Labors [Gomes und Bogosyan 2009, S. 4745]. Eine Möglichkeit liegt in der lokalen Simulation für die Durchführung virtueller Experimente auf dem eigenen Endgerät. Dies ist z.B. im Rahmen von CBTs oder für Szenarien mit spezieller Simulationssoftware denkbar. Die zweite Möglichkeit wird durch eine serverbasierte, remote Simulation dargestellt. Die simulierten Zusammenhänge lassen sich auf diese Art zentral berechnen, vernetzen und ggf. auch durch die Gemeinschaft der Nutzer, zur Erreichung eines großen Datenkomplexes, verknüpfen. Bei dieser Variante erfolgt der Zugriff per Browser oder über

einen Software-Client. Die Vorteile von remote Simulationen liegen in der Flexibilität der Verwendung durch den individuellen Zugriff über das Internet, ggf. geringeren Investitionskosten im Vergleich zu remote Laboren (abhängig von der Modellierungstiefe und Darstellung) sowie der Möglichkeit, als Virtual Twin Zugriff auf Daten eines real existierenden Aufbaus im produktiven Betrieb zu haben [Bruchmüller und Haug 2001, S. 197].

Im Kontext dieser Arbeit stellen virtuelle Labore eine lokal oder remote simulierte Umgebung dar, welche Experimente mit realitätsnah abgebildeten, naturwissenschaftlichen Zusammenhängen ermöglicht. Hierbei besteht keine wechselwirkende Verbindung zwischen der simulierten Abbildung und dem realen Vorbild.

Virtuelle Labore können als didaktisches Element sowohl zur Unterstützung von präsenzbasierten (Blended Learning oder Flipped Classroom) als auch onlinebasierten Lehr- und Lernveranstaltungen (Webinar oder Virtual Classroom) eingesetzt werden [Frerich et al. 2016, S. 230]. Die digitale Abbildung erlaubt zudem die beliebige Manipulation der simulierten Darstellung und Funktionsweisen, sodass Szenarien realisiert werden können, die in der realen Welt nicht oder nur mit großem Aufwand zugänglich sind. Zu diesen Szenarien gehören Experimente mit erhöhtem Gefahrenpotential, wie z.B. radioaktiver Strahlung, Hochdruckanwendungen und auch mit biologischen oder chemischen Gefahrstoffen. Die virtuelle Natur eines so gefährlichen Labors vereinfacht den Umgang mit diesen Experimenten als Lernressource. Der hauptsächliche Vorteil eines virtuellen Labors ist die Möglichkeit, dass die rein virtuelle Ressource beliebig kopiert und simultan genutzt werden kann. Weiterhin ist die Nutzung eines virtuellen Labors über das Internet auch standortunabhängig möglich [ebd.].

Virtuelle Labore werden bereits in einigen Bereichen für Ausbildung und Training eingesetzt. Dabei werden virtuelle Szenarien im Fachbereich Biologie [Kalles 2017, S. 26; Stephens et al. 2016, S. 5] und Medizin [Boulos et al. 2007, S. 233] realisiert. Im Bereich der Elektronik wird hier bereits mit Lasern [Titov et al. 2016, S. 337] und elektronischen Schaltungen [Travassos Valdez et al. 2014, S. 1] im virtuellen Umfeld experimentiert. Virtuelle Labore aus den Ingenieurwissenschaften behandeln beispielsweise Fragestellungen mechanischer [Restivo et al. 2015, S. 2] oder steuerungstechnischer Zusammenhänge [Martin-Villalba et al. 2014, S. 78]. Der Bereich der Informatik verwendet virtuelle Labore für die Softwareentwicklung und Experimente mit digitaler Technik [Sanchez und Alvarez Garcia 2016, S. 1].

Das Lernen mit virtuellen Laboren für Industrie 4.0-Szenarien profitiert von den virtuellen Anlagendarstellungen durch die horizontale und vertikale Integration aller Unternehmensabläufe in ein CPS. Diese können auf einfachem Weg als virtuelles Labor bereitgestellt werden. Die Verwendung dieser virtuellen Zusammenhänge ermöglicht den Anwendern arbeits- und wirklichkeitsnahe Lernerfahrungen mit individuellen und flexiblen Nutzungsmöglichkeiten, die das informelle Lernen unterstützen. Virtuelle Labore sind ein innovativer Ansatz, Lehre zu individualisieren und zu vervielfältigen. Dabei stellen sie jedoch keinen ganzheitlichen Ersatz für Erfahrungen durch Experimente in der realen Wirklichkeit dar

[Bruchmüller und Haug 2001, S. 205]. Vielmehr lassen sich einige Aufgaben und Problemstellungen gut virtualisieren (standardisierte Prozeduren und Methoden), wohingegen andere Erfahrungen nur im direkten Laborumfeld möglich sind (außerplanmäßige Arbeiten, Laborsicherheit).

2.3.3 Grundlagen der remote Labore

Im Unterschied zu den im vorhergehenden Kapitel vorgestellten virtuellen Laboren basieren remote Labore auf realen Versuchsaufbauten, die über Informations- und Kommunikationstechnik von einem digitalen Endgerät aus, wie z.B. einem Computer, kontrolliert und gesteuert werden können [Bruchmüller und Haug 2001, S. 197; Gomes und Bogosyan 2009, S. 4745]. Für die weitere Beschreibung von remote Laboren ist zunächst die Bedeutung des Wortes „remote“ zu klären. Die heutige, vernetzte Welt überbrückt Distanzen mit Hilfe von Informations- und Kommunikationstechnik. Im technischen Kontext steht der Begriff „remote“ für den Fernzugriff auf etwas, das für gewöhnlich lokal bedient wird [Bruchmüller und Haug 2001, S. 194]. Am Beispiel eines ferngesteuerten Modellfahrzeuges wie z.B. einer Kameradrohne, wird deutlich, was die Vorteile der Fernbedienbarkeit sind. Durch eine Fernbedienung ist es möglich, das kleine Fluggerät ohne einen Piloten an Bord des Fahrzeugs zu steuern. Dies ist über einen geeigneten Kontroller und z.B. auf Basis des übertragenen Videobildes der Kameradrohne möglich. Im deutschen Sprachgebrauch ist der Begriff „remote“ als Bezeichnung des Fernzugriffs vor allem aus dem PC- und Mobilfunkbereich bekannt. Als eine rein deutsche Formulierung dieser Eigenschaft wird hin und wieder der Begriff „teleoperativ“ verwendet. Bedingt durch den starken Einfluss amerikanischer Unternehmen und einer Vielzahl internationaler Nutzer amerikanischer Software-Produkte hat sich der Begriff „remote“ für viele Arten des Fernzugriffs durchgesetzt. Im Unterschied zur lokalen Bedienung vor Ort geht bei der remote Bedienung über große Distanzen die Fähigkeit der direkten sensorischen Wahrnehmung (optisch, akustisch, haptisch) des realen technischen Systems verloren. Immer, wenn das technische System aus dem natürlichen Wahrnehmungsbereich des Nutzers (Bedieners) verschwindet, können die zur Bedienung notwendigen, natürlichen Rückmeldungen nicht mehr in den Prozess der Bedienung eingebunden werden. Die sensorische Wahrnehmung kann auch bei kleinen Abständen zwischen Nutzer und System, z.B. durch einen Sichtschutz oder eine räumliche Trennung, unterbrochen sein. Wird die Interaktion zwischen einem Bediener und einem technischen System über eine größere Distanz oder eine sensorische Barriere hinweg betrachtet, stellt sich die Frage nach den für die remote Bedienung notwendigen Informationen. Für den Informationsaustausch zwischen zwei Orten, egal ob Mensch-Mensch (Bediener-Bediener), Mensch-Maschine (Bediener-Gerät) oder Maschine-Mensch (Gerät-Bediener), sind entsprechende Ein- und Ausgabesysteme notwendig [ebd., S. 199]. Die Kommunikationsform Maschine-Maschine wird meist ohne weitere Aufbereitung übertragen, direkt interpretiert und umgesetzt, vorausgesetzt die Kommunikationsstandards der teilnehmenden Maschinen sind untereinander kompatibel. Für den grundlegenden Informationsaustausch zwischen Bediener und einem remote System wird ein digitales Endgerät als Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS oder HMI), wie z.B. Bildschirm, Tastatur und Maus an einem PC, Laptop, Tablet oder Smartphone benötigt. Das persönliche digitale Endgerät nimmt dann z.B. über das Internet die Verbindung

mit einem entfernten Endgerät auf (siehe hierzu Abbildung 2-16). Zur Umsetzung einer remote Steuerung sind die zur Bedienung notwendigen Informationen und Parameter sorgfältig auszuwählen.

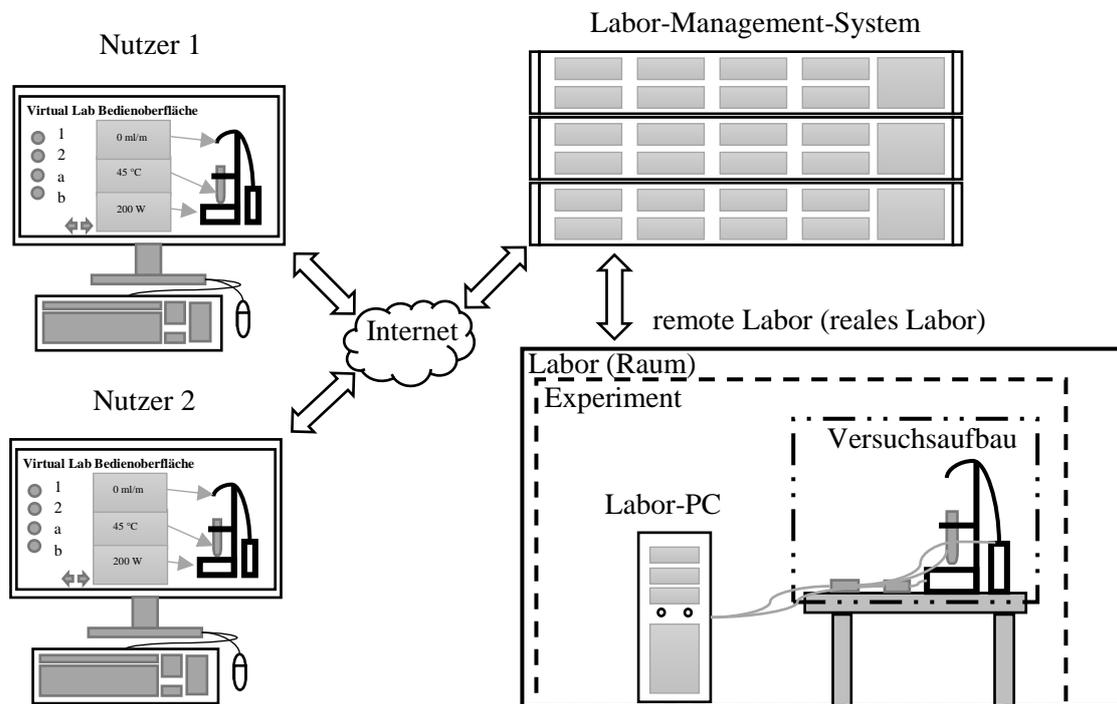


ABBILDUNG 2-16 REMOTE ZUGRIFF AUF EINEN REALEN VERSUCHSAUFBAU ÜBER DAS INTERNET (REMOTE LABOR)

Die kommunikationstechnische Verbindung zwischen einem entfernten Ein- und Ausgabesystem auf der Nutzerseite und einem entfernten technischen System bringt einige Besonderheiten für bestimmte Informationsarten mit sich. Durch die zur Übertragung notwendige Digitalisierung der Informationen für die Bedienung eines remote Systems verliert der Nutzer eine Vielzahl von unterschweligen Eindrücken, die helfen, den Betriebszustand des technischen Systems zu erfassen. Technisch ist es äußerst aufwendig und nur begrenzt sinnvoll, Vibrationen, Gerüche, Hitzeabstrahlung und Geräuschkulissen zu übertragen, die durch den Betrieb einer technischen Anlage entstehen können. Sollen aus sensorischen Eindrücken dieser Art Handlungen abgeleitet werden, muss eine geeignete Form der Digitalisierung und Darstellung gewählt werden. Temperaturen können über Farben, Vibrationen über Animationen oder einzelne Geräusche durch akustische Übertragung vermittelt werden [Bruchmüller und Haug 2001, S. 198]. Neben den sensorischen Besonderheiten ist auch die Reaktionszeit eines realen, ferngesteuerten technischen Systems zu berücksichtigen. Zur Quittierung von Eingaben, deren Ausführung ggf. im Hintergrund verarbeitet wird, hilft eine Darstellung des Betriebszustandes z.B. in Form von Statusbalken oder Statusmeldungen. In der Folge können sonst Probleme durch die Fehlbedienung der Anlage und die Irritation des Nutzers auftreten. Die sorgfältige Auswahl der zu digitalisierenden Betriebsparameter einer technischen Anlage im remote Betrieb sowie die Gestaltung einer geeigneten Benutzeroberfläche für die remote Bedienung ist von großer Bedeutung. Dies ist besonders im Umgang mit einer heterogenen Nutzergruppe in Bezug auf intuitive Bedienbarkeit und Akzeptanz der remote Steuerung zu beachten.

Ein remote Labor unterscheidet sich in wesentlichen Punkten von einem virtuellen Labor. Es stellt eine weitere Sonderform der Laborlehre dar, bei der ein realer Versuchsaufbau und Nutzer räumlich getrennt sind [Gomes und Bogosyan 2009, S. 4745]. Ein realer Versuchsaufbau wird dem Nutzer hierbei durch ein digitales Endgerät, wie z.B. einem Computer, zugänglich gemacht. Der Versuchsaufbau für das remote Experiment steht in einem geeigneten Laborraum, während der Nutzer über das Internet auf das remote Labor zugreift. Durch die Übertragung der Benutzereingaben vom Computer an den Versuchsaufbau entsteht die Möglichkeit, ein Experiment aus der Ferne zu kontrollieren [Bruchmüller und Haug 2001, S. 196]. Dies wird genutzt, um die Ortsbindung an den Laborraum zu lösen, da das Experiment über das Internet von jedem internetfähigen PC durchgeführt werden kann. Die für ein remote Labor verwendeten Gerätschaften müssen über eine Kommunikationsschnittstelle wie z.B. USB, RS232, RS485 oder Ethernet zum Anschluss an einen Labor-PC verfügen [Gomes und Bogosyan 2009, S. 4748]. Eine zunehmende Anzahl an Laborgerätschaften wie Messgeräte, Pumpen, Wagen, Heizplatten, Motoren oder Kameras verfügen, zumindest optional, über eine solche Schnittstelle. Für alle Elemente ohne eine integrierte Schnittstelle (Drucksensoren, Thermoelemente, einfache Schalter, Relais und ähnliches), muss eine passende Schnittstelle zur Kommunikation eingerichtet werden. Die Tatsache, dass Benutzereingaben an einem entfernten Ort eine Reaktion des Versuchsaufbaus an einem anderen Ort hervorrufen, bedingt zudem eine erhöhte Umsicht bei Aufstellung und Betrieb eines realen Versuchsaufbaus als remote Labor. Dies bezieht sich auf den Schutz des Versuchsaufbaus, aber auch auf den Schutz des Laborraums, in dem der Aufbau steht, da dort ggf. Menschen außerhalb des Kontextes von remote Experimenten arbeiten [Bruchmüller und Haug 2001, S. 158].

Die Kopplung an einen realen Versuchsaufbau sorgt für die Notwendigkeit, einen Betriebsmodus festzulegen, über welchen ein remote Labor erreichbar ist. Im einfachsten Fall ist der Zugriff eingeschränkt. Hier kann das remote Labor genutzt werden um, z.B. zu Demonstrationszwecken während einer Lehrveranstaltung ein remote Experiment durchzuführen. In diesem Fall liegt der Zugriff exklusiv beim Vorführenden. Soll ein solches remote Experiment nicht nur von einer Lehrperson vorgeführt, sondern über das Internet einer bestimmten Gruppe (z.B. Hörer einer Vorlesung) oder sogar der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden, muss der Zugriff auf das remote Labor organisiert werden [Frerich et al. 2016, S. 230]. Bei unkoordinierter Mehrfachnutzung können sich gleichzeitig agierende Nutzer, ggf. ohne gegenseitige Wahrnehmung, stören. Für die Koordination der Zugriffe auf individueller oder Gruppenebene wird ein Labor-Management-System benötigt. In Abbildung 2-16 ist ein solches System exemplarisch gezeigt. Der Nutzer greift mit seinem Computer über das Internet auf ein Labor-Management-System zu, welches die Zugriffsrechte und Zugriffszeiten von remote Laboren verwaltet. Die Nutzer können ein remote Labor für einen bestimmten Zeitraum buchen. Für die Dauer des gebuchten Zeitraumes steht dem Nutzer das remote Labor exklusiv zur Verfügung [ebd., S. 231].

Der remote Zugriff auf reale, technische Anlagen ist in einigen Bereichen der Arbeitswelt alltäglich. Das Lernen an remote Laboren eignet sich daher nicht nur für die Betrachtung wissenschaftlicher Phänomene, sondern auch für die Vermittlung praktischer Inhalte mit einer realitätsnahen Abbildung einer

potentiellen Arbeitsumgebung. Für Nutzer ohne Bezug zu alltäglicher remote Steuerung technischer Anlagen empfiehlt sich eine sorgfältige Vorbereitung auf den remote Zugriff sowie ein intuitives Bedienkonzept des remote Labors.

Remote Labore können, ebenso wie virtuelle Labore, als didaktisches Element zur Unterstützung sowohl von präsenzbasierten (Blended Learning oder Flipped Classroom) als auch onlinebasierten Lehrveranstaltungen (Webinar oder Virtual Classroom) eingesetzt werden. Der Vorteil von remote Laboren liegt in der Anbindung an reale, technische Systeme, die beliebig komplexe Zusammenhänge in der natürlichen Wirklichkeit abbilden. Der größte Nachteil liegt in der Exklusivität des Zugriffs auf einen Versuchsaufbau. Ein Labor-Management-System hilft, die Auslastung eines remote Labors zu organisieren. Für den remote Betrieb wird die Ausarbeitung eines geeigneten remote Bedienkonzeptes notwendig. Dieses wird dafür oft an die lokalen Bedienkonzepte angelehnt, um bei einem Wechsel des Bedienmodus, von lokal zu remote oder umgekehrt, einen intuitiven Zugang und auf diese Weise praxis- und arbeitsplatznahes Lernen zu ermöglichen [Universität Bremen 2016, S. 99]. Die Fernsteuerung von technischen Anlagen ist in der Industrie an der Tagesordnung und kommt in der Regel zunächst durch die technische Notwendigkeit der Überbrückung einer räumlichen Trennung zustande. Das Verhalten fernbedienter, realer Anlagen entspricht den jeweiligen physikalischen, elektrischen oder chemischen Zusammenhängen der natürlichen Wirklichkeit. Die Wahrnehmungs- und Kontrollmöglichkeiten dieser Zusammenhänge an einem entfernten Ort werden jedoch durch die Auswahl entsprechender Sensoren und Aktoren beeinflusst. Die auftretenden Fehler, Reproduktionsungenauigkeiten und alle weiteren realen Einflüsse werden, im Gegensatz zum virtuellen Labor, in vollem Umfang dargestellt. Die Möglichkeit, mit individuellen Eingaben eine entfernte Apparatur zu bedienen, stellt eine neue und faszinierende Lernmöglichkeit dar, was sich im Kontext eines Lernszenarios produktiv nutzen lässt. Der vom virtuellen Labor bereits bekannte Vorteil der standortunabhängigen Verfügbarkeit gilt auch für den Remotezugriff auf ein real existierendes Labor.

Remote Labore werden in einigen Bereichen bereits für die Ausbildung und vertiefende Trainings genutzt. Zu diesen Bereichen gehören insbesondere die Disziplinen, in denen die Vernetzung und Internetanbindung technischer Systeme gängige Praxis ist. Die remote Labore ermöglichen dann den praktischen Kompetenzgewinn in den Bereichen der Elektronik und Mikroelektronik, Leistungselektronik und elektrischen Antriebe, Steuerungssysteme und Automation sowie Steuerung von Robotersystemen und der Programmierung eingebetteter Systeme (FPGA) [Gomes und Bogosyan 2009, S. 4752]. Auch der Bereich der Verfahrenstechnik wendet vereinzelt remote Labore zur Vermittlung von praktischen Kompetenzen an. Neben Fragestellungen um die Kontrolle eines Förderprozesses [You 2012, S. 6–11] werden auch Prozesse der Abwasserbehandlung [Frerich et al. 2013, S. 264] behandelt.

Das Lernen mit remote Laboren für Industrie 4.0-Szenarien profitiert von der wirklichkeitstreuher Abbildung beliebig komplexer, individueller, realer Anlagen. Die vorhandenen Kommunikations- und Informationsstrukturen der automatisierten CPS in Industrie 4.0 erlauben das einfache Bereitstellen von

realen Versuchsaufbauten als remote Labor. Durch das reale, auch störungs- und problembehaftete Szenario, können Lernende praxisnahe Kompetenzen erwerben und das remote Labor auf individuelle und flexible Weise auch für das non-formale Lernen nutzen. Auf diese Art wird es möglich, auch hochwertiges oder nur begrenzt verfügbares Equipment einer breiten Nutzerschaft zur Verfügung zu stellen [Bruchmüller und Haug 2001, S. 196]. Das große Einsatzspektrum und die Flexibilität von remote Laboren führen zu neuen Lernformaten. Auf absehbare Zeit ist jedoch nicht mit einer kompletten Verdrängung der formalen Laborlehre zu rechnen. Wahrscheinlicher ist die Kombination von remote Laboren und formaler Laborlehre, da je nach Lernziel die Verwendung eines physischen Versuchsaufbaus für das Training mancher Aspekte unabdingbar ist.

2.4 Das Potential virtueller und remote Labore für die Aus- und Weiterbildung

Die Transformation der Arbeitsorganisation der heutigen Arbeitswelt auf die Industrie 4.0 ist mehr als die Umstrukturierung von Arbeitsabläufen. Um die Mitarbeiter optimal auf die neuen Aufgaben vorzubereiten, sind außerordentliche Weiterbildungsmaßnahmen notwendig. In Zukunft wird der Fokus von Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen auf Anwender- und Prozessschulungen für zunehmend komplexe Produkte und Prozesse liegen. Bei der Einführung komplexer, zusammenhängender Arbeitsprozesse bedarf es der praktischen Erprobung dieser neuen Zusammenhänge für eine individuelle Kompetenzentwicklung der zukünftigen Mitarbeiter. Parallel zur theoriebasierten Aus- und Weiterbildung ergänzen praktische Lernangebote, wie z.B. das Training von Arbeitsabläufen mit virtuellen oder remote Laboren, die Maßnahmen optimal und sorgen für ein besseres Verständnis [ebd., S. 57]. Durch das Training mit virtuellen oder remote Laboren sind Mitarbeiter im realen Umfeld schneller orientiert und können besser reagieren. Virtuelle und remote Labore (VRLs) können daher für die Vorbereitung auf zukünftige Tätigkeiten oder das vertiefende Lernen an produktiv laufenden Prozessen genutzt werden. Die Einarbeitung von Mitarbeitern an technischen Anlagen erfolgt bisher oft in Gruppen oder im laufenden Betrieb (on the job) [Gebhardt et al. 2015, S. 51]. Das Anlernen in Gruppen ist jedoch wenig individuell und birgt das Risiko, den individuellen Anforderungen einer heterogenen Gruppe nicht gerecht zu werden. Schulungsanlagen innerhalb des produktiven Betriebs sind wenig flexibel, da womöglich nicht alle notwendigen Arbeitsschritte und Verfahren trainiert werden können. Möglich ist die Einrichtung von eigenständigen Übungs- und Trainingsanlagen oder die Verwendung von Pilotanlagen als remote Labor. Der Maßstab eines remote Labors, seine Auslastung, aber auch die damit einhergehenden Kosten, sind wesentliche Punkte, die bei der Bereitstellung für ein Aus- und Weiterbildungsszenario berücksichtigt werden müssen. Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen mit virtuellen und remote Laboren können die Auslastung realer Trainingsanlagen durch ein Labor-Management-System optimieren und ggf. bestehende eLearning-Konzepte um die Möglichkeiten des individuellen, praktischen Kompetenzaufbaus erweitern [Bruchmüller und Haug 2001, S. 196].

Die Vermittlung praktischer Erfahrungen in den Ingenieurwissenschaften der deutschen Hochschulen geschieht über verschiedene Elemente. Neben mehrwöchigen Fachpraktika in der Berufswelt greifen

vor allem die Ingenieur- und Naturwissenschaften auf Veranstaltungen wie z.B. Laborpraktika zurück. Die Ziele solcher Laborpraktika können neben dem Begreifen fachlicher Phänomene auch das Erlernen des wissenschaftlichen Arbeitens unter Laborbedingungen sein [Bruchmüller und Haug 2001, S. 59–60]. Die Teilnehmer solcher Laborpraktika sind dann für gewöhnlich Studierende der jeweiligen Hochschulen. Eine der Herausforderung bei einem solchen Angebot liegt, je nach Studiengang, in der Bewältigung großer Gruppen und dem damit einhergehenden organisatorischen Aufwand. Der Erstsemesterjahrgang Maschinenbau der Ruhr-Universität Bochum bestand im Wintersemester 2016/2017 aus 517 Studierenden [RUB Dez. 1 2016]. Das praktische Arbeiten im Laborumfeld ist hier erst im dritten Fachsemester des Bachelor-Studienganges [RUB Fak. MB 2016a, S. 3] und später für die ersten beiden Mastersemester im jeweiligen Studienplan vorgesehen [RUB Fak. MB 2016b, S. 1]. Die entsprechenden Laborpraktika werden für gewöhnlich in Kleingruppen mit etwa drei bis fünf Teilnehmern durchgeführt. Der individuelle Lernerfolg und das Gesamterlebnis der Laborveranstaltungen hängen jedoch stark von der Größe und der Zusammensetzung der Gruppe ab [Bruchmüller und Haug 2001, S. 59]. Aufgrund der möglichen Diversität einer Laborgruppe besteht immer das Risiko, dass einzelne Teilnehmer bevorzugt oder benachteiligt werden [eBusiness-Lotse Mecklenburg-Vorpommern 2015, S. 13–14]. Der grundlegende Ablauf eines beispielhaften Praktikumsversuchs (IL-LL-PL, siehe Kapitel 2.3.1) ist in verschiedene Phasen gegliedert: Versuchsvorbereitung, Reflexionsgespräch, Durchführung, Auswertung und Ergebnispräsentation. Unter der Annahme, es handele sich um einen Praktikumsversuch, der ein fachliches Phänomen vermitteln soll, stellt die Durchführungsphase eine besondere Herausforderung dar. Aufgrund endlicher Ressourcen der Hochschule steht nur in den seltensten Fällen jedem Gruppenmitglied ein eigener experimenteller Aufbau zur Verfügung. Vielmehr werden die Aufgaben zur Handhabung eines solchen Aufbaus über die Gruppe verteilt. Der Kompetenzerwerb der einzelnen Teilnehmer ist somit stark von seiner Beteiligung an den praktischen Handlungen abhängig, was die Gruppengröße für klassische Hands-on-Labore begrenzt.

Die Unterschiede in der Vermittlung von praktischer Kompetenz im Betrieb oder an der Hochschule liegen in den jeweiligen Rahmenbedingungen. Betriebliche Aus- und Weiterbildung versucht auf allen Ebenen möglichst viele Elemente aus der Unternehmenswelt zu übernehmen. Dies betrifft das organisatorische Vorgehen, die inhaltliche Gestaltung und das Szenario, in dem die Inhalte vermittelt werden [Bruchmüller und Haug 2001, S. 80]. Lernangebote von Hochschulen haben den Anspruch, eine wissenschaftliche Arbeitsweise zu vermitteln, sehen sich aber auch mit der Forderung durch die Industrie nach praxisnah ausgebildeten Absolventen konfrontiert.

Die Anwendung von VRLs für die betriebliche Aus- und Weiterbildung hat auch monetäre Auswirkungen. Kurzfristig wird durch Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen mit VRLs der Ausfall von Arbeitsleistung während der Lern- und Vorbereitungsphasen minimiert [Institut für Erziehungswissenschaft 2015, S. 29]. Durch die Berücksichtigung der Heterogenität der Mitarbeiter bei der Einrichtung eines VRL-Lernangebots profitiert ein Unternehmen auch langfristig. Das individuelle und flexible Lernen mit einem VRL-Laborangebot begünstigt den Lernerfolg jedes einzelnen Mitarbeiters und steigert

somit die Effektivität des Aus- und Weiterbildungsangebotes, was letztendlich auch die Innovationsfähigkeit des Unternehmens verbessert [Botthof und Hartmann 2015, S. 15–16]. Letzteres ist besonders in den neuen Geschäftsfeldern der Industrie 4.0 wichtig, um an den sich rasch verändernden oder neu entstehenden Märkten bestehen zu können.

Die Motivation für VRL-basierte, praktische Lernangebote an der Hochschule ist weniger monetär geprägt, sondern lässt sich eher mit dem Ziel einer möglichst intensiven Auseinandersetzung mit den fachlichen Phänomenen in den Disziplinen der Lernenden verbinden [Bruchmüller und Haug 2001, S. 80]. Die Individualisierung und Personalisierung der Lernangebote bedient auch hier eine sehr heterogene Gruppe Lernender, die das mittelfristige Ziel verfolgt, einen akademischen Abschluss zu erlangen [ebd., S. 45]. Lernangebote mit VRLs, wie z.B. das VRL-Angebot des Projekts „Exzellentes Lehren und Lernen in den Ingenieurwissenschaften“ an der Ruhr-Universität Bochum, stellen im universitären Umfeld noch immer eine Ausnahme dar [Frerich et al. 2016, S. 229]. Dies liegt unter anderem an dem damit einhergehenden Aufwand und oftmals auch an dem Fehlen konsequenter eLearning-Strategien an vielen Hochschulen. Um hier eine wirksame und nachhaltige Veränderung zu etablieren, bedarf es vorausschauender Planung und einer interdisziplinären Zusammenarbeit bei der Einrichtung und dem Betrieb von VRL-Lernangeboten.

Unabhängig seines Anwendungsbereiches (Industrie oder Hochschule) ist der flexible und individuelle Einsatz von VRLs förderlich für das individuelle Lernergebnis. Die Voraussetzung hierfür ist ein gut ausbalanciertes Lernangebot, welches weder zu schwierig noch zu einfach gestaltet ist [MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung 2011, S. 16]. Die Einstellung dieser Balance wird zum Teil über die Intensität und die Art der Vorbereitungsphase gesteuert und den Nutzern durch integrierte Tests individuell reflektiert. Die Abschaffung der Ortsbindung ergibt zusammen mit der zeitlichen Flexibilität der Nutzung eines VRL-Lernangebotes ein personalisierbares Lernerlebnis, welches sich den individuellen Anforderungen der Nutzer anpassen lässt [Bruchmüller und Haug 2001, S. 186].

Die vorhergehenden Absätze erläutern, wie VRLs sowohl zur betrieblichen als auch zur universitären Aus- und Weiterbildung eingesetzt werden können. Sowohl Hochschullehre als auch verantwortliche Personen betrieblicher Weiterbildungsmaßnahmen stellen sich einer zunehmend heterogenen Nutzergruppe. Gleichzeitig steigen die betrieblichen Anforderungen an die individuelle Leistungsfähigkeit der Arbeitnehmer [Pfeifer et al. 2016, S. 15]. Klassische Lehr- und Lernmethoden stellen sich diesem Wandel auf vielfältige Art und Weise, z.B. durch die Einrichtung von Blended Learning, Virtual Classrooms oder Inverted Classroom Veranstaltungen. Die Verwendung von VRLs in Kombination mit diesen Veranstaltungsformaten ist eine mögliche Antwort auf die sich verändernden Anforderungen.

3 Das Lehren und Lernen mit virtuellen und remote Laboren

Die Bereitstellung von remote Laboren für Lehr- und Lernzwecke ist ein fortwährender Prozess und erfordert das reibungsfreie Ineinandergreifen von Mensch, Organisation und Technik [Botthof und Hartmann 2015, S. 11]. Mit dem Ziel, den Menschen auch nach der vierten industriellen Revolution als wesentlichen Bestandteil von Arbeits- und Produktionsprozessen zu positionieren, müssen die klassischen Formen der Aus- und Weiterbildung angepasst werden. Dies gilt für alle Bildungsbereiche, ganz gleich ob in Schulen, Universitäten, Betrieben oder externen Weiterbildungseinrichtungen [Gebhardt et al. 2015, S. 47].

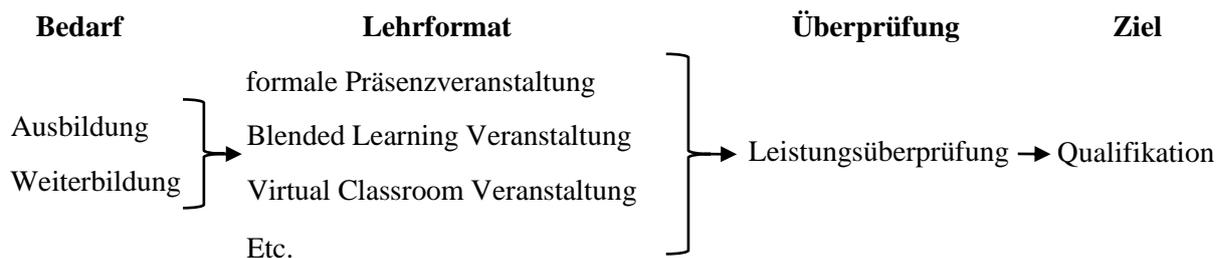


ABBILDUNG 3-1 BEISPIELHAFTER ABLAUF VON AUS- UND WEITERBILDUNGSMAßNAHMEN

In Abbildung 3-1 ist der Ablauf eines beispielhaften Bildungsprozesses, unabhängig von einer Bildungseinrichtung, dargestellt. Dem grundsätzlichen Bedarf nach qualifizierten Mitarbeitern wird mit entsprechenden Aus- und Weiterbildungsformaten begegnet. Um das Qualifikationsziel zu erreichen, bedarf es eines geeigneten Lehrformats und einer abschließenden Leistungsüberprüfung. Für die Lehrformate zur Vermittlung theoretischer Inhalte sind verschiedene Szenarien möglich. Denkbar sind beispielsweise klassische Präsenzveranstaltungen im formalen Rahmen, Blended Learning Veranstaltungen mit non-formalen Anteilen oder auch vollständig virtuelle Lehrveranstaltungen im Virtual Classroom. Besonders bei technischen Themen profitieren die Lernenden von der Vernetzung theoretischer Inhalte mit der Möglichkeit, praktische Erfahrungen zu sammeln [Bruchmüller und Haug 2001, S. 48]. Die in Abbildung 3-1 beispielhaft genannten Lehrformate können durch den Einsatz von VRLs um das flexible und individuelle Erleben von praxisnahen Erfahrungen erweitert werden.

3.1 Der VRL-Lernprozess

Das zentrale Element eines VRL-Lernangebots sind ein oder mehrere geeignete Labore. Die Nutzung eines VRLs ist jedoch nur ein Teil des praktischen Lernens. Um das Selbstlernen mit VRLs zu ermöglichen, ist ein eLearning-Konzept notwendig, welches Vor- und Nachbereitung der Labornutzung durch digitale Medien begleitet. Die Einrichtung eines solchen eLearning-tauglichen Laborkonzepts ist kein final terminiertes Projekt, sondern vielmehr ein Prozess, welcher zu unterschiedlichen Zeitpunkten ein unterschiedliches Maß an Aufmerksamkeit, Arbeitsleistung und finanzieller Zuwendung bedarf. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte VRL-Lernkonzept ist Teil eines BMBF Projekts zur Verbesserung des Lehrens und Lernens in den Ingenieurwissenschaften. Die Aufgabe ist es, den freien und flexiblen

Zugriff auf onlinefähige VRLs für Lehrende und Lernende durch die Bündelung verschiedener Technologien und Konzepte zu ermöglichen. Der aus dieser Aufgabenstellung resultierende, neuartige Lernprozess erfüllt alle durch die Industrie 4.0 geforderten Kriterien und ist das Ergebnis einer sukzessiven Näherung an die gestellten Anforderungen [Kruse et al. 2016, S. 470].

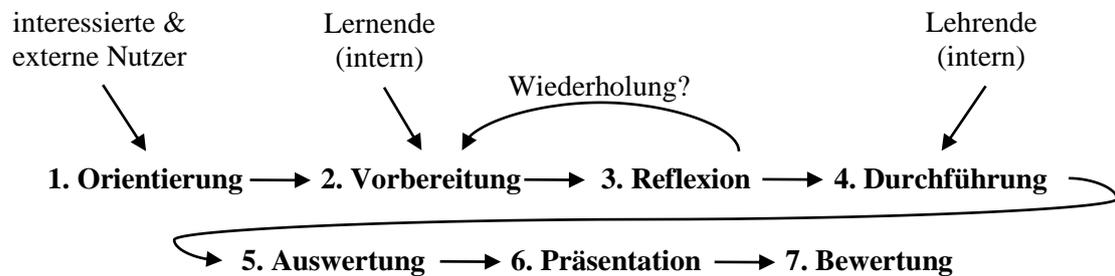


ABBILDUNG 3-2 DARSTELLUNG DES VRL-LERNPROZESSES ZUR BEGLEITUNG DER NUTZUNG VON VRLS

Aus technischer Sicht ist die Realisierung eines virtuellen Labors oder die Einrichtung eines realen, technischen Aufbaus mit Remotezugriff die vielleicht größte Herausforderung. Die Aufgabe geht jedoch über die bloße Bereitstellung von VRLs hinaus. Neben der Frage nach der Zielsetzung bei der Nutzung von VRL-Ressourcen müssen auch didaktische und organisatorische Aspekte des neuen eLearning-Konzepts berücksichtigt werden. Die Gestaltung eines solchen begleitenden eLearning-Konzepts ist von gleicher Wichtigkeit wie die technische Bereitstellung der VRLs. Die Einbettung der VRLs in eine begleitende Umgebung zur Vor- und Nachbereitung von Laborversuchen mit digitalen Medien steht vor der Aufgabe, die benötigten didaktischen Elemente mit geeigneten Softwaretools umzusetzen [Terkowski et al. 2011, S. 494]. Das für eine VRL-Begleitung notwendige eLearning-Konzept lässt sich in einzelne Phasen, gemäß Abbildung 3-2, einteilen. Hierbei haben die Phasen jeweils eine klare Zielsetzung, deren Erreichung mit einer Bandbreite digitaler Tools und eLearning-Methoden angestrebt wird. Allgemein gilt es, die Diversität der Nutzerschaft zu berücksichtigen und somit den flexiblen und individuellen Zugang zum VRL-Lernprozess zu ermöglichen. Diese Diversität drückt sich beispielsweise in verschiedener Motivation, variierendem Hintergrundwissen oder unterschiedlicher VRL-Affinität der einzelnen Nutzer aus. Dies gilt sowohl für Lernende, die VRLs im Selbststudium nutzen, als auch für Lehrende die VRLs zur Demonstration in Vorlesung anwenden und insbesondere für externe interessierte Nutzer.

3.1.1 Orientierungsphase

Durch die Anbindung von virtuellen Laborumgebungen und remotefähigen Versuchsaufbauten an das Internet sind VRLs einer Bildungseinrichtung von überall aufrufbar. Durch diese Offenheit des VRL-Angebots muss die Vielfältigkeit der potentiellen Nutzerschaft besonders berücksichtigt werden. Die Orientierungsphase dient allen Nutzern als Ausgangspunkt um das gesamte VRL-Angebot zu überblicken. Hierzu wird zwischen internen und externen Nutzern unterschieden. Weiterhin wird die Nutzerschaft über ihre Intention bei der Nutzung der VRLs in die Gruppen Lernende, Lehrende und Interessierte unterteilt.

Die zur Bildungseinrichtung zugeordneten Lernenden werden als interne Nutzer betrachtet. Der gezielte Aufbau praktischer Kompetenzen durch das Arbeiten in VRLs gelingt durch die Integration der VRLs in den Lernprozess der Nutzer. Die Verwendung des VRL-Angebots ist für diese Gruppe dann durch das Curriculum vorgegeben. Die VRLs sind entweder Teil einer Lehrveranstaltung oder bilden eine eigenständige Laborveranstaltung wie z.B. ein Laborpraktikum. Werden im Rahmen dieser beiden Veranstaltungen keine speziellen VRLs vorgegeben, dient die Orientierungsphase zur Auswahl eines VRLs das den Anforderungen der jeweiligen Lernveranstaltung entspricht. Externe Lernende nutzen die Orientierungsphase des VRL-Angebots als Angehörige einer anderen Bildungseinrichtung im gleichen Rahmen wie die internen Lernenden.

Die der Bildungseinrichtung angehörige Lehrende werden als interne Nutzer betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Gruppe das Potential und die Funktionsweise des VRL-Angebotes bekannt sind. Durch die Integration von VRLs in die eigenen Lehrveranstaltungen wird das Lernerlebnis des Veranstaltungsformates um praxisnahe Inhalte erweitert. Die VRLs dienen dann der Demonstration (als IL) durch den Lehrenden oder werden den Lernenden als Aufgaben zur individuellen Vertiefung (als LL oder PL) aufgetragen (siehe Kapitel 2.3.1). Die Orientierungsphase wird in diesen beiden Fällen übersprungen (siehe Abbildung 3-2). Lehrende anderer Bildungseinrichtungen werden als externe Nutzer betrachtet. Ihre Intention ist vergleichbar mit den internen Lehrenden, das Hintergrundwissen zum VRL-Angebot ist hier jedoch deutlich geringer. Die Orientierungsphase dient dieser Nutzergruppe als Ausblick auf das Potential und die Vielfalt der Einsatzmöglichkeiten des VRL-Angebots für die Integration in die eigene Lehrveranstaltung.

Die hohe Verfügbarkeit und die Flexibilität beim Zugriff erlauben die Öffnung des VRL-Angebotes auch für eine interessierte Öffentlichkeit. Als Interessierte Nutzer werden alle Personen betrachtet, welche unabhängig der Zugehörigkeit zu einer Bildungseinrichtung Interesse an der Nutzung des VRL-Angebotes haben. Der Zugriff von interessierten Personen (siehe Abbildung 3-2) ist intrinsisch motiviert und dient der Befriedigung der persönlichen Neugierde durch das Experimentieren mit den VRLs. Angebote in diesem Format werden als „Walk in Laboratory“ [Bruchmüller und Haug 2001, S. 96], Lern Fabrik [Universität Bremen 2016, S. 99] oder im praktischen, handwerklichen Umfeld auch Maker Space bezeichnet. Interessierten Nutzern dient die Orientierungsphase ebenfalls als Möglichkeit, das Potential und die Vielfalt des VRL-Angebots für die individuelle Nutzung zu entdecken.

Für den allgemeinen Eintritt in die Orientierungsphase und somit den Zugang zum VRL-Angebot ist eine zentrale Zugriffsmöglichkeit vorteilhaft [Kruse et al. 2016, S. 470]. Unter der Adresse www.elliab-library.de (ELL) ist neben der Erklärung zum Projekt und der Erläuterung der Rahmenbedingungen des VRL-Angebotes auch jedes VRL mit einem Steckbrief, einem Foto und einer Kurzbeschreibung in einem Katalog aufgeführt. Für Nutzer, welche die Orientierungsphase und Vorbereitungsphase überspringen wollen, ist die direkte Buchung der VRLs möglich.

In der ersten Phase des VRL-Lernprozess bietet die zentrale Webseite ELL einen Überblick über das Angebot, die Anforderungen und den Ablauf der einzelnen VRL-Lerneinheit. Die Betreiber eines VRLs können auf dieser Webseite die für ihr VRL notwendige Dokumentation sowie zusätzliches Material für die Phasen der Vor- oder Nachbereitung bereitstellen. An dieser Stelle könnte alternativ zu einer Webseite auch ein bestehendes LMS genutzt werden, es gibt dabei jedoch einige Herausforderungen. An dieser Stelle wird zunächst auf ein LMS oder die Anbindung an selbiges verzichtet, da dies die klassischen Strukturen von Lehrveranstaltungen abbildet. Durch die Verwendung einer LMS unabhängigen Webseitentechnologie können alle Elemente des VRL-Lernprozesses möglichst nahtlos zusammengefügt werden. Für die Gestaltung komplett neuer Lehr- und Lernkonzepte und die Integration der notwendigen Technologie ist die zentrale Administration eines LMS zunächst hinderlich. Die Administration der zentralen Webseite ELL liegt hier in der Hand der VRL-Anbieter. Dies führt einerseits zu größtmöglicher Flexibilität bei der Gestaltung des Angebots, bringt aber auch die Verantwortung für Wartung und Betrieb der Internetseite mit sich.

Die Webseite ELL als zentrale VRL-Plattform ist auf Basis des frei verfügbaren Content Management Systems (CMS) Joomla entstanden [Steyer 2015, S. 3] und wird auf einem deutschen Webseiten-Hosting-Service betrieben. Dies sichert den freien und einfachen Zugang zu Updates und Erweiterungsmodulen, welche durch eine Open Source Community gepflegt werden. Die optische Anpassung an das ELLI-Projektdesign geschieht mit Hilfe von Cascade Style Sheets (CSS).

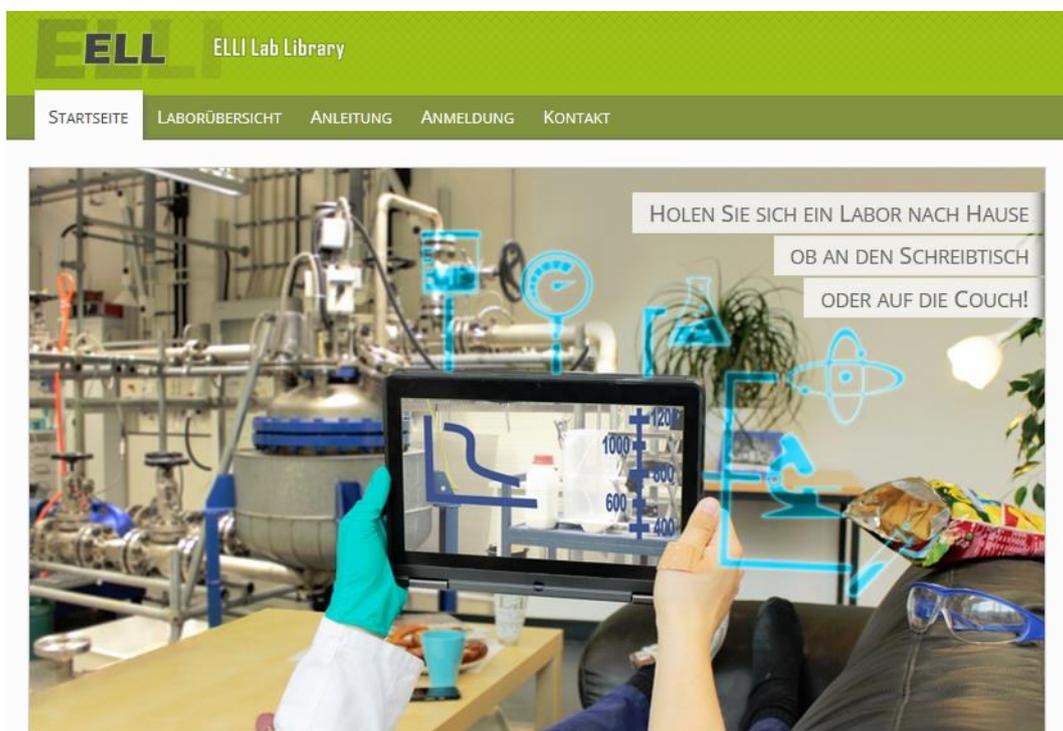


ABBILDUNG 3-3 STARTSEITE DER ELLI LAB LIBRARY ZUR ORIENTIERUNG IM VRL-ANGEBOT DES ELLI PROJEKTS [ELLI 2017]

Diese Technologie passt das Design der Webseite an das anzeigende Endgerät an und erlaubt so den komfortablen Zugriff von einer Vielzahl unterschiedlicher Endgeräte wie PCs, Tablets oder Handys

[Steyer 2015, S. 27–28]. Die Menüleiste im oberen Bereich der Internetseite ermöglicht den direkten Zugriff auf die für VRL-Nutzer interessanten Bereiche der Webseite (siehe Abbildung 3-3). Nach dem Einstieg über die Startseite und den Erläuterungen zum Projekte ruft der Nutzer den VRL-Katalog über den Menüpunkt „Laborübersicht“ auf. Hier werden alle verfügbaren Labore aufgelistet und grob kategorisiert (siehe Abbildung 3-4).

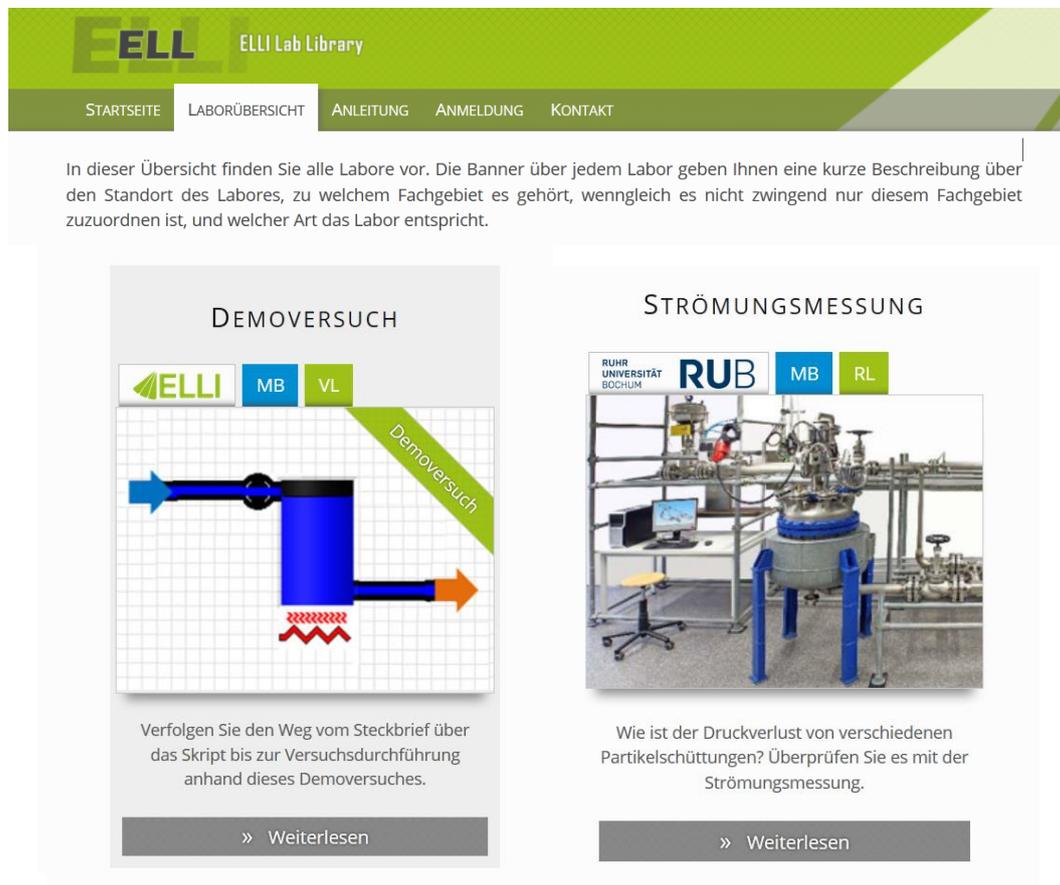


ABBILDUNG 3-4 ZENTRALE WEBSEITE ZUR ORIENTIERUNG IM VRL-LERNPROZESS MIT DEN ERSTEN BEIDEN LABORE DES KATALOGS [ELLI 2017]

Der Klick auf die Schaltfläche „Weiterlesen“ unter dem jeweiligen Labor öffnet den zugehörigen Laborsteckbrief. Dieser Steckbrief enthält die zur individuellen Einschätzung des Versuchs notwendigen Informationen. Hier werden Möglichkeiten und Ziele, aber auch Voraussetzungen und Einschränkungen des jeweiligen Labors erläutert. Bei Rückfragen wendet sich der Nutzer an den ebenfalls im Steckbrief aufgeführten und verantwortlichen Laborbetreiber. Der Menüpunkt „Anleitung“ führt in das zur VRL-Nutzung notwendige Browser Plug-in ein und erläutert das weitere Vorgehen für die Reservierung eines VRLs. Für Personen, die keine Orientierung oder Vorbereitung benötigen, führt der Menüpunkt „Anmeldung“ direkt zum Labor-Management-System iLab, über welches sich Nutzer ein VRL individuell reservieren können.

Neben der organisatorischen Funktion ist die Plattform auch das technische Grundgerüst für einige weitere Elemente des VRL-Lernprozess. Zusätzlich zu der Webseitenoberfläche für die Nutzer des VRL-Lernangebotes stellt ELLI, neben dem Bereich für die allgemeine Administration der Webseite, auch

einen Bereich für die Betreiber der VRLs zur Verfügung. In diesem Bereich ist jeder VRL-Betreiber in der Lage, die Darstellung und Dokumentation seiner Ressource auf dem aktuellen Stand zu halten und der jeweiligen VRL-Konfiguration anzupassen [Steyer 2015, S. 75].

3.1.2 Vorbereitungsphase

Bevor ein VRL für den persönlichen Kompetenzerwerb genutzt wird, benötigen die lernenden Nutzer eine individuelle Vorbereitung [Bruchmüller und Haug 2001, S. 155–156]. Neben der fachlichen und inhaltlichen Vorbereitung auf ein Experiment im VRL ist ggf. auch eine Einführung in die verwendete VRL-Technologie und deren Bedienung notwendig [MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung 2011, S. 16]. Eine reibungsfreie Durchführung von Experimenten in einem VRL erhöht die Akzeptanz des Lernkonzepts und ermöglicht einen optimalen Kompetenzerwerb der Nutzer. Dies gilt ggf. auch für lehrende Nutzer, ist hier aber vom fachlichen Hintergrund der Dozierenden abhängig. In der Vorbereitungsphase erarbeiten die Nutzer die ersten zwei Experimentierphasen nach Haug (siehe Kapitel 2.3.1) mit digitalen Medien. Hierzu zählen das Erfassen der Problemstellung und die Bildung einer oder mehrerer Hypothesen auf Basis der bereitgestellten VRL-Dokumentation. Es ist zu beachten, dass die Phasen des VRL-Lernprozesses i.d.R. nicht synchron durch einen Betreuer begleitet werden. Die Nutzer sind hier also auf sich selbst gestellt und müssen in der Lage sein, eventuell auftretende Probleme selbstständig zu lösen. Durch eine klare Problemstellung für jedes VRL und eine gut ausgearbeitete Vorbereitungsphase wird die Anzahl der Probleme in den nachfolgenden Phasen bereits im Vorfeld reduziert [Bruchmüller und Haug 2001, S. 208].

Durch Einbindung von VRLs in bestehende Lehrveranstaltungen können die zur Durchführung notwendigen Inhalte komplett oder in Teilen im Rahmen dieser Veranstaltung vermittelt werden [ebd., S. 48]. In diesem Fall wird durch den Verlauf und die Ausrichtung der Lehrveranstaltung von einem einigermaßen homogenen fachlichen Wissensstand ausgegangen. Alle anderen Nutzer stellen eine weniger homogene Gruppe, in Bezug auf Motivation, Hintergrundwissen und VRL-Affinität, dar. Die Aufbereitung des Wissens für diese Zielgruppe muss flexibel und individuell erfolgen. Die grundlegenden Inhalte der Vorbereitungsphase sind in Tabelle 3-1 in die inhaltliche und organisatorische Ebene unterteilt. Die Informationen der organisatorischen Ebene müssen übersichtlich und einfach zugänglich dargestellt werden. Um die notwendigen Schritte und alle Phasen des VRL-Lernprozesses zu vermitteln eignet sich die Kombination aus einer Übersichtsgrafik und einer entsprechenden Beschreibung. Durch die Verwendung eines zusätzlichen Videoclips zur Erläuterung, wird hier ein alternativer Zugang zur Erklärung des VRL-Lernprozesses bereitgestellt.

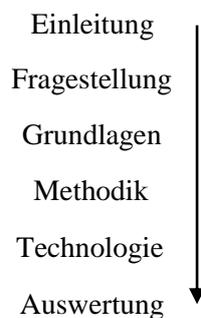
TABELLE 3-1 INHALTE DER VORBEREITUNGSPHASE DES VRL-LERNPROZESSES

organisatorische Ebene	inhaltliche Ebene
<ul style="list-style-type: none"> • Ablauf des VRL-Lernprozesses • Hinweise zu den einzelnen Phasen • Ansprechpartner bei technischen Fragen • Ansprechpartner bei inhaltlichen Fragen • Rahmenbedingungen des Lernprozesse 	<ul style="list-style-type: none"> • Das Lernziel • Die Frage- oder Problemstellung • Die theoretischen Grundlagen • Die Hintergrundinformationen • Die mögliche Methodik • Die verwendete Technologien • Die Hinweise zur Auswertung

Für den bestmöglichen Kompetenzgewinn aus der Kombination des theoretischen Wissens und der praktischen Erfahrung im VRL gilt es, eine für jeden Nutzer möglichst individuelle Vorbereitung anzubieten. Die digitale Natur des VRL-Lernprozesses erlaubt die Verwendung einer großen Bandbreite an Medien. Eine individuelle Vorbereitung erlaubt dem Nutzer das Tempo, die Reihenfolge und die Häufigkeit der Wissens Elemente selbst zu bestimmen. Die Verwendung alternativer Darstellungen oder Beschreibungen des gleichen Sachverhaltes erlauben dem Nutzer, die für ihn geeignetste Darstellung zur Vorbereitung zur verwenden. Im Folgenden werden beispielhaft drei Möglichkeiten der inhaltlichen Vorbereitung vorgestellt.

a.)

Skript oder WBT (linear)



b.)

WBT oder Wiki (dynamisch)

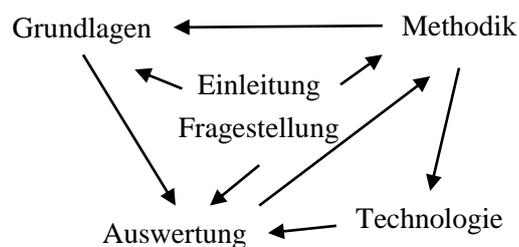


ABBILDUNG 3-5 IN GRAFIK A.) IST DIE DARSTELLUNG EINER LINEAREN VERSUCHSVORBEREITUNG (WIE Z.B. EIN PDF SKRIPT) ZU SEHEN, IN GRAFIK B.) IST EINE DYNAMISCHEN VERSUCHSVORBEREITUNG (Z.B. WIKI ODER DYNAMISCHES WBT) ABGEBILDET

In der einfachsten Variante der Vorbereitung steht den Nutzern ein linear strukturiertes Textdokument zur Verfügung, so wie es aus klassischen Präsenz- oder Laborveranstaltungen bekannt ist. In Grafik a.) von Abbildung 3-5 ist der typische Aufbau eines Textdokumentes (wie z.B. PDF) zur Versuchsvorbereitung zu sehen. Die Darstellung der Inhalte ist hier auf die Verwendung von Texten und Abbildungen beschränkt. Durch die Verwendung von Internetlinks können weitere, ggf. auch interaktive, Inhalte bereitgestellt werden. Internetlinks auf externe Angebote sind jedoch selten speziell für die Verwendung

im VRL-Lernprozess optimiert und werden in einem zusätzlichen Programmfenster angezeigt. Hierdurch wird eine weitere Ebene in das ohnehin schon vielschichtige VRL-Angebot einbezogen, was organisatorisch und methodisch berücksichtigt werden muss. Im Allgemeinen sind Textdokumente für die Vorbereitung konventioneller Präsenzveranstaltungen oder klassischer Präsenzlaborveranstaltungen jedoch etabliert.

Durch Verwendung von digitalen Endgeräten im VRL-Lernprozess kann eine dokumentbasierte Versuchsvorbereitung durch passende Tools (z.B. H5P in Moodle) in ein multimediales, interaktives Vorbereitungsangebot transformiert werden [Bruchmüller und Haug 2001, S. 182–183]. Selbst wenn die Vorbereitung auf der inhaltlichen Ebene auch weiterhin primär auf geschriebenen Text (HTML) zurückgreift und sich an dem Konzept eines linearen WBT (siehe Kapitel 2.2.3 bzw. Grafik a.) in Abbildung 3-5) orientiert, können eingebettete Animationen, Videos und Tonaufnahmen ein besseres Verständnis ermöglichen. Die Webseite der ELLI Lab Library unterstützt die Einbindung von Medien wie Audio- und Videodateien, HTML5 Inhalten, Flash oder Java-Animationen, sowie eine Vielzahl weiterer Formate für die interaktive Darstellung. Verglichen mit den statischen Elementen eines linearen PDF-Skriptes werden auf diese Weise die Möglichkeiten des Erfassens der Inhalte erweitert [Stocker und Tochtermann 2012, S. 51]. In diesem Fall handelt es sich zwar um eine interaktive Vermittlung von Inhalten, die jedoch noch immer einem strukturierten, meist linearen Ablauf folgt [Bruchmüller und Haug 2001, S. 93].

Mit der dynamischen Struktur eines Wikis in Kombination mit interaktiven Elementen wird ein noch individuellerer Zugang zu den fachlichen Inhalten erreicht [Fraas et al. 2012, S. 27]. Mit einem Wiki ist es möglich, statische und textbasierte Informationen mit dynamischen, interaktiven Inhalten in Wiki-Artikeln zu verknüpfen [Stocker und Tochtermann 2012, S. 49]. Wie Inhalte zur Vorbereitung in diesem Konzept individuell erarbeitet werden können zeigt Grafik b.) in Abbildung 3-5. Die fachlichen Inhalte eines VRL-Experimentes werden hier über die Verlinkung der einzelnen Schlagwörter und Artikel erforschbar (siehe Abbildung 3-6).

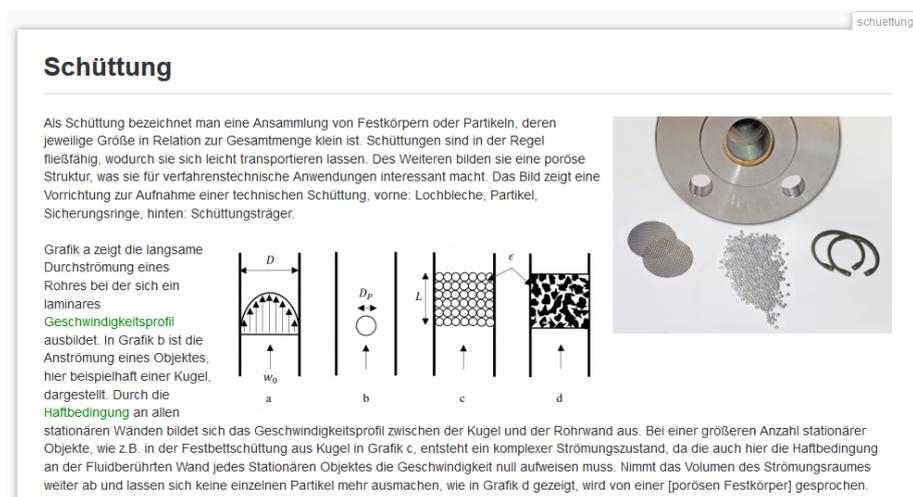


ABBILDUNG 3-6 THEORETISCHE GRUNDLAGEN ZUM THEMENBEREICH FESTBETTSCHÜTTUNGEN IN EINEM WIKI

Durch die Verlinkungen und Querverweise in den einzelnen Themen kann der Nutzer sich individuell durch die zum Lernziel passenden Artikel lesen und selbst entscheiden, ob er einen Artikel komplett liest, oder die Thematik bereits beherrscht.

Jede der drei vorgestellten Vorbereitungsmethoden (PDF, statisches WBT, dynamisches WBT bzw. Wiki) hat Vor- und Nachteile. Zwar erlaubt der interaktive WBT-Ansatz die Verwendung dynamischer Elemente (Audio, Video, Animation), was eine aktivierende Wirkung entfaltet, jedoch besteht bei linearen WBTs das Problem des immer gleichen Ablaufs der Vorbereitung. Die nichtlineare Versuchsvorbereitung durch ein dynamisches WBT oder ein Wiki kann für unterschiedliche Nutzer den individuellen Zugang zum notwendigen Wissen darstellen. Bei der nichtlinearen Vorbereitung ist zu beachten, dass die Vollständigkeit der Vorbereitung sichergestellt werden muss. Ohne die Möglichkeit der Diskussion mit anderen Teilnehmern ist es möglich, dass es bei der Verwendung statischer Vorbereitung zu Motivations- oder Verständnisproblemen kommt. Die starre Struktur und der wenig aktivierende Konsum einer solch linearen Laborvorbereitung funktionieren eher in der klassischen, gruppenbasierten Laborlehre, was jedoch nicht zuletzt auch an der Gruppendynamik solcher Laborveranstaltungen liegt. Der VRL-Lernprozess ist jedoch ein individueller Lernprozess mit dem Ziel, durch die bestmögliche, individuelle Vorbereitung den maximalen, persönlichen Kompetenzgewinn zu ermöglichen.

3.1.3 Reflexionsphase

Die interaktiven Elemente der VRL-Vorbereitungsphase wie die Verwendung des Wikis oder eines WBTs ermöglichen zwar einen individuellen Zugang zum Wissen, bringen aber auch neue Herausforderungen mit sich. Vor dem Eintritt in die Durchführungsphase des VRL-Lernprozesses, in welcher ein Experiment genutzt werden soll um die aufgestellten Hypothesen zu überprüfen, muss ein ausreichendes Maß an Vorbereitung sichergestellt werden. Dies dient sowohl den lernenden Nutzern zur Selbstkontrolle als auch dem Lehrenden als Rückmeldung über die Leistung der Nutzer sowie dem VRL-Anbieter als Möglichkeit, eine Einstiegshürde für die Durchführungsphase einzurichten. Lernende können den Umfang des notwendigen fachlichen Hintergrunds anhand des Umfangs eines klassisch zur Verfügung gestellten Textdokuments meist quantitativ abschätzen. Im Fall des klassischen Präsenzlabors prüft zudem eine Betreuungsperson im Labor die ausreichende Vorbereitung der Lernenden mit einem Test oder einer Diskussion [Bruchmüller und Haug 2001, S. 156]. Das Fehlen der synchronen Betreuung im Umgang mit VRLs erfordert, dass diese Überprüfung der Vorbereitung mit digitalen Medien realisiert wird. Die digitale Natur eines WBTs oder eines Wikis, und die möglichen Freiheiten in der individuellen Erarbeitung der fachlichen Inhalte in der Vorbereitungsphase, schaffen zudem eine Bandbreite an Feedbackmöglichkeiten zur Selbsteinschätzung der VRL-Nutzer. Insbesondere für den Umgang mit VRL-Experimenten durch autonome Nutzer gilt: Für einen erfolgreichen Kompetenzgewinn bedarf es einer gewissen Souveränität im Umgang mit dem VRL für den möglichst reibungslosen Ablauf der notwendigen Experimente [Kruse et al. 2017, S. 3].

Im VRL-Lernprozess ermöglicht die Reflexionsphase eine Selbsteinschätzung der Nutzer und dient als Maßnahme zur Sicherstellung der ausreichenden Vorbereitung auf die Durchführungsphase. Auf diese Weise wird eine qualitativ hochwertige und wirksame VRL-Erfahrung gewährleistet. Die Grafik in Abbildung 3-7 zeigt diesen Ausschnitt des Lernprozesses. Treten während der Überprüfung der Vorbereitung der Nutzer in der Reflexionsphase Wissenslücken auf, erhalten diese einen Rückverweis auf die Vorbereitungsphase. Abhängig von den verwendeten Tools in der Reflexionsphase führen mehr oder weniger detaillierte Rückmeldungen zu den entsprechenden fehlenden oder fehlerhaften Inhalten und empfehlen die Wiederholung dieser Abschnitte der Vorbereitungsphase.

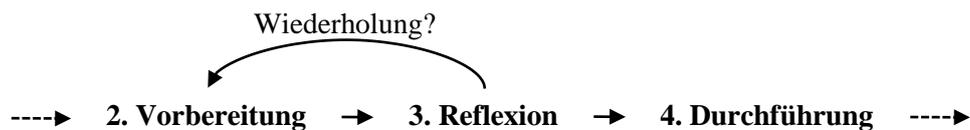


ABBILDUNG 3-7 SELBSTREFLEXION ZUR GEWÄHRLEISTUNG AUSREICHENDER VORBEREITUNG VOR DER NUTZUNG EINES VRLS MIT DER MÖGLICHKEIT DES RÜCKVERWEISES AUF INHALTE DER VORBEREITUNGSPHASE (AUSZUG AUS ABBILDUNG 3-2)

Die fehlende, synchrone Betreuung durch einen Laborbetreiber und die Abwesenheit von Gruppenmitgliedern während der Phasen des VRL-Lernprozesses kann für nicht ausreichend vorbereitete Nutzer zum Problem werden. Besonders in der Durchführungsphase, in der einzelne Nutzer die alleinige Kontrolle über ein VRL haben und diese zielgerichtet für Messungen und Beobachtungen einsetzen sollen, kann dies schnell zu Fehlbedienung des VRL und somit zu falschen oder unvollständigen Ergebnissen führen. Den Anbietern einer VRL-Ressource bietet sich hier die Möglichkeit eine Einstiegshürde am Übergang zur Durchführungsphase zu etablieren. Dies dient der Optimierung des individuellen Lernerlebnisses der Nutzer. Bei remote Laboren hilft dies, insbesondere bei stark frequentierten Ressourcen oder solchen, die nur zeitlich begrenzt verfügbar sind, die Auslastung zu optimieren und Buchungen von unzureichend vorbereiteten Nutzern zu vermeiden. Für virtuelle Labore ist dieser Aspekt aus organisatorischer Sicht nicht unbedingt notwendig, dient aber auch hier der Steigerung des individuellen Lernergebnisses.

Eine Möglichkeit der interaktiven Reflexion ist die Verwendung von Onlinetests. Je nach Gestaltung können diese unterschiedlich komplex ausfallen und verschiedene Aspekte der Vorbereitung beleuchten. Ein Multiple-Choice-Test kann zur Überprüfung des Erinnerungsvermögens einzelner Aspekte herangezogen werden (IL oder LL, Stufe 1). Diese Tests haben den Vorteil, dass sie einfach zu gestalten und schnell zu bearbeiten sind. Geht es um die Überprüfung eines tieferen Verständnisses, oder sogar einer Kompetenz, ist eine andere Herangehensweise zu wählen. Für diesen Zweck eignet sich beispielsweise der Umgang mit der schematischen Darstellung des technischen Prozesses [Kruse et al. 2017, S. 4]. Diese technischen Pläne oder Schemata visualisieren den Ablauf eines Prozesses und enthalten die für den betrachteten Prozess grundlegenden Bauteile, Fließrichtungen und Verschaltungen. Den einfachsten Fall einer Prüfungsaufgabe stellt die Beschriftung eines solchen Plans dar, wobei der Plan selbst eine Hilfestellung ist. Der Lernende muss die Elemente eines bestehenden Versuchsaufbaus (IL oder

LL/PL Stufe 1) identifizieren. Deutlich fordernder ist diese Aufgabe, wenn ein solcher Plan nicht bereits Teil der Vorbereitungsphase war und wird noch anspruchsvoller, wenn die Lernenden den Plan selbstständig erstellen sollen [Bruchmüller und Haug 2001, S. 47]. Im zuletzt genannten Fall muss der Lernende die passenden Komponenten aus einem Katalog auswählen, im Plan positionieren und mit den übrigen Komponenten korrekt verbinden. Wenn dem Nutzer dies gelingt, wird davon ausgegangen, dass ein Grundverständnis für den zur Anwendung kommenden Versuchsaufbau (LL oder PL Stufe 1 und 2) und die auftretenden Zusammenhänge existiert [ebd., S. 190].

Für diesen Zweck wurde auf Basis der Entwicklungsumgebung Phaser (www.phaser.io) und Java Script eine Umgebung entwickelt, in der ein virtuelles Prozessschema (VPS) zur Überprüfung der Versuchsvorbereitung genutzt wird [Kruse et al. 2017, S. 5].

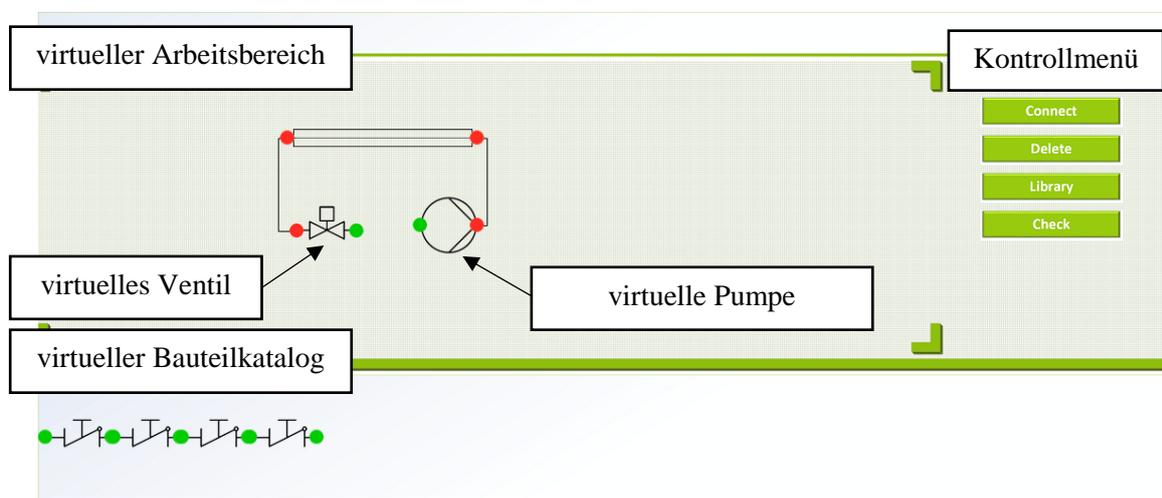


ABBILDUNG 3-8 VIRTUELLES PROZESSSCHEMA ZUR VORBEREITUNG VON REMOTE LABOR VERSUCHEN MIT VIRTUELLEM BAUTEILKATALOG, KONTROLLMENÜ UND VIRTUELLER ARBEITSFLÄCHE

Das HTML 5 Framework Phaser eignet sich insbesondere für die Entwicklung von browserbasierten Spielen für Desktop-PCs oder mobile Endgeräte. Hierbei stellt das Framework eine ganze Reihe spieletypischer Objekte und Funktionen zur Verfügung [Hogan 2016, S. 3]. Die spieletypischen Elemente wie einen Objektkatalog, eine virtuelle Zeichenfläche und die Möglichkeit, Objekte mit der Maus zu verschieben, stehen dem Nutzer im VPS zur Verfügung, um ein einfaches technisches Schema zu erstellen. Die Nutzer sollen innerhalb des virtuellen Arbeitsbereichs ihren Entwurf eines zur VRL-Fragestellung passenden Versuchsaufbaus schematisch zusammenstellen. Aus einem Teilekatalog wird dem individuellen Prozessschema jedes gewünschte Element hinzugefügt (siehe Abbildung 3-8). Der Katalog enthält eine größere Anzahl Elemente als für den gesuchten Aufbau notwendig ist. Die Lernenden müssen also die notwendigen Teile identifizieren, platzieren und dann virtuell verbinden. Die Lernenden können die Positionierung und die Verbindung der Elemente individuell beeinflussen. Hierzu zeigen die ausgewählten Bauteile ihre freien und besetzten Anschlusspunkte mit grünen bzw. roten Anschlussstellen an. Diese Eigenleistung macht das individuelle Verständnis der Nutzer bezüglich der Funktion der einzelnen Komponenten und des gesamten Aufbaus sichtbar. Wird ein virtueller Aufbau als fertig erachtet, erfolgt

die Überprüfung mit Hilfe eines einfachen Algorithmus. Neben der einfachen Kontrolle, ob alle benötigten Elemente verwendet worden sind, gibt die Überprüfung auch Auskunft über etwaige Verbindungs- oder Positionierungsprobleme der verwendeten Komponenten. Je detaillierter das Feedback für einen Nutzer bezüglich des individuellen Aufbaus ist, umso treffender können die Hinweise zur Wiederholung einzelner Bereiche der Vorbereitungsphase platziert werden. Durch die Verwendung des VPS in der Reflexionsphase werden die Lernenden im VRL-Lernprozess bestmöglich auf die Durchführung eines Experimentes mit einem VRL vorbereitet.

Die Verwendung eines solchen virtuellen Prozessschemas zur Überprüfung der Vorbereitung auf die Benutzung eines VRLs ist flexibel auch auf andere technische Szenarien übertragbar [Kruse et al. 2017, S. 6]. Auch einige nichttechnische Disziplinen arbeiten mit abstrahierender, grafischer Darstellung komplexer Zusammenhänge und können von dieser Art der Reflexion profitieren.

3.1.4 Durchführungsphase

Die drei bisher vorgestellten Phasen des VRL-Lernprozesses dienen der Orientierung und Vorbereitung auf den selbstständigen Gebrauch eines VRLs zur Lösung einer Frage- oder Problemstellung. In den ersten beiden Phasen werden lernende Nutzer nun an die Problem- oder Fragestellung herangeführt, erstellen eigene Hypothesen und entwickeln virtuell einen zur Untersuchung geeigneten Versuchsaufbau mit dem VPS. Als nächster Schritt der Experimentierphasen nach Bruchmüller und Haug folgt nun die Überprüfung der Hypothese durch ein Experiment. Während der Durchführungsphase erhält der Nutzer den exklusiven Zugriff auf ein VRL für individuelle Experimente zur Überprüfung seiner Hypothesen.

Die Bereitstellung von virtuellen Laboren ist aufgrund ihrer vollständig digitalen Natur ohne Verbindung zu einem realen Versuchsaufbau vergleichsweise einfach zu organisieren. Aufgrund der organisatorischen Besonderheiten bei der Arbeit mit realen Versuchsaufbauten liegt der Fokus der vorliegenden Arbeit auf dem Einsatz von remote Laboren. Um störungsfreies Arbeiten mit remote Laboren zur ermöglichen, muss der individuelle Zugriff organisiert werden. Während der Durchführungsphase bedient ein Nutzer als einziger und ohne Beeinflussung anderer Nutzer ein remote Labor. Um dies zu gewährleisten, wird ein Zeitfenster für die Nutzung des remote Labors reserviert. Die Grafik in Abbildung 3-9 zeigt den schematischen Aufbau der Organisation eines remote Zugriffs auf reale Versuche mit Hilfe eines Labor-Management-Systems. Hier reserviert „Nutzer A“ über ein Labor-Management-Systems den „Versuch 1“ für einen bestimmten Zeitraum. Das Labor-Management-System zeigt „Versuch 1“ nun für alle anderen Nutzer im entsprechenden Zeitraum als reserviert bzw. nicht verfügbar an. Zu Beginn des reservierten Zeitraumes erhält „Nutzer A“ die Kontrolle über das remote Labor (Versuch 1).

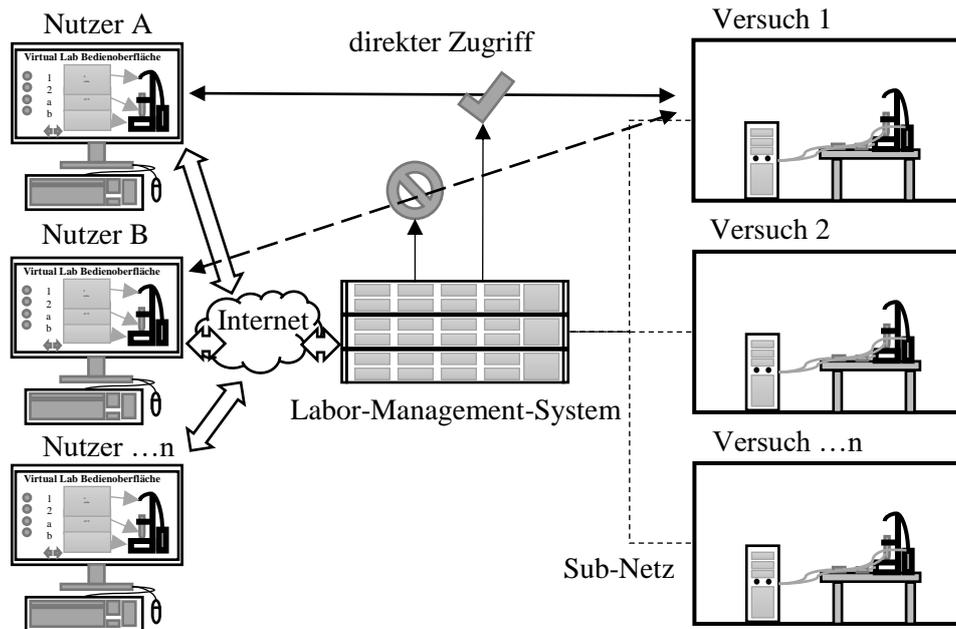


ABBILDUNG 3-9 ORGANISATION EINES EXKLUSIVEN ZUGRIFFS AUF EIN REMOTE LABOR MIT EINEM LABOR-MANAGEMENT-SYSTEM

Für die anderen Nutzer des Systems ist das Labor in diesem Moment nicht erreichbar. Erst nach Ablauf des Reservierungszeitraumes wird der Laborversuch wieder freigegeben, sodass andere Nutzer ihre Reservierungen einlösen können.

Der VRL-Lernprozess greift an dieser Stelle auf ein open source Labor-Management-System zurück, welches bereits ab 2001 vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) und Microsoft im Rahmen des iCampus entwickelt worden ist [Muramatsu 2006]. Mit dem Grundgedanken einer einfach zu bedienenden, zentralen Administration für remote Labore wurde das Labor-Management-System iLab auf Basis einer sogenannten shared architecture entwickelt. Der Vorteil liegt hier in der Robustheit des Systems bei Ausfall einzelner Komponenten und der einfachen Skalierbarkeit der Anzahl an beteiligten Laboren. Dabei liegt die Herausforderungen in der Einrichtung und dem Betrieb aller Komponenten des komplexen Systems. Das Konzept der shared architecture geht von einem oder mehreren, zentralen Punkten (Servern) aus, welche häufig genutzte Dienste und Funktionen für alle verbundenen Systeme (Clienten) bereitstellt [MIT iLab 2011, S. 3]. Im Fall von iLab geschieht dies über ein SQL-Datenbanksystem, welches verschiedene Funktionen abbildet (siehe Abbildung 3-10).

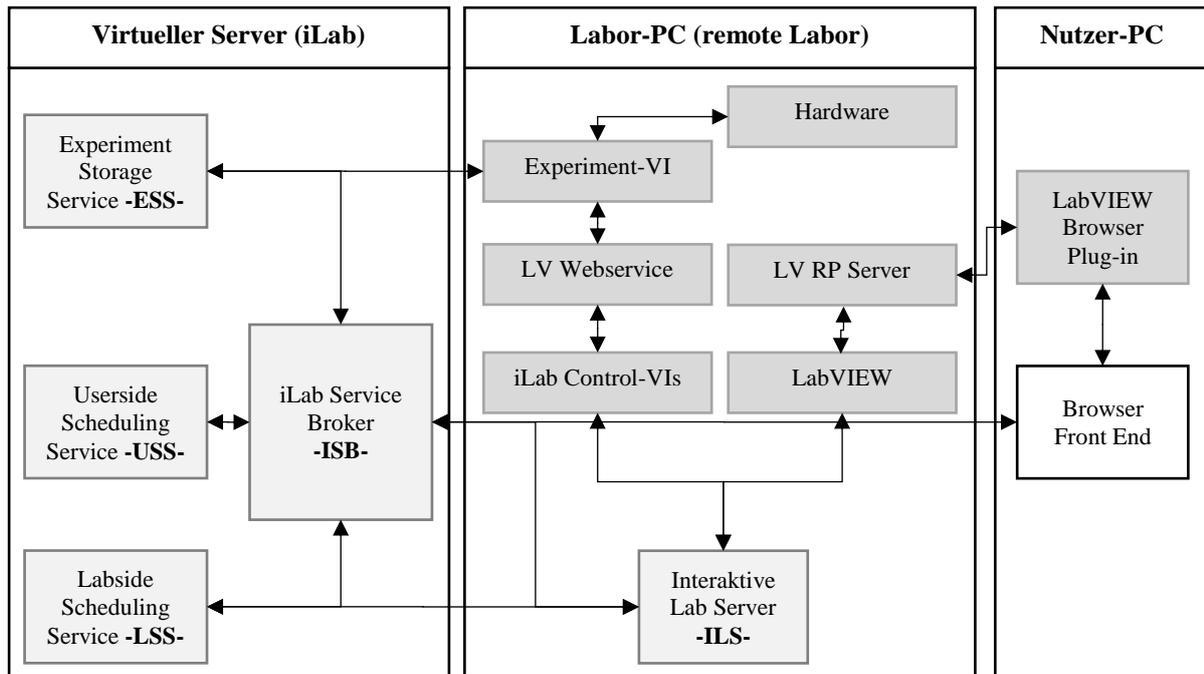


ABBILDUNG 3-10 AUFBAU DER ILAB SHARED ARCHITECTURE UND DER VI-KONTROLLE IN LABVIEW MIT DEN DREI BEREICHEN: VIRTUELLER SERVER, LABOR-PC UND NUTZER-PC,

Für die remote Labore des VRL-Lernprozess sind die zentralen Dienste für iLab auf einem virtuellen Server eingerichtet, wohingegen jedes verbundene remote Labor einen Client, wie z.B. einen Labor-PC, benötigt. Die Serverdienste gliedern sich in vier Module. Der iLab-Service-Broker (ISB) ist der organisatorische Kern dieser Architektur. Der ISB steuert die internen Abläufe und koordiniert die externen Zugriffe. Zur Administration der remote Labore und der zugehörigen Labor-PCs wird ein Modul mit dem Namen Labside-Scheduling-Service (LSS) eingerichtet. Der LSS ermöglicht die Konfiguration der remote Labore in Bezug auf ihre Verfügbarkeit, max. Versuchsdauer, Zugriffsrechte und max. Anzahl an Versuchsdurchläufen. Die Administration der Labornutzer erfolgt über das Modul Userside-Scheduling-Service (USS). Über den USS werden individuelle Nutzerprofile verwaltet und den entsprechenden Hierarchien zugeordnet. Das vierte Modul mit dem Namen Experiment-Storage-Service (ESS) speichert und verwaltet Daten der Versuchsdurchläufe.

Auf jedem Labor-PC der remote Labore des VRL-Lernprozesses wird der Client-Dienst für iLab betrieben. Hier wird der sogenannte interactive LabServer (ILS) eingerichtet, welcher der Softwareumgebung LabVIEW der Firma National Instruments (NI) die Kommunikation mit dem ISB von iLab ermöglicht [Kruse et al. 2016, S. 471]. Auf dem Labor-PC läuft zusätzlich ein für den jeweiligen Versuchsaufbau entwickeltes LabVIEW Programm (Experiment-VI) zur Bedienung des remote Experimentes durch den Nutzer. LabVIEW bietet einen Webservice an, um die Bedienoberfläche eines LabVIEW-VIs als Webseite verfügbar zu machen. Für die Kontrolle dieses Zugriffs oder eventuelle Beschränkung des Zugangs wird der ILS über Steuerungs-VIs und die DCOM Schnittstelle mit der LabVIEW Instanz auf dem Labor-PC lokal verbunden. Der ILS startet und beendet den individuellen Nutzerzugriff auf das Experiment VI entsprechend dem im ISB reservierten Zeitraum.

Zur Bedienung eines remote Labors ist auf Seiten der Nutzer neben einem PC oder Notebook auf Windows, Linux oder iOS Basis auch ein aktueller Browser wie der Internetexplorer, Firefox oder Safari notwendig. Um das Experiment-VI im Browser auszuführen, wird ein Run-Time Plug-in von National Instruments benötigt. Die Bedienung des remote Experimentes geschieht dann anhand der Interaktion mit der Bedienoberfläche des Experiment-VI im Browser des Nutzer-PCs. Hier werden die Eingaben entgegengenommen und die entsprechenden Kommandos über das Internet an den Labor-PC übertragen. Das Experiment-VI auf dem Labor-PC verarbeitet die Eingaben und gibt diese über eine Hardwareschnittstelle an den remote Versuchsaufbau weiter. Gleichzeitig werden die vom Labor-PC erfassten Bedienparameter und Messgrößen im Experiment-VI angezeigt und für die spätere Auswertung aufgezeichnet. Die Messdaten des durchgeführten remote Experimentes werden im ESS abgelegt oder per Mail aus dem Experiment-VI an den Nutzer versendet. Durch die manuelle Übertragung erster Messergebnisse in ein vorgefertigtes Protokoll, wird bereits während der Durchführungsphase ein erstes Feedback über den Verlauf des Experimentes gegeben. So wird z.B. verhindert, dass Messpunkte vergessen oder einzelne Aspekte des Experimentes vernachlässigt werden [Bruchmüller und Haug 2001, S. 90–91].

Das Zusammenspiel der oben aufgeführten Komponenten des iLab-Systems erlaubt die koordinierte Bereitstellung von remote Laboren für Lernende und Lehrende über das Internet. Der individuelle Zugriff, ohne die Kollision mit anderen lernenden Nutzern, ermöglicht die Integration des VRL-Lernprozesses und seiner remote Labore beispielsweise in die Selbstlernphasen von Blended Learning, Inverted Classroom oder Virtual Classroom Veranstaltungen. Ein remote Labor kann auch durch Dozierende z.B. zur Demonstration innerhalb der oben genannten Formate reserviert werden. Hierfür ermöglicht iLab die bevorzugte Behandlung der Reservierungswünsche von Dozierenden.

3.1.5 Auswertungsphase

Im Anschluss an die Durchführungsphase erhalten die Nutzer die durch das individuelle Experimentieren mit einem VRL gewonnenen Daten. Die Auswertungsphase ist der letzte Schritt der Experimentierphasen nach Haug. In dieser Phase wird die Eigenleistung der Nutzer (Hypothese(n), Messergebnisse) mit den vermittelten Grundlagen diskutiert. Die Auswertung der eigens gewonnenen Messergebnisse orientiert sich an den in der Vorbereitungsphase (siehe Kapitel 3.1.2) formulierten Lernzielen und der oder den durch die Nutzer aufgestellten Hypothese(n) [ebd., S. 88]. Die Messdaten müssen aufbereitet werden, um Fehler und Unsicherheiten zu berücksichtigen sowie weitere Erkenntnisse über den Verlauf der Experimente ableiten zu können. Diese Nachbearbeitung der Ergebnisse führt der Nutzer auf seinem lokalen PC oder Notebook durch. Je nach Aufgabenstellung ist die Verwendung einer bestimmten Methodik oder Software zur Nachbearbeitung vorgeschrieben. In vielen Fällen genügt der Funktionsumfang einer modernen Tabellenkalkulationssoftware wie Microsoft Excel oder openCalc zur Aufbereitung und Analyse der Messwerte. Die Anbieter des VRLs können in der Vorbereitungsphase Vorgaben über logische oder formelle Vorgehensweisen machen. Oft sind hier Standards oder Normen aus der Praxis der jeweiligen Disziplin einzuhalten, welche ebenfalls in der Vorbereitungsphase

vermittelt worden sind. Die Auswertung der Daten und die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen in Bezug auf die Problemstellung bzw. Hypothese werden durch den Lernenden in einem vereinbarten Format festgehalten. Hier können unterschiedliche Schriftformen vom Messprotokoll (IL und PL Stufe 1) bis hin zum technischen Bericht nach industriellem Standard (PL Stufe 2 und 3) gefordert sein [Bruchmüller und Haug 2001, S. 143–144]. Der Prozess des Erkenntnisgewinns wird durch die Synthese des Grundlagenwissens aus der Vorbereitungsphase mit dem Erfahrungswissen des Experimentes der Durchführungsphase erreicht. Um eventuelle Fragen in Bezug auf das Grundlagenwissen oder die Ergebnisse der Experimente klären zu können, kann der VRL-Anbieter über die auf ELL hinterlegten Kontaktinformationen kontaktiert werden.

3.1.6 Präsentationsphase

Für VRLs im Kontext von Weiterbildungs- und Qualifizierungsmaßnahmen ist eine Überprüfung der erbrachten Leistung notwendig. Traditionell geschieht dies in Form von schriftlichen Berichten und in Form einer mündlichen Präsentation [ebd., S. 220]. Die Lernenden stellen in beiden Fällen die Zielsetzung, das Vorgehen und die Ergebnisse ihres VRL-Experimentes dar. Die Darstellung setzt sich aus einer inhaltlichen und einer formellen Komponente zusammen.

Ein schriftlicher Ergebnisbericht lässt sich elektronisch, z.B. per Email oder als Upload in ein LMS, übermitteln. Bei der Auswertung schriftlicher Berichte von wiederkehrenden Fragen- bzw. Problemstellungen hilft eine elektronische Plagiatsprüfung, die Echtheit einer Ausarbeitung zu bewerten.

Um die mündliche Ergebnispräsentation auch ohne räumliche Nähe durchführen zu können, sind einige Herausforderungen zu meistern. Eine mündliche, foliengestützte Präsentation bedarf des Rückgriffs auf zusätzliche technische Unterstützung. Eine Möglichkeit ist die synchrone Präsentation im virtuellen Raum. Hierfür muss der PC oder das Notebook über eine geeignete Kamera, ein Mikrofon und eine ausreichend schnelle Internetanbindung verfügen. Eine solche Ergebnispräsentation kann z.B. mit Adobe Connect oder Blackboard Collaborativ (siehe Kapitel 2.2.3), aber auch mit Skype oder ähnlichen Videokonferenztools übertragen werden. Diese Kommunikationsprogramme erlauben die gleichzeitige Übertragung eines Kamerabildes und einer Bildschirmpräsentation. Videopräsentationen dieser Art stellen für Aus- und Weiterbildung zwar eine neue, aber nicht uninteressante Perspektive dar. Sie sind eine gute Vorbereitung auf ein modernes Arbeitsumfeld, welches durch fortschreitende Globalisierung eben diese Kompetenz fordert [ebd.].

Eine weitere Alternative der Leistungsüberprüfung sind die schon für die Vorbereitungsphase vorgestellten Onlinetests. Durch diese kann neu erworbenes Wissen und erweitertes Verständnis ebenfalls innerhalb einer Videokonferenz überprüft werden. Die Fragen und Aufgaben des Tests werden durch den fachlichen Betreuer während der Sitzung bereitgestellt. Organisatorisch erfordert diese Art der Leistungsprüfung jedoch terminliche Absprache und wird vermutlich vorrangig mit synchroner Betreuung zu realisieren sein, was die individuelle Flexibilität der Nutzer an dieser Stelle mindert, die räumliche

Freiheit jedoch erhält. Virtuelle Präsentation und elektronische Ergebnisdarstellung sind eine gute Vorbereitung auf ein modernes Arbeitsumfeld. Besonders für die Bewertung dieser Präsentation in Aus- und Weiterbildung besteht, abhängig von der Relevanz der Leistung innerhalb des gesamten Bildungsangebotes, ggf. das Problem der eindeutigen Identifikation des Leistungserbringenden. Der rechtliche Rahmen für dieses Szenario ist noch nicht abschließend diskutiert.

3.1.7 Bewertungsphase

Die Bewertung der im VRL-Lernprozess erbrachten Leistung hat verschiedene Motive. Bewertungen in Form von Noten oder Punkten dienen der Quantifizierung einer individuellen Leistung. Darüber hinaus bietet die Bewertung einer Leistung auch eine Reflexionsmöglichkeit für die Leistungserbringenden. Fällt die Bewertung gut aus, so wird die erbrachte Leistung honoriert und die Motivation für weitere Leistungen ist hoch [Bruchmüller und Haug 2001, S. 33]. Auch wenn eine Bewertung nicht gut ausfällt, kann dies die Motivation für zukünftige Leistungen verbessern. Besonders im Fall einer schlechten Bewertung ist eine detaillierte Begründung hilfreich, um die Schwachstellen gezielt bearbeiten zu können. Hierfür ist es wichtig, die Leistungserwartung spätestens in der Vorbereitungsphase klar zu kommunizieren. Dies gilt für die inhaltliche Erarbeitung der Lernziele, aber auch für das formale und organisatorische Vorgehen während der Bearbeitung der Aufgaben-bzw. Problemstellung.

Im Fall der Leistungsbewertung eines VRL-Experiments setzt sich die Gesamtleistung aus verschiedenen Teilleistungen einzelner Phasen zusammen. Die hauptsächliche Aussage über die erbrachte Leistung wird, so wie auch bei Präsenzlaboren, der Ergebnispräsentation entnommen. Die Verwendung digitaler Medien ermöglicht zudem das Einbeziehen von Metadaten in die Bewertung. Wo es zunächst attraktiv erscheint, die Betrachtungshäufigkeit und die Verweildauern in den einzelnen Phasen der Vorbereitung und Durchführung heranzuziehen, entstehen gerade für individuelle und flexible remote Anwendungen besondere Herausforderungen. Die Heterogenität der Nutzer und die Vielzahl der individuellen Nutzungsszenarien begrenzen die Aussagekräftigkeit dieser Metadaten.

Auch wenn Teile der Bewertung automatisiert ablaufen (Onlinetests), so werden Präsentationen und Ergebnisberichte individuell durch die Anbieter einer VRL-Ressource bewertet. Besonders für große Gruppen bieten asynchrone Bewertungsszenarien die notwendige Flexibilität, um doch stets ähnlich aufgebaute Ergebnisberichte und Präsentationen zu bewerten. Die Bewertung der elektronisch übermittelten Ergebnisberichte geschieht entsprechend der zuvor kommunizierten Anforderungen nach festgelegten Kriterien [ebd., S. 238]. Die Bewertung einer synchronen (Livebild) oder asynchronen virtuellen Präsentation (Aufzeichnung) stellt hier ggf. ein Novum dar, wobei sich die herangezogenen Kriterien für die Bewertung einer Präsentation nicht zwingendermaßen von denen einer klassischen Präsentation unterscheiden [ebd., S. 247].

3.2 Einsatz des VRL-Lernprozesses in der universitären Laborlehre

Die Einsatzmöglichkeiten des vorgestellten VRL-Lernprozesses sind, nicht nur im Hochschulumfeld, vielseitig. Als praxisorientierte Ergänzung zu theorievermittelnden eLearning-Konzepten wird Lehrenden und Lernenden individuelles Experimentieren ermöglicht. Im Folgenden werden beispielhaft zwei denkbare Einsatzszenarien für den VRL-Lernprozess beschrieben.

Eine Präsenzveranstaltung, beispielsweise zum Thema Rheologie, findet als klassische Präsenzveranstaltung mit angeschlossenen Übungseinheiten statt. Die Vorlesung vermittelt die Grundlagen der akademischen und technischen Betrachtung des Fließverhaltens. Neben der Einführung in die unterschiedlichen Strömungsarten werden auch die Fließarten erläutert. Technische Berechnungen und die Arbeit mit Geschwindigkeitsprofilen werden innerhalb der Präsenzübung berücksichtigt. Um auch praktische Erfahrungen zu vermitteln, dient eine klassische Laborveranstaltung, bei welcher der gesamte Kurs (ca. 20 Teilnehmer) mit den Methoden der Viskosimetrie vertraut gemacht wird. Um die praktischen Erfahrungen der Kursteilnehmer individuell zu erweitern, kann der Dozent ein remote Labor zur Untersuchung von Strömungen auf der zentralen Informationsplattform des VRL-Angebots anbieten. Es liegt im Ermessen der Dozierenden, die Verbindlichkeit dieses Angebots festzulegen. Die theoretischen und fachlichen Grundlagen des remote Labors werden in der Vorbereitungsphase des VRL-Lernprozesses vermittelt, können aber auch in die Präsenzveranstaltungen aufgenommen werden. Eine zusätzliche Integration dieser Inhalte in die Präsenzveranstaltung kann das Lernergebnis verbessern [Bruchmüller und Haug 2001, S. 48]. Für die Nutzung des remote Labors im VRL-Lernprozess durchlaufen die Studierenden die zuvor beschriebenen Phasen des VRL-Lernprozesses. Es ist möglich, die Phase der Leistungsüberprüfung bzw. der Präsentation hier als Remote- oder Präsenzveranstaltung auszuliegen. Der Mehrwert liegt hier hauptsächlich in der flexiblen Erweiterung des individuellen Erfahrungshorizonts der Nutzer und in der Entlastung der Ressourcen der Dozierenden.

Ein anderes Szenario ist in einem größeren oder zumindest offeneren Rahmen denkbar. Personen, die bisher nicht als Studierende oder Mitarbeiter auf irgendeine Art und Weise mit der Universität verbunden sind, können von einem VRL-Lernangebot ebenso profitieren. Die Konfrontation mit dem Lernangebot ist über verschiedene Wege möglich. Die zentrale Informationsplattform des VRL-Angebots ist online jederzeit frei verfügbar. Auf diese Weise können interessierte Personen das Angebot durch Verlinkungen auf Internetseiten dritter oder über eine direkte Stichwortsuche aufrufen. Andererseits ist es möglich, dass das VRL-Lernangebot Bestandteil einer online Lernveranstaltung ist. Dies ist sowohl als MOOC oder als geschlossenes Webinar denkbar (siehe 2.2.3). Ein Punkt, der bei offenen Onlineangeboten nicht vernachlässigt werden darf, ist die quasi nicht vorhersagbare Auslastung und das Interesse der allgemeinen Öffentlichkeit. In beiden Fällen liegt der Mehrwert, im Vergleich zu einem ähnlichen Angebot, im formalen Rahmen, in der Ermöglichung der Nutzung von echtem Laborequipment innerhalb einer eLearning-Veranstaltung und dies über große Distanzen und zu flexiblen Zeiten.

4 Verfahrenstechnische Untersuchung von Strömungen und Druckverlusten

Die vorangehenden Kapitel vermitteln die allgemeinen Grundlagen von ausgewählten eLearning-Elementen sowie virtuellen und remote Laboren wie sie für den Aufbau von Fach- und Querkompetenzen im Rahmen eines eLearning-Konzeptes, z.B. mit dem VRL-Lernprozess, eingesetzt werden können. Das folgende Kapitel widmet sich der praktischen Einrichtung eines remote Labors für eben diesen Zweck. Beispielhaft wird ein verfahrenstechnisches Labor zur Untersuchung von technischen Strömungen betrachtet. Die Verfahrenstechnik ist eine Fachdisziplin innerhalb der Ingenieurwissenschaften, die sich unter anderem mit Impuls-, Wärme- und Stofftransport beschäftigt. Viele Problemstellungen und deren Lösungen werden auch von angrenzenden oder fachfremden Disziplinen verwendet. Im Folgenden werden zunächst die theoretischen Grundlagen für die verfahrenstechnische Betrachtung von Druckverlusten erläutert. Anschließend wird ein Versuchsaufbau vorgestellt, der über ein klassisches Hands-on Bedienkonzept verfügt. Für den Einsatz als remote Labor wird dieser Prüfstand entsprechend erweitert und um ein Bedienkonzept für den remote Betrieb ergänzt.

4.1 Grundlagen der Druckverlustmessung in durchströmten Partikelsystemen

In verfahrenstechnischen Prozessen kommt eine große Bandbreite an Fluiden zum Einsatz. Je nach Anwendungsfall sind diese Prozessfluide mit Partikeln oder Gas beladen. Prozessfluide können sowohl als Produktionsströme (Herstellung von flüssigen Gütern: Treibstoffe, Farbe, Lebensmittel, etc...), sowie auch als Peripherieströme für technische Hilfsprozesse (Kühlung, Schmierung, Reaktionssteuerung) eingesetzt werden. Für diese technischen Anwendungen werden Strömungen oft künstlich erzeugt. Hierzu werden Förderorgane wie Pumpen oder sonstige Druckerzeugungssysteme verwendet. Viele technische Prozesse bedienen sich dabei der geführten Strömung wie z.B. in Rohren. Vier der häufig anzutreffenden Strömungen sind in Abbildung 4-1 beispielhaft gezeigt.

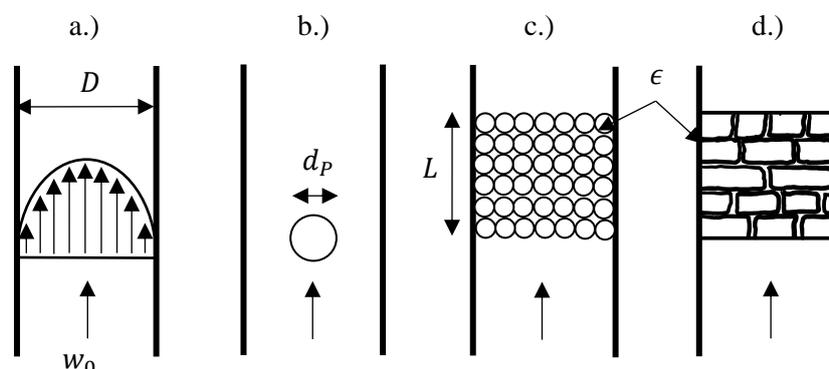


ABBILDUNG 4-1 FORMEN TECHNISCHER STRÖMUNGEN, ROHRSTRÖMUNG A.), ANSTRÖMUNG EINES OBJEKTES B.), DURCHSTRÖMUNG EINER PARTIKELSCHÜTTUNG C.), DURCHSTRÖMUNG EINER PORÖSEN SCHICHT D.)

Grafik a.) zeigt die langsame Durchströmung eines Rohres, bei der sich ein laminares Geschwindigkeitsprofil ausbildet. In Grafik b.) ist die Anströmung eines Objektes, hier einer Kugel, dargestellt. Durch die Haftbedingung an allen Wänden bildet sich das Geschwindigkeitsprofil zwischen der Kugel

und der umlaufenden Rohrwand aus. Bei einer größeren Anzahl stationärer Objekte, welche den Strömungsraum einnehmen, wird von einem Festbett gesprochen. In einer Festbettschüttung aus z.B. Kugeln entsteht ein komplexer Strömungszustand. Die Anordnung der Partikel ist strukturiert, wie in Grafik c, aber auch willkürlich möglich. Auch hier gilt die Haftbedingung an jeder benetzten Wand aller Objekte im Strömungsquerschnitt. Dies sorgt für eine komplexe Strömungssituation, bei der sich viele unterschiedliche Geschwindigkeitsprofile zwischen den Partikeln, aber auch zwischen den Partikeln und der Wand ausbilden. Lassen sich um die Strömungskanäle herum keine einzelnen Partikel mehr ausmachen, wie in Grafik d.) gezeigt, wird von einem porösen Festkörper gesprochen. Die Durchströmung von Strukturen wie c.) und d.) sind Vorgänge, bei welchen beliebig komplexe, mikroskopische Strömungsvorgänge auftreten. Im Folgenden liegt der Fokus auf der Untersuchung von technisch genutzten Festbettschüttungen wie beispielhaft in Grafik c.) dargestellt. In der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich Festbettschüttungen betrachtet, bei denen die Anordnung der Partikel zufälliger Natur ist.

Innerhalb verfahrenstechnischer Vorgänge durchlaufen Fluide unterschiedliche Prozesse, bei welchen oftmals vorgegebene Prozessparameter eingehalten werden müssen. Mögliche Anwendungsgebiete sind die Filterung, Temperierung und die biologische oder chemische Reaktion des geförderten Fluides. Um den jeweils gewünschten Prozess sicher gewährleisten zu können, wird eine definierte Kontaktfläche zwischen dem Fluid und einem geeigneten technischen System benötigt. Festbetten können eingesetzt werden, um die oben genannten Parameter des Prozessfluides sicherzustellen. Die Oberflächen der Partikel einer Festbettschüttung können je nach Einsatzzweck Wärme übertragen, Partikel abscheiden, chemisch oder biologisch aktiv sein. Bei der Durchströmung einer Festbettschüttung kommt es zum Impulsaustausch innerhalb der Fluidschichten und zwischen Fluid und der Oberfläche der Festbettschüttung. Dieser Impulsaustausch beeinflusst jedoch die Strömungsgeschwindigkeit und erzeugt einen Druckverlust, welcher durch geeignete Förderorgane zu überwinden ist. Das Bestreben nach Prozessoptimierung richtet sich zunehmend auch auf den Energiebedarf der Förderprozesse von Produktions- und Peripherieströmen. Für die Optimierung ist es wichtig, Druckverluste in Einbauten und Festbettschüttungen zu kennen und ggf. vorhersagen zu können, um die Leistungsfähigkeit von Förderorganen und damit die Druckerzeugung optimal an einen Anwendungsfall anzupassen.

4.1.1 Festbettschüttungen

Eine Festbettschüttung ist eine Ansammlung von Einzelpartikeln zu einer Struktur aus Hohlräumen und Festkörpern. In einer natürlichen Festbettschüttung sind diese Partikel oft polydispers und zufällig angeordnet. Auch in technischen Anwendungen können naturähnliche Festbetten beispielsweise in Form von Sandfiltern genutzt werden. In verfahrenstechnischen Prozessen wie z.B. Kolonnen, Filtern, Wärmeübertragern oder Reaktoren werden häufig definierte Partikel in zufälliger oder geordneter Struktur verwendet. Zur Beschreibung von Festbetten können die räumliche Anordnung der Partikel bzw. Strömungskanäle oder das für Fluide zugängliche Volumen herangezogen werden.

Ein natürliches Festbett besteht selten aus kugeligen Partikeln. Je nach Situation können auch flache oder unförmige Partikel auftreten. Um unregelmäßige Partikel dennoch allgemein zu beschreiben, wird die volumenbezogene spezifische Oberfläche S_v verwendet [Stieß 2009, S. 16].

$$S_v = \frac{A_p}{V_p} \quad 4-1$$

Dabei wird der Quotient aus A_p für die Partikeloberfläche und V_p für das Partikelvolumen gebildet. Für geometrische Kugeln mit dem einheitlichen Durchmesser d_p ergibt sich [ebd.]:

$$S_v = \frac{6}{d_p} \quad 4-2$$

Zur Beschreibung nicht kugeliger Partikel, wie z.B. Kies, Sand oder Holzschnitzel, werden Äquivalenzdurchmesser verwendet. Ein Äquivalenzdurchmesser führt eine geometrische oder physikalische Eigenschaft eines unregelmäßigen Partikels auf den Durchmesser einer Kugel mit der gleichen Eigenschaft zurück. Für unregelmäßige Partikel wird die spezifische Oberfläche S_v mit d_s als Durchmesser einer oberflächengleichen Kugel und d_v als Durchmesser einer volumengleichen Kugel berechnet.

$$S_v = \frac{\pi d_s^2}{\left(\frac{\pi}{6}\right) d_v^3} = 6 \frac{d_s^2}{d_v^3} \quad 4-3$$

Die in dieser Arbeit untersuchten Partikel sind geometrisch ideale Kugeln mit dem Durchmesser d_p .

Die charakteristische Größe einer Festbettschüttung ist die Porosität ϵ . Sie ist das Verhältnis zwischen dem Leervolumen V_l , welches nicht durch Partikel der Schüttung eingenommen wird, und dem Volumen V der Schüttung [ebd., S. 65].

$$\epsilon = \frac{V_l}{V} = 1 - \frac{V_{p\ ges}}{V} \quad 4-4$$

Alternativ kann ϵ auch aus dem gesamten Volumen aller Partikel $V_{p\ ges}$ berechnet werden. Die Porosität von Festbettschüttungen liegt für monodisperse Kugeln in dichtester Packung bei 0,26 und für kubische Packungen bei 0,48 als Richtwert für eine Abschätzung empfiehlt Stieß $\epsilon = 0,4$ [ebd., S. 62].

Der durchströmte Hohlraum zwischen den Partikeln wird durch die Oberflächen der Partikel und die Wände des Schüttungsbehälters eingefasst. Die Tortuosität T ist das Verhältnis zwischen der Gesamtlänge des Festbetts in Strömungsrichtung und der Länge eines Strompfades durch die Festbettschüttung.

$$T = \left(\frac{L_{Strompfad}}{L_{Festbett}} \right)^2 \quad 4-5$$

Für die Bewertung der Gültigkeitsbereiche empirischer Zusammenhänge und zur Vergleichbarkeit verschieden dimensionierter Schüttungen ist das Verhältnis von Schüttungs- zu Partikeldurchmesser von Interesse. Je größer dieses Verhältnis ist, umso geringer wirken sich Wandeffekte auf den Verlauf der Strömung im Inneren des Festbetts aus.

4.1.2 Strömungen

Die Strömung eines Fluides durch einen beliebigen Strömungskanal kann zwei unterschiedliche Strömungszustände annehmen: laminar und turbulent. Im laminaren Fall wird eine Strömung als die Bewegung einzelner Fluidschichten betrachtet. Hierbei strömen Schichten mit unterschiedlicher Geschwindigkeit parallel zueinander, ohne einen relevanten Austausch von Fluidteilchen quer zur Strömungsrichtung [Gersten 1991, S. 94]. Das Geschwindigkeitsprofil einer laminaren Strömung ist in Abbildung 4-1 (a) zu erkennen. Eine turbulente Strömungssituation wird durch ein hohes Maß an stochastisch schwankenden Strömungsgrößen charakterisiert. Überlagert mit der Hauptströmung sorgen diese Schwankungen für einen intensiven Austausch von Fluidteilchen quer zur Strömungsrichtung [ebd.]. Neben den beiden oben genannten Ausprägungen der Strömungssituation existiert auch ein Bereich, in welchem der laminare in den turbulenten bzw. der turbulente in den laminaren Strömungszustand übergeht.

In Festbetschüttungen ist der Strömungszustand anders als z.B. in einem Rohr. Das durchströmte Volumen einer Schüttung besteht aus vielen einzelnen, teils miteinander verbundenen Strömungskanälen mit unregelmäßigem Querschnitt. Modellhaft wird hier oft eine Parallelschaltung vieler einzelner Röhren betrachtet, was in realen Schüttungen jedoch nur selten der Fall ist. Durch die Hohlräume einer Schüttung können sich Teile der Hauptströmungen auch quer zur hauptsächlichen Fließrichtung bewegen. Die Durchströmung von Festbetten stellt somit einen äußerst komplexen Strömungszustand dar.

Zur Charakterisierung des komplexen Strömungszustandes einer Festbetschüttung werden verschiedene Parameter benötigt. Der hydraulische Durchmesser d_h ist ein Äquivalenz-Durchmesser, mit dessen Hilfe auch nicht-runde Strömungsquerschnitte beschrieben werden können. Für diesen Fall ist d_h das Äquivalent des Durchmessers eines kreisförmigen Strömungsquerschnittes aus dem Verhältnis von Porenvolumen zur Porenoberfläche der betrachteten Poren [Stieß 2009, S. 144]. Sind Poren- und Feststoffoberflächen identisch, wie zum Beispiel bei Kugelschüttungen, so lässt sich der hydraulische Durchmesser wie folgt berechnen:

$$d_h = 4 \frac{\epsilon}{(1 - \epsilon)} \cdot \frac{1}{S_V} \quad 4-6$$

Für die Beschreibung einer polydispersen Schüttung wird der Sauterdurchmesser d_{32} herangezogen. Der Sauterdurchmesser ist der Äquivalenzdurchmesser einer monodispersen Kugelschüttung, welche die gleiche Oberfläche wie eine polydisperse Schüttung aufweist [ebd.].

$$d_{32} = \frac{6}{S_V} \quad 4-7$$

Bei der Charakterisierung von technischen Strömungen dient die dimensionslose Reynoldszahl Re zur Unterscheidung der Strömungszustände in laminar und turbulent. Der zudem als Ähnlichkeitskennzahl bezeichnete Ausdruck ist dimensionslos und erlaubt den Vergleich verschiedener Strömungssituationen

durch die Beschreibung des Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften einer Strömung [VDI-GVC 2013, S. 15].

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta} \quad 4-8$$

Wie in Gleichung 4-8 formuliert, ist die Reynoldszahl Re das Produkt aus der Dichte des Fluides ρ , der Geschwindigkeit v und einer charakteristischen Länge d im Verhältnis zur dynamischen Viskosität η . Für Strömungsvorgänge in Rohren wird der Rohrdurchmesser als charakteristische Länge und die Strömungsgeschwindigkeit im Rohr als Geschwindigkeit angenommen. Im Vergleich zu Rohren haben Festbetten eine komplexe Geometrie, bei deren Beschreibung für die Geschwindigkeit und die charakteristische Länge verschiedene Größen herangezogen werden können. Zur Charakterisierung des Strömungszustandes stellt die Interstitial Reynolds Number (Poren Reynoldszahl) als dimensionslose Kennzahl Re_i einen Zusammenhang mit festbettspezifischen Größen her [Brauer 1971a, S. 425].

$$Re_i = \frac{\rho d_p}{\eta} \cdot \frac{w_0}{\epsilon} \quad 4-9$$

Hierbei steht d_p für den Partikeldurchmesser und der Quotient aus der Geschwindigkeit im Leerrohr w_0 und der Porosität ϵ für die mittlere Geschwindigkeit der Strömung in der Schüttung. Alternativ wird die Reynoldszahl Re_s auch mit dem hydraulischen Durchmesser gebildet und berechnet sich dann, in bereits vereinfachter Form, zu:

$$Re_s = \frac{\rho d_p}{\eta} \cdot \frac{w_0}{(1 - \epsilon)} \quad 4-10$$

Die Reynoldszahl in Bezug auf den Partikeldurchmesser als charakteristische Länge wird mit:

$$Re_p = \frac{\rho d_p w_0}{\eta} \quad 4-11$$

berechnet [ebd.].

4.1.3 Berechnung des Druckverlustes

Der in dieser Arbeit betrachtete Druckverlust wird durch die technisch gelenkte Durchströmung einer zufällig strukturierten Festbettschüttung aus monodispersen Partikeln erzeugt. Dieser Druckverlust lässt sich analytisch beschreiben. Hierzu existieren jedoch unterschiedliche Modellvorstellungen in Bezug auf die Berechnung des Druckverlustes. Im Folgenden werden drei Gleichungen vorgestellt, die aus zwei unterschiedlichen Berechnungsansätzen hervorgehen. Die Gleichungen von Ergun und Brauer betrachten eine Festbettschüttung als eine Vielzahl parallel angeordneter Strömungskanäle. Der Druckverlust nach Ergun wird über die Länge einer Festbettschüttung mit den bereits bekannten Größen wie folgt berechnet [Ergun 1952, S. 89]:

$$\frac{\Delta p}{L} = 150 \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} \cdot \frac{\eta w_0}{d_p^2} + 1,75 \frac{(1 - \epsilon)}{\epsilon^3} \cdot \frac{\rho w_0^2}{d_p} \quad 4-12$$

Nach Brauer lässt sich der Druckverlust über die Länge einer Festbettschüttung, mit den ebenfalls bekannten Größen nach Gleichung 4-13 berechnen [Brauer 1971b, S. 429].

$$\frac{\Delta p}{L} = 160 \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} \cdot \frac{\eta w_0}{d_p^2} + 3,1 \frac{(1 - \epsilon)}{\epsilon^3} \cdot \frac{\rho w_0^2}{d_p} \left(\frac{\eta(1 - \epsilon)}{\rho w_0 d_p} \right)^{0,1} \quad 4-13$$

Die unterschiedlichen Faktoren in beiden Gleichungen resultieren aus der Korrelation einer großen Anzahl von empirischen Untersuchungen des Druckverlustes an unterschiedlich konfigurierten Versuchsaufbauten.

Der Druckverlust nach Molerus beruht auf dem Gedanken des vielfachen Widerstandes von einzeln umströmten Partikeln. Im Unterschied zu den oben genannten Druckverlustformeln enthält der Ansatz von Molerus nach Formel 4-14 den Einfluss der Anordnung des Festbettes in Form einer festbettspezifischen Eulerzahl [Molerus 1982, S. 12].

$$\frac{\Delta p}{\Delta L} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\rho w_0^2}{d_p} \cdot \frac{(1 - \epsilon)}{\epsilon^2} \cdot Eu_s \quad 4-14$$

Um die Anordnung des Festbetts zu beschreiben, führt Molerus ein Gitternetz ein. Für monodisperse Kugelschüttungen ist der Mittelpunkt jedes Partikels gleich dem Mittelpunkt jeder Zelle. Die Eulerzahl des Festbetts enthält, mit dem Verhältnis aus dem Abstand zwischen Partikeloberfläche und Gitterzelle δ zum Radius r der Partikel, zusätzliche geometrische Information zur Beschreibung des Strömungsraumes eines Festbettes. Für eine Kugelschüttung ergibt sich für diese Eulerzahl des Festbettes Eu_s folgende Approximationsfunktion [Molerus 1982, S. 33]:

$$Eu_s = \frac{24}{Re_i} \left(1 + 0,692 \left(\frac{r}{\delta} + 0,5 \left(\frac{r}{\delta} \right)^2 \right) \right) + \frac{4}{\sqrt{Re_i}} \left(1 + 0,12 \left(\frac{r}{\delta} \right)^{1,5} \right) + 0,4 + 0,891 \frac{r}{\delta} Re_i^{-0,1} \quad 4-15$$

Für Festbetten, deren Partikel nicht aus Kugeln bestehen, muss diese Approximationsfunktion experimentell erneut bestimmt werden.

Eine dimensionslose Beschreibung des Druckverlustes ist mit dem Reibungsbeiwert f_k möglich.

$$\frac{\Delta p}{L} \frac{d_p}{w_0 \dot{m}} \frac{\epsilon^3}{(1 - \epsilon)} = f_k \quad 4-16$$

Dabei steht \dot{m} für den Massenstrom durch die Schüttung und Re_p für die Partikelreynoldszahl. Für Schüttungen im Fall horizontaler Durchströmung ist der Reibungsbeiwert nach Ergun wie folgt formuliert:

$$f_k = 1,75 + 150 \frac{Re_p}{1 - \epsilon} \quad 4-17$$

Die Faktoren in Gleichung 4-17 wurden durch Ergun in 640 Experimenten empirisch ermittelt [Ergun 1952, S. 92]. Brauer gibt den Reibungsbeiwert in folgender Form an:

$$f_k = \frac{3,1}{Re_p^{0,1}} + \frac{160}{Re_p} \quad 4-18$$

Auch die Faktoren dieser Gleichung sind das Ergebnis einer Reihe empirischer Untersuchungen [Brauer 1971a, S. 427].

4.2 Prüfstand zur Untersuchung von Strömungen und Druckverlusten

Der in dieser Arbeit als Beispiel herangezogene Strömungsprüfstand eignet sich für Untersuchungen verschiedener verfahrenstechnischer Förder- und Strömungsvorgänge. Die Ermittlung von Pumpenkennfeldern im Zusammenspiel mit verschiedenen Fluiden ist ebenso möglich wie auch die Betrachtung der Durchströmung verschiedener Bauteile. In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus auf der Untersuchung des Druckverlustes von Festbettschüttungen wie sie in der Verfahrenstechnik für unterschiedlichste Aufgaben eingesetzt werden. Im Folgenden werden der grundlegende Aufbau dieses Prüfstandes und die Funktionsweise der verwendeten Aktoren und Sensoren erläutert sowie ein Einblick in die Bedienung und Steuerung gegeben. Weiterhin wird ein für die Untersuchung von Festbetten notwendiges Trägersystem vorgestellt.

4.2.1 Aufbau

Die Betrachtung von Pumpen und Anlagenkennlinien im Industriemaßstab erfordert das kontinuierliche Fördern großer Mengen an Flüssigkeiten. Zu diesem Zweck wurde ein Prüfstand als geschlossener und rezirkulierender Aufbau realisiert (siehe Abbildung 4-2). Die Förderung des Prozessfluides geschieht wahlweise durch eine Kreiselpumpe (A) der Firma KSB oder durch eine Seitenkanalpumpe (B) der Firma SERO. Die im Betrieb nicht benötigte Pumpe wird mit Absperrventilen vom übrigen Kreislauf getrennt. Der Prüfstand verfügt über zwei parallel geschaltete Rohrsysteme (Strömungspfad 1 und Strömungspfad 2). In Strömungspfad 1 sorgt die Drossel (D) für einen einstellbaren Druckgradienten. In Strömungspfad 2 befindet sich ein Trägersystem (C) zur Aufnahme der zu untersuchenden Festbettschüttungen mitsamt dem zugehörigen Differenzdruckmesssystem. Die Festbettschüttung ist über die Länge der Schüttung oder die Größe der Partikel veränderbar. Für einen schnellen und sicheren Austausch der Festbettschüttung oder die Umrüstung anderer Komponenten ist der gesamte Aufbau modular ausgeführt. Der Betriebspunkt des Prüfstandes ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Pumpenkennlinie mit der Anlagenkennlinie und wird über eine Veränderung dieser eingestellt. Die Anlagenkennlinie wird durch das Rohrsystem, eventuelle Einbauten in Strömungspfad 2 und die Drosselstellung in Strömungspfad 1 beeinflusst. Die Variation der Pumpenkennlinie geschieht durch die Veränderung der Drehzahl der Pumpe. Für die Untersuchung eines Festbetts in verschiedenen Betriebspunkten steuert ein PID-Regler im Computer die Massenströme der parallel betriebenen Strömungspfade durch die Vorgabe unterschiedlicher Drosselstellungen in Strömungspfad 1.

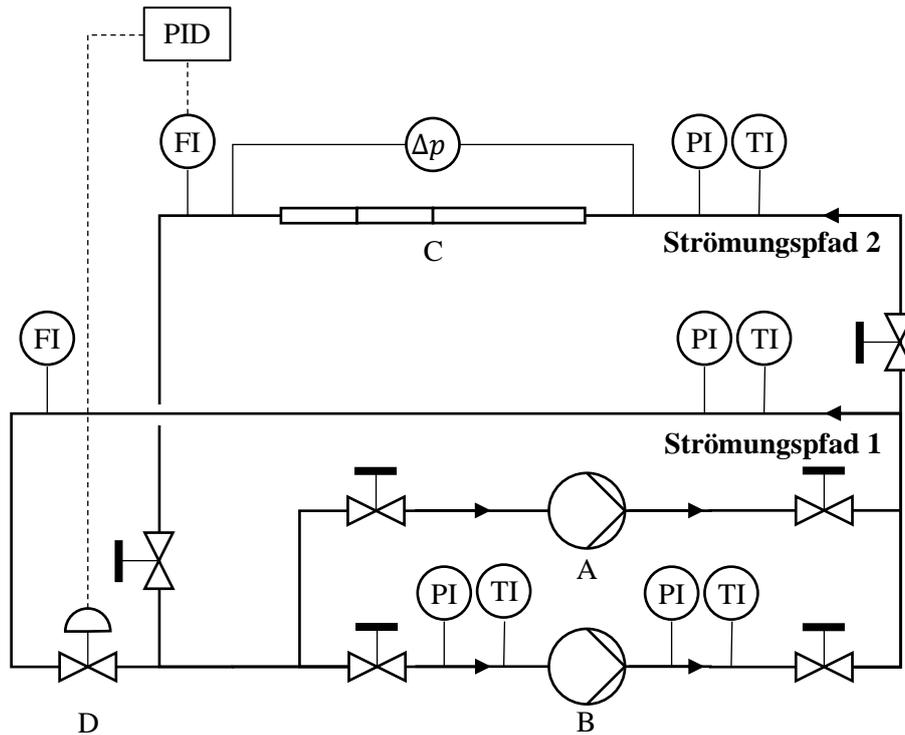


ABBILDUNG 4-2 STRÖMUNGSPRÜFSTAND ZUR UNTERSUCHUNG DES DRUCKVERLUSTES ÜBER FESTBETTSCHÜTTUNGEN MIT DEN BEIDEN PUMPEN (A) UND (B), DEM TRÄGERSYSTEM FÜR FESTBETTSCHÜTTUNGEN (C) IN STRÖMUNGSPFAD 2 UND EINER DROSSEL (D) IN STRÖMUNGSPFAD 1

Die zur Auslegung des Prüfstands festgelegten Bereiche für Druck und Temperatur entstammten der Überlegung, auch komplexe, gasbeladene Fluide fördern zu können. Die Rezirkulationsleitung ist für einen Maximaldruck von $p_{max} = 160$ bar ausgelegt. Die maximale Betriebstemperatur der Rohrleitungen liegt bei einer $T_{max} = 200$ °C, wobei je nach Temperatureinsatzgebiet eine Reduzierung des Betriebsdrucks nötig ist. In Abbildung 4-3 ist der Aufbau des Strömungsprüfstandes mit all seinen Elementen und dem Rohrsystem zu sehen.



ABBILDUNG 4-3 VERFAHRENSTECHNISCHER STRÖMUNGSPRÜFSTAND ZUR UNTERSUCHUNG VON PUMPENKENNLINIEN SOWIE DRUCKVERLUSTEN AN ROHREINBAUTEN (WIE Z.B. FESTBETTSCHÜTTUNGEN)

Der in Abbildung 4-2 vorgestellte Aufbau ermöglicht die Untersuchung von verschiedenen Aspekten verfahrenstechnischer Strömungen. Wird der Prüfstand nur über den Strömungspfad 1 betrieben (also

z.B. ohne eine Festbettschüttung), so eignet er sich für die Untersuchung von Pumpenkennfeldern. Der Betriebspunkt ist dann nur vom Rohrsystem, der Drosselstellung und der Drehzahl der Pumpe abhängig. Liegt der Fokus der Untersuchung z.B. auf dem Druckverlust über eine Festbettschüttung, wird diese in den Strömungspfad 2 eingebaut und parallel zu Strömungspfad 1 betrieben. Der Betriebspunkt ist dann zusätzlich von dem Widerstand der eingebauten Festbettschüttung abhängig. Die modulare Bauweise ermöglicht Festbettlängen von 250 mm, 500 mm, 750 mm und 1000 mm. Mit einem Schüttungsdurchmesser von 41 mm und einer minimalen Partikelgröße von 2 mm lassen sich unterschiedlichste Festbettschüttungen untersuchen. Ein druckfester Schlauch am Ende von Strömungspfad 2 erlaubt variable Längen der Festbettschüttungen und erhöht die Flexibilität für andere Einbauten, wie z.B. eine optische Messtrecke oder Strömungsgleichrichter.

4.2.2 Aktoren: Pumpen und Drossel

Aktoren sind Stellglieder einer Regelstrecke, welche steuernd oder regelnd in einen Prozess eingreifen. Dabei verändert ein Aktor die Charakteristik einer am Prozess beteiligten Komponente. Der Förderprozess im vorgestellten Prüfstand verfügt über zwei unterschiedliche Arten von Aktoren. Die beiden Pumpen des Prüfstandes dienen der Druckerhöhung und lassen sich im Bereich der jeweiligen Pumpenkennlinie betreiben sowie in ihrer Drehzahl regeln. Die Drossel in Strömungspfad 1 erzeugt einen einstellbaren Druckgradienten entsprechend einer Drosselkurve.

Zur Förderung eines Fluides stehen, abhängig von den Prozessanforderungen, eine Reihe unterschiedlicher Pumpenbauformen zur Verfügung. Die Untersuchung des Druckverlustes über Festbettschüttungen ist z.B. durch die Verwendung einer geeigneten Kreiselpumpe möglich. Kreiselpumpen werden als hydraulische Strömungsmaschinen kategorisiert und sind in der Lage, große Fördermengen bei hohen Drücken zu fördern. Dabei sind sie günstiger und zuverlässiger als vergleichbare Pumpen, die nach dem Verdrängerprinzip arbeiten [KSB 2009, S. 153]. Beide im Strömungsprüfstand zur Anwendung kommenden Pumpen gehören in die Kategorie der Kreiselpumpen, haben jedoch unterschiedliche Arbeitsbereiche.

Pumpe (A) ist eine Radialpumpe, Typ CPKCM 40-200, der Firma KSB und wird mit einer Nenndrehzahl von 1450 min^{-1} betrieben (siehe Abbildung 4-4).



ABBILDUNG 4-4 RADIALPUMPE KSB CPKCM 40-200 MIT DREHSTROMMOTOR UND EINER MAXIMALEN FÖRDERHÖHE VON 15 M BEI EINEM VOLUMENSTROM VON $7 \text{ m}^3/\text{h}$

Die einstufige Kreiselpumpe verfügt über ein Radiallaufrad mit einem Durchmesser von 200 mm. Die Förderhöhe der Pumpe (A) ist, laut Hersteller KSB, mit maximal 15 m angegeben, der maximale Volumenstrom beträgt $7 \text{ m}^3/\text{h}$ [KSB 2004, S. 2]. Das Gehäuse und die Wellendichtung der Pumpe sind für eine Druckstufe von PN10 ausgelegt. Das Fluid strömt auf der Saugseite der Pumpe horizontal in die Mitte des rotierenden Radialrades ein. Durch die Rotation des Radiallaufrades wird der Fluidströmung kinetische Energie zugeführt. Anschließend verlässt das Fluid das Laufrad senkrecht zur Antriebswelle und wird durch eine Leiteinrichtung, ähnlich wie bei einem Diffusor, verzögert. Dabei wird durch die Verzögerung ein Großteil der kinetischen Energie in statischen Druck umgewandelt, bevor das Fluid auf der Druckseite der Pumpe vertikal ausströmt [Gülich 2010, S. 39]. Im Fall der Förderung von Wasser entspricht der statische Druck der Förderhöhe.

Die Pumpe (B) im Prüfstand ist eine mehrstufige Seitenkanalpumpe und wird vom Hersteller SERO als SHP114 vertrieben. Ihre vier Stufen bestehen aus einer Vorstufe mit einem Radialrad und drei Stufen nach dem Seitenkanalprinzip. Die Seitenkanalstufen erlauben eine deutliche Steigerung der Förderhöhe im Gegensatz zu einer vergleichbar ausgelegten, mehrstufigen Radialpumpe [KSB 2009, S. 252]. Zusammen mit dem Antrieb ist die Anordnung auf eine Grundplatte montiert, wie in Abbildung 4-5 zu sehen.

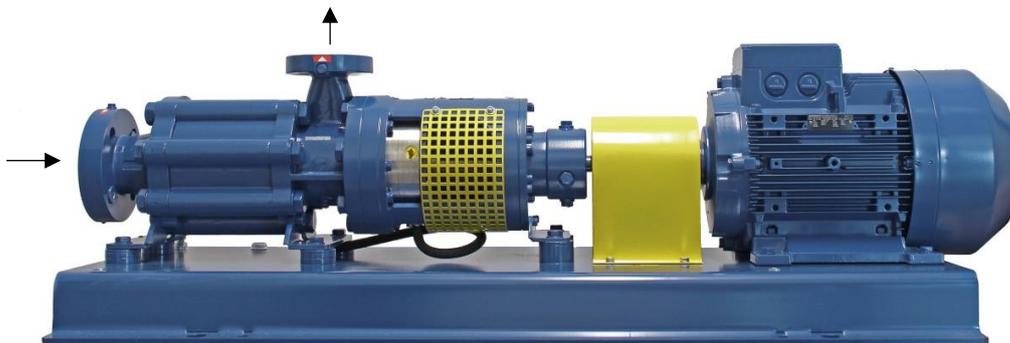


ABBILDUNG 4-5 DIE SEITENKANALPUMPE SHP 114 VON SERO, EINE VIERSTUFIGE SEITENKANALPUMPE MIT BIS ZU 300M FÖRDERHÖHE UND $3 \text{ m}^3/\text{h}$ VOLUMENSTROM BEI EINER NENNDREHZAHL VON 2900 min^{-1}

Das Prozessfluid wird der Radialrad-Vorstufe durch den saugseitigen Flansch zugeführt. Diese Vorstufe verbessert das Ansaugverhalten der Pumpe. Die eigentliche Druckerhöhung erfolgt in den drei aufeinanderfolgenden, identischen Seitenkanalstufen. Jede Seitenkanalstufe besteht aus einem Sternrad mit 24 Schaufeln und einem sogenannten Seitenkanal. Dieser Seitenkanal beginnt am Saugstutzen der Stufe, verläuft über etwa 330° entlang des Umfangs und endet am Druckstutzen der Stufe. Entlang dieser Bahn verändert sich der zur Verfügung stehende Querschnitt lediglich im Ein- und Austrittsbereich. Der Impulsaustausch zwischen Fluid und Sternrad erfolgt durch die wiederholte Zirkulation des Förderfluides zwischen dem Seitenkanal und den Schaufeln [Gülich 2010, S. 65].

Die SHP 114 ist eine vielseitig einsetzbare Pumpe. Für den Einsatz im Strömungsprüfstand empfiehlt der Hersteller einen Betriebsbereich. Bei der Nenndrehzahl von 2900 min^{-1} erreicht die Pumpe den Betriebspunkt 1 mit einer Förderhöhe von 300 m bei einem Volumenstrom von $3 \text{ m}^3/\text{h}$ (siehe Abbildung

4-6). In Betriebspunkt 2 fördert die Pumpe einen Volumenstrom von $6,5 \text{ m}^3/\text{h}$ bei einer Förderhöhe von 100 m . Der Hersteller empfiehlt den Betrieb der Pumpe innerhalb dieser beiden Betriebspunkte. Mit Veränderung der Drehzahl verändert sich der Betriebsbereich entsprechend des Affinitätsgesetzes [KSB 2009, S. 21].

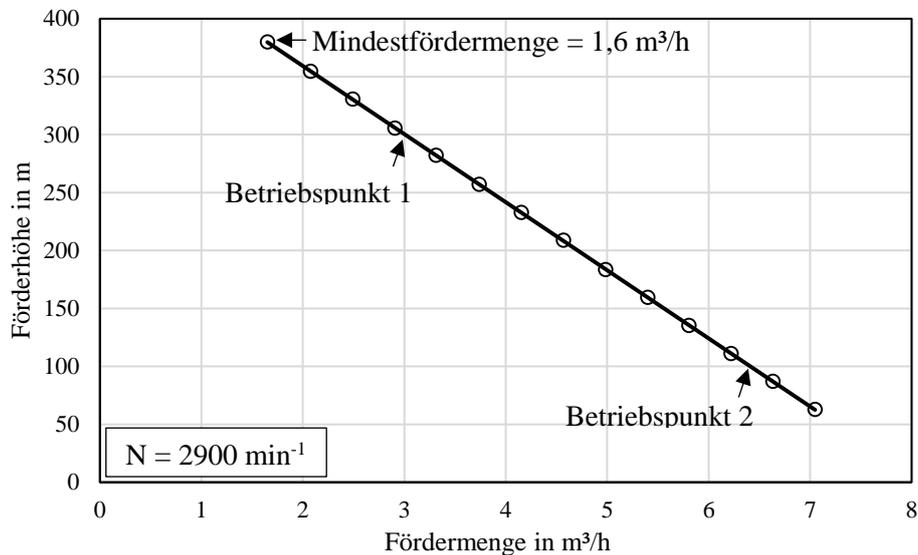


ABBILDUNG 4-6 KENNLINIE DER SEITENKANALPUMPE SERO SHP 114 FÜR 2900 MIN^{-1} NENNDREHZAHL [SERO PUMPSYSTEMS 2015, S. 1]

Der Antrieb beider Pumpen wird durch einen elektrischen Antrieb geleistet. Die KSB-Pumpe wird mit einem $0,64 \text{ kW}$ Drehstrommotor bei einer Nenndrehzahl von 1450 min^{-1} und die KSB-Pumpe mit einem 18 kW Drehstrommotor bei 2900 min^{-1} angetrieben. Die Nenndrehzahlen sind für eine Netzfrequenz von 50 Hz angegeben. Für die stufenlose Anpassung der Drehzahl muss die für den Drehstrommotor bereitgestellte Netzfrequenz verändert werden. Dies geschieht über Frequenzumrichter (FU) Typ VTL 300 der Firma Danfoss. Ein FU ermöglicht das Anfahren und Abbremsen der Pumpen mit Geschwindigkeitsrampen sowie die Steuerung der Drehzahl durch Vorgabe der Netzfrequenz zwischen 0 und 50 Hz [Danfoss 2013, S. 44]. Zugleich kann ein FU viele Betriebsparameter des angeschlossenen Motors anzeigen und ausgeben. Auf diese Weise können Betriebstemperatur, Strombedarf und Betriebsstunden direkt und Drehmoment und Drehzahl rechnerisch bereitgestellt werden. Die manuelle Bedienung der FUs und somit der angeschlossenen Pumpen ist über ein Bedienfeld am elektrischen Schaltkasten des Prüfstandes möglich [ebd., S. 30]. Wahlweise ist auch eine Sollwertvorgabe über strom- oder spannungsführende Signaleingänge möglich. Die Sollwertvorgabe der Drehzahl beider Pumpen erfolgt über ein Gleichstromsignal zwischen 0 mA und 20 mA . Für eine umfangreiche und bidirektionale Kommunikation sind beide Umrichter für diverse Bus-Kommunikationssysteme vorbereitet, sodass alle Parameter und Messwerte der FU auch an einen Computer übertragen werden können [ebd., S. 50].

Eine Drossel wird in der Verfahrens- und Prozesstechnik als Instrument zur Einstellung von Parametern in Prozessen mit flüssigen oder gasförmigen Medien verwendet. Entsprechend der jeweiligen Anwendung können über eine Drossel Volumenströme und Fluiddrücke eingestellt werden [KSB 2009, S. 60]. In einfachen Ausführungen besteht eine Drossel aus einem Element zur Versperrung des Strömungsquerschnittes. Die Versperrung ist beweglich und hat zwei Endlagen. In einer Endlage ist der Strömungsquerschnitt versperrt, sodass kein Fluid durch die Drossel fließt. Wird der Querschnitt für die Durchströmung freigegeben, so setzt zunächst ein kleiner Volumenstrom bei großem Druckgradienten ein. Bei komplett geöffnetem Strömungsquerschnitt wird die Drossel vom größtmöglichen Volumenstrom bei einem geringen Druckgradienten durchströmt. Durch die Variation des bereitgestellten Strömungsquerschnittes wird die Anlagenkennlinie beeinflusst und der Volumenstrom bzw. der Druckabfall eingestellt. Je nach Betriebspunkt ist mit dem lokalen Unterschreiten des Dampfdrucks zu rechnen, was auf Dauer zu einer Beschädigung und Undichtigkeiten an der Drossel führen kann.

Um die Anlagenkennlinie des in dieser Arbeit verwendeten Prüfstandes zu variieren, wird eine vierstufige Drossel der Firma FLOWSERVE mit z-Geometrie verwendet (siehe Abbildung 4-7).



ABBILDUNG 4-7 DROSSEL MIT VIERSTUFIGEM Z-KEGEL FÜR DEN DRUCKABBAU UND PNEUMATISCHEM STELLANTRIEB SOWIE EINEM STELLUNGSREGLER LOGIX 510SI

Der Druckabbau in vier Stufen verhindert das Unterschreiten des Dampfdrucks und erhöht somit die Lebensdauer der Drossel [Flowserve 2016, S. 5]. Ein durch einen Membranantrieb betätigter Kegel verschließt den, in vier Stufen verschlossenen, Strömungsquerschnitt der Drossel in seiner Ausgangslage. Durch eine entsprechende Sollwertvorgabe wird der Querschnitt kontinuierlich freigegeben. Dabei ist jede Stufe für einen bestimmten Öffnungsbereich des Querschnitts ausgelegt, um den Wirkungsgrad zu verbessern und die Lebensdauer der Drossel zu erhöhen [ebd., S. 10]. Das charakteristische Verhalten des Druckabbaus einer Drossel wird im Zusammenhang mit dem zugehörigen Volumenstrom als Drosselkurve beschrieben.

Die Betätigung der Drossel erfolgt über einen pneumatischen Membranstellantrieb. Dieser hebt den Kegel durch den auf eine Membran wirkenden Luftdruck. Für eine stufenlose Einstellung des benötigten

Strömungsquerschnitts, wirkt der pneumatische Druck gegen Federn, die eine Rückstellkraft auf Membran und Kegel ausüben. Ist die Kraft durch den pneumatischen Druck mit der Kraft durch die Rückstellfedern im Gleichgewicht, so ist die Position des Kegels stabil. Eine Änderung des pneumatischen Drucks führt zu einer Bewegung des Kegels. Die Ansteuerung des pneumatischen Membranstellantriebes erfolgt über einen Stellungsregler. Der Stellungsregler, Typ Logix 510si, ist direkt an der Drossel montiert und wird mit Druckluft versorgt. Die Sollwertvorgabe erfolgt elektrisch über ein Gleichstromsignal mit 4 mA bis 20 mA. Der elektrische Leistungsbedarf des Stellungsreglers wird durch den auf 4 mA angehobenen Signalpegel der elektrischen Sollwertvorgabe gedeckt [Flowserve 2016, S. 3].

4.2.3 Sensoren: Druck, Durchfluss und Temperatur

Sensoren sind Elemente einer Regelstrecke, welche die Erfassung von Prozessparametern ermöglichen. Die erfassten Prozessparameter werden für gewöhnlich in die Steuerung oder Regelung eines Prozesses einbezogen. Dabei werden Sensoren nach verschiedenen Messprinzipien und ihren unterschiedlichen Ausführungen unterschieden [KSB 2009, S. 254]. Für die Betrachtung von Betriebspunkten eines verfahrenstechnischen Strömungsprüfstandes sind Sensoren für die Erfassung von Absolut- und Differenzdruck, Volumenstrom und Temperatur nötig.

Nach DIN ISO 9906 wird ein Betriebspunkt über Förderhöhe und Volumenstrom charakterisiert. Die Auslegung vieler Armaturen und Förderorgane orientiert sich am Auslegungsfluid Wasser. In einem solchen Fall ist die Förderhöhe vereinfachend mit dem statischen Druck gleichzusetzen, welcher erzeugt bzw. überwunden wird [ISO/DIS 9906:2010, S. 10].

Der vorgestellte Versuchsaufbau verfügt über verschiedene Messsysteme zur Druckerfassung. Für die Vermessung von Pumpenkennlinien wird der Druck am Druckstutzen der Pumpe über den geförderten Volumenstrom aufgetragen [ISO/DIS 9906:2010, S. 37]. Für die Messung dieses Drucks kommen Absolutdruckaufnehmer der Firma Gneuß zur Anwendung. Die Sensoren des Typs DAI sind ursprünglich für den Bereich der Polymerverarbeitung entwickelt und verfügen über eine gute thermische Entkopplung sowie einen integrierten Messverstärker mit Signalaufbereitung [Gneuß GmbH 2012, S. 1].

Die DAI Drucksensoren (Grafik a.) in Abbildung 4-8) werden senkrecht in spezielle Flanschblätter (Messflansch) des Prüfstandes eingeschraubt und schließen mit ihrer Sensormembran nahezu plan mit der Wand des fluidführenden Rohres ab (Grafik b.) in Abbildung 4-8). Der auf diese Wand wirkende Druck wird über eine Membran an ein Übertragungsfluid weitergegeben und über eine Kapillare an eine zweite Membran im Gehäuse des Messverstärkers übertragen. Die Belastung der Membran wird dort über eine Anordnung von Dehnungsmessstreifen ausgewertet und mit Hilfe einer Widerstandsmessbrücke in ein elektrisches Signal umgewandelt.

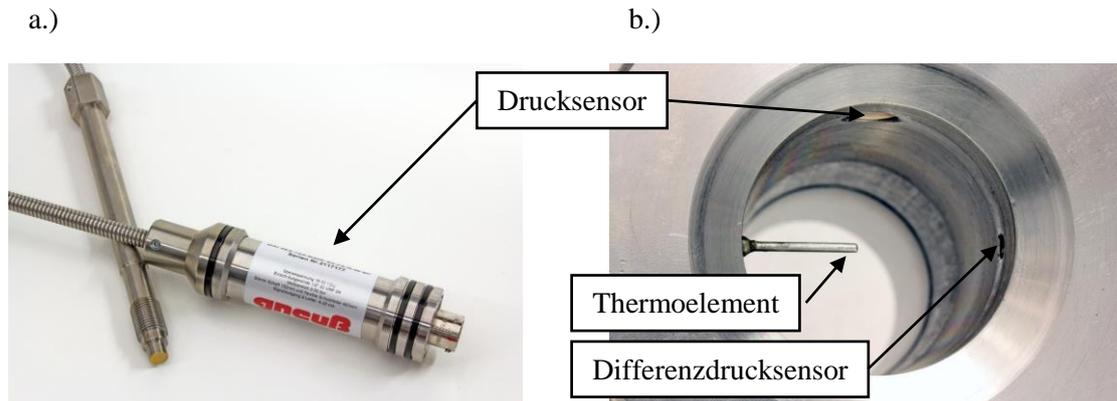


ABBILDUNG 4-8 GRAFIK A.) ZEIGT EINEN ABSOLUTDRUCKAUFNEHMER DER FIRMA GNEUß, MODELL DAI MIT MEMBRAN, DRUCKÜBERTRAGUNGSSYSTEM UND MESSVERSTÄRKER, GRAFIK B.) ZEIGT DEN BLICK AUF DAS INNERE EINES MESSFLANSCHS MIT BOHRUNGEN FÜR DRUCKSENSOR, EINEM THERMOELEMENT UND EINER ZUSÄTZLICHEN BOHRUNG Z.B. FÜR EINEN DIFFERENZDRUCKSENSOR

Die Energieversorgung des Messverstärkers erfolgt durch die Anhebung des Ausgangssignales auf den Bereich zwischen 4 mA und 20 mA [ebd., S. 2]. Zur Anwendung kommen je zwei Absolutdruckaufnehmer mit einem Druckbereich von 0 bar – 50 bar und einer Genauigkeit von +/- 0,25 bar (vor und hinter der Pumpe) sowie 0 bar – 200 bar und einer Genauigkeit von +/- 1 bar (Strömungspfad 1 und 2).

Für die Erfassung des Druckverlustes über eine Festbettschüttung wird ein deutlich genaueres Messprinzip benötigt. Der erwartete Druckverlust bei kleinen Volumenströmen liegt im Bereich der Unsicherheit der oben vorgestellten Sensoren. Die maximal erzeugbare Druckdifferenz liegt mit Einsatz der SERO SHP114 bei 300 m Förderhöhe bzw. 30 bar. Das Rohrsystem des Prüfstandes ist für einen zulässigen statischen Druck von $p_{max} = 160$ bar ausgelegt. Die kleinste, noch zu erfassende Druckdifferenz während der Untersuchung des Druckverlustes über Festbettschüttungen wird zwischen 4 mbar und 12 mbar angesetzt. Sensoren, welche nach dem absoluten Messprinzip arbeiten und einen Arbeitsbereich bis 160 bar aufweisen, liefern bei einer Genauigkeit von 0,25 % eine Abweichung von +/- 400 mbar. Bei der Verwendung von zwei Absolutdrucksensoren zur Erfassung eines Differenzdrucks addiert sich jedoch diese Ungenauigkeit im ungünstigsten Fall. Die präzise Messung von Druckdifferenz bei hohen statischen Drücken erfordert ein alternatives Messsystem.

Der Differenzdrucksensor aus der FKC-Reihe von Fuji Electric ist für einen Messbereich zwischen $\Delta p_{min} = 3$ bar und $\Delta p_{max} = 30$ bar bei einem statischen Druck von $p_{max} = 160$ bar ausgelegt [Fuji Electric 2014, S. 9]. Der Sensor wird durch druckfeste Schläuche mit je einem Messflansch vor (Hochdruck) und hinter (Niederdruck) der Festbettschüttung verbunden (siehe Grafik b.) in Abbildung 4-9). In diese Anordnung misst der Sensor den Unterschied des statischen Drucks, der durch die Durchströmung der Festbettschüttung entsteht. Durch die Verbindungsschläuche stellt sich das bei der Durchströmung entstehende Druckgefälle über der Festbettschüttung auch in der Messkammer des Differenzdrucksensors ein.

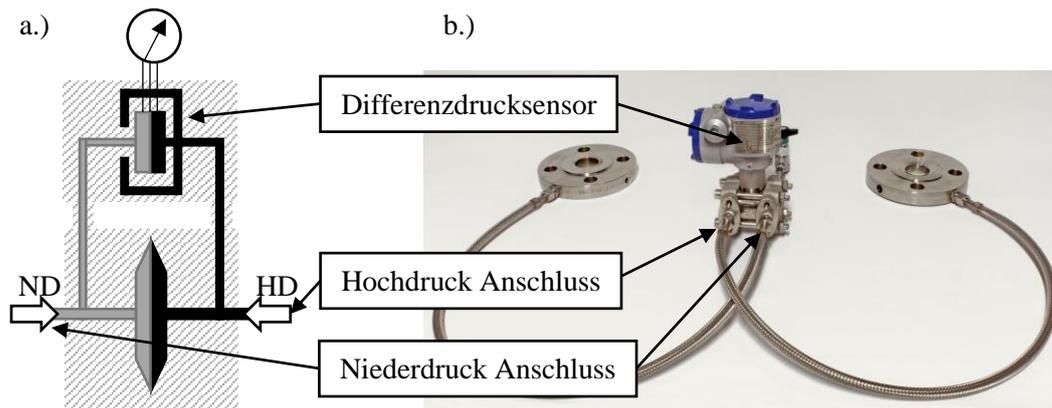


ABBILDUNG 4-9 MESSKAMMER DES MIKRO-KAPAZITÄTSSENSOR (GRAFIK A.) FÜR DIE AUSWERTUNG VON DIFFERENZDRÜCKEN [FUJI ELECTRIC 2014, S. 9], EINBAUFERTIGER DRUCKSENSOR FKCW38 MIT ANSCHLUSSSCHLÄUCHEN UND ZWEI MESSFLANSCHEN (GRAFIK B.)

Hier befindet sich eine Membran und eine kapazitive Sensoranordnung [Fuji Electric 2014, S. 9]. Der Sensor aus der FKC-Reihe detektiert Druckdifferenzen, indem er Kapazitätsänderungen der Messkammer erfasst. Die Kapazität wird in Folge der Verformung zweier Kondensatorflächen durch den wirkenden Differenzdruck ausgelöst (siehe Grafik a in Abbildung 4-9). Diese Kapazitätsänderung wird digitalisiert und anschließend durch einen Mikroprozessor verarbeitet. Für das Modell FKCW38 ist das Einstellen der Nullposition also der Ausgangslage für die Differenzmessung und die Anpassung der Messskala auf eine beliebige Spanne der Druckdifferenz zwischen $\Delta p_{min} = 3 \text{ bar}$ und $\Delta p_{max} = 30 \text{ bar}$ möglich. Die variable Messspanne optimiert die Auflösung des Ausgangssignals im Bereich von 4 mA bis 20 mA für den jeweiligen Anwendungsfall [ebd., S. 17–18]. Im vorliegenden Fall wurde der Differenzdrucksensor mit einem Referenzdrucksensor des Typ 765 der Firma Paroscientific (Messgenauigkeit von $\pm 0,008 \%$) auf die Spanne von 0 bar bis 10 bar kalibriert. In dieser Spanne ist eine Genauigkeit von $\pm 12 \text{ mbar}$ gegeben. Die Installation des Differenzdrucksensors ist so flexibel gestaltet, dass das Messsystem entlang des Strömungspfades 2 frei positioniert werden kann.

Für die Charakterisierung eines Betriebspunktes nach DIN ISO 9906 wird neben dem Druck bzw. der Förderhöhe auch der geförderte Volumenstrom herangezogen [ISO/DIS 9906:2010, S. 8]. Die am Strömungsprüfstand hierfür zur Anwendung kommende Technik beruht auf der Erfassung des Massendurchflusses mit Hilfe der Corioliskraft. Der Volumenstrom wird anschließend über die Dichte des geförderten Fluides berechnet. Der in Kapitel 4.2.1 vorgestellte Aufbau verfügt über zwei in ihrer Funktionsweise identische Messvorrichtungen (Strömungspfad 1 und 2), welche sich lediglich in ihrem Messbereich unterscheiden. Beide Sensoren sind Teil des Rohrsystems und werden von dem Prozessfluid durchströmt.

Der allgemeine Aufbau des Massendurchflusssensors besteht aus einem Omega-förmigen Rohrabschnitt, wahlweise aus einer oder zwei Rohrschleifen, welche seriell bzw. parallel verlaufen können. Diese Rohrschleife wird mittels elektromagnetischer Spulen zu einer Torsionsschwingung angeregt, sodass sich eine konstante Grundschwingung einstellt [Rheonik GmbH 2004, S. 2]. Diese Schwingung

wird durch zwei induktive Sensoren erfasst und ist für den nicht durchströmten Fall gleichförmig. Das Durchströmen der Rohrschleife oder die Veränderung der Temperatur der Rohrschleife beeinflussen diese Grundschiwingung. Der Temperatureinfluss auf das E-Modul ist unerwünscht und wird über eine integrierte Temperaturmessung kompensiert [Rheonik GmbH 2004, S. 3]. Die Durchströmung der schwingenden Rohrschleife bewirkt ein Taumeln des Rohrabschnittes durch die auftretende Corioliskraft. Dies sorgt für eine Frequenzverschiebung der Schwingung im Vergleich zur Grundschiwingung. Die Abweichung der resultierenden Schwingung zur Grundschiwingung ist direkt proportional zum vorherrschenden Massenstrom [ebd.]. Nach diesem Prinzip lassen sich Massenströme von Flüssigkeiten und Gasen über einen großen Einsatzbereich hinweg erfassen.

Der in Strömungspfad 1 eingebaute Durchflusssensor, Typ Rheonik RHM 20, verfügt über einen Messbereich bis 300 kg/min bei Temperaturen zwischen - 45 °C bis + 210 °C. Der für die Untersuchung der Festbetschüttung in Strömungspfad 2 installierte Sensor des Typs Rheonik RHM 06 hat einen Messbereich bis 10 kg/min bei Temperaturen von -20 °C bis +120 °C. Beide Geräte haben eine Genauigkeit von +/- 0,5 % bei einer Skala von 50:1 (300 kg/min bis 6 kg/min für RHM 20) und +/- 0,2 % bei einer Skala von 20:1 (300 kg/min bis 15 kg/min für RHM 20). Die Messelektronik gibt ein analoges Gleichstromsignal von 4 mA bis 20 mA aus.

Verfahrenstechnische Prozesse, wie die betrachtete Vermessung des Druckverlustes über eine Festbetschüttung, werden zum Teil mit stark temperaturabhängigen Fluiden betrieben. Zur Berücksichtigung dieses Einflusses ist der in Kapitel 4.2.1 vorgestellte Prüfstand mit Temperatursensoren an verschiedenen Stellen des Rohrsystems ausgestattet. Das verwendete Messprinzip beruht auf dem Seebeck-Effekt. Dieser Effekt beschreibt die Erzeugung einer thermoelektrischen Spannung in Abhängigkeit der Temperatur bestimmter metallischer Materialpaarungen [Transmetra GmbH 2010, S. 4]. Temperatursensoren dieser Art heißen Thermoelemente und werden mit standardisierten Materialpaarungen für unterschiedliche Einsatzbereiche hergestellt.



ABBILDUNG 4-10 THERMOELEMENT TYP K, EINGELÖTET IN EIN HOCHDRUCKROHR MIT SCHNEIDRINGVERSCHRAUBUNG SOWIE BLINDSTOPFEN ZUM VERSCHLIEßEN UNGENUTZTER ANSCHLÜSSE AM MESSFLANSCH.

Die verwendeten Temperatursensoren sind Thermoelemente vom Typ K (NiCr-Ni) und haben in Klasse 1 eine Genauigkeit von $\pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ in einem Bereich zwischen $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ und $+1000 \text{ }^\circ\text{C}$ [Transmetra GmbH 2010, S. 1]. Der Einbau der Thermoelemente in den Rohrkreislauf der Anlage geschieht über die Verwendung eines Hochdruckrohres und der entsprechenden Verschraubung (siehe Abbildung 4-10), welche analog zu den Absolutdrucksensoren seitlich in einen Messflansch geschraubt werden (siehe Grafik b.) in Abbildung 4-8).

4.2.4 Trägersystem für Festbettschüttungen

Die in Kapitel 4.1 vorgestellte Untersuchung des Druckverlustes über Festbettschüttungen erfordert die Integration einer Schüttung aus einzelnen Partikeln in den Rohrkreislauf des Prüfstandes. Wie in Kapitel 4.2.1 vorgestellt, ist hierfür der Strömungspfad 2 des Versuchsaufbaus vorgesehen. Die Partikel des zu untersuchenden Festbetts müssen für eine gleichbleibende Struktur der Schüttung stabil im Rohrsystem installiert sein. Weiterhin ist eine sichere Installation im Rohrsystem notwendig, um Anlagekomponenten, insbesondere die Pumpen, vor Schäden zu schützen. Zugleich wird das Ziel verfolgt, größtmögliche Flexibilität bei der Konfiguration der Festbettschüttung (Länge und Partikeldurchmesser) zu haben. Entsprechend dieser Anforderungen wurde ein modulares Trägersystem für Festbettschüttungen entwickelt. Für die Variation verschiedener Festbettlängen stehen Rohrelemente in unterschiedlichen Längen zur Verfügung (siehe Grafik a.) in Abbildung 4-11). Durch die Kombination von zwei 250 mm und einem 500 mm Rohrstücke können Festbettlängen von 250 mm, 500 mm, 750 mm oder 1000 mm erzeugt werden. Das Trägersystem erlaubt die kleinste Partikelgröße von 2 mm und ermöglicht die Konfiguration vier unterschiedlicher Schüttungslängen. Das Festbett hat mit 41 mm den Durchmesser einer DN 40-Rohrleitung und wird auf beiden Seiten durch je ein Lochblech mit einer Lochgröße von 1,1 mm begrenzt (siehe Grafik b.) in Abbildung 4-11).

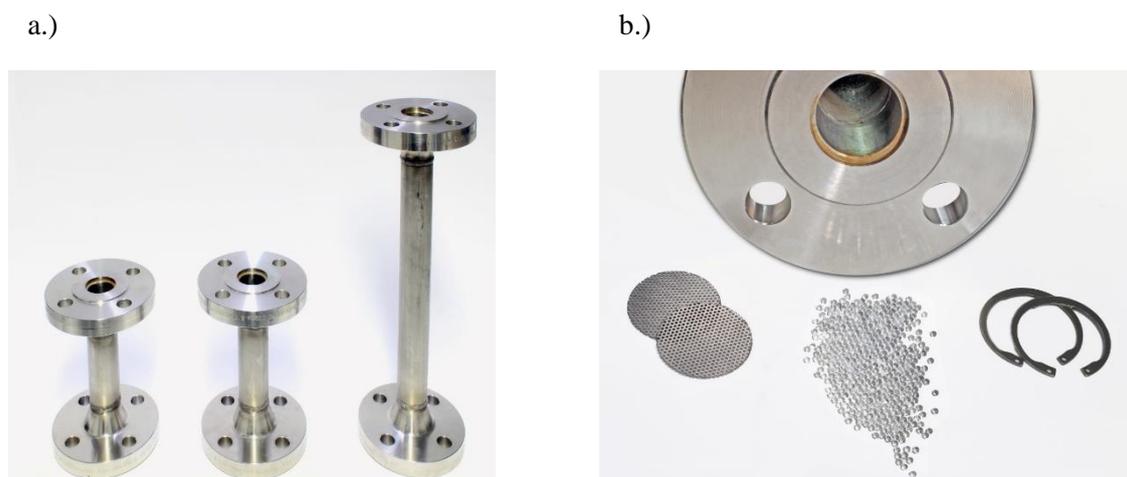


ABBILDUNG 4-11 GRAFIK A.) ZEIGT DIE ROHRELEMENTE MIT 250 MM BZW. 500 MM LÄNGE GRAFIK B.) ZEIGT DIE KOMPONENTEN ZUR FIXIERUNG EINES FESTBETT BESTEHEND AUS LOCHBLECH, GLASKUGELN UND SICHERUNGSRINGEN

Bei den Partikeln des Festbetts handelt es sich um Glaskugeln, wie sie für die Verhinderung von Siedeverzug im Laborumfeld verwendet werden [Römpf 2017]. Die Glaskugeln können einfach in

ausreichender Menge und definierten Größen erworben werden, lassen sich geometrisch gut beschreiben und ermöglichen eine stabile Festbettschüttung [Brauer 1971a, S. 401]. Die im Folgenden zur Anwendung kommenden Partikel haben einen Durchmesser von 3 mm und werden zu einem monodispersen Festbett mit zufälliger Struktur verdichtet.

Für die Einrichtung des Festbetts wird der Strömungspfad 2 im Kreislauf der Versuchsanlage abgesperrt, entleert und ausgebaut. Die Rohrelemente werden dann zur gewünschten Länge zusammengeschaubt. Das Trägersystem wird zunächst einseitig durch ein Lochblech gesichert und anschließend durch das Einschütten der Partikel befüllt. Für eine möglichst geringe Porosität wird die Schüttung während des Befüllens durch Vibration verdichtet. Durch Anbringen des zweiten Lochblechs wird die Schüttung fixiert. Nach Herstellung der gewünschten Schüttungskonfiguration werden die vorbereiteten Rohrelemente eingebaut und die Absperrorgane zu den angrenzenden Abschnitten geöffnet. Der Strömungspfad 2 muss nun mit dem Prozessfluid befüllt und anschließend entlüftet werden.

4.2.5 Bedienkonzept als lokales Labor

Die Bedienung und der Betrieb des Versuchstands erfolgen über verschiedene Komponenten. Ein Teil dieser Komponenten muss manuell bedient werden. In diese Kategorie gehören die manuellen Absperrventile vor und hinter den jeweiligen Pumpen sowie zu Anfang und zum Ende von Strömungspfad 2. Die Ventile werden beim Befüllen oder Ablassen des Prozessfluids sowie bei der Entlüftung eingesetzt. Die Absperrvorrichtungen ermöglichen Arbeiten an diesem Teilabschnitt, unabhängig vom übrigen Prüfstand und werden im regulären Messbetrieb nicht benötigt. Der andere Teil der notwendigen Komponenten zur Bedienung des Prüfstandes ist eine Kombination verschiedener elektrischer Systeme. Die Grafik in Abbildung 4-12 zeigt die entsprechenden Abhängigkeiten dieser Systeme.

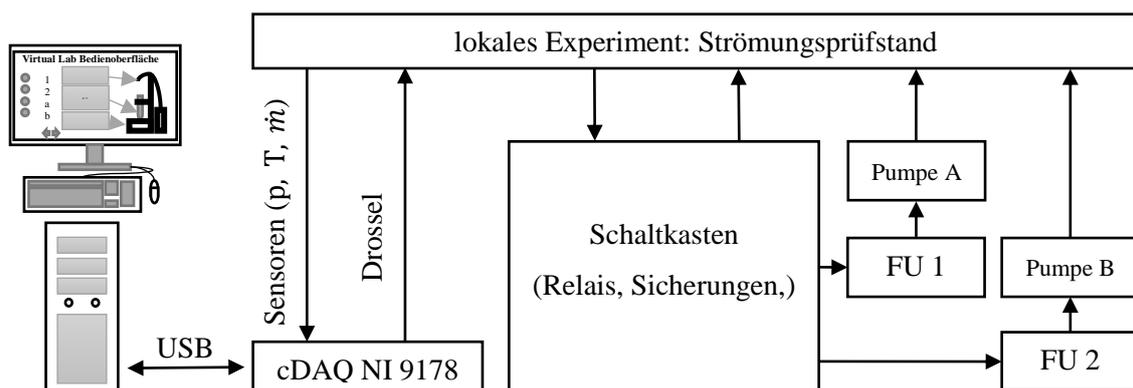


ABBILDUNG 4-12 SIGNALPLAN DER ELEKTRISCHEN SYSTEME FÜR DEN LOKALEN LABORBETRIEB

Ein manuell bedienter Schaltkasten stellt die notwendige Infrastruktur zur Verfügung, um die elektrischen Verbraucher für die Messungen ein- bzw. nach Ende einer Messung wieder auszuschalten (siehe Abbildung 4-13).

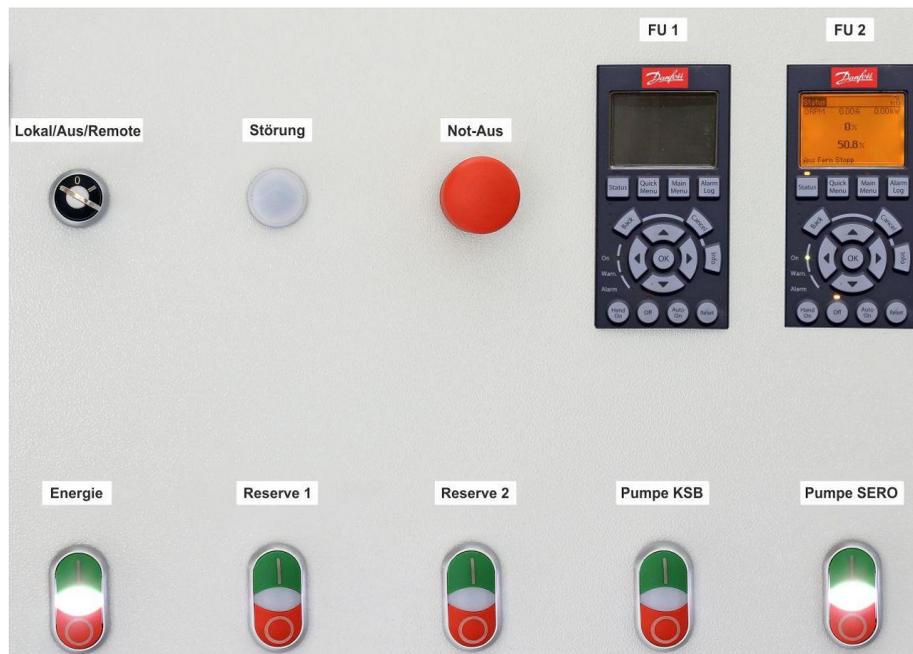


ABBILDUNG 4-13 SCHALTKASTEN ZUR KONTROLLE DER ELEKTRISCHEN ANLAGEN MIT DEN BEDIENFELDERN DER FREQUENZUMRICHTER (FU 1 UND FU2) FÜR DIE BEIDEN PUMPEN

Auch ein System zur Notabschaltung durch Not-Aus-Schalter entlang des Prüfstandes ist hier integriert. Zu den vorgesehenen Verbrauchern gehören in diesem Fall die grundsätzliche Spannungsversorgung der Prüfstands-Peripherie (wie. z.B. Sensoren oder Hilfsaggregate) und je ein Frequenzumrichter (FU 1 und FU 2) für die KSB-Pumpe (Pumpe A) sowie für die SERO-Pumpe (Pumpe B). Für die Bedienung beider FU ist auf der Vorderseite des Schaltkastens ein Bedienfeld mit grafischer Anzeige installiert. Hier wird die gewünschte Drehzahl der jeweiligen Pumpen eingestellt.

Für Messungen am Prüfstand wird ein Labor-PC mit standardmäßiger Hardwareausstattung, wie auch für Büroanwendungen üblich, verwendet. Zur Gestaltung des Kontrollprogramms und der Bedienoberflächen kommt die Entwicklungsumgebung LabVIEW zum Einsatz. In der Kombination aus LabVIEW und passender Schnittstellenhardware können alle Prozessparameter erfasst, aufbereitet und dargestellt werden. LabVIEW ist eine von der Firma National Instruments (NI) entwickelte Software, die grafische Programmierung nach dem Datenflussprinzip erlaubt. Es liegt der Gedanke zugrunde, einen möglichst intuitiven Zugang zu individuellen Programmen zu ermöglichen, die als Virtual Instruments (VI) beliebig verknüpft werden können [Georgi und Metin 2011, S. 22]. Dabei besteht ein LabVIEW-VI immer aus einem Frontpanel mit den Bedienelementen und Anzeigen sowie einem Blockdiagramm mit der dazugehörigen Verarbeitungslogik. Für den Strömungsprüfstand wurde eine Bedienoberfläche auf Basis einer Abbildung des Anlagenschemas erstellt. Hier sind Anzeigeelemente, z.B. für Druck und Temperatur, und Bedienelemente, z.B. die Einstellung der Pumpendrehzahl, an den entsprechenden Stellen des Anlagenschemas platziert.

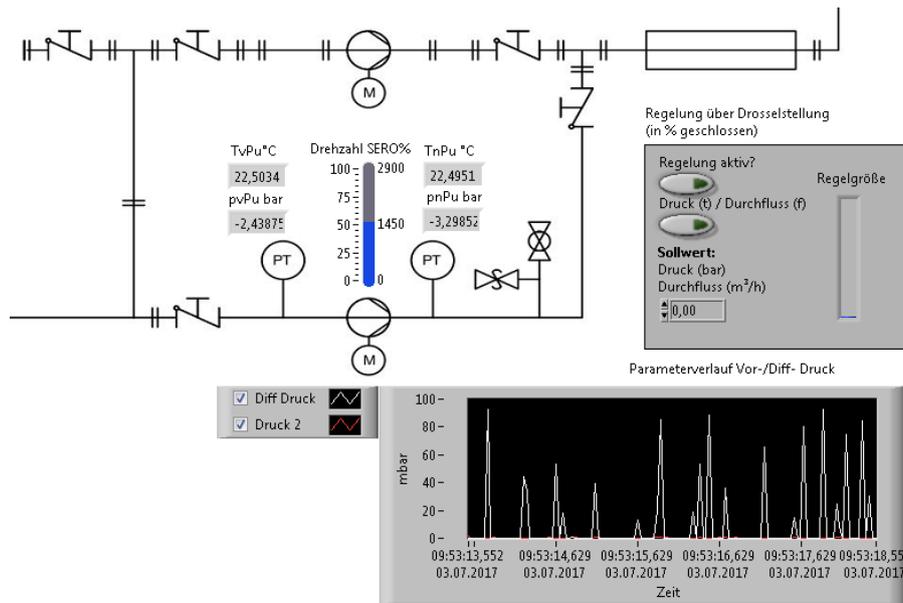


ABBILDUNG 4-14 AUSSCHNITT DER LABVIEW BEDIENBEREICHE MIT SCHIEBEREGLER ZUR DREHZAHLEINSTELLUNG DER SERO PUMPE, ANZEIGE FÜR DRUCK UND TEMPERATUR, DEN BEDIENELEMENTEN DES PID REGLERS UND EINEM SIGNALGRAPHEN ZUR ANZEIGE DES ABSOLUT- UND DIFFERENZDRUCKS IN STRÖMUNGSPFAD 2

Ein Ausschnitt der Bedienoberfläche ist in Abbildung 4-14 zu sehen. Diese Art der Gestaltung von Bedienoberflächen ist für technische Prozesse üblich. Sie erlaubt das schnelle Erfassen der Zusammenhänge zwischen den angezeigten Messwerten und den Benutzereingaben.

Um die Kommunikation zwischen Labor-PC und Versuchsanlage zu realisieren, wird eine modulare Datenerfassung der Firma National Instruments als Hardwareschnittstelle verwendet. Das verwendete compact-Data-Acquisition-System (cDAQ) stellt Steckplätze für unterschiedliche Module zur Erfassung und Ausgabe verschiedenster Mess- und Steuerungsgrößen zu Verfügung. Diese können in passenden Chassis nach Belieben einzeln betrieben oder mit vier bis acht Modulen kombiniert werden. Die Kommunikation zwischen Chassis und Rechner erfolgt wahlweise über USB oder Ethernet.

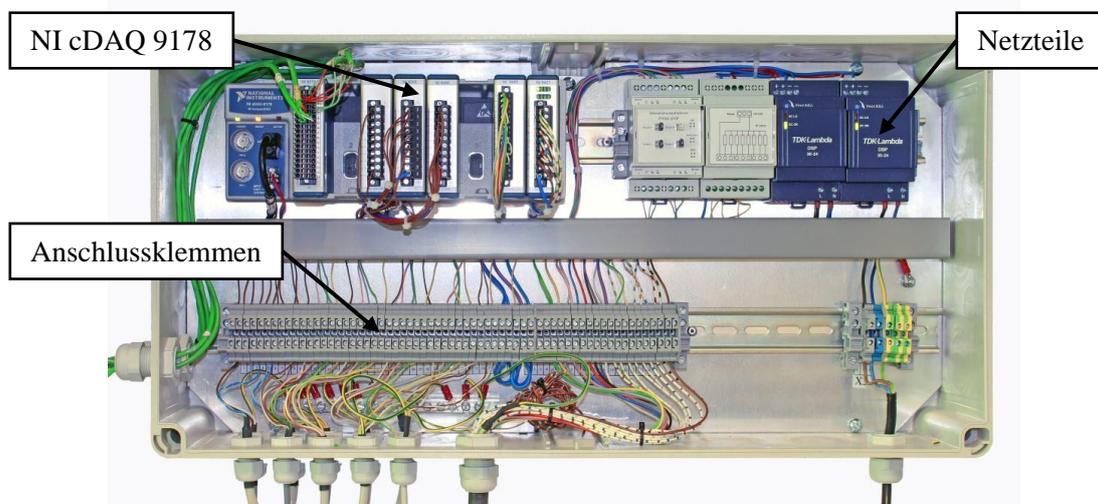


ABBILDUNG 4-15 CHASSIS NI cDAQ 9178 MIT SECHS MODULKARTEN ZUR SIGNALEIN- UND AUSGABE SOWIE NETZTEILE UND ANSCHLUSSKLEMMEN FÜR SENSOREN UND AKTOREN

Für den in dieser Arbeit vorgestellten Versuchsaufbau kommt ein NI cDAQ 9178-USB Chassis mit acht Steckplätzen zum Einsatz. Das Chassis beherbergt sechs Module für die Analog-Digital-Wandlung der Signaleingabe bzw. Digital-Analog-Wandlung der Signalausgabe (siehe Abbildung 4-15).

Die verwendeten Module eignen sich für einen bestimmten Signaltyp innerhalb einer definierten Signalspanne. In Tabelle 4-1 werden die in Kapitel 4.2.2 und 4.2.3 beschriebenen Sensor- und Aktorsignale den verwendeten Modulen zugeordnet.

TABELLE 4-1 NI MODULE FÜR DIE SIGNALEIN- UND AUSGABE IM LOKALEN BETRIEB MIT IHREN ENTSPRECHENDEN SIGNALFORMEN

Modul	Signalform	Sensor/Aktor
NI 9203	4 mA bis 20 mA	4 x Drucksensor DAI, Differenzdruck Sensor FKC
NI 9203	4 mA bis 20 mA	2 x Massendurchflusssensoren RHM
NI 9213	-80 mV bis +100 mV	6 x Thermoelemente Typ K
NI 9265	0 mA bzw. 4 mA bis 20 mA	Z-Drossel

Durch die Verwendung des NI cDAQ-Systems ist eine flexible Anpassung oder Erweiterung der Signalein- und ausgabe möglich. Die Integration der cDAQ-Hardware in LabVIEW geschieht durch einen DAQ-Assistenten. Der DAQ-Assistent erlaubt die einfache Verwaltung aller Signalströme, die Zuweisung der passenden Skalen [Georgi und Metin 2011, S. 345–346] und eine dokumentierte Kalibrierung der Sensoren.

4.3 Erweiterung des Prüfstands zum remote Experiment

Der Strömungsprüfstand wurde zunächst für den lokalen Betrieb eingerichtet. In einem zweiten Schritt wird der Prüfstand nun zu einem remote Labor erweitert. Bei der Entwicklung kommerzieller, fernbedienbarer Systeme wird ein nicht geringer Teil der Aufmerksamkeit auf die Sicherheit und Robustheit des remote Systems gerichtet. Die Robustheit bezieht sich hierbei nicht ausschließlich auf eine mechanische Belastung, sondern insbesondere auch auf die Interaktion mit der realen, komplexen und sehr individuellen Umwelt, in der diese fernbedienten Systeme funktionieren müssen. In diesem Kontext sind, besonders für remote Labore, grundlegende Fragen nach Personenschutz, Zuverlässigkeit, Schutz gegen Fehlbedienung und Systemschutz zu klären. Der Letzte Aspekt ist besonders wichtig, wenn ein remote Labor Teil eines größeren Gesamtsystems ist, wie z.B. im Rahmen des VRL-Angebotes. In diesem Fall darf der Ausfall eines einzelnen Labors nicht die Verfügbarkeit und Stabilität des übrigen Angebotes beeinflussen. Oft stehen diese Aspekte in einem Spannungsfeld aus Sicherheit und Komfort. Anders als bei fernbedienbaren Produkten für den Endbenutzer in der freien Wirtschaft werden remote Labore jedoch in viel kleinerem Rahmen entwickelt und eingesetzt. Dies bringt zusätzlich den Punkt der Machbarkeit in das Spannungsfeld ein. Die notwendigen Modifikationen des vorgestellten Prüfstandes für den remote Betrieb sind in vier Bereiche aufgeteilt. Nach der Aufnahme des Ausgangszustands werden die notwendigen Modifikationen im Bedienkonzept, dem mechanischen Aufbau, den elektrischen Systemen und dem Labor-PC inkl. des Kontrollprogrammes erläutert.

Das in Kapitel 4.2 beschriebene Bedienkonzept ist für den lokalen Betrieb konzeptioniert. In diesem Fall wird der Prüfstand durch den Nutzer im Labor bedient. Die Zielsetzung für das remote Labor sieht nun einen unabhängigen remote Betrieb vor, so dass der Prüfstand durch den Nutzer von einem beliebigen, internetfähigen PC aus bedient wird. Durch die Verwendung des Labor-PCs zur Anzeige der Messdaten liegt ein Teil der für ein remote Labor benötigten Daten bereits in geeigneter Weise vor. Für den remote Betrieb des Prüfstandes müssen verschiedene Aspekte an die neue Situation angepasst werden, um die Abwesenheit einer Person zur lokalen Bedienung des Prüfstandes zu kompensieren. Die betrachteten Aspekte sind in den folgenden Unterkapiteln aufgeführt.

4.3.1 Modifikation des Bedienkonzeptes

Der Versuchsstand wird über einen Schlüsselschalter am Schaltkasten für den remote Betrieb freigegeben. Das einmalige Einschalten der Hauptversorgung und das eventuelle Quittieren von Störungen oder Not-Aus-Meldungen versetzen den remote Prüfstand in Bereitschaft. Ab diesem Zeitpunkt erfolgt die komplette Kontrolle des Prüfstandes durch den Labor-PC über das Internet. Durch zwei zusätzliche cDAQ-Module sind der Schaltkasten und die FUs mit dem Labor-PC verbunden, wie in Abbildung 4-16 zu sehen.

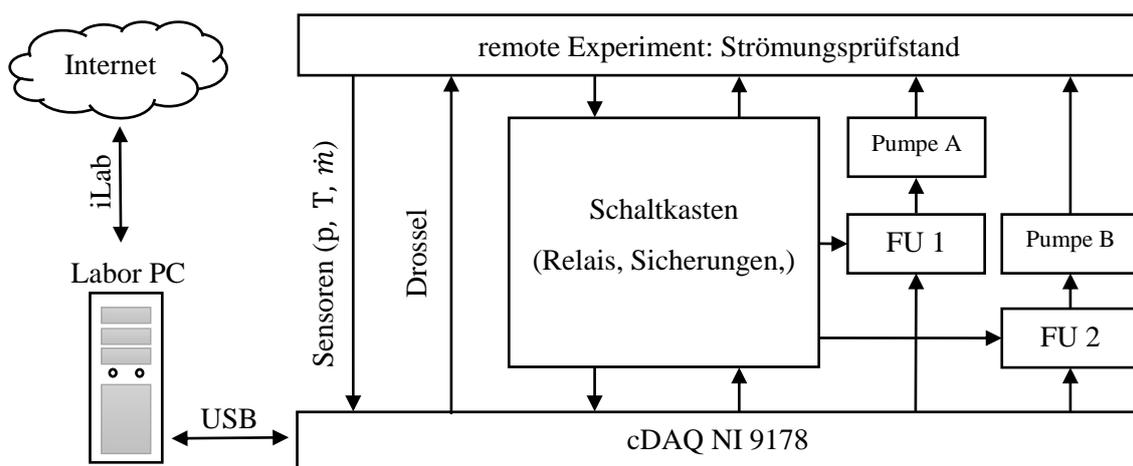


ABBILDUNG 4-16 SIGNALPLAN DER ELEKTRISCHEN KOMPONENTEN FÜR DEN REMOTE BETRIEB, HIER ERFOLGT DIE STEUERUNG DES PRÜFSTANDS UND ALL SEINER KOMPONENTEN AUSSCHLIEßLICH DURCH DEN LABOR-PC ÜBER DAS INTERNET

Über die cDAQ-Module NI 9485 und NI 9421 kommuniziert der Labor-PC nun mit dem Schaltkasten und gibt über das Modul NI 9265, neben dem Sollwert für die Drossel, auch die Sollwerte für die Drehzahlen der KSB oder SERO Pumpe vor (siehe Tabelle 4-2). Die parallele Anordnung der beiden Pumpen im Rohrsystem verhindert den simultanen Betrieb eben dieser. Die unterschiedlichen Betriebsbereiche führen im simultanen Betrieb zu Kurzschlussströmen und würden die KSB Pumpe auf Grund der geringeren Druckstufe beschädigen.

TABELLE 4-2 ERWEITERUNG DER NI MODULE FÜR DIE SIGNALEIN- UND AUSGABE IM REMOTE BETRIEB MIT IHREN ENTSPRECHENDEN SIGNALFORMEN

Modul	Signalform	Sensor/Aktor
NI 9203	4 mA bis 20 mA	4 x Drucksensor DAI, Differenzdruck Sensor FKC
NI 9203	4 mA bis 20 mA	2 x Massendurchflusssensoren RHM
NI 9213	-80 mV bis +100 mV	6 x Thermoelemente Typ K
NI 9265	0 mA bzw. 4 mA bis 20 mA	Z-Drossel, 2 x Frequenzumrichter (remote)
NI 9485	12 V TTL	Schaltschrank Relais, Betätigung (remote)
NI 9421	12 V TTL	Schaltschrank Relais, Abfrage (remote)

4.3.2 Modifikation der mechanischen Systeme

Der mechanische Aufbau des Versuchsstandes eignet sich für den remote Betrieb und wurde nicht gesondert angepasst. Bereits bei der Planung des Versuchsstandes für den lokalen Betrieb wurden die Parameter für das Rohrsystem auf den maximalen Druck von $p_{max} = 160$ bar und auf eine maximale Temperatur von $T_{max} = 200$ °C ausgelegt. Die SERO-Pumpe leistet jedoch eine maximale Druckerhöhung von 30 bar in ihrem zweiten Betriebspunkt [SERO PumpSystems 2015, S. 1]. Der Prüfstand ist zudem nicht temperiert, sodass ein Wärmeeintrag allein durch das Pumpen und die daraus resultierende Dissipation des rezirkulierenden Prozessfluides erfolgt. Die beschränkenden Parameter sind hier nicht durch das Rohrsystem, sondern durch die Pumpe und die maximale Betriebstemperatur der Wellendichtungen sowie die notwendige Mindestfördermenge vorgegeben. Die zulässige Betriebstemperatur liegt laut dem Hersteller SERO bei 60 °C. Durch den parallelen Betrieb der Strömungspfade 1 und 2 wird die Mindestfördermenge auch bei einem technischen Defekt oder einer bewussten Fehlbedienung nicht unterschritten. Die geringe Förderleistung der einstufigen KSB-Pumpe verursacht keine für den remote Betrieb relevanten Einflüsse. Im Betrieb als remote Labor können somit weder p_{max} oder T_{max} überschritten werden.

Die Dichtheit des geschlossenen Fluidkreislaufs wird durch Edelstahl-Dichtlinsen mit einer hohen Lebensdauer gewährleistet. Zudem sorgt ein, an der kleinsten vorhandenen Druckstufe orientiertes, Überströmventil für die Sicherheit gegen eine Überbelastung. Beide Pumpen des Versuchsstandes stehen über einer Auffangwanne, welche das gesamte Volumen des Prozessfluides in der Versuchsanlage bei Versagen einer der beiden Wellendichtungen aufnehmen kann. Auf diese Weise ist umliegendes Equipment vor weiteren Beschädigungen geschützt.

Für den Betrieb der Versuchsanlage ist neben der elektrischen Versorgungsspannung auch die Bereitstellung von Druckluft für die Drossel notwendig. Die Druckluft wird permanent über das zentrale Druckluftsystem des Gebäudes bereitgestellt und mit Hilfe eines Druckminderers auf den Betriebsdruck der Drossel eingestellt. Ein Ausfall der Druckluft schließt die Drossel durch Federkraft und verhindert somit die Durchströmung des Strömungspfad 1. In diesem Fall müsste das Prozessfluid vollständig durch den Strömungspfad 2 fließen. Für dieses Szenario darf der Druckverlust bei der ausschließlichen

Durchströmung der Festbettschüttung bei maximaler Förderleistung der Pumpe nicht über 30 bar liegen, um den empfohlenen Betriebsbereich der Pumpe nicht zu verlassen.

4.3.3 Modifikation der elektrischen Systeme

Die permanente Bereitstellung des Prüfstands als remote Labor und die Abwesenheit von Laborpersonal macht die remote Kontrolle der leistungsstarken, elektrischen Verbraucher notwendig. Werden im lokalen Betrieb manuell Taster betätigt, welche einen Verbraucher ein- und ausschalten, so muss dies im remote Betrieb über den Labor-PC geschehen. Die elektrischen Systeme des Strömungsprüfstandes lassen sich über ihren Energiebedarf in zwei Kategorien einteilen. Die beiden Pumpen gehören in die erste Kategorie, verfügen über je einen Drehstromanschluss und lassen sich als Leistungselektronik bezeichnen. Die Anbindung an 2 x 64 A Drehstrom verdeutlicht den potentiellen Energiebedarf und die potentielle Leistung, die hier benötigt wird. Die Kontrolle dieser elektrischen Großverbraucher dient sowohl der Energieeffizienz und ist auch für die Sicherheit des Versuchsaufbaus und der Umgebung des Aufbaus notwendig. Der Labor-PC und die Messelektronik sowie die Drossel fallen mit ihrem geringen Energiebedarf in die zweite Kategorie. Diese Systeme werden im remote Betrieb permanent über eine 230 V Wechselstromanbindung versorgt, die teilweise noch auf 12 V - 36 V transformiert und gleichgerichtet wird.

Der Remotebetrieb des Prüfstandes wird über einen Schlüsselschalter aktiviert. In der Schlüsselschalterstellung „Remote“ (siehe Abbildung 4-13) lässt sich der Schaltschrank komplett über die Signale aus dem cDAQ-Chassis des Laborrechners steuern. Dies geschieht über das NI 9485 Modul im cDAQ-Chassis. Gleichzeitig liest der Labor-PC über das NI 9421 Modul im cDAQ-Chassis die Schaltzustände der Steuer- und Lastrelais aus, um ausgeführte Kontrollbefehle direkt zu quittieren. Um diese Steuerung im Einklang mit den Vorschriften für den Betrieb elektrischer Anlagen sicher und zuverlässig zu gestalten, werden, neben den Signalen der Taster auf der Vorderseite des Schaltkastens, noch weitere Steuersignale speziell für den remote Betrieb benötigt. Das Freischalten der Frequenzumrichter für den Betrieb der Pumpen [Danfoss 2013, S. 44] und ein Signal zur Überwachung des Zustands des Labor-PCs sorgen für Sicherheit gegen unabsichtliches Starten der Pumpen oder den Ausfall des Labor-PCs. Die Überwachung des Labor-PCs ist durch eine sogenannte Watch-Dog-Schaltung realisiert, welche speziell für den remote Betrieb aufgebaut wurde. Die Schaltung agiert wie die regulären Not-Aus-Schalter und erwartet vom Labor-PC ein gleichmäßiges Rechtecksignal. Solange der Labor-PC das LabVIEW-Programm zur Anlagensteuerung ordnungsgemäß ausführt, wird das geforderte Rechtecksignal erzeugt und der Versuchsstand bleibt in Betrieb oder Bereitschaft. Im Fall von Computer- oder Softwareversagen bleibt dieses Rechtecksignal aus. Die Watch-Dog-Schaltung registriert dies und löst die Not-Aus-Schaltung aus. Wenn das Signal wieder bereitgestellt wird, ist der Versuchsstand wieder in Bereitschaft. Ist der Ausfall des Labor-PCs durch eine Unterbrechung der Laborstromversorgung verursacht, muss die erneute Inbetriebnahme des remote Prüfstands vor Ort durch einen Labor Betreuer erfolgen. Wird im „Fern“ Betrieb ein lokaler Not-Ausschalter betätigt, muss auch dieser lokal wieder

entriegelt und die Anlage vor Ort freigegeben werden. Dies verhindert das unbeabsichtigte Wiedereinschalten des Prüfstandes nach einem Störfall ohne vorherige Überprüfung der Anlage.

Neben der Kontrolle über die Leistungselektronik muss auch die Sollwertvorgabe für die Pumpen über den PC ermöglicht werden. Hierzu verfügen beide Frequenzumrichter über Anschlussklemmen zur Sollwertvorgabe [Danfoss 2013, S. 18]. Die Sollwertvorgabe erfolgt durch das NI 9265 Modul im cDAQ-Chassis und liegt im Signalbereich von 0 mA - 20 mA. Die Kommunikation mit den Sensoren und die Ansteuerung der Drossel erfolgen weiterhin über die bereits beschriebenen NI Module am Labor-PC (siehe Kapitel 4.2.5). Für den remote Betrieb werden hierfür keine besonderen Änderungen notwendig.

4.3.4 Modifikation des Labor-PCs und der Software

Der Labor-PC wird für den remote Betrieb mit einer zweiten Netzwerkkarte ausgestattet. Dies erlaubt den Betrieb in zwei Netzwerken, sogenannten Subnetzen. Der Labor Betreiber kann den Labor-PC, z.B. zu Wartungszwecken, in einem internen Netzwerk erreichen ohne dass dieses zwangsläufig über das Internet verfügbar ist. Das iLab Subnetz ist jedoch immer über das Internet erreichbar. Zusätzlich wird der PC so konfiguriert, dass er nach einem etwaigen Stromausfall automatisch gestartet wird. Tritt dieser Fall ein und der PC ist erneut hochgefahren, so entspricht der Zustand des remote Labors dann dem Aus-Zustand des Prüfstandes. Aus Sicherheitsgründen ist der Prüfstand dann zunächst nicht als remote Experiment verfügbar, wie im vorangehenden Kapitel erläutert. Erst nach einer manuellen Überprüfung und der Freigabe durch die betreuende Person wird der remote Prüfstand wieder in Bereitschaft versetzt.

Zur allgemeinen Bedienung des remote Experimentes muss das LabVIEW-VI für die Kontrolle der bereits erläuterten elektrischen Systeme ergänzt werden. Die Integration der Signale erfolgt über zwei zusätzliche Instanzen des DAQ-Assistenten, der schon in Kapitel 4.2.5 zur Anwendung kommt (siehe Anhang). Die Ein- und Ausgangssignale des Schaltkastens sind binärer Natur und werden daher von LabVIEW als boolescher Datentyp gehandhabt. Die Kontrollelemente der in Kapitel 4.3.3 vorgestellten Prüfstandssicherheit und der Lastelektronik sind in die Bedienoberfläche integriert (siehe Abbildung 4-17). Um die Ausführung des LabVIEW-VIs zum remote Betrieb des Prüfstandes zu kontrollieren, wird auf dem Labor-PC ein Interactive Lab Server (ILS) eingerichtet und in iLab integriert (siehe Kapitel 3.1.4). Hierfür ist die Einrichtung des Microsoft Internet Information Service (IIS) und einer MySQL-Datenbank auf dem Labor-PC notwendig. Dies beiden Dienste erlauben die Einrichtung des ILS und die Anbindung des Labor-PCs als Client des iLab-Systems [Frerich et al. 2016, S. 231]. Für die Durchführung eines remote Experimentes, z.B. während der Durchführungsphase des VRL-Lernprozesses (siehe Kapitel 3.1), sind nun verschiedene Schritte notwendig. Hierzu muss der Labor Betreuer das Labor in iLab zunächst als verfügbar eintragen. Das Labor kann nun für individuelle remote Experimente reserviert werden.

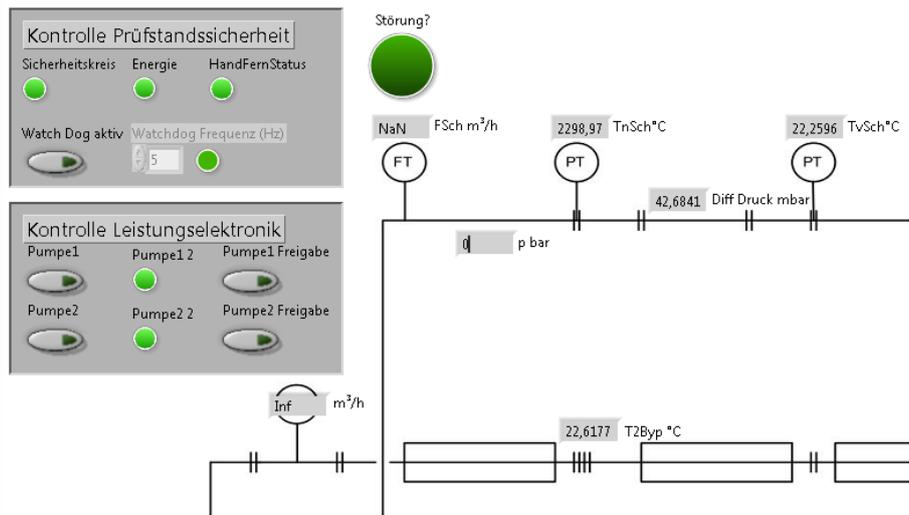


ABBILDUNG 4-17 AUSSCHNITT DER BEDIENBEREICHE DES LABVIEW-VI FÜR DEN REMOTE BETRIEB MIT DEN ZUSÄTZLICHEN BEDIENELEMENTEN ZUR KONTROLLE DES WATCH-DOG-SYSTEMS UND DER ELEKTRISCHEN ANLAGEN

Für die Durchführung der remote Experimente muss ein lernender Nutzer nach dem Aufrufen der Bedienoberfläche über iLab zunächst die Watch-Dog-Schaltung des Prüfstandes aktivieren, damit der Prüfstand aus dem Bereitschaftszustand (Leistungselektronik ausgeschaltet) in den Betriebszustand (die Leistungselektronik kann eingeschaltet werden) wechselt. Dann muss die für die Aufgabenstellung vorgesehene Pumpe eingeschaltet werden. Bevor das Anfahren der Pumpe möglich ist, muss zudem die Freischaltung durch den lernenden Nutzer erfolgen, sofern das VI die Freischaltung nicht aus Sicherheitsgründen blockiert. Vor dem Start des Experimentes muss der lernende Nutzer die Messwertaufnahme konfigurieren und so die Anzahl der Messpunkte über die Zeit anpassen und die Bezeichnung der Messreihe angeben. Im Anschluss führt der lernende Nutzer die Messreihen seines remote Experiments durch. Nach Ablauf des in iLab reservierten Zeitfensters (siehe Kapitel 3.1.4) wird das LabVIEW-VI zur Kontrolle des Prüfstandes durch den ILS auf dem Labor-PC beendet und im Browser des Nutzers wird die Bedienoberfläche inaktiv. Als Folge hiervon fehlt das Rechtecksignal für die Watch-Dog-Schaltung und der remote Prüfstand wird wieder in den Bereitschaftszustand (Leistungselektronik ausgeschaltet) versetzt. Der remote Prüfstand verharrt nun bis zum nächsten remote Zugriff in diesem Bereitschaftszustand.

Mit den vorgestellten Modifikationen ist es möglich, den Prüfstand als remote Experiment z.B. im Rahmen des vorgestellten VRL-Lernprozesses zu nutzen. Vor dem fachlichen Hintergrund der Betrachtung von Betriebspunkten und Druckverlusten von technischen Einbauten wie z.B. Festbettschüttungen lassen sich für den Lehrbetrieb verschiedene Problemstellungen der Strömungsmechanik oder Verfahrenstechnik entwickeln. Die Überprüfung des Gültigkeitsbereiches von empirischen Gleichungen, wie sie in Kapitel 4.1.3 vorgestellt wurden, ist eine Möglichkeit. Die Betrachtung bestimmter Betriebspunkte im Hinblick auf ihren Strömungszustand (laminar bzw. turbulent) und die damit verbundene Abhängigkeit des Druckverlustes stellt eine andere Möglichkeit dar.

Für die Integration in den VRL-Lernprozess wurden die grundlegenden Informationen des Prüfstandes in Form eines Steckbriefs auf der Internetseite www.elli-lab-library.de bereitgestellt. Die Möglichkeiten des remote Experimentes sind vielfältig und erlauben die Adressierung einer breit aufgestellten Zielgruppe, was jedoch eine klare Formulierung der Anforderungen und Lernziele für die Orientierungsphase (siehe 3.1.1) bedingt. Die Bereitstellung einer dynamischen Versuchsvorbereitung (siehe 3.1.2) erlaubt das gemeinsame Nutzen von Inhalten für unterschiedlich ausgerichtete Fragestellungen und die Vorbereitung der Bedienung des remote Prüfstandes. Die Reflexionsphase zur Sicherstellung der Versuchsvorbereitung kann mit Onlinefragebögen zum theoretischen Hintergrund der Druckverlustbetrachtung, Rückfragen zu den verwendeten Geräten und Anlagen oder dem Anfertigen eines virtuellen Prozessschemas (siehe 3.1.3) erfolgen. Die Integration in die Durchführungsphase ist im vorangehenden Kapitel erläutert worden. Die Anforderungen der Auswertungs- und Präsentationsphase (siehe 3.1.5 und 3.1.6) müssen an das jeweilige Lernziel und die Zielgruppe angepasst sein, um die Leistung in der Bewertungsphase (siehe 3.1.7) objektiv feststellen zu können.

5 Betrachtung des Druckverlustes durchströmter Festbettschüttungen

Die Betrachtung von Druckverlusten liefert einer Reihe von Disziplinen einen Ansatz zur energetischen Optimierung von Förderprozessen. Anders als bei der freien Umströmung von Strukturen im offenen Raum geht es hier um die Betrachtung komplexer Strömungsvorgänge auf engstem Raum. Die Durchströmung einer Festbettschüttung ist ein Vorgang, bei welchem beliebig komplexe, mikroskopische Strömungsvorgänge auftreten. Um solch komplexe Strömungsvorgänge dennoch bewerten zu können, werden sie in Experimenten auf gut messbare Summenparameter, im Folgenden auf den Druckverlust, zurückgeführt. Um diese Vorgänge zukünftig in einem remote Labor mit dem in Kapitel 4.3 vorgestellten Prüfstand zu untersuchen, ist eine geeignete Ausgangskonfiguration des Prüfstandes zu bestimmen. Dies geschieht im Hinblick auf die Auswahl einer geeigneten Festbettschüttung und eines passenden Prozessfluids für den remote Betrieb des Prüfstandes. Im Folgenden werden die Experimente zur Bestimmung einer geeigneten Konfiguration des remote Prüfstandes sowie eine einfache Simulation zur Visualisierung der Strömung durch Festbettschüttungen erläutert.

5.1 Experimentelle Erfassung des Druckverlusts

Für die Feststellung einer geeigneten Konfiguration des Prüfstandes im Einsatz als remote Labor, wird der Druckverlust für verschiedene Schüttungslängen bei gleichbleibendem Partikeldurchmesser ermittelt. Weiterhin wird die Erfassung eines möglichst großen Bereichs der Partikel-Reynoldszahl Re_p angestrebt, was durch die Betrachtung verschiedener Volumenströme und der Verwendung von zwei unterschiedlich viskosen Fluiden möglich wird.

5.1.1 Prozessfluide

Die eingesetzten Fluide zur Durchströmung der Festbettschüttung sind Wasser und eine höher viskose Wasser-Glyzerin-Mischung. Für die ersten Messreihen wird Wasser verwendet, das mit Papierfiltern gefiltert und ohne Additive eingesetzt wird. Für Untersuchungen des Druckverlustes bei kleineren Reynoldszahlen wird ein zweiter Satz Messreihen mit einem newtonschen Fluid höherer Viskosität durchgeführt. Durch die Vermischung von Wasser und Glyzerin lässt sich die Viskosität des Prozessfluides über das Mischungsverhältnis der beiden Fluide beeinflussen. So ist es möglich, Experimente bei unterschiedlichen Reynoldszahlen mit ansonsten vergleichbaren Konfigurationen des Prüfstands durchzuführen. Als für den Menschen ungefährlicher, nichtflüchtiger und wasserlöslicher Stoff eignet sich Glyzerin als Komponente dieses Modellfluides. Die Wahl des Mischungsverhältnis, und damit auch der Viskosität, ist auf den Betriebsbereich der in Kapitel 4.2.2 vorgestellten Pumpen anzupassen. Für alle im Folgenden vorgestellten Messreihen wird die Pumpe der Firma SERO verwendet, welche für einen Viskositätsbereich von 1 mPas bis 100 mPas freigegeben ist. Da die Viskosität sowohl der einzelnen Fluide als auch der Mischung temperaturabhängig ist muss die Fluidtemperatur berücksichtigt werden. Hierzu wurden Voruntersuchungen mit einem Rotationsviskosimeter, Typ RheoStress RS75 der Firma Haake, durchgeführt. Die untersuchten Mischungsverhältnisse liegen zwischen 85 Gew.-% und 95 Gew. % und wurden sowohl bei Umgebungstemperatur als auch bei 40 °C vermessen. Die oben

genannten Mischungen wurden alle unter atmosphärischen Bedingungen mit der Messgeometrie Z40 und teilweise unter Druck mit der Druckmesszelle D400 und der Messgeometrie PZ38b vermessen (siehe Anhang). Die Wahl des Mischungsverhältnisses fällt wegen des Betriebsbereichs der Pumpe auf ein Gemisch aus 85 Gew.-% Glyzerin und 15 Gew.-% Wasser mit einer Viskosität von 73 Pas bei 20°C.

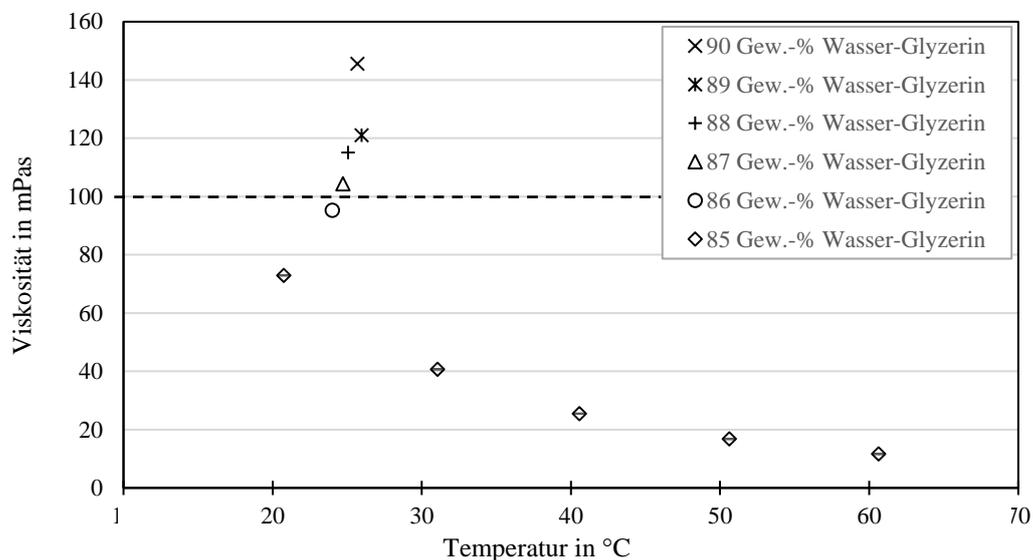


ABBILDUNG 5-1 VISKOSITÄT VERSCHIEDENER WASSER-GLYZERIN-MISCHUNGEN ZWISCHEN 20 UND 60 °C

Die Kreislaufförderung des Prozessfluides im Prüfstand und der hierdurch permanente Eintrag von Energie sorgt für unterschiedliche Temperaturen in verschiedenen Betriebszuständen. Eine detaillierte Untersuchung des ausgewählten Mischungsverhältnisses zeigt den Einfluss der Temperatur auf die Viskosität des Prozessfluides in Abbildung 5-1. Hierfür wurde die Probe bei Temperaturen zwischen 20 °C und 60 °C untersucht. Die Messpunkte im Graphen zeigen, dass für ein Gemisch aus 85 Gew.-% Glyzerin und 15 Gew.-% Wasser die zulässige Viskosität vom maximal 100 mPas auch im Fall eines Kaltstarts bei einer Raumtemperatur von 20 °C nicht überschritten wird. Mit zunehmender Temperatur sinkt die Viskosität der Mischung. Die Abbildung verdeutlicht diese Temperaturabhängigkeit, welche sich auch auf den gemessenen Druckverlust über die Festbettschüttungen auswirkt.

5.1.2 Festbettschüttung

Um den experimentell bestimmten Druckverlust anhand der vorgestellten empirischen Gleichungen zu verifizieren, werden definierte Festbettschüttungen benötigt. Das in Kapitel 4.2.4 vorgestellte Trägersystem zur flexiblen Aufnahme unterschiedlicher Festbettlängen fixiert Partikel bis zu einer minimalen Größe von 2 mm sicher und ohne Versperrung der begrenzenden Lochbleche. Für die Untersuchung der Festbettlängen von 500 mm, 750 mm und 1000 mm werden monodisperse Schüttungen aus runden 3 mm Partikeln erzeugt. Die sphärischen Partikel (siehe Abbildung 5-2) erzeugen eine zufällige Festbettschüttung, welche sich im Vergleich zu polydispersen Partikeln analytisch einfach beschreiben lässt. Um eine möglichst stabile Festbettschüttung zu erhalten und die Neupositionierung der Partikel bei der

Anströmung zu erschweren, wird die Schüttung bei ihrer Herstellung mehrfach durch Vibration verdichtet. Dabei werden solange Partikel hinzugegeben, bis die Probenfixierung unter Spannung installiert werden kann. Die Anzahl der Partikel jeder Schüttung wird durch das Wiegen der hinzugefügten Partikel bestimmt. Für das Abwiegen wird eine Waage der Firma Mettler vom Typ AE 200-S mit einer Genauigkeit von +/- 0,1 mg verwendet. Das Gewicht einer 3 mm Glaskugel liegt bei 35,7 mg. Die Porosität der jeweiligen Schüttung wird ebenfalls durch das Hinzufügen einer abgewogenen Menge Wasser bestimmt.

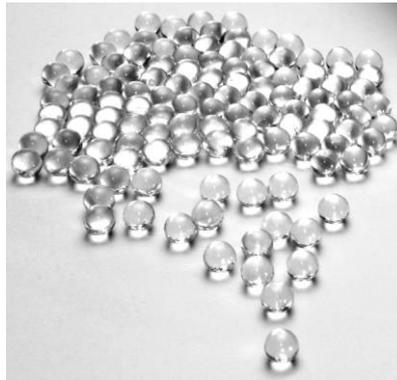


ABBILDUNG 5-2 GLASKUGELN MIT 3 MM DURCHMESSER ALS PARTIKEL DER FESTBETTSCHÜTTUNGEN

Die Schüttungen werden für jede Festbettlänge und auch bei Wechsel des Prozessfluides neu hergestellt. Vor der Herstellung einer neuen Schüttung werden die verwendeten Partikel gereinigt und getrocknet, um eine zuverlässige Wägung zu ermöglichen. Für alle Festbettschüttungen wird die Porosität sowohl nach Formel 4-4 bestimmt, als auch wie oben beschrieben durch Wiegen ermittelt. Die berechnete Porosität basiert auf den geometrischen Informationen der Partikel (3 mm Durchmesser) und des Trägersystems (Innendurchmesser: 41 mm, Längen: 500 mm, 750 mm und 1000 mm). Hierbei wird der Schüttungsträger als idealer Zylinder mit konstantem Durchmesser betrachtet und die geometrischen Besonderheiten an den Verbindungsstellen der einzelnen Rohrelemente des zusammengesetzten Schüttungsträgers vernachlässigt. Die charakteristischen Werte für alle Schüttungen mit Wasser als Prozessfluid sind in Tabelle 5-1 aufgeführt.

TABELLE 5-1 CHARAKTERISTISCHE GRÖßEN DER FESTBETTSCHÜTTUNGEN FÜR DIE KONFIGURATION MIT WASSER

Schüttungslänge	Anzahl der Glaskugeln	berechnete Porosität	gemessene Porosität
500 mm	30159	0,354	0,365
750 mm	43575	0,378	0,369
1000 mm	59604	0,362	0,370

Die charakteristischen Werte für alle Schüttungen mit Wasser-Glyzerin als Prozessfluid sind in Tabelle 5-2 aufgeführt.

TABELLE 5-2 CHARAKTERISTISCHE GRÖßEN DER FESTBETTSCHÜTTUNGEN FÜR DIE KONFIGURATION MIT WASSER-GLYZERIN

Schüttungslänge	Anzahl der Glaskugeln	berechnete Porosität	gemessene Porosität
500 mm	29614	0,366	0,397
750 mm	44537	0,364	0,396
1000 mm	58714	0,371	0,395

Die Unterschiede der Porosität zwischen Wasser und Wasser-Glyzerin können auf kleine Unterschiede in der Herstellungsprozedur bzw. Kompaktierung der Partikel und Ungenauigkeiten beim Wiegen der Partikel oder des Wassers zurückgeführt werden.

5.1.3 Messmethode

Die Untersuchung des Druckverlusts geschieht unter Variation verschiedener Parameter. Die Konfigurationen des Prüfstandes werden hierfür in der Länge der Festbettschüttung (bei konstanter Partikelgröße) und der Viskosität des Prozessfluides variiert. Auf diese Weise ergeben sich für drei Festbettlängen und zwei Prozessfluide insgesamt sechs mögliche Konfigurationen. Der Druckverlust einer Konfiguration wird in mehreren Messreihen mit unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten (ermittelt über den Massenstrom) vermessen. Die Variation der Strömungsgeschwindigkeit geschieht über die in Kapitel 4.2.2 beschriebene Drossel (Strömungspfad 1) in Kombination mit einer PID-Regelung im LabVIEW-VI. Die Führungsgröße für die Regelung liefert die in Kapitel 4.2.3 beschriebene Massendurchfluss-Messung, welche hinter der Festbettschüttung in Strömungspfad 2 angeordnet ist. Der maximal erfassbare Massenstrom liegt hier bei 1200 kg/h, was für Wasser bei 20 °C mit einer Dichte von 998 kg/m³ einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit w_0 von 1,198 m³/h entspricht. Um diesen maximalen Volumenstrom nicht zu überschreiten, aber gleichzeitig einen ausreichenden Druckgradienten aufbauen zu können, wird die SERO Pumpe für alle Messreihen mit halbiertes Nenndrehzahl bei 1450 min⁻¹ betrieben. Die systematische Erfassung des Druckverlustes und die Abschätzung des Temperatureinflusses erfolgt durch mehrfaches Anfahren der Mess- bzw. Betriebspunkte in aufsteigender und abfallender Reihenfolge.

Für die Versuchskonfiguration mit Wasser wird der Volumenstrom im Intervall von 0,5 m³/h bis 1 m³/h mit der Schrittweite 0,1 m³/h variiert. Der eingestellte Betriebspunkt wird durch den PID-Regler angefahren und gehalten. Sobald der eingestellte Volumenstrom durch die Festbettschüttung konstant ist, erfolgt die Aufnahme der Messwerte über die Dauer von 60 Sekunden. Bei einer Aufnahme Frequenz von 5 Hz entstehen so 300 Messwerte für einen Mess- bzw. Betriebspunkt. Um eventuelle Unregelmäßigkeiten des Messsystems, z.B. durch Erwärmung des Prozessfluides, sichtbar zu machen, werden alle Messreihen einer Konfiguration unmittelbar hintereinander aufgenommen. Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Messungen werden die Messpunkte für Wasser insgesamt dreimal abgefahren. Dabei

wird die erste Messreihe, beginnend bei 0,5 m³/h, in aufsteigender Reihenfolge aufgenommen (Messreihe 1). Im Anschluss werden die Messpunkte, beginnend mit 1 m³/h, in absteigender Reihenfolge angefahren (Messreihe 2). Abschließend wird die Messreihe in aufsteigender Reihenfolge wiederholt (Messreihe 3).

Bei den Messungen mit der Wasser-Glyzerin-Mischung wird der Volumenstrom im Intervall von 0,2 m³/h bis 1 m³/h mit der Schrittweite 0,1 m³/h variiert. Auch hier werden im stationären Betriebspunkt 300 Messwerte aufgezeichnet. Die Reproduktion der Messungen für das Wasser-Glyzerin-Gemisch beschränkt sich hier jedoch auf zwei Durchgänge je Konfiguration, je einer in auf-(Messreihe 1) und einer in absteigender (Messreihe 2) Reihenfolge der Messpunkte.

5.1.4 Ergebnisse

Die in den Experimenten untersuchte Messgröße ist der Druckverlust in Abhängigkeit des jeweiligen Volumenstroms. Für die Auswertung und die Diskussion sind neben den Messwerten auch die Bedienparameter des Prüfstands in den jeweiligen Messpunkten wichtig. Aus diesem Grund werden standardmäßig alle Bedienparameter (zur Steuerung: Drehzahl, Volumenstrom, Drosselstellung) und Messwerte (Sensorwerte: Druck, Temperatur, Volumenstrom) des Prüfstandes in festgelegten Abständen aufgezeichnet. Die Daten erlauben eine umfangreiche Rekonstruktion der Betriebszustände des Prüfstandes und der Messungen sowie die Bewertung von Anomalien. Die chronologische Aufzeichnung erfolgt entlang eines relativen Zeitwerts. Die erfassten Werte jeder Messreihe werden durch das LabVIEW-Programm zur Steuerung des Prüfstandes in einer LabVIEW Measurement Datei (lvm) abgelegt. Diese Datei lässt sich mit gängigen Programmen zur Tabellenkalkulation (z.B. Microsoft Excel, OpenCalc, etc...) oder speziellen Programmen zur Auswertung öffnen (DiaDem, SigmaPlot, etc.).

Bei den folgenden Betrachtungen ist das Prozessfluid Wasser mit einer Viskosität von $\eta = 1 \text{ mPas}$ und einer Dichte von $998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ bei 20 °C. Die charakteristischen Parameter der Strömung für die Messungen mit Wasser sind in Tabelle 5-3 aufgeführt.

TABELLE 5-3 CHARAKTERISTISCHE PARAMETER DER STRÖMUNG MIT WASSER BEI 20°C IN DEN MESSPUNKTEN

Volumenstrom \dot{V} in m ³ /h	Geschwindigkeit w_0 in m/s	Reynoldszahlen				
		Re_p Partikel	Re_{Sch} (500 mm)	Re_{Sch} (750 mm)	Re_{Sch} (1000 mm)	Re Rohr
0,5	0,105	315	794	795	797	4305
0,6	0,126	378	952	954	956	5165
0,7	0,147	441	1111	1112	1115	6026
0,8	0,168	504	1270	1271	1275	6887
0,9	0,189	567	1428	1430	1434	7748
1,0	0,210	630	1587	1589	1593	8609

Der Graph in Abbildung 5-3 zeigt den gemessenen Differenzdruck der drei Festbettlängen. Die im Diagramm eingetragenen Punkte sind die Mittelwerte aus den drei Messreihen und sind mit ihrer jeweiligen Standardabweichung nach „*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*“ (*GUM*) aufgetragen [JCGM 100:2008, S. 10–11]. Hierbei beträgt die Abweichung maximal +/- 1,9 % und minimal +/- 0,6 %. Erwartungsgemäß haben sowohl der Volumenstrom als auch die Länge der Schüttung Einfluss auf den gemessenen Druckverlust. Der Anstieg durch den zunehmenden Volumenstrom ist auf den zunehmenden Impulsaustausch zwischen den Fluidschichten und auf die damit einhergehende Dissipation von kinetischer Energie zurückzuführen. Dies geschieht in den komplexen Strömungsräumen zwischen den Partikeln. Die Länge der Schüttung hat Einfluss auf die Anzahl der Partikel und der Zwischenräume, was sich durch einen Anstieg des Druckverlustes bemerkbar macht. Bei einer 500 mm Schüttung werden ca. 30 000 Partikel und bei einer 1000 mm Schüttung werden knapp 60 000 Partikel von Wasser umströmt.

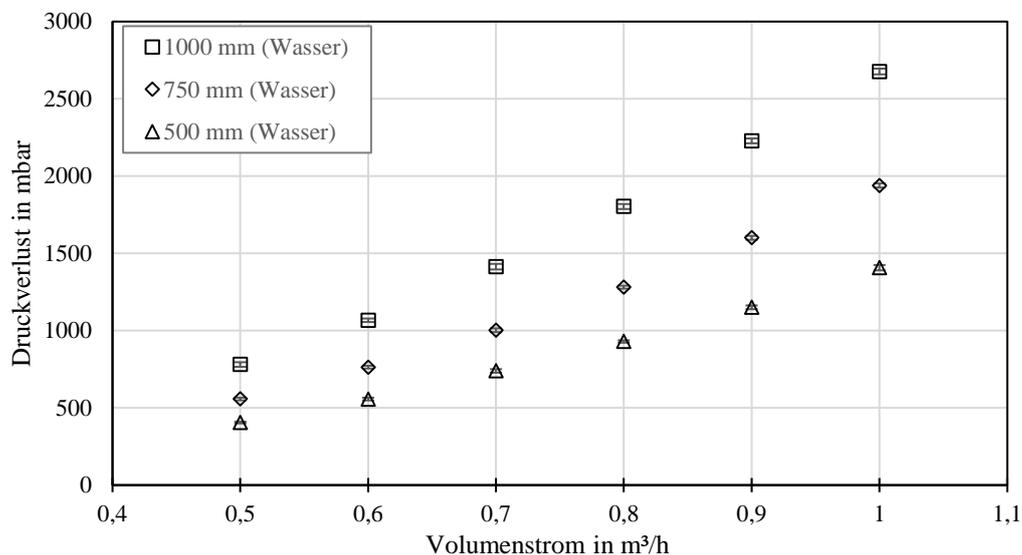


ABBILDUNG 5-3 DRUCKVERLUST ALLER FESTBETTKONFIGURATIONEN MIT WASSER AUS DEN MITTELWERTEN DER DREI MESSREIHEN MIT DER ZUGEHÖRIGEN STANDARDABWEICHUNG

In Abbildung 5-4 sind die gemessenen Druckverlustwerte einer 750 mm Festbettschüttung, im Vergleich mit den Gleichungen von Ergun (Gl. 4-12), Brauer (4-13) und Molerus (4-14) aus Kapitel 4.1.3, aufgetragen. Für die Berechnung des Druckverlustes wird die gemessene Porosität der jeweiligen Schüttungen herangezogen. Die Mittelwerte des Druckverlustes der 750 mm Festbettschüttung liegen unter den Berechnungen nach den Formeln von Ergun und Brauer, welche den Druckverlust auf Basis des hydraulischen Durchmessers berechnen. Die Berechnungen der Werte nach Molerus, welcher den Druckverlust aus dem Widerstand der Einzelpartikelumströmung berechnet, führen zu nicht plausiblen Werten. Die Abweichung zwischen den nach Brauer berechneten Werten und den bei 750 mm gemessenen Druckverlusten nimmt mit steigendem Volumenstrom zu und liegt zwischen 12,2 % und 14 %. Dies ist auf die mit steigendem Volumenstrom zunehmende Ungenauigkeit der Volumenstrommessung

und somit auch der PID-Regelung zurückzuführen. Die Erwärmung des Prozessfluides durch die rezirkulierende Förderung wirkt auf die Viskosität des Prozessfluides und beeinflusst somit ebenfalls den gemessenen Druckverlust.

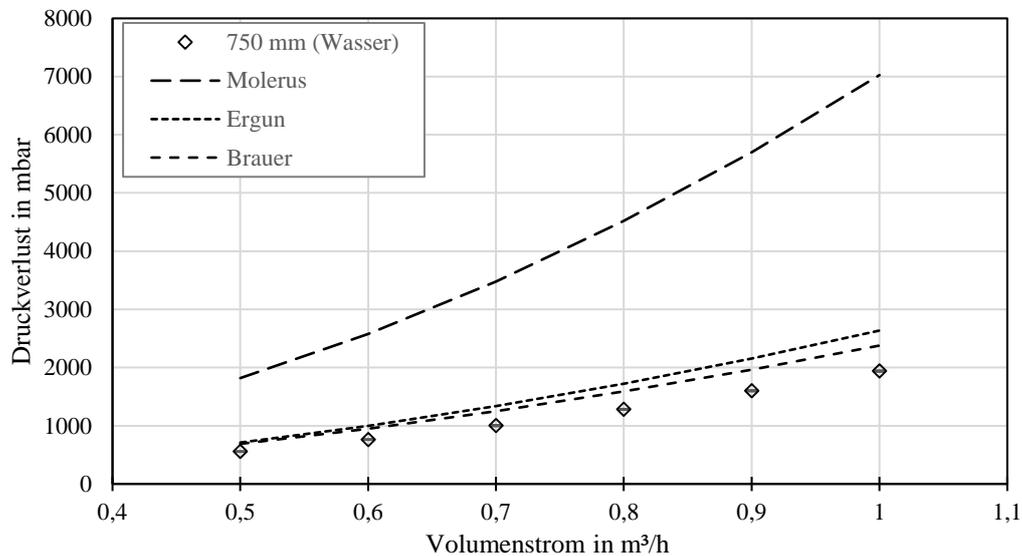


ABBILDUNG 5-4 DRUCKVERLUST EINER 750 MM-FESTBETTSCHÜTTUNG UND WASSER ALS PROZESSFLUID IM VERGLEICH ZU DEN BE-RECHNETEN DRUCKVERLUSTEN NACH MOLERUS, ERGUN UND BRAUER

Als zweites Prozessfluid wird eine 85 Gew.-% Wasser-Glyzerin-Mischung mit einer Viskosität von $\eta = 40,7 \text{ mPas}$ und einer Dichte von $1244 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ bei 30°C verwendet. Die charakteristischen Parameter der Strömung für die Messungen mit der Wasser-Glyzerin-Mischung sind in Tabelle 5-4 aufgeführt.

TABELLE 5-4 CHARAKTERISTISCHE PARAMETER DER STRÖMUNG MIT EINER 85 GEW.-% WASSER-GLYZERIN-MISCHUNG BEI 30°C IN DEN BETRACHTETEN MESSPUNKTEN

Volumenstrom \dot{V} in m^3/h	Geschwin- digkeit w_0 in m/s	Reynoldszahlen				
		Re_P Partikel	Re_{Sch} (500 mm)	Re_{Sch} (750 mm)	Re_{Sch} (1000 mm)	Re Rohr
0,2	0,042	3,9	9,7	9,7	9,8	53
0,3	0,063	5,8	15	15	15	79
0,4	0,084	7,7	19	19	20	105
0,5	0,105	9,6	24	24	24	132
0,6	0,126	12	29	29	29	158
0,7	0,147	14	34	34	34	185
0,8	0,168	15	39	39	39	211
0,9	0,189	17	44	44	-	237
1,0	0,210	19	53	-	-	263

Durch die höhere Viskosität können mit dem PID-Regler nicht alle geplanten Messpunkte der Messreihen angefahren werden. Die höhere Viskosität bewirkt einen stärkeren Impulsaustausch der

Fluidschichten, was durch kleinere Reynoldszahlen zu erkennen ist. Bei der Durchströmung des Prüfstandes und besonders des Festbetts resultiert dies in einem größeren Maß an Dissipation der kinetischen Energie, was auch den Druckverlust vergrößert. Der Graph in Abbildung 5-5 zeigt den gemessenen Differenzdruck der drei Festbettlängen analog zu der Messung mit Wasser. Die Standardabweichung beträgt hier maximal +/- 32,2 % und minimal +/- 0,1 %. Der gemessene Druckverlust mit Wasser-Glyzerin ist wegen der höheren Viskosität im Vergleich zu Wasser deutlich größer.

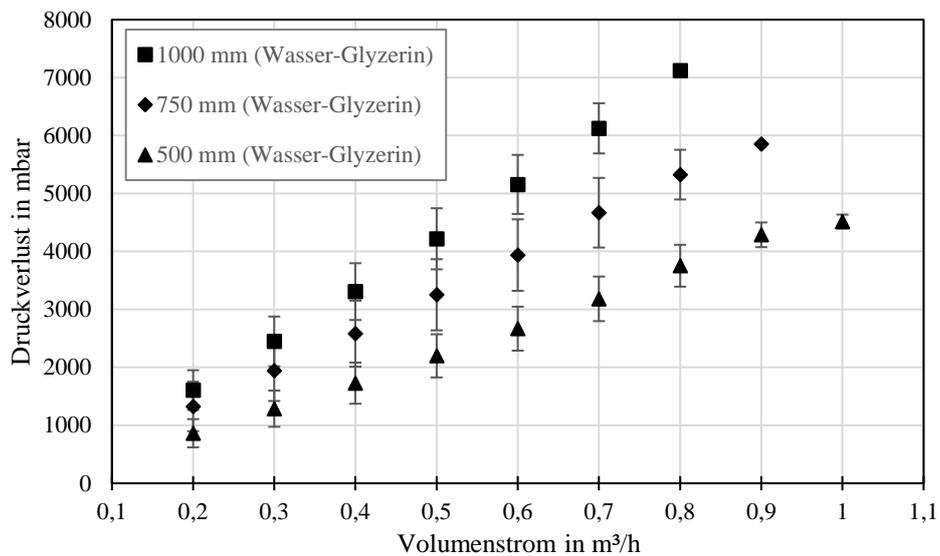


ABBILDUNG 5-5 DRUCKVERLUST ALLER FESTBETTLÄNGEN IN DER KONFIGURATION MIT DER 85 GEW.-% WASSER-GLYZERIN MISCHUNG

In Abbildung 5-6 ist der Vergleich der Konfiguration mit der 750 mm Festbettschüttung, diesmal jedoch mit der 85 Gew.-% Wasser-Glyzerin-Mischung, mit den Gleichungen aus Kapitel 4.1.3 zu sehen.

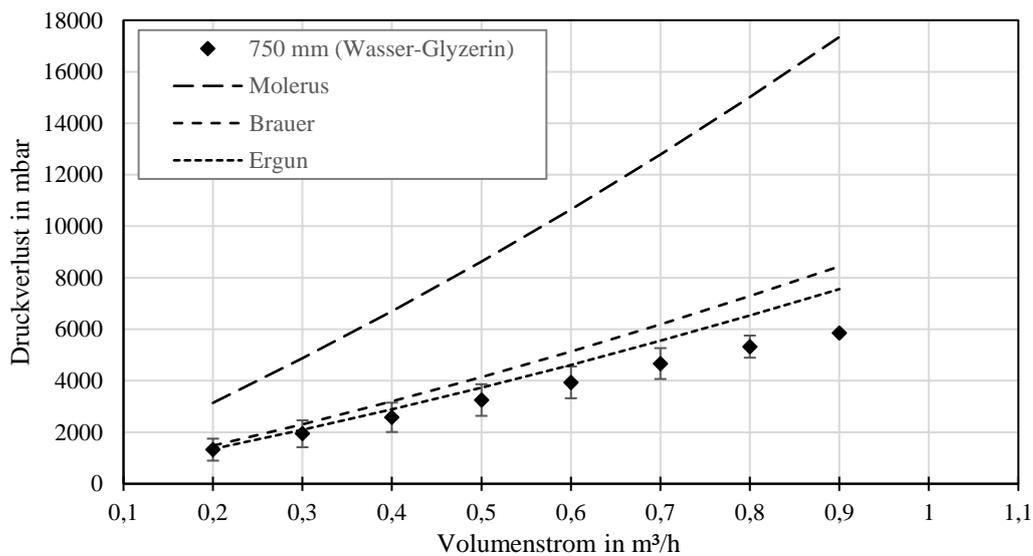


ABBILDUNG 5-6 VERGLEICH DES GEMESSENEN DRUCKVERLUSTES ÜBER EIN 750 MM FESTBETT MIT EINER 85 GEW.-% WASSER-GLYZERIN MISCHUNG UND DES BERECHNETEN DRUCKVERLUST NACH MOLERUS, BRAUER UND ERGUN

Die Mittelwerte des Druckverlustes der 750 mm Festbettschüttung liegen auch hier näher an den Werten von Ergun und Brauer. Durch die höhere Viskosität des untersuchten Prozessfluides liegen die durch Erguns Gleichung berechneten Druckverlustwerte den Messwerten am nächsten. Die Abweichung zwischen den nach Ergun berechneten Werten und den bei 750 mm gemessenen Druckverlusten liegt zwischen 2 und 29,1 %. Die nach Molerus berechneten Druckverluste liegen deutlich höher und liefern im hier betrachteten Bereich der Reynoldszahlen keine plausiblen Werte.

Die untersuchten Messpunkte lassen sich auch in dimensionslose Darstellung auftragen. Hierfür wird der Reibungsbeiwert f_k über einer modifizierten Form der Partikel-Reynoldszahl Re_p aufgetragen (Siehe Abbildung 5-7).

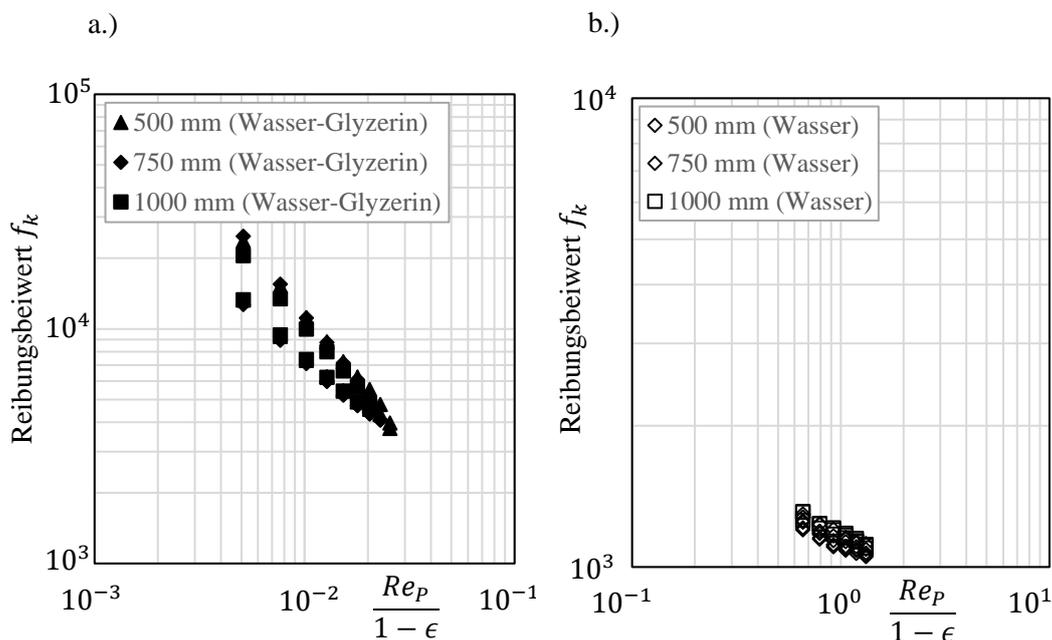


ABBILDUNG 5-7 REIBUNGSBEIWERT DER MESSPUNKTE ÜBER EINER MODIFIZIERTEN FORM DER REYNOLDSZAHL, GRAPH A.) WASSER-GLYZERIN GEMISCH, GRAPH B.) WASSER

Die aus den Messungen resultierenden Reibungsbeiwerte liegen in Bereichen unterschiedlicher Reynoldszahlen. Durch die niedrigere Viskosität des Wassers weisen die zugehörigen Messwerte höhere Partikel-Reynoldszahlen (Graph b.) in Abbildung 5-7) auf, als die Messwerte der 85 Gew.-% Wasser-Glyzerin-Mischung (Graph a.) in Abbildung 5-7). Die Reibungsbeiwerte der beiden Graphen wurden nicht aus den zuvor gezeigten Mittelwerten aller Messpunkte, sondern aus den Mittelwerten der einzelnen Messreihen berechnet. Die Partikeldurchmesser aller untersuchten Schüttungen und die Anströmgeschwindigkeiten der beiden untersuchten Prozessfluide sind identisch. Die Porosität ist auf Grund der notwendigen erneuten Herstellung der Schüttung für jede Messreihe zwar nicht konstant, sie liegt in allen Konfigurationen jedoch zwischen 0,365 und 0,397. Die große Variation der berechneten Reibungsbeiwerte für den unteren Bereich der Partikel-Reynoldszahl Re_p ist auf die Abfolge der Messpunkte und den Einfluss der Dissipation bei den Messungen mit dem Wasser-Glyzerin-Gemisch zurückzuführen.

5.2 Simulation der Strömung in einer Festbettschüttung

Neben der experimentellen Untersuchung technischer und naturwissenschaftlicher Zusammenhänge erlauben moderne Computersysteme die Simulation beliebiger Zusammenhänge für eine neue Art von simulierten Experimenten. Der Bereich mit dem Namen Computational Fluid Dynamics (CFD) widmet sich den computerbasierten Lösungen zu Problemstellungen der Strömungsmechanik. Neben quantitativen Erkenntnissen können hier auch viele qualitative Einblicke gewonnen werden. Die Visualisierung von Stromlinien und die Farbflächendarstellung von Strömungsparametern wie Dichte, Druck, Temperatur oder Viskosität erlaubt aussagekräftige Darstellungen, die mit klassischer Messtechnik nicht oder nur mit großem Aufwand möglich sind.

5.2.1 Motivation

Technische und naturwissenschaftliche Vorgänge zeichnen sich durch komplexe und sich überlagernde Mechanismen aus. Die Durchströmung einer Festbettschüttung stellt einen solch komplexen Fall dar. Die Abbildung der Vielzahl von komplexen Strömungsvorgängen in den Hohlräumen einer Festbettschüttung ist hierbei eine Herausforderung. Durch Vereinfachungen können solche komplexen Zusammenhänge, je nach Anwendungsfall, mit hinreichender Genauigkeit abgebildet werden. Um die Komplexität einzuschränken, werden untersuchte Bereiche einzeln betrachtet. Neben dieser räumlichen Eingrenzung kommt in vielen Fällen ein vereinfachtes Rechenmodell zum Einsatz. Solche Rechenmodelle bilden einzelne oder in Gruppen zusammengefasste Elemente des darzustellenden Wirkungsmechanismus ab. Die Fragestellung, welche über eine solche Simulation zusätzliche Erkenntnisse über einen Vorgang zu gewinnen erhofft um ggf. Voraussagen treffen zu können, beschränkt sich dabei i.d.R. auf einen bestimmten Mechanismus oder Zusammenhang. Im Fall der Strömung durch eine Festbettschüttung liegen Geschwindigkeit und Druck entlang des betrachteten Bereichs im Fokus. Eine solche Simulation erlaubt Einblicke in die Wechselwirkung zwischen dem Fluid und den Partikeln sowie die Strömungszustände in den Hohlräumen zwischen den Partikeln einer Festbettschüttung. Das Ziel der im Folgenden vorgestellten Simulation liegt in der Visualisierung des Strömungszustands vor, in und hinter der Festbettschüttung, während diese mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchströmt wird. Die resultierende Visualisierung der Simulation eignet sich z.B. als Unterstützung des VRL-Lernprozesses in die Phasen der Vorbereitung, Reflexion oder Durchführung. Mit ihrer Hilfe können Strömungsphänomene wie z.B. Wirbel und ihre Abhängigkeiten von bestimmten Strömungsparametern realitätsnah dargestellt werden.

5.2.2 Ablauf einer Simulation mit ANSYS Workbench und ANSYS Fluent

Die allgemeine Vorgehensweise für die Simulation, z.B. eines strömungstechnischen Vorgangs, ist in Abbildung 5-8 zu erkennen.

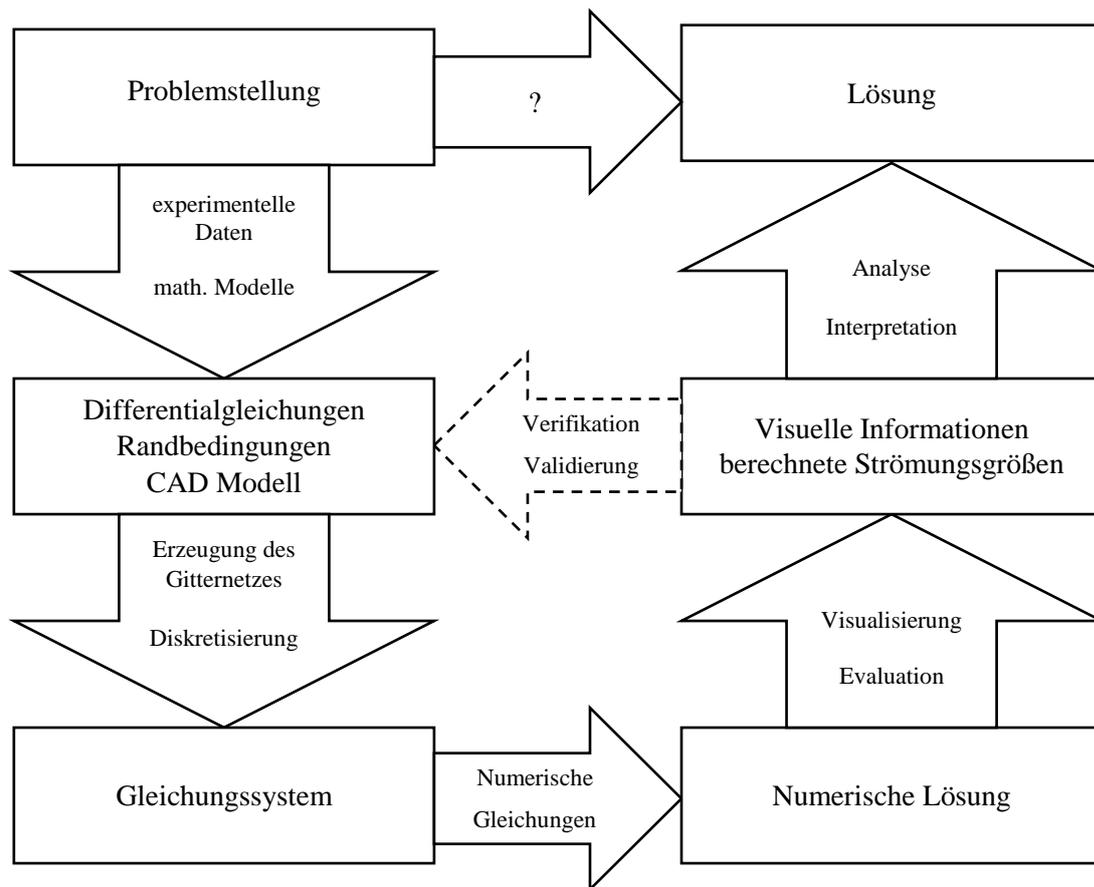


ABBILDUNG 5-8 ABLAUF DER SIMULATION EINER TECHNISCHEN PROBLEMSTELLUNG [SCHÄFER 2006, S. 7]

Ausgehend von einer Problemstellung, deren Lösung nicht bekannt ist, werden zunächst analytische und experimentelle Zusammenhänge betrachtet. Aus diesen beschreibenden Modellen wird eine geeignete mathematische Beschreibung wie z.B. eine oder mehrere Differentialgleichungen ausgewählt und die zugehörigen Randbedingungen des betrachteten Phänomens festgelegt. Zur Überführung der geometrischen Komponenten eines Problems wird ein CAD-Modell des betrachteten Bereiches angefertigt. Um die Differentialgleichung im betrachteten Bereich (zwei- oder dreidimensional) lösen zu können, muss dieser durch ein Gitternetz diskretisiert werden. Hieraus ergibt sich ein Gleichungssystem, welches z.B. durch geeignete Modellgleichungen numerisch abgebildet wird. Die Lösung dieser numerischen Gleichung wird durch entsprechende Nachbearbeitung visualisiert. In diesem Schritt können einzelne Parameter des simulierten Vorgangs diskret oder über einen beliebigen Bereich gemittelt ausgegeben werden. Durch einen Vergleich zwischen experimentellen und simulierten Daten wird die Simulation validiert. Liegt die Genauigkeit im gewünschten Bereich, so führen die Analyse und Interpretation der Daten letztendlich zur Lösung der eingangs aufgestellten Problemstellung.

Die kommerzielle Simulationsumgebung ANSYS ist eine umfangreiche Sammlung an Programmen und Modulen für die Simulation verschiedenster technischer Vorgänge. Das Programm ANSYS Workbench bündelt die für eine Simulation notwendigen Elemente (siehe Abbildung 5-8) und erlaubt das nahtlose

Arbeiten mit den übrigen ANSYS-Modulen für die Bewältigung der Vorbereitungs-, Lösungs-, Auswertungs- und Nachbearbeitungsschritte. ANSYS Fluent erlaubt die Simulation von laminaren und turbulenten, kompressiblen und inkompressiblen sowie stationären und instationären Strömungen [Schwarze 2013].

5.2.3 Geometrisches Modell

Zur Vorbereitung der Strömungssimulation gehört die Eingrenzung des zu betrachtenden Bereichs. Im Fall des Strömungsprüfstandes liegt das Augenmerk auf der Untersuchung des Druckverlustes über einer Festbettschüttung. Um diesen Druckverlust mit einer maximalen Berechnungsdauer von 24 – 48 Stunden je Simulation berechnen zu können, wird ein beispielhaftes Teilstück des Festbettes betrachtet. Die in experimentellen Untersuchungen verwendeten Festbettschüttungen bestehen aus knapp 60 000 Partikeln mit je 3 mm Partikeldurchmesser bei einer Schüttungslänge von 1000 mm und einem Schüttungsdurchmesser von 41 mm. Auch die kleinste betrachtete Festbettschüttung mit 250 mm enthält noch immer rund 15 000 Partikel. Die Anzahl der Partikel und die Komplexität der damit einhergehenden Simulation sind an die verfügbaren Ressourcen anzupassen. Zu diesen Ressourcen zählt neben der Rechenleistung und der Kapazität des Arbeitsspeichers auch der zeitliche Aufwand einer Berechnung. Die Berechnungen werden durch eine DELL Precision T7910 Workstation durchgeführt. Die Workstation verfügt hierfür über zwei Mehrkern-Xeon-Prozessoren mit je zehn CPUs bei einer Taktfrequenz von jeweils 3,1 GHz, 512 GB Arbeitsspeicher sowie einer 1 TB Solid State Disk. Nun gilt es, ein digitales Modell einer Festbettschüttung zu erzeugen, welches in guter Näherung den realen Schüttungen in dieser Arbeit entspricht. Die oben beschriebenen, experimentell untersuchten, Festbettschüttungen bestehen allerdings aus einer zufällig angeordneten Partikelstruktur und lassen sich als CAD-Modell somit nur schwer manuell konstruieren. Das Erstellen eines solchen CAD-Modelles mit zufälliger Partikelstruktur geschieht hier durch einen Zufallsalgorithmus. Ein entsprechender Algorithmus wurde durch Elsner und Ebner auf Basis der Programmierumgebung FORTRAN entwickelt [Ebner 2016, S. 160]. Die Erzeugung der Schüttung erfolgt, wie im Ablaufdiagramm in Abbildung 5-9 zu sehen, innerhalb eines in Höhe und Durchmesser zu definierenden, virtuellen Zylinders. Zunächst werden die virtuellen Partikel, zufällig und mit einigem Abstand entlang einer im Vergleich zur Zielhöhe der Schüttung größeren Höhe platziert, sodass sich die Partikel nicht berühren oder schneiden. In einem zweiten Schritt werden die losen Partikel verdichtet. Hierbei wählt der Algorithmus ein Partikel per Zufall und bewegt diesen in allen Raumrichtungen auf den Boden des Zylinders zu, bis dieser Partikel nicht mehr beweglich ist. Dieser Vorgang wird für alle Partikel mehrfach wiederholt. Nach Ablauf einer voreingestellten Anzahl an Durchläufen, oder wenn keine Partikel mehr zu bewegen sind, stoppt der Algorithmus und entfernt alle Kugelmittelpunkte oberhalb der gewünschten Zielhöhe der Zufallsschüttung. Durch die Entfernung der überflüssigen Kugelmittelpunkte und der zugehörigen Kugeln entsteht eine zufällig strukturierte Stirnfläche auf der Oberseite der Schüttung. Die plane Unterseite der Schüttung ist durch die Startebene vorgegeben. Zur Weiterverarbeitung in ANSYS-Workbench wird abschließend eine CAD-Datei im STEP-Format erzeugt.

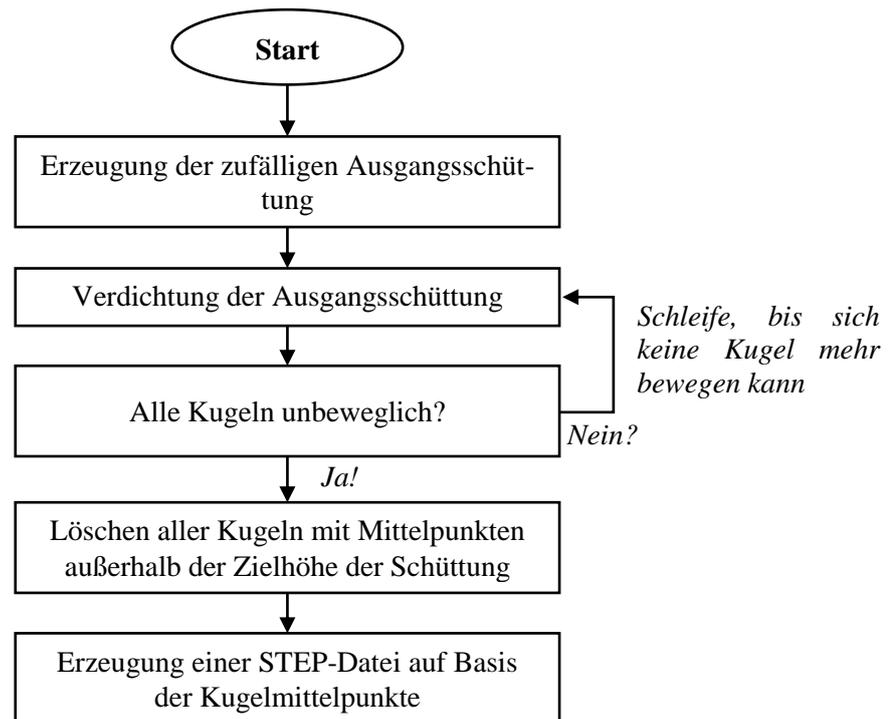


ABBILDUNG 5-9 PROGRAMM ZUR ERZEUGUNG VON ZUFALLSSCHÜTTUNGEN NACH ELSNER UND EBNER [EBNER 2016, S. 160]

Die nach diesem Algorithmus erzeugten Zufallsschüttungen bieten eine gute Näherung an real erzeugte und verdichtete Schüttungen, weisen jedoch auch charakteristische Unterschiede auf. Die Länge der digitalen Schüttung ist auf 25 mm reduziert und hat einen Durchmesser von 41 mm. Die Porosität liegt bei 0,59 und der Kugeldurchmesser wird für den Import in ANSYS von 3 mm auf 0,295 mm reduziert, um die folgende Netzgenerierung zu vereinfachen. Das Modell der Festbettschüttung aus digitalen Partikeln stellt jedoch nur einen Teil der für die Simulation benötigten Geometrie dar. Um das Fluid auch wie im Fall des realen Experiments durch die künstliche Schüttung strömen zu lassen, bedarf es der begrenzenden Geometrie eines Rohrstücks. Ein zylindrisches Rohrelement für Vor- und Nachlauf der Strömung umschließt das betrachtete System und fasst die Schüttung entlang ihres Umfangs ein. Zur Vereinfachung der Netzgenerierung wird ein Spalt von 1 mm zwischen Schüttung und Rohrwand eingefügt. In der Simulation wird alles freie Volumen im Rohr und zwischen den Partikeln der Schüttung vom Fluid durchströmt.

Ähnlich wie bei einer realen Schüttung sind die Partikel der computergenerierten Schüttung auf einer Seite plan in einer Ebene angeordnet, wohingegen sie am gegenüberliegenden Ende der Schüttung willkürlich abschließen. Für die Simulation sind alle Partikelpositionen fixiert. Die Ausrichtung der Schüttung erfolgt mit der planen Seite in Ausflussrichtung. Die Anströmung erfolgt, wie auch im Experiment, von der Seite der willkürlich abschließenden Partikeln.

5.2.4 Netzgenerierung und Netzunabhängigkeitsstudie

Für eine Simulation auf Basis einer Geometrie muss der zu durchströmende Bereich nun diskretisiert werden. Hierzu wird das Negativ der in Kapitel 5.2.3 beschriebenen Geometrie, also das durchströmte

Volumen, in kleinere Kontrollvolumen sogenannter Gitterzellen unterteilt [Schwarze 2013]. Die Diskretisierung, auch Vernetzung genannt, kann auf unterschiedliche Weise erfolgen und steht häufig im Spannungsfeld zwischen den Aspekten Genauigkeit, Effizienz und Einfachheit des Netzes [Schäfer 2006, S. 60]. Während die Erzeugung einfacher, vollautomatischer Netze einen geringen Aufwand bedeutet, geschieht dies i.d.R. zu Lasten der Genauigkeit. Liegt die Genauigkeit im Fokus, ist es notwendig, das Netz auf die jeweilige Situation anzupassen. Für die Vernetzung stehen dann verschiedene topografische Strukturen und unterschiedliche Vernetzungsarten zur Verfügung. Die Vernetzungsart lässt sich grundsätzlich in strukturierte und unstrukturierte Netze unterteilen. Die strukturierten Netze lassen sich eindeutig mit Spalten und Zeilen beschreiben. Hier können die topografischen Netze der O-, C- oder H-Struktur erzeugt werden. Die Namen der jeweiligen topografischen Strukturen orientieren sich am Erscheinungsbild dieser. Die genannten Strukturen eignen sich besonders für einfache oder symmetrische Strukturen. Die Vernetzung von komplexen Geometrien erfolgt häufig durch unstrukturierte Gitter oder die Kombinationen aus mehreren Gitterformen. Die Kombination von strukturierten und unstrukturierten Elementen vereint die Vorteile der Berechnungsgeschwindigkeit einfacher Strukturen mit den Vorteilen der Genauigkeit in komplexen Geometrien [Schwarze 2013]. Der hier betrachtete Strömungsraum wird durch solch ein kombiniertes Gitter diskretisiert (siehe Abbildung 5-10).

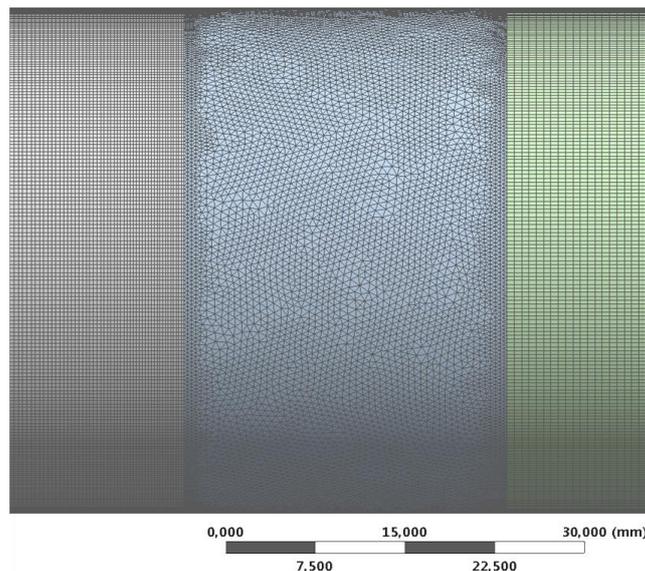


ABBILDUNG 5-10 KOMBINIERTE NETZSTRUKTUR DER FESTBETTSCHÜTTUNG, VORLAUF UND NACHLAUF ALS STRUKTURIERTES GITTER UND DAS FESTBETT ALS UNSTRUKTURIERTES GITTER

Vor- und Nachlauf der Schüttung werden mit einem strukturierten Gitter beschrieben, wohingegen der freie Strömungsraum zwischen den Kugeln der Schüttung mit einem unstrukturierten Gitter vernetzt ist. Um die vielen punktuellen Kontaktstellen zwischen Partikel und Wand oder zwischen zwei Partikeln mit entsprechender Qualität vernetzen zu können, stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Für ein möglichst qualitativ hochwertiges Gitter wird versucht, extreme Winkel in den Gitterzellen und große Gradienten in der Gittergröße zu vermeiden. Für Aussagen über die Güte eines Rechengitters gibt

es eine Reihe von Faktoren. Die Änderung des Gradienten der Gittergröße oder aber bei strukturierten Netzen die Rechtwinkeligkeit des Gitternetzes kann mit entsprechenden Kennzahlen beschrieben werden [ANSYS 2016, S. 17]. Für die betrachtete Festbettschüttung ist die Qualität der Gitter an den Kontaktstellen zwischen den Partikeln und an den Kontaktstellen zwischen den Partikeln und der Wand des einfassenden Rohres relevant. Die spitzen Winkel an diesen Kontaktstellen können bei der computergenerierten Schüttung durch Schrumpfen der Partikeldurchmesser und einbringen eines Spalts zwischen Schüttung Rohrwand verhindert werden. Die Reduktion der Partikelgröße um bis zu 2 % bei fixierten Partikeln erhöht die Porosität lediglich um 6 % [Bai et al. 2009, S. 4068]. Durch diese Maßnahmen wird das Konvergenzverhalten der numerischen Iterationen verbessert und auch die Berechnungsgeschwindigkeit erhöht.

Ein effizientes Netz stellt Zusammenhänge in dem Detailgrad dar, der im jeweiligen Fall benötigt wird, um eine Aussage über das Verhalten der betrachteten Größe treffen zu können [ANSYS 2016]. Um die Effizienz eines Netzes zu bewerten, wird eine sogenannte Netzunabhängigkeitsstudie durchgeführt. Zum Nachweis der Netzunabhängigkeit der numerisch errechneten Lösung wird die Anzahl der Gitterzellen, ausgehend von einer geringen Anzahl der Zellen, schrittweise erhöht. Ist das Ergebnis der Simulation, in diesem Beispiel der Druckverlust über der Festbettschüttung, trotz Erhöhung der Anzahl der Rechenzellen nahezu konstant, wird die minimal notwendige Zellenzahl ermittelt. Das Diagramm in Abbildung 5-11 zeigt den Verlauf der Netzstudie für die betrachtete Festbettschüttung.

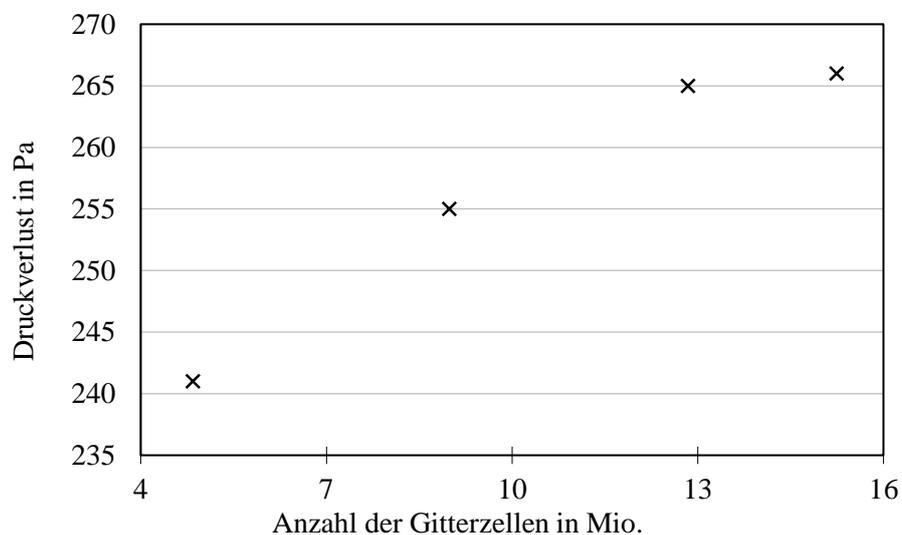


ABBILDUNG 5-11 NETZUNABHÄNGIGKEITSSTUDIE FÜR DAS DIGITALE SCHÜTTUNGSMODELL

Die Abweichung des Druckverlusts zwischen 4,8 Millionen, 9 Millionen und 12,8 Millionen Rechenzellen ist mit 5,5 % bzw. 4,1 % sehr deutlich zu sehen. Der Unterschied des Druckverlustes zwischen 12,8 Millionen und 15,2 Millionen Rechenzellen beträgt dagegen lediglich 0,4 %. Die Netzunabhängigkeitsstudie für das zuvor eingeführte Rechengitter zeigt, dass 12,8 Millionen Zellen ein ausreichend unabhängiges Simulationsergebnis bei akzeptabler Rechendauer liefern.

5.2.5 Mathematische Modelle und Simulationsbedingungen

Die Beschreibung von turbulenten Strömungszuständen ist für viele technische Vorgänge von Interesse. Die computergestützte Berechnung erlaubt hierbei Einblicke, die anders nicht oder nur schwer möglich sind. Die Qualität der Beschreibung hängt wesentlich von dem vorliegenden Sachverhalt und dem gewählten Ansatz zu dessen Beschreibung ab. Am Beispiel einer turbulenten Strömung in einem Festbett wird dies schnell deutlich. Strömungen im turbulenten Regime sind starken stochastischen Schwankungen der lokalen Strömungsgrößen ausgesetzt, die eine lineare Beschreibung der Strömung unmöglich machen. Dabei finden die Schwankungen der Strömungsparameter auf Skalen unterschiedlicher Größenordnung statt [Schwarze 2013, S. 129]. Auf Basis dieser Größenordnungen unterscheidet moderne Software zur Strömungssimulation die drei folgenden Ansätze der Beschreibung. Mit aufsteigendem Einflussbereich der Schwankungen, also steigendem Rechenaufwand, stehen die Lösungsverfahren RANS (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes = Reynolds-Mittelwerte-Navier-Stokes), LES (Large-EDDY-Simulation = Grobstruktursimulation) und DNS (Direct-Numeric-Simulation = direkte numerische Simulation) zur Verfügung [ebd., S. 138]. Simulation nach RANS lösen die meisten Aufgaben mit ausreichender Genauigkeit in akzeptabler Zeit, sodass sie in industriellen Simulationen als Standardtool zum Einsatz kommen, um sich einer Lösung zu nähern [ebd.].

Aus diesem Grund wird zur Simulation der Durchströmung der digitalen Festbettschüttung das RANS-Verfahren gewählt. Hierbei werden die Hauptgrößen der Navier-Stokes-Gleichung einer turbulenten Strömung an jeder Stelle des Rechengitters durch eine sogenannte Reynolds-Zerlegung in gemittelte und fluktuierende Strömungsparameter unterteilt [ebd., S. 130]. Die Beschreibung der fluktuierenden Anteile der Strömungsparameter benötigt zusätzliche Gleichungssysteme, auch Turbulenzmodelle genannt [ebd., S. 139]. Für die vorgestellte Simulation werden die folgenden vier Turbulenzmodelle betrachtet:

- Standard $k - \epsilon$ Modell
häufiger Einsatz für einfache Strömungen mit hohen Reynoldszahlen [ebd., S. 142]
- Standard $k - \omega$ Modell
bildet Strömungen in Wandnähe genauer ab [ebd., S. 146]
- SST $k - \omega$ Modell
hybrides Modell aus $k - \epsilon$ und $k - \omega$, deckt viele Einsatzgebiete ab [ebd.]
- Reynolds Stress Modell (RSM)
direkte Modellierung des Reynolds-Spannungstensors [ebd., S. 147]

Der Rechenaufwand der unterschiedlichen Turbulenzmodelle steigt von $k - \epsilon$, $k - \omega$ und SST $k - \omega$ mit zwei Gleichungen zum RSM mit vier (zwei dimensional) bzw. sieben (drei dimensional) Gleichungen merklich an [ebd.]. Zur Überprüfung der Eignung und der notwendigen Rechenzeit der vorgestellten Turbulenzmodelle wird die Simulation mit allen vier Modellen durchgeführt.

Für die Simulation der Strömung durch die Festbetschüttung wird das digitale Modell der Festbetschüttung aus Kapitel 5.2.3 mit dem in Kapitel 5.2.4 erstellten Netz in ANSYS Workbench verknüpft und in ANSYS Fluent übertragen. ANSYS Fluent ist ein Solver, welcher die aufgestellten Gleichungen über das gesamte Rechengitter löst. Hierfür sind, neben der Auswahl des Turbulenzmodells, die entsprechenden Randbedingungen der Strömung und der eingesetzten Stoffe und Materialien zu definieren [Schwarze 2013, S. 34]. Die in dieser Arbeit durchgeführte Simulation beschränkt sich hierbei auf die Anströmung mit Wasser bei $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$, $0,6 \text{ m}^3/\text{h}$ und $0,7 \text{ m}^3/\text{h}$. Die Parameter für das Material der Oberflächen (Edelstahl) und die Eigenschaften des strömenden Fluides (Wasser) werden der ANSYS-Materialdatenbank entnommen. Neben den festen, geschlossenen Flächen des Modells (Rohrwand, Partikel der Schüttung) gibt es auch offene, zu durchströmende Flächen. Hier werden Zu- und Abfluss, sowie die Vorgabe des Startparameters (Einlaufgeschwindigkeit) gewählt. Der Auslauf ist frei und auf atmosphärische Bedingungen festgelegt. Auch der Ausgangszustand des Strömungsraums ist zu definieren. In diesem Fall ist dieser vollständig mit dem strömenden Fluid (Wasser) gefüllt.

Neben spezifischen Einstellungen zu den Lösungsmethoden und der Lösungskontrolle in ANSYS Fluent werden auch der Initialisierungsmodus und die Anzahl der durchzuführenden Iterationen eingestellt. Zusammen mit den Residuen der allgemeinen Transportgleichungen können individuell definierte Parameter der Strömung als Indikatoren für den Verlauf der Simulation dienen und erlauben das Erkennen einer konvergierenden Lösung. Divergiert eine Simulation oder erfolgt die Lösung nicht im gewünschten Maße, ermöglichen einstellbare Relaxionsfaktoren eine gewisse Steuerung des Lösungsprozesses [ebd., S. 85–86].

5.2.6 Ergebnisse

Eine Simulation technischer Vorgänge erzeugt eine Vielzahl von Informationen und Daten, welche durch geeignete Nachbearbeitung ähnlich wie Messwerte genutzt werden können. Die Qualität der Ergebnisse ist jedoch stark abhängig von den festgelegten Ausgangsbedingungen, dem Gitternetz und der Wahl der numerischen Berechnungsmethode. Die Ergebnisse der dreidimensionalen Simulation werden für jeden Knotenpunkt des zuvor definierten Gitternetzes berechnet (siehe Kapitel 5.2.4). Die Auswertung mit ANSYS CFD-POST ermöglicht die Nachbearbeitung durch eine gezielte Betrachtung einzelner Messpunkte oder die Mittelwertbildung über frei wählbare Schnittflächen des Modells. Neben der Betrachtung von simulierten Drücken oder Geschwindigkeiten erlaubt die Gesamtheit der simulierten Strömungswerte auch Rückschlüsse über Strömungspfade einzelner Elemente des Fluides und das Darstellen von Parameterprofilen entlang frei wählbarer Schnittachsen.

Das Ziel der Simulation ist die Visualisierung der komplexen Strömungszustände vor, in und nach der Durchströmung des Festbetts. Hierfür wurden die vier oben genannten Turbulenzmodelle für das RANS-Verfahren miteinander verglichen. Die Strömungsgeschwindigkeit wurde mit $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$, $0,6 \text{ m}^3/\text{h}$ und $0,7 \text{ m}^3/\text{h}$ variiert. Das computergenerierte Modell der zufällig strukturierten Festbetschüttung (Porosität $\epsilon = 0,59$) verhindert den direkten Vergleich mit den verwendeten, realen Festbetschüttungen

(Porosität $\epsilon < 0,4$). Um trotzdem einen Eindruck von der Qualität der simulierten Druckverluste zu erhalten, dienen die in Kapitel 4.1.3 vorgestellten, empirischen Gleichungen als Referenz.

Der Druckverlust der simulierten Durchströmung der Festbetschüttung wird über die Differenz des flächengemittelten Absolutdrucks vor und nach der Schüttung gebildet. Durch die stark verkürzte Geometrie (1:20) sind die ermittelten Druckverluste vergleichsweise gering bei nur einstelligen Millibar Werten. Der Volumenstrom ist konstant und wird durch die Randbedingungen der Simulation vorgegeben. Die charakteristischen Parameter für die simulierten Strömungssituationen sind in Tabelle 5-5 aufgeführt.

TABELLE 5-5 CHARAKTERISTISCHE PARAMETER DER SIMULIERTEN STRÖMUNG MIT WASSER BEI 20°C BEI VERSCHIEDENEN STRÖMUNGSGESCHWINDIGKEITEN

Volumenstrom \dot{V} in m ³ /h	Geschwin- digkeit w_0 in m/s	Reynoldszahlen		
		Re_p Partikel	Re_{Sch} (25 mm)	Re Rohr
0,5	0,105	315	534	4305
0,6	0,126	378	641	5165
0,7	0,147	441	748	6026

Die Druckdifferenzen aus den insgesamt 12 Simulationen sind in Abbildung 5-12 dargestellt. Der Unterschied der simulierten Druckverluste der verschiedenen Turbulenzmodelle ist gering im Vergleich zu den Abweichungen der berechneten Druckverluste nach Ergun, Brauer und Molerus.

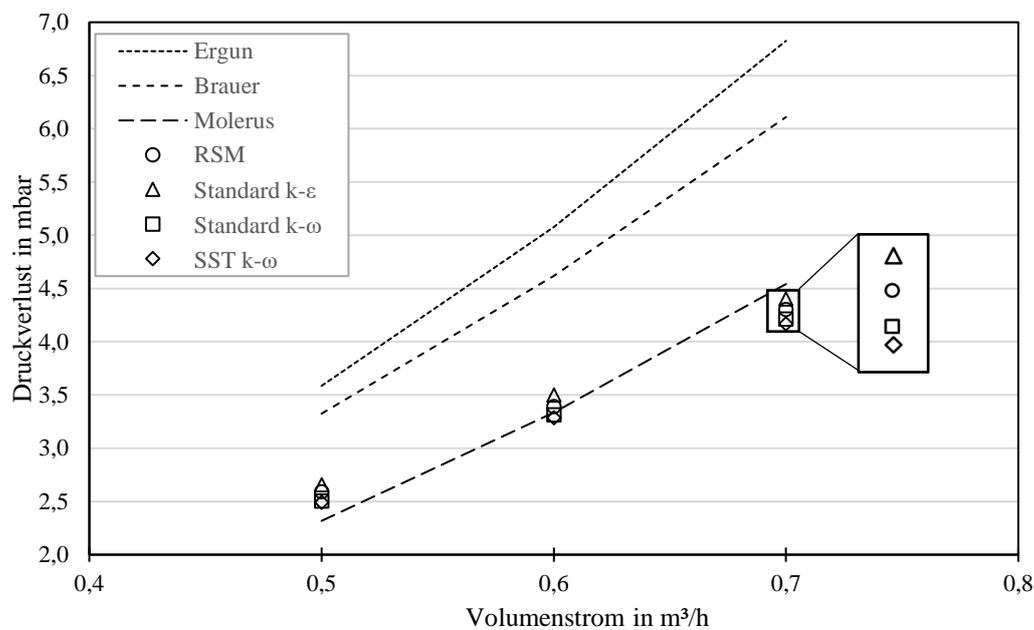


ABBILDUNG 5-12 DER SIMULIERTE DRUCKVERLUST IM VERGLEICH ZU DEN GLEICHUNGEN VON ERGUN, BRAUER UND MOLERUS, VERGRÖßERTE DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE FÜR EINEN VOLUMENSTROM VON 0,7 M³/H

Die Auswertungen der Experimente am Strömungsprüfstand im Kapitel 5.1 zeigten, dass der gemessene Druckverlust am ehesten mit nach Brauer oder Ergun berechneten Druckverlusten korreliert. Die Druckverlustwerte der Simulation liegen alle in der Nähe zu den nach Molerus berechneten Werten. Dies kann durch die vorgenommenen Modifikationen in Bezug auf den Spalt zwischen Rohrwand und Schüttung, aber auch durch die Reduktion der Partikeldurchmesser, erklärt werden. Zudem entspricht die Partikelanordnung der digitalen Festbettschüttung tendenziell eher der Betrachtung des Modells der Einzelpartikelumströmung nach Molerus als den in den Experimenten untersuchten Festbettschüttungen mit geringerer Porosität.

Für eine möglichst gute Visualisierung der komplexen Strömungszustände in einem Festbett wird eine aussagekräftige Modellierung benötigt. Das im Folgenden betrachtete Turbulenzmodell RSM beschreibt die stochastischen Schwankungen der Strömungsgrößen in Turbulenzen über 7 Gleichungen und zeigt bei einer moderaten Rechendauer von nicht länger als 24 Stunden, akzeptable Werte für den Druckverlust.

Die Ergebnisdarstellung von Simulationen birgt großes Potential für den Erkenntnisgewinn. Messwerte aus realen Anlagen, wie z.B. in Kapitel 4.1 vorgestellt, erfassen i.d.R. nur einen Messwert an einem Ort, wobei der Sensor das betrachtete System stören kann. Im Vergleich hierzu bieten die Daten aus einer Simulation für jede durch das Rechengitter diskretisierte Zelle einen Wert für die simulierten Strömungsparameter. Die in dieser Arbeit primär betrachteten Parameter sind die Geschwindigkeit und der Druck des strömenden Fluides. Die Visualisierung der Strömungsparameter und damit die Strömungssituation ist auf beliebig definierten Schnittebenen im Strömungsraum möglich. Hierbei wird jedem Wert eines Strömungsparameters eine Farbe auf einer Farbskala zugeordnet, welche die Minimal- und Maximalwerte über ein Farbspektrum aufteilt [Schwarze 2013, S. 15]. Auf diese Weise wird ein Strömungszustand grafisch abgebildet.

In Abbildung 5-13 ist der Längsschnitt für die drei Anströmgeschwindigkeiten 0,5, 0,6 und 0,7 m³/h zu sehen. Die Anströmung der Festbettschüttung erfolgt auf der nicht planen Seite der Schüttung. Der Auslauf auf der rechten Seite ist frei und hat atmosphärische Bedingungen. Aus diesem Grund zeigt die globale Farbskala dasselbe, Türkis gefärbte Druckniveau für den Nachlauf [A] aller drei Anströmgeschwindigkeiten. Der Vorlauf hingegen zeigt einen deutlichen Anstieg des Druckniveaus mit zunehmender Anströmgeschwindigkeit (Farbwechsel von Gelb [I] über Orange [II] zu Rot [III]). Zudem ist auch die Verschiebung des Bereichs mittleren Drucks [M] in Richtung Auslass [A] deutlich zu sehen. Die Skala des dargestellten Drucks reicht bis in den negativen Bereich und stellt die lokale Unterschreitung des Umgebungsdrucks dar, welche z.B. durch Turbulenzen entstehen kann. Diese Bereiche sind sehr beschränkt und treten innerhalb des Festbettes, z.B. an der Rückseite von angeströmten Partikeln, auf.

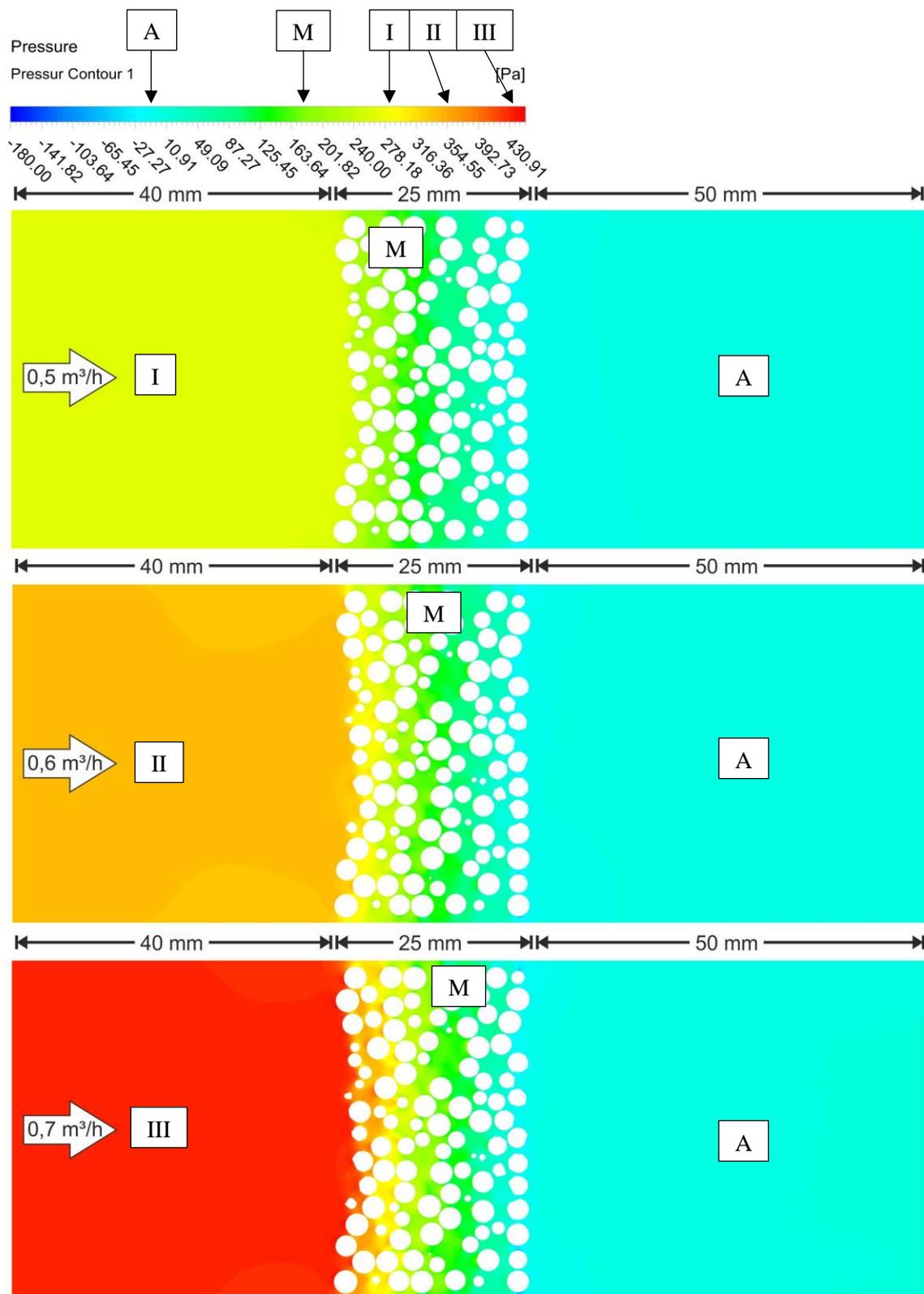


ABBILDUNG 5-13 LÄNGSSCHNITT DURCH DAS ROHR DER FESTBETTSCHÜTTUNG MIT DER DARSTELLUNG DER DRUCKVERTEILUNG BEI VOLUMENSTRÖMEN VON 0,5 M³/H, 0,6 M³/H UND 0,7 M³/H

Die Darstellung der Geschwindigkeit in Abbildung 5-14 zeigt vergleichsweise geringe farbliche Veränderungen bei den verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten im Vorlauf in den Bereichen [I], [II] und [III]. Auf der verwendeten Farbskala wird ruhendes Fluid, z.B. an der Rohrwand, im Staupunkt oder

hinter manchen Partikeln, mit dunklem Blau gekennzeichnet. In allen drei Darstellungen ist zu sehen, wie in den durchströmten Zwischenräumen der Festbettschüttung die Strömungsgeschwindigkeit ansteigt, sichtbar an den Punkten [i], [ii] und [iii].

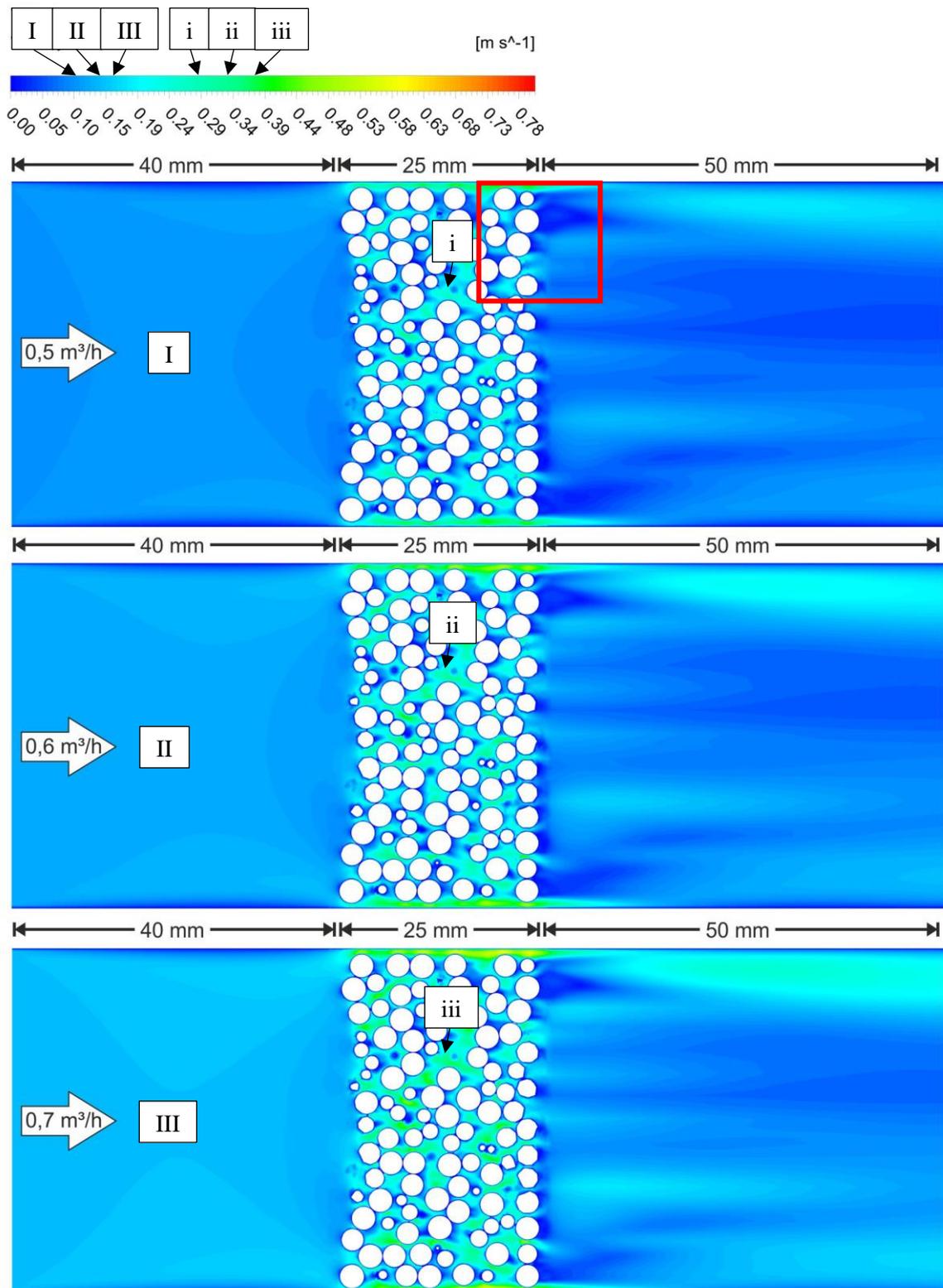


ABBILDUNG 5-14 LÄNGSSCHNITT DURCH DIE SIMULATION MIT DARSTELLUNG DER GESCHWINDIGKEITSVERTEILUNG BEI VOLUMENSTRÖMEN VON 0,5 m³/h, 0,6 m³/h UND 0,7 m³/h

Wegen der großen Geschwindigkeitsgradienten in der Festbettschüttung ist der Unterschied der Anströmgeschwindigkeit im Vorlauf kaum zu erkennen. Erst im Nachlauf der Festbettschüttung lassen sich, abhängig von der Geschwindigkeit der Anströmung, lokal unterschiedliche Geschwindigkeiten ermitteln.

Die Darstellungen a.) bis c.) in Abbildung 5-15 zeigen den in Abbildung 5-14 durch einen Rahmen markierten Abschnitt des Festbettes im Übergang zum freien Strömungsquerschnitt des Rohres.

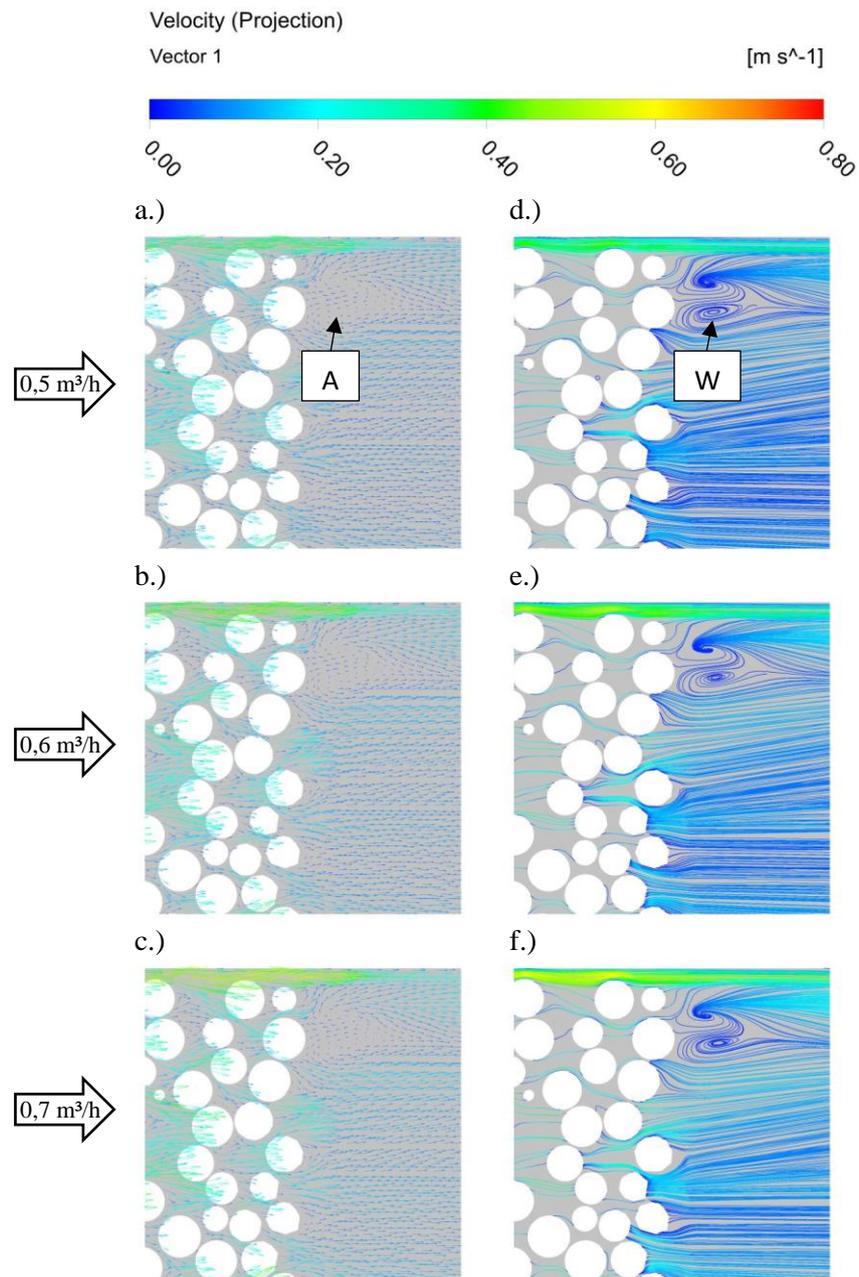


ABBILDUNG 5-15 A.) BIS C.): VEKTORFELD AUS TANGENTIALPROJEKTION DER IM RAUM ORIENTIERTEN GESCHWINDIGKEITSVEKTOREN [A]=BEREICH NIEDRIGER STRÖMUNGSGESCHWINDIGKEITEN, D.) BIS F.): STRÖMUNGSPFADE EINZELNER STRÖMUNGSPARTIKEL [W]=GEGENLÄUFIGE WIRBEL

Die gewählte Darstellungsweise zeigt die skalare Größe der Geschwindigkeit durch eine Farbskala und die lokale Richtung der Strömung durch Vektorpfeile an. Analog zu den vorhergehenden Abbildungen

steigt die Anströmgeschwindigkeit von $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$ zu $0,7 \text{ m}^3/\text{h}$ an. Innerhalb der Festbettschüttung sind die unterschiedlich gefärbten und ausgerichteten Geschwindigkeitsvektoren zu sehen, die einen komplexen Strömungszustand beschreiben. Im betrachteten Ausschnitt existiert für alle Geschwindigkeiten ein Bereich mit sehr kurzen, dunkelblauen Vektorpfeilen [A], welcher auf eine Anomalie hinweist. Zur näheren Betrachtung wird die Darstellung der Stromlinien von Fluidpartikeln in d.) bis f.) der Abbildung 5-15 herangezogen. Hier lassen sich im selben Bereich zwei langsam drehende, gegenläufige Wirbel erkennen [W]. Die beiden Wirbel erscheinen unabhängig von der Anströmgeschwindigkeit und zeigen nur lokalen Geschwindigkeitszuwachs in der nachgelagerten Strömung des betrachteten Wirbels.

Die vorgestellten Ergebnisse geben einen Eindruck, auf welche Art und Weise Strömungssimulationen bei der Betrachtung eines komplexen Vorgangs, wie der Durchströmung einer Festbettschüttung, helfen können. Die Verfolgung von einzelnen Fluidpartikeln und das Aufzeigen potentieller Anomalien, wie z.B. die oben gezeigten Doppelwirbel, unterstreichen die Komplexität der Strömungssituation. Es wird deutlich, dass für quantitative Aussagen, z.B. zum Auftreten von Wirbeln, detailliertere Untersuchungen notwendig sind.

6 Diskussion und Bewertung

Das folgende Kapitel widmet sich der kritischen Betrachtung der im Verlauf dieser Arbeit vorgestellten Sachverhalte und diskutiert die aus den Untersuchungen resultierenden Erkenntnisse. Die Diskussion erstreckt sich über die Einsatzmöglichkeiten des VRL-Lernprozesses und den Bedarf an praktischem Kompetenzaufbau in der Mitarbeiterqualifikation für Industrie 4.0. Weiterhin werden die möglichen Konfigurationen des vorgestellten Strömungsprüfstandes für den Betrieb als remote Labor, sowie die Visualisierung der Strömungsvorgänge in der Festbetschüttung zur Unterstützung des VRL-Lernprozesses diskutiert. Abschließend wird die Erfahrung aus der Einrichtung des VRL-Lernprozesses und des vorgestellten remote Prüfstandes in allgemeine Empfehlungen überführt.

6.1 Bewertung des VRL-Lernprozesses nach den Anforderungen von Industrie 4.0

Die in Kapitel 2.2.1 erarbeiteten Anforderungen der Industrie 4.0 an eLearning-Konzepte formulieren den Bedarf nach individuellen und gleichzeitig flexiblen Lernangeboten. Diese Forderungen gelten oft für beide Seiten eines solchen eLearning-Angebotes, wie in Tabelle 6-1 zu erkennen ist.

TABELLE 6-1 ANFORDERUNGEN AN ELEARNING IN DER MITARBEITERQUALIFIKATION IN INDUSTRIE 4.0 AUFGETEILT NACH LERNENDEN UND LEHRENDEN

Anforderungen der Nutzer/Lernenden	Anforderungen der Unternehmen/Lehrenden
<ul style="list-style-type: none">• Lernen im Prozess der Arbeit ermöglichen• Individualität des Lernens• Flexibel im Lernort• Flexibel in Lernzeit/Tempo• Individualität der Angebote (bestehende Kompetenzen)• Lebenslanges Lernen ermöglichen• Handeln in realen, praktischen Situationen entwickelt Kompetenzen• Querkompetenzen und Diversität im Fachwissen vermittelbar machen	<ul style="list-style-type: none">• Lernen im Prozess der Arbeit ermöglichen• Möglichst geringe Kosten (pro Qualifizierung)• Möglichst geringer Zeitaufwand (pro Qualifizierung)• Querkompetenzen und Diversität im Fachwissen vermittelbar machen• Handeln in realen, praktischen Situationen, entwickelt Kompetenzen

Der VRL-Lernprozess ist ein eLearning-Konzept, welches den individuellen und flexiblen Aufbau von Fach- und Querkompetenzen für das Arbeitsumfeld in der Industrie 4.0 durch praxisnahes Arbeiten mit virtuellen und remote Laboren ermöglicht. Der Lernprozess besteht aus sieben Phasen, welche sich unterschiedlichen Methoden und Techniken des eLearning bedienen. Ziel des VRL-Lernprozesses ist die Begleitung der Nutzer beim Aufbau praktischer Kompetenzen mit virtuellen und remote Laboren im

Einklang mit den oben aufgestellten Anforderungen. Der Zugang zum VRL-Lernprozess ist über jeden internetfähigen PC oder jedes Notebook möglich. Somit ist non-formales Lernen, und damit auch das Lernen im Prozess der Arbeit oder das Lernen am Arbeitsplatz, möglich. Dies reduziert die Kosten und den Zeitaufwand für Qualifizierungsmaßnahmen die mit dem VRL-Lernprozess durchgeführt werden. Durch die Integration in den Arbeitsprozess reduzieren sich Ausfallzeiten, die z.B. durch das Reisen zu einer formalen Aus- und Weiterbildungseinrichtung anfallen würden. Zudem ermöglicht die zunehmende Verwendung non-formaler Lernangebote den Lernenden einen individuellen Zugang zu Inhalten und erlaubt, diese im eigenen Tempo zu bearbeiten. Die zeitliche und örtliche Flexibilität in Kombination mit dem individuellen Zugang zu theoretischen und praktischen Inhalten ermöglicht einer heterogenen Zielgruppe lebenslanges Lernen. Die bisher genannten Aspekte gelten jedoch zunächst für nahezu alle, auf die Vermittlung theoretischer Inhalte ausgerichteten, eLearning-Konzepte. Durch die Verwendung des VRL-Lernprozesses werden diese eLearning-typischen Aspekte mit der Bereitstellung von praxisnahen, virtuellen Abbildungen oder realen, fernbedienbaren Anlagen kombiniert. Die Entwicklung von Fach- und Querkompetenz aus dem Umgang mit praktischen oder praxisnahen Problemstellungen wird durch die Verwendung von VRLs, auf individuelle und flexible Weise, auch für eLearning-Konzepte möglich. Die zentrale Bereitstellung von VRL-Experimenten für verschiedene Standorte eines Unternehmens hilft, sowohl Investitions- als auch laufende Kosten zu senken. Der VRL-Lernprozess erfüllt somit alle in Tabelle 6-1 aufgeführten Anforderungen.

Der Einsatz des VRL-Lernprozesses ist als Element eines bestehenden oder als eigenständiges eLearning-Konzept in formalen oder non-formalen Lern- und Qualifizierungsangeboten möglich (siehe Kapitel 2.2.2). Mit Hilfe virtueller Labore lassen sich alle 3 Stufen der praxisorientierten Labore (siehe Kapitel 2.3.1) umsetzen. Die Genauigkeit dieser Abbildung hängt dabei jedoch stark vom Modellierungsaufwand ab. Remote Labore sind reale technische Anlagen, deren Verhalten nicht virtuell simuliert wird. Die Herausforderung liegt hier in der Anbindung eines realen Versuchsaufbaus an das Internet. Durch den i.d.R. vorbestimmten Aufbau eines remote Labors eignet sich dies für gewöhnlich lediglich für praxisorientierte Labore der Stufe 1. Lernszenarien mit remote Laboren für die Qualifizierung nach Stufe 2 oder 3 sind eine besondere Herausforderung, da das freie Zusammenstellen eines individuellen Versuchsaufbaus nur eingeschränkt möglich ist. Um praxisorientierte Labore dieser Stufen anzubieten eignet sich die Kombination aus remote Laboren und virtuellen Elementen. Die für diese Stufen notwendige Eigenleistung erfordert beispielsweise die individuelle Zusammenstellung eines Experiments zur Überprüfung einer Hypothese. Möglich wird dies z.B. durch das virtuelle Prozessschema, wie es für die Reflexionsphase (siehe Kapitel 3.1.3) des VRL-Lernprozesses entwickelt wurde.

Zum Nachweis der erfolgreichen Qualifizierung aber auch der Qualitätssicherung bedarf es der Evaluation des VRL-Lernangebotes [Clarke 2005, S. 137]. Unter Berücksichtigung der geltenden Datenschutzbestimmungen können die Metadaten aus den einzelnen Phasen des VRL-Lernprozesses für die Bewertung der Qualität und Akzeptanz der einzelnen Phasen gewonnen werden. Ein detaillierteres

Feedback zur Qualität des Lernprozesses, zumindest in Bezug auf die methodische und technische Umsetzung, wird durch eine summative Evaluation entlang des VRL-Lernprozesses gewonnen [Clarke 2005, S. 137]. Die Nutzung eines elektronischen Systems zur Evaluation mit online Fragebögen (z.B. EvaSys) bietet eine ähnliche Flexibilität bei der Anwendung, wie der zu evaluierende VRL-Lernprozess (Evaluations Fragestellungen siehe Anhang). Um das Feedback möglichst genau aufzulösen und den Lernprozess dabei nicht unnötig zu unterbrechen, werden einige Phasen des VRL-Lernprozesses zusammengefasst evaluiert [ebd., S. 145–146]. Die Evaluation des VLR-Lernprozesses ist dabei in die folgenden drei Bereiche aufgeteilt:

1. Orientierung, Vorbereitung und Reflexion
2. Durchführung
3. Auswertung, Präsentation und Bewertung

Aus den individuellen Rückmeldungen der Evaluation dieser drei Bereiche wird die Optimierung der einzelnen Phasen des VRL-Lernprozesses möglich. Beim Einsatz des VRL-Lernprozesses zur Qualifizierung nach den Anforderungen der Industrie 4.0 hilft die Evaluation, Abweichungen der Rahmenbedingungen zu erkennen und mit geeigneten Maßnahmen auf diese Veränderungen zu reagieren.

6.2 Bewertung des Strömungsprüfstands für den Einsatz als remote Experiment

Zu den allgemeinen Anforderungen an den Strömungsprüfstand als remote Labor gehört neben der inhaltlichen Begleitung und der flexiblen Verfügbarkeit auch eine geeignete Konfiguration von Festbettschüttung und Prozessfluid für die reproduzierbare Erfassung von Messergebnissen.

Die inhaltliche Begleitung des remote Strömungsprüfstandes ist mit dem VRL Lernprozess möglich. Die ELLI-Lab-Library dient der Orientierung und Vermittlung der Lernziele und Voraussetzungen. Das Wiki ermöglicht ein individuelles Erarbeiten der theoretischen und fachlichen Grundlagen. Das virtuelle Prozessschema reflektiert den Wissensstand der Nutzer vor der Durchführungsphase.

Durch die browserbasierte Steuerung des remote Prüfstandes über das Internet, mit einem LabVIEW-VI, in Kombination mit dem Interactive Lab Server auf dem Labor-PC, ist eine flexible Onlineverfügbarkeit gewährleistet. Gleichzeitig vermeidet die Abschaltung der elektrischen Großverbraucher, hier z.B. der Pumpen, während der Bereitschaftsphasen des remote Prüfstandes unnötige Betriebsstunden und reduziert so Betriebs- und Wartungskosten.

Die Eignung des Prüfstandes als Praxislabor für die Aus- und Weiterbildung ist abhängig von der Konfiguration (Prozessfluid und Schüttungslänge) bei der Bereitstellung als remote Prüfstand. Der Fokus für diese Anwendung liegt auf dem zuverlässigen Betrieb und der Gewährleistung von reproduzierbaren Messwerten. Hierfür werden die Messergebnisse mit Wasser und Wasser-Glyzerin sowie die möglichen Schüttungen in 500 mm, 750 mm und 1000 mm Länge betrachtet (siehe Kapiteln 5.1.4). Die in Abbildung 6-1 dargestellten Messpunkte zeigen den betrachteten Betriebsbereich des Prüfstandes auf. Der

kleinste erfasste Druckverlust liegt für Wasser mit 0,5 m³/h durch die Festbettschüttung von 500 mm Länge bei 404 mbar. Der Maximalwert liegt für Wasser-Glyzerin bei einem Volumenstrom 0,8 m³/h durch die Schüttung von 1000 mm Länge bei 7122 mbar. Unter Berücksichtigung der Genauigkeit des Differenzdrucksensors ist mit einer Unsicherheit von +/- 12 mbar zu rechnen. Für den Minimalwert bedeutet dies einen relativen Fehler von 2,9 % und für den Maximalwert einen relativen Fehler von 0,1 %.

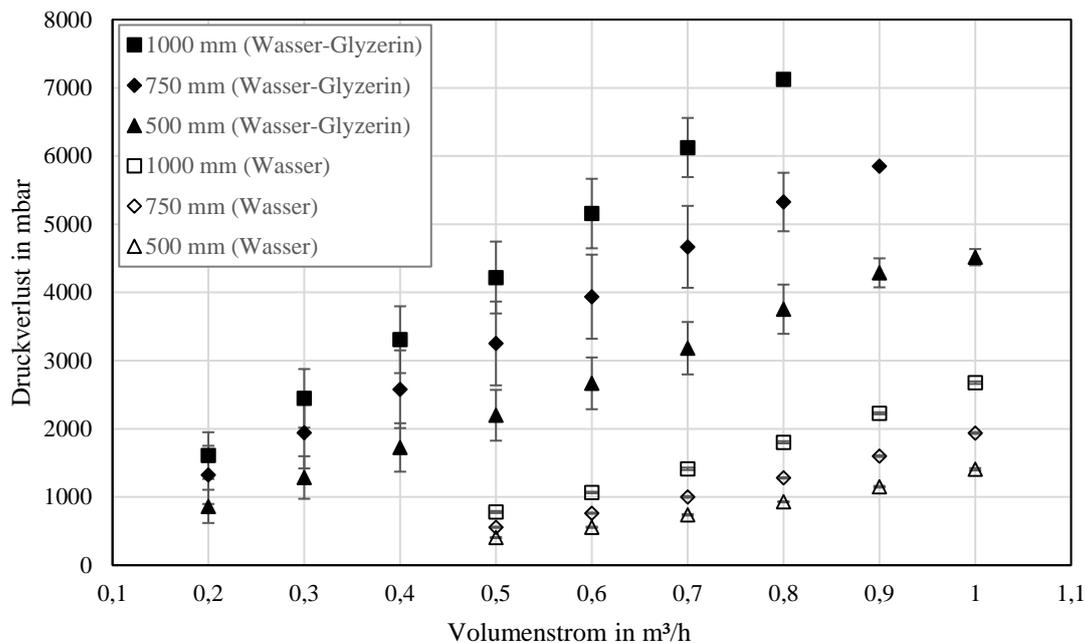


ABBILDUNG 6-1 VERGLEICH DES DRUCKVERLUSTES VON WASSER UND EINER 85 GEW.-% WASSER-GLYZERIN-MISCHUNG

Durch die größere Viskosität der Wasser-Glyzerin-Mischung steigt die innere Reibung, was wiederum den Druckverlust erhöht. Der höhere Druckverlust sorgt jedoch für eine geringere relative Unsicherheit des Differenzdrucksensors im Vergleich zur Verwendung von Wasser als Prozessfluid. Die Erhöhung der inneren Reibung hat zudem auch Auswirkungen auf die Temperatur des Prozessfluids, was sich wiederum auf die Reproduzierbarkeit der Messpunkte auswirkt. Ohne Temperierung war es für die untersuchte Wasser-Glyzerin-Mischung im Zeitfenster von 30 bis 60 Minuten zwar möglich, konstante Volumenströme zu erreichen, jedoch keine stationären Temperaturzustände. In Abbildung 6-1 ist dieser Effekt durch die größere Standardabweichung des Druckverlustes der Wasser-Glyzerin-Mischung, besonders bei steigendem Volumenstrom, zu sehen. Die sehr kleinen Standardabweichungen der letzten Messpunkte des Wasser-Glyzerin-Gemischs werden durch das Verhalten der PID-Regelung und die Umkehr der Messrichtung am Ende des möglichen Regelbereichs verursacht. Hier wird der letzte Messpunkt der ersten und der erste Messpunkt der zweiten Messreihe in einem Betriebspunkt erfasst. Durch das Ausbleiben des Anfahrens eines neuen Betriebspunktes ist die Erwärmung des Prozessfluides hier vergleichsweise gering, was zu den sehr kleinen Standardabweichungen führt. Die Abfolge der Messpunkte und die Verweildauer in den einzelnen Messpunkten haben maßgeblichen Einfluss auf die

Erwärmung des Prüfstandes. Der PID-Regler im LabVIEW-VI des remote Prüfstandes hält den eingestellten Volumenstrom durch die Festbettschüttung in Strömungspfad 2 unabhängig von der Temperatur konstant. Die hierzu genutzte Führungsgröße, der Volumenstrom, wird aus einer als konstant angenommenen Dichte und dem gemessenen Massenstrom berechnet. Ohne Kompensation der Dissipation durch eine Temperierung oder einen Algorithmus in Kombination mit dem PID-Regler, ist der gemessene Druckverlustwert in einem Betriebspunkt abhängig von der Temperatur des Prozessfluides. Die Messungen mit Wasser zeigen eine weniger starke Abweichung und weisen eine bessere Reproduzierbarkeit auf. Für eine möglichst gute Reproduzierbarkeit vieler aufeinander folgender Messreihen muss der remote Prüfstand entweder mit Wasser betrieben oder mit einer geeigneten Temperierung versehen werden.

In der Betrachtung der dimensionslosen Darstellung des Reibungsbeiwerts sind zwei Bereiche mit unterschiedlichen Strömungszuständen zu erkennen (siehe Abbildung 6-2). Der Verlauf der Ausgleichsgerade für die Reibungsbeiwerte mit Wasser als Prozessfluid weist eine geringere Steigung auf, als die der Ausgleichsgeraden für die Messpunkte mit der Wasser-Glycerin-Mischung. Die beiden Ausgleichsgeraden schneiden sich im Bereich $10^{-1} > Re_p / (1 - \epsilon) > 10^{-2}$ und deuten auf eine Veränderung der vorherrschenden Strömungssituation hin. Ein ähnlicher Verlauf ist für den Widerstandsbeiwert in durchströmten Rohren zu beobachten [VDI-GVC 2013, S. 1226]. Die Reynoldszahlen für die Messungen mit Wasser sind um zwei Größenordnungen größer, als die mit Wasser-Glycerin. Die Strömung mit Wasser unterliegt daher eher turbulenten Verhältnissen, während die Strömung der Wasser-Glycerin-Mischung als laminar anzunehmen ist.

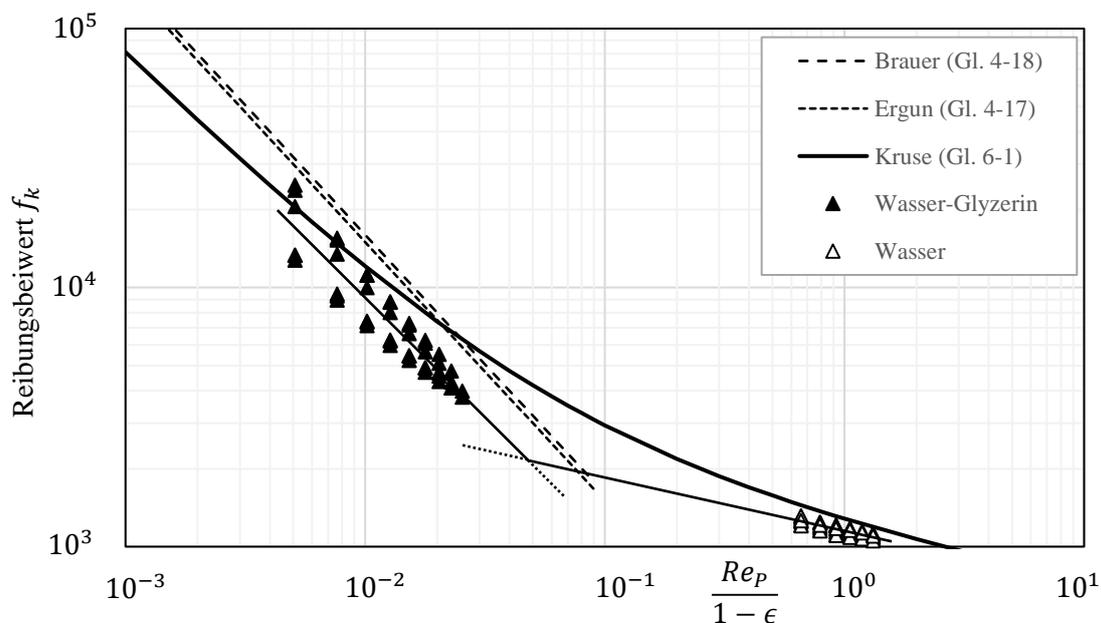


ABBILDUNG 6-2 REIBUNGSBEIWERT DER FESTBETTSCHÜTTUNGEN ÜBER DER REYNOLDSZAHL

Der Übergang zwischen diesen beiden Strömungsregimen wurde nicht untersucht, ist jedoch nicht so sprunghaft zu erwarten, wie im Schnittpunkt der Ausgleichsgeraden dargestellt. Vielmehr kommt es bei

steigender Reynoldszahl zu einem stetigen Anstieg der turbulenten Effekte. Der Plot der Summenformel aus den Potenzgleichungen der beiden Ausgleichgeraden gibt einen Eindruck des Übergangsbereichs vom laminaren zum turbulenten Strömungszustand wieder. Die Summenformel besteht aus der Addition der Terme beider Trendlinien der Messgruppen und lautet wie folgt:

$$f_k = \frac{Re_P}{1 - \epsilon} (1152^{-0,205} + 130,93^{-0,992}) \quad 6-1$$

Die Faktoren dieser Summenformel entstehen aus 15 Messreihen mit insgesamt 84 ausgewerteten Messpunkten.

Die Plots der Widerstandsbeiwerte nach Brauer (Gleichung 4-18) und Ergun (Gleichung 4-17) liegen nahe dem Bereich der untersuchten Reibungsbeiwerte für die Wasser-Glyzerin-Mischung. Die beiden geplotteten Verläufe liegen jedoch oberhalb der gemessenen Werte, weisen aber eine vergleichbare Steigung auf. Die Reibungsbeiwerte liegen hier deutlich näher an dem Verlauf des Plots der Ergun-Gleichung, so wie auch der hier gemessene Druckverlust in Abbildung 5-4. Die Trendlinie der Reibungsbeiwerte für Wasser hat eine deutlich abweichende Steigung. Zudem liegen diese Reibungsbeiwerte auch deutlich abseits des Verlaufs der Werte von Brauer und Ergun. Die Reibungsbeiwerte für Wasser liegen hier näher an den Werten einer gedachten Fortführung der beiden Plots. Analog zu den gemessenen Druckverlusten in Abbildung 5-6 liegen die Reibungsbeiwerte für Wasser auch hier näher an den durch Brauers Gleichung berechneten Werten. Der Verlauf der Plots wirft jedoch die Frage nach der grundsätzlichen Eignung der Gleichungen für diesen Bereich der Reynoldszahlen auf.

Für den Betrieb des Prüfstandes als Remote Labor kann dies eine mögliche Fragestellung sein. Sollen der Einfluss der Temperatur und die veränderliche Viskosität betrachtet werden, so eignen sich die 750 mm oder 1000 mm langen Schüttungen in Kombination mit der 85 Gew.-% Wasser-Glyzerin-Mischung. Abhängig vom Lernziel kann die Erwärmung des Prozessfluides für Wasser und eine beliebige Schüttung aus 3 mm Partikeln vernachlässigt werden. Der Vergleich des Druckverlustes von unterschiedlichen Schüttungs- und Fluidkonfigurationen im remote Betrieb ist nur durch eine zusätzliche Temperierung oder durch den Vergleich mit bereits vermessenen Konfigurationen möglich. Für dieses Szenario bietet sich z.B. die Verwendung der 750 mm-Festbettschüttung an, da es möglich ist, sie mit beiden Prozessfluiden im Bereich von 0,5 m³/h bis 0,9 m³/h zu durchströmen. Diese Schüttungslänge führt in den genannten Betriebspunkten zu gemessenen Druckverlusten zwischen 557 mbar und 5852 mbar.

6.3 Bewertung der Simulation für den Einsatz im VRL-Lernprozess

Ziel der durchgeführten Simulation ist die Visualisierung der Strömungszustände vor, in und nach einer Festbettschüttung. Da eine numerische Simulation auch für nicht plausible Fälle Werte berechnet, muss die Bewertung der Ergebnisse immer unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen erfolgen. Für die Simulation wurden verschiedene vereinfachende Maßnahmen angewendet, welche bei der Betrachtung

des Ergebnisses berücksichtigt werden müssen. Die Länge der digitalen Festbettschüttung ist auf 25 mm im Vergleich zur kleinsten experimentell untersuchten Schüttung reduziert (1:20) und besteht aus 1173 Partikeln. Im Unterschied zur Porosität der zufälligen Schüttungen aus Kapitel 5.1.1 ($\epsilon < 0,4$) liegt die Porosität der digitalen Zufallsschüttung mit $\epsilon = 0,59$ deutlich höher. Die Vernetzung mit 12,8 Millionen Gitterzellen führt die 25 mm Festbettschüttung bereits zu einer Rechenzeit von 24 bis 48 Stunden, je nach verwendetem Turbulenzmodell. Zur Verbesserung der Netzqualität, und damit der Beschleunigung der numerischen Berechnung, werden Maßnahmen ergriffen um starke geometrische Verzerrungen des Rechengitters, besonders an spitzen Winkeln, zu reduzieren. In den Kontaktstellen zwischen den Partikeln wird dies durch die Reduktion des Partikeldurchmessers von 3 mm auf 2,95 mm erreicht, wobei die Porosität um weniger als 6 % zunimmt [Bai et al. 2009, S. 4064]. Mit der gleichen Intention wurde auch ein Spalt von 1 mm zwischen den Partikeln der Festbettschüttung und der begrenzenden Rohrwand hinzugefügt.

Im Vergleich mit den Werten der empirischen Gleichungen von Ergun, Brauer und Molerus weist der simulierte Druckverlust deutliche Abweichungen auf. Die simulierten Druckverlustwerte haben Abweichungen von bis zu 33,3% zu den am nächsten gelegenen Werten nach Molerus. Die großen Abweichungen sind allgemein auf die oben erwähnten Maßnahmen zur Vereinfachung der Simulation zurückzuführen. Die Skalierung des Druckverlustes auf eine längere Schüttung, wie sie z.B. im Experiment untersucht worden ist, wäre über die Höhe der Schüttung oder die Anzahl der betrachteten Partikel möglich [ebd., S. 4067]. Aufgrund der hohen Abweichungen zu den theoretischen Modellen und der unterschiedlichen Porosität der realen Schüttung lassen sich die simulierten Werte so jedoch nicht quantitativ validieren. Für einen qualitativen Einblick in den Zustand der Strömung vor, in oder nach der Durchströmung des Festbetts lässt sich die mit dem RSM-Turbulenzmodell visualisierte Strömung jedoch heranziehen. Die grundlegenden Effekte der Strömungsmechanik werden durch die Simulation qualitativ korrekt abgebildet. Die Flächendarstellung des Drucks in Abbildung 5-13 zeigt eine plausible Verteilung, bei der die Abhängigkeit zur Strömungsgeschwindigkeit berücksichtigt ist. Auch die Geschwindigkeitsverteilung in Abbildung 5-14 stellt sich plausibel dar. Gut zu erkennen ist dies an der Haftbedingung in Wandnähe, an der Beschleunigung der Strömung zwischen den Partikeln und den sichtbaren Staupunkten der senkrecht angeströmten Partikel, z.B. in der ersten Partikelschicht. Trotz der vorgenommenen Vereinfachungen und Beschränkungen der Simulation bildet diese den komplexen Strömungsvorgang durch die computergenerierte Festbettschüttung hinreichend genau ab. Die Visualisierungen der Simulationsergebnisse können z.B. für die Vorbereitung auf ein remote Experiment mit dem Strömungsprüfstand genutzt werden.

6.4 Empfehlungen für die Einrichtung eines VRL-Lernprozesses

Die Umsetzung der vorgestellten Strategie zur Mitarbeiterqualifikation nach den Anforderungen der Industrie 4.0 bearbeitet Herausforderungen in unterschiedlichen Bereichen. Im Folgenden werden die

Erfahrungen aus der Einrichtung der VRLs vorgestellt. Bei der Entwicklung der VRLs und des Lernprozesses stehen die Aspekte der Nachhaltigkeit, ein möglichst hohes Maß an Modularität sowie die einfache Übertragbarkeit von Konzepten und Technologien im Vordergrund.

Herausforderungen für die Einrichtung des VRL-Lernprozesses:

Der VRL-Lernprozess kombiniert unterschiedliche Softwaretools und Technologien mit dem Ziel, ein ortsunabhängiges eLearning-Angebot für den Aufbau praktischer Kompetenz im Umgang mit virtuellen und remote Laboren zu entwickeln. Die Herausforderungen lassen sich grob in Fragestellungen der Technologien und der Organisation unterteilen.

Die Organisation eines VRL-Lernangebotes wird in die Phasen Einrichtung und Betrieb unterteilt. Die Einrichtung umfasst hierbei die Planung, die Umsetzung und die Inbetriebnahme der Elemente des VRL-Lernprozesses. Die Zielsetzung des VRL-Lernprozesses beeinflusst die Gestaltung des fachlichen Inhaltes, des allgemeinen Lernprozessablaufes und seine Einbindung in ggf. bestehende Aus- und Weiterbildungsangebote. Die Akzeptanz des Lernangebotes wird durch die Einbeziehung der Zielgruppe in die Einrichtungsphase verbessert. Gleichzeitig hilft eine wiederkehrende Evaluation ab der Planungsphase, Probleme zu erkennen und ihre Wiederholung zu vermeiden. Eine klare Aufgabenverteilung und feste Ansprechpartner schaffen Transparenz und ermöglichen den gezielten Erfahrungsaustausch. Der Betrieb eines VRL-Lernangebotes lässt sich in die Sicherstellung der Bereitschaft und die Fortentwicklung des Angebotes aufteilen. Für die Sicherstellung der Bereitschaft einzelner Elemente des VRL-Lernprozesses (LMS, VRL, etc.) werden klare Verantwortungsbereiche benötigt. Im Sinne der Nachhaltigkeit sind Kosten für Instandsetzung oder Modernisierungen bereits in der Planungsphase zu berücksichtigen. Die Fortentwicklung des Angebotes stützt sich auf die Ergebnisse der Evaluation durch die Nutzer, veränderte Anforderungen oder die Verfügbarkeit neuer Technologien. Organisatorisch ist die Bereitstellung eines attraktiven VRL-Lernangebotes ein fortwährender Prozess, an denen viele unterschiedliche Stellen teilhaben.

Auf der technischen Seite ist die Frage zu klären: Wer stellt die IT-Infrastruktur bereit und wartet diese? Je nach vorhandener Kapazität kann die Bereitstellung der IT-Infrastruktur intern oder durch externe Dienstleister erfolgen. Die notwendige IT-Infrastruktur besteht aus Webseiten-Servern, LMS-Servern, Servern für das Labor-Management-System sowie ggf. Servern für die Bereitstellung von Diensten für Videokonferenzen. Darüber hinaus werden ein Netzwerk oder Subnetzwerk, eine Firewall und ein Gateway benötigt, um die Anbindung an das Internet zu ermöglichen. Die Aspekte IT- und Datensicherheit sind dem Einsatzgebiet entsprechend zu berücksichtigen. Soll der VRL-Lernprozess ganz oder in Teilen nicht öffentlich erreichbar sein, stellt ein VPN-Tunnel eine geschützte Verbindung her.

Herausforderungen in Bezug auf die Zielgruppe:

Die frühe und permanente Einbeziehung der Zielgruppe für den Betrieb eines VRL-Angebotes ist unabdingbar. Für die Organisation des Lernprozesses und die Aufbereitung der fachlichen Inhalte ist die

Medienkompetenz der Nutzer zu berücksichtigen. Die Medienkompetenz einer auf den ersten Blick homogen wirkenden Zielgruppe kann äußerst divers ausgeprägt sein. Zur Kompensation unterschiedlicher Medienkompetenzen lässt sich die Individualität des VRL-Lernprozesses nutzen. Der ortsunabhängige Zugriff und die flexiblen Nutzungszeiträume erhöhen zudem die Akzeptanz des VRL-Lernprozesses zur Aus- und Weiterbildung. Die Untersuchung der Wirksamkeit des VRL-Lernprozesses wird für die Optimierung des Lernangebotes genutzt. Die Durchführung von validen Wirksamkeitsstudien ist sehr komplex und fällt in den Bereich der Lehr- und Lernforschung. Eine interdisziplinäre Kooperation zwischen dem Anbieter eines VRL-Lernprozesses und Experten der Lehr- und Lernforschung kann auch diesen Aspekt für die Optimierung des Lernprozesses zugänglich machen.

Herausforderungen für die Einrichtung eines remote Labors:

Für die Einrichtung eines remote Labors dienen i.d.R. klassische Laborversuche als Vorbild. Remote Labore profitieren von einem modularen Aufbau, der das einfache Austauschen einzelner Komponenten ermöglicht. Dies ist zur Variation des Experiments (z.B. im wöchentlichen Rhythmus), aber auch zum Beheben von Störungen an einzelnen Bauteilen notwendig. Dabei erlaubt die Modularität des remote Labors einen Umbau, ohne den Betrieb oder die Bereitschaft des Labors zu lange einzuschränken. Dieser Aspekt gilt für den mechanischen und elektrischen Versuchsaufbau genauso wie für die Kontrollsoftware am Labor-PC. Die Festlegung eines Technologiestandards hilft bei der Vermeidung redundanter Strukturen und grenzt die Zahl der Problemquellen ein. Bei der Umrüstung eines bestehenden Aufbaus zu einem remote Labor ist zu prüfen, inwiefern der Aufbau für den unbeaufsichtigten Fernbetrieb geeignet ist. Dies betrifft die Aspekte der Anbindung an einen Labor-PC, aber auch das vom Versuchsaufbau ausgehende Gefahrenpotential. Werden für das Experiment z.B. Laserstrahlen oder sich frei bewegende Roboter verwendet, muss die Gefährdung angrenzender Anlagen oder sich zufällig im Raum befindender Personen ausgeschlossen werden.

Bei der Wahl der Komponenten für den Versuchsaufbau sind die angestrebte Dauer der Durchführungsphase sowie die Lebensdauer in der geplanten Bereitstellungsweise zu berücksichtigen. Insbesondere bei der Beschaffung von Sensoren und Aktoren können durch die sorgfältige Auswahl der Komponenten die Investitionskosten reduziert werden. Die Abbildung eines Versuchsaufbaus im Modellmaßstab kann den finanziellen und zeitlichen Aufwand für die Anschaffung und die Inbetriebnahme sowie die Betriebs- und Wartungskosten senken.

Der Aufbau oder die Umrüstung eines Experimentes zum remote Labor gelingt durch interdisziplinäre Zusammenarbeit verschiedener Fachbereiche. In den meisten Fällen wird eine Person aus der Fachdisziplin des anzubietenden remote Labors federführend tätig. Für die Ausführung der elektrischen Arbeiten ist entsprechend qualifiziertes Personal zwingend erforderlich. Die Programmierung der Kontrollsoftware und die Anbindung an eine zentrale Labor-Management-Struktur wie iLab benötigen die Kompetenzen einer IT-Fachkraft.

Ganz allgemein lässt sich festhalten: Die Herausforderungen bei der Einrichtung und dem Betrieb eines formalen oder non-formalen eLearning-Lernangebotes sind auch ohne die Verwendung von virtuellen und remote Laboren vielfältig. Durch die Verwendung von VRLs wird der Einsatzbereich von eLearning um den Aspekt des Aufbaus praktischer Kompetenzen erweitert. Hinzu kommen eine Reihe VRL-spezifischer Herausforderungen und Verantwortungsbereiche. Für die erfolgreiche Einrichtung und den zuverlässigen Betrieb eines VRL-Lernangebots sind eine klare Zielsetzung, transparente Kommunikation unter den Beteiligten und eine zentrale Dokumentation unabdingbar.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Transformation der Arbeitswelt hin zur Industrie 4.0 ist ein aktuelles Thema für Arbeitnehmer und Arbeitgeber. Es konnte gezeigt werden, dass die neue Arbeitsumgebung der Industrie 4.0 auch neue Anforderungen an die Mitarbeiterqualifizierung stellt. Zur Deckung des Bedarfs an qualifizierten Mitarbeitern betreiben viele Unternehmen klassischerweise Programme zur Personalentwicklung. Die Verwendung von eLearning-Konzepten in diesem Kontext beschränkt sich dabei bisher vorwiegend auf die Vermittlung theoretischer Inhalte. Für die Industrie 4.0 werden neben den klassischen Fachkompetenzen zunehmend auch Querkompetenzen für das Arbeiten in stark vernetzten Umfeldern benötigt. Diese Querkompetenzen fordern das praxisnahe Lernen an realitätsnahen Problemstellungen. Die praxisorientierte Aus- und Weiterbildung durch das Arbeiten mit realen technischen Anlagen ist bisher wenig flexibel und nur eingeschränkt für den Einsatz in eLearning-Konzepten geeignet.

Um auch praktische Kompetenzen in eLearning-Konzepten flexibel und individuell aufbauen zu können, müssen geeignete Schulungsanlagen virtualisiert werden. Hierdurch wird es möglich, praktische Erfahrungen in eLearning-Konzepten zu integrieren. Die Virtualisierung von technischen Anlagen zu Aus- und Weiterbildungszwecken ist in Form von simulierten virtuellen Laboren oder realen remote Laboren möglich. Ein virtuelles Labor besteht als rein digitales Konstrukt und bildet die betrachteten Zusammenhänge durch mathematische Modelle und Algorithmen ab. Hierdurch lässt sich dieses Labor für gewöhnlich beliebig vervielfältigen, die Genauigkeit der Abbildung ist jedoch vom betriebenen Entwicklungsaufwand abhängig. Ein remote Labor besteht aus einem physikalischen Versuchsaufbau, welcher durch eine geeignete Hardware über das Internet bedienbar ist. Durch die reale Natur des Versuchsaufbaus muss der Zugriff auf ein remote Labor organisiert werden, um Überschneidungen bei der Nutzung zu vermeiden. Die Genauigkeit der Abbildung eines solchen Labors entspricht der physikalischen Realität, ist jedoch durch das Übertragungsvermögen der im Aufbau verwendeten Komponenten begrenzt.

Die Bereitstellung eines virtuellen oder remote Labors ist keineswegs eine rein technische Herausforderung. Das praxisorientierte Lernen ohne direkte Betreuung stellt zudem eine organisatorische Herausforderung dar. Um den praktischen Kompetenzgewinn in Aus- und Weiterbildung mit virtuellen oder remote Laboren zu begleiten, wurde der VRL-Lernprozess entwickelt. Die Zielsetzung sieht den individuellen und flexiblen Zugriff auf verschiedene onlineverfügbare virtuelle und remote Labore vor. Die Zielgruppe setzt sich dabei aus dem Kreis der allgemein interessierten Nutzer, den formal oder non-formal lernenden Nutzern und aus den lehrenden Nutzern zusammen. Der VRL-Lernprozess besteht aus den Phasen: Orientierung, Vorbereitung, Reflexion, Durchführung, Auswertung, Präsentation und Bewertung. Dabei ist der Prozess nicht zwingend linear, sodass die Nutzer einzelne Phasen überspringen können (z.B.: Lehrende zu Demonstrationszwecken). Die ersten drei Phasen dienen der individuellen Orientierung und Vorbereitung der Nutzer. Das Kernelement des VRL-Lernprozesses ist der Zugriff auf ein virtuelles oder remote Labor in der Durchführungsphase. Die hier gewonnenen Daten werden in der

Auswertungsphase genutzt um, je nach Lernziel, aufgestellte Hypothesen zu bestätigen oder zu widerlegen. Die Präsentationsphase und die Bewertungsphase dienen der Leistungsbewertung. Der VRL-Lernprozess begleitet die praxisnahe Mitarbeiterqualifizierung mit virtuellen und remote Laboren entsprechend den Anforderungen der Industrie 4.0.

Der vorgestellte VRL-Lernprozess zur Begleitung des Lernens mit virtuellen und remote Laboren ist ein erster Entwurf. Die Verknüpfung der Reflexionsphase mit der Vorbereitungsphase ermöglicht ein aussagekräftiges Feedback für den Nutzer und kann das individuelle Lernergebnis verbessern. Das für die Reflexionsphase des VRL-Lernprozesses entwickelte virtuelle Prozessschema erkennt bereits einfache Fehler, die der Nutzer beim Zusammenstellen des virtuellen Versuchsaufbaus gemacht hat. Ein detaillierterer Algorithmus zur Prüfung des Aufbaus, welcher nicht nur die Art der virtuellen Bauteile, sondern auch den Einsatzbereich der selbigen berücksichtigt, kann die Aussagekräftigkeit des Feedbacks aus der Reflexionsphase verbessern. Werden die Rückmeldungen aus diesem Feedback mit entsprechenden Abschnitten der Versuchsvorbereitung verknüpft, lassen sich so die individuellen Wissenslücken der Nutzer schließen. Hierfür kann die Verwendung eines globalen Wikis zur dynamischen Vorbereitung mehrerer VRLs eine realitätsnahe Datenbasis schaffen.

Die Anbindung des VRL-Lernprozesses an ein Lern-Management-System wird die Integrationsfähigkeit des VRL-Angebots in bestehende eLearning-Formate vereinfachen. Hierzu ist die Verwendung von Standards für eLearning-Inhalte, wie z.B. Shareable-Content-Object-Reference-model (SCORM) oder dem IEEE Standard 1484 Learning-Objects-Metadata (LOM) zu empfehlen. Dies erleichtert den Austausch und Einsatz einzelner Elemente des eLearning-Konzeptes zwischen verschiedenen eLearning-Angeboten. Die LMS-Anbindung schafft eine Kommunikationsplattform für den Austausch unter den Nutzern und die Möglichkeit, auch kollaborative Lernszenarien umzusetzen.

Aussagekräftige Evaluationen über mehrere Nutzungszyklen hinweg konnten bisher noch nicht durchgeführt werden. Hier wird eine kontinuierliche Evaluation des VRL-Lernprozesses nach einem globalen Standard einen VRL-übergreifenden Vergleich verschiedener Labore ermöglichen. Dies erlaubt den Vergleich der technischen Umsetzung, der Qualität der Einbindung in bestehende Lehrveranstaltungen und die Bewertung der persönlichen Erfahrungen mit dem VRL-Lernprozess zur Einhaltung eines, noch festzulegenden, globalen Qualitätsstandards.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Virtualisierung eines Labors am Beispiel der Erweiterung eines verfahrenstechnischen Prüfstands zu einem remote Labor gezeigt. Zunächst wurde das für den lokalen Betrieb des Prüfstands gedachte Bedienkonzept für den remote Betrieb angepasst. Durch die Abwesenheit des Nutzers im Laborraum müssen alle notwendigen Funktionen über einen Labor-PC bedienbar sein. Im remote Betrieb findet die Interaktion mit dem Prüfstand ausschließlich über die Bedienoberfläche der Kontrollsoftware in LabVIEW statt. Die für den Betrieb notwendigen Messwerte (Druck, Temperatur und Durchfluss) und Bedienparameter (Drehzahl, Drosselstellung und Volumenstrom über

einen PID-Regler) werden auf der LabVIEW Bedienoberfläche angezeigt bzw. eingegeben. Die Sicherheitssysteme und elektrischen Anlagen wurden ebenfalls an den remote Betrieb angepasst, um das Labor und den Prüfstand vor Fehlbedienungen oder Ausfällen zu schützen. Für den Fall eines technischen Defektes oder einen anderweitigen Ausfall des Labor-PCs wurde eine Sicherheitsschaltung zur Überwachung eingerichtet, welche den Prüfstand ggf. vorsorglich abschaltet. Es wurde gezeigt, dass die vorgestellten Maßnahmen den sicheren remote Betrieb des Prüfstands und seine Bedienung über das Internet ermöglichen.

Für den remote Betrieb ist die Untersuchung des Druckverlustes einer Festbettschüttung vorgesehen. Um den zuverlässigen remote Betrieb des Prüfstands zu gewährleisten, wurden Voruntersuchungen mit drei unterschiedlich langen Festbettschüttungen und zwei verschiedenen Prozessfluiden durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war die Auswahl einer robusten Konfiguration des Prüfstandes für den remote Betrieb. Hierfür wurden zufällige Festbettschüttungen mit 500 mm, 750 mm und 1000 mm Länge betrachtet, die aus monodispersen Glaskugeln mit 3 mm Durchmesser bestanden. Als Prozessfluid wurde zunächst Wasser verwendet. Weiterhin wurde eine Wasser-Glyzerin-Mischung mit 85 Gew.-% Glyzerin als Modellfluid mit einstellbarer Viskosität ausgewählt. Für den remote Betrieb in dauerhafter Bereitschaft wird eine Konfiguration mit einer 1000 mm Festbettschüttung aus 3 mm Partikeln und Wasser als Prozessfluid empfohlen, um auch bei großer Auslastung reproduzierbare Messergebnisse zu erhalten.

Um den Einsatzbereich des remote Strömungsprüfstandes zu erweitern, bieten sich verschiedene Modifikationen an. Für einen erweiterten Parameterspielraum im Betrieb als remote Labor aber auch für die mobile Bedienung des Prüfstandes per Smartphone oder Tablet muss das LabVIEW-VI überarbeitet werden. Hierbei müssen die Art der Darstellung sowie die Benutzereingaben an eine Bedienung durch mobile Endgeräte angepasst werden. Weiterhin ist es sinnvoll, das LabVIEW-VI zur Prüfstandskontrolle von einer einfachen Ablaufsteuerung in einen Zustandsautomaten zu übertragen. Hierdurch lassen sich überwachende Funktionen besser in den Programmablauf integrieren, was letztendlich einen größeren Spielraum bei der Wahl der Betriebsparameter erlaubt. Zudem ist der Prüfstand für den Betrieb mit einer geeigneten Temperierungsanlage vorbereitet. Durch die Installation einer geeigneten Temperierung können präzisere Untersuchungen im Viskositätsbereich von 1 bis 100 mPas zum Übergang der Strömungssituation vom laminaren ins turbulente Strömungsregime durchgeführt werden. Auch kann das Förderverhalten von Pumpen bei unterschiedlich viskosen Prozessfluiden untersucht werden. Neben der Abhängigkeit des Druckverlustes über Festbettschüttungen vom Prozessfluid kann auch die Durchströmung monodisperser Festbettschüttungen mit anderen Partikelgrößen oder polydispersen Partikelschüttungen untersucht werden.

Für die Organisation des Zugriffs auf den eingerichteten remote Prüfstand, z.B. im Rahmen des vorgestellten VRL-Lernprozesses, wurde das remote Labor in das Labor-Management-System iLab integriert.

Das Labor-Management-System wurde auf einem virtuellen Server eingerichtet und ist der Hauptbestandteil der notwendigen Infrastruktur zum geregelten Betrieb eines oder mehrerer remote Labore. Die Verbindung zwischen dem verfahrenstechnischen remote Labor und dem Labor-Management-System erfolgt über ein eigens eingerichtetes Subnetz. Für die Erweiterung des Einsatzspektrums des Labor-Management-Systems kann durch die Anpassung des Quellcodes auch der von LabVIEW unabhängige Betrieb von remote Laboren ermöglicht werden. Für die Nutzung von remote Laboren auf mobilen Endgeräten empfiehlt sich die Verwendung eines alternativen Labor-Management-Systems.

Eine alternative Form der Virtualisierung stellt die simulierte Abbildung der Strömungsvorgänge innerhalb der Festbettströmung dar. Diese wurde mit Hilfe einer CFD-Simulation umgesetzt, mit welcher das digitale Modell einer Zufallsschüttung virtuell durchströmt wurde. Die digitale Zufallsschüttung wurde durch einen Zufallsalgorithmus aus runden Partikeln erzeugt. Anschließend ist die Durchströmung dieses aus 2,95 mm großen Partikeln bestehenden Festbetts auf einer Länge von 25 mm mit der Simulationssoftware ANSYS Fluent simuliert worden. Zur Abbildung der turbulenten Anteile der Strömung im RANS-Verfahren wurden die vier Turbulenzmodelle Standard $k - \epsilon$, Standard $k - \omega$ und SST $k - \omega$ und RSM verglichen. Die Ergebnisse der numerischen Berechnungen mit dem RSM-Modell ermöglichten die Visualisierung der komplexen Strömungssituation in den Zwischenräumen der Partikel des Festbetts.

Um die Simulationsergebnisse mit Messergebnissen des Strömungsprüfstandes zukünftig quantitativ zu verifizieren, muss der Realitätsgrad der Simulation verbessert werden. Die Verwendung eines CT-Scans als reales Vorbild für die simulierte Durchströmung einer digitalen Festbettschüttung verspricht einen präzisen Einblick in tatsächliche Strömungsverhältnisse. Hierzu wurde ein Modellfestbett mit gleichem Durchmesser der experimentell betrachteten Schüttung und einer Länge von ca. 60 mm mit einem μ CT-Scanner vermessen. Die gewonnenen Daten liegen als Punktwolke vor und können über eine 3D-Flächenrückführung in ein CAD-Modell überführt werden. Durch künftige Simulationen mit diesem neuen CAD-Modell lassen sich die simulierten Strömungszustände am ehesten mit Messergebnissen aus realen Experimenten vergleichen. Die transiente Simulation unterschiedlicher Anströmgeschwindigkeiten ermöglicht zusätzlich eine bewegte Visualisierung der komplexen Strömungsvorgänge vor, innerhalb und nach der digitalen Festbettschüttung. Die lange Berechnungsdauer von 24 – 48 Stunden verhindert den direkten Einsatz der CFD-Simulation im VRL-Lernprozess. Mit einer Vielzahl an im Vorfeld angefertigten Strömungssimulationen können die Visualisierungen jedoch als interaktive Medien in die Vorbereitungs-, Reflexions- und Durchführungsphase des VRL-Lernprozesses integriert werden. So kann der Einfluss z.B. der Strömungsgeschwindigkeit oder anderer Parameter auf die Strömungssituation hier interaktiv erarbeitet werden.

8 Literaturverzeichnis

- ANSYS (2016): Firmenschrift: ANSYS Best Practice Guidelines. Mesh Quality (Lecutre 9). Hg. v. ANSYS Inc. Online verfügbar unter <https://de.scribd.com/document/342686980/Fluent-Intro-16-0-L09-BestPractices-pdf>, zuletzt geprüft am 08.06.2017
- Bai, Hua; Theuerkauf, Jörg; Gillis, Paul A.; Witt, Paul M. (2009): A Coupled DEM and CFD Simulation of Flow Field and Pressure Drop in Fixed Bed Reactor with Randomly Packed Catalyst Particles. In: *Ind. Eng. Chem. Res.* 48 (8), S. 4060–4074. DOI: 10.1021/ie801548h
- BITKOM (2015): Industrie 4.0 – Deutschland als Vorreiter der digitalisierten Vernetzung von Produkten und Produktionsprozessen. Politische Handlungsempfehlungen. Hg. v. BITKOM. BITKOM
- BMAS (2015): Grünbuch. Arbeiten 4.0, Arbeit weiterdenken. Hg. v. Bundesministerium für Arbeit und Soziales. Berlin
- BMBF (2016): Digitale Medien in der beruflichen Bildung. Hg. v. Bundesministerium für Bildung und Forschung. Berlin
- BMVI (2017): Breitbandausbau in Deutschland. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Online verfügbar unter <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/breitbandausbau-in-deutschland.html>, zuletzt geprüft am 08.06.2017
- Böhler, Christian (2013): Webbasiertes Lernen in Unternehmen. Entscheider/innen, Zielgruppen, Lernformen und Erfolgsfaktoren. In: Martin Ebner und Sandra Schön (Hg.): Lehrbuch für Lernen und Lehren mit Technologien. 2. Aufl. Berlin: epubli GmbH, S. 489–495
- Botthof, Alfons; Hartmann, Ernst Andreas (Hg.) (2015): Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0. Unter Mitarbeit von Ernst Andreas Hartmann. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg
- Boulos, Maged N. Kamel; Hetherington, Lee; Wheeler, Steve (2007): Second Life: an overview of the potential of 3-D virtual worlds in medical and health education. In: *Health information and libraries journal* 24 (4), S. 233–245. DOI: 10.1111/j.1471-1842.2007.00733.x
- Brauer, Heinz (1971a): Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen. 1. Aufl. Aarau: Sauerländer (Grundlagen der chemischen Technik)
- Brauer, Heinz (1971b): Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen. 2. Aufl. Aarau: Sauerländer (Grundlagen der chemischen Technik)
- Bruchmüller, Hans-Georg; Haug, Albert (2001): Labordidaktik für Hochschulen. Eine Hinführung zum praxisorientierten Projekt-Labor. Alsbach: Leuchtturm-Verlag (Schriftenreihe

Report / Lenkungsausschuss der Studienkommission für Hochschuldidaktik an den Fachhochschulen in Baden-Württemberg, 40)

- Clarke, Sophie (2005): eLearning in Process and Chemical Engineering. Evaluation. In: Günter Wozny (Hg.): E-Learning in process and chemical engineering. A practical overview, Bd. 828. 1. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 3, Verfahrenstechnik, 828), S. 137–151
- Danfoss (2013): Firmenschrift: Anleitung und Datenblatt. VTL Automation Drive Reihe. Hg. v. Danfoss. Danfoss
- Duden (Hg.) (2013): Duden - Die deutsche Rechtschreibung. Unter Mitarbeit von Werner Scholze-Stubenrecht. Bibliographisches Institut Mannheim. 26. Aufl. Berlin: Dudenverlag (Der Duden, Band 1)
- Ebner, Lena (2016): Kugelschüttungen als Filter und Wärmespeicher. Bochum: Ruhr-Universität Bochum
- Ebner, Martin; Schön, Sandra (2013): Das Themenfeld "Lernen und Lehren mit Technologien". In: Martin Ebner und Sandra Schön (Hg.): Lehrbuch für Lernen und Lehren mit Technologien. 2. Aufl. Berlin: epubli GmbH, S. 11–25
- Ebner, Martin; Schön, Sandra; Bäuml-Westebbe, Gabriela; Buchern, Illona; Lehr, Christian; Egloffstein, Marc (2013): Kommunikation und Moderation. Internetgestützte Kommunikation zur Lernunterstützung. In: Martin Ebner und Sandra Schön (Hg.): Lehrbuch für Lernen und Lehren mit Technologien. 2. Aufl. Berlin: epubli GmbH
- eBusiness-Lotse Mecklenburg-Vorpommern (2015): eLearning im Unternehmen. Lernen und Arbeiten mit digitalen Medien. Unter Mitarbeit von Katharina Kutzbach. Hg. v. eBusiness-Lotse Mecklenburg-Vorpommern. Allgemeiner Unternehmensverband Neubrandenburg e. V. Neubrandenburg
- eLearning Journal (2015): Lernen im Unternehmen. Digitale Medien in der betrieblichen Bildung. Hg. v. Frank Siepmann. Hagen
- ELLI (2017): ELLI Lab Library. Hg. v. Daniel Kruse, Robert Kuska, Sulamith Frerich. Online verfügbar unter <http://elli-lab-library.de/index.php/de/>
- Ergun, Sabri (1952): Fluid Flow through packed columns. In: *Chemical Engineering Progress* 1952 (48), S. 89–94
- Feisel, Lyle D.; Rosa, Albert J. (2005): The Role of the Laboratory in Undergraduate Engineering Education. In: *Journal of Engineering Education* 94 (1), S. 121–130. DOI: 10.1002/j.2168-9830.2005.tb00833.x

- Flowserve (2016): Firmenschrift: Anleitung und Datenblatt. Kämmer Multi-Z-Serie. Hg. v. Flowserve Essen GmbH
- Fraas, Claudia; Meier, Stefan; Pentzold, Christian (2012): Online-Kommunikation. Grundlagen, Praxisfelder und Methoden. München: Oldenbourg (Sozialwissenschaften 10-2012)
- Frerich, Sulamith; Heinz, Eva; Müller, Kristina (2013): RUB-Ingenieurwissenschaften expandieren in die virtuelle Lernwelt. In: A. Erman Tekkaya, Sabina Jeschke und Marcus Petermann (Hg.): Innovationen für die Zukunft der Lehre in den Ingenieurwissenschaften. Aachen: TeachING-LearnING.EU (TeachING-LearnING.EU discussions), S. 261–265
- Frerich, Sulamith; Kruse, Daniel; Petermann, Marcus (2016): Virtual Labs and Remote Labs: Practical experience for everyone. In: Sulamith Frerich, Tobias Meisen, Anja Simone Richert, Marcus Petermann, Sabina Jeschke, Uwe Wilkesmann und A. Erman Tekkaya (Hg.): Engineering education 4.0. Excellent teaching and learning in engineering sciences. Cham, Switzerland: Springer, S. 229–234
- Fuji Electric (2014): Firmenschrift: Anleitung und Datenblatt. Differenzdruckaufnehmer FKC-Serie. Hg. v. Fuji Electric. Fuji Electric
- Gebhardt, Jonas; Grimm, Axel; Neugebauer, Laura Maria (2015): Entwicklungen 4.0 – Ausblicke auf zukünftige Anforderungen an und Auswirkungen auf Arbeit und Ausbildung. In: Institut für Erziehungswissenschaft (Hg.): Journal of technical education. JOTED, Bd. 3. Stuttgart: Institut für Erziehungswissenschaft, S. 45–61
- Gensicke, Miriam; Bechmann, Sebastian; Härtel, Michael; Schubert, Tanja; García-Wülfing, Isabel; Güntürk-Kuhl, Betül (2016): Digitale Medien in Betrieben - heute und morgen. Eine repräsentative Bestandsanalyse. 2. Aufl. Bonn: Bundesinstitut für Berufsbildung (Wissenschaftliche Diskussionspapiere / Bundesinstitut für Berufsbildung, 177)
- Georgi, Wolfgang; Metin, Ergun (2011): Einführung in LabVIEW. 4. Aufl. München: Carl-Hanser-Verl.
- Gersten, Klaus (1991): Einführung in die Strömungsmechanik. 6., überarb. Aufl. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg
- Gneuß GmbH (2012): Firmenschrift: Anleitung und Datenblatt. Druckaufnehmer DAI-Serie. Hg. v. Gneuß GmbH. Gneuß GmbH. Bad Oeynhausen
- Gomes, Luis; Bogosyan, Seta (2009): Current Trends in Remote Laboratories. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 56 (12), S. 4744–4756. DOI: 10.1109/TIE.2009.2033293
- JCGM 100:2008: Guide to the expression of uncertainty in measurement - JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections - Evaluation of measurement data)

- Gülich, Johann Friedrich (2010): Kreiselpumpen. Handbuch für Entwicklung, Anlagenplanung und Betrieb. 3. Aufl. Heidelberg: Springer-Verlag
- Haarmann, Heike; Glauch, Daniel; Roos, Eckhard (2016): Industrie 4.0 formt neue Berufsbilder. In: *Process Spezial Prozessindustrie 4.0* 2016 (10), S. 32–34
- Hesse, Wolfgang (2000): Virtualität und Realität. Konflikt zweier Welten. Hg. v. Wolfgang Hesse. Universität Marburg. Marburg
- Hogan, Brian (2016): Making a 2D Game in Phaser. In: *The Pragmatic Programmers* (84), S. 1–19
- Holm, Thomas (2016): Mobil, skalierbar, modular. In: *Process Spezial Prozessindustrie 4.0* 2016 (10), S. 42–44
- Hubig, Christoph (2011): Virtualisierung der Technik - Virtualisierung der Lebenswelt. Neue Herausforderungen für eine Technikethik als Ermöglichungsethik. In: Carl Friedrich Gethmann (Hg.): *Lebenswelt und Wissenschaft. Kolloquienbeiträge*. Hamburg: Meiner (Deutsches Jahrbuch Philosophie, Bd. 2), S. 148–158
- IHK (2014): *Wirtschaft 4.0. Große Chancen, viel zu tun*. Hg. v. Deutscher Industrie- und Handelskammertag e. V. Deutscher Industrie- und Handelskammertag e. V. Berlin/Brüssel
- Institut für Erziehungswissenschaft (Hg.) (2015): *Journal of technical education. JOTED*. Institut für Erziehungswissenschaft. Stuttgart: Institut für Erziehungswissenschaft. Online verfügbar unter <http://www.journal-of-technical-education.de/>, zuletzt geprüft am 08.06.2016
- Kalles, Dimitris (2017): Simulation for blended Learning Laboratory education. In: European Association of Distance Teaching Universities (EADTU) (Hg.): *The Envisioning Report for Empowering Universities*. 1 Band
- Kerres, Michael; Jechle, Thomas (2000): Betreuung des mediengestützten Lernens in telemedialen Lernumgebungen. In: *Unterrichtswissenschaft* (28), S. 257–277
- ISO/DIS 9906:2010, 06.06.2010: *Kreiselpumpen – Hydraulische Abnahmeprüfungen*
- Kruse, Daniel; Frerich, Sulamith; Petermann, Marcus; Ortelt, Tobias R.; Tekkaya, A. Erman (2016): Remote Labs in ELLI. Lab Experience for Every Student with Two Different Approaches. In: *Proceedings of 2016 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*. 10-13 April 2016, Abu Dhabi, UAE. Piscataway, NJ: IEEE, S. 469–475
- Kruse, Daniel; Kuska, Robert; Frerich, Sulamith; May, Dominik; Ortelt, Tobias R.; Tekkaya, A. Erman (2017): More than “Did you read the script?”. Different approaches for preparing students for meaningful experimentation processes in Remote and Virtual Laboratories. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing. Proceedings of the REV 2016*: Springer-Verlag New York Inc

- KSB (2004): Firmenschrift: Anleitung und Datenblatt. Pumpen aus der CPK-Reihe. Hg. v. KSB Aktiengesellschaft. KSB Aktiengesellschaft
- KSB (Hg.) (2009): Kreiselpumpen-Lexikon. KSB-Kreiselpumpen-Lexikon. Unter Mitarbeit von Dieter-Heinz Hellmann. Klein, Schanzlin & Becker Aktiengesellschaft. 4. Aufl. Frankenthal: KSB
- Martin-Villalba, Carla; Urquia, Alfonso; Senichenkov, Yuri; Kolesov, Yuri (2014): Two Approaches to Facilitate Virtual Lab Implementation. In: *Comput. Sci. Eng.* 16 (1), S. 78–86. DOI: 10.1109/MCSE.2014.29
- Medosch, Armin (2011): Lernen in der Netzwerkgesellschaft. Wien: Bundesministerium für Unterricht Kunst und Kultur
- Milgram, Paul; Takemura, Haruo; Utsumi, Akira; Kishino, Fumio (1994): Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. In: *Telem manipulator and Telepresence Technologies 1994* (2351), S. 282–292
- MIT iLab (2011): about iLabs. Online verfügbar unter <https://wikis.mit.edu/confluence/display/ILAB2/about+iLabs>, zuletzt geprüft am 08.06.2017
- MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung (2010): „Telefonische Befragung zum Einsatz von eLearning in deutschen Großunternehmen“. Schlussbericht zur Studie. Unter Mitarbeit von PSEPHOS Institut. Hg. v. MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung. BITKOM Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. Essen/Berlin
- MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung (2011): E-Learning 50plus. Hg. v. MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung. Essen
- MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung (2016): Weiterbildung und digitales Lernen heute und in drei Jahren. Mobiles Lernen wird der Umsatzbringer No. 1. Hg. v. MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung. Essen
- MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung (2017): Corporate learning wird zum Cyber-Learning. Hg. v. MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung. Essen
- Molerus, Otto (1982): Fluid-Feststoff-Strömungen. Strömungsverhalten feststoffbeladener Fluide und kohäsiver Schüttgüter. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg
- Muramatsu, Brandon (2006): MIT iCampus. Hg. v. Brandon Muramatsu. Online verfügbar unter <http://icampus.mit.edu/about/>, zuletzt geprüft am 08.06.2017
- Otten, Wilhelm (2016): Standards haben Priorität. In: *Process Spezial Prozessindustrie 4.0* 2016 (10), S. 6

- Pappano, Laura (2012): The Year of the Mooc. In: *New York Times* 2012, S. 1–7
- Paul, Hansjürgen (2016): Industrie 4.0. Annäherung an ein Konzept. Gelsenkirchen (Forschung aktuell)
- Pfeifer, Sabine; Lee, Horan; Zimig, Christopher; Suphan, Anne (2016): Industrie 4.0 - Qualifizierung 2025. Hg. v. VDMA
- Pfeifer, Sabine; Suphan, Anne (2015): Der AV-Index. Lebendiges Arbeitsvermögen und Erfahrung als Ressourcen auf dem Weg zu Industrie 4.0. Hg. v. Universität Hohenheim. Lehrstuhl für Soziologie. Hohenheim
- Reglin, Thomas (2012): Anerkennung und Anrechnung informellen und non - formalen Lernens. Systemfragen und Konsequenzen für die politische Umsetzung. Hg. v. Forschungsinstitut betriebliche Bildung
- Restivo, MAria Teresa; Urbano, Diana; Chouzal, Fatima (2015): Hi kids: that's funny! Mechanics 3D Virtual lab. In: Proceedings of 2015 International Conference on Interactive Mobile Communication Technologies and Learning (IMCL). 19-20 November 2015, Thessaloniki, Greece. Piscataway, NJ: IEEE
- Rey, Günter Daniel (2009): E-Learning. Theorien, Gestaltungsempfehlungen und Forschung. 1. Aufl. Bern: Huber (Psychologie-Lehrbuch)
- Rheonik GmbH (2004): Firmenschrift: Anleitung und Datenblatt. Massendurchflussmesser RHM-Serie. Hg. v. Rheonik GmbH. Neukirchen-Vluyn
- Römpf (2017): Römpf-Lexikon Online. Stuttgart. Online verfügbar unter <https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/Welcome.do>, zuletzt geprüft am 08.06.2017
- Roth, Armin (Hg.) (2016): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler
- RUB Dez. 1 (2016): Studienanfänger im 1. Fachsemester im Wintersemester 2016/2017. Hg. v. Ruhr-Universität Bochum. Bochum. Online verfügbar unter http://dwh.uv.ruhr-uni-bochum.de/fileadmin/docs/statistik/archiv/Jahr_2016-2017/Studienanfaenger_im_1FS_WS_2016-2017.PDF
- RUB Fak. MB (2016a): Studienverlaufsplan Bachelor WiSe 16/17. Hg. v. Ruhr-Universität Bochum. Bochum. Online verfügbar unter <http://www.mb.rub.de/studium-mb/pdfs/BSc-MB-Studienplaene-ab-WiSe-2016-17.pdf>
- RUB Fak. MB (2016b): Studienverlaufsplan Master. Hg. v. Ruhr-Universität Bochum. Bochum. Online verfügbar unter <http://www.mb.rub.de/studium-mb/pdfs/MSc-MB-Studienpl%C3%A4ne-ab-SoSe-2016-031116.pdf>

- Sanchez, Jose Vicente Valverde; Alvarez Garcia, Francisco Javier (2016): Virtual Lab for Digital Systems. In: Proceedings of 2016 Technologies Applied to Electronics Teaching (TAAE). 22-24 June 2016 in Sevilla, Spain. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1–7
- Schäfer, Michael (2006): Computational Engineering - Introduction to Numerical Methods. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Schulmeister, Rolf (2003): Lernplattformen für das virtuelle Lernen. Evaluation und Didaktik. München, Wien: Oldenbourg
- Schulmeister, Rolf (2006): Virtuelle Kommunikation. Editorial. In: *Zeitschrift für e-Learning* 2006 (01), S. 1
- Schwarze, Rüdiger (2013): CFD-Modellierung. Grundlagen und Anwendungen bei Strömungsprozessen. Berlin, Heidelberg: Springer
- SERO PumpSystems (2015): Firmenschrift: Anleitung und Datenblatt. Pumpen aus der SHP-Reihe. Hg. v. SERO PumpSystems
- Siemens, George; Tittenberger, Peter (2009): Handbook of Emerging Technologies for Learning. University of Manitoba
- Siepmann, David (2016): Industrie 4.0 – Fünf zentrale Paradigmen. In: Armin Roth (Hg.): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler, S. 35–45
- Stephan, Dominik (2016): Die Industrie 4.0 Roadmap. So wird Ausbildung zum Schlüssel für die vierte industrielle Revolution. In: *Process Spezial Prozessindustrie 4.0* 2016 (10), S. 8–9
- Stephens, Lisa A.; Lamp, Richard; Riman, Jeffrey; Pearson, Karen (2016): Considering Virtual Labs: A SUNY Preliminary Report
- Steyer, Ralph (2015): Joomla! Einführung in das populäre CMS. Wiesbaden: Springer Vieweg
- Stieß, Matthias (2009): Partikeltechnologie. 3. Aufl. Berlin: Springer (Springer-Lehrbuch)
- Stocker, Alexander; Tochtermann, Klaus (2012): Wissenstransfer mit Wikis und Weblogs. Fallstudien zum erfolgreichen Einsatz von Web 2.0 in Unternehmen. 2. Aufl. Wiesbaden: Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH (Gabler Research)
- Stoecker, Daniela (2013): eLearning - Konzept und Drehbuch. Handbuch für Medienautoren und Projektleiter. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (X.media.press). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-17206-9>

- Strenger, Natascha; Kruse, Daniel; Frerich, Sulamith; May, Dominik; Ortelt, Tobias R.; Tekkaya, A. Erman: Internationalization and Digitalization in Engineering Education. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Higher Education Advances, HEAd' 17, Valencia, Spain, S. 558–565
- Terkowski, Claudius; Pleul, Christian; Jahnke, Isa; Tekkaya, A. Erman (2011): Platform for E-Learning and Telemetric Experimentation (PeTEX). Tele-Operated Laboratories for Production Engineering Education. In: Proceedings of 2012 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON). 4 - 6 April 2011, Amman, Jordan. Piscataway, NJ: IEEE, S. 491–497
- Titov, Igor; Glotov Alexander; Andrey, Yelizarov; Petrov, Victor (2016): Labicom Labs: Remote and Virtual Solid-State Laser Lab, RF&Microwave Amplifier Remote and Virtual Lab. In: Proceedings of 2016 Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE). 22-24 June 2016 in Sevilla, Spain. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1137–1140
- Transmetra GmbH (2010): Firmenschrift: Anleitung und Datenblatt. Thermoelemente Typ K. Hg. v. Transmetra GmbH. Neuhausen
- Travassos Valdez, M.; Machado Ferreira, C.; Martins, Maria Joao M.; Maciel Barbosa, F. P. (2014): Virtual labs in electrical engineering education - The VEMA environment. In: 2014 Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET), S. 1–5
- Universität Bremen (2016): Industrie 4.0 – Auswirkungen auf Aus -und Weiterbildung in der M+E Industrie. Unter Mitarbeit von Universität Bremen. Universität Bremen. Bremen. Online verfügbar unter www.baymevbm.de
- van Treeck, Timo; Himpfel-Gutermann, Klaus; Robes, Jochen (2013): Offene und partizipative Lernkonzepte. E-Portfolios, MOOCs und Flipped Classrooms. In: Martin Ebner und Sandra Schön (Hg.): Lehrbuch für Lernen und Lehren mit Technologien. 2. Aufl. Berlin: epubli GmbH, S. 288–299
- VDI-GVC (Hg.) (2013): VDI-Wärmeatlas. Mit 320 Tabellen. Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen. 11. Aufl. Berlin: Springer Vieweg
- Wühr, Manja (2016): Kreativität vs. Erfahrung. Wie die Digitalisierung in der Pharmabranche die Anforderungen an Mitarbeiter verändert. In: *Process Spezial Prozessindustrie 4.0* 2016 (10), S. 12–13
- You, Yuqin (2012): A LabVIEW-Based Remote Laboratory. Architecture and Implementation. In: Abul K. M. Azad, Michael E. Auer und V. Judson Harward (Hg.): Internet accessible remote laboratories. Scalable e-learning tools for engineering and science disciplines. Hershey, Pa.: Engineering Science Reference (Premier reference source), S. 1–18

Zawacki-Richter, Olaf (2013): Geschichte des Fernunterrichts. Vom brieflichen Unterricht zum gemeinsamen Lernen im Web 2.0. In: Martin Ebner und Sandra Schön (Hg.): Lehrbuch für Lernen und Lehren mit Technologien. 2. Aufl. Berlin: epubli GmbH, S. 65–73

9 Anhang

9.1 Anforderungen für Aus- und Weiterbildung von Industrie 4.0 (Fortsetzung)

Die Literaturrecherche zu den Anforderungen der Industrie 4.0 an die Mitarbeiterqualifizierung ergab die folgenden 30 Aspekte. Ein Auszug der ersten 10 Punkte wird in Kapitel 2.2.1 erläutert. Dabei stand nicht jede untersuchte Quelle in einem eLearning Kontext. Die aufgeführten Anforderungen lassen sich jedoch Großteils durch ein ganzheitliches eLearning Angebot für die Aus- und Weiterbildung erfüllen.

TABELLE 9-1 ANFORDERUNGEN AN ELEARNING BASIERTE AUS- UND WEITERBILDUNG FÜR DIE MITARBEITERQUALIFIKATION IM SINNE DER INDUSTRIE 4.0

Anforderung	Quelle
1. Lernen im Prozess der Arbeit ermöglichen	[Botthof und Hartmann 2015, S. 27; Universität Bremen 2016, S. 99; eBusiness-Lotse Mecklenburg-Vorpommern 2015, S. 12–13; Institut für Erziehungswissenschaft 2015, S. 24, 2015, S. 29; Gebhardt et al. 2015, S. 51, 2015, S. 51]
2. Individualität des Lernens	[MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung 2010, S. 4, 2011, S. 9, 2011, S. 8; Institut für Erziehungswissenschaft 2015, S. 22]
3. Flexibel im Lernort	[eBusiness-Lotse Mecklenburg-Vorpommern 2015, S. 29; Gensicke et al. 2016, S. 42; MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung 2011, S. 9]
4. Flexibel in Lernzeit/Tempo	[eBusiness-Lotse Mecklenburg-Vorpommern 2015, S. 29; Gensicke et al. 2016, S. 42; MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung 2011, S. 9]
5. Möglichst geringe Kosten (pro Qualifizierung)	[MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung 2010, S. 4; eBusiness-Lotse Mecklenburg-Vorpommern 2015, S. 12–13]
6. Möglichst geringer Zeitaufwand (pro Qualifizierung)	[MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung 2010, S. 4; eBusiness-Lotse Mecklenburg-Vorpommern 2015, S. 12–13, 2015, S. 12–13]
7. Individualität der Angebote (bestehende Kompetenzen)	[eBusiness-Lotse Mecklenburg-Vorpommern 2015, S. 10–11; MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung 2011, S. 8]
8. Lebenslanges Lernen ermöglichen	[Botthof und Hartmann 2015, S. 25; Paul 2016, S. 11]

Anforderung	Quelle
9. Querkompetenzen und Diversität im Fachwissen vermittelbar machen	[Pfeifer et al. 2016, S. 13]
10. Handeln in realen, praktischen Situationen entwickelt Kompetenzen	[Botthof und Hartmann 2015, S. 14]
11. Informelles Lernen ergänzt konventionelles Lernen	[Botthof und Hartmann 2015, S. 14]
12. Moderater Aufwand für die Erstellung von eLearning Konzepten und Inhalten	[Gensicke et al. 2016, S. 73]
13. Gesetzliche Unterweisungen können digitalisiert werden	[eBusiness-Lotse Mecklenburg-Vorpommern 2015, S. 23]
14. Motivation zum Selbstlernen	[Stoecker 2013, S. 128]
15. Didaktisch hochwertig	[eBusiness-Lotse Mecklenburg-Vorpommern 2015, S. 10–11]
16. Interaktionsmöglichkeiten mit der Materie	[eBusiness-Lotse Mecklenburg-Vorpommern 2015, S. 10–11]
17. Qualifizierung für alle Mitarbeiter eines Unternehmens	[Universität Bremen 2016, S. 84]
18. Akzeptanz im Unternehmen	[eBusiness-Lotse Mecklenburg-Vorpommern 2015, S. 13–14]
19. Thematisch passende Tools abhängig vom Inhalt	[eBusiness-Lotse Mecklenburg-Vorpommern 2015, S. 13–14]
20. Eine klare Lernzieldefinition	[Stoecker 2013, S. 128]
21. Permanente Rückmeldung über den Lernfortschritt	[Stoecker 2013, S. 128]
22. Dramaturgische Einbettung in eine Lerngeschichte	[Stoecker 2013, S. 128]
23. Möglichkeiten etwas zu entdecken, überrascht zu	[Stoecker 2013, S. 128]

Anforderung	Quelle
werden, Missverständnisse aufklären	
24. Anreizsysteme für Lernende (Zertifikat)	[Stoecker 2013, S. 128]
25. Wettbewerbe für Lernende (Highscore)	[Stoecker 2013, S. 128]
26. Neue, faszinierende Technik einsetzen	[Stoecker 2013, S. 128]
27. Betreuung und Hilfe durch Ansprechpartner	[MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung 2011, S. 8]
28. Umfassende Orientierungsmöglichkeiten im Lernprozess	[MMB-Institut für Medien- und Kompetenzforschung 2011, S. 16]
29. Interaktion wenig einschüchternd	[eBusiness-Lotse Mecklenburg-Vorpommern 2015, S. 8–9]
30. Vermittlung von Prozess-Knowhow	[IHK 2014]

9.2 LabVIEW-VI des remote Prüfstands

In den Kapiteln 4.2.5 und 4.3.4 wird ein LabVIEW-VI vorgestellt, welches der Kontrolle des Prüfstandes zunächst im lokalen und später für den remote Betrieb dient. Die VIs bauen aufeinander auf, sodass in Abbildung 9-1 nur die Struktur des VIs mit den zusätzlichen Elementen für den remote Betrieb gezeigt wird. Das VI ist in zwei While-Schleifen aufgeteilt. Der Rahmen der While-Schleife 1, links im Bild, umfasst alle für die Ein- und Ausgabe sowie die Anzeige der Daten notwendigen Elemente. Das zentrale Element sind die vier DAQ-Assistenten für die Anbindung an die Mess-, Steuer- und Regelungshardware des Prüfstandes. Die DAQ-Assistenten sorgen für die Skalierung des Ein- und Ausgangssignals jedes I/O-Kanals entsprechend der physikalischen Signalspanne (0-200 bar = 4 – 20 mA) und berücksichtigen zudem die aufgenommene Kalibrierung des Differenzdrucksensors. Die zwei oberen DAQ-Assistenten behandeln die Ein- und Ausgabe analoger Werte, wie sie hauptsächlich im Fall der lokalen Bedienung benötigt werden. Die beiden unteren DAQ-Assistenten verarbeiten die Ein- und Ausgabe der logischen Signale zur Kontrolle der Leistungselektronik über den Schaltkasten des Prüfstandes. Die Funktionselemente des PID-Reglers und die Watch-Dog Logik (PC-alive) sind in zwei case Strukturen ausgeführt und können je nach Betriebsmodus aktiviert werden.

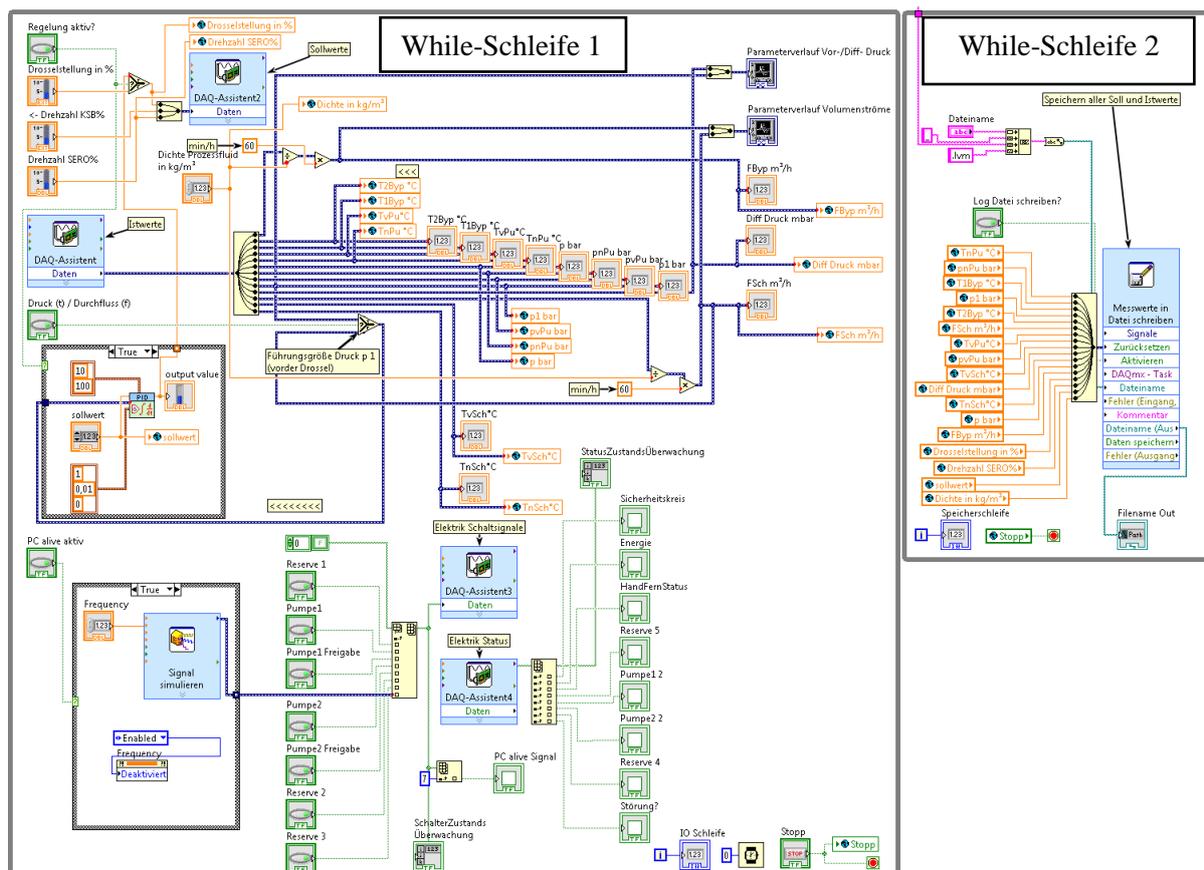


ABBILDUNG 9-1 BLOCKDIAGRAM DES LABVIEW-VI ZUR KONTROLLE DES PRÜFSTANDES IM REMOTE BETRIEB

Der Rahmen der While-Schleife 2, rechts im Bild, umfasst alle zur Aufzeichnung der Messdaten notwendigen Elemente. Die Messwerte werden durch globale Variablen zwischen den While-Schleifen übergeben. Die LabVIEW Funktion „Messwerte in Datei schreiben“ legt eine *.lvm Datei mit Header

und Zeitstempel an, liest die globalen Variablen aus und schreibt die Werte in die Datei. Der Name der Datei wird dabei aus Datum und Uhrzeit des ersten Speichervorgangs und einem individuell einzugebenden Text erzeugt.

9.3 Viskositätsmessung verschiedener Wasser-Glyzerin-Gemische

TABELLE 9-2 DATEN DER VERWENDETEN MESSSYSTEME

Messsystem	Einheit	Z40	D400/300 mit PZ38b
Schergeschwindigkeitsbereich	1/s	0,001 – 1931	0,4 - 6000
Viskositätsbereich	mPas	5 – 100.000	0,1 - 2500000
Füllmenge	ml	65,4	32
Schergeschwindigkeitsfaktor	min/s	1,291	4,032
Radius Messzylinder (R_i)	mm	20	19
Radius Messbecher (R_a)	mm	21,7	19,5
Messzylinderlänge	mm	60	80
Messspalt	mm	1,7	0,5
Radienverhältnis	R_a / R_i	1,085	1,0263
Betriebsdruck max.	bar	-	400
Temperatur max.	°C	-	300
Berechnungsfaktor A	Pa/Nm	5574,81	5511
Berechnungsfaktor M	$s^{-1}/rad s^{-1}$	12,29	40,51

TABELLE 9-3 VISKOSITÄTSWERTE FÜR VERSCHIEDENE WASSER-GLYZERIN-GEMISCHE BEI UMGEBUNGSTEMPERATUR

Anteil Glycerin [Gew.-%]	Temperatur im Messbecher [°C]	Viskosität atmosphärisch [mPas]	Zufällige Abweichung ± [mPas]	Viskosität bei 30 bar [mPas]	Zufällige Abweichung ± [mPas]	$\Delta\eta$ [mPas]
100	23,85	944,67	4,24	947,81	1,94	3,14
95	22,86	372,24	3,77	374,99	1,11	2,74
94	24,02	298,67	3,38	301,12	0,37	2,45
93	24,88	230,85	2,81	233,44	1,35	2,59
92	24,96	202,54	0,79	204,84	0,68	2,31
91	25,72	163,99	2,42	165,71	2,46	1,72
90	25,68	145,59	0,76	147,30	2,74	1,71
89	25,97	121,01	1,39	122,58	1,27	1,57
88	25,07	115,13	0,57	116,41	0,43	1,28
87	24,72	104,33	0,45	105,50	0,21	1,17
86	23,99	95,31	0,89	96,53	0,72	1,21
85	23,35	86,82	1,76	87,47	1,03	0,65

TABELLE 9-4 VISKOSITÄTSWERTE FÜR DIE WASSER-GLYCERIN -GEMISCHE BEI $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Labormessungen						Nach <i>Segur</i> und <i>Oberstar</i>
Anteil Glycerin [Gew.-%]	Viskosität at- mosphärisch [mPas]	Zufällige Abweichung \pm [mPas]	Viskosität bei 30 bar [mPas]	Zufällige Abweichung \pm [mPas]	$\Delta\eta$ [mPas]	Viskosität at- mosphärisch [mPas]
100	258,43	1,86	260,96	1,07	2,53	284
95	116,66	0,61	118,87	1,84	1,91	121
94	99,53	0,03	101,30	1,13	1,77	105
93	86,80	1,62	88,35	1,87	1,55	89
92	76,48	0,37	77,53	1,94	1,06	78,3
91	66,26	1,20	67,44	0,04	1,18	68,1
90	59,76	0,44	60,76	1,26	1,00	60,0
89	52,44	0,33	53,22	0,62	0,79	-
88	46,57	0,03	47,45	1,14	0,89	-
87	41,82	0,66	42,32	0,03	0,50	-
86	37,26	0,09	37,56	0,65	0,30	-
85	33,27	0,02	33,37	0,31	0,10	33,6

9.4 Druckverluste der Wasser und Wasser-Glyzerin Messungen

Die folgenden Tabellen enthält die Messwerte der Graphen in Abbildung 5-3. Für Wasser wird der Mittelwert des Druckverlustes aus den Ergebnissen von drei Messreihen gebildet.

TABELLE 9-5 MITTELWERT DES DRUCKVERLUSTES IN DEN KONFIGURATIONEN MIT WASSER

Volumenstrom \dot{V} in m ³ /h	Geschwindigkeit w_0 in m/s	Druckverlust in mbar		
		500 mm	750 mm	1000 mm
0,5	0,105	404,7	557,4	780,3
0,6	0,126	556,9	763,5	1066,9
0,7	0,147	738,9	1002,2	1413,8
0,8	0,168	929,4	1281,0	1803,1
0,9	0,189	1150,5	1600,5	2227,8
1,0	0,210	1407,1	1938,9	2676,9

Die folgende Tabelle enthält die Messwerte der Graphen für die 85 Gew.-% Wasser-Glyzerin-Mischung in Abbildung 5-5. Hier wird der Mittelwert des Druckverlustes aus zwei Messreihen gebildet.

TABELLE 9-6 MITTELWERT DES DRUCKVERLUSTES IN DEN KONFIGURATIONEN MIT EINER 85 GEW.-% WASSER-GLYZERIN-MISCHUNG

Volumenstrom \dot{V} in m ³ /h	Geschwindigkeit w_0 in m/s	Druckverlust in mbar		
		500 mm	750 mm	1000 mm
0,2	0,042	863,2	1324,9	1607,7
0,3	0,063	1286,2	1942,0	2447,1
0,4	0,084	1727,1	2580,6	3307,0
0,5	0,105	2198,4	3251,9	4218,6
0,6	0,126	2667,3	3937,4	5156,6
0,7	0,147	3182,1	4668,5	6124,9
0,8	0,168	863,2	1324,9	1607,7
0,9	0,189	1286,2	1942,0	2447,1
1	0,210	1727,1	2580,6	3307,0

9.5 Evaluation des VRL-Lernprozess (Fragenkatalog)

Für die Evaluation werden fünf Phasen des VRL-Lernprozesses näher betrachtet. Die Durchführung erfolgt in insgesamt drei Schritten (siehe Abbildung 9-2) über Evasys (siehe: www.evasys.de/). Für Koordination und Dokumentation aller VRL-Evaluationen wird eine zentrale Dokumentation wie, z.B. eine SharePoint Seite empfohlen.



ABBILDUNG 9-2 FÜR DIE DREI SCHRITTE DER EVALUATION DES VRL LERNPROZESSES

Die Kategorien der Fragen lauten:

1. Grundsätzliche Informationen
2. Vorbereitung
3. Durchführung
4. Auswertung
5. Insgesamt/Gesamterlebnis

Dabei werden die ersten beiden Kategorien im ersten Evaluationsschritt abgefragt. Dies erfolgt vor der Durchführung, allerdings nach der Vorbereitung. Der nächste Evaluationsschritt ist unmittelbar nach der Versuchsdurchführung angegliedert. Zu guter Letzt werden die letzten beiden Kategorien nach dem letzten Schritt des Lernprozesses abgefragt, z. B. bei der Abgabe der Auswertung.

Vor jeder Evaluation wird von den Studierenden ein individueller Code erzeugt, um die einzelnen online Fragebögen einer anonymisierten Person zuweisen zu können. Dies ermöglicht die spätere Querbetrachtung der Evaluationsergebnisse. Daraufhin sollen die Studierenden das von ihnen benutzte Labor auswählen, um die dazu passenden Fragen freizuschalten.

In der Erprobung- und Einrichtungsphase eines VRLs sollte ein/e Student/in mit anwesend sein, um den Versuchsablauf zu beobachten. Dadurch entsteht ein kurzer Bericht über die Beobachtung, welcher die VRL Erfahrung beschreibt. Dabei soll besonders darauf geachtet werden, wie die Studenten den Versuch durchgeführt haben, ob und wie sie untereinander kommuniziert haben (falls Durchführung in Gruppen), wie die Betreuung war (haben sie alles selbstständig gemacht, konnten/mussten sie nachfragen, gab es überhaupt eine Betreuung?). Diese Berichte fließen in die Optimierung des Aufbaus und der inhaltlichen Gestaltung des VRL-Angebotes ein und können nach der regulären Inbetriebnahme in größeren Abständen durchgeführt werden. Die Evaluation im regulären remote Betrieb ist nicht betreut besonders Betreut. Ein Ansprechpartner für Fragen im Kontext der Evaluation ist förderlich.

Im Folgenden werden die Fragen der unterschiedlichen Kategorien aufgelistet:

1. Grundsätzliche Informationen

- Studiengang (Vertiefungsrichtung)
- Semester
- Alter (Gestaffelt)
- Ich nutze PC oder Laptop regelmäßig für private Zwecke (Trifft zu / nicht, 6er-Skala)
- Ich nutze PC oder Laptop regelmäßig für die Uni (6er-Skala)
- Ich nutze ein Tablet regelmäßig für private Zwecke (6er-Skala)
- Ich nutze ein Tablet regelmäßig für die Uni (6er-Skala)
- Ich nutze ein Smartphone regelmäßig für private Zwecke (6er-Skala)
- Ich nutze ein Smartphone regelmäßig für die Uni (6er-Skala)

2. Vorbereitung:

- Wie viel Zeit (Stunden) haben Sie zur Vorbereitung des Versuches aufgewendet?
- Nach der Vorbereitung habe ich die theoretischen Grundlagen verstanden (6er-Skala)
- Ich habe den Aufbau und Ablauf des Versuches verstanden (6er-Skala)
- Das weitere Vorgehen während des Durchführungsphase ist mir klar (6er-Skala)
- Die zur Verfügung gestellten Materialien waren zur Vorbereitung ausreichend (6er-Skala)
- Bitte geben Sie mindestens 1-2 Sätze Feedback zur Vorbereitung (Text)

3. Durchführung:

- Wie viel Zeit (Stunden) haben Sie für die Durchführung des Versuches benötigt?
- Die Durchführung des Versuchs verlief wie erwartet (6er-Skala)
- Gab es technische Probleme? (Ja/Nein)
 - Wenn ja, welche (Text)
- Der Versuchsablauf ließ sich durch die dargestellten Informationen gut beobachten (6er-Skala)
- Die Auswirkungen der Bedienelemente waren eindeutig verständlich (6er-Skala)
- Die Reaktionen auf Benutzereingaben waren wie erwartet (6er-Skala)
- Bitte geben Sie mindestens 1-2 Sätze Feedback zur Durchführung (Text)

4. Auswertung

- Wie viel Zeit (Stunden) haben Sie für die Auswertung der Messdaten benötigt?
- Es ist nachvollziehbar, wie die aufgezeichneten Messdaten zu Stande kamen (6er-Skala)
- Die Messdaten waren in ihrem Format gut für die weitere Auswertung geeignet (6er-Skala)
- Die Messdaten ließen sich eindeutig interpretieren (6er-Skala)
- Die Messwerte zeigen das erwartete Verhalten (6er-Skala)
- Bitte geben Sie mindestens 1-2 Sätze Feedback zur Auswertung (Text)

5. Gesamteindruck Insgesamt:

- Die Durchführung von Laborversuchen aus der Ferne erhöht die individuelle Flexibilität (6er-Skala)

- Die direkte Interaktion mit einem/r Betreuer/in beim Versuch hat mir gefehlt (6er-Skala)
- Ein Remote-Lab ist eine sinnvolle Ergänzung zu normalen Laborversuchen (6er-Skala)
- Ein Remote-Lab kann einen klassischen Laborversuch ersetzen (6er-Skala)
- Ich fände die selbstständige Verwendung von Remote-Versuchen im Studium sinnvoll (6er-Skala)
- Ich fände die Verwendung von Remoteversuchen als Vorführung während einer Vorlesung sinnvoll (6er-Skala)
- Der Aufwand für die Vorbereitung war für den weiteren Verlauf angemessen (6er-Skala)
- Der Aufwand für die Auswertung war im Hinblick auf das Thema angemessen (6er-Skala)
- Wie bewerten Sie den Ablauf insgesamt? (Schulnoten)
- Bitte nennen Sie mindestens einen negativen Kritikpunkt (Text)
- Bitte nennen Sie mindestens einen positiven Kritikpunkt (Text)
- Haben Sie konkrete Verbesserungsvorschläge? (Text)

Das Evaluationskonzept befindet sich im Aufbau und wurde bisher nur in der Erprobungsphase einzelner VRLs angewendet. Aussagekräftige Evaluationen über mehrere Nutzungszyklen hinweg konnten bisher noch nicht durchgeführt werden.

9.6 CT-Scan einer Festbettschüttung für die Strömungssimulation

Für eine genauere Abbildung einer realen Festbettschüttung kann die CT-Technik aus der Medizin bzw. der Materialprüfung angewendet werden. In Zusammenarbeit mit der Firma BMB Gesellschaft für Materialprüfung wird eine verkürzte Schüttung (60 mm) mit 3 mm Glaspartikeln, auf die gleiche Weise wie für eine experimentelle Untersuchung, vorbereitet. Der Scan erfolgt mit einem Mikro Computer Tomographen, Typ Monomax der Firma Zeiss, und erzeugt drei dimensionale Aufnahmen mit einer Empfindlichkeit von bis zu 5 μm Auflösung. Die Verwendung eines metallenen Schüttungsträgers ist für den Scanvorgang jedoch ungünstig. Um die gläsernen Siedeperlen deutlich herausstellen zu können, wurde ein Probenkörper mit einem deutlichen Dichteunterschied zu Glas benötigt. Aus diesem Zweck wurde ein Probenträger aus PVC angefertigt. Der Innendurchmesser dieses Schüttungsträgers aus PVC entspricht mit 41 mm Durchmesser dem Abbild des experimentellen Trägersystems innerhalb des Strömungsversuchsstandes, wobei die Länge auf 60 cm beschränkt ist. Aus den während des CT Scan gewonnenen Datenpunkten (Punktewolken, Polygone) werden die Partikeloberflächen der Schüttung als Flächen ausgeleitet. Zu diesem Zeitpunkt lassen sich die Partikel am Rechner als ein Polygongitter mit etwa 20 Millionen Elementen darstellen. Die Oberflächen weisen somit jedoch Kanten und unregelmäßige Übergänge an den Kontaktstellen der Polygonfläche auf, welche die simulierte Strömung durch die Partikelansammlung beeinflussen würden. Die Rückführung der Polygonstruktur in geometrisch einwandfreie Kugeln mit glatter Oberfläche wird durch einen zusätzlichen Nachbearbeitungsschritt möglich. Der technologische Fortschritt im Bereich computergestütztes Revers Engineering erlaubt eine automatisierte Flächenrückführung und das Finden und Bestimmen von festgelegten Geometrien.

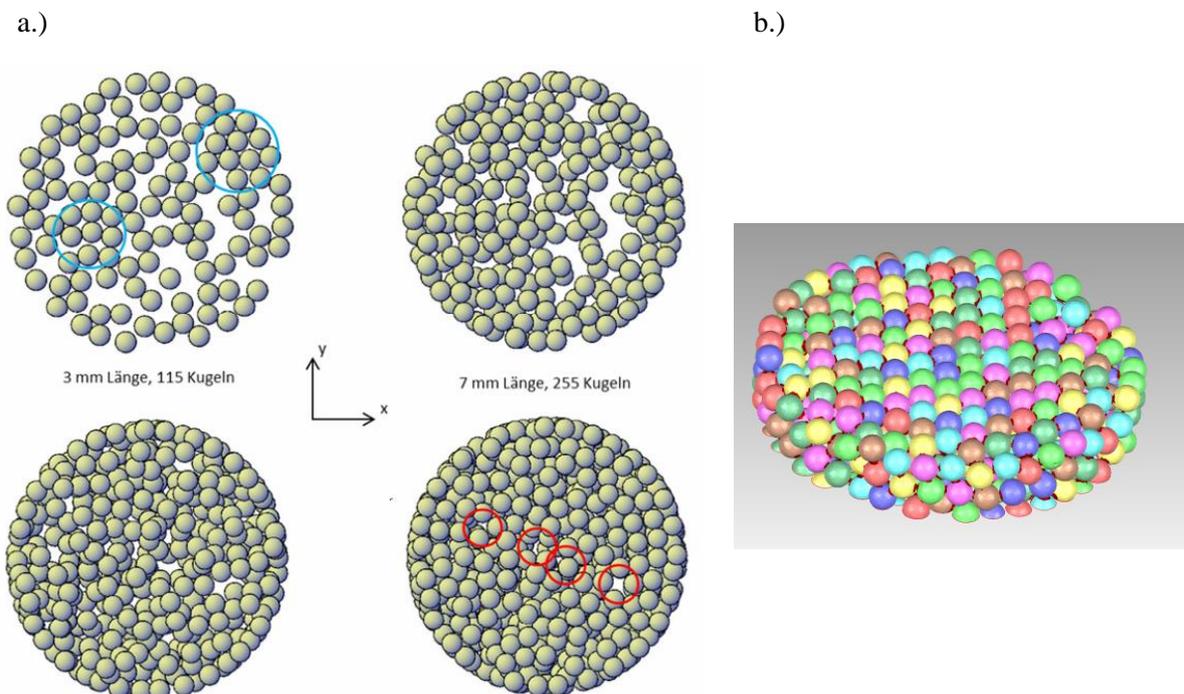


ABBILDUNG 9-3 LINKS CT SCAN, RECHTS PROGRAMM ZUR ERZEUGUNG VON ZUFALLSSCHÜTTUNGEN

Die Flächenrückführung der monodispersen Schüttungspartikel gelang dem Servicedienstleister 3D Systems in Zusammenarbeit mit Schweikert3DSystems. Die Konvertierung in geometrisch ideale Kugeln erfolgt hier mit der 3D Software VG Studio Max 3.0 und der Reverse Engineering Software Geomagic Design X. Letztendlich liegt die gescannte Festbettschüttung nun als CAD kompatible *.igs Datei vor und kann in den ANSYS Workbench importiert werden.

Insgesamt besteht diese nach denselben Kriterien wie die für die realen Experimente hergestellte Schüttung aus 3197 Partikeln. Die Porosität liegt mit 0,45 deutlich näher an der Porosität der in den Experimenten verwendeten Schüttungen. Abbildung 9-3 zeigt das jeweilige digitale Abbild an der linken Seite sowohl der durch den Algorithmus generierten Schüttung als auch der Schüttung die aus dem CT Scan resultiert. Bereits die Betrachtung der ersten Schicht aus Partikeln offenbart die dichtere Packung der gescannten Festbettschüttung. Für eine Strömungssimulation durch die gescannte Festbettschüttung ist die Vernetzung erneut an die dichtere Packung der Partikel anzupassen.

Lebenslauf

Name: Daniel Kruse, M. Sc.

Geburtstag: 28.01.1986

Geburtsort: Hagen

Ausbildung:

- 6/2012-4/2013 Ruhr Universität Bochum
Master of Science, Maschinenbau
Vertiefungsrichtung Energie- und Verfahrenstechnik
Titel der Masterarbeit: „*Aufbau und Inbetriebnahme eines Messsystems zur automatisierten Erfassung von Pumpenkennfeldern*“
- 10/2007-06/2012 Ruhr Universität Bochum
Bachelor of Science, Maschinenbau
Vertiefungsrichtung Energie- und Verfahrenstechnik
Titel der Bachelorarbeit: „*Aufbau und Inbetriebnahme einer Versuchsanlage zur Untersuchung von Druck- und Temperaturverlauf bei der Tröpfchenkondensation feuchter Luft*“
- 1/2007-9/2007 Deutsche Bundeswehr
Wehrdienst
Grundausbildung mit Auszeichnung, anschließend Dienst als Fernmelder bei der Panzerbrigade 21 (Lipperland)
- 7/2005-5/2006 Theodor Reuter Berufskolleg Iserlohn
Allgemeine Hochschulreife
- 7/2002-5/2005 Theodor Reuter Berufskolleg Iserlohn
Fachhochschulreife und Facharbeiterbrief
Kommunikationselektroniker, Fachrichtung: Informationstechnik
- 7/1996-5/02 Fichte Gymnasium Hagen
Fachoberschulreife mit Qualifikation

Daniel Kruse

Daniel Kruse