

Das Labor als Lehr-Lern-Umgebung in der Umformtechnik

Entwicklungsstrategie und hochschuldidaktisches Modell

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Dr.-Ing.
der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Christian Pleul M.Sc. M.Eng.
aus
Bad Lobenstein

Dortmund, 2016

Vorsitzender der Prüfungskommission: Priv.-Doz. Dr.-Ing. Jobst Bickendorf
Berichter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya
Mitberichter: Prof. em. Dr. Dr. h. c. Johannes Wildt
Prof. Dr.-Ing. Sulamith Frerich
Tag der mündlichen Prüfung: 10. Mai 2016

Dortmunder Umformtechnik

Band 89

Christian Pleul

**Das Labor als Lehr-Lern-Umgebung
in der Umformtechnik**

Entwicklungsstrategie und hochschuldidaktisches Modell

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2016

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4569-7

ISSN 1619-6317

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

für CFV

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL) der Technischen Universität Dortmund. Wichtige Teile dieser Arbeit entstanden in den Projekten „PeTEX-Plattform for e-learning and Telemetric Experimentation“ (142270-LLP-1-2008-IDE-LEONARDO-LMP, gefördert durch die Europäische Union), „ELLI-Exzellentes Lehren und Lernen in den Ingenieurwissenschaften“ (0710511198, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung) und „IngLab- Das Labor in der ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung“ (gefördert durch die acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften).

Mein außerordentlicher Dank gilt meiner Frau Christiane, wie auch meinen Kindern Frida und Valentin. Mit viel Geduld und Herzlichkeit bereiteten sie mir den familiären Rückhalt während der Anfertigung dieser Dissertation. Ihnen widme ich diese Arbeit.

Ich möchte mich besonders bedanken bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya. Er hat mir diese Arbeit ermöglicht. Durch seine interdisziplinäre Sichtweise und in Zusammenarbeit mit Herrn Prof. em. Dr. Dr. h. c. Johannes Wildt haben beide die stetige Fortführung und Fertigstellung dieser Arbeit unterstützt und gefördert. Herrn Prof. em. Dr. Dr. h. c. Johannes Wildt möchte ich darüber hinaus für die Übernahme des Korreferats danken. Für die Mitwirkung in der Prüfungskommission möchte ich mich herzlich bedanken bei Frau Prof. Dr.-Ing. Sulamith Frerich und Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing. Jobst Bickendorf.

Darüber hinaus möchte ich mich bei allen derzeitigen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen des IUL und zhb für die konstruktive und angenehme Zusammenarbeit bedanken. Insbesondere gilt mein Dank den Herren Dipl.-Ing. Daniel Staupendahl, Prof. Dr.-Ing. Matthias Hermes, Dr.-Ing. Christoph Becker, Dipl.-Ing. Tobias R. Ortelt, Dipl.-Inf. Abdelhakim Sadiki und Dr.-Ing. habil. Sami Chatti. Für die Zusammenarbeit im interdisziplinären Kontext möchte ich mich bedanken bei Frau Dipl.-Päd. Nina Friese, Frau Prof. Dr. phil. Isa Jahnke, den Herren Dipl.-Päd. Claudius Terkowsky, Prof. Dr.-Ing. Thorsten Jungmann, Dipl. Wirt.-Ing. Dominik May und B.Sc. Philipp Osenberg. Für die technische Unterstützung am IUL gilt mein Dank den Herren Werner Feurer, Dirk Hoffmann, Andreas Herdt und Michael Prüfert. Darüber hinaus gilt mein Dank den Studierenden, welche mich während meiner Tätigkeit unterstützten.

Für die sprachliche Korrektur meiner Arbeit möchte ich mich recht herzlich bei Frau Dipl.-Fachübers. Andrea Hallen und Frau Beate Ulm-Brandt bedanken. Herrn Dipl.-Des. Patrick Cramer danke ich für die Gestaltung der Titelseite.

Zwickau, im Mai 2016

Christian Pleul, geb. Burkhardt

Inhaltsübersicht

Fertigungstechnische Errungenschaften und Innovationen, bspw. in der Umformtechnik, erfordern in einem signifikanten Umfang erfahrungsbasierten Erkenntnisgewinn. Diesen ingenieurtypischen Ansatz gilt es im Ingenieurstudium der Fertigungstechniken zu adressieren. Dies kann mit dem Lehr-Lern-Format *Labor* zielführend und anforderungsgerecht erfolgen.

In dieser Arbeit wird die Entwicklung und Durchführung einer Laborveranstaltung für die Fertigungstechnik *Umformtechnik* gezeigt. Ausgehend von einer systemischen Betrachtung des Umformens, basiert das Veranstaltungskonzept auf der konzeptionellen Darstellung des Umformprozesses anhand der analytischen Auseinandersetzung. Anhand des systematischen Entwurfs erfolgt die Kombination

- eines ingenieurtypischen, strukturierten Vorgehens für die Bearbeitung eines authentischen Sachverhaltes bis zur Problemlösung mit
- der fachbezogenen didaktischen Ausgestaltung zum erfahrungs- und problembasierten Lernen in studierendenzentrierter und kompetenzorientierter Ausrichtung.

Dabei werden die identifizierten umformtechnischen Schlüsselkonzepte und fachtypischen Einsatzfeldcluster der Experimente in der Umformtechnik integriert. Das sich ergebende Veranstaltungsmodell für das ingenieurwissenschaftliche Labor in der Umformtechnik kombiniert selbstständige sowie vor Ort Lern- und Prüfungsaktivitäten innerhalb der charakteristischen Laborphasen in einer abgestimmten, durch teleoperatives Experimentieren erweiterten Lehr-Lern-Umgebung. Durch die darin vollzogene didaktische Umsetzung des Konstruktivismus im Shift from Teaching to Learning erfolgt die Ausgestaltung zur aktiven und verantwortungsbewussten Teilhabe der Studierenden am eigenen Lernprozess. Die synergetische Wechselbeziehung fachlicher/fachmethodischer Verortung sowie lernförderlicher Gestaltung der Lehr-Lern-Umgebung Labor adressiert explizit die Nutzung des formatinhärenten Potenzials und fördert damit explizit das konzeptionelle Verständnis der Umformtechnik an sich.

In der Arbeit wird eine fachbezogene, interdisziplinär grundlegende wissenschaftliche Auseinandersetzung mit den Aspekten der Lehr-Lern-Umgebung Labor für die Umformtechnik dargestellt. Die entwickelte Vorgehensweise und das entwickelte Modell können an andere fachliche Zusammenhänge angepasst und darin angewandt werden.

Abstract

Accomplishments and innovations in manufacturing technology, e. g., in forming technology require, to a significant amount, the experiential based acquisition of knowledge. Such typical engineering approach needs to be addressed in academia in engineering studies like manufacturing technology. This can be done using the teaching and learning format of a laboratory in an effective and requirement-oriented way.

In this work, the development and execution of a laboratory course for the manufacturing technology *forming technology* is shown. By means of a systematic examination of forming itself, the course concept is based on the conceptual presentation of the analytically examined forming process. On the basis of the systematic conceptual design, a combination is done of

- an engineering-specific, structured approach covering the processing of an authentic issue to resolving the defined problem and
- a professional-focussed didactic design for the purpose of experiential and problem-based learning in student centered and competence-oriented adjustment.

Thereby, the identified key concepts and subject-specific application cluster of experiments in forming technology are integrated. The resulting course model of an engineering science laboratory in forming technology combines independent distant as well as presence activities of learning and assessment within characteristic phases of an aligned learning and teaching environment enhanced by tele operative experiments. By using the shift from teaching to learning as the didactic application of constructivism, a design approach is followed that leads to a student owned learning process characterized by active and responsible participation. The synergetic interdependance of subject-specific and methodical aspects as well as a setup that facilitates the learning process within the learning environment of the lab addresses explicitly the utilization of the course inherent potentials. As a result, such a lab designed in this way fosters the conceptual understanding in forming technology intrinsically.

In the present work, a subject-specific, interdisciplinary fundamental and scientific examination of the learning and teaching environment of the laboratory for forming technology is shown. The developed procedural method and the developed model are flexibel to be adapted and applied in different subject-specific contexts.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Erfahrungsbasierter Erkenntnisgewinn im Fachbezug	2
1.2 Lehr-Lern-Umgebung <i>Labor</i> im Anwendungsbezug	2
1.3 Einschätzung beobachteter Laborveranstaltungen im Fokus der Fertigungs- und Umformtechnik	4
1.4 Potenzial in der Laborausbildung und dessen Nutzung	5
1.4.1 Potenzial der fachlichen Anbindung	6
1.4.2 Potenzial didaktischer Ausgestaltung im Fachbezug	7
1.4.3 Potenzial technologischer Erweiterungen	8
1.5 Employability – kompetenzbasierte Beschäftigungsfähigkeit	9
1.5.1 Beschäftigungsfähigkeit im Fachbezug	9
1.5.2 Beschäftigungsfähigkeit und Kompetenzorientierung	10
1.5.3 Referenzrahmen in exemplarischer Erläuterung	11
2 Zielstellung	13
3 Umformtechnik: Das Verfahren der Fertigungstechnik – eine konzeptionelle Betrachtung	15
3.1 Einteilung der Umformtechnik	15
3.2 Der Umformvorgang – eine konzeptionell-systemische Darstellung	18
3.3 Schlüsselkonzepte der Umformtechnik	28
3.4 Kompetenzerfordernisse im Fachbezug	34
4 Hochschuldidaktik	39
4.1 Ziele und Tätigkeitsfelder der allgemeinen Hochschuldidaktik	39
4.2 Hochschuldidaktik im Fachbezug	42
4.3 Kompetenz als Lernergebnis	44
4.3.1 Kompetenz	44
4.3.2 Beabsichtigte Lernergebnisse	46
4.3.3 Lernzielbereiche und deren Niveaus	48
4.4 Shift from Teaching to Learning – Konstruktivismus didaktisch umgesetzt	53
4.4.1 Aktives Lernen	56

4.4.2	Selbstständigkeit im Lernprozess	57
4.5	Erfahrungsbasiertes Lernen	59
4.6	Problembasiertes Lernen	61
4.7	Exkurs: Problemverständnis und Bearbeitung	64
4.7.1	Einzelheiten zum Problemverständnis	66
4.7.2	Problembearbeitung durch Ingenieurinnen und Ingenieure	69
4.8	Kompetenzorientiertes Prüfen in einer abgestimmten Lernumgebung	77
5	Das Experiment und das Format Labor in der Lehre – wissenschaftliches Werkzeug im Anwendungsbezug der Umformtechnik	83
5.1	Einsatzfelder von Experimenten in der Fertigungs- und Umformtechnik	83
5.2	Kennzeichnende Merkmale im Fachbezug	87
5.2.1	Konzeption und Ausgangspunkt des Labors	88
5.2.2	Arten und Phasen im Labor	88
5.2.3	Ansätze der Problembearbeitung	90
5.2.4	Grad der Offenheit	91
5.2.5	Zielkomponenten	93
5.2.6	Verstehensebenen nach SOLO	95
5.2.7	Didaktisches Szenario	96
5.2.8	Prüfung zur Einschätzung der Lernergebnisse	97
5.2.9	Zugriff auf das Experiment	98
5.2.10	Weitere Merkmale	100
6	Entwicklung und Umsetzung des didaktischen Modells im Fachbezug der Umformtechnik	103
6.1	Systematischer Entwurf	103
6.2	Konzeptentwicklung für ein Labor der Umformtechnik	104
6.2.1	Phase ❶: Erarbeitung der Anforderungen	105
6.2.2	Phase ❷: Identifizieren von Wirkstrukturen	105
6.2.3	Phase ❸: Teillösungen erarbeiten	106
6.2.4	Phase ❹: Ausgestaltung	107
6.3	Umsetzung des Konzeptes als Labormodell für die Umformtechnik	109
6.3.1	Analyse- und Entwicklungsvorgehen	109
6.3.2	Fachliche Verortung	110
6.3.3	Entwicklung des Labormodells	111
7	Entwicklung der teleoperativen Experimentierumgebung	117
7.1	Konzeptionierung der teleoperativen Versuchseinrichtung	118
7.2	Robotergestütztes Positionieren der Probe	118
7.2.1	Portable Roboterarbeitsstation	119

7.2.2	Erweiterung der Klemmeinheiten	121
7.2.3	Integration der robotergestützten Probenhandhabung	126
7.3	Teleoperation der Experimentiereinheit	126
7.3.1	Die Benutzerschnittstelle	128
7.3.2	Hardwarekomponenten innerhalb der Teleoperation	128
7.3.3	Einbindung in die Lernumgebung	129
8	Durchführung der Laborveranstaltung und Evaluation	133
8.1	Durchführung der Laborveranstaltung	133
8.2	Einschätzung zum Profil des entwickelten und durchgeführten Pilotlabors . . .	140
8.3	Evaluation zur Laborveranstaltung	145
8.3.1	Inhalt der Evaluation	145
8.3.2	Methodik zur Evaluation	146
8.3.3	Ergebnisse der Evaluation	148
9	Zusammenfassung und Diskussion	157
10	Ausblick	161
	Literaturverzeichnis	163

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
a	mm	Dicke, S. 32
A	mm ²	Fläche, S. 23
A_p	mm ²	Einspannfläche, S. 125
A_g	–	plastische Extensometer-Dehnung bei Höchstkraft, S. 22
b	mm	Breite, S. 32
B_A	–	äußere Belastung, S. 21
E	N · mm ⁻²	Elastizitätsmodul, S. 23
$f_{\text{Hill,2D}}$	–	Fließkriterium nach Hill für den zweidimensionalen Fall, S. 29
F	N	(Umform)Kraft, S. 20
F	–	Parameter für das Fließkriterium nach Hill, S. 29
F_{spann}	N	Spannkraft, S. 125
G	N · mm ⁻²	Schubmodul, S. 23
G	–	Parameter für das Fließkriterium nach Hill, S. 29
H	–	Parameter für das Fließkriterium nach Hill, S. 29
k_f	N · mm ⁻²	Fließspannung, S. 32
$k_{f,\text{kin}}$	N · mm ⁻²	Fließspannung bei kinematischer Verfestigung, S. 32
l	mm	Länge, S. 23
L	mm	Messlänge, S. 22
N	–	Parameter für das Fließkriterium nach Hill, S. 29
p	N · mm ⁻²	Flächenpressung, S. 125
R_e	N · mm ⁻²	Streckgrenze, S. 22
R_m	N · mm ⁻²	Zugfestigkeit, S. 125
$R_{p0,2}$	N · mm ⁻²	Dehngrenze, S. 125
s	mm	Abstand der Keilzugbacken, S. 123
S	mm ²	Querschnitt, S. 125
t	s	Zeit, S. 23
T	°C	Temperatur, S. 33
T	ms	Intervall, S. 129
v_c	mm · s ⁻¹	Traversengeschwindigkeit, S. 33
$v_{\text{prüf}}$	mm · s ⁻¹	Prüfgeschwindigkeit, S. 33
V	m ³	Volumen, S. 26

Zeichen	Einheit	Beschreibung
W	$N \cdot m$	(Umform)Arbeit, S. 20
α	$^\circ$	Winkel, S. 24
α	–	Koeffizient des BAUSCHINGER-Effekts, S. 32
β	$^\circ$	Winkel an den Keilzugbacken, S. 125
γ	–	Schubwinkel, S. 23
ε	–	Dehnung, S. 23
λ	–	nicht-negative reelle Zahl, S. 23
σ	$N \cdot mm^{-2}$	Spannung, S. 21
σ'	$N \cdot mm^{-2}$	deviatorische Spannung, S. 23
τ	$N \cdot mm^{-2}$	Schubspannung, S. 21
τ_f	$N \cdot mm^{-2}$	Fließschubspannung, S. 24
φ	–	Umformgrad, S. 23
$\bar{\varphi}$	–	Vergleichsumformgrad, S. 23
$\dot{\varphi}$	–	Umformgeschwindigkeit, S. 23

Indizes

Index	Beschreibung
0	Initialwert, S. 26
B	Biege, S. 20
el	elastisch, S. 22
ges	gesamt, S. 20
gl	Gleichmaß, S. 22
h	hydrostatische Spannungskomponente, S. 21
id	ideell, S. 20
ij	Spannungskomponenten im Koordinatensystem, S. 21
kr	kritisch, S. 25
Mat	Material, S. 125
max	Maximal, S. 24
min	Minimal, S. 24
N	orthogonal wirkende Komponente, S. 24
pl	plastisch, S. 22
P#	Probnummer, S. 33
res	resultierend, S. 125
R	Reib, S. 20
RT	Rekristallisation, S. 33
S	Schub, S. 20
T	Schubkomponente, S. 24
v.M.	VON MISES, S. 24

Index	Beschreibung
zug	Zugkomponente, S. 22
zul	zulässig, S. 125
Δ	Änderung, S. 32

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
4ING	Fakultätentage der Ingenieurwissenschaften und der Informatik an Universitäten, S. 35
ABET	Accreditation Board for Engineering and Technology, S. 52
AfH	Arbeitsstelle für Hochschuldidaktik, Universität Zürich, S. 44
AK DQR	Arbeitskreis Deutscher Qualifikationsrahmen, S. 11
ASIIN	Akkreditierungsagentur für Studiengänge der Ingenieurwissenschaften, der Informatik, der Naturwissenschaften und der Mathematik e.V., S. 12
BDA	Bundesvereinigung der Deutschen Arbeitgeberverbände, S. 11
BDI	Bundesverband der Deutschen Industrie, S. 11
CAD	Computer Aided Design, S. 134
CLT	Cognitive Load Theory, S. 58
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V., S. 15
DMS	Dehnmessstreifen, S. 121
EQR	Europäischer Qualifikationsrahmen, S. 11
ET	Expertenteam, Expertengruppe, S. 135
FEH	Fachspezifische Ergänzende Hinweise, S. 12
GNW	Gewerkschaftliches Gutachternetzwerk, S. 10
hex	hexagonal, S. 28
HRK	Hochschulrektorenkonferenz, S. 9
ILO	beabsichtigte Lernergebnisse (Intended Learning Outcomes), S. 105
ISA	iLab Shared Architecture, S. 8
kfz	kubisch-flächenzentriert, S. 28
krz	kubisch-raumzentriert, S. 28
KFBT	Konferenz der Fachbereichstage, S. 11
KMK	Kultusministerkonferenz, S. 11
LT	Laborteam, Laborgruppe, S. 137
LZK	Lernzielkomponente, S. 94
LiLa	Library of Labs, S. 8
MINT	Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften u. Technik, S. 1
MIT	Massachusetts Institute of Technology, S. 8
PeTeX	Plattform for e-learning and Telemetric Experimentation, S. 117
PBL	problemorientiertes Lernen (Problem Based Learning), S. 61

Abkürzung	Beschreibung
PLC	PORTEVIN-LE CHATELIER, S. 126
SOLO	Structure of the Observed Learning Outcome, S. 46
S#	Systemabschnittnummer, S. 19
TOTE	Test-Operate-Test-Exit, S. 71
TU9	neun führende Technische Universitäten in Deutschland, S. 10
VDI	Verein Deutscher Ingenieure, S. 4
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik e. V., S. 35
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V., S. 35
VISIR	Virtual Instrument Systems in Reality, S. 8
WiSe	Wintersemester, S. 109
XML	erweiterbare Auszeichnungssprache (Extensible Markup Language), S. 127
ZIMT	Zwick Interpreter for Materials Testing, S. 128