Schriftenreihe des Lehrstuhls für Kontinuumsmechanik und Materialtheorie der Technischen Universität Berlin

Herausgegeben von Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang H. Müller



Werkstoffeigenschaften handlaminierter Faserverbundkunststoffe, erfasst in realen und virtuellen Laboren der Mechanik unter Einsatz von Methoden zur Wissensorganisation





0/

Werkstoffeigenschaften handlaminierter Faserverbundkunststoffe, erfasst in realen und virtuellen Laboren der Mechanik unter Einsatz von Methoden zur Wissensorganisation

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch. 2

Werkstoffeigenschaften handlaminierter Faserverbundkunststoffe, erfasst in realen und virtuellen Laboren der Mechanik unter Einsatz von Methoden zur Wissensorganisation

von Diplom-Wirtschaftsingenieurin Isabel Koke aus Diemelstadt-Wrexen

von der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme der Technischen Universität Berlin zur Erlangung des akademischen Grades

Doktorin der Ingenieurwissenschaften - Dr.-Ing. -

genehmigte DISSERTATION

PROMOTIONSAUSSCHUSS:

Vorsitzender:	Prof. DrIng. Henning Meyer
Gutachter:	Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang H. Müller
Gutachter:	Prof. DrIng. Ferdinand Ferber

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 07. Dezember 2011



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. 2

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2012 Zugl.: (TU) Berlin, Univ., Diss., 2012

978-3-95404-081-0

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2012 Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen Telefon: 0551-54724-0 Telefax: 0551-54724-21 www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.1. Auflage, 2012Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-95404-081-0

Institut für Mechanik, Sekr. MS-2 Lehrstuhl für Kontinuumsmechanik und Materialtheorie (LKM) Technische Universität Berlin

Einsteinufer 5 10587 Berlin



PROMOTIONSAUSSCHUSS

Vorsitzender:	Prof. DrIng. Henning Meyer Institut für Konstruktion, Mikro- und Medizintechnik, FG Konstruktion von Maschinensystemen TU Berlin
Erster Gutachter:	Prof. Dr. rer. nat. habil. Wolfgang H. Müller Institut für Mechanik, TU Berlin
Zweiter Gutachter:	Prof. DrIng. habil. Ferdinand Ferber Universität Paderborn Lehrstuhl für Technische Mechanik (LTM) Warburger Str. 100, 33098 Paderborn
Tag der Einreichung: Tag der Aussprache:	04. Oktober 2011 07. Dezember 2011

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch. 2





GFK-Zugprüfkörper nach Materialversagen

eingefärbtes Epoxidharz

Glasfasergewebe 263 g/m²



Glasbiaxialgelege 408 g/m²



Aramidfasergewebe 170 g/m²



Basaltfasergewebe 280 g/m²



Kohlenstofffasergewebe 245 g/m²

Kontakt

isabel.koke@gmx.de

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch. 2



Danksagung

Die vorliegende Dissertation spiegelt meine Arbeit während der letzten sechs Jahre sowohl an der Technischen Universität Berlin als auch der Universität Paderborn wieder. Während dieser Zeit wurde ich von vielen Menschen unterstützt und gefördert. Die Liste derer, denen Dank gebührt, ist lang. Zunächst möchte ich Herrn PD Dr.-Ing. habil. Ferdinand Ferber und Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Wolfgang H. Müller für die lehrreiche langjährige Zusammenarbeit, wertvolle Tipps, Anregungen und Unterstützung in vielerlei Hinsicht während der Bearbeitung von Experimenten, dahintersteckender Theorie und der vereinfachten Adaption für den Transfer in die Lehre mittels E-Learning danken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Henning Meyer danke ich dafür, dass er freundlicherweise den Vorsitz im Promotionsausschuss übernommen hat.

Ein herzliches Dankeschön gilt allen an den Forschungsergebnissen beteiligten Personen, darunter den Studien- und Diplomarbeitern Kathrin Kückelheim, Jens Dau, Yimin Du, Anna Napiorkowska, Maik Hellmann, Roland Tombers und David Wuttke für die Durchführung von Experimenten oder die Erarbeitung von E-Learning-Inhalten, die durch ihr Engagement zum Gelingen beigetragen haben. Die zum Projekt Nemesis gehörenden studentischen Hilfskräfte Anja Nicolai, Daniel Bude und Marcel Schreiber sowie die später dazugestoßenen Tutoren des NeLe-Mech-Projekts Sabine Kunze, Tobias Bungers, Markus Vöse, Anna Japs und Daniel Weber haben ebenfalls Ihren Beitrag zur Realisierung des Online-Lehrauftrittes E-MechLAB geleistet. Insbesondere Anna Japs ist hervorzuheben, die die Ausgestaltung bis zum Schluss begleitet hat.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Herbert Funke danke ich dafür, dass er mein Interesse für Faserverbund-Kunststoffe geweckt und den initialen Anstoß zu der experimentellen Thematik gegeben hat. Der Fa. R&G Faserverbundwerkstoffe in Waldenbuch danke ich herzlich für die Unterstützung in sachlicher und persönlicher Hinsicht, da ohne das kostenlos zur Verfügung gestellte Material und die gesponsorten Werkzeuge keine verifizierenden Versuche möglich gewesen wären, sowie Fa. GOM in Braunschweig für die Hilfestellung bei technischen Fragen rund um die optische Verformungsanalyse.

Ein weiteres großes Dankeschön gilt den Herren im Hingergrund, die mit Rat und Tat in der Vorbereitungsphase sowie während den Experimenten an der Universität Paderborn zur Seite standen. Dazu zählen mein Bürokollege Dr.-Ing. Manuel Hentrich, der neben anregenden Diskussionen über die Arbeit und nebensächliches die Tücken der Elektrotechnik zu überwinden half, Heinrich Dirkmorfeld und Frederik Hankeln, die bei den Zugversuchen kraftvoll mitgezogen haben, sowie Manfred Fortmeier in seiner Funktion als Administrator und gute Seele des LTM. Nicht unerwähnt bleiben sollen die Kollegen aus der Verfahrenstechnik und der Zentralwerkstatt, die bereitwillig mit Gerätschaften aushalfen. Des Weiteren ist das Team der Entwickler von ^{open}sTeam um Prof. Dr.-Ing. Reinhard Keil zu nennen: Dr. rer. nat. Olaf Nowaczyk, Daniel Büse, der verstorbene Mitinitiator Prof. Dr. rer. nat. Thorsten Hampel, Sven Brodowski und Dominik Niehus.

R

Dem Lehrstuhl Regelungstechnik und Mechatronik (RtM) von Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Ansgar Trächtler, der mich die letzten drei Jahre meiner Tätigkeit beherbergt hat, gebührt ebenfalls Dank. Hier sei stellvertretend für die netten Kollegen Annette Bökamp-Gros genannt.

Darüber hinaus gilt mein ganz besonderer Dank meinem Mann Dr.-Ing. Mathias Wöhler, der vermutlich am meisten unter meiner Tätigkeit leiden musste, dennoch stets aufmunternde, manchmal auch energische Worte für mich übrig hatte, sich nie für die eine oder andere fachliche Diskussion zu schade war und seine verfahrenstechnisch geprägte Sicht der Dinge einbrachte. Auch sollten meine Familie und Freunde nicht unerwähnt bleiben, die mit Verständnis und Zuversicht aufgewartet haben und daher ein großes Dankeschön verdienen.

Paderborn im September 2011 Isabel Koke



Zusammenfassung

Das generelle Thema dieser Arbeit ist die Mechanik faserverstärkter Kunststoffe und zwar sowohl vom experimentellen als auch theoretischen Standpunkt aus. Drei Aspekte werden zusammengebracht, die in den Kapiteln 2, 3 und 4 ausgeführt werden.

Kapitel 2 mit der Überschrift "Mechanik und reale Labore – Experimentelle Bestimmung elastischer Materialeigenschaften faserverstärkter Kunststoffverbundwerkstoffe unter Einsatz optischer Feldmessverfahren" beschreibt die Herstellung der faserverstärkten Materialien per Handlaminierverfahren und die Methode der Photogrammetrie, die eingesetzt wurde, um die mechanischen Kenndaten experimentell zu ermitteln. Dabei wird besonderes Augenmerk auf die Zusammenstellung der Eigenschaften der Ausgangsmaterialien gelegt, die Messmethode der Photogrammetrie wird angerissen und die Versuchsauswertung zur Bestimmung des Elastizitäts- und Schubmoduls sowie der Querkontraktionszahl für anisotrope Werkstoffe nach DIN beschrieben. Der Kunststoff (Epoxidharz) wurde mit Aramid-, Basalt-, Glas- und Kohlenstofffasergeweben verstärkt.

In Kapitel 3 "Theorie zum Labor – Einführung in die Laminattheorie und Vergleich mit Experimenten" werden vornehmlich die Grundlagen der Laminattheorie erklärt. Besondere Betonung wird dabei auf eine Darstellung im Sinne der Rationalen Mechanik gelegt. Das Kapitel ist darüber hinaus dem Vergleich zwischen experimentellen und theoretischen Ergebnissen gewidmet. Dabei werden gelegentlich auftretende Diskrepanzen identifiziert und interpretiert.

Kapitel 4 "Mechanik und virtuelle Labore – neue Lehrmethoden für eine traditionsreiche Wissenschaft" geht über den Inhalt einer "regulären" Dissertation hinaus. Hier wird erfolgreich gezeigt, wie die experimentellen und theoretischen Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel in virtuellen Laboren für die Ingenieurausbildung, für den Laien wie auch den fortgeschrittenen Ingenieur, der sich mit Faserverbundwerkstoffen beschäftigt, multimedial ansprechend aufbereitet und dargestellt werden können. Von Erfahrungen aus öffentlich geförderten Projekten wird berichtet, Lehrkonzepte diskutiert und ihre Umsetzung zu E-Learning-Inhalten am konkreten Beispiel demonstriert. In diesem Zusammenhang ist die der schriftlichen Dissertation beigefügte DVD besonders zu erwähnen, auf der die vorgestellten virtuellen Labore zum praktischen Einsatz zur Verfügung stehen.



Abstract

The general theme of this work is the mechanics of fiber-reinforced composites – from the experimental as well as from the theoretical point-of-view. Three aspects are combined, which are outlined in Chapters 2, 3, and 4.

Chapter 2, entitled "Mechanics and Real Labs – Experimental Determination of Elastic Material Properties of Fibre-Reinforced Composites by Means of Optical Field Measurement Techniques", describes the making of hand-laminated fiber-reinforced materials and the method of photogrammetry, which serves for the experimental characterization of mechanical properties. Particular attention is given to the compilation of the properties of the initial materials, the measurement technique of photogrammetry is outlined, and the evaluation of the experiments for determination of Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio is described according to DIN standards. In this context the plastic (epoxy) was reinforced using fabric made of aramid, basalt, glass, and carbon fiber.

Chapter 3, "Theory for the Lab – Introduction to Laminate Theory and Comparison with Experiments", is mainly devoted to an explanation of the fundamentals of laminate theory. Particular emphasis is on a presentation in the spirit of Rational Mechanics. Moreover, this chapter is dedicated to a comparison between experimental and theoretical results. Occasional discrepancies are identified and interpreted in this context.

Chapter 4, "Mechanics and Virtual Labs – New Methods of Learning for a Traditional Science", is unusual for a dissertation in engineering science. It successfully demonstrates how the experimental and theoretical results of the preceding chapters can be prepared and presented multimedia-based in virtual labs for students of engineering, for the layman, and also for the advanced engineer who is concerned with fiber-reinforced materials. Experience from publically funded projects is reported, learning concepts are discussed and their transformation into e-learning content is demonstrated by using a concrete example as shown on the DVD that is included with the written dissertation.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	
Zusammenfassung	
Abstract	
Inhaltsverzeichnis	
Bezeichnungen: Abkürzungen und Symbole	
1 Einleitung und Aufgabenstellung	1
2 Mechanik und reale Labore – Experimentelle Bestimmung elastischer Materialeigenschaften faserverstärkter Kunststoffverbundwerkstoffe unter Einsatz optischer Feldmessverfahren	5
2.1 Wissenswertes über faserverstärkte Kunststoffverbunde	7
2.1.1 Einsatz von faserverstärkten Kunststoffverbunden unter Leichtbaugesichtspunkten	9
2.1.2 Werkstoffe mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften	10
2.1.3 Zusammenspiel von Faser und Matrix im Verbund	11
2.1.4 Anwendungsbeispiele von Faser-Kunststoff-Verbunden	12
2.2 Verstärkungsfasern im Einsatz	15
2.2.1 Glasfasern	19
2.2.2 Kohlenstofffasern	21
2.2.3 Aramidfasern	23
2.2.4 Basaltfasern	26
2.2.5 Prinzipielle Messverfahren für die Elementarkenndaten der Faser	28
2.2.6 Textile Flächengebilde	29
2.2.6.1 Leinwandbindung	33
2.2.6.2 Köperbindung	34
2.2.6.3 Einfluss der Gewebebindung auf mechanische Eigenschaften	35
2.2.6.4 Abreißgewebe	37
2.2.6.5 Gelege	39
2.2.7 Untersuchte Gewebe	39
2.3 Der Kunststoff als Matrixmaterial der Wahl	41
2.4 Herstellungsverfahren – Fasern+Matrix=Verbundwerkstoff	48
2.4.1 Handlaminierverfahren	49
2.4.2 Vakuumverfahren	52



2.5	Von d	er Laminatherstellung bis zum fertigen Prüfkörper	53	
2.5.	1 Fes	tlegung des Versuchsprogramms – Versuchsplanung	56	
2.5.	2.5.2 Gewebezuschnitt			
2.5.	2.5.3 Faserablage von Geweben, Stapelfolge			
2.5.	4 Lar	ninieren – Fertigungsprozess der Prüflaminate	61	
2.5.	5 Bes	timmung des Faservolumenanteils	63	
2.5.	6 Fer	tigung der Prüfkörper und Prüfkörpergeometrie	67	
2	2.5.6.1	Vorüberlegungen zum Prüfkörper	67	
2	2.5.6.2	Prüfkörpergeometrie	67	
2	2.5.6.3	Aufleimer zur Krafteinleitung	69	
2	2.5.6.4	Prüfkörper heraustrennen aus vorbereitetem Prüflaminat	71	
2.5.	7 Pro	benpräparation mit stochastischem Oberflächenmuster	72	
2.6	Messu	ng mechanischer Kenndaten eines Verbundes – Versuchsaufbau, -technik und		
	-durcl	ıführung	73	
2.6.	1 Der	Klassiker – quasistatischer Zugversuch	75	
2.6.	2 Sch	wellende Belastung – zyklischer Zugversuch	78	
2.6.	3 Opt	ische Verformungsanalyse mit Hilfe photogrammetrischer Messmethoden	79	
2	2.6.3.1	Wie funktioniert das?	80	
2	2.6.3.2	Anwendung der optischen Verformungserfassung und technische Daten	78	
2	2.6.3.3	Was optische Deformationsanalyse (nicht) kann	81	
2	2.6.3.4	Mess(un)genauigkeit	82	
2	2.6.3.5	Geometrisches Dehnungsphänomen der Deckschicht bei Anwendung auf		
		Faserverbundstrukturen	83	
2	2.6.3.6	Vergleich photogrammetrischer Analyse mit klassischem Extensometer	83	
2.7	Versu	chsauswertung und Ergebnisbetrachtung	86	
2.7.	1 Spa	nnungs-Dehnungs-Verhalten der geprüften fasergewebeverstärkten Kunststoffe (Messkurve	n) 89	
2	2.7.1.1	Glasfaserverstärkter Kunststoff	89	
2	2.7.1.2	Aramidfaserverstärkter Kunststoff	90	
2	2.7.1.3	Basaltfaserverstärkter Kunststoff	91	
2	2.7.1.4	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff	92	
2	2.7.1.5	Vergleich des materialabhängigen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens (bei gleicher		
		Faserorientierung)	93	
2.7.	2 Kei	ngrößenbestimmung aus dem Experiment (DIN 527-1, DIN EN 2747)	94	
2	2.7.2.1	Der Elastizitätsmodul	94	
	2.7.2.1	.1 Handelt es sich überhaupt um linear-elastisches Materialverhalten? –		
		Spannungs-Dehnungs-Verhalten im zyklischen Zugversuch	96	
	2.7.2.1	.2 Einfluss des Faservolumenanteils auf den E-Modul	98	
2	2.7.2.2	Der Schubmodul	102	
	2.7.2.2	In welchem Wertebereich und wie genau wird G_{12} ermittelt?	102	
	2.7.2.2	2.2 Schubmodulbestimmung – Begründung der Vorgehensweise	103	
	2.7.2.2	Einfluss des Faservolumenanteils auf den Schubmodul	104	
2	2.7.2.3	Die Querkontraktionszahl (POISSONzahl)	105	
	2.7.2.3	Einfluss des Faservolumenanteils auf die Querkontraktionszahl	106	
	2.7.2.3	V_{21} größer 0,5 – geht das?	106	
2.7.	3 Feh	lerabschätzung für Faservolumenanteil und E-Modul	107	



3] I	`heorie zum Labor – Cinführung in die Laminattheorie und Vergleich mit Experimenten	109
3.1	Bilanzgleichungen	109
3.1.	Ziel der Kontinuumsmechanik: Bestimmung von vier Feldern	109
3.1.	2 Massenbilanz	110
3.1.	3 Impulsbilanz	110
3.1.	Umformung der Massen- und Impulsbilanz	113
3.1.	5 Zusammenfassung wichtiger Erkenntnisse	116
3.2	Materialgesetz	116
3.2.	Allgemeine Formulierung des HOOKEschen Gesetzes für beliebige anisotrope	
	linear-elastische Materialien	117
3.2.	2 Totaler Dehnungstensor	117
3	.2.2.1 Thermische Dehnungen	118
3	.2.2.2 Quellungen	119
3.2.	3 Steifigkeitsmatrix	119
3.2.	Superindex angewendet auf HOOKEsches Gesetz	122
3.2.	5 Nachgiebigkeitsmatrix	124
3.3	Werkstoffeigenschaften Homogenität und Anisotropie	126
3.3.	Homogenität	126
3.3.	2 Anisotropie	127
3.3.	8 Koordinatentransformation mit Dreh- und Symmetriematrizen	127
3.4	Steifigkeits- und Nachgiebigkeitsmatrizen in Abhängigkeit von der Werkstoffsymmetrie	
	(Kristallklasse)	129
3.4.	Triklin	130
3.4.	2 Monoklin	130
3.4.	3 Orthotrop/ Orthorhombisch	131
3.4.	l Tetragonal	132
3.4.	o Trigonal	133
3.4.	Transversale Isotropie	133
3.4.	/ Kubisch	134
3.4.	3 Isotrope Materialien	135
3.5	Einführung von Ingenieurkonstanten	136
3.5.	"Experimente" bei monoklinen Werkstoffen	136
3.5.	2 "Experimente" bei orthotropen Werkstoffen	140
3.5.	3 "Experimente" bei transversal-isotropen Werkstoffen	141
3.6	Transformation richtungsabhängiger Einzelschichtinformationen zur Laminatsteifigkeit	143
3.7	Laminattheorie - Spezielles Materialgesetz für den orthotropen Fall 2D	145
3.7.	Die Einzelschicht (ein Ply)	145
3	7.1.1 Ebener Spannungszustand bei orthotropen Werkstoffen, Eigensystem (x_1, x_2, x_3)	145
3	7.1.2 Mischungsregeln für mechanische Eigenschaften der Einzelschicht (Mikromechanik)	149
3	.7.1.3 Drehung einer Einzelschicht	150

	117

3.7.2	Ein symmetrisches Laminat	152
3.7.3 Berechnung der globalen Laminatsteifigkeit eines symmetrischen Laminats		
3.	7.3.1 Berechnung der Einzelschichtdicke t_k	154
3.7.4	Ableitung der benötigten Anzahl von Versuchen	155
3.8	Vergleich Experiment und Vorhersage mit Bewertung	156
3.8.1	Funktionsweise des Softwaretools LamiCens [©]	156
3.8.2	2 Berechnung nach klassischer Laminattheorie (CLT)	157
3.	8.2.1 Mischungsregeln	158
3.	8.2.2 Zehn Schritte zur Berechnung der Spannungen in den Einzelschichten	161
	3.8.2.2.1 1. Schritt: Bestimmung der Einzelschicht-Steifigkeiten	162
	3.8.2.2.2 2. Schritt: Transformation der Einzelschicht-Steifigkeiten	163
	3.8.2.2.3 3. Schrift: Berechnung der Laminatsteifigkeitsmatrix	164
	3.8.2.2.4 4. Schrift: Invertieren der Laminatsteifigkeitsmatrix zur -nachgiebigkeitsmatrix	164
	3.8.2.2.5 5. Schrift: Laminatverzerrungen	165
	3.8.2.2.6 6. Schrift: Berechnung der Gesamtverzerrungen des Laminats	166
	3.8.2.2.7 /. Schrift: Berechnung der Einzelschichtspannungen	166
	3.8.2.2.8 8. Schritt: Summe der spannungswirksamen verzerrungen	16/
	5.8.2.2.9 9. Schrift: Rucktransformation der spannungstreien Verzerrungen in das jeweilige	167
	2 8 2 2 10 10 Schritt: Borachnung der Spannungen in den Einzelschichten	168
3	8.2.3 Korrekturfaktoren	168
3.	8.2.4 Festigkeitskriterien	168
383	B Experiment versus Prognose gemäß klassischer Laminattheorie	169
3.	8.3.1 Elastische Materialkenngrößen in Polardiagrammen aufgetragen	169
3.	8.3.2 Elastische Materialkenngrößen in Balkendiagrammen gegenübergestellt	172
3.	8.3.3 Einfluss des Faservolumenanteils auf elastische Kenngrößen aus Experiment und Theorie	182
3.	8.3.4 Abschließende Diskussion	191
3.8.4	Ausblick	194
4 N	fechanik und virtuelle Labore –	
n	eue Lehrmethoden für eine traditionsreiche Wissenschaft	195
4.1	Zielsetzung	196
4.2	Begriffsdefinitionen und Grundlagen	197
4.2.1	Virtuelle Labore	197
4.2.2	2 E-Learning und Online-Lehre	199
4.2.3	B Der didaktische Ansatz	200
4.3	E-MechLAB – virtuelle Labore für die Ingenieurausbildung im Bereich der Mechanik	202
4.3.1	Konzept der Generierung von Online-Lehrmaterialien	202
4.3.2	2 Systematisierung und Navigation	203
4.3.3	Softwareergonomie der Lernumgebung	206
4.3.4	Farbpsychologie und Corporate Design	207
4.3.5	Anwenderzentriertes Konzept	208
4.3.6	6 Anwendungsbezogenes Konzept	209

7

4.4	V	irtuelle Labore für die Grundlagen der Technischen Mechanik	209
4.	4.1	Übersichtsschaubilder	210
4.	4.2	Online-Lernbausteine für die Mechaniklehre	212
	4.4.2	.1 Anschauliche Beispiele	212
	4.4.2	.2 Interaktive Lernanwendungen	214
	4.4.2	.3 Explorationen – experimentierfähige grafische Konstruktionsumgebungen	222
	4.4.2	.4 Katalogisierung der institutseigenen experimentellen Aufbauten	225
4.	4.3	Qualitätssicherung und Evaluationsergebnisse	227
4.5	V	irtuelle Labore für die Mechanik der Faserverbundkunststoffe	228
4.	5.1	Zielsetzung und Ansatzpunkt der Umsetzung	228
4.	5.2	Mehrwert des Medieneinsatzes	230
4.	5.3	Zielgruppe	231
	4.5.3	.1 Motivation zum Lernen	232
	4.5.3	.2 Zeit zum Lernen	232
	4.5.3	.3 Computerzugang, Medienkompetenz, Einstellung zum Onlinelernen	233
	4.5.3	.4 Vorerfahrung mit dem Lernstoff, E-Learning und Lernplattformen	233
4.	5.4	Didaktische Überlegungen	234
	4.5.4	.1 Lernziele	234
	4.5.4	.2 Lerninhalte	235
	4.	5.4.2.1 Ausgangslage und Problematik	235
	4.	5.4.2.2 Neukonzept der Lehrveranstaltung	235
	4.	5.4.2.3 Verzahnungspunkte von virtueller Laborumgebung und Präsenzveranstaltung	236
	4.5.4	.3 Lehrmethoden	237
	4.5.4	.4 Szenarien netzbasierten Lernens	238
	4.5.4	.5 Medien	240
4.	5.5	Planung der konkreten Umsetzung	242
	4.5.5	.1 Zeitplan für die Einführung	242
	4.5.5	.2 Ablaufplan der Veranstaltung	242
	4.5.5	.3 Technische Ausstattung und Aspekte	244
	4.5.5	.4 Eigenart ingenieurwissenschaftlicher Online-Lehrinhalte – Formeln im Web	244
	4.5.5	.5 Zu erwartende Schwierigkeiten bei der Umsetzung	246
4.	5.6	Umsetzung - Lerneinheiten zur "Mechanik der Faserverbundwerkstoffe"	247
	4.5.6	5.1 Strukturentwurf	247
	4.5.6	Von der Einleitung bis zur Gestaltung mit Faser-Kunststoff-Verbunden	249
	4.5.6	Grundgedanken zur Konzeption der Lerneinheit zur Berechnung von FVK	254
	4.5.6	 Methodisches Vorgehen zur Definition der Arbeitsabläufe und geeigneten Darstellung des Herstellprozesses von Faserverbundkunststoffen in Online-Lehreinheiten 	261
4.6	E	rgebnisse und abschließende Diskussion der finalen Realisierung	263
4.7	A	usblick	264
5	Lite	eraturverzeichnis	265



Bezeichnungen: Abkürzungen und Symbole

Abkürzungen

AFK	Aramidfaserverstärkter Kunststoff
BFK	Basaltfaserverstärkter Kunststoff (Anmerkung: Die hier gewählte Bezeichnung ist nicht üblich, da mit BFK gewöhnlich borfaserverstärkte Kunststoffe abgekürzt werden, zur Probenkennzeichnung für diese Arbeit jedoch zweckdienlich und so- mit hoffentlich verzeihlich.)
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
const.	konstant
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
FVK	Faserverbundkunststoff oder auch faserverstärkter Kunststoffverbund (-werkstoff)
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund

Symbole

Α	Querschni	tt	
b	Breite b_0 Δb	Ausgangsbreite Änderung der Breite	[mm]
d	Dicke		[mm]
Ε	Elastizitäts E_F E_H $E_1 = E_{\parallel}$ $E_2 = E_{\perp}$	smodul Elastizitätsmodul des Faserwerkstoffes Elastizitätsmodul der Matrix aus Epoxidharz Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung Elastizitätsmodul senkrecht zur Faserrichtung	[MPa]
F	Kraft		[N]
G	Schubmod	lul	[MPa]

l	Länge		[mm]
	l_0	Ausgangsänge	
	Δl	Längenänderung	
α	Laminat- b	ozw. Faserorientierungswinkel	[°]
	$lpha_{ m Kett}$	Faserorientierungswinkel der Kettfäden im Laminat	
	$lpha_{ m Schuss}$	Faserorientierungswinkel der Schussfäden im Laminat	
	$lpha_k$	Laminatorientierungswinkel der Einzelschicht k	
З	Dehnung		[%]
	${\cal E}_{ m q}$	Querdehnung	
	\mathcal{E}_1	Längsdehnung	
	$oldsymbol{\mathcal{E}}_{kl}^{ ext{th}}$	Temperaturabhängige Dehnung	
	$oldsymbol{\mathcal{E}}_{kl}^{ ext{qu}}$	Dehnung aufgrund von hygroskopischen Quellungen	
	$oldsymbol{\mathcal{E}}_{kl}^{ ext{ph}}$	Dehnungen aufgrund von Phasenumwandlungen	
	$oldsymbol{\mathcal{E}}_{kl}^{ ext{pl}}$	plastische (= zeitunabhängig bleibende) Dehnung	
	$oldsymbol{\mathcal{E}}_{kl}^{ ext{cr}}$	Kriechdehnung (= zeitabhängig bleibende Verformung)	
	$oldsymbol{\mathcal{E}}_{kl}^{\Delta oldsymbol{v}/oldsymbol{v}}$	geschwindigkeitsabhängige Dehnung	
	\mathcal{E}_{11}	parallel zur Faserrichtung gemessene Dehnung	
		[DIN EN 2561 (1995)]	
	\mathcal{E}_{22}	senkrecht (in Laminatebene) zur Faserrichtung gemessene	
	_	Dehnung [DIN EN 2561 (1995)]	
	\mathcal{E}_{y}	axiale Dehnung bzw. Langsdehnung in Laborkoordinaten	
	\mathcal{E}_{x}	Querdehnung in Laborkoordinaten	
	${\cal E}^{}_{ m B}$	Bruchdehnung	
φ	Faservolumenanteil im Laminat (FVA) [%]		[%]
ρ	Dichte		[g/cm ³]
V	Querkontr	aktionszahl	[-]
V_{21}	Querkontra Verbundes	aktionszahl der (anisotropen) Einzelschicht des Faser-Kunststoft : für die Indizierung der Querkontraktionszahlen v_{ij} gilt im	f-
	deutschspra 1. Index <i>i</i> .	achigen Raum [vgl. z. B. MICHAELI et al. (1995)]: Richtung der Verformung	
	2. Index <i>j</i> :	Richtung der Spannung, die diese Verzerrung bewirkt	

σ	Spannung		[MPa]
	$\sigma_{\text{T11}} = \frac{F_{\text{B}}}{b d}$	Bruchkraft $F_{\rm B}$ in N bezogen auf das Produkt aus Probenbreite	
		<i>b</i> und –dicke <i>d</i> in mm [DIN EN 2561 (1995)]	
	σ_{y}	Normalspannung in Laborkoordinaten	
	$\sigma_{\scriptscriptstyle m B}$	Bruchspannung	
τ	Schubspannung		[MPa]
t	Zeit		[s]
Δt	Zeitinkrement		[s]

Operatoren

A^{T}	Transponierte eines Tensors
A^{-1}	Inverse eines Tensors
$C = A \cdot B$	Matrixprodukt, $C_{ij} = A_{ik}B_{kj}$
ż	Zeitableitung
$\frac{\partial y}{\partial x}$	partielle Ableitung
$\frac{dy}{dx}$	totale Ableitung



1 Einleitung und Aufgabenstellung

Faserverstärkte Kunststoffe erschließen fortwährend neue Anwendungsbereiche. Prominente Einsatzbeispiele aus der Luftfahrt nach der Jahrtausendwende sind der Airbus A380 und der Boeing Dreamliner. Neben dem großindustriellen Einsatz ist die Fertigung in Faserverbundbauweise auch für Kleinserien wie bei einem Formula Student¹ Rennsportfahrzeug oder einem Ultra-Leicht-Segelflieger (siehe Bild 1.1) interessant, da sie im manuellen Handlaminierverfahren mit überschaubarer maschineller Ausstattung möglich ist.² Der vermehrte Einsatz von faserverstärkten Kunststoffverbundwerkstoffen ist auf ihr beachtliches Leichtbaupotenzial zurückzuführen, was bedeutet, dass sie bei einer geringen Dichte über gute mechanische Eigenschaften verfügen.



Bild 1.1: Handlaminierte Ultra-Leicht-Segelflieger in Wabensandwich-Bauweise [Bildquelle: SILENCE AIRCRAFT (2011-ol)]

Als Konstruktionswerkstoff verwendet birgt der Faser-Kunststoff-Verbund jedoch eine gewisse Problematik, die gleichermaßen aus seinen Vorzügen erwächst. In diesem Zusammenhang ist einerseits das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten innerhalb des (inhomogenen) Verbundes bei mechanischer und/oder thermischer Belastung zu nennen. Andererseits bewirkt die Richtungsabhängigkeit der Materialeigenschaften, dass – bei gleichem Bauteilquerschnitt – eine Stärkung der Struktur durch gezielte Einbringung von Fasern in der vorher-

¹ Formula Student Germany: Konstruktionswettbewerb für Studenten, der seit dem Jahr 2006 vom Verein Deutscher Ingenieure (VDI) ausgerichtet wird

² Für die Produktion von Großserien sind Handlaminierverfahren wegen des zu geringen Materialdurchsatzes pro Stunde weniger geeignet [FLEMMING et al. (1996)].



Herausforderungen und Handlungsbedarf

Vielfältige Kombinationsmöglichkeiten von Faser- und Matrixwerkstoffen sowie Variationsoptionen bei Faserablage, -orientierung, -volumenanteil und weiteren Produktkenndaten führen teilweise zu extrem unterschiedlichen Materialeigenschaften. Die inhomogenen und anisotropen Werkstoffeigenschaften bewirken in Abgrenzung zum Einsatz klassischer Konstruktionswerkstoffe, dass sich die Auslegung einer solchen Konstruktion um ein Vielfaches verkompliziert. Schließlich hängen sie nicht allein von den Ausgangsmaterialien, sondern außerdem von weiteren Parametern ab. Darüber hinaus mangelt es in vielen Fällen an Angaben über Werkstoffkennwerte für die verwendeten Komponenten der faserverstärkten Kunststoffverbunde bzw. für die Verbunde selbst [FUNKE (2001)]. Eine zusätzliche Schwierigkeit ist für den Konstrukteur bei der Bauteilauslegung auf die Tatsache zurückzuführen, dass der eigentliche Werkstoff erst mit der Formgebung des Bauteils entsteht, die produktionsspezifischen Werkstoffparameter des erstellten Verbundes (z. B. Faservolumenanteile, genaue Faserorientierung, -verteilung und -benetzung, usw.) sich also erst in dieser, dem Konstruktionsprozess nachgelagerten Produktionsstufe ergeben. Wird der Faser-Kunststoff-Verbund manuell gefertigt, stellt sich zusätzlich die Frage nach der Zuverlässigkeit und Vorhersagbarkeit des Materialverhaltens, da Imperfektionen und lokale Abweichungen eine stete Begleiterscheinung sind.

Aus den vielfältigen genannten Gründen ist eine gesamte und übersichtliche Darstellung aller Werkstoffkennwerte für Faserverbundkunststoffe nicht möglich. Folglich müssen die Materialkenngrößen streng genommen für jeden Laminataufbau experimentell bestimmt werden. Das stellt einen hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand dar, der nicht immer leistbar ist. Sofern keine repräsentativen experimentellen Daten vorliegen, können die Werkstoffparameter eines jeden Laminataufbaus nur rechnerisch - und ihrerseits basierend auf Prognosen vorhergesagt werden. Als allgemeine Theorie zur Bestimmung dieser Materialparameter gilt die klassische Laminattheorie (engl.: Classical Laminate Theory, kurz: CLT). Vorgelagert finden dazu mikromechanische Homogenisierungsmodelle Anwendung, die teils empirischen Ursprungs sind. Es existieren diverse Möglichkeiten, anhand dieser Theorie Faserverbundlaminate zu berechnen. Eine davon ist das im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Berechnungstool LamiCens[©] [FUNKE (2005b), FUNKE (2005c)], das sich bei der Vorhersage entsprechender Laminatkennwerte unter Anwendung der Berechnungsalgorithmen der CLT durch seine einfache, niederschwellige Bedienbarkeit auszeichnet. Zur Erstellung des Laminataufbaus greift LamiCens[©] datenbankunterstützt auf Halbzeugdaten sowie Schätzwerte zurück, die wiederum einen wesentlichen Einfluss auf die zu ermittelnden Werkstoffkennwerte nehmen. Dabei lässt sich über die Zuverlässigkeit der Halbzeugdaten schwerlich eine Aussage treffen und die Schätzwerte sind naturgemäß ungenau. Des Weiteren findet der Einfluss der Faserwellung, welche typischerweise ein Gewebe kennzeichnet, in der Software keine Berücksichtigung. Ebenso ist fraglich, inwiefern die manuelle Herstellung der Verbundwerkstoffe Einfluss auf deren mechanische Eigenschaften gegenüber der rechnerischen Prognose nimmt.



Bislang hat keine experimentelle Überprüfung der mit Lami*Cens*[©] prognostizierten Werkstoffkennwerte für handlaminierte faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe stattgefunden.

Ziele und Vorgehensweise

Motiviert durch diese Diskrepanz besteht ein wesentliches Ziel der vorliegenden Dissertation darin, die mit Hilfe des Berechnungstool LamiCens[©] ermittelten elastischen Materialparameter wie Elastizitäts- und auch Schubmoduln sowie Querkontraktionszahlen (sog. "Ingenieurkonstanten") experimentell zu verifizieren. Dazu sollen anhand von eigens dafür manuell gefertigten (sog. handlaminierten) Faserverbundkunststoffen aus handelsüblichen Glas-, Kohlenstoff-, Aramid- und Basaltfaserhalbzeugen, eingebettet in eine Kunststoffmatrix aus Epoxidharz, Experimente durchgeführt und ausgewertet werden. Bei den zu untersuchenden Faserhalbzeugen handelt es sich um stellvertretend auszuwählende Standardgewebe, die senkrecht verkreuzte Fasern aufweisen und in der Praxis häufig Verwendung finden. Für die zu Testzwecken herzustellenden Faser-Kunststoff-Laminate sind zunächst die produktionsspezifischen Kenndaten (Volumenanteile der Faser) zu ermitteln, um im Anschluss daraus Prüfkörper herzustellen. Bei der Ermittlung der Ingenieurkonstanten im realen Versuch werden optische Feldmessverfahren zum Einsatz kommen, welche sich der Methode der Photogrammetrie bedienen. Den experimentell ermittelten elastischen Kenngrößen werden dann zu Vergleichszwecken die Vorhersagen aus Berechnungen mit LamiCens[©] unter Berücksichtigung im Labor bestimmter Eingangsdaten zur Charakteristik des jeweiligen Probelaminats (z. B. Faservolumenanteil) gegenübergestellt. Die generierte Datenbasis soll Anwendern der hier getesteten faserverstärkten Epoxidharze als Anhaltspunkt für die Güte eines manuell gefertigten Laminats dienen. Man erhofft sich am Ende dieser Arbeit Aussagen über geeignete Korrekturfaktoren zu den exemplarisch untersuchten Werkstoffkonstellationen.

Da sich der Herstellungsprozess – etwa eines Schalenbauteils aus Faserverbundkunststoff – erheblich von dem einer Metallkonstruktion unterscheidet, außerdem in Bezug auf die Bauteilgeometrie bei einer Faserverbundkonstruktion bestimmte Regeln zu beachten sind und die Werkstoffauslegung komplizierter ist, stellt die Einarbeitung in die Thematik eine große Hürde dar. MICHAELI et al. (1995) beschreiben diese Problematik als "*zwischen 'Anfänger- und Spezialistenliteratur' klaffende inhaltliche Lücke*". Wie führt man aber nun den wissenschaftlichen Nachwuchs an eine solch komplexe Thematik heran? Aus diesem Grund ist Wissensvermittlung ein weiteres zentrales Thema dieser Abhandlung. Es gilt, dem (angehenden) Konstrukteur mittels der universitären Ausbildung zunächst ein Gefühl für die doch ungewöhnlichen Vor- und Nachteile und damit verbundenen Möglichkeiten und Einschränkungen beim Einsatz von Faser-Kunststoff-Verbunden in Bauteilen zu vermitteln. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit zu entwickelnde Lernumgebung namens "E-MechLAB" soll hier einen Ansatz liefern, um den schwierigen Einstieg zu erleichtern und evtl. als Nachschlagewerk zur Vertiefung für mechanische Fragestellungen zu dienen.

Struktureller Aufbau der vorliegenden Arbeit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich diese Dissertation handlaminierten Faserverbundkunststoffen widmet und versucht, deren Eigenschaften zu quantifizieren und zwar sowohl experimentell in Abhängigkeit der Faserorientierung, als auch theoretisch und – aufgrund der Komplexität der Thematik – die Ergebnisse in einer ansprechenden Lernumgebung für den Anwender aufzubereiten. Daraus ergibt sich der Aufbau dieser Arbeit, der grundsätzlich, wie in Bild 1.2 veranschaulicht, durch die folgenden drei Säulen charakterisiert wird:

- → Säule 1: Die Anwendung neuer experimenteller Methoden optischer Feldmessverfahren (Photogrammetrie) auf faserverstärkte Kunststoffe.
- → Säule 2: Die Theorie zum Labor mittels Einführung in die Laminattheorie und Vergleich mit den Resultaten aus der ersten Säule.
- → Säule 3: Der Transfer dieses komplexen Werkstoffwissens in die Lehre durch die Einbettung der ersten und zweiten Säule in eine mit virtuellen Laboren angereicherte Fachwissensbasis für einen Adressatenkreis von Studenten, Anwendern, im Beruf stehenden Personen, die sich ein neues Wissensgebiet erschließen wollen, und weiterem interessiertem Publikum, sei es schulisch oder beruflich motiviert.



Bild 1.2: Die drei Säulen der Umsetzung realer und virtueller Labore zur Mechanik der Faserverbundkunststoffe



Mechanik und reale Labore Experimentelle Bestimmung elastischer Materialeigenschaften faserverstärkter Kunststoffverbundwerkstoffe unter Einsatz optischer Feldmessverfahren

Für den Konstrukteur stellt gemäß MICHAELI et al. (1995) die Vielzahl der zu determinierenden Eingangskenngrößen, die allesamt entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften des späteren Werkstoffes haben, eine sehr unübersichtliche und nahezu unlösbare Aufgabe bei der optimalen Auslegung eines Faserverbundkunststoff-Laminats dar. Die Werkstoffauswahl ist zu treffen, der Faservolumenanteil ist zu schätzen, die Orientierungswinkel der Einzelschicht müssen möglichst belastungsgerecht prognostiziert werden, über gewünschte Schichtdicken sind Annahmen zu treffen und Stapelfolgen sind festzulegen. In der Hochschullandschaft finden sich dafür komplexe numerische Optimierungsprogramme (vgl. z. B. KNEPPE (1986)). Die Luft- und Raumfahrt setzt ebenfalls solche Programme ein. Schon 1995 bemerkten MI-CHAELI et al. (1995), dass *"kommerzielle Programmentwicklungen zur FVK-Optimierung… noch in den Kinderschuhen"* stecken. Daran hat sich bis heute leider wenig geändert.

Die erwähnten, zahlreichen Parameter, die in den konstruktiven Prozess einfließen, sind relativ unsicher. MICHAELI et al. (1995) betonen daher, "dass in Versuchen ermittelte Einzelschichteigenschaften immer die ,besseren' Kennwerte für eine Dimensionierung sind", da sie die Realität exakter abbilden, als eine theoretische Prognose aus einer Simulation. NIEDER-STADT et al. (1985) erörtern ausführlich, dass ein Bauteil aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (kurz: CFK) von vornherein mit mehr "Fehlern" behaftet ist als ein vergleichbares Metallteil, was schlichtweg darauf zurückzuführen ist, dass hier zwei Komponenten zu einem Werkstoff zusammengesetzt werden, die hinsichtlich ihrer Form, ihrer mechanischen Eigenschaften wie auch ihrer chemischen Konsistenz völlig unterschiedlich sind. Material- bzw. Verarbeitungsfehler (Bereiche mit zuviel oder zuwenig Harz, Gasblasen oder Fremdkörpereinschlüsse, fehlerhafte oder falsch orientierte bzw. verrutschte Faserlagen, unvollständige Vernetzung, zu hohe Feuchtigkeitsaufnahme) dürfen ein gewisses Maß, das als tolerabel erachtet wird, nicht überschreiten. Durch gezielte Qualitätssicherung kann bestimmten Schäden bereits im Vorfeld der Fertigung durch gewissenhafte Wareneingangskontrolle, Überwachung der Lager- und Werkstattbedingungen sowie bei der Herstellung weitestgehend vorgebeugt werden. Gänzlich auszuschließen sind diese Defekte jedoch nicht.

Beim Aushärtungsprozess kommen entstehende Risse hinzu. Wird das Bauteil belastet, so vergrößern und vermehren sich diese Defekte im allgemeinen stetig; es treten weitere Risse auf, die gegebenenfalls von Delaminationen zwischen den einzelnen Faserlagen sowie Faserbrüchen oder Faser-Harz-Ablösungen begleitet werden. Das Ausmaß der Schädigung kann mit zerstörungsfreien Prüfmethoden bestimmt werden, z. B. Röntgenprüftechnik, Ultraschall-Prüftechnik, Schallemissionsanalyse, Rasterreflexionsverfahren, holografische Interferometrie, Wärmefluss-Thermografie, Abklopfverfahren, um Aussagen zur Bauteilzuverlässigkeit bei weiterer Belastung treffen zu können. Wenn das Bauteil "gut" konstruiert ist und es nicht in unvorhergesehener Weise belastet wird, sollten nach NIEDERSTADT et al. (1985) alle festgestellten Defekte unterkritisch sein. Wird das Faktum der fehlerbehafteten Bauteile darüber hinaus um den Umstand ergänzt, dass der Verbundwerkstoff im Handlaminierverfahren – also **manuell** – hergestellt wurde, so steigert das nicht das gefühlte Vertrauen in die Werkstoffkategorie der faserverstärkten Kunststoffe. Mithin stellt sich die Frage: Wie "gut" sind solche handlaminierten Faserverbundkunststoffe wirklich? Zumal das manuelle Herstellverfahren gar nicht so selten zum Einsatz kommt, wie Bild 2.1 mit dem Vergleich unterschiedlicher Verarbeitungsverfahren für glasfaserverstärkte Kunststoffe bezüglich ihrer Jahresproduktion in Europa im Jahr 2005 belegt. Im Gegenteil, hieraus wird deutlich, dass die manuelle Herstellung von Glasfaserverbundkunststoffen im Handlaminierverfahren eine Vorrangstellung vor den maschinellen Verfahren einnimmt. Neben automatisierten Herstellungsverfahren, die insbesondere bei der Großserienfertigung zum Tragen kommen, eignet sich das Handlaminierverfahren (vgl. Abschnitt 2.4) ideal zur Herstellung kleiner Stückzahlen von FKV-Bauteilen, Prototypen oder auch sehr großen Bauteilen. Es ist außerdem sehr flexibel und investitionsarm in Bezug auf benötigte Werkzeuge und Verarbeitungsmittel [EHRENSTEIN (2006)]. Jedoch ist zu erwähnen, dass die Qualität im Handlaminierverfahren vom Können und der Erfahrung des Laminierers abhängt.



Bild 2.1: GFK-Verarbeitungsverfahren in Europa 2005 [Bildquelle: nach EHRENSTEIN (2006)]

Der Frage nach dem Einfluss der manuellen Werkstoffherstellung soll im Rahmen dieser Arbeit mit Hilfe optischer und damit berührungsloser Messtechnik zur Verformungserfassung nachgegangen werden. Dazu werden zunächst die Werkstoffe vorgestellt, deren Herstellung und die der Prüfkörper erörtert, auf die Prüftechnik (Prüfstand und eingesetzte Sensoren) eingegangen und anschließend die experimentellen Ergebnisse präsentiert, die dann im nächsten Kapitel der Theorie gegenübergestellt werden. Die Abschätzung des Versuchsprogramms auf Grundlage der klassischen Laminattheorie bzw. vor kontinuumsmechanischem Hintergrund ist ausführlich in Kapitel 3 dargestellt. Die erarbeitete Wissensbasis wird darüber hinaus wie in Kapitel 4 beschrieben für die Online-Lehre aufbereitet und so einem breiten Publikum zugänglich gemacht.



2.1 Wissenswertes über faserverstärkte Kunststoffverbunde

Faserverstärkte Kunststoffverbunde bestehen aus zwei Komponenten: dünnen Fasern und einer umgebenden Matrix. Die Verstärkungswirkung kann dabei allgemein als "Erhöhen der Festigkeit eines Grundwerkstoffes durch Einbetten von Verstärkungsmaterial" [SCHÜRMANN (2007)] definiert werden. Dieses Konstruktionsprinzip ist keinesfalls neu. Faserverbundbauweisen treten in der Natur bereits seit Millionen von Jahren auf. So gehört der Faserverbundwerkstoff Holz zu den ältesten Konstruktionswerkstoffen des Menschen. Die neue Werkstoffgruppe der duroplastischen Faserverbundwerkstoffe wurde vor ca. 70 Jahren entdeckt, als die Fa. United Rubber Company 1942 eine erhebliche Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von ungesättigten Polyesterharzen durch Verstärkung mit Glasfasern herausfand, vgl. dazu FLEMMING et al. (1999), DOMININGHAUS (1992). Die Entdeckung fußt auf mehreren Meilensteinen. Einer davon war 1912 mit der Herstellung endloser Glasfasern mit entsprechenden mechanischen und chemischen Eigenschaften gelegt [LANGHORST (1993)]. Dann glückte in den dreißiger Jahren die Entwicklung duroplastischer, also härtbarer Matrixsysteme, die auch allgemeinhin unter dem Namen Harze bekannt sind. In mehreren Etappen wurden seitdem die Vernetzungsreaktionen von Polyesterharzen wie auch die Reaktionsfreudigkeit der Epoxidharzgruppe genutzt und verbessert, sodass letztgenannte ohne Abspaltung von Nebenprodukten aushärten und Endprodukte mit hervorragenden Eigenschaften bei geringem Schwund entstehen [FLEMMING et al. (1999)].

Die Fasern übernehmen den größten Teil der mechanischen Belastungen im Verbund. Häufig kommen Verstärkungsfasern aus Glas, Aramid oder Kohlenstoff zum Einsatz, die im Rahmen dieser Arbeit neben Basaltfasern untersucht werden. Diesen modernen Industriefasern werden sehr gute mechanische Eigenschaften nachgesagt. Die Fasern liegen gewöhnlich in Form von flächigen oder räumlichen Halbzeugen vor. Sie werden in eine sogenannte Matrix aus Kunststoff (z. B. Thermoplaste oder in unserem Fall Duroplaste) eingebettet. Für stark beanspruchte Bauteile werden SCHÜRMANN (2007) zufolge vorwiegend Epoxidharze verwendet, wie auch in den dieser Arbeit zugrunde liegenden Versuchen. Der schematischen Darstellung in Bild 2.2 ist zu entnehmen, dass der Faserverbundkunststoff bei der Einbettung der Fasern in den Matrixwerkstoff – in der gewünschten Stapelfolge – und ggf. durch Verpressen sowie anschließende Aushärtung entsteht. Die Fasern sind dabei zumeist in Faserbündeln, sogenannten Rovings, zusammengefasst. Diese Rovings liegen parallel zueinander³ und formen mit der umgebenden Matrix eine Einzelschicht. Ist der Faserverbundwerkstoff schichtweise aus mehreren mit Matrixwerkstoff durchtränkten Halbzeuglagen übereinander aufgebaut, so wird der Verbund als Laminat bezeichnet. Die Bezeichnung Laminat ist vom lateinischen Wort lamina ("Schicht") abgeleitet. Innerhalb des Laminats sind die Einzelschichten häufig gegeneinander verdreht angeordnet, damit die höherfesten Fasern Lasten in verschiedenen Richtungen aufnehmen können. Faserverbundlaminate werden entsprechend der Ausrichtung ihrer Fasern in unidirektional (UD), bidirektional (BD) und multidirektional (MD) unterschieden.

³ Die parallele Anordnung ist eine Prämisse für die Theorie: In der Praxis mag es (marginale) Abweichungen in Abhängigkeit vom verwendeten textilen Flächengebilde (siehe Abschnitt 2.2.6) geben. Oftmals werden Gelege, Gewebe oder Geflechte verwendet. In diesen Faseranordnungen liegen die Fasern bereits in orthogonalen Schichten ineinander.





Bild 2.2: Aufbau von Faserverbundkunststoffen [Bildquelle: nach DLR Stuttgart, veröffentlicht in: R&G (2003)]

Ein entscheidender Vorteil dieser Art des Werkstoffs ist die relativ einfache Verarbeitung, die mit geringem Investitionsaufwand sogar in einer Hobbywerkstatt möglich ist. Für den so entstandenen Werkstoffverbund finden sich in der Literatur verschiedene Bezeichnungen wie faserverstärkter Kunststoff, Faserverbundkunststoff (FVK) oder Faser-Kunststoff-Verbund (FKV). Weiterhin wird auch der englische Begriff "Composite" synonym verwendet. Die allgemeine Bezeichnung faserverstärkter Kunststoff kann durch Einsetzen des konkret verwendeten Faserwerkstoffs präzisiert werden. So wird für einen glasfaserverstärkten Kunststoff die gängige Abkürzung GFK verwendet. Analog existieren die Bezeichnungen kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK), basaltfaserverstärkter Kunststoff (BFK) und aramidfaserverstärkter Kunststoff (AFK). Letzterer wird gelegentlich auch als synthesefaserverstärkter Kunststoff (SFK) bezeichnet. Dieser Begriff ist dann jedoch weiter gefasst und schließt auch Polyethylen- und Polyamidfasern (ebenfalls Synthesefasern) mit ein. In Bezug auf die Abkürzung BFK gilt es, Vorsicht walten zu lassen, da diese stellenweise auch für borfaserverstärkte Kunststoffe verwendet wird. Aus der Kombination der beiden Komponenten Faser und Matrix ergeben sich im Wesentlichen zwei grundlegende Eigenschaften, die Faserverbundkunststoffe von anderen Konstruktionswerkstoffen wie beispielsweise Stahl unterscheiden: sie sind **inhomogen** und **anisotrop** (siehe auch Abschnitt 3.3). Unter Inhomogenität versteht man, dass die Materialeigenschaften eines Werkstoffes vom Ort abhängen. Eine dieser Werkstoffeigenschaften ist die Steifigkeit, welche dort, wo sich Fasern befinden, deutlich höher ist als an Stellen mit Harz. Anisotropie bedeutet Richtungsabhängigkeit. Allgemein gilt für Faserverbundkunststoffe, dass die Steifigkeit in Faserrichtung deutlich höher ist als die Steifigkeit quer dazu. Aus diesen beiden wesentlichen Merkmalen ergeben sich gravierende Unterschiede gegenüber der Berechnung herkömmlicher Werkstoffe wie Stahl.

2.1.1 Einsatz von faserverstärkten Kunststoffverbunden unter Leichtbaugesichtspunkten

Faserverbundkunststoffen wird "enormes Leichtbaupotenzial" nachgesagt. Sie weisen laut MICHAELI et al. (1995) *"hervorragende mechanische Eigenschaften*" auf und übertrumpfen die klassischen Konstruktionswerkstoffe wie Stahl und Aluminium aufgrund ihrer geringen Dichte mit *"sehr hohen gewichtsbezogenen Festigkeiten und Steifigkeiten*", was aus dem Vergleich in Bild 2.3 hervorgeht. Im linken Diagramm ist die Zugfestigkeit über dem E-Modul aufgetragen, rechts sind diese Kennzahlen normiert auf die jeweilige Werkstoffdichte dargestellt. Zur Schonung von Ressourcen werden FVK daher bevorzugt für Leichtbaukonstruktionen, also überall dort, wo hohe Festigkeiten bei geringer Masse gefordert sind, eingesetzt.



Bild 2.3: Vergleich absoluter (links) und spezifischer Materialeigenschaften von unidirektionalen Hochleistungsverbund-Kunststoffen mit hochfesten Metallen [Bildquelle: EHREN-STEIN (2006), geringfügig modifiziert]

Diese herausragenden Eigenschaften liegen jedoch im Wesentlichen in Faserrichtung vor, was MICHAELI et al. (1995) eindrucksvoll in Bild 2.4 mit der Gegenüberstellung von unidirektionalen gegenüber quasi-isotropen FVK-Laminaten veranschaulichen. Es wird deutlich, dass sich der gewichtsbezogene Vorteil gegenüber Metallen relativiert, wenn die Konstruktion nicht lastgerecht optimiert wurde. FVK sind nach WIEDEMANN (1996) wegen ihres Leichtbaupotenzials prädestiniert für den Fahrzeugbau, die Luft- und Raumfahrt oder den Maschi-

9

nenbau. Für EHRENSTEIN (2006) sprechen aus Sicht von Unternehmen die zwei Schlüsselfaktoren Festigkeit und geringe Masse für den Einsatz von FVK, gefolgt von der Medienbeständigkeit und Steifigkeit. Zu beachten ist aber auch, dass man mit der Entscheidung für FVK in Bezug auf die Bauteilanforderungen flexibler ist, da sie über *"eine in weiten Grenzen einstellbare Steifigkeit, die von sehr hoher Steifigkeit bis zu hervorragender Dehnbarkeit reicht"*, verfügen [MICHAELI/WEGENER (1990)].



Bild 2.4: Spezifische Eigenschaften von unidirektional und quasi-isotrop verstärkten Faserverbundkunststoff-Laminaten gegenüber denen von Metallen [Bildquelle: MICHAELI et al. (1995)]

2.1.2 Werkstoffe mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften

In Bezug auf die gezielte Einstellung bestimmter gewünschter Eigenschaften wird bei Faserverbundwerkstoffen auch von maßgeschneiderten bzw. designbaren Werkstoffen gesprochen. Es besteht die Möglichkeit, verschiedene Faserhalbzeuge zu wählen, zu kombinieren und darüber hinaus die Fasern belastungsgerecht im Bauteil zu positionieren. Das hängt mit der Besonderheit des Faserverbundwerkstoffs, der Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften (Anisotropie), zusammen. Die Fasern können je nach Belastung des Bauteils ausgerichtet werden: In Richtung der Fasern können Faserverbund-Bauteile hohe Kräfte aufnehmen, während sie einer Belastung außerhalb der Faserrichtung weniger gut Stand halten. Die Tatsache, dass nicht nur mit dem Werkstoff konstruiert wird, sondern auch der Werkstoff selbst entsprechend den gewünschten Anforderungen erschaffen wird, eröffnet viele Gestaltungsmöglichkeiten [MICHAELI/WEGENER (1990)]. Konstruktionen aus Faserverbundkunststoffen haben den Vorteil, dass sie durch die Wahl der geeigneten Fasern und deren Ausrichtung sowie Lagenstärke, in Verbindung mit einem entsprechenden Matrixmaterial, nahezu

ideal auf die zu erwartenden Belastungen im konkreten Anwendungsfall abgestimmt werden können. Besonders beanspruchte Stellen können gezielt verstärkt werden, so dass die mit einer Verstärkung verbundene Gewichtszunahme auf ein Minimum reduziert werden kann. Die Fasern sind dabei ähnlich wie bei Pflanzen angeordnet: An höherbelasteten Stellen werden mehr Fasern genau in Kraftrichtung angeordnet. Aufgrund der erwähnten Anisotropie sind Kenntnisse über die Gestaltung und Dimensionierung von FKV-Bauteilen unbedingt erforderlich. Mit der optimalen Nutzung dieses Leichtbaupotenzials beschäftigt sich das Textilverfahren Tailored Fibre Placement (TFP) (siehe z. B. SPICKENHEUER (2008)).

2.1.3 Zusammenspiel von Faser und Matrix im Verbund

"In einem Composite-Material kann die Verbundstruktur als Ganzes Spannungen ertragen, die die schwächere zerbrechen würde, während von der stärksten Komponente ein viel höherer Prozentsatz der theoretischen Festigkeit realisiert werden kann, als wenn sie allein beansprucht würde." [SLAYTER (1962)]

Dieses – der Aufzählung von VAN KREVELEN (1983) zufolge – "vierte Paradoxon" beschreibt das bemerkenswerte Zusammenwirken von Faser und Matrix im Verbund und wurde ursprünglich für Zwei-Phasensysteme formuliert [FLEMMING/ROTH (2003)].

Um die mechanischen Werkstoffeigenschaften der Fasern nutzen zu können, werden diese in eine Matrix eingebettet, wie in Bild 2.2 veranschaulicht. Es liegt eine gewisse Aufgabenteilung in dieser Symbiose. FLEMMING et al. (1999) kritisieren die *"weitverbreitete Meinung, die Harze dienen nur als ,Klebstoff' für die Verstärkungsfasern"*, wohingegen die Fasern die eigenschaftsbestimmende Komponente des Verbundes seien. Vielmehr sei die Abstimmung des Harzsystems auf die Fasern essentiell, um einen leistungsfähigen Komposit zu erzeugen.

Die Fasern bilden zwar die verstärkende Komponente im Verbund, jedoch könnte ein spröder Werkstoff wie Glas nicht alleine für Bauteilkonstruktionen eingesetzt werden [MICHAE-LI/WEGENER (1990)]. Wie in den meisten Fällen üblich, werden auch die zur Herstellung der Zugproben verwendeten Fasern vollständig in eine Kunststoffmatrix eingebettet. Dies hat zur Folge, dass die Fasern nicht mehr direkt belastet werden, sondern die Kräfte über die Matrix auf sie übertragen werden. Der Krafteinleitung kommt somit eine wichtige Bedeutung zu [RÖSLER et al. (2006)]. Insbesondere bei einer Belastung des Werkstoffs quer zur Faserrichtung spielt die Haftung zwischen Faser und Matrix eine entscheidende Rolle.

Die Aufgaben des Harzsystems im Verbund können wie folgt beschrieben werden [SCHÜR-MANN (2007)]:

- \rightarrow Fixierung der Fasern in einer vorgesehenen Orientierung,
- \rightarrow Erzeugung einer Distanz zwischen den scheuerempfindlichen Fasern,
- → Schutz der Fasern vor Umgebungseinflüssen (Chemikalien, Abrieb): bei AFK-Bauteilen kann die Matrix darüber hinaus als Trägermaterial genutzt werden, um einen Lack aufzubringen, der die Fasern vor dem für sie schädigenden UV-Licht schützt,
- \rightarrow Rissstopperfunktion bei Verwendung einer zähen Matrix,



- → Krafteinleitung in die Fasern und Kraftüberleitung von Faser zu Faser und
- → Stützen der Fasern bei Vorliegen einer Druckbeanspruchung in Faserrichtung.

Da bei Belastung des Faserverbundwerkstoffes die Kraftübertragung mittels Schubkräften von der Matrix auf die Faser stattfindet, ist die Qualität der Haftung entscheidend. Durch gezielte Oberflächenbehandlung oder auf die Matrix abgestimmte -beschichtung der Fasern versucht man diese zu beeinflussen. Die Oberflächenbehandlung soll einerseits eine ausreichende Benetzung der Fasern mit Harz gewährleisten, die den Kraftschluss sicherstellt, andererseits soll sie die Fasern während der Verarbeitung vor Beschädigungen schützen [WEIBBACH (2007)]. Faserabhängig existieren unterschiedliche Maßnahmen zur Verbesserung der Faser-Matrix-Haftung, auf die in den Abschnitte 2.2.1 bis 2.2.4 eingegangen wird. In der Literatur wird von einer sich ausbildenden "Interphase" zwischen Faser und Matrix ausgegangen, mit der eine möglichst gute Faser-Matrix-Haftung erreicht werden soll [FLEMMING et al. (1999)]. Unterschiedliche Fasern, die "*bei der Beurteilung von Schädigungsverläufen in FVW eine große Rolle*" spielen [LÜTZE (2002)].

2.1.4 Anwendungsbeispiele von Faser-Kunststoff-Verbunden

Die Spannbreite der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Faser-Kunststoff-Verbunden sollen die im Folgenden beispielhaft aufgeführten Anwendungen aufzeigen.

Beispielsweise profitieren in CFK-Bauweise hergestellte, elektrisch beheizbare Kunststoffformen von den besonderen Eigenschaften der Verstärkungsfasern. Im Laminat eingebettete Kohlenstofffasern fungieren dabei aufgrund ihrer elektrischen Leitfähigkeit als Widerstandsleiter zur Beheizung der Formen. Ein aktuelles Forschungsbeispiel beschäftigt sich mit einem Verfahren zum Aufbau solcher beheizbarer Negativformen aus CFK, die der Herstellung von faserverstärkten Kunststoff-Bauteilen dienen. Das beheizbare Kohlenstofffasergewebe (siehe Bild 2.5) kann in Kombination mit unterschiedlichen Matrixwerkstoffen eingesetzt werden. Die kostengünstig herstellbaren CFK-Heizformen sind sehr leicht und wegen der sehr geringen Wärmekapazität energieeffizient. Aufgrund des leicht negativen thermischen Ausdehnungskoeffizienten lassen sich sogar Formen herstellen, die praktisch keinen Verzug aufweisen und somit sehr gut maßhaltig sind. Es werden hohe Aufheiz- und Abkühlraten dadurch erzielt, dass der Strom direkt am Geweberand angeschlossen wird und die Wärme in unmittelbarer Bauteilnähe eingebracht werden kann. Das Gewebe kann so Temperaturen von über 200° C erreichen. Mit solchen Formen, die im Handlaminierverfahren bzw. im Infusionsverfahren hergestellt werden, lassen sich Fertigungskosten von Kunststoffformteilen erheblich reduzieren. [FIBRETEMP (2009-ol), FUNKE (2001)]

Die Bremer Firmen Yachtwerft Meyer und Partnerunternehmen Fibretech GmbH wendeten sich mit ihrem Bestreben, eine großflächige Form zur Herstellung von Flugzeug-Innenraumpaneelen aus CFK kostengünstig beheizen zu wollen, an Prof. Dr.-Ing. Herbert Funke von der FH Dortmund. Der Grundstein für diese Verbindung wurde bereits 1996 an der Universität Paderborn mit der Studienarbeit zur elektrischen Beheizung großer Kunststoffformen über integrierte Kohlenstofffasern vom heutigen Fibretech-Geschäftsführer Jens Brandes gelegt [BRANDES/GEBAUER (1996)], die durch den damaligen wissenschaftlichen Mitarbeiter Herbert Funke betreut wurde. Die darin festgestellten Probleme mit auftretenden Kurzschlüssen und dem Verzug der großflächigen Formschale galt es diesmal in den Griff zu bekommen. Als diese Hürde genommen war, wurden in 2006 erste Innenraumpaneele gefertigt und die Erfindung des Formenbausystems Fibretemp beim Deutschen Patentamt in München zum Patent angemeldet. In Integralbauweise wird die Bauteilform mit den wärmeerzeugenden Komponenten kombiniert, sodass die Wärme dort entsteht, wo sie zum Beheizen der Bauteiloberfläche im Härtungsprozess benötigt wird. Diese Technik wird derzeit von einem Windkraftanlagenhersteller für die Fertigung faserverstärkter Komponenten für Windkraftrotoren mit einer Spannweite von 40 m und über 100 m² Oberfläche auf diese Weise zu fertigen. Die Forschung von Prof. Funke und Co. wurde auf der größten europäischen Verbundwerkstoffmesse JEC 2008 in Paris mit dem JEC-Award für Prozesstechnologie und mit dem Hochschulpreis der Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe (AVK) ausgezeichnet. [SIEBENLIST (2009)]



Bild 2.5: Kohlenstofffasergewebe mit elektrisch leitfähigen Anschlüssen [Bildquelle: FIBRE-TEMP (2009-ol)]

Weitere Anwendungsbeispiele sind die einsitzigen Formelrennwagen der FH Dortmund und der Universität Paderborn zur Teilnahme an dem vom Verein Deutscher Ingenieure (VDI) organisierten Motorsportwettbewerb "Formula Student Germany". Hingebungsvoll designen und tüfteln Studenten dafür an ihrem Rennfahrzeug. Wirtschaftlichkeitskriterien zählen dabei ebenso wie das Einwerben der Finanzierung und die Leistungskriterien des Fahrzeugs selbst. Für den ersten Boliden konstruierte das "Race-Ing" Team der FH Dortmund nach Teamgründung in 2005 ein Chassis aus GFK. Das in 2006 gegründete UPB Racing Team bestritt die Erstteilnahme mit einer Verkleidung des Formelrennwagens aus Aluminiumblechen mit Kunststoff und GFK. Mittlerweile wird bei beiden Teams bei der Außenverkleidung des Monocoques auf kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe gesetzt, und deren Einsatz vom UPB Racing Team darüber hinaus auch bei weiteren Profilteilen wie der Doppelquerlenkeraufhängung und der Airbox favorisiert. Das in Bild 2.6 gezeigte Rennteam der Universität Paderborn hat mit seinem Rennwagen "PX 209" in 2009 die erfolgreichste Rennsaison seit seinem Be-

stehen mit achtbaren Platzierungen in Silverstone (30. von 84), Hockenheim (34. von 78) und dem italienischen Varano de Meleari (22. Platz von 40 teilnehmenden Teams) abgeschlossen [WESTFÄLISCHES VOLKSBLATT PADERBORN (2009), RACE-ING. (-ol), UPBRACINGTEAM (-ol)].



Bild 2.6: Formula Student-Rennteam der Universität Paderborn mit kohlenstofffaserverstärktem Chassis sowie diversen Bauteilen in Kohlenstofffaserverbundbauweise des Rennboliden "PX 209" [Bildquelle: WESTFÄLISCHES VOLKSBLATT PADERBORN (2009)]



Bild 2.7: UL-Segelflugzeug Silence (rechts), bestehend aus leichtem, gleichzeitig stabilem Wabensandwich-Rumpf mit GFK-Deckhäuten (links) [Bildquelle: FUNKE (2000-2001)]

Seit 1957 kommen Faserverbundwerkstoffe serienmäßig im Segelflugzeugbau zum Einsatz, wo zuvor u. a. "*wichtige Pionierarbeiten"* in diesem Bereich geleistet wurde [GÖTZ (2000)].

Häufig werden faserverstärkte Kunststoffverbunde als Deckhäute in Wabensandwichbauweise verwendet, wie beispielsweise bei Ultraleicht-Segelflieger Silence, der in Bild 1.1 und Bild 2.7 zu sehen ist. Als Sandwich bezeichnet man dabei einen Dreischichtverbund, bei dem die dünnen Deckschichten von höherer Festigkeit und höherem E-Modul als die Kernschicht sind [WIEDEMANN (2007)]. So wird eine optimale räumliche Versteifung großflächiger Schalenelemente erzielt [FUNKE (2001)]. Die Kernschicht ist dabei sehr leicht und dient im Wesentlichen als Abstandshalter zwischen den Deckhäuten, die auf diese Weise weit weg von der neutralen Faser angeordnet sind, was ein günstiges Flächenträgheitsmoment und somit einen hohen Widerstand gegen Biegung, Beul- oder Knickgefahr bewirkt. Es entsteht eine stabile Schalenkonstruktion.

2.2 Verstärkungsfasern im Einsatz

Die Verstärkungsfasern übernehmen im Faser-Kunststoff-Verbund im Wesentlichen die Aufgabe, anliegende Lasten zu tragen und haben damit großen Einfluss auf dessen mechanische Eigenschaften. Dafür müssen die Fasern eine hohe Steifigkeit und Festigkeit (vgl. dazu Bild 2.8) aufweisen. Bei den Fasern werden vor allem die Eigenschaften in Faserlängsrichtung genutzt. Die Zugfestigkeiten der einzelnen Verstärkungsfasern übertreffen für sich betrachtet die der metallischen Werkstoffe, bei geringerer Dichte als bspw. der von Aluminium [MI-CHAELI et al. (1995)].



Bild 2.8: Spannungs-Dehnungs-Verhalten ausgewählter Verstärkungsfasern [R&G (2003)]

Der Leichtbaugedanke erfordert weiterhin eine geringe Dichte der Fasermaterialien [SCHÜR-MANN (2007)]. Im Wesentlichen werden diese Anforderungen in der Praxis durch organische (z.B. Aramid, Kohlenstoff) oder anorganische Stoffe (z.B. Glas, Bor) verwirklicht. Des Weiteren existieren Naturfasern (z.B. Baumwolle, Hanf, Sisal) und Metallfasern (z.B. Stahl, Aluminium). [SCHÜRMANN (2007)]

Ein Grund für die Verwendung eines Werkstoffs in Faserform ergibt sich aus dem so genannten **Paradoxon der Faserform** von A. A. GRIFFITH (1920), welches besagt: "*Ein Werkstoff in Faserform hat eine vielfach höhere Festigkeit als das gleiche Material in kompakter Form,*

Q
und je dünner die Faser ist, um so größer ist ihre Festigkeit." Je größer das Faservolumen ist, desto größer ist statistisch gesehen die Anzahl festigkeitsreduzierender Fehlstellen. Eine dünne Faser mit entsprechend wenig Volumen weist daher weniger dieser Defekte auf als derselbe Werkstoff in dickerer Form. Dieses Phänomen ist daher ebenso als **Größeneffekt** bekannt. Aufgrund der kleinen Faserdurchmesser reduziert sich darüber hinaus auch die Größe der Fehlstellen selbst [EHRENSTEIN (2006), SCHÜRMANN (2007)]. FLEMMING/ROTH (2003) weisen in dem Zusammenhang auf Anhaltspunkte hin, "dass nicht nur die Zugfestigkeit mit abnehmendem Faserdurchmesser zunimmt, sondern auch der E-Modul".

Des Weiteren haben Fertigungsverfahren von Fasern großen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. Beim Verstrecken der Fasern während der Herstellung werden die stärksten atomaren Bindungen in Faserlängsrichtung ausgerichtet und bewirken eine höhere Steifigkeit und Festigkeit. Darüber hinaus orientieren sich die Fehlstellen (z. B. Hohlräume) in Längsrichtung der Faser und werden gelängt und abgeplattet. Bild 2.9 veranschaulicht auf der linken Seite, dass quer zur Faserlängsrichtung orientierte Hohlräume starke Spannungsüberhöhungen bewirken, wohingegen längs orientierte Fehlstellen die Kerbwirkung vermindern, wie rechts in Bild 2.9 dargestellt. Eine weniger scharfe Kerbe hat auch geringere Spannungsüberhöhungen und damit geringere Festigkeitseinbußen zu Folge [SCHÜRMANN (2007)].



Bild 2.9: Einfluss der Faserherstellung auf die Kerbwirkung von Fehlstellen [SCHÜRMANN (2007)]

Dünne Fasern weisen in einem Faser-Kunststoff-Verbund einen weiteren Vorteil auf: Aufgrund des geringen Durchmessers besitzen sie ein ideales Volumen/Oberflächen-Verhältnis. Dadurch steht mehr Haftfläche zwischen Faser und Matrixwerkstoff zur Verfügung als bei einem Werkstoff in kompakter Form und die Kräfte können besser übertragen werden [MO-SER (1992)].

In der vorliegenden Arbeit wurden experimentelle Untersuchungen anhand von glas-, aramidund kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffverbunden durchgeführt [KOKE (2005), DAU (2006) und (2007), TOMBERS (2008)]. Die hier zu Grunde liegenden drei Faserarten (Bild 2.10) haben sich etabliert, wenn es um die Anwendung besonders beanspruchter Leichtbauwerkstoffe geht [SCHÜRMANN (2007)]. ZIEGMANN (1996) zufolge sind Glas-, Aramid- und Kohlenstofffasern heutzutage die bedeutendsten am Markt erhältlichen Verstärkungsfasern. Des Weiteren wurden Versuche mit basaltfaserverstärkten Kunststoffen vorgenommen, da diese aufgrund von ähnlichem Materialverhalten und Preis mit den glasfaserverstärkten Kunststoffen konkurrieren [KAMENNY VEK (2009-ol)].



17

Bild 2.10: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der gebräuchlichsten Verstärkungsfasern [SCHÜRMANN (2007)]

Vergleich der Verstärkungseigenschaften

In der nun folgenden Tabelle 2.1 werden die Eigenschaften der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Verstärkungsfasern, bezogen von der Fa. R&G Faserverbundwerkstoffe, Waldenbuch, gegenübergestellt. In den nachfolgenden Abschnitten 2.2.1 bis 2.2.4 wird auf diese Faserwerkstoffe näher eingegangen. Die Angaben ohne Zusatz in Tabelle 2.1 korrespondieren mit den für die Vergleichsberechnung genutzten und in der Software hinterlegten Daten. Der Vermerk Stern (*) kennzeichnet Lieferantenangaben, die Raute (#) weist zum Vergleich herangezogene Literaturangaben aus. Dabei fällt jedoch auf, dass die vergleichende Literatur durchaus abweichende Elementarkenndaten bereithält. Später werden mögliche Abweichungen zwischen experimentellen und den zu Prognosezwecken berechneten Faser-Kunststoff-Verbundkennwerten auf dieser Basis zu diskutieren sein.

Durch Nachrechnen mit den in Tabelle 2.1 angegebenen Werten für Elastizitätsmodul, Querkontraktionszahl und Schubmodul stellt man sofort fest, dass die aus der elementaren Festigkeitslehre bekannte Beziehung $G = E/(2(1+\nu))$ für Kohlenstoff- und Aramidfaser nicht erfüllt ist. Dies ist auch nicht weiter verwunderlich, denn wie man in der Tabelle sieht, gibt es in Längs- und Querrichtung unterschiedliche E-Moduln. Diese Fasern sind also höchstgradig anisotrop. WURTINGER (1977) stellt in diesem Zusammenhang fest: "Da für die Kohlenstofffaser als anisotroper Werkstoff nicht mehr die für isotrope Werkstoffe gültige Beziehung zwischen Schubmodul und E-Modul $G = E/(2(1+\nu))$ gilt, können auch nicht die üblichen Formeln zum Berechnen des Schubmoduls eines Verbundes längs und quer zur Faserrichtung G_{12} herangezogen werden." Allerdings ist diese einfache Beziehung auch im Falle der isotropen Glasfaser nicht erfüllt und man fragt sich warum. Eine mögliche Antwort hierauf könnte sein, dass E-Modul und Schubmodul nicht aus einander über die Querkontraktionszahl berechnet wurden, sondern beide in unabhängigen Messungen ermittelt wurden.

Eigenschaft	Einheit	E-Glas	Aramid HM	C-Faser HT	Basalt
E-Modul längs $E_{F1} := E_F$ (Young's modulus longitudinal)	GPa	73	120 130 ^{#)}	235 230 ^{#)}	89 ^{*)} 85-95 ^{**)}
E-Modul quer E_{F2} (Young's modulus transverse)	GPa	73	5,4	15 28 ^{#)}	
Schubmodul $G_{F12} := G_F$ (shear modulus)	GPa	10 29,92 ^{#)}	17 1,45 ^{#)}	30 50 ^{#)}	21,76 ^{##)}
Querkontraktion ⁴ $V_{F21} := V_F$	-	0,1 0,22 ^{#)}	0,1 0,32 ^{#)}	0,1 0,23 ^{#)}	
Dichte ⁵ (fiber density)	g/cm ³ (20°C)	2,6	1,45	1,78	2,75 ^{*)} 2,67 ^{**)}
Zugfestigkeit (Tensile strength)	MPa	3400	2900	3400	4840 ^{*)} 2700-3200 ^{**)}
Druckfestigkeit (Compressive strength)	MPa	3033 ^{*)}			3792 ^{*)}
Bruchdehnung (Elongation at break)	%	3,5 4,7 ^{*)}	1,9 2,8 ^{***)}	1,4	3,15*)
Wärmeausdehnungs- koeffizient längs	10 ⁻⁶ /K	5	-4,13,5	-0,1	
Wärmeausdehnungs- koeffizient quer	10 ⁻⁶ /K	5	17	10	
Wärmeleitfähigkeit	W/mK	1	0,04 0,05	17	
Spez. elektrischer Widerstand	Ohm/cm (20 °C)	10 ¹⁵	10 ¹⁵	10^{-4} 10^{-3}	
Feuchtigkeitsaufnahme	% (20 °C, 65 % rel. Feuchte)	0,1	3,5	0,1	

⁴ Die **Querkontraktionszahl** von Glasfaser beträgt gem. KAW (2006) 0,2; für Kohlenstofffaser 0,3 (=Axial POISSON's ratio) bzw. 0,35 (=Transverse POISSONS's ratio) und Aramidfaser 0,36 (axial) bzw. 0,37 (transversal). R&G (2009a) weist für die Querkontraktionszahl von Glasfaser 0,18 aus.

⁵ Die Angaben über **Faserdichten** variieren in der Literatur. Die verwendeten Angaben in Tabelle 2.1 und Tabelle 2.5 entstammen der Fachliteratur des Lieferanten [R&G (2003), R&G (2008)] und korrespondieren mit den hinterlegten Daten von Software-Tool Lami*Cens* [FUNKE (2005c), siehe auch Abschnitt 3.8.1]. E-Glas wird gelegentlich mit 2,55 g/cm³ Dichte angegeben [FLEMMING et al. (1995), KICKERT (1988)]. Kohlefasern bewegen sich in einem Fenster von 1,7 bis 1,9 g/cm³; Fa. Tenax GmbH, Wuppertal, gibt für ihre HTA-Fasern 1,77 g/cm³ an [CARLSSON/PIPES (1989), R&G (2003), KICKERT (1988)]. Für Aramidfasern finden sich Dichten von 1,4 bis 1,5 g/cm³, die Angaben verdichten sich jedoch für Hochmodul-Aramidfasern bei 1,45 g/cm³. MILITKY/KOVACIC (1996) weisen für Basaltfasern eine Dichte von 2,733 g/cm³ aus, VAN DE VELDE et al. (2003) fassen diese weiter mit 2,2 bis 2,8 g/cm³.

Q

2.2.1 Glasfasern

Die Glasfaser ist die am längsten bekannte synthetische Verstärkungsfaser. Bereits vor etwa 3500 Jahren zogen Ägypter erste Glasfäden, schildert SCHÜRMANN (2007). FLEMMING et al. (1995) zufolge entdeckten die Chinesen die Glasfasern in der Han-Dynastie (200-220 n. Chr.). Die industrielle Herstellung dieses Werkstoffs beginnt erst viel später im Jahr 1912. Noch heute sind Glasfasern die am häufigsten verwendeten Verstärkungsfasern für Kunststoffe.

Zur Herstellung von Glasfasern wird geschmolzenes Glas auseinandergezogen und zu langen, dünnen Fäden versponnen [FITZER (1985)], die dann in einem weiteren Verfahrensschritt zu Spinnfäden, den sog. Rovings, gebündelt werden. Das Ziehen von Glas zu feinen Fasern bewirkt, dass es sein sprödes Verhalten verliert und die Festigkeit gegenüber normalem monolithischem Glas deutlich zunimmt [FLEMMING et al. (1995)]. Näheres zum Herstellungsverfahren kann bei MICHAELI/WEGENER (1990) nachgelesen werden.

Der Hauptbestandteil der Glasfaser ist Quarz (SiO₂). Bedingt durch die starken kovalenten Bindungen zwischen Silizium und Sauerstoff ergibt sich die hohe Festigkeit der Faser. Es existieren unterschiedliche Arten von Glasfasern, die sich in ihrer Zusammensetzung durch Typ und Anteil von Metalloxiden wie z.B. Na₂O, K₂O, MgO, PbO, B₂O₃ und Al₂O₃ unterscheiden, durch deren definierte Zugabe sich die Eigenschaften des Materials weiter verändern lassen. Die Atome bilden ein dreidimensionales Netz mit amorpher (ungeordneter) Struktur, wodurch Glasfasern im Gegensatz zu Kohlenstoff- und Aramidfasern isotrope Werkstoffeigenschaften aufweisen. [FLEMMING et al. (1995), MICHAELI/WEGENER (1990)]

Unter den verschiedenen Glasfaserarten ist der Einsatz der preiswerten E-Glasfaser zur Verstärkung von Kunststoffen mit einem Marktanteil von ca. 90 % am weitesten verbreitet [EH-RENSTEIN (2006)]. Sie wurde ursprünglich für den elektrischen Einsatz entwickelt, was auch die Abkürzung "E" erklärt, da sie einen sehr guten elektrischen Isolator verkörpert [MICHAE-LI/WEGENER (1990)]. Verstärkungsfasern aus E-Glas sind vielseitig einsetzbar, da sie eine hohe Beständigkeit gegenüber Witterungseinflüssen und Chemikalien sowie gute dielektrische Eigenschaften aufweisen [R&G (2008)]. Dem E-Glas stehen die erheblich teurere, aber weniger verwendete R/S-Glasfaser (R = franz.: résistance / S = engl.: strength) mit höherer Festigkeit und die sich durch einen höheren Modul auszeichnende M-Glasfaser gegenüber [MICHAELI/WEGENER (1990)]. Neben dem finanziellen Aspekt hängt die Häufigkeit der Verwendung sicherlich auch damit zusammen, dass die meisten textilen Faserflächengebilde wie Gewebe und Gelege (vgl. Abschnitt 2.2.6) ausschließlich aus E-Glas erhältlich sind. Beispielsweise liefert die Fa. R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH in Waldenbuch, die freundlicherweise die im Rahmen dieser Arbeit geprüften Fasern (und Harzsysteme) zur Verfügung gestellt hat, ausschließlich E-Glasprodukte ab Lager. Nähere Informationen zu den untersuchten Faserwerkstoffen können Tabelle 2.1 und Tabelle 2.4 entnommen werden.

Glasfasern weisen eine hohe Bruchdehnung in Faserlängsrichtung auf. Die Festigkeit Eglasfaserverstärkter Bauteile ist gem. R&G (2008) – bei geringerer Masse und günstigerem Preis – der von Metallen vergleichbar. Aufgrund des vergleichsweise niedrigen Elastizitätsmoduls ist der Werkstoff allerdings weniger für schlanke Biegestrukturen (z. B. Tragflügel eines Flugzeugs mit großer Spannweite) geeignet. Durch die Einbettung der Fasern in eine Kunststoffmatrix wird die Steifigkeit (noch) weiter herabgesetzt. Der geringe E-Modul in Verbindung mit einer großen linear-elastischen Verformbarkeit macht einen Glasfaser-

R

Kunststoff-Verbund jedoch zu einem idealen Federwerkstoff (Eignung z. B. für Blattfedern). So werden parallel angeordnete Glasfasern im Kunststoffverbund zur Aussteifung von Profilen verwendet, wie bspw. bei Sportpfeilen für das Bogenschießen; der niedrige E-Modul sorgt dabei für die benötigte Flexibilität des Profils [WIKIPEDIA (2009-ol)]. In der Herstellung von Verbundbauteilen bietet eine geringe Steifigkeit den Vorteil, dass sich die Fasern gut um enge Radien drapieren lassen. [SCHÜRMANN (2007)]

Die Leistungsgrenze von Glas als Verstärkungsfaser liegt also im Wesentlichen in seinem geringen E-Modul begründet [FLEMMING et al. (1999)], vgl. dazu Bild 2.8. Durch die Entwicklung verschiedener Spezialglasfasern mit höheren Festigkeiten und Steifigkeiten (Rbzw. S-Glas) war das Potenzial des Werkstoffs Glas nahezu ausgeschöpft. Und weil mit multidirektionalem GFK gegenüber Stahl oder Aluminium keine erheblichen Gewichtseinsparungen möglich sind, bestand Ende der sechziger Jahre FLEMMING et al. (1999) und HEIBLER (1977) zufolge die Notwendigkeit, den Entwicklungsfokus auf andere Fasertypen zu richten, mit denen noch bessere mechanische Eigenschaften erzielt werden können. Unter diesen Fasertypen wird den Kohlenstoff- und Aramidfasern, die im Folgenden diskutiert werden, eine besondere Bedeutung beigemessen.

Oberflächenbehandlung der Fasern – Haftung zur Matrix

Glasfasern werden überwiegend in Form von Faserhalbzeugen wie Geweben oder Vliesen verarbeitet (siehe Abschnitt 2.2.6). Beim Webvorgang werden die Fasern zu ihrem Schutz mit Textilschlichte benetzt, um sie vor Abrasion zu schützen und sie geschmeidiger zu machen. Diese besteht i.d.R. aus Stärke und Ölen. Negativer Effekt dieser Schutzfunktion ist jedoch, dass die Textilschlichte später im Verbund, insbesondere unter Feuchtigkeitsaufnahme, einer angestrebten guten Haftung zwischen Faser und Matrix entgegenwirkt. Faserwerkstoffe, die in Kunststoffmatrix eingebettet werden sollen, müssen aus diesem Grunde vor einer Weiterverarbeitung durch einen thermischen Prozess entschlichtet werden. Um die Haftung zwischen Verstärkungsfasern und Matrix zu optimieren, kommen spezielle Haftvermittler (meistens modifizierte Silane, die auf den Matrixwerkstoff abgestimmt sind) zum Einsatz. Diese Beschichtung, die auch als Finish bezeichnet wird, hat entscheidenden Einfluss auf Durchtränkung und Benetzung der Fasern mit Matrixmaterial und sorgt somit für eine möglichst feste chemische Verbindung mit dem Harz, denn letztendlich hängt die Qualität eines Faserverbundkunststoffes von der Haftung des Harzes auf den Fasern ab. [NEITZEL/BREUER (1997), EHRENSTEIN (2006), FUNKE (2001)] Einen Kompromiss zwischen aufwändig in der Nachbearbeitung gefinishten und mit Textilschlichte versehenen Faserhalbzeugen stellt der Einsatz einer Silanschlichte dar, die sowohl Schmierfähigkeit zum Schutz der Fasern beim Weben als auch haftungsvermittelnde Eigenschaften besitzt [R&G (2003)]. Die etwas preiswertere Silanschlichte verursacht jedoch eine vergleichsweise schlechtere mechanische Haftung, da sich Glasfasern mit Silanschlichte schlechter durchtränken lassen, was eine geringere Festigkeit zur Folge hat. Laut FUNKE (2001) werden für hochbeanspruchte Bauteile ausschließlich gefinishte Glasgewebe verwendet. Die in dieser Arbeit verwendeten E-Glasfasern sind ebenfalls gefinisht.

Q

2.2.2 Kohlenstofffasern

NIEDERSTADT et al. (1985) beschreiben die Werkstoffgruppe der kohlenstofffaserverstärkten Polymere als "die konsequente Weiterentwicklung der Glasfaserkunststoffe, da sie höhere Festigkeiten erreichen oder erheblich steifer sein können, dank verbesserter Matrices zur Erschließung neuer Anwendungsbereiche dienen und somit grundlegend für den Sektor der ,High-Tech'-Anwendungen sind." Die Herstellung von Kohlenstofffasern (kurz: C-Fasern von engl. carbon) beginnt schon ca. 1880 mittels Pyrolyse⁶ von pflanzlichen Stoffen (Baumwollgarnen, Bambusfasern). EDISON und SWAN nutzen diese Kohlenstofffasern als Glühfäden in Glühlampen [FLEMMING et al. (1995)]. Für den Einsatz als Verstärkungsfaser wird die C-Faser erst Ende der 50er Jahre als geeignete Alternative zur Glasfaser interessant, die für viele Anwendungen eine zu geringe Steifigkeit aufweist [ROSE (1977), SCHÜRMANN (2007)]. Die Luftfahrtindustrie forciert diese Entwicklung maßgeblich [FLEMMING et al. (1995)], sodass sie für das Einsatzgebiet als Verstärkungsfaser seit Mitte der 70er Jahre industriell produziert wird [FUNKE (2001)]. Die bereits früher verfügbaren Borfasern zeichnet, ebenso wie Kohlenstofffasern, eine hohe Festigkeit und Steifigkeit bei gleichzeitig geringer Dichte aus. Wegen ihres großen Faserdurchmessers (ca. 50 µm) sind sie jedoch schlecht verarbeitbar und wurden fast vollständig durch die Kohlenstofffaser, die einen Durchmesser von nur 5 bis 8 Mikrometer aufweist (vgl. Bild 2.10), verdrängt [SCHÜRMANN (2007)].

C-Fasern sind aus einzelnen Graphitschichten aufgebaut [FLEMMING et al. (1995)]. Den schematischen Aufbau der Elementarzelle von Graphit veranschaulicht das Bild 2.12 auf der linken Seite. Der strukturelle Faseraufbau bedingt sowohl bei der Kohlenstoff- als auch der Aramidfaser ein stark anisotropes Verhalten; quer zur Faserlängsachse weisen die charakteristischen Eigenschaften wesentlich kleinere Werte auf als parallel dazu [HEIBLER (1977)]. Starke kovalente Bindungen sind für die hohe Steifigkeit und Festigkeit in Richtung der Faserachse verantwortlich. In Faserquerrichtung liegen schwache van-der-Waals-Bindungen vor, was die geringe Quersteifigkeit der C-Faser bewirkt [SCHÜRMANN (2007).

Am weitesten verbreitet ist die hochfeste HT-Kohlenstofffaser, die vergleichsweise preiswert gegenüber der bei höheren Temperaturen geglühten Hochmodulfaser (HM) ist [FUNKE (2001)]. HT-Fasern waren als erste am Markt erhältlich und gelten als Standardfasern [MI-CHAELI/WEGENER (1990)]. Als Ausgangsmaterial der HT-Faser dient Polyacrylnitril (PAN), aus dem über 90 % der heute gebräuchlichen C-Hochleistungsfasern hergestellt werden, da es eine hohe Kohlenstoffausbeute (ca. 55 Gew.-%) ermöglicht und sich von allen Ausgangsmaterialien am wirtschaftlichsten verarbeiten lässt [SCHÜRMANN (2007), NEITZEL/BREUER (1997)]. Bei den in dieser Arbeit getesteten Fasern handelt es sich um HT-Fasern auf PAN-Basis [R&G (2003)]. Bild 2.11 zeigt ein Modell des anisotropen Aufbaus einer HM-C-Faser auf ex-PAN-Basis von BARNET und NORR (1974), dessen Querschnitt unterschiedliche Bereiche (Kern und Ummantelung) aufweist. Danach ist die Oberfläche der am meisten orientierte Teil der Faser, deren Struktur durch sich durchziehende sog. "Bänder" (engl. "Ribbons") gekennzeichnet ist. Die konkrete Beschreibung der unterschiedlichen Ausgangsmaterialien und Herstellprozesse (mit den Schritten Stabilisierung, Carbonisierung, Graphitisierung und anschließender Oberflächenbehandlung), die elementaren Einfluss auf die späteren mechanischen Eigenschaften der C-Fasern haben, kann z. B. in FLEMMING et al. (1995), SCHÜRMANN

⁶ Pyrolyse: thermische Aufspaltung chemischer Verbindungen [RÖMPP (1995)]

(2007) oder MICHAELI/WEGENER (1990) nachvollzogen werden. Durch eine Verstreckung (= Anlegen einer Zugspannung) während der Herstellung kann die Orientierung der Graphitschichten parallel zur Faserachse verbessert und damit der E-Modul erhöht werden [SCHÜR-MANN (2007)]. C-Fasern zeigen ein progressives Spannungs-Dehnungs-Verhalten. Die zunehmende Ausrichtung der Graphitschichten durch die aufgeprägte Zugspannung bewirkt eine Steifigkeitszunahme um ca. 10 % [SCHÜRMANN (2007)].



Bild 2.11: Modell einer HM PAN-Faser [Bildquelle: KALNIN/JÄGER (1985)]

Wesentliches Merkmal der C-Faser ist die hohe Zugfestigkeit, die jedoch von einer geringen Bruchdehnung begleitet wird. Weiterhin ist die hohe Ermüdungsfestigkeit (nahezu dauerschwingfest) zu erwähnen, weshalb die dynamischen Eigenschaften von CFK besser sind als z. B. die von Aluminium [EHRENSTEIN (2006)]. Die Kohlenstofffaser charakterisiert ferner ein – wenn auch sehr geringer – negativer Wärmeausdehnungskoeffizient in Faserlängsrichtung neben der thermischen und elektrischen Leitfähigkeit (siehe auch Abschnitt 2.1.4 zur Nutzungsmöglichkeit dieser Charakteristik). Im Gegensatz dazu sind Glas- und Aramidfasern elektrische Isolatoren. Dem Nachteil der geringen Schlagzähigkeit wird häufig begegnet, indem C-Fasern als Hybridwerkstoff z. B. in Verbindung mit Aramidfasern zum Einsatz kommen. Im Vergleich zu einer reinen CFK-Konstruktion erhöht sich die Schlagzähigkeit und gegenüber einer reinen AFK-Konstruktion erhöhen sich die Steifigkeit und die Druckfestigkeit. [MICHAELI/WEGENER (1990)]

Kohlenstofffasern sind im Vergleich zu Glasfasern immer noch recht teuer, sie werden daher vor allem in der Luft- und Raumfahrt (vor allem die Spezialfasern z. B. mit höherem E-Modul), sowie im Hochleistungssport (z. B. Motorsport), eingesetzt. Betrachtet man jedoch die gewichtsbezogenen Eigenschaften, so verschiebt sich das Verhältnis zugunsten der Koh-

lenstofffasern. Die Anwendungsbereiche erstrecken sich mittlerweile auch auf Sportartikel oder den Boots- und Yachtbau. [MICHAELI/WEGENER (1990)]

Oberflächenbehandlung der Fasern – Haftung zur Matrix

Während der Verarbeitung zum Verbundwerkstoff ist zu beachten, dass die C-Fasern sehr spröde und knickempfindlich sind [EHRENSTEIN (2006)]. Aufgrund ihrer Empfindlichkeit ist insbesondere im Naßverfahren (vgl. Abschnitt 2.4.1) Sorge zu tragen, dass die C-Fasern nicht beschädigt werden. Aus diesem Grund sind die Hersteller von C-Fasern dazu übergegangen, die Rovings mit einer für Epoxid- und Polyesterharze geeigneten (Kunststoff-) Schlichte (Faserfinish), vorwiegend auf der Basis desselben Harzes, auszustatten. [HEIBLER (1977)] Sie bewirkt neben einer Haftverbesserung eine Imprägnierung der Faser und erleichtert die Herstellung [EHRENSTEIN (2006)]. Zur Verbesserung der Haftung kann die Oberfläche der C-Faser nach ihrer Herstellung durch chemische oder physikalische Verfahren behandelt werden [MICHAELI/WEGENER (1990)]. Dadurch lassen sich Kohlenstofffasern gut mit Epoxidharz benetzen, was zu einer sehr guten Haftung zwischen Matrix und Faser führt.



Bild 2.12: Links: Elementarzelle eines Graphitkristalls (Idealstruktur) [SCHÜRMANN (2007), EH-RENSTEIN (2006)], rechts: Aufbau von Aramidfasern [MICHAELI/WEGENER (1990), NEIT-ZEL/BREUER (1997)]

2.2.3 Aramidfasern

Aramid steht gleichbedeutend für alle **ar**omatischen Poly**amid**e, die in Faserform als "organische Hochleistungschemiefasern" gelten. Im Wesentlichen entwickelte sie die Firma DuPont zu Beginn der 50er Jahre, deren Bestrebungen in Verbindung mit weiteren Forschungsergebnissen 1969 in die Marktreife der ersten Hochleistungsaramidfaser mündeten. DuPont brachte

23



1972 eine Faser aus PPTA (**p**oly-**p**henylene **t**erephthal**a**mid) unter dem Markennamen Kevlar[®] heraus. Von dem Typ sind auch heute noch die wichtigsten handelsüblichen Aramidfasern, so ist man sich in der wissenschaftlichen Literatur einig. Der Name Kevlar[®] ist vielerorts geläufiger als die Bezeichnung Aramid und wird stellenweise synonym dafür verwendet [SCHÜRMANN (2007)]. Weitere, wenn auch weniger bekannte Handelsnamen sind Twaron[®] (Firma Enka, Europa) und Technora[®] (Firma Teijin, Japan). [FLEMMING et al. (1995)]

Mit dem Ausgangsmaterial PPTA lässt sich die gestreckte Polymerkettenanordnung einfacher realisieren als mit den übrigen Aramidpolymeren. Obendrein sind die Molekülketten in ihrer Drehung um die Bindungsachse eingeschränkt, sodass sie sich nicht falten können, was eine *"stabförmige*" Ausrichtung bewirkt. Dadurch weist die Faser selbst anisotropes Werkstoffverhalten auf, da sie sich unterschiedlich in Faserlängs- und -querrichtung verhält. Bedingt durch kovalente Atombindungen in Faserrichtung und Wasserstoffbrückenbindungen in Faserquerrichtung zwischen den Polymerketten wird bei hoher Packungsdichte die hohe axiale Zugfestigkeit der Faser auf Basis der PPTA-Moleküle erzielt, wie Bild 2.12 auf der rechten Seite schematisch zeigt. [FLEMMING et al. (1995)] Die schwächeren Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Polymerketten sind aber auch Ursache für die geringe Festigkeit der Faser in Querrichtung [EHRENSTEIN (2006)]. Je mehr die Kettenmoleküle in Richtung der Faserachse orientiert sind, desto höher sind Festigkeit und Steifigkeit in Faserrichtung [SCHÜRMANN (2007)].

Aramidfasern werden charakterisiert durch ihre hohe Zugfestigkeit bei gleichzeitig geringer Dichte sowie ihre bemerkenswerte Zähigkeit [MICHAELI/WEGENER (1990), SCHÜRMANN (2007)]. Darüber hinaus weisen die Fasern einen hohen Elastizitätsmodul bei guter thermischer Beständigkeit auf und sind nicht spröde. "*Aufgrund ihrer polymeren Molekularstruktur sind Aramidfasern sehr duktil und damit auch zäh*", was sie für den Einsatz bei "*ballistischen Problemen und Anwendungen im Schnittschutzbereich*" prädestiniert. [FLEMMING et al. (1995)] Trockene, somit nicht in vorgetränkter Form vorliegende, Aramid-Rovings sind wesentlich unempfindlicher als C-Fasern, und können daher auch im Naßwickelverfahren problemlos verarbeitet werden. [HEIBLER (1977)]

Es gibt im Wesentlichen zwei Aramidfasertypen, die sich vorwiegend in ihrem Steifigkeitsund Bruchdehnungsverhalten unterscheiden [EHRENSTEIN (2006)]. Einerseits sind das hochzähe Niedrigmodulfasern mit geringem E-Modul und hoher Bruchdehnung, die wegen ihres hohen Arbeitsaufnahmevermögens⁷ auch als High-Energy-Fasern (HE) bezeichnet werden. Sie finden Verwendung für den ballistischen Schutz (z. B. schusssichere Westen), ferner für stoßbeanspruchte Teile wie Schutzplatten (ballistische Hartlaminate). [MICHAELI/WEGENER (1990)]. Andererseits gibt es Hochmodulfasern mit großer Steifigkeit, aber dafür geringerer Bruchdehnung. Sie werden vorwiegend in Faser-Kunststoff-Verbunden eingesetzt, die in der Fahrzeug- oder Flugzeugindustrie zum Einsatz kommen, und als solche auch im Rahmen dieser Arbeit untersucht (siehe Tabelle 2.1 und Tabelle 2.4) [R&G (2003)]. Bild 2.13 stellt exemplarisch das Spannungs-Dehnungs-Verhalten beider Faserarten im Verbund gegenüber.

⁷ Diese Eigenschaft zeichnet Werkstoffe aus, die bei hoher Bruchdehnung gleichzeitig hohe Zugspannungen ertragen können [MICHAELI/WEGENER (1990)].

Nachteilig an Aramidfasern ist, dass sie eine niedrige Druckfestigkeit in Faserrichtung besitzen, was aus Bild 2.13 deutlich hervorgeht, und sich daher wenig für Bauteile eignen, die auf Druck belastet werden oder einer dynamischen Belastung unterliegen [HEIBLER (1977)]. Mehrfache Belastungen der Faser im Druckbereich haben sogar eine Verringerung der Zugfestigkeit zur Folge [SCHÜRMANN (2007)]. Daher werden die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten zyklischen Versuche schwellend unter Zuglast durchgeführt, um die geschilderte Problematik zu umgehen.



Bild 2.13: Vergleich des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens hochsteifer und hochzäher Aramidfasern [EHRENSTEIN (2006)] (auch: [FLEMMING et al. (1995)])

Die bereits erwähnte Zähigkeit von Aramidfasern "wirkt sich… negativ bei der mechanischen (Nach-) Bearbeitung von Aramidfasern und deren Laminaten aus", was den Einsatz von Spezialwerkzeugen erfordert. Im Ergebnis sehen die "Schnittkanten… leicht ausgefranst (aus) und bei Laminaten kann es zu Delaminationen kommen." [FLEMMING et al. (1995)] Bei der Weiterverarbeitung von aramidfaserverstärkten Kunststoffen ist des Weiteren zu beachten, dass die Fasern Feuchtigkeit aufnehmen. Dieses hygroskopische Verhalten beeinflusst zum einen die Festigkeit der Faser, zum anderen verschlechtert es die Haftung zwischen Faser und Matrix [EHRENSTEIN (2006)]. Darüber hinaus sind die Fasern vor UV-Licht zu schützen, da dieses eine erhebliche Verschlechterung der Festigkeit zur Folge hat. FLEMMING et al. (1995) beschreiben einen Versuch, in dem Aramidfasern über einen Zeitraum von 200 Tagen einer natürlichen Belichtung und Bewetterung ausgesetzt wurden. Die Restfestigkeit betrug anschließend noch 50 % der ursprünglichen Festigkeit. Die UV-Einwirkung ist bei Laminaten an einer bräunlichen Verfärbung zu erkennen.

Aramidfasern kommen nicht ausschließlich, wie bei den experimentellen Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit, als Verstärkungsfasern in Faserverbundkunststoffen zum Einsatz. Lediglich ein Bruchteil der insgesamt produzierten Fasern (zwei Prozent von ca. 37.000 t Fasern im Jahr 2002) dient als Verstärkungsfaser in festen Bauteilen [EHRENSTEIN (2006)]. Der Großteil der Weltproduktion wird in textiler Form als Verstärkung von Gummireifen, in Bremsbelägen, Keil- und Zahnriemen, Tauen oder Hydraulikschläuchen ohne Matrixsystem verwendet [SCHÜRMANN (2007)]. Schusssichere Westen (s. o.) oder Schnittschutzhandschuhe z. B. für den Shrimpfang sind mit diesen Fasern armiert. Ebenso werden die Fasern genutzt,



Oberflächenbehandlung der Fasern – Haftung zur Matrix

Die Haftung zwischen der glatten Struktur der Aramidfaser und einem Kunststoff ist grundsätzlich schlecht. Die Oberflächenbehandlung erfolgt in erster Linie mit dem Ziel der besseren Verarbeitbarkeit. Das Aufbringen einer Webschlichte (Avivage) dient zum Schutz der Faser, ohne jedoch die Haftung zur Matrix zu verbessern [MICHAELI/WEGENER (1990)]. Da die Haftung zu Epoxidharzen aber für viele Anwendungen ausreichend ist, werden selten chemische Haftvermittler eingesetzt. Bei Fasern, die in Spezialanwendungen zum Einsatz kommen, wird die Schlichte allerdings durch Lösungsmittel (Wasser) wieder entfernt. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Haftung faserseitig zu verbessern, indem die Faseroberfläche z. B. durch eine Elektronenbestrahlung verändert wird [EHRENSTEIN (2006)].

2.2.4 Basaltfasern

Basaltfasern werden aus vulkanischem Basaltgestein hergestellt und ihr Hauptbestandteil ist – wie auch bei Glasfasern – Quarz (SiO₂). Die Herstellung erfolgt durch Zerstoßen des schwarzen, basischen Lavagesteins, Aufschmelzen und anschließendes Spinnen zu feinen goldbraunen Fasern bei etwa 1500 °C [VAN DE VELDE et al. (2003)]. Aufgrund ihrer schwarzen Färbung sind die Basaltfasern, insbesondere im fertigen Laminat, kaum von Kohlenstofffasern zu unterscheiden. [SCHÜRMANN (2007)] Die Farbe von Basalt reicht nach MILITKY/KOVACIC (1996) in Abhängigkeit vom Eisenoxid-Anteil (FeO) von braun bis zu gräulichem grün. PAV-LOVSKI et al. (2007) zufolge wurden die ersten Versuche, Basaltfilamente aus der Schmelze herzustellen, zuerst 1923 in den USA gemacht. Die Technologie, aus diesem Gestein ein endloses Filament zu produzieren, wurde bereits vor mehr als 30 Jahren in der ehemaligen Sow-jetunion entwickelt, ist jedoch erst heute für kommerzielle Zwecke verfügbar [R&G (2008)].

Die Fasern aus Lavagestein stellen eine ernstzunehmende Konkurrenz zu Glasfasern dar, da sie im Vergleich zu E-Glasfasern eine um 15-20 % höhere Zugfestigkeit, Druckfestigkeit und Steifigkeit (E-Modul) bei nur geringfügig höherer Dichte besitzen. Darüber hinaus zeichnen sich die Basaltfasern durch eine außerordentlich hohe Temperaturbeständigkeit (Schmelztemperatur ca. 1450 °C) aus, zeigen eine geringe Feuchtigkeitsaufnahme, sind chemisch (gegen starke Säuren und Laugen sowie Lösemittel) und auch gegen UV-Licht beständig. Mit diesen Eigenschaften erweisen sie sich als adäquat zu Spezialglasfasern wie beispielsweise dem S-Glas. Nicht zuletzt bieten Basaltfasern den Vorteil, ungiftig und nicht karzinogen zu sein, weshalb sie als umweltfreundlich eingestuft werden. [KAMENNY VEK (2009-ol)] Gemäß R&G (2008) sind die zu 100 % natürlichen Basaltfasern "gegen biologische Einwirkungen und Korrosion… sozusagen von Natur aus geschützt". Sie sind geeignet für die Verarbeitung mit Epoxid-, Vinylester- und Polyesterharzen.

Die Anwendungsgebiete für Basalt-Verstärkungsfasern erstrecken sich von der Baubranche über die Automobilindustrie, den Modellbau und Motorsport bis hin zu Schiffsbau und Windkraftanlagen [R&G (2008)].

27

Q

Die Basaltfasern der im Rahmen dieser Arbeit experimentell untersuchten Gewebe stammen gemäß Lieferantenauskunft [OTT (2009)] ausschließlich von der russischen Fa. KAMENNY VEK (2009-ol) mit Sitz in der Nähe von Moskau, die dem Verbundwerkstofflieferanten leider nur sehr wenige Werkstoffkenndaten zu den Faserhalbzeugen aus Basalt zur Verfügung stellt. Und – schlimmer noch für eine rechnerische Vorhersage des Laminatverhaltens – die Herstellerdaten differieren häufig stark, was aufgrund von Unterschieden in der Zusammensetzung der verwendeten Schmelzen zustande kommen kann. Zu Querkontraktionszahl und Schubmodul der Basaltfasern gibt der Hersteller keine Auskunft. Zudem besteht generell noch sehr wenig Erfahrung bezüglich dieses – zumindest für die westliche Welt – neuen Fasertyps. Aufgrund dieser Problematik wird Fa. R&G in Zukunft voraussichtlich mit einem österreichischen Hersteller zusammenarbeiten, der gleichbleibende Eigenschaften durch eine vorgegebene Rezeptur garantiert, da sie natürlich auch selbst sehr an seriösen Kennwerten interessiert sind. Wie schwierig sich die Recherche von Elementarkenndaten zur Basaltfaser für Vergleichsberechnungen der im Rahmen dieser Arbeit experimentell untersuchten BFK-Laminate gestaltet, ist im folgenden kurz dargestellt.

Die Zugfestigkeiten streuen in der Literatur stark: 1,43 ± 0,59 GPa für Fasern [MILIT-KY/KOVACIC (1996)], wobei nicht klar wird, aus welchen Experimenten die Basaltkenndaten wie ermittelt werden. VAN DE VELDE et al. (2003) stellen dem Experimente mit Basaltfasern von der Fa. Basaltex, Masureel Group, Belgien gegenüber, die in Bezug auf die Zugfestigkeit stark unterschiedliche Ergebnis für die getesteten Fasern (1662 ± 599 MPa) gegenüber den Rovings (650 ± 68 bis 860 ± 63 MPa) liefern. Weiterhin weisen sie als E-Modul eine Spanne von 82 bis 110 GPa aus, die sie eigenen Experimenten mit Basaltfasern und -rovings gegenüberstellen, die 70,4 \pm 7,4 bis 76,6 \pm 3,3 GPa ergeben. Es wird jedoch von ihnen hervorgehoben, dass Basalt eine geringere Festigkeit bei höherem Zugmodul als E-Glas aufweise, überragend sei die Basaltfaser jedoch immer dann, wenn sie nicht unter Normalbedingungen eingesetzt wird. Der Verdacht drängt sich auf, dass es sich bei den Werten um Verbundkennwerte und nicht ausschließlich Faserkennwerte handeln könnte, da von der österreichischen Fa. ASA.TEC (-ol) Werte vergleichbarer Größenordnung für unidirektionale Epoxid-Laminate mit einer Zugfestigkeit von 1500 MPa bei einem Zugmodul von 60 GPa, für die Hochleistungsfasern bis 2000 MPa, angegeben werden. Zu Querkontraktion und Schubmodul der einzelnen Faser wurden leider keine Angaben in der Literatur gefunden, weshalb eine Gegenüberstellung mit theoretischen Werten in Abschnitt 3.8.3 nicht möglich ist.

Oberflächenbehandlung der Faser: Analog zur Glasfaser wird die Basaltfaser mit einer Silanschlichte nachbehandelt [R&G (-ol)]

2.2.5 Prinzipielle Messverfahren für die Elementarkenndaten der Faser

Einen nicht zu unterschätzenden Aufwand stellt das Aufspüren der Eigenschaften von den gebräuchlichsten Verstärkungsfasern, die in Tabelle 2.1 zusammengetragen wurden, dar. Die Vertrauenswürdigkeit dieser Kennwerte ist schwerlich überprüfbar. Zahlreiche Informationen können den Publikationen der Faserhersteller, beispielsweise von Kohlefasern TOHOTENAX (-ol) und TORAYCA (-ol), entnommen werden. Trotz der dort vorzufindenden ausführlichen Faserbeschreibungen wird hier dennoch die Problematik deutlich, dass kaum Angaben über die jeweilige Querkontraktion der Faser sowie deren Schubmodul verfügbar sind.

Es drängt sich somit die Frage auf, wo die mechanischen Faserkenndaten herkommen. Dass die Bestimmung der Eigenschaften senkrecht zur Faserachse nicht trivial ist, ist bei den geringen Faserquerschnitten leicht ersichtlich.



Bild 2.14: Kraft-Dehnungs-Diagramm eines in Faserrichtung belasteten UD-CFK mit charakteristisch konvexem Verlauf [in Anlehnung an Bildquelle: DIN EN 2561 (1995)]

Eine Möglichkeit zur Bestimmung der Elementarkenndaten der Faser besteht gemäß DIN EN 2561 (1995) darin, aus Versuchen mit unidirektionalen kohlenstofffaserverstärkten Laminaten, die parallel zur Faserachse belastet werden, zurückzurechnen. Der **faserbezogene Sekantenmodul** (Elastizitätsmodul) E_{F1} [MPa] zwischen $F_{\rm B}/10$ und $F_{\rm B}/2$ lässt sich demnach wie in Bild 2.14 zu sehen ermitteln als:

$$E_{F1} = \frac{0.4 F_{\rm B} \rho_F}{n \ b \ M_{sF} \left[(\varepsilon_{11})_B - (\varepsilon_{11})_A \right]}.$$
(2.1)

Dabei wird mit $F_{\rm B}$ die Bruchkraft in N, ρ_F die Faserdichte in kg/m³, *n* die Anzahl der Lagen, *b* die Probenbreite in mm, M_{sF} die flächenbezogene Masse der Fasern in g/m² pro Lage (=,,Flächengewicht") und $(\varepsilon_{11})_A$ die Dehnung parallel zur Faserrichtung bei $F_{\rm B}/10$ bzw. für $(\varepsilon_{11})_B$ bei $F_{\rm B}/2$ bezeichnet. Darüber hinaus gilt für die faserbezogene Zugfestigkeit σ_F :

$$\sigma_F = \frac{F_{\rm B} \rho_F}{n \, b \, M_{sF}} \,. \tag{2.2}$$

Der **E-Modul quer zur Faserachse** E_{F1} ist nach SCHÜRMANN (2007) "*kaum direkt mess*bar". Man wählt ihm zufolge für dessen Bestimmung wiederum den umgekehrten Weg aus dem Experiment anhand eines Verbundes und rechnet aus den experimentellen Werten mithilfe der halbempirischen Formel (3.191)₁ von PUCK (1967) und (1969) – vorausgesetzt, E-Modul des Harzes und Faservolumenanteil sind bekannt – zurück auf den Faserquermodul. Diese halbempirische Formel (siehe auch Abschnitt 3.8.2.1) wurde anhand von Versuchen an Glasfasern (GF-EP) gewonnen, die jedoch die Besonderheit aufweisen, wegen Ihrer Isotropie längs und quer zur Faserachse denselben E-Modul zu besitzen. [SCHÜRMANN (2007)] Der Einsatz von Verstärkungsfasern in Form von textilen Flächengebilden ist zur Herstellung von Verbundlaminaten weit verbreitet. In diesen aus der Textiltechnik stammenden Lieferformen sind die Fasern einfacher und schneller für flächige Anwendungen zu handhaben, da sich die Faserablage gegenüber Einzelfasern vereinfacht und die Wirtschaftlichkeit des Herstellprozesses erhöht wird. Zu den textilen Flächengebilden, die sich nach MICHAE-LI/WEGENER (1990) in verschiedene Gruppen (Angabe in Klammern) einteilen lassen, zählen:

- \rightarrow Gewirke und Gestricke (maschenbildende Systeme⁸),
- → Gewebe, Gelege und Geflechte (nichtmaschenbildende Systeme) und
- \rightarrow Vliese, die auch als Wirrfasermatten bezeichnet werden.

Zur Realisierung dünnwandiger, flächiger Bauteile im Sinne einer Leichtbaukonstruktion werden überwiegend Gewebe und Gelege verarbeitet. Da die Ausrichtungen der Fasern im Verbund entscheidenden Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften eines Bauteils hat, ist an Geweben und Gelegen vorteilhaft, dass sie sich leicht orientierungsgerecht positionieren lassen. [SCHÜRMANN (2007), MICHAELI/WEGENER (1990)]

Im Rahmen dieser Arbeit interessieren insbesondere Gewebe, die laut MOSER (1992) "*seit Beginn der Anwendung von verstärkten Kunststoffen oft und gerne eingesetzt*" werden. Fasergewebe sind FLEMMING et al. (1996) zufolge sowohl die ältesten als auch bekanntesten und vermutlich wichtigsten textilen Flächengebilde zur Verstärkung von Kunststoffen. Sie werden von jedem Bastler – in Kombination mit einer Reaktionsharzmatrix – für kleinere Ausbesserungsarbeiten oder zur Fertigung naßlaminierter Bauteile geschätzt. MOSER (1992) stellt des Weiteren heraus, die Vorliebe für Gewebe "*ist besonders beim Handauflegeverfahren zu beobachten, wo diese Verstärkungsform die höchsten erzielbaren mechanischen Werte ergibt.*"

Aufbau und Herstellung von Geweben

Ausgangsmaterial eines Fasergewebes, das gelegentlich in der Literatur auch als "trockenes" Halbzeug⁹ bezeichnet wird, ist das endlose Faserfilament. Werden mehrere dieser Faserfilamente parallel angeordnet und zu einem Bündel zusammengefasst, nennt man sie Roving (oder Tow). Ist hingegen von endlosem Garn die Rede, so besteht dieses aus geschnittenen Kurzfasern, die zu Endlosfasern versponnen wurden. Ein Faden beinhaltet mehrere einzelne Fasern. Sämtliche textile Flächengebilde bestehen nun entweder aus Monofilamenten, Schnittfasern, Rovings oder Garn (Begriffsdefinitionen siehe Tabelle 2.2). [FLEMMING et al. (1996), MICHAELI/WEGENER (1990)]

⁸ Zur Bildung einer Masche wird ein Faden zu Schlingen geformt, durch die wiederum Fadenschlaufen gezogen werden, u.s.w.. Diese miteinander verschlungenen Schlaufen werden als maschenbildendes System bezeichnet. [DIGEL/KWIATKOWSKI (1983), TEXTILIENWIKI (-ol)]

⁹ Ein Prepreg (= preimpregnated, also mit Harz vorgetränktes Faserhalbzeug) hingegen wäre das "nasse" Halbzeug. Im Rahmen dieser Arbeit ist daher ausschließlich das "trockene" Halbzeug gemeint, wenn vom Faserhalbzeug die Rede ist. [FLEMMING et al. (1996)]

Begriff	Beschreibung
Filament	technische Endlosfaser, Einzel- bzw. Elementfaser
Spinnfaden	Bestimmte Anzahl parallel nebeneinander liegender, nicht verdrehter Fila- mente
Filamentgarn	entsteht durch Drehen eines Spinnfadens. Daneben gibt es auch ungezwirnte Garne, die Einzelfilamente ohne Drehung zusammenfassen. Einzelne Quellen sprechen bis zu einer Fadenstärke von 68 tex von Filamentgarn. Ungezwirnte Garne werden häufig für FVK eingesetzt.
Roving	Besteht aus einer bestimmten Anzahl parallel nebeneinander liegender, nicht verdrehter Spinnfäden. Teilweise wird in der Literatur ein Roving in Abgrenzung zum Filamentgarn als >> 68 tex Fadenstärke definiert.
Zwirn	beinhaltet zwei oder mehrere Garne, die entgegen der Garndrehung verdreht sind.

Tabelle 2.2: Bündelformen von Einzelfasern nach [NEITZEL/BREUER (1997), MOSER (1992)]

Die in Form von Garnen bzw. Rovings vorliegenden Fasern werden zu Gelegen oder Geweben weiterverarbeitet, bei letztgenannten rechtwinklig verkreuzt. Man unterscheidet dabei je nach Richtung des Fasereintrags die in Erzeugendenrichtung verlaufenden Kett- und orthogonal dazu angeordneten Schussfäden, die bei Geweben seitlich in die (endlosen) Kettfäden eingewoben werden, sodass eine bidirektionale Verstärkungswirkung entsteht. [MOSER (1992), FLEMMING et al. (1996)] Bild 2.15 zeigt den Webprozess in einer Großweberei. Darin zu sehen sind über eine Webmaschine gespannte Endlosfäden (Kettfäden); die Schussfäden werden senkrecht dazu eingewoben.



Die Kettfäden passieren an der Webmaschine den Streichbaum, die Lamellen und das Webgeschirr.



Durch Verkreuzung der Kettfäden mit dem Schußfaden entsteht das Gewebe.

Bild 2.15: Bilder aus einer Weberei [Bildquelle: R&G (2009)]

Bindungsarten von Geweben

Je nachdem, in welcher Reihenfolge die Kettfäden beim Webprozess angehoben werden, ergeben sich beim Hineinweben des Schussfadens unterschiedliche Arten der Fadenkreuzung, die sog. Gewebebindung [FLEMMING et al. (1996)]. Die wesentlichsten Gewebebindungen Leinwand-, Köper- und Atlasbindung sind in Bild 2.16 als Foto (vergrößerter Ausschnitt), schematische Darstellung in Drauf- und Seitenansicht sowie als Webbild gegenübergestellt.



Bild 2.16: Webarten textiler Faserhalbzeuge [Bildquelle: modifiziert nach R&G (2005) und (2009)], Drapierfähigkeit ggü. Schiebeverfestigung der einzelnen Bindungsarten

Mit der sog. Flottierung wird bei Geweben die geometrische Beziehung von Kette und Schuss beschrieben. Genauer gesagt bezeichnet die Flottierung den Abstand zwischen zwei Kreuzungspunkten [SCHÜRMANN (2007)]. Bei vielen Fadenkreuzungspunkten spricht man von einer "kleinen Flottierung" (z. B. abwechselndes Über- und Unterkreuzen der Kettfäden), bei weniger Fadenkreuzungspunkten von einer "großen Flottierung". [MOSER (1992)]

Der Vorteil der Verwendung von Fasergeweben liegt in der einfacheren Handhabung ggü. Gelegen und der besseren Drapierbarkeit. Letztere beschreibt die geometrische Anpassungsfähigkeit (Anschmiegbarkeit) an Wölbungen und Schalenstrukturen. Die Drapierfähigkeit variiert innerhalb der Gewebehalbzeuge je nach Webart, wie Bild 2.17 links für ein Leinwand- und ein Köpergewebe veranschaulicht. Eine weitere verarbeitungsrelevante Kenngröße ist die Schiebefestigkeit. Sie drückt in etwa den Widerstand des Gewebes gegen Verformung,

31

wie im Bild 2.17 rechts angedeutet, aus. "*Die Schiebefestigkeit ist im Allgemeinen umso geringer, je niedriger die Fadendichte und je höher die Flottierung… ist*", stellen BEY-ER/SCHAAB (1969) fest. Der Zusammenhang zwischen Drapierfähigkeit, also der Anschmiegsamkeit an die Bauteilkontur, und Schiebeverfestigung ist in Bild 2.16 (unten) in Abhängigkeit von der Anzahl der Kreuzungspunkte bei den einzelnen Bindungsarten aufgezeigt. Die Drapierfähigkeit steigt mit fallender Anzahl an Fadenkreuzungspunkten bei sinkender Schiebeverfestigung. Und umgekehrt nimmt sie mit steigender Schiebeverfestigung ab. Aber auch das Finish nimmt Einfluss auf die Anschmiegbarkeit [BEYER/SCHAAB (1969)].



Bild 2.17: links: Drapierfähigkeit [R&G (2009)] und rechts: Schiebeverfestigung [SCHÜRMANN (2007)]

Für die Verarbeitbarkeit eines Gewebes entscheidend ist neben Schiebefestigkeit und Anschmiegbarkeit die Tränkfähigkeit. Beispielsweise sind "Rovinggewebe… schwerer zu durchtränken als Glasseidengewebe, sie ergeben relativ dicke Laminate" und weisen eine ungleichmäßigere Verteilung der Glasfasern auf. "Gewebe aus ungezwirnten Garnen lassen sich… schneller mit Harz tränken, sind schmiegsamer, ergeben eine höhere Transparenz, eine geringere Oberflächenrauhigkeit und sind billiger." [BEYER/SCHAAB (1969)]

Die Prüfung der mechanischen Eigenschaften erstreckt sich im vorliegenden Fall ausschließlich auf Gewebe mit Köper- oder Leinwandbindung, die im Folgenden diskutiert werden. Bei der Fertigung der Prüfkörper kommen darüber hinaus Gelege aus Glasfasern zur Abfederung der Einspannklemmkräfte zum Einsatz.

2.2.6.1 Leinwandbindung

Die Gewebe mit Leinwandbindung besitzen den einfachsten Aufbau. Sie weisen die meisten Kreuzungspunkte auf, da sich jeweils ein Schussfaden über einen Kettfaden erstreckt, um dann unter dem nächsten hindurchzulaufen. Die schematische Darstellung eines sich wiederholenden Segments aus einem Leinwandgewebe kann Bild 2.18 entnommen werden. Dadurch sind Leinwandgewebe formstabil (schiebe- und schnittfest), aber nicht so drapierfähig. Beim Zuschnitt wirkt sich die Formbeständigkeit positiv aus, indem das Gewebe "*dem Schneidwerkzeug wenig ausweicht"* und ebenso wenig ausfranst. Die vielen Kreuzungspunkte pro Flächeneinheit bewirken jedoch ebenso eine Verringerung der Festigkeit und des E-Moduls. [FLEMMING et al. (1996)]



Bild 2.18: Ondulation bei Leinwandbindung, Schematische Darstellung einer Einheitszelle [Bildquelle: FLEMMING et al. (1996)]

2.2.6.2 Köperbindung

Die Köperbindung beschreibt den Verlauf eines Schussfadens über definiert viele Kettfäden, um dann unter den nächsten Kettfäden hindurchzutauchen. Bei den untersuchten Köpergeweben handelt es sich um Köper 2/2, wodurch das Über- und Unterkreuzen von jeweils 2 Fäden beschrieben wird. Durch diese Bindung weist die Oberfläche des Gewebes eine charakteristisch diagonale Struktur auf, den sog. Köpergrat, der links im Bild 2.19 zu sehen ist. Der Köpergrat beschreibt parallele Linien, die sich unter 45° durch die Kreuzungspunkte der Kettund Schussfäden ausbilden und entlang der sich in Köpergratrichtung "*bei nicht ausgewogenem Laminataufbau*" Kräfte ausbilden können [R&G (2009)].

Gewebe mit Köperbindung sind gut drapierfähig, sie schmiegen sich an räumliche Geometrien an. Dem gegenüber steht eine schlechtere Schiebefestigkeit als bei Leinwandbindung, was sich in der Handhabung des Gewebes (Abwickeln vom Transportkern, Zuschnitt) bereits bemerkbar macht. Eine definierte Faserorientierung für den Zuschnitt zu erzielen erfordert Nachjustierung. "Durch die geringere Fadenablenkung des Köpergewebes… sind (jedoch) die Festigkeiten und Moduli leicht höher als bei Leinwandgewebe." [FLEMMING et al. (1996)]



Bild 2.19: links: Struktur der Köperbindung mit Kett- (K) und Schussfäden (S), rechts: Faserwellung nach gedachter Entflechtung des Gewebes [Bildquelle: PUCK (1996)]

33

2.2.6.3 Einfluss der Gewebebindung auf mechanische Eigenschaften

Die Fixierung der Fasern im textilen Halbzeug geschieht beim Gewebe durch das Verweben (analog erfolgt dies beim Gelege durch Vernähen mit sog. Wirkfäden). Gleichermaßen erfährt neben den Verarbeitungseigenschaften das Festigkeits- und Verformungsverhalten, somit also auch die Steifigkeit, bedingt durch die Fadenkreuzungen im Gewebe bzw. "*die Lage des Kett-fadens*", wie MOSER (1992) sich ausdrückt, einen signifikanten Unterschied. [FLEMMING et al. (1996)]

Je nach Bindungsart werden die Fasern unterschiedlich stark umgelenkt. Viele Kreuzungspunkte haben einen negativen Einfluss auf das Steifigkeits- und Festigkeitsverhalten. Für mechanische Anwendungen werden eher Gewebe mit hoher Flottierung verwendet (keine Leinwandbindung). Allerdings erkauft man sich damit eine geringere Schiebeverfestigung, so dass Gewebe mit hoher Flottierung an sich keinen so guten Zusammenhalt wie solche mit Leinwandbindung aufweisen und daher schlechter handhabbar sind. [FLEMMING et al. (1996)]

Bezüglich der erzielbaren Zug-, Druck- und Biegefestigkeit ist festzustellen, dass Köperbindung 2/2, die in den hier zugrunde liegenden Experimenten mit Verstärkungsfasern aus Aramid, Kohlenstoff und Glas verwendet wurde, eine höhere Festigkeit als Leinwandbindung erzielt und "*ungezwirnte Garne* (Leinwand) *eine höhere Festigkeit als gezwirnte Garne ergeben. … Im Allgemeinen gilt, dass die Laminatfestigkeit um so höher ist, je gestreckter die Glasfäden im Gewebe liegen. Hier sind Gewebe mit hoher Flottierung im Vorteil."* Näheres kann dazu nachgelesen werden in [HÖRSCH (1965)]. Untersuchungen zum Einfluss von Garntyp und Gewebebindung auf insbesondere die Laminateigenschaft der Schlagzähigkeit haben bspw. WEGENER/HAUSMANN (1964, 1966) durchgeführt. [BEYER/SCHAAB (1969)]

Die Fadendicke nimmt ebenfalls Einfluss auf den E-Modul, indem sie eine "*zunehmende Krümmung der Fäden beim Über- und Untereinanderherlaufen verursacht*". Hier spielt auch die Maschenweite eine wichtige Rolle.

- → Bei konstanter Maschenweite gilt: je dicker die Faser, umso kleiner der Krümmungsradius.
- → Umgekehrt gilt bei gleichbleibender Faserdicke: je kleiner die Maschenweite umso kleiner der Krümmungsradius.

Die Fadenkrümmung wiederum beeinflusst laut BEYER/SCHAAB (1969) den Elastizitätsmodul, indem sich stärker gekrümmt im Schichtverbund liegende Fasern unter Zuglast in Faserrichtung mehr gerade ausrichten müssen. Dies geschieht zu Lasten der Matrix, weil davon anfänglich ein Großteil der Zuglast aufgenommen wird. "Da der E-Modul des Harzes aber im Verhältnis zu dem (der Faser) klein ist…, wird mit zunehmender Belastung ein immer höherer Anteil der Last" von der Faser "übernommen, wobei" sie "von der übernommenen Last entsprechend gestreckt wird. Beim Erreichen der Bruchlast sind dann die Fäden etwa durchgestreckt." Die Gesamtdehnung errechnet sich folglich aus der "Streckung der Fadenkrümmung" und der Dehnung der Faser infolge des übernommenen Lastanteils. Als Grenzwert für die Gesamtdehnung, die mit dem Krümmungsradius zunimmt, gilt ein durch die Dehngrenze des Harzes determinierter Wert. "Aus diesem Grund ist der Elastizitätsmodul von…" den jeweiligen Faser- und Kunststoff-Werkstoffpaarungen "kein konstanter Wert, sondern… bei

Q

Verwendung von Fasergespinsten stets niedriger als bei Verwendung gestreckter Fasern." [BEYER/SCHAAB (1969)]

Faserkrümmungen und Zwirnung des Garns stellen aus Sicht der Mechanik "Störungen" im Faserhalbzeug dar, die steifigkeits- und festigkeitsreduzierend gegenüber gestreckt vorliegenden Fasern wirken. Bei Lasteinwirkung kommt es dort zu komplexen Spannungszuständen. Je geringer ausgeprägt die Faserkrümmungen sind, desto besser sind grundsätzlich die mechanischen Eigenschaften. Das volle Festigkeits- und Steifigkeitspotential einer Faser kann nur im ausgestreckten Zustand abgerufen werden. [SCHÜRMANN (2007)] Folglich weisen die Köperund Atlasgewebe aufgrund ihrer geringeren Faserumlenkungen bessere mechanische Eigenschaften auf als ein Gewebe in Leinwandbindung [FLEMMING et al. (1996)]. Bei dem angewendeten Berechnungsmodell der mechanischen Eigenschaften wird ein Gewebe einerseits gedanklich in zwei Einzelschichten, in denen die Fasern orthogonal zueinander verlaufen, zerlegt. Andererseits kann der Einfluss der Faserwellung auf die Steifigkeit und Festigkeit durch Abminderungsfaktoren, z. B. einen empirisch ermittelten Ondulationsfaktor, berücksichtigt werden, vgl. dazu Abschnitt 3.8.2, insbesondere 3.8.2.3.

Flächengewicht (Grammatur), Feinheit und Fadendichte

Die Gewebe unterscheiden sich neben der Bindungsart auch noch durch das Flächengewicht, Art und Feinheit der Garne sowie durch die Fadendichte [BEYER/SCHAAB (1969)]. Das Flächengewicht wird auch als Grammatur bezeichnet und in g/m² angegeben. Es kennzeichnet die Dicke des Gewebes [FUNKE (2002)] und wird auch als Feinheit des Gewebes bezeichnet [SCHÜRMANN (2007)]. Die Fadendichte, oder auch Einstellung genannt, wird als Fadenzahl pro Gewebebreite (Fadenzahl/cm) angegeben [FLEMMING et al. (1996), R&G (2003)].

Bei der Auswahl der zu verwendenden Gewebe gilt es bereits, die Einflussfaktoren auf das fertige Bauteil abzuwägen. Die im Bereich der Luft- und Raumfahrt verwendeten Strukturgewebe, die immer häufiger auch in der Verkehrstechnik Einzug halten, sollen "wegen der Oberflächenqualität von Außenflächen" möglichst dicht gewebt sein. "Der Leichtbau fordert außerdem möglichst dünne Gewebe, auch deshalb, weil die Laminate – um Verzug zu vermeiden – symmetrisch aufgebaut sein müssen. Mit dünnen Geweben können die Laminataufbauten besser den gegebenen Belastungen angepasst und dadurch Gewicht eingespart werden." Daher sind insbesondere die in der Herstellung (sowohl in der Roving-Herstellung selbst als auch im Webvorgang) teureren sog. 3 K- und 6 K-Rovings in der Luft- und Raumfahrt begehrt, die bei geringem Flächengewicht dicht gewebt sind. [FLEMMING et al. (1996)] 3 K bezeichnet die Einheit des sog. "Titers" bei C-Fasern. Der aus der Textiltechnik stammende Begriff Titer beschreibt die Feinheit von Faserbündeln und charakterisiert den vorliegenden Garntyp [NEITZEL/BREUER (1997)]. Je geringer die Faserfeinheit ist, desto weicher fühlt sich ein Fasermaterial an [KALWEIT et al. (2006)]. Analog werden für die Feinheit die Bezeichnungen Fadenstärke, Fadendicke oder Fadengewicht verwendet. Es haben sich vielfach faserspezifische Einheiten etabliert, bspw. wird der Titer von Glasfasern in tex angegeben (vgl. Tabelle 2.3).

		P.

Einheit Titer	tex	K - Zahl	denier
Beschreibung	längenbezogene Masse	Anzahl der Elementar- fasern pro Faserbündel	längenbezogene Masse
Umrechnung ¹⁰ / Bedeutung	1 tex = 1 g/ 1000 m, 1 dtex = 10 tex	1 K = 1000 Filamente	1 denier = 1 g/ 9000 m
Verwendung	Glas-, Aramidfasern	Kohlenstofffasern	veraltete Bezeichnung für Aramidfasern

Tabelle 2.3:	Titer von	Faserbündeln	[Moser	(1992)
--------------	-----------	--------------	--------	--------

2.2.6.4 Abreißgewebe

Gewebe werden nicht ausschließlich zur Faserverstärkung im Komposit verwendet. Das in Bild 2.20 gezeigte Abreißgewebe kommt bei der Herstellung der Laminate als Fertigungshilfsmittel zum Einsatz, um der Oberfläche der Bauteile eine gleichmäßige und raue Struktur zu verleihen. Es handelt sich dabei um ein Köpergewebe aus Polyamid (Nylon) mit einem Flächengewicht von 100 g/m², das als äußere Schicht auf das Laminat aufgebracht und nach Aushärtung der Matrix wieder entfernt wird [R&G (-ol)]. Je nachdem, welcher Abreißgewebetyp zum Einsatz kommt, lassen sich hiermit Rautiefen zwischen $R_z = 60...100 \,\mu\text{m}$ erzielen.



Bild 2.20: Abreißgewebe der Fa. R&G (links), Abdruck eines Abreißgewebes auf einem Laminat (rechts) [Bildquelle: TOMBERS (2008) nach SCHÜRMANN (2007)]

¹⁰ Auch eine Umrechnung zwischen den einzelnen Einheiten ist möglich, z. B. entspricht die Feinheit eines Standard-Rovings mit 12 K einem Wert von 800 tex [SCHÜRMANN (2007)].

Farbige Fäden im Abreißgewebe (hier rot) sollen das Gewebe als Fertigungshilfsmittel kenntlich machen und verhindern, dass es versehentlich auf dem Laminat verbleibt [SCHÜRMANN (2007)].

Im Hinblick auf die Herstellung der Probelaminate (siehe Abschnitt 2.5, speziell 2.5.4) ergeben sich in Anlehnung an SCHÜRMANN (2007) insbesondere folgende Vorteile:

- → Entfallen eines Anschleifvorgangs (dadurch Reduktion der Fertigungszeit und gesundheitsgefährdender Schleifstäube).
- → Vorbereitung für eine Klebung (entferntes Abreißgewebe hinterlässt schmutz- und fettfreie Oberfläche, die zudem noch stark vergrößert ist aufgrund der erhöhten Rauhigkeit, was die Klebwirkung begünstigt): Im Rahmen dieser Arbeit werden die Aufleimerriegel, die als Verstärkung der Probekörper in den Einspannbereichen zum Einsatz kommen, so vorbereitet auf die Laminate aufgeklebt.
- → Funktion einer Entlüftungs- und Absaugschicht: Die hier im Handlaminierverfahren hergestellten Mehrschichtverbunde werden im Anschluss an den Laminiervorgang im Vakuumverfahren (siehe Abschnitt 2.4.2) verpresst, um Lufteinschlüsse aus dem Laminat zu entfernen. Wird als letzte Schicht eine Lage Abreißgewebe aufgebracht, bewirkt diese aufgrund ihrer Durchlässigkeit eine Entlüftung des Gewebes. Im vorliegenden Fall wird diese Funktion eingeschränkt genutzt, da die Laminate nur an den Rändern mit einem Streifen Abreißgewebe abgedeckt werden, um dort eine optimale Verklebung mit den Aufleimerriegeln zu gewährleisten. Weiterhin trägt das Abreißgewebe zu einem gleichmäßigen Faservolumenanteil der Laminate bei, indem es überschüssiges Harz aufnimmt.

2.2.6.5 Gelege

Ein Gelege ist sozusagen ein Sonderfall eines Gewebes, bei dem keine Faserkrümmungen auftreten [FLEMMING et al. (1996)]. Im Falle eines Geleges werden die einzelnen Faserlagen lediglich gleich oder unterschiedlich orientiert aufeinander abgelegt und mithilfe eines dünnen Wirkfadens in der entsprechenden Position gehalten. Theoretisch werden in Gelegen die mechanischen Eigenschaften der Fasern optimal ausgenutzt: Störungen durch Fadenkreuzungen treten hier nicht auf, die die Faserfestigkeit mindern könnten [SCHÜRMANN (2007)]. In FUNKE (2001) wird jedoch auf das erheblich gleichmäßigere Faserbild hingewiesen, das Gewebe bei der Verarbeitung im Handlaminierverfahren ergeben. Das relativiert den Vorteil des Geleges gegenüber dem Gewebe. Vergleicht man die mechanischen Eigenschaften von 0°/ 90°-gelegeverstärkten Kunststoffen mit ihrem gewebeverstärkten Gegenstück, so zeigt sich ferner, dass die Steifigkeiten und Festigkeiten des Gewebelaminats in Nichtverstärkungsrichtung (z. B. 45°-Richtung) höher sind. Aus diesem Grunde werden Gewebe gegenüber Gelegen bevorzugt eingesetzt, wenn undefinierten Beanspruchungen eines Bauteils begegnet werden muss (z. B. bei Schiffsrümpfen) [MICHAELI/WEGENER (1990)].

Das Bild 2.21 illustriert, dass durch den Einsatz eines Wirkfadens verschiedene Orientierungen der einzelnen Lagen zueinander realisiert werden können. Aus Biaxialgelege bestehen die in dieser Arbeit verwendeten Aufleimer. Daneben gibt es noch Multiaxialgelege, die mehr als zwei Faserrichtungen aufweisen [FLEMMING et al. (1996)]. Darin wird eine einzelne Faserlage



mit nur einer Faserrichtung als unidirektionale Schicht (kurz: UD-Schicht) bezeichnet [MI-CHAELI/WEGENER (1990)].



Bild 2.21: Gelege mit Wirkfäden [MICHAELI/WEGENER (1990)]

2.2.7 Untersuchte Gewebe

Die zu Zugprüfkörpern verarbeiteten und der Materialprüfung unterzogenen Gewebe werden in Tabelle 2.4 näher spezifiziert. Darunter befinden sich Gewebe aus Kohlenstoff- und Basaltfaser, die symmetrisch aufgebaut sind, was an der gleich hohen Fadendichte in Kett- und Schussrichtung erkennbar ist. Bei dem Glas- und dem Aramidfasergewebe sind Asymmetrien vorhanden, da sie in Kettrichtung eine geringfügig höhere Fadendichte aufweisen. Die Fadenstärke ist jeweils identisch. Mit Ausnahme des in Leinwandbindung aufgebauten Basaltfasergewebes liegen die übrigen untersuchten Gewebe in Köperbindung mit jeweils zwei über- und unterkreuzenden Faserbündeln vor.

Gewebe- spezifikation	Glas	Aramid	Kohlenstoff	Basalt
Abbildung [Bild- quelle: R&G (2008)]				
Flächengewicht	163 g/m²	170 g/m²	245 g/m²	280 g/m²
Dicke	0,18 mm	0,38 mm	0,35 mm	0,3 mm
Fasertyp	E-Glas	HM	HT	-
Webart	Köper 2/2 (Twill 2/2)	Köper 2/2 (Twill 2/2)	Köper 2/2 (Twill 2/2)	Leinwand 1/1 (Plain 1/1)
Finish	FK 144	gewaschen	Epoxid	Silanschlichte
Zulassung	Werkstoff nach Luftfahrtnorm (Aeronautic)	Luftfahrt (Aeronautic)	Luftfahrt (Aeronautic)	Industrie (Industry)

Tabelle 2.4: Spezifikation der geprüften Verstärkungsfasergewebe [R&G (2008)], englische Bezeichnung in Klammern

Gewebe- spezifikation	Glas	Aramid	Kohlenstoff	Basalt
Fadendichte, Fa- denzahl/cm (Kette x Schuss) [1/cm] (number of ends per cm (warp x weft))	12 x 11,5	6,5 x 6,2	6 x 6	5 x 5
Fadenstärke, Garnfeinheit bzw. Garntyp (Kette x Schuss) [tex] (Yarn number in g/1000 m, yarntype (warp x weft))	68 x 68	127 x 127	200 x 200	280 x 280

Faserhalbzeugspezifische Besonderheiten

An dieser Stelle sei auf KOKE (2005a) verwiesen, wo auf Erfahrungen im Umgang mit den unterschiedlichen Faserhalbzeugen und deren Besonderheiten eingegangen wird, um damit eine Hilfestellung für künftige Anwender zu geben. Die Verarbeitbarkeit von den hier vorgestellten, häufig verwendeten Verstärkungsfasergeweben und weiteren textilen Faserhalbzeugen aus Glas-, Aramid-, Kohlenstoff- und Dyneemaverstärkungsfasern ist darin thematisiert. Es handelt sich um Extrakte aus Laminierprotokollen zu den experimentellen Untersuchungen im Rahmen von KOKE (2005). Diese Erfahrungsberichte sind subjektiv, geben jedoch evtl. Aufschluss über mögliche "Ungereimtheiten" bei den experimentell ermittelten Faservolumenanteilen, die in Tabelle 2.6 aufgeführt sind, und späteren elastischen Materialkenngrößen.

2.3 Der Kunststoff als Matrixmaterial der Wahl

Matrixfunktionen und Auswahlkriterien

Die verbindende und gestaltgebende Komponente des Faser-Kunststoff-Verbundes ist der Kunststoff. Dieses vermeintlich "schwache" Matrixmaterial hat einen nicht unerheblichen Anteil von 40 bis 70 Prozent am Gesamtvolumen des Werkstoffverbundes. Wie bereits in Abschnitt 2.1.3 dargelegt, bestehen die Aufgaben des Matrixwerkstoffes gemäß FLEMMING et al. (1999)

- \rightarrow über die Formgebung hinaus in der
- → Übertragung und Verteilung der auftretenden Kräfte,
- → der Fixierung der Fasern und
- → deren Abschirmung gegen eventuell aggressive Umgebungsmedien. Dies ist nur möglich, wenn die Fasern vollständig ummantelt sind. Einschlüsse und Poren schwächen den Verbundwerkstoff.

39

→ Darüber hinaus determiniert der Matrixwerkstoff die Verbindungsmöglichkeiten mit anderen Bauteilen. [MICHAELI/WEGENER (1990)]

Die Entscheidung für das optimale Matrixsystem fußt auf dem jeweiligen Faserwerkstoff und den zu erwartenden Eigenschaften des Faser-Kunststoff-Verbunds (FKV) [HEIßLER (1977)]. Bspw. wird die thermische Belastbarkeit eines FKV ganz wesentlich durch den verwendeten Kunststoff bestimmt [EHRENSTEIN (2006)]. Gewollte Unterschiede der Kunststoffe können z. B. in der Dichte, der Schlagzähigkeit, den Temperatur-Einsatzgrenzen oder der Chemikalienbeständigkeit liegen [SCHÜRMANN (2007)]. Entsprechend vielseitig ist das Angebot der Hersteller, um unterschiedlichsten Anforderungen zu entsprechen. Auch fertigungsbedingte Aspekte wie die Verarbeitbarkeit der Matrix haben entscheidenden Einfluss auf die Auswahl der Werkstoffe. Wichtige Kriterien sind in diesem Zusammenhang Topfzeiten¹¹, Viskosität (Zähflüssigkeit) oder Härtungszeit.

Eingrenzung auf Epoxidharze (Fokus dieser Arbeit)

Kunststoffe (= Polymere) bestehen aus einer Vielzahl von Molekülketten, wobei die Art und Weise der Verknüpfung der Monomere ihre Eigenschaften bestimmt. Schwerpunktmäßig werden aktuell organische Polymere als Matrixsysteme für Faserverbundwerkstoffe verwendet [FLEMMING (1996)]. Grundsätzlich werden Kunststoffe in die drei Hauptgruppen Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere eingeteilt. Als Matrixsystem kommen bisher bei Faserverbundkunststoffen in hohem Maße Duroplaste, und davon überwiegend Epoxidharze, zum Einsatz [FLEMMING et al. (1999)]. "Bei richtiger Zusammensetzung" können Epoxidharze MOSER (1992) zufolge "höchste Anforderungen bei Faserverbundkonstruktionen erfüllen". NIEDERSTADT et al. (1985) grenzen weiter ein, dass Epoxidharze als Matrixwerkstoff für CFK "vom Gesichtspunkt der chemischen und thermischen Beständigkeit bis 200 °C... konkurrenzlos" sind. HEIBLER (1986) bekräftigt, "vernetzte Epoxidharze haben sich als Matrixwerkstoffe für faserverstärkte Kunststoffe in breitem Umfang bewährt" und somit finden sie ihren Einsatz auch in dieser Arbeit als Matrixsystem zur Herstellung der Prüfkörper. "Durch die zahlreichen Strukturkombinationsmöglichkeiten eignen sich diese Systeme vorzüglich zur gezielten Einstellung von Werkstoffeigenschaften (,maßgeschneiderte Kunststoffe')" [HEIBLER (1986)].

In modifizierter Form wird ein solches wie hier verwendetes Epoxidharz auch gerne als Strukturklebstoff (z. B. im Automobilbau zum Fügen der Windschutzscheibe in die Karosserie) bezeichnet. Ein Klebstoff ist per Definition ein "*nichtmetallischer Stoff, der Werkstoffe durch Oberflächenhaftung (Adhäsion) so verbinden kann, dass die Verbindung eine ausreichende innere Festigkeit (Kohäsion) besitzt*" [DIN EN 923]. Mechanische Adhäsion findet dabei an der Oberfläche des Werkstückes statt.

Historische Entwicklung der Epoxidharze

Die Entwicklung der Epoxidharze geht zurück auf das Jahr 1934 mit der erstmaligen Beschreibung der Reaktion "von Diepoxiden mit Aminen zu Polyaminverbindungen". Das erste

¹¹ Die Topfzeit gibt die maximale Verarbeitungszeit für Reaktionsharze an [SCHÜRMANN (2007)]

Patent für Kunstharze, die die wesentlichsten Eigenschaften der heutigen Kunststoffe verkörpern (als da wären: geringer Schwund bei Aushärtung ohne Abspaltung flüchtiger Nebenprodukte, gute mechanische Eigenschaften), stammt aus dem Jahr 1938 von P. CASTAN. [FLEM-MING et al. (1995)]

Aufbau von Epoxidharzen

Die Vernetzung folgt dem Reaktionsmechanismus der sogenannten Polyaddition. Dabei wird ein Zweikomponenten-System (Epoxidharz und Härter) eingesetzt. Die chemische Reaktion wird durch Beimischung des Härters zum Epoxidharz ausgelöst. Eine Steigerung des Vernetzungsgrades ist durch Wärmezufuhr nach Anhärtung – mit Temperung wird diese Warmaushärtung auch bezeichnet – möglich. Im Gegensatz zu thermoplastischen Kunststoffen, die sich durch Erwärmen auf Schmelztemperatur erneut in einen formbaren Zustand versetzen lassen, was bspw. die Schweißbarkeit ermöglicht, ist bei Duroplasten nach dem Aushärtungsprozess keine Verformung durch Wärmeeintrag mehr möglich. Im Ergebnis erhält man eine sehr engmaschig vernetzte dreidimensionale Polymerstruktur. Aus diesem Grund sind Epoxidharze im Vergleich zu anderen Kunststoffarten sehr hart und spröde. Epoxidharze sind nicht verformbar, dafür aber in weiten Bereichen temperaturbeständig, nicht schmelzbar und zersetzen sich bei einer charakteristischen Temperatur, was Bild 2.22 thematisiert. [FLEMMING et al. (1995), R&G (2003)]



Bild 2.22: Aufbau und Verhalten von Duroplasten [KALWEIT et al. (2006)]

Bild 2.23 zeigt das Reaktionsschema zur Herstellung von Epoxidharzen. In dieser Polyadditionsreaktion reagiert die sehr reaktionsfreudige, endständige Epoxidgruppe mit einer Hydroxylgruppe. Als Reaktionsprodukte sind zwei Isomere denkbar, die wiederum eine Hydroxylgruppe enthalten, die abermals mit einer freien Epoxid- oder anderen reaktiven Gruppe reagieren kann. [FLEMMING (1995)] Der Reaktionsablauf der in dieser Arbeit verwendeten Stoffsysteme unterscheidet sich bei der Aushärtung nicht grundsätzlich von dem in Bild 2.23 dargestellten Reaktionsschema. Die Aminogruppe lagert sich an die Epoxidgruppe an, wobei eine Hydroxyl- und eine sekundäre Aminogruppe entstehen. Diese Gruppen können erneut mit einer Epoxidgruppe reagieren, so dass hochvernetzte, dreidimensionale Strukturen entste-

hen. Weiteres zu den chemikalischen Grundlagen kann z. B. in WITTEN (2010) nachgelesen werden.



Bild 2.23: Grundsätzliches Reaktionsschema zur Herstellung von Epoxidharzen [FLEMMING (1995)]

Epoxidharzeigenschaften sowie deren Vor- und Nachteile

Die Verwendung von Epoxidharzsystemen bietet NIEDERSTADT et al. (1985) zufolge viele **Vorteile** wie die hohe Festigkeit und die geringe Schrumpfung während der Aushärtung, was kaum Eigenspannungen im fertigen Laminat nach sich zieht und sich positiv auf die Maßhaltigkeit der Bauteile auswirkt. Daher werden 95 Prozent aller Faserverbund-Kunststoff-Bauteile im Flugzeugbau mit einer Matrix aus Epoxidharz gefertigt [KEIL (2004)]. Epoxidharze sind des Weiteren hydrolysestabil, beständig gegenüber Umwelteinflüssen und ihre Oberfläche weist nahezu keine Porosität auf. Dennoch ist eine gute Haftung an verschiedenen Oberflächen gegeben. Für die Fertigung ist die gute Faserbenetzung entscheidend. [NIEDER-STADT et al. (1985)]

Nachteilig wird gesehen, dass Epoxidharze vergleichsweise teuer sind, einen begrenzten Temperatureinsatzbereich bis ca. 220 °C aufweisen und Feuchtigkeit aufnehmen, was zwar reversibel ist, aber (reversible) Nachteile in Bezug auf die mechanischen Eigenschaften nach sich ziehen kann [NIEDERSTADT et al. (1985)]. Unter den Gesichtspunkten der Fertigung bringen Epoxidharze den **Nachteil** mit sich, "*dass die Aushärtung relativ lange Zykluszeiten in Anspruch nimmt und (sie) somit für große Stückzahlen, wie z.B. in der Automobilindustrie üblich, nur bedingt geeignet erscheinen"*. Für die Luftfahrtindustrie mit ihren geforderten geringeren Stückzahlen ist dieser Umstand nicht so schwerwiegend, da hier Verfahren mit langen Zykluszeiten und ein hoher manueller Bearbeitungsanteil tolerabel sind. [FLEMMING et al. (1999)]

Mechanische, chemische und fertigungstechnische Eigenschaften von Epoxidharzen

Das Harz in Reinform verhält sich JOHNKE (1987) zufolge "*den allgemeinen Gesetzen der Relaxationstheorie*" entsprechend. Liegt der Polymerwerkstoff im Verbund mit Fasern vor, so bestimmt der Faseranteil entscheidend das Dämpfungsverhalten und die "*Elastizität über der Dehnung*". Die Bruchdehnung von Laminierharzen sollte vorzugsweise gleich oder größer der Bruchdehnung der Verstärkungsfasern sein, damit im Belastungsfall kein Bauteilversagen durch Brüche und Risse im Harz eintritt [R&G (2003)].

Die Einhaltung des stöchiometrischen Mischungsverhältnisses von Harz und Härter innerhalb eines Toleranzbandes von 0,2 Prozent ist für optimale Eigenschaften erforderlich [R&G (2003)]. Wenn nicht, findet keine vollständige Vernetzung statt. Unverkettete Moleküle wir-

Q

ken sich negativ auf mechanische und thermische Eigenschaften aus. [FUNKE (2005a)] Da die Härtungsreaktion exotherm verläuft, kann ein größerer Harzansatz bei der Verarbeitung verkochen.

Zu der chemischen Widerstandsfähigkeit von Epoxidharzen finden sich in der Literatur nur sehr wenige Daten. Nach WITTEN (2010) ist man dabei zumeist auf die Kenndaten der Hersteller angewiesen: "Als Grundlagen für die Auswahl von EP-Harzen und zugehörige Härterkomponenten sind meistens nur spezielle betriebliche Erfahrungsnachweise und gegebenenfalls Angaben der Harzhersteller verfügbar". Chemische Beständigkeitslisten, wie sie z. B. für handelsübliche Lösemittel oder Laugen/Säuren vorliegen, oder einschlägige EP-Formstoff-/Medienlisten sind nicht vorhanden, insbesondere bei unterschiedlichen Temperaturen. Bei chemisch/thermischen Beanspruchungen ist der Anwender daher im Allgemeinen auf zumeist selbständig durchzuführende Betriebs- oder Laborversuche angewiesen. Dies wird sich laut WITTEN (2010) erst ändern, wenn eine übersichtliche Gliederung für EP-Harzsysteme vorliegt und er führt weiter aus, "allgemeine Angaben sind für praktische Anwendungen unzureichend, weil u. a. Begrenzungen auf bestimmte Konzentrationen und Betriebstemperaturen vielfach fehlen." Im Allgemeinen kann man EP-Harzformstoffe, die mit Polyaminen, insbesondere mit aromatischen Polyaminen gehärtet wurden, als besonders alkalienbeständig ansehen. Bei Einsatz von Anhydridhärtern ergeben sich EP-Harzformstoffe mit hervorragender Säure- und Witterungsbeständigkeit. "Gegenüber organischen Säuren und Lösemitteln werden mit aromatischen Polyaminen gehärtete EP-Harzformstoffe generell als beständig bezeichnet." [WITTEN (2010)]

In der vorliegenden Arbeit werden die Probekörper mit einem Titandioxid-Spray, welches zum Weißen der Oberflächen vor der photogrammetrischen Dehnungsfelderfassung verwendet wird, behandelt. Neben pulverförmigem Titandioxid ist der Hauptbestandteil dieses Sprays Isopropylalkohol (zu 85 bis 95 Prozent). In Laboruntersuchungen wurde deshalb geprüft, ob der Probekörper durch den Alkohol beeinflusst wird. Bei der relativ kurzen Behandlungszeit des Sprays und dem niedrigen Dampfdruck des Isopropylalkohols kann ein Einfluss ausgeschlossen werden. Jedoch sollten die Behandlungstemperatur und -zeit gering gehalten werden. Ebenso ist eine saubere Herstellung der Prüfkörper sicherzustellen, da (Mikro-) Risse oder Einschlüsse die chemische Widerstandsfähigkeit extrem verschlechtern können.

Vergleich der Eigenschaften der verwendeten Epoxidharzsysteme

Die als Matrixwerkstoff für die Prüflaminate verwendeten Epoxidharzsysteme gehören zu den in der Praxis am häufigsten eingesetzten.

Um insbesondere den mechanischen Anforderungen an den Faser-Matrix-Verbund gerecht zu werden, wird zur Herstellung der Prüfköper ein Expoxidharz-Härter-System ausgewählt, das sich durch die in der Tabelle 2.5 aufgeführten Kenngrößen charakterisieren lässt. Ein zweites System wird als Klebstoff zum Aufkleben der Aufleimer auf die Prüflaminate verwendet. Hierfür ist eine hohe Scherfestigkeit des Klebers erforderlich, da die Klebestelle beim Zugversuch einer hohen Schubspannung ausgesetzt ist. In der folgenden Tabelle 2.5 sind die charakteristischen Eigenschaften der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Harzsysteme und deren Komponenten aufgeschlüsselt nach den Bereichen Mechanik, Haptik und Fertigung zusammengetragen.

Q

Eigenschaft:	Einheit	Harzsyst	em L 20	Harzsy	stem L 1100
Mechanik		Epoxidharz L 20	Härter EPH 161, auch als VE 3261 bezeichnet	Epoxid- harz L1100	Härter EPH 294, auch als VE 5194/H bezeichnet
Dichte ¹²	g/cm ³	1,14 - 1,16	0,98; 1,0 +)	1,15	0,934 ±0,02
(density)	(20 °C)	zusamme	en: 1,158	1,135 (DIN 53479)	
Zugfestigkeit (Tensile strength)	MPa	70,2 N/	′mm² ⁺⁾	65,4 (DIN 53455)
Druckfestigkeit (Compressive strength)	MPa	125 N/2	mm ^{2 +)}		
Biegefestigkeit (Flexural strength)	MPa	130 N/2	mm ^{2 +)}	11 (DI	0 N/mm² N 53452)
E-Modul Zug E_H (Young's modulus)	MPa	3400 N/mm ^{2 +)}		3160 N/mm ² (DIN 53457)	
E-Modul Biegevers. (Flexural modulus)	MPa	3600 N/mm ^{2 +)}		2730 N/mm ² (DIN 53457)	
Schubmodul G _H	MPa	(bei 54 °C) 1019 N/mm ^{2 +)} 1030 N/mm		0 N/mm ²	
Querkontraktion V_H	-	0,3	35	0,35	
Bruchdehnung (Zug) (Elongation at break)	%	6 – 8 9,5 ⁺⁾		9,0 (DIN 53455)	
Schlagzähigkeit (Impact strength)	kJ/m²	4	0		
Biegewechsel- festigkeit	Lastwechsel	1.500.000			
Wärmeausdeh- nungskoeffizient	10 ⁻⁶ /K	60 - 70		6	50 - 70
Wärmeleitfähigkeit	W/mK	0,5	52	0,52	
Wärmebelastbarkeit	°C	max. 130-140 cher Temperun	°C (bei zusätzli- g 10h/100°C)		
Spez. elektrischer Widerstand	Ohm/cm (20 °C)	10	15		10 ¹⁵
Wasseraufnahme	24 h. 23 °C			0,13 % (DIN 53495)

Tabe

168 h, 23 °C

(Gew.-%)

0,34 %

¹² Bei Harzsystemen schwanken die Dichteangaben von 1,0 g/cm³ (überschlägiger Schätzwert) bis hin zu einem Regelwert zwischen 1,13 und 1,18 g/cm3. R&G (2003) geben Epoxidharz-Dichten zwischen 1,1 und 1,25 g/cm3 an, z. B. CARLSSON/PIPES (1989) 1,2 bzw. 1,265 g/cm3 für die Epoxidharze N5208 bzw. 3501-6.

Eigenschaft:	Einheit	Harzsyst	em L 20	Harzsystem L 1100		
Haptik/ Fertigung		Epoxidharz L 20	Härter EPH 161, auch als VE 3261 bezeichnet	Epoxid- harz L1100	Härter EPH 294, auch als VE 5194/H bezeichnet	
Chemische Charak- terisierung		Modifiziertes Epoxidharz	Epoxidhärter	Epoxid- harz	Epoxidhärter	
Inhaltsstoffe	Bisphenol-A-Epicl Bisphenol-F-Epicl	hlorhydrinharze >50 % hlorhydrinharze <25 % Epoxidderivate <25 %	Isophorondiamin 25 - 50 %	Bisphenol-A- Epichlor- hydrinharze > 50 % Oxiran < 10 %	Alkyletheramin > 50 % 3-Aminomethyl-3,5,5- trimethylcyclohexyl- amin 25-50 %	
Form		viskose Flüssigkeit	flüssig	flüssig	flüssig	
Farbe		hellgelb	hellgelb	gelblich	bläulich trans- parent	
Mischungsverhältnis (Gewichtsanteile)		100 : 100 : 29 (Volu	: 25 umenanteile)	1 100 : 37	.00 : 30 ' (Volanteile)	
Viskosität	mPas (25 °C)	750 - 1050	150 - 250	1200	55; 60 $\pm 20^{+)}$	
(dyn. bei 20°C)		gemischt: 560 ± 100		gemischt: 290		
Topfzeit	Minuten		90		400	
Kaltanhärtung	Stunden	24 h b	ei RT	10	- 15 h RT	
Warmhärtung/ Temperung	Stunden	15 h bei m	in. 60 °C	10 h	ı bei 70 °C	
Zulassung		Zugelassen für den Bau von Segel- + Motorflugzeugen vom Luftfahrtbundesamt (LBA)			n vom Germani- loyd für Wind- aftflügel	
Einsatzbeispiele		Segel- undMotorsport, FormenbaMotorflugzeugbauFlugzeugbau			ort, Formenbau, gzeugbau	
Verwendung		zum Aufkleben d. Aufleim- erstreifen auf Prüflaminate			rüflaminate	

Die untersuchten Verbundkunststofflaminate bestehen aus dem Epoxidharzsystem L 1100/EPH 294, welches als "*Standard-Laminier- und Klebeharz*" gilt. Wird **Epoxidharz L 1100** in Kombination mit dem langsamen **Härter EPH 294** verwendet, so ist dieses Harzsystem gemäß R&G (2008) "*für große Bauteile und zum Einstellen von* (dem schnelleren) *Härter EPH 295*" geeignet. Das Harz ist dünnflüssig und besitzt hervorragende Tränkungseigenschaften laut R&G (2003) sowie "*hohe statische und dynamische Festigkeit*" [R&G (2008)] und eine (GL-) "*Zulassung vom Germanischen Lloyd für die Herstellung hochbelasteter Windkraftflügel*" [R&G (2003)]. Es handelt sich um ein neuentwickeltes Epoxidharzsystem, das ein besonders günstiges Preis-Leistungsverhältnis aufweist. Anwendungsgebiete sind



Glas-, Aramid und Kohlefaserverbundwerkstoffe im Flugzeugbau, Modellbau, Sportgerätebau, Formenbau und Motorsport. [R&G (2003)]

Das zum Aufbringen der Aufleimer, in den Vorversuchen und bei der Bestimmung der Faservolumenanteile für die Reihenuntersuchungen verwendete **Epoxidharz L 20 mit Härter EPH 161** zeichnet eine sehr gute Benetzung der Fasern aus. Es ist daher "geeignet für Bauteile mit hoher statischer und dynamischer Festigkeit und erhöhter Wärmeformbeständigkeit". Obwohl es kaltanhärtend ist, wird "für Luftfahrtbauteile zusätzlich eine Warmhärtung erforderlich. Das Harzsystem ist vom Luftfahrtbundesamt (LBA) für den Flugzeugbau zugelassen." [R&G (2008)]

2.4 Herstellungsverfahren – Fasern+Matrix=Verbundwerkstoff

Bei "*der Verwendung duroplastischer Harzsysteme… entsteht der eigentliche Werkstoff mit der Bauteilherstellung, d. h. bei der Aushärtung.*" Folglich etablierten sich praktisch zeitgleich mit der Entwicklung der Faserverbundkunststoffe diverse Verfahren zur Herstellung von Bauteilen und Strukturen daraus. [FLEMMING et al. (1999)]

Alle Herstellungsverfahren haben eines gemeinsam: sie zielen darauf ab, Fasern und Matrix in geeigneter Weise zusammenzubringen. Mittlerweile gibt es eine Vielzahl solcher Verfahren. Es kommen stets neue Abwandlungen hinzu und eine klare Abgrenzung ist häufig nicht möglich. Daher soll hier ausschließlich auf die angewendeten Verfahren eingegangen werden. Bei Bedarf kann man sich relativ leicht weitere Verfahren aneignen, wenn die grundsätzliche Entstehungsweise von Faserverbundkunststoffen verstanden und die Grundlagen zur Mechanik verinnerlicht sind. Details zu weiteren Fertigungsverfahren können z. B. in MICHAE-LI/WEGENER (1990), WITTEN (2010) und NEITZEL/MITSCHANG (2004) nachgelesen werden. Nach letztgenannten beinhalten die einzelnen Herstellungsverfahren grundsätzlich – unabhängig von manueller oder industrieller Fertigung – die folgenden Prozessschritte, die zeitlich versetzt oder gleichzeitig erfolgen können:

- → Fasern imprägnieren,
- \rightarrow Verbund konsolidieren,
- \rightarrow Solidifikation.

Mit dem **Imprägnieren** ist das Benetzen jeder einzelnen Faseroberfläche mit Matrixwerkstoff gemeint, bis die Faser komplett von der Matrix ummantelt wird, wobei das Auffüllen der Faserzwischenräume eingeschlossen ist. Durch Vorwärmen der Textilien und/oder des Harzes lässt sich die Imprägniergeschwindigkeit erhöhen, da die Viskosität des erwärmten Harzes sinkt. Unter **Konsolidieren** ist das Kompaktieren bzw. Entlüften des flüssigen Kunststoffs zu verstehen, wodurch der Verbund verdichtet wird. In diesem Schritt wird der Faservolumenanteil maßgeblich eingestellt. Qualitätskriterium eines gut konsolidierten glasfaserverstärkten Kunststoffverbundes ist, dass er nahezu transparent aussieht (landläufige Umschreibung: "Es soll möglich sein, durch den Glasfaserverbund eine Zeitung zu lesen."). Transparenz gegen Licht wird nur erreicht, wenn die Fasern vollständig getränkt und nicht viele Lufteinschlüsse enthalten sind, denn an den Grenzflächen bricht sich das Licht, die Bereiche erscheinen mil-

chig. Diese Transparenzeigenschaft kann man sich, wie später in Abschnitt 2.5 beschrieben, bei der Herstellung der Prüflaminate zu Nutze machen, indem die Faserablage anhand von Markierungen in der Form ausgerichtet wird. Mit **Solidifikation** wird das Härten des Faser-Flüssigmatrix-Gemisches durch chemische Vernetzungsreaktion bezeichnet. Dabei entsteht die finale Bauteilgeometrie.

2.4.1 Handlaminierverfahren

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf dem Handlaminierverfahren, das um die Vakuumtechnik aus dem folgenden Abschnitt erweitert wird. Das Handlaminierverfahren gehört zu den **Naßlaminiertechniken**, die gemeinhin als die einfachste Möglichkeit gelten, Faser und Matrix zusammenzufügen. Dabei geschieht der Harzeintrag z. B. mittels Pinseln und Rollen oder indem die Fasern durch ein Harzbad gezogen werden. Anschließend erfolgt die Aushärtung in der dafür vorgesehenen Form. Zu Beginn der Faserverbundtechnologie wurde das gesamte trockene Faserhalbzeug in der Form positioniert, anschließend die abgewogene flüssige Matrixmenge hinzugefügt, um sie mittels Rollen, Pinseln oder Spachtelwerkzeugen in die Fasern einzuarbeiten. Insbesondere im Falle von komplizierten Bauteilgeometrien führte diese Vorgehensweise jedoch zu starken Schwankungen in der Bauteildicke, da der Harzeintrag durch die einzelnen Faserschichten hindurch über die Fläche des Bauteils variierte, was eher für ein schichtweises Vorgehen spricht. [FLEMMING et al. (1999)]

Das Naßlaminierverfahren bezeichnet im Allgemeinen das "nasse Tränken" einer Faserverstärkung mit einer Reaktionsharzmasse. Als Faserverstärkung kommen dabei alle bereits in Abschnitt 2.2.6 behandelten Faserhalbzeuge in Betracht. Dabei hat sich die Souterrain- oder Garagentechnik (Rollen/Pinsel-Verfahren) innerhalb der Naßtechniken etabliert, da man hier mit einer sehr einfachen Methodik und Werkzeugen arbeiten kann. "*Mit einem Becher kalthärtendem Harz, einem Fasergewebe, einer einfachen Holzform und einem Pinsel (können) nicht nur einfache, sondern auch komplexe Faserverbundbauteile*" hergestellt werden. Das zunächst einfach anmutende Verfahren entbindet jedoch nicht von Arbeits- bzw. Gesundheitsschutzmaßnahmen, welche insbesondere beim offenen Naßlaminierverfahren weiterer Vorkehrungen bedürfen, bspw. einen angemessenen Atemschutz. [FLEMMING et al. (1999)]

Nach Aussage von FLEMMING et al. (1996), (1999) ist das **Handlaminierverfahren**, das teilweise in der Literatur auch als Handlegeverfahren (z. B. bei NEITZEL/MITSCHANG (2004)) bezeichnet wird, "*das wohl älteste, aber immer noch bewährte und äußerst einfache und flexible Verfahren zur Herstellung von Faserverbundbauteilen"*, da der Umfang der benötigten "*verfahrenstechnischen Peripherieeinrichtungen"*, wie NEITZEL/MITSCHANG (2004) sie nennen, gering ist, was proportional zu den Investitionskosten zu sehen ist. Prinzipiell reicht eine Form aus bspw. Holz, Gips oder einer anderen Modellmasse aus, um darin ein Faserhalbzeug in ein Reaktionsharz (z. B. Epoxidharz) zu betten. Bedingung ist nur, dass sie unter Belastung beim Laminieren bzw. durch die Gewichtskraft des Laminats formstabil bleibt. Die Oberfläche des Formwerkzeugs bestimmt maßgeblich die spätere Bauteiloberflächenqualität. Der Formenbau ist daher eine Wissenschaft für sich. Der prinzipielle Aufbau des Handlaminierverfahrens kann Bild 2.24 entnommen werden. Die gezielt orientierte Faserablage und das Tränken des Fasermaterials mit Harz geschehen gewöhnlich in einem Arbeitsschritt durch sukzessives Einrollen des Harz-Härter-Gemisches in die positionierten Fasern gegen die Form. Dabei gilt es, so viel Harz wie nötig, aber so wenig wie möglich zu verwenden. Diese





Bild 2.24: Schematische Darstellung des Handlaminierverfahrens [Bildquelle: FUNKE (2001)]

Um im Handlaminierverfahren eine gute Durchtränkung aller Fasern zu erzielen, werden die einzelnen Faserlagen sorgfältig nacheinander bis zur gewünschten Bauteildicke auflaminiert. Hier kommt der Auswahl eines geeigneten Harz-Härter-Systems in Bezug auf die Viskosität zentrale Bedeutung zu und stellt den Anwender vor ein Optimierungsproblem. Einerseits muss das Harz so dünnflüssig sein, dass eine möglichst gleichmäßige Harzverteilung beim Handlaminieren erzielt werden kann. Mit einem niedrigviskosen Harz lassen sich die Fasern einfacher und schneller tränken sowie einlaminierte Gaseinschlüsse wenigstens zum Teil beseitigen. Ein geringerer Kraftaufwand ist erforderlich. Gleichzeitig muss insbesondere im Fall von komplexen dreidimensionalen Bauteilstrukturen beachtet werden, dass das verwendete Harz so viskos ist, "dass es an schrägen und senkrechten Bereichen des Bauteils nicht abtropft und (dem Gefälle folgend) abfließt, was harzarme und harzreiche Stellen" zur Folge hat, zumal die Viskosität bei der Temperung¹³ zeitweilig abermals abfällt. Diesem Problem kann aber entgegengewirkt werden. Es empfiehlt sich, den Harzansatz in kleinen Portionen vorzubereiten, vorzuwärmen und erst kurz vor der Verwendung mit dem Härter anzumischen. Dadurch kann die Viskosität herabgesetzt, die Verarbeitungszeit verlängert und somit die Harzverteilung verbessert und einem "Verkochen" des zu großen Harz-Härter-Ansatzes vorgebeugt werden. [FLEMMING et al. (1999)]

Bauteilherstellung im Handlaminierverfahren

Soll ein anspruchsvolleres Bauteil im Handlaminierverfahren entstehen, so schlägt EHREN-STEIN (2006) das folgende Vorgehen vor. Zunächst wird die Form mit einer Schicht Trennmittel (Wachs oder Lösung) imprägniert, die ein dauerhaftes Festkleben der harzgetränkten Fasern verhindert und so die Entformung des angehärteten Laminats begünstigt. Offene Bauteile lassen sich dann unter Zuhilfenahme eines Spachtels i. d. R. gut von der Form lösen. Um eine möglichst glatte, rissfrei bleibende Bauteiloberfläche zu erzielen und ein Abzeichnen der da-

¹³ Aushärten des Bauteils bei erhöhter Temperatur

runterliegenden Fasern zu verhindern, wird eine Gelcoatschicht verwendet. Diese einfärbbare Feinschicht besteht aus gefülltem Harz (bspw. mit Baumwollflocken, was auch gerne als Füllmaterial zur Ausbildung von Ecken genutzt wird) und beträgt weniger als einen Millimeter. Zur Optimierung der Oberfläche können zusätzlich Vliese oder dünne Gewebe in die Gelcoatschicht einlaminiert werden. Dann erfolgt erst der schichtweise Aufbau des eigentlichen Laminats. Dabei ist die Anzahl der in der Form aufeinander gestapelten Faserhalbzeuglagen und Verstärkungsschichten nach FLEMMING et al. (1999) nahezu beliebig. Zu große Wandstärken widersprechen jedoch gewöhnlich dem Leichtbaugedanken. Die auf diese Weise mit Gewebeverstärkungen im Handlaminierverfahren erzielten Faservolumenanteile betragen EHRENSTEIN (2006) zufolge zwischen 40 % bis 45 %.

Das **Anhärten** des verwendeten Harz-Härter-Gemisches erfolgt im einfachsten Fall bei Raumtemperatur. Die Vernetzungsreaktion läuft exotherm ab und setzt in Abhängigkeit von der Topf- bzw. Verarbeitungszeit des Harzsystems ein. Mittels Wärmezufuhr, bspw. durch Warmluft, kann der Härtungsprozess zusätzlich beschleunigt werden. Bei manchen Harzsystemen findet eine nahezu vollständige Vernetzung (**Aushärtung**) erst unter Wärmeeintrag statt. [FLEMMING et al. (1999)]

Vor- und Nachteile

nach FLEMMING et al. (1999), MICHAELI/WEGENER (1990), NEITZEL/MITSCHANG (2004):

- \rightarrow Das einfache Handlaminierverfahren ist investitionsarm.
- → Ein weiterer Vorteil ist, dass sich auch komplizierte Bauteilgeometrien realisieren lassen, z. B. sehr große Bauteile wie Bootsrümpfe oder Hinterschnitte durch geteilte Werkzeuge. Das Handlaminierverfahren bietet dem Konstrukteur Gestaltungsfreiheit aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten. Es eignet sich somit weiterhin bestens zur Fertigung von Prototypen, Unikaten und Kleinserien.
- → Das Handlaminierverfahren ist lohnkostenintensiv, erfordert längere Taktzeiten, und ist damit nicht (groß-) serientauglich, weil der Materialdurchsatz vergleichsweise zu gering ist. Das Handlaminierverfahren dient aber oftmals als Vorläufer der Serienfertigung, da die gewöhnlich günstigen Formen in der Entwicklungsphase preiswert angepasst, verändert oder neu hergestellt werden können, was konstruktive Änderungen mit relativ geringem Aufwand ermöglicht (gegenüber teuren Formwerkzeugen in der Serienfertigung).
- → Die Qualität des Handlaminats ist stark abhängig vom handwerklichen Geschick des Verarbeiters. Problematisch sind dabei wie bei jedem manuellen Verfahren die Einhaltung und die Reproduzierbarkeit der typisch prozessbezogenen Parameter wie bspw. Dickentoleranzen, Faservolumenanteil und Oberflächenqualität. Ein erfahrener Laminierer zeichnet sich dadurch aus, dass er relativ gleichbleibende Ergebnisse erzielt, bei einem weniger erfahrenen Anwender sind größere Schwankungen der Parameter zu erwarten. Ferner ist es beim Handlaminieren nicht trivial, eine vorgegebene Faserrichtung exakt einzustellen. Prinzipiell lässt sich dem nur mit einer Überdimensionierung begegnen, um die Konstruktion mit ausreichender Sicherheit auszulegen. Das geht zu Lasten des Leichtbaus.



- → Unterschiedliche Oberflächenqualitäten sind einstellbar durch Gelcoat, spezielle Oberflächenvliese, etc.
- → Da im einfachen Handlaminierverfahren der Konsolidierungsprozess der nasslaminierten Faserlagen nicht so ausgeprägt erfolgt, wie in der um die Vakuumtechnik erweiterten Variante (vgl. den nächsten Abschnitt 2.4.2), ist der Porengehalt höher als bei einer Härtung unter Druck, und es stellen sich eher geringe Faservolumenanteile (30 % bis 45 %), die größeren Streuungen unterworfen sind, ein. Erstmal einlaminierte Lufteinschlüsse lassen sich schlecht wieder vollständig entfernen, was zu hohen Laminatporengehalten führen kann. Durch Poren im Faserverbundkunststoff verschlechtern sich die statischen Festigkeiten und die Ermüdungsfestigkeiten [EHRENSTEIN (2006)]. Das ist nicht unproblematisch, wenn die Auslegungsdaten im Falle tragender Bauteilstrukturen gewöhnlich statistisch abgesichert werden müssen. Daher wird "*das Verfahren… fast nur für niedrig belastete Bauteile angewendet"*. [FLEMMING et al. (1999)]

2.4.2 Vakuumverfahren

Das Vakuumverfahren (oder auch Vakuumsackverfahren genannt) zählt gemäß FLEMMING et al. (1999) zu den Naßimprägnier- oder Naßlaminierverfahren, das eine Abwandlung der Handlaminiermethode darstellt und zu den Niederdruckverfahren gehört. Dabei werden die Fasern wie beim Handlaminieren auch in einer Form abgelegt und mit Harz getränkt, wie in Bild 2.25 zu sehen ist, um anschließend mit einem Abreißgewebe, Lochfolie und Saugvlies abgedeckt zu werden. Der Abschluss hängt im Wesentlichen davon ab, welche Oberflächengüte auf der Bauteilinnenseite erzielt werden soll. Mit der Verwendung eines Abreißgewebes (vgl. Abschnitt 2.2.6.4) können bestimmte Rauhtiefen erzielt und ein späteres Anschleifen erspart werden. Ist eine glatte Oberfläche gefragt, würde anstelle des Abreißgewebes eine Trennfolie verwendet, sofern keine zu starke Wölbung der Struktur entgegenspricht.



Bild 2.25: Schematischer Aufbau des Vakuumverfahrens zur Herstellung von Faserverbundbauteilen [Bildquelle: modifiziert nach CS-INTERGLAS in R&G (2009)]

Der Aufbau wird in einen Vakuumfolienschlauch geschoben, mit umlaufender Dichtung abgedichtet und evakuiert. In der Regel werden durch den atmosphärischen Druck eine gleichDie im Rahmen dieser Arbeit zu untersuchenden faserverstärkten Kunststofflaminate entstehen im Vakuumverfahren bei 0,7 bar Umgebungsdruck. Auf Lochfolie und Saugvlies kann dabei verzichtet werden, da die Verwendung von beidem zu unnötig ungleichmäßiger Verteilung des Harzes unter den Ansauglöchern führt.

2.5 Von der Laminatherstellung bis zum fertigen Prüfkörper

Wie ein Faser-Kunststoff-Verbund auszulegen und zu berechnen ist, beschreibt die VDI-RICHTLINIE 2014 (1989, 1993, 2006). Dazu werden möglichst verlässliche Werkstoffkenndaten benötigt. Als Eingangsgrößen für deren Berechnung sind zum einen fertigungsbedingte wie auch mechanische Kenngrößen zwingend erforderlich, die jedoch nicht immer bekannt sind. Die wesentlichste fertigungsbedingte Kenngröße beschreibt der Faservolumenanteil φ , der größtenteils durch das Herstellungsverfahren des Schichtverbundes beeinflusst und während dieses Prozesses festgelegt wird. Die Gruppe der mechanischen Kenngrößen umfasst die elastischen Parameter Elastizitätsmodul, Schubmodul und Querkontraktionszahl. Die verlässlichsten Aussagen über die genannten Kenngrößen des Verbundes erhält man durch Materialtests, die aufgrund des anisotropen Werkstoffverhaltens richtungsabhängig zu erfolgen haben. Wie daraus die Werkstoffkennwerte generiert werden, verrät Abschnitt 2.7.2.

Die durchzuführenden Materialtests zur Bestimmung der charakteristischen elastischen Kennwerte setzen repräsentative Werkstoffproben voraus. Daher wird zunächst eine Methodik benötigt, die die Herstellung der Prüfkörper festlegt und zu möglichst aussagekräftigen Materialkennwerten der faserverstärkten Kunststoffe führt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher zunächst eine Literaturauswertung durchgeführt. Zusammengestellt und ausgewertet für Experimente mit glasfaserverstärkten Kunststoffverbunden (GFK) wird diese in DAU (2006), aufbauend auf KOKE (2005). Methodisch aufbereitet münden die Überlegungen in die in Bild 4.38 identifizierten Phasen und Meilensteine aus dem zu dieser Arbeit gehörenden E-Learningangebot zur Faserverbundmechanik [E-MECHLAB EXPERIMENTE (-ol) und auf der beiliegenden DVD], vgl. Abschnitt 4.5.6.4. Weitgehend standardisiert sind dabei Aspekte der Versuchsplanung wie bspw. die Probengeometrie (vgl. Abschnitt 2.5.6.2) und der Zugversuchsdurchführung wie etwa die einzuhaltende Prüfgeschwindigkeit (vgl. Abschnitt 2.6.1) und orientieren sich an normativen Vorgaben. Die Phasen der Prüflaminat- und Prüfkörperherstellung, die in Bild 2.26 näher aufgeschlüsselt werden, interessieren in diesem Abschnitt besonders. Auf eine vollständige Wiederholung der fertigungstechnischen Details wird an dieser Stelle jedoch verzichtet, es sei lediglich auf einzelne, für das Verständnis wichtige Aspekte hingewiesen.

Weitere Materialtests führten im Rahmen dieser Arbeit DAU (2007) mit GFK und TOMBERS (2008) darüber hinaus mit kohlenstoff- (CFK), basalt- (BFK) und aramidfaserverstärkten Kunststoffen (AFK) unter Anleitung der Verfasserin durch. Letztgenannte Experimente erfordern Anpassungen der erarbeiteten Methodik in Bezug auf materialspezifische Besonderheiten. Auf deren Erkenntnisse und Ergebnisse gehen dieser und die folgenden Abschnitte ein.


Bild 2.26: Verfahrensschritte (Phasen und Meilensteine) zur Herstellung von Prüflaminaten und Prüfkörpern [Bildquelle: nach DAU (2007)]

Q

In diesem Abschnitt wird die Vorgehensweise zur Herstellung von Prüfkörpern aus handlaminierten fasergewebeverstärkten Kunststoffen vorgestellt, die die folgenden Arbeitsschritte beinhaltet: Nach Festlegung des Versuchsprogramms werden zunächst Faser-Kunststoff-Laminate (sog. Probelaminate) unter definierter Winkelablage der Fasern hergestellt, deren produktionsspezifische Kenndaten wie der Faservolumenanteil zu bestimmen sind. Aus den Probelaminaten werden streifenförmige Materialproben herausgetrennt, die in weiteren Schritten zu Zugproben weiterverarbeitet werden.

2.5.1 Festlegung des Versuchsprogramms – Versuchsplanung

Faser-Kunststoff-Verbunde mit Verstärkungsfasern aus Glas, Kohlenstoff, Aramid und Basalt sollen der werkstoffmechanischen Untersuchung im einachsigen Zugversuch unterzogen werden. Wie viele Experimente sind pro Werkstoffkombination – also pro Verstärkungsfasergewebe kombiniert mit ein- und demselben Epoxidharz – für die Bestimmung von jeweils drei Materialkennwerten erforderlich? Vgl. dazu die auf die Theorie gestützten Überlegungen in Abschnitt 3.7.4, nach denen die Untersuchung vier verschiedener Faserorientierungen je Materialpaarung ausreicht. Jeder weitere Winkel dient der Absicherung und erhöht die Genauigkeit der Aussagen. Abzuwägen ist dabei der Aufwand, der mit der Prüfkörperfertigung einhergeht und die Grenzen der fertigungstechnischen Genauigkeit gegenüber dem Wunsch, ein möglichst vollständiges und repräsentatives Bild der Materialeigenschaften unter Berücksichtigung der Anisotropie zu erhalten.

Die Entscheidung fällt auf fünf verschiedene Orientierungswinkel der Faser im Laminat, die untersucht werden sollen. Wie die angegebenen Laminatorientierungswinkel zu verstehen sind, erläutert Abschnitt 2.5.2. Beginnend bei einer Faserorientierung der Kettfäden des Gewebes von $\alpha_{Kett} = 0^{\circ}$, sodass die spätere Lasteinleitungsrichtung und Kettfadenorientierung zusammenfallen, weisen die weiteren Prüfkörper einen um jeweils 15° gegen den Uhrzeigersinn gedrehten Winkel auf. Aus dem Winkelversatz von 15°, mit dem die Zuschnitte aus der Gewebebahn herausgetrennt werden, ergeben sich die folgenden Orientierungswinkel der Kettfäden im späteren Prüfkörper:

$$\alpha_{\text{Kett}} = 15^{\circ} \cdot n \begin{cases} \min n = 0, 1, 2, 3, 6 \text{ im Falle von unsymmetrischen Geweben} \\ \min n = 0, \frac{1}{3}, 1, 2, 3 \text{ für symmetrisch aufgebaute Gewebe} \end{cases}$$
(2.3)

Als unsymmetrisches oder unsymmetrisch aufgebautes Gewebe wird dabei ein Gewebe bezeichnet, dessen Kettfäden eine abweichende Fadenzahl und/oder -stärke gegenüber den Schussfäden aufweisen. Das ist bei dem in dieser Arbeit untersuchten Glas- und Aramidfasergewebe der Fall, siehe dazu Tabelle 2.4 in Abschnitt 2.2.7. Symmetrisch aufgebaute Gewebe zeichnen sich durch identische Kett- und Schussfäden aus, wie im Falle des verwendeten Kohlenstoff- und Basaltfasergewebe (vgl. ebenfalls Tabelle 2.4).

Ein Versuchsumfang von mindestens fünf Prüfkörpern pro Laminataufbau, wie DIN EN 2561 (1995) für unidirektionale CKF-Proben fordert, soll dabei pro Werkstoffkombination und Orientierungswinkel geprüft werden. Die verschnittoptimierten Gewebezuschnitte für die Probelaminate sind so bemessen, dass aus einem Probelaminat acht Prüfkörper herausgetrennt werden können. Zur Sicherheit umfassen die Untersuchungen mindestens zwei Probelaminate pro Werkstoffkombination und Orientierungswinkel, die herstellungsbedingt geringfügig in

ihrem Faservolumenanteil voneinander abweichen, sodass dennoch mindestens fünf Prüfkörper aus einem Probelaminat unmittelbar vergleichbare Ergebnisse liefern.

2.5.2 Gewebezuschnitt

Aufgrund der anisotropen Werkstoffeigenschaften von Faserverbundkunststoffen ist es erforderlich, die Materialprüfung in Abhängigkeit der Faserorientierung im Laminat durchzuführen. Diesen Laminatorientierungswinkel gilt es möglichst sorgfältig einzustellen, um aussagekräftige experimentelle Ergebnisse zu erhalten; der Grundstein dafür wird mit dem Zuschnitt der Fasergewebe gelegt.

Eine Alternative ist, die Prüfkörper mit der gewünschten Faserorientierung aus größeren $[0^{\circ}/90^{\circ}]$ -"Standard"-Gewebelaminaten herauszutrennen. Vorteilhaft ist daran der relativ einfache Gewebezuschnitt, bei dem die Schablone parallel zum Faserverlauf ausgerichtet wird. Dabei fällt jedoch – zumindest für Winkel $\neq 0^{\circ}$ bzw. 90° – sehr viel Laminatverschnitt an. Bei der anderen Alternative erfolgt die Einstellung des Faserorientierungswinkels bereits beim Gewebezuschnitt. Von letztgenannter Verfahrensweise wird hier zur verschnittoptimierten Herstellung der Prüfkörper Gebrauch gemacht, wie nachfolgend vorgestellt, da auf diese Weise außerdem die Richtungstreue der Fasern besser sichergestellt werden kann.



Bild 2.27: Zuschnitt der Gewebelagen für das Probelaminat [Bildquelle: nach TOMBERS (2008)]

Wie der schematischen Darstellung in Bild 2.27 zu entnehmen ist, richtet sich der angegebene Winkel für die Faserorientierung nach der Winkelabweichung der Schablone und damit der Längsachse der späteren Zugproben ggü. den Kettfäden (vgl. Abschnitt 2.2.6). Der Winkel gibt folglich die Abweichung der (Kett-) Faserrichtung gegenüber der Belastungsrichtung an. Mittels Rollmesser, entlang der Kante einer formstabilen und entgrateten Schablone geführt, sind präzise Gewebezuschnitte von Glas-, Kohlenstoff- und Basaltfasern möglich. Im Falle des Aramidfasergewebes erfolgt der Zuschnitt mittels microverzahnter Schere anstatt des Rollmessers. Auch hier leistet eine Schablone nützliche Dienste, dient sie doch zum Anzeichnen der späteren Scherenschnittkanten (z. B. mit wasserfestem Marker).

Durch Drehung der Zuschnittschablone um $-\alpha_{Kett}$ erhält man einen Gewebezuschnitt, dessen Kettfadenorientierung um α_{Kett} ggü. den Zuschnitt- und gleichzeitig späteren Laminatkanten gedreht ist. Im abgebildeten Beispiel (Bild 2.27) wird exemplarisch eine Faserablage von $\alpha_{Kett} = 30^{\circ}$ für das Probelaminat, aus welchem später die Materialproben herausgetrennt werden, vorbereitet, sodass daraus Zugproben $[\alpha_{Kett}/\alpha_{Schuss}]_n = [30^{\circ}/120^{\circ}]_n$ entstehen können. Dabei bezeichnet α die Winkel, unter denen die Fasern in Bezug auf ein globales Laminat-Koordinatensystem orientiert sind; α_{Kett} bezieht sich auf die Kettfasern, α_{Schuss} auf die Schussfasern. Der Index *n* steht für die Anzahl der Gewebelagen, aus denen das Prüflaminat bestehen wird. Im Falle der AFK-, BFK- und CFK-Laminate beträgt n = 4 und bei den GFK-Laminaten n = 8. Der Einfachheit halber wird dann in Abschnitt 2.7 und 3.8.3 für das hier beschriebene Beispiel von 30^{\circ}-Versuchen gesprochen. Die Angabe bezieht sich auf die Orientierung des Kettfadensystems. Diese Bezeichnungsweise deckt sich auch mit der von Lami*Cens*[©] verwendeten Definition des Laminatwinkels im Falle eines Gewebes (vgl. Abschnitt 3.8.1).



Bild 2.28: Faserorientierung: Funktionswinkel von Kett- und Schussfäden im Gewebe-Zuschnitt des Probelaminats

"Der Faserwinkel α hat einen positiven Wert, wenn man durch mathematisch positive Drehung – d. h. entgegen dem Uhrzeigersinn – von der x-Richtung (Laminat-Koordinatensystem) in die 1-Richtung (Schicht-Koordinatensystem) gelangt." [SCHÜRMANN (2007)] Zu den abgetragenen Winkeln muss folgendes erläutert werden. Streng genommen müssten selbstverständlich auch die Schussfäden ihr eigenes Einzelschichtkoordinatensystem bekommen, da beide Fadensysteme eines Gewebes in der klassischen Laminattheorie als zwei unidirektionale Einzelschichten modelliert werden (vgl. dazu auch Abschnitte 3.7.1 und 3.7.2). Würde man Kett- und Schussfäden gedanklich separieren, stellt sich der Sachverhalt wie in Bild 2.28 verdeutlicht, dar. Dabei wird das Laborkoordinatensystem mit x, y bezeichnet, wobei x im hier gewählten Beispiel die Lasteinleitungsrichtung repräsentiert¹⁴. Die Einzelschicht der Kettbzw. der Schussfäden wird in 1, 2-Koordinaten ausgedrückt. Die Richtung der Fasern wird

¹⁴ Die Lasteinleitungsrichtung wird bei den in dieser Arbeit vorgestellten realen Laborversuchen abweichend davon mit y bezeichnet, damit eine identische Nomenklatur zu der der Messsoftware verwendet werden kann.

dabei per Konvention immer mit der 1-Richtung identifiziert. Die Orientierung der Schussfäden α_{schuss} ergibt sich relativ zu der der Kettfäden α_{kett} durch die folgende Beziehung:

$$\alpha_{\rm Schuss} = \alpha_{\rm Kett} + \pi/2 \,. \tag{2.4}$$

Dieser Terminologie für die Winkelangaben bei mathematisch positiver Drehung folgend, erhält das in dieser Arbeit untersuchte Versuchsprogramm aus dem vorherigen Abschnitt 2.5.1 die Beschreibungen $[0^{\circ}/90^{\circ}]_n$, $[5^{\circ}/95^{\circ}]_n$, $[15^{\circ}/105^{\circ}]_n$, $[30^{\circ}/120^{\circ}]_n$, und $[45^{\circ}/135^{\circ}]_n$. Zur Bezeichnung des letztgenannten Sachverhaltes findet sich häufig in der Literatur die Angabe $[\pm 45^{\circ}]$, was synonym verwendet wird, da die Schussfäden sowohl nach Drehung um +135^{\circ} als auch um -45^{\circ} vom Laborkoordinatensystem anzutreffen sind. Formal korrekt ist diese Bezeichnung im Rahmen der hier gewählten Definitionen nicht, dem menschlichen Vorstel-lungsvermögen kommen jedoch Winkelangaben $\leq 90^{\circ}$ eher entgegen.



Bild 2.29: Zuschnittproblematik bei fehlender Faserausrichtung [Bildquelle: TOMBERS (2008)]

DIN EN 2747 (1998) gestattet Abweichungen von $\pm 1^{\circ}$ des tatsächlich im Probelaminat bzw. im späteren Prüfkörper vorliegenden Faserorientierungswinkels von der nominellen Angabe. Durch vorherige Ausrichtung der Kett- und Schussfäden auf dem Zuschneidetisch kann die Genauigkeit der Faserablage erhöht werden. Dabei sind Konstellationen, wie in Bild 2.29 überzeichnet dargestellt, zu vermeiden.

2.5.3 Faserablage von Geweben, Stapelfolge

Um späteren Bauteilverzug zu vermeiden, ist auf einen symmetrischen Aufbau des Laminats zur Mittelebene zu achten, wie Bild 2.30 veranschaulicht. In dem Zusammenhang wird auch von einem orthotropen Aufbau gesprochen. Bei Geweben in Leinwandbindung ist diese Forderung ohnehin erfüllt (zu den einzelnen Gewebebindungen vgl. Abschnitt 2.2.6). Nicht jedoch bei Geweben anderer Bindungsart wie Köper oder Atlas, wie Bild 2.31 zeigt, denn hier weist die Oberfläche eine Faservorzugsrichtung auf, sodass ein symmetrischer Aufbau erreicht wird, indem "*z. B. zwei Lagen spiegelbildlich zueinander abgelegt werden*". [VDI-RICHTLINIE 2014 (1993), Blatt 2] In der gewebeverarbeitenden Industrie wird von der "rechte-Hand-linke-Hand-Regel" gesprochen, wenn bei der Ablage von Köpergeweben jeweils die durch den Köpergrat gekennzeichnete Diagonale abwechselnd an der rechten und dann an der linken Hand beginnen soll.



Leinwandbindung: einlagig, verzugsfrei



Atlasbindung: zweilagig, verzugsfrei gestapelt

Bild 2.31: Stapelfolge bei Gewebelaminaten unterschiedlicher Bindungsart zur Vermeidung von Verzug [Bildquelle: VDI-RICHTLINIE 2014 (1989), Blatt 2]

Die Basaltfaserproben weisen Leinwandbindung auf, daher ist hier die Symmetriebedingung erfüllt. Im Falle der übrigen Zugproben liegt ein Köpergewebe vor, das gemäß der Bindungsform zwischen Leinwand- und Atlasbindung einzuordnen ist, wie in Bild 2.16 zu sehen ist.

Bei der Herstellung der Versuchsproben aus Köpergewebe wurde der rechts in Bild 2.31 vorgeschlagenen Stapelfolge nicht entsprochen, was evtl. eine leichte Verwölbung mit sich bringen könnte. Diese wurde nach Aushärtung jedoch nicht beobachtet. Die Entscheidung fiel gegen die abwechselnde Stapelfolge, weil diese bei den Versuchen ungleich 0° und 90°

- → mehr Verschnitt verursacht hätte,
- → sich der Zuschnitt und die Faserablage verkompliziert hätten, auch fehleranfälliger geworden wären und
- → größere Ungenauigkeiten bei den definiert einzustellenden Faserorientierungswinkeln ggü. der Zugrichtung hätten in Kauf genommen werden müssen.

Allerdings zeigte sich eine leichte Verwölbung nach Aufsprühen des Entwicklersprays (Titandioxid gelöst in Alkohol) zum Weißen und Mattieren der Probenoberfläche vor Aufbringung des stochastischen Musters (vgl. dazu Abschnitt 2.5.7 und für mögliche Ursachen in der Matrix Abschnitt 2.3).

2.5.4 Laminieren – Fertigungsprozess der Prüflaminate

Das prinzipiell in Abschnitt 2.4 dargestellte Handlaminierverfahren (erweitert um Vakuumtechnik) konkretisiert der schematische Aufbau in Bild 2.32.

- → Dabei wird auf einer gereinigten und entfetteten sowie trennmittelbeschichteten Grundplatte (, die formstabil sein sollte,) zunächst ein Abreißgewebe abgelegt, das für eine definiert raue Oberfläche der späteren Prüfkörperrückseite sorgt, um einerseits ein Extensometer zur Dehnungserfassung rutschsicher anbringen zu können, andererseits viel Oberfläche für eine optimale Klebung des Aufleimerlaminats zu erzielen.
- → Es folgt der schichtweise Aufbau des Prüflaminats aus dem zu untersuchenden Gewebe, das sukzessive mit dem Harz/Härter-Gemisch getränkt wird. Der Tränkvorgang erfolgt mit Hilfe von Laminierrollen, mit denen das Harz, das bedarfsgerecht entsprechend dem vom Hersteller angegebenen Mischungsverhältnis mit Härter angemischt wurde, in das Fasergewebe eingearbeitet wird. Es empfiehlt sich, den Harzansatz portionsweise vorzubereiten, um einem "Verkochen" vorzubeugen und die Topfzeit optimal auszunutzen. Zur Herabsetzung der Viskosität kann das Harz zuvor im Wasserbad angewärmt werden. Für eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Harz/Härter-Gemisches soll ein häufiges Überrollen in Faserrichtung mit geringem Druck sorgen. Dabei gilt es, Harzansammlungen wie auch ungetränkte Bereiche zu vermeiden. Gleichmäßige und systematische Bewegungen der harzgetränkten Schaumstoffwalze können helfen, das vollständige Benetzen der Fasern sicherzustellen. Die dafür benötigte Harzmenge kann zuvor mit Hilfe der Software Lami*Cens*[©] [FUNKE (2005c)] überschlägig berechnet werden.
- → Die Gewebefaserablage selbst erfolgt mit Hilfe einer Ablagevorrichtung, um einen Versatz der Zuschnitte zu verhindern, entlang von zuvor auf der Grundplatte aufgebrachten Markierungen. Diese Hilfslinien erleichtern die positionsgenaue und winkelgetreue Ablage der Gewebezuschnitte. Positiver Nebeneffekt bei Glas- und Aramidfasern: Werden die Fasergewebe entlang von Markierungen (z. B. gezogen mit wasserfestem Marker) in der Form ausgerichtet, so übertragen sich diese Markierungen auf das Laminat, was später den Zuschnitt und das Aufbringen der Aufleimerlaminate erleichtert.
- → Insbesondere bei den Kohlenstofffaserproben ist auf eine ausreichende Tränkung der Laminate mit Harz zu achten, da die – zwar möglichen – hohen erzielbaren Faservolumenanteile um 50 % den Nachteil mit sich bringen, wie sich später zeigen wird, dass die lineare Mischungsregel bei der Anwendung der CLT nicht mehr als ausreichend angesehen werden kann. So schlägt auch SCHÜRMANN (2007) vor, bei Kohlenstofffasern mit Harzüberschuss zu arbeiten, da die gleichmäßige Benetzung aufgrund der dunklen Färbung des Werkstoffs schlecht zu erkennen ist. Das überschüssige Harz wird schließlich im Vakuumverfahren wieder aus dem Faser-Harz-Gemisch herausgedrückt. In gleicher Weise

wird bei der Herstellung der Aramid- und Basaltfaserlaminate verfahren, wobei hier die Tränkung vergleichsweise besser erkennbar ist.

- → Zu beachten gilt, dass die UV-empfindlichen Aramidfasern ebenso wie die daraus gefertigten AFK-Laminate während des gesamten Herstellungsprozesses bis hin zur zerstörenden Materialprüfung lichtgeschützt gelagert werden müssen. [SCHÜRMANN (2007)]
- → Im Anschluss an den lagenweisen Aufbau des Laminats besteht die Möglichkeit, mittels eines bedruckbaren Kopiervlieses (Glasvlies 40 g/m²) eine eindeutige Probenkennzeichnung aufzubringen. Die einlaminierte Kennzeichnung erfolgt zur Kodierung des hergestellten Laminataufbaus anhand eines Klassifizierungssystems, das z. B. die Faserart, Grammatur, Lagenzahl, Faserwinkel, das jeweilige Probelaminat und die Probe beinhaltet. Es dient (später) zur eindeutigen Dokumentation und strukturierten Datenablage der Materialprüfungsergebnisse. Ein optimales Ergebnis wird damit auf hellen Fasertypen wie Glas oder Aramid erzielt. Ein dunkler Fasertyp (Kohlenstoff, Basalt) bietet nicht den notwendigen Kontrast, um die Schrift auf dem zarten Kopiervlies, das einlaminiert nahezu transparent erscheint, erkennen zu lassen. Behelfsweise kann hier die Kennzeichnung auf den Aufleimerlaminaten aus GFK (vgl. Abschnitt 2.5.6.3) aufgebracht werden.
- → Wo später die Aufleimerlaminate aufgeklebt werden sollen, wird als letzte Schicht Abreißgewebe (vgl. Abschnitt 2.2.6.4), das auch in schmalen Streifen mit sauberen Abschlusskanten als sog. Abreißgewebeband erhältlich ist, auflaminiert. Da das Abreißgewebe aus Nylon keine dauerhafte Verbindung mit dem Laminat eingeht, sorgt es dafür, dass die Saugschicht nicht mit dem Laminat verklebt [R&G (2003)].
- → Den Abschluss bildet eine Folie in dem Bereich der späteren Zugprobe, der mittels optischer Verformungsanalyse untersucht werden soll, um dafür eine möglichst plane Oberfläche zu erzeugen (Kapillarwirkung, Grenzflächen- bzw. Oberflächenhaftung).
- → Versehen mit Abdeckfolie und Saugvlies zur gleichmäßigen Verteilung des Unterdruckes wird der Aufbau anschließend in einen Vakuumsack eingebracht und evakuiert.





An- und Aushärten des Prüflaminats

Anhärten (druckbeaufschlagt): Das Evakuieren geschieht zum Verdichten des Verbundes (auch Kompaktieren genannt) bis der Matrixwerkstoff angehärtet ist, um unerwünschte Lufteinschlüsse (Poren) weitestgehend zu vermeiden (vgl. auch Abschnitt 2.4.2). Der eingestellte Unterdruck (hier: 0,7 bar, was auch für komplexere Bauteile eine realistische Annahme darstellt) verdichtet zum einen das Laminat und der Faservolumenanteil des Laminataufbaus wird gleichermaßen erhöht, da überschüssiges Harz herausfließt. Ist das Laminat evakuiert, wird es aus dem Vakuumsack entnommen, entformt und das Abreißgewebe entfernt.

Aushärten (temperaturbeaufschlagt): Im Anschluss erfolgt die Wärmebehandlung. Zur Steigerung des Harzvernetzungsgrades werden die Laminate getempert (10 Stunden lang für Harzsystem L1100 bei ca. 60° C). Das Vorgehen beschreibt auch KOKE et al. (2008).

2.5.5 Bestimmung des Faservolumenanteils

Die Eigenschaften des Verbundes werden nicht nur durch die hervorragenden mechanischen Kennwerte der Fasern bestimmt, sondern aus der Summe dieser *"und einer Matrix mit mäßigen mechanischen Eigenschaften…*. Die Summe dieser Eigenschaften liegt natürlich unter dem Eigenschaftsniveau der Fasern alleine. Je nach Faservolumengehalt, der im Wesentlichen vom Fertigungsverfahren abhängig ist, kann dieser Unterschied beträchtlich sein!" [MICHAELI et al. (1995)] Im Handlaminierverfahren ist es jedoch schier unmöglich, Laminate mit immer gleichbleibendem Faservolumenanteil einzustellen. "Ein flächenbezogener Materialkennwert wie eine Bruchspannung ist also nur in Verbindung mit der Angabe des Faservolumenanteils gültig", stellt [KICKERT (1988)] fest. Daher wird im Vorfeld der im Rahmen dieser Arbeit durchzuführenden Versuche für jedes einzelne Probelaminat zunächst der Faservolumenanteil bestimmt.

Genauer gesagt, nach der Herstellung der Probelaminate (aus dem Vakuumsack und vom Abreißgewebe befreit) und noch bevor die Aufleimerriegel aufgeklebt und die Proben zugeschnitten werden, erfolgt die Ermittlung dieser wichtigen produktionsspezifischen Kenngröße, des Faservolumenanteils (engl.: fiber volume fraction):

$$\varphi = \frac{V_{\rm F}}{V_{\rm Composit}} = \frac{V_{\rm F}}{V_{\rm F} + V_{\rm H}}$$
(2.5)

mit $V_{\text{Composit, F, H}}$ = Volumen des Komposits, der Faser bzw. des Harzes. Da gilt:

$$m_{\rm F} = \rho_{\rm F} \cdot V_{\rm F}, \ m_{\rm H} = \rho_{\rm H} \cdot V_{\rm H}, \tag{2.6}$$

lässt sich für das jeweilige Volumen schreiben:

$$V_{\rm F} = \frac{m_{\rm F}}{\rho_{\rm F}}, \ V_{\rm H} = \frac{m_{\rm H}}{\rho_{\rm H}}.$$
 (2.7)

Aus den Massenanteilen von Faser und Harz sowie mit Hilfe der Faser- und der Harzdichte werden die Volumenanteile der Komponenten am Verbund berechnet (vgl. z. B. CARLS-SON/PIPES (1989) oder KAW (2006)):

$$\varphi = \frac{\frac{m_{\rm F}}{\rho_{\rm F}}}{\frac{m_{\rm F}}{\rho_{\rm F}} + \frac{m_{\rm H}}{\rho_{\rm H}}}.$$
(2.8)

Die Harzmasse im Verbund kann nicht direkt bestimmt werden, wohl aber durch Auswiegen die Masse des Gesamtlaminats m_{Composit} , ebenso wie die Fasermasse m_{F} . Zur Bestimmung der produktionsspezifischen Kenngröße φ des Probelaminats wurde hier eine zerstörungsfreie Prüftechnik gewählt, um möglichst exakte Aussagen für das jeweilige getestete Prüflaminat und damit möglichst repräsentative Eingangsdaten des Verbundes zu erhalten. Mit der Kenntnis der Faserdichte und der Dichte des Matrixwerkstoffes sowie des Masseanteils der Fasern, der über die Geometrie des Probelaminats aus dem Flächengewicht des Faserhalbzeuges bestimmt werden kann, ist der für die Steifigkeit maßgebende Parameter ρ_{F} zur Beschreibung des Komposits bestimmbar. Alternative, aber zerstörende Prüfverfahren sind:

- → das Verbrennen des Kunststoffs im Muffelofen nach vorherigem Auswiegen des Komposits und anschließendem Auswiegen der verbleibenden Fasern,
- \rightarrow die chemische Extraktion,
- → die Bestimmung der Dichte des Verbundes mittels Dichtewaage, unter der Annahme, es sind weder Lufteinschlüsse noch Verunreinigungen im Faserverbundkunststoff.

Zur Ermittlung der Fasermasse werden die Probelaminate im Rahmen dieser Arbeit zunächst für deren Vermessung rechtwinklig zugeschnitten, z. B. mittels wassergekühltem Trennschleifer mit diamantbesetztem Sägeblatt, um den Staub direkt zu binden, wie in Bild 2.33 schematisch dargestellt, und ggf. nachgeschliffen.



Bild 2.33: Zuschnitt des Probelaminats auf rechtwinklige Form

Mittels der präzise bestimmten Fläche des Laminats A_{Laminat} lässt sich über das Flächengewicht/m² (Grammatur) des textilen Faserhalbzeugs $m_{\text{Faser},k}$ und die Anzahl der Faserlagen ndie Fasermasse bestimmen:

$$m_{\rm F} = m_{\rm Faser, k} \cdot A_{\rm Laminat} \cdot n \ . \tag{2.9}$$

Zuvor empfiehlt sich eine stichprobenartige Überprüfung des realen Flächengewichts des Faserhalbzeuges auf Übereinstimmung mit dessen nominell angegebener Grammatur.

Da $m_{\rm H} = m_{\rm Composit} - m_{\rm F}$, ergibt sich für die Berechnung des Faservolumenanteils:

$$\varphi = \frac{\frac{m_{\rm F}}{\rho_{\rm F}}}{\frac{m_{\rm F}}{\rho_{\rm F}} + \frac{m_{\rm Composit} - m_{\rm F}}{\rho_{\rm H}}}.$$
(2.10)

Der Ausdruck kann algebraisch vereinfacht werden zu:

$$\varphi = \frac{m_{\rm F}\rho_{\rm H}}{m_{\rm F}\rho_{\rm H} + (m_{\rm Composit} - m_{\rm F})\rho_{\rm F}}.$$
(2.11)

Um der Realität Rechnung zu tragen, müssten streng genommen Fehlstellen oder Lufteinschlüsse im Laminat $V_{\rm L}$ bei der Berechnung des Gesamtlaminatvolumens $V_{\rm Composit}$ Berücksichtigung finden, die während des Herstellungsprozesses des Laminats eingebracht und typischerweise nicht vollständig entfernt werden können, da:

$$V_{\text{Composit}} = V_{\text{F}} + V_{\text{H}} + V_{\text{L}} \,. \tag{2.12}$$

Dadurch bedingt ist die theoretische Dichte höher als die tatsächlich ermittelte.

$$\frac{m_{\rm Composit}}{\rho_{\rm Composit_{Experiment}}} = \frac{m_{\rm Composit}}{\rho_{\rm Composit_{theoretisch}}} + V_{\rm L} \,. \tag{2.13}$$

Mit jedem weiteren Prozent an Fehlstelleninhalt (engl. void content) sinken gemäß KAW (2006) die matrix-dominierten Materialeigenschaften wie z. B. Schubmodul um 2 bis 10 %.

In der nachfolgenden Tabelle 2.6 wird eine Übersicht über experimentell ermittelte Faservolumenanteile bei Verwendung der näher spezifizierten Faserhalbzeuge in Kombination mit Epoxidharz L 20/Härter EPH 161¹⁵ (vorgewärmt verarbeitet) gegeben [KOKE (2005)]. Die Werte können als Anhaltspunkt für eine überschlägige Berechnung nach klassischer Laminattheorie dienen, wenn keine anderweitigen Daten bekannt sind. Faserhalbzeuge und Matrixmaterial stammen von Fa. R&G Faserverbundwerkstoffe, Waldenbuch [R&G (2008) bzw. R&G (-ol)]. Die Faservolumenanteile beziehen sich einerseits auf unverpresst im Handlaminierverfahren hergestellte Faserverbund-Kunststoff-Laminate (vgl. Abschnitt 2.4.1) und andererseits im Vakuumverfahren bei 0,7 bar verpresste Laminate (vgl. Abschnitt 2.4.2). Sämtliche im weiteren Verlauf dieser Arbeit vorgestellte experimentelle Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf im Vakuumverfahren hergestellte Laminate.

¹⁵ Bezeichnung des Härters vormals: VE 3216

	Faserhalbzeug im Laminat			Faservolumenanteil ϕ	
	Faserart	Flächengewicht	Lieferform	Handlaminierverfahren (nass)	Vakuumverfahren (verpresst)
GFK	Glasfaser	25 g/m²	Gewebe	25 %	34 %
	Glasfaser	49 g/m²	Gewebe	35 %	42 %
	Glasfaser	58 g/m²	Gewebe	34 %	39 %
	Glasfaser	80 g/m²	Gewebe	34 %	38 %
	Glasfaser	105 g/m²	Gewebe	29 %	33 %
	Glasfaser	163 g/m²	Gewebe	32 %	37 %
	Glasfaser	220 g/m²	unidirektional	37 %	43 %
	Glasfaser	280 g/m²	Gewebe	35 %	42 %
	Glasfaser	296 g/m²	Gewebe	34 %	38 %
	Glasfaser	390 g/m²	Gewebe	40 %	46 %
	Glasfaser	580 g/m²	Gewebe	53 %	56 %
	Glasfaser	310 g/m²	Gelege biaxial	34 %	42 %
	Glasfaser	408 g/m²	Gelege biaxial	41 %	48 %
	Glasfaser	30 g/m²	Glasvlies	6 %	6 %
	Glasfaser	225 g/m²	Glasmatte	25 %	29 %
	Glasfaser	450 g/m²	Glasmatte	29 %	31 %
DFK	Dyneema	160 g/m²	Gewebe	51 %	57 %
AFK	Aramid	36 g/m²	Gewebe	31 %	37 %
	Aramid	61 g/m²	Gewebe	36 %	43 %
	Aramid	110 g/m²	Gewebe	44 %	47 %
	Aramid	170 g/m²	Gewebe	45 %	49 %
CFK	Kohlefaser	65 g/m²	Gewebe	40 %	46 %
	Kohlefaser	93 g/m²	Gewebe	44 %	50 %
	Kohlefaser	160 g/m²	Gewebe	47 %	52 %
	Kohlefaser	204 g/m²	Gewebe	49 %	55 %
	Kohlefaser	245 g/m²	Gewebe	50 %	55 %
	Kohlefaser	360 g/m²	Tenax CCC-Style	44 %	49 %
	Kohlefaser	410 g/m²	Gewebe	59 %	64 %
	Kohlefaser	80 g/m²	Gelege (UD)	37 %	44 %
	Kohlefaser	125 g/m²	Gelege (UD)	47 %	53 %
	Kohlefaser	252 g/m²	Tenax Gelege	51 %	53 %
	Kohlefaser	140 g/m²	Gewebe (UD)	50 %	52 %
	Kohlefaser	160 g/m²	Gelege biaxial	36 %	41 %
	Kohlefaser	250 g/m²	Gelege (UD)	38 %	42 %
	Kohlefaser	290 g/m²	Gelege biaxial	44 %	49 %
	Kohlefaser	420 g/m ²	Gelege biaxial	47 %	49 %

2

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.



2.5.6 Fertigung der Prüfkörper und Prüfkörpergeometrie

Sind die Faservolumenanteile des Probelaminats bestimmt, kann erst die eigentliche Fertigung der Prüfkörper beginnen. Die Schritte zur Herstellung der Prüfkörper sind:

- \rightarrow die Herstellung von Aufleimerlaminaten,
- \rightarrow das Aufbringen der Aufleimerlaminate auf das Prüflaminat und
- \rightarrow das Heraustrennen der Zugproben-Streifen aus dem Prüflaminat.

2.5.6.1 Vorüberlegungen zum Prüfkörper

Ein Blick in die Literatur zeigt es: Will man realitätsnahe, jedoch auch praktisch herstellbare Prüfkörper anfertigen, so ist dies kein triviales Unterfangen. Es existiert ein Dschungel aus normativen Vorgaben. Stößt man dabei auf Testergebnisse, so ist nicht zwingend ersichtlich, wie sich diese akquirieren ließen.

Um faserverstärkte Kunststoffe einer Materialprüfung zu unterziehen, sind Versuchsreihen mit manuell gefertigten (handlaminierten) Prüfkörpern erforderlich. Mit der systematischen Aufarbeitung vorhandener – teilweise widersprüchlicher – Normen und deren Prüfung auf Anwendbarkeit auf die gegebenen Randbedingungen beschäftigt sich, aufbauend auf der Diplomarbeit von der Verfasserin [KOKE (2005)], die Arbeit von DAU (2006). Vgl. dazu auch Abschnitt 4.5.6.4 bzw. das entsprechende Kapitel "Experimente" im Online-Lehrangebot [E-MECHLAB/EXPERIMENTE (-ol) bzw. auf der beiliegenden DVD].

2.5.6.2 Prüfkörpergeometrie

Bei der Wahl der Prüfkörpergeometrie sollte das Paradoxon der Messlänge der Fasern bedacht werden: "*Die gemessene Festigkeit einer Faser ist umso größer, je kleiner die Messlänge ist*" (siehe dazu auch Abschnitt 2.2). Bild 2.34 belegt dieses Paradoxon am Beispiel von Kohlenstoff-, Glas- und Aluminiumoxidfasern. Der Einfluss des Größeneffekts ist ersichtlich. [FLEMMING/ROTH (2003)] Da einerseits mit steigendem Werkstoffvolumen die Wahrscheinlichkeit von Fehlstellen zunimmt, müssen Prüfkörper in Geometrie und Werkstoffvolumen annähernd identisch sein, um vergleichbare Versuchsergebnisse sicherzustellen [SCHÜRMANN (2007),]. Andererseits dürfen die Prüfkörper nicht zu dünn sein, da dies zum einen den relativen Messfehler erhöhen (vgl. Abschnitt 2.7.3) und zum anderen ein Ausknicken des ohnehin knickempfindlichen Prüfkörpers während des Einspannvorgangs vor dem Zugversuch begünstigen würde.



Bild 2.34: Mess- bzw. Einspannlängenabhängigkeit der Zugfestigkeit von Verstärkungsfasern [Bildquelle: FLEMMING/ROTH (2003) nach VAN KREVELEN (1983), DOW/ROSEN (1965), HUGHES et al. (1980), HARTMANN/NUßBAUM (1981), SLAYTER (1962), ASHTON et al. (1969)]

Die in dieser Arbeit verwendete Prüfkörpergeometrie ist Bild 2.35 zu entnehmen. Es handelt sich um eine Flachstabprobe, die mit sog. "Aufleimern" (vgl. 2.5.6.3) im Bereich der Krafteinleitung (mittels Spannbacken) versehen wurde und sich an DIN EN ISO 527 orientiert.



Bild 2.35: Geometrie der untersuchten Prüfkörper [TOMBERS (2008)], Flachstabprobe in Anlehnung an DIN EN ISO 527]

Die Dicke der Verbundwerkstoffprobe richtet sich nach den verwendeten Faserhalbzeugen sowie dem erzielten Faservolumenanteil. Die variable Probendicke ist der Tatsache geschuldet, dass die untersuchten Gewebe einerseits unterschiedliche Stärken aufweisen, jedoch andererseits auf einen orthotropen Laminataufbau zu achten ist. Letztgenannter Forderung wird mit vier bzw. acht Gewebelagen entsprochen. Die damit erzielten Laminatstärken der geprüften Laminate von ca. 1,1 mm bei vierlagigem BFK bis 1,7 mm bei achtlagigem GFK (mit ca. 1,2 mm liegen AFK und CFK mit je vier Gewebelagen dazwischen) bewegen sich jedoch im vorgegebenen Rahmen zwischen einem Millimeter für unidirektionale Prüfkörper gem. z. B. DIN EN ISO 527-5 (1997) und zwei Millimetern, die u. a. DIN EN ISO 527 Teil 4 (1997)

65

 \mathbf{Q}

bzw. DIN EN 2747 (1998) fordern. Die Normen beziehen sich auf 0°-, 45°- und 90°-Versuche. Für Zugversuche mit faserverstärkten Kunststoffen unter anderer Faserorientierung oder für multiaxial aufgebaute Laminate ist kein Prüfkörper definiert. Die vorgestellte Prüfkörpergeometrie stellt in vielerlei Hinsicht einen Kompromiss dar, der der Fertigungs- und Experimentaltechnik geschuldet ist. Reale Bauteile hingegen sind aus Leichtbaugründen vielfach nicht mehr als einige Zehntel Millimeter dick. In den Vorversuchen ergaben exemplarische Experimente mit ein und zwei Millimeter starken gewebeverstärkten GFK-Laminaten keine signifikanten Unterschiede bzgl. der ermittelten Kennwerte. Die Toleranzen zu den jeweiligen Abmessungen der Prüfkörper innerhalb einer Versuchsserie weist Tabelle 2.7 aus.

	Маве	Toleranz
Länge	220 mm	
Dicke	<i>x</i> mm	$\pm 0,1 \text{ mm}$
Breite	25 mm	$\pm 0,5 \text{ mm}$
Abstand zwischen den Aufleimern	150 mm	$\pm 1 \text{ mm}$
Abstand zwischen den Klemmbacken	> 150 mm	
Länge der Aufleimer	35 mm	$\pm 0,5 \text{ mm}$
Dicke der Aufleimer	2,3 mm	$\pm 0,2 \text{ mm}$
Fase der Aufleimer	30°	

Tabelle 2.7: Abmessungen und Toleranzen der Flachstabproben

2.5.6.3 Aufleimer zur Krafteinleitung

Die Krafteinleitung in den FVK-Prüfkörper kann nicht als unproblematisch bezeichnet werden (vgl. dazu z. B. SEILER (1987)). In der Einspannung ist die Probe Druck- und Schubkräften infolge von Klemmung und Haftreibung ausgesetzt. Es kommt zu lokaler Belastungsüberhöhung, gewöhnlich begleitet von Mehrachsigkeit des Belastungszustands. Bei schichtweise aufgebauten FVK-Laminaten ist die Dickenrichtung jedoch mechanisch nicht hoch belastbar, sodass vorzeitiges Versagen im Bereich der Klemmung eintritt. [SEILER (1987)]

Daher werden sog. "Aufleimer" an den Krafteinleitungsstellen auf die Prüflaminate aufgeklebt, deren Verwendung zum Ziel hat, die Einflüsse durch die Einspannbacken, die das reine Zugergebnis verfälschen könnten, "abzufedern" [DIN EN ISO 527-4 (1997)], um lediglich die mechanischen Eigenschaften des zu prüfenden Verbundmaterials im Zugversuch optimal wiederzugeben. Die Aufleimerlaminate dienen dabei zur gleichmäßigen Übertragung der Klemmkräfte auf den Faserverbundwerkstoff. Nebenbei sorgen die Aufleimer für die elektrische Isolierung des Testmaterials, die insbesondere bei Prüfkörpern aus CFK notwendig ist. Der Übergang zwischen Aufleimer und Prüflaminat sollte fließend gestaltet sein, da dieser andernfalls wiederum eine Kerbe darstellen würde, die zur Spannungssingularität führt, was vorzeitiges Materialversagen im Kerbgrund zur Folge hat. Abhilfe schafft das vorherige Anfasen des Aufleimers (30°), welches für eine möglichst weiche Umlenkung des Kraftflusses sorgt und so Spannungsspitzen vermeidet. Im Zugversuch werden die Kräfte durch Schubspannung über die Klebschicht zwischen Aufleimer und Prüfkörper eingeleitet [EHRENSTEIN (2006)]. Bild 2.36 veranschaulicht die Schubspannungsverteilung. Problematisch sind bei den Flachstabproben die Bereiche an den Enden der Aufleimer im Übergang zur Prüffläche, wo es aufgrund der erhöhten Schubspannung häufig zum Versagen des Prüfkörpers kommt. Gem. DIN EN ISO 527-1 (1996) soll der Bruch innerhalb des Abstands zwischen den Aufleimern und wenigstens zehn Millimeter entfernt von der Einspannung erfolgen, um vom Materialverhalten ausgehen zu können [EHRENSTEIN (2006)]. Ein vorzeitiges Versagen des Prüfkörpers infolge der Kerbwirkung würde kein realitätsgetreues Werkstoffverhalten widerspiegeln.



Bild 2.36: Schubspannungsverteilung bei Krafteinleitung in Aufleimer von Zugproben [Bildquelle: nach GRÜNINGER (1977)]

Im Rahmen der Vorversuche zeigten sich Schwächen bei den aufgeklebten Aufleimern. An der angefasten Seite bildete sich ein – wenn auch kleiner – Spalt aus, da sich die Klebschicht bei Härtung scheinbar infolge der Kapillarwirkung zusammenzog (siehe Bild 2.37 a). Zur Abhilfe wurden im Wege einer Nachbearbeitung Kehlnähte aus Epoxidharz aufgebracht, um den Übergang vom Aufleimer zum Prüflaminat noch weicher zu gestalten (vgl. Bild 2.37 b).



Bild 2.37: a) Ungünstige und b) mittels Kehlnähten aus Epoxidharz modifizierte Krafteinleitung in den zu prüfenden Faserverbundkunststoff [Bildquellen: nach TOMBERS (2008)]



2.5.6.4 Prüfkörper heraustrennen aus vorbereitetem Prüflaminat

Es sei an dieser Stelle daran erinnert, dass das reguläre Heraustrennen der Prüfkörper aus dem Prüflaminat, wie in Bild 2.33 gezeigt, mit diamantbesetzter Trennscheibe erfolgt. Im Falle von AFK empfiehlt sich aufgrund von dessen Zähigkeit der abweichende Zuschnitt im abrasiven Wasserstrahlverfahren, das in Bild 2.38 dargestellt ist. Ggf. ist anschließend ein leichtes Anschleifen der Trennkanten erforderlich. Weitere Details der Modifikation ggü. der in der Internetpräsenz E-MECHLAB EXPERIMENTE (-ol) beschriebenen Methodik finden sich in TOMBERS (2008).



Bild 2.38: Abrasiver Wasserstrahlschneidprozess zum Heraustrennen von AFK-Prüfkörpern (Clever-Cut GmbH) [Bildquellen: nach Tombers (2008)]

Anzahl Prüfkörper: Aus einem Probelaminat können acht Prüfkörper geschnitten werden, sodass selbst bei einkalkuliertem Ausschuss ein Probenumfang von mindestens fünf Stück pro Winkel und Faservolumenanteil sichergestellt ist, wie DIN EN 2561(1995) analog für unidirektionale CKF-Proben fordert.

Geometrievermessung der Prüfkörper: Nach dem Heraustrennen des Prüfkörpers sind dessen exakte Abmessungen für die spätere Ermittlung der Querschnittsfläche zu erheben. Dazu werden in Anlehnung an DIN EN 2561(1995) für unidirektionale CKF-Proben die Breite b_0 und die Dicke *d* der Prüfkörper an drei Stellen des Probekörpers (in der Mitte und an zwei entgegengesetzten, 30 mm von der Mitte entfernten Punkten) senkrecht zur bzw. "*auf der Mittellinie*" mit einer Genauigkeit von 1/100 mm gemessen.

2.5.7 Probenpräparation mit stochastischem Oberflächenmuster

Als Vorbereitung zur Anwendung der optischen Verformungsanalyse mittels Grauwertkorrelationsanalyse (vgl. Abschnitt 2.6.3) erhält die Probenoberfläche auf der glatten Seite des Prüfkörpers eine weiße, sehr matte Grundierung. Anschließend erfolgt das Besprenkeln der Oberfläche mit einer Textur, die optimalerweise eine Schwarzabdeckung von ca. 50 % der zu untersuchenden Probenoberfläche beinhaltet. Es ergibt sich ein stochastisches Muster wie Bild 2.39 zeigt. Das Besprenkeln erfordert ein gewisses Maß an Übung, damit die schwarzen Punkte ungefähr die gleiche Größe (nicht zu groß, aber auch nicht zu klein) und einen möglichst hohen Kontrast zwischen dunklen Sprenkeln und hellem Untergrund aufweisen, da das Messsystem einen bestimmten Gradienten zwischen Hell und Dunkel für die Berechnung der Verformungen benötigt.



Bild 2.39: Aufbringen der Textur auf Prüfkörper aus AFK [Bildquelle: nach TOMBERS (2008)]

Eine geeignete Textur unterliegt folgenden Bedingungen, wie TOMBERS (2008) aufzählt:

- → Die aufgetragene Textur muss matt sein, um Reflexionen zu vermeiden, die das Messergebnis verfälschen würden.
- → Das Epoxidharz darf nicht chemisch angegriffen werden: Der Verdacht kann beim Trägermedium Isopropylalkohol (IPA) für das Weißen mit pulverförmigen TiO₂-Farbpigmenten entstehen. Wird eine dünne Schicht aufgetragen, verdunstet der IPA jedoch schnell und ist somit unbedenklich.

- → Die mechanischen Eigenschaften des Faserverbundkunststoffes dürfen nicht durch die Deckschicht beeinflusst werden. TiO₂-Farbpigmente gehen keine Bindung zueinander ein, somit sind auch keine messbaren Auswirkungen auf die Materialtests zu erwarten.
- → Dennoch muss die Deckschicht während der Versuchsdauer ausreichend auf der Prüfkörperoberfläche haften, um die Berechnung der Verformungen für die einzelnen Laststufen zu ermöglichen.

2.6 Messung mechanischer Kenndaten eines Verbundes – Versuchsaufbau, -technik und -durchführung

"*Um die Festigkeit* (und auch den E-Modul) *von Materialien zu prüfen, ist es üblich, Zugversuche an Proben durchzuführen.*" [NIEDERSTADT et al. (1985)] Eine schematische Darstellung der Verfahrensschritte zeigt Bild 2.41. Die dazu verwendeten Prüfkörper beschreibt Abschnitt 2.5.6.2.

Für die Versuchsauswertung wird in der vorliegenden Dissertation ein kartesisches **Labor-Koordinatensystem** definiert, welches die *y*-Achse mit der Lastrichtung, die *x*-Achse in Querrichtung und die *z*-Achse in Dickenrichtung ausrichtet, um die gleiche Nomenklatur wie die Deformationsanalysesoftware [ARAMIS (-ol)] zu verwenden. Während das in Bild 2.40 gezeigte Labor-Koordinatensystem (*x*, *y*, *z*) die Aufbringung der äußeren Lasten repräsentiert, spannt das Einzelschicht-Koordinatensystem der (Kett-) Faser mit der entlang der Faserachse verlaufenden 1_{Kett}-Richtung einen Winkel α_{Kett} ggü. dem Labor-KS auf, der in den hier durchgeführten Experimenten stets die Faserorientierung der Kettfäden ggü. der *y*-Richtung angibt. Beim Einzelschicht-Koordinatensystem der orthogonal zu den Kett- verlaufenden Schussfasern kennzeichnet die 1_{Schuss}-Richtung die Faserlängsachse. (Zum Winkel der Faser-verstärkung vgl. auch Bild 2.28.)



Bild 2.40: Koordinatensysteme des Laminats: gewähltes Laborsystem (*x*, *y*, *z*), unabhängig von der Faserorientierung im Prüfkörper sowie Kett- und Schussfaser-Einzelschicht-Koordinatensysteme



Bild 2.41: Verfahrensschritte (Phasen und Meilensteine) von Versuchsvorbereitung, -durchführung und -auswertung, gleichermaßen als Gliederung des E-Learning-Bereichs über die Experimente genutzt [Bildquelle: nach DAU (2006), vervollständigt v. Verfasserin]

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.

Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

71

 \mathbb{Q}

Bei der Messung der mechanischen Kenndaten, wie Sie in den Abschnitten 2.7.2 und 3.8.3 im Detail diskutiert werden, wird die am LTM vorhandene Ausrüstung verwendet, als da wären:

- ein unter 2.6.1 näher spezifizierter Axial-Materialprüfstand mit servohydraulischem Regler, hydraulischen Spannzeugen und mit Lastzelle 100 kN der Fa. MTS (siehe Bild 2.42),
- ein ARAMIS 4M Deformationsanalysesystem der Fa. GOM mit Steuergerät, der sog. Triggerbox (siehe Tabelle 2.8).

2.6.1 Der Klassiker – quasistatischer Zugversuch

Nach Festlegung der Versuchsparameter werden die Faserverbundkunststoffproben in einen servohydraulischen Axial-Materialprüfstand der Fa. MTS (Modell 810) mit dem softwaregesteuerten digitalen Servoregler MTS Flextest SE eingespannt und auf Zug belastet. Es handelt sich bei dem 100-kN-Prüfsystem, wie Bild 2.42 veranschaulicht, um einen zweisäuligen Lastrahmen mit feststehendem Querjoch und Hydraulikzylinder. Der Lastrahmen ist ein variabel verstellbarer Eigenbau. Durch Verfahren eines Kolbens können Proben mit dem Prüfstand sowohl auf Zug (wie in unserem Fall) oder auf Druck bis maximal ± 100 kN, auf die Lastrahmen und Kraftaufnehmer ausgelegt sind, belastet werden. Der Kolben kann einen Weg von ± 50 mm verfahren, wobei ein positiver Weg einem Verfahren des Kolbens nach unten (=auf Zug) entspricht.



Bild 2.42: Zugprüfstand mit eingespanntem GFK-Prüfkörper und Sensor des photogrammetrischen Deformationsanalysesystems [Bildquelle: Verfasserin]

Hydraulische Spannbacken (Keilspannzeuge) übernehmen die Probenfixierung und Lasteinleitung, wie in Bild 2.43 zu sehen ist. Deren Vorteil besteht gegenüber verschraubbaren Probenhalterungen in der während der gesamten Versuchsdauer durch eine externe Hydraulikversorgung aufrechterhaltenen Klemmkraft, die für die auf Reibung basierende kraftschlüssige Verbindung zwischen Spannbacken- und Aufleimerkontaktfläche sorgt. Das ist insbesondere bei den 45°-Prüfkörpern wichtig, die auf Zug belastet hohe Dehnungen aufweisen, da andernfalls mit steigender Prüfkraft Material aus dem Bereich der Einspannung entweicht und sich die Klemmkraft reduziert [ZWICK (2008)], was ein Herausrutschen aus der Halterung zur Folge hat. Die Ausrichtung der Probenaufnahme erfolgte zuvor, insbesondere vor dem Hintergrund der Knickanfälligkeit von Faserverbundproben, mithilfe einer instrumentierten Rundprobe und zugehörigem softwaregestütztem Ausrichtzubehör.



Bild 2.43: Positionierung der Aufleimer in den Spannzeugen des Prüfstandes [Bildquelle: DIN EN 2561, ergänzt von Verfasserin]

Alle Zugversuche werden gemäß DIN EN ISO 527-4 (1997) (anhand der dortigen Probenform 3) bei Raumtemperatur in der Laboratmosphäre an Proben durchgeführt, die zuvor, wie in Abschnitt 2.5.7 beschrieben, präpariert wurden. Nicht untersucht wurde der Einfluss von Temperatur oder Umgebungsfeuchte. Die Prüfgeschwindigkeit zur Bestimmung der Materialparameter Elastizitäts- und Schubmodul sowie Querkontraktionszahl beträgt 1 mm/min ¹⁶ und erfolgt weggeregelt. Sowohl die aufgeprägte Last als auch die Verschiebung des Kolbens wird gemessen. Darüber hinaus werden lokale Verschiebungen (axial, in Quer- sowie Dickenrichtung) und Dehnungen (axial und in Querrichtung) berührungslos mit Hilfe der Grauwertkorrelations-Analyse auf Basis der Photogrammetrie bestimmt. In den Vorversuchen erfolgt die Dehnungserfassung redundant, indem zusätzlich zur optischen Deformationsanalyse als Kontrollwerkzeug ein mechanisches Extensometer aufgebracht wird. Es dient zur Absicherung der Genauigkeit der berührungslos ermittelten Verformungsdaten, indem es die axialen Dehnungen zwischen zwei Extensometerschneiden bestimmt.

Die Aufzeichnung der Messwerte zur Ermittlung der Dehnungen erfolgt während der Materialprüfung in Laborkoordinaten (siehe Bild 2.40 und mehr dazu findet sich in Bild 3.24) und

¹⁶ CARLSSON/PIPES (1989) empfehlen eine Traversengeschwindigkeit von 0,5… 1 mm/min.

R

- a) in den Vorversuchen einerseits mit Hilfe eines an der Probe befestigten Extensometers (Axialdehnungsaufnehmers) von der Fa. Hottinger Baldwin Messtechnik HBM, Typenbezeichnung D01, mit einer Messlänge von 25 mm zwischen den Extensometerschneiden. Dabei wird die Längenänderung der Materialprobe umgerechnet aus der Widerstandsänderung der WHEATSTONEschen Brückenschaltung gegenüber der Ausgangslänge online mitprotokolliert. Andererseits erfolgt die Auswertung der Dehnungen unter Last im
 Post-Processing mit Hilfe eines optischen Verformungserfassungssystems, das näher in
 Abschnitt 2.6.3 beschrieben wird.
- **b**) in den Hauptversuchen ausschließlich berührungslos mit Hilfe eines optischen Verformungserfassungssystems, das näher in Abschnitt 2.6.3 beschrieben wird.

Das Kraftsignal (Spannung zwischen 0 und 10 V) wird vom analogen Ausgang des Servoreglers des Axial-Materialprüfsystems abgegriffen und als Triggersignal zum Auslösen der Kameras bei Erreichen bestimmter vorgegebener Laststufen verwendet. Als Eingangssignal zur Steuerung und Taktung der Bildaufnahmen wird die angreifende Kraft an das Steuergerät des optischen Verformungsanalyse-Systems weitergegeben.

2.6.2 Schwellende Belastung – zyklischer Zugversuch

Neben den statischen Zugversuchen wird unter Beibehaltung des unter 2.6.1 beschriebenen Prüfstandsaufbaus in einer weiteren Versuchsreihe mit geringerem Stichprobenumfang – bestehend aus je einer Probe pro Materialpaarung und Faserorientierungswinkel – der Versuchsablauf durch die Vorgabe des in Bild 2.44 gezeigten Lastspiels abgewandelt. Die Versuche werden wiederum weggeregelt bei einer Prüfgeschwindigkeit von max. 1 mm/min. gefahren.





Der R-Faktor ist das Maß für die Belastungsart und ist definiert als

$$R = \sigma_u / \sigma_o \tag{2.14}$$

Q

mit Unterspannung σ_u und Oberspannung σ_o [FLEMMING/ROTH (2003)]. Abweichend von der eigentlichen "Schwellast", die per Definition durch R = 0 gekennzeichnet ist, wird hier eine Zugbelastung mit einer gewählten Unterspannung, die einem Zehntel der Oberspannung entspricht (R-Verhältnis = 0,1), vorgegeben, um einem Ausknicken der Prüfkörper vorzubeugen. Dieses R-Verhältnis von 0,1 wird gerne verwendet, weil keine zusätzliche Knickstütze angebracht werden muss, die die Ergebnisse verfälschen kann. FLEMMING/ROTH (2003) bezeichnen Lastfälle mit einem R-Verhältnis von R < 1 als "allgemeinen Lastfall".

Die zyklische Belastung, mit der die Prüfkörper beaufschlagt werden, erfolgt gestaffelt in insgesamt drei Stufen. Mit dem in Bild 2.44 vorgegebenen Weg des Hydraulikzylinders zwischen Minimum 0,15 mm und Maximum 0,45 mm für die zyklische Belastung bewegen wir uns unterhalb von 0,25 % axialer Dehnung, für die die elastischen Konstanten später bestimmt werden (Belastungsstufe 1). Belastungsstufe 2 sieht einen unteren/oberen Grenzwert von 0,15 mm/0,6 mm des Weges als Funktion der Zeit vor, was einer Dehnung von max. 0,35 % entspricht, die noch vor Erreichen des "Knies" (vgl. Abschnitt 2.7) liegt. Bei der Belastungsstufe 3 liegt der obere Grenzwert mit 1,2 mm bei 0,7 % axialer Dehnung und damit weit oberhalb des "Knies" (Untergrenze unverändert).

2.6.3 Optische Verformungsanalyse mit Hilfe photogrammetrischer Messmethoden

Das Besondere an der vorliegenden Forschungsarbeit ist die Durchführung von Reihenuntersuchungen gewebefaserverstärkter Kunststofflaminate unter Anwendung von berührungsloser Verformungsanalyse. Die auf diese Weise ermittelten Deformationen basieren auf optischen Feldmessverfahren, welche sich der Methode der Photogrammetrie bedienen. Anschließend bedarf es der Verdichtung der erhobenen Feldinformationen zu makroskopischen Datensätzen und der systematischen Auswertung der Versuchsreihen im Hinblick auf deren linearelastisches Materialverhalten. Eine dazu entwickelte Methodik zur Bestimmung der elastischen Werkstoffparameter wurde zu Beginn des Abschnitts 2.6 kurz angerissen und wird nun erläutert.

Die Materialprüfung mit Hilfe der hier angewendeten optischen Deformationsanalyse liefert neben den Daten eines herkömmlichen Extensometers weitere Möglichkeiten, um die mit der jeweiligen Belastung der Werkstoffprobe korrespondierende Verformung zu ermitteln:

- → eine qualitative Falschfarbendarstellung des gesamten Dehnungsfeldes (siehe Bild 2.45, rechts), die jedoch eine Nachbearbeitung in Form einer Mittelwertbildung der dazugehörenden Datenpunkte erforderlich macht, will man elastische Kenngrößen ermitteln;
- → ein oder mehrere Punkt-zu-Punkt-Abstände, sog. "virtuelle" Extensometer, zur Bestimmung der Dehnungen ε_x and ε_y aus einem Experiment;
- → eine statistische Analyse des Dehnungsfeldes innerhalb eines bestimmten Bereiches auf der Probenoberfläche, der ggf. auch die gesamte Probenoberfläche umfassen kann
- → und über die Kennwertbestimmung hinausgehend eine gesonderte Detailanalyse eines geschädigten Gebietes (Faserbruch, "Dehnungs-Hotspot") (siehe Bild 2.45, links).



Bild 2.45: Photogrammetrische Analyse eines Zugversuchs mit GFK $[0^{\circ}/90^{\circ}]_{6}$ bei $\varphi = 40\%$ zum Zeitpunkt einsetzender Faserrisse:

- lokale axiale Dehnung f
 ür die einzelnen Laststufen entlang eines Schnittes mit lokal auftretender Dehnungs
 überh
 öhung (links oben),
- lokale Dehnungen f
 ür einzelne besonders interessierende Bereiche auf der Probenoberfl
 äche, sog. Stufenpunkte, die in der Probenansicht gekennzeichnet sind (links unten) und
- Probenfotos, eins überlagert mit Dehnungsfeldinformation in Falschfarbendarstellung (rechts)

Die im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit vorgestellten experimentellen Resultate werden auf unterschiedlichen Wegen generiert: zum einen aus Abweichungen einzelner Punkte zueinander [DAU (2007), DAU et al. (2007a)], zum anderen aus homogenisierten Flächeninformationen [KOKE (2005), KOKE et al. (2005), KOKE et al. (2006), KOKE et al. (2007), KOKE et al. (2008), KOKE et al. (2009)]. Abschnitt 2.6.3.6 stellt dazu die Ergebnisse der einzelnen Auswertemethoden gegenüber und diskutiert deren Aussagefähigkeit und Güte.

2.6.3.1 Wie funktioniert das?

Photogrammetrie

Der Begriff Photogrammetrie¹⁷ ist ein Sammelbegriff für eine Gruppe von Messmethoden, die aus hochauflösenden Fotografien eines Objektes (sog. Messbildern) seine räumliche Lage

¹⁷ auch Raumbildmessung genannt

beziehungsweise seine dreidimensionale Geometrie bestimmen [PEIPE/DORRER (1989), KRAUS (1982)]. HOFMANN/FINSTERWALDER (1968) beschreiben Photogrammetrie als ein Messverfahren zur "*Rekonstruktion eines Gegenstandes aus ebenen Perspektiven*". Gemäß PIECHEL (1991) sind dafür "*zur unverzerrten Beschreibung von Objekten, vor allem aber zur Erfassung ihrer räumlichen Struktur… i. a. überlappende Aufnahmen von verschiedenen Standpunkten (Stereophotos) notwendig*". Aus der Kartographie (in der sog. Luftbildphotogrammetrie) schon seit Anfang des letzten Jahrhunderts nicht mehr wegzudenken, erfreuen sich photogrammetrische Messverfahren auch in technischen Anwendungen immer größerer Beliebtheit. Das Messprinzip (siehe Bild 2.46) entspricht dem des menschlichen Sehens, bei dem durch die Überlagerung zweier Bilder ein Objekt räumlich wahrgenommen und lokalisiert werden kann. Man spricht von der Doppel- oder Zweibildmessung. Aus sich überlappenden Bildern werden Verformungsinformationen ausgerechnet. [DIGEL/KWIATKOWSKI (1983)]



Bild 2.46: Funktionsweise photogrammetrischer Verfahren angewendet auf eine Zugprobe und Messaufbau mit Prüfkörper nach erfolgtem Zugversuch

Grauwertkorrelationsanalyse

"Zur Verarbeitung der Bilder bedient sich" das hier verwendete Deformationserfassungssystem "der Grauwertkorrelationsanalyse. Darin werden kleinen Bildausschnitten, den sogenannten Pixeln, Grauwerte zugeordnet" [TÜV-SÜD (-ol)]. Die Grauwerte kann man sich wie Höhenlinien in einer Landkarte vorstellen. Diese Bildinformationen werden mit anderen nachfolgenden Bildern verglichen. Ist die lokale Position eines Pixels in Folge der Krafteinwirkung auf die Probe "verschoben", so wird die neue Position über den Grauwert ermittelt und die Verschiebung zwischen beiden Positionen, wie in Bild 2.47 veranschaulicht, berechnet. Die Grauwertkorrelationsanalyse bildet somit die Grundlage zur Verschiebungs- bzw. Dehnungsberechnung und erklärt die Notwendigkeit einer zusätzlich auf die Oberfläche aufgetragenen Textur. Diese Textur zeichnet sich durch ein zufälliges Muster aus und deren Aufbringung beschreibt Abschnitt 2.5.7. Zufallsmuster bieten KRAUS (1996) zufolge den Vorteil, dass das Auftreten zweier gleicher oder nahezu gleicher Musterbereiche innerhalb eines Bildausschnitts, was eine eindeutige Zuordnung erschweren würde, sehr unwahrscheinlich ist.



Bild 2.47: Prinzip der Grauwertkorrelationsanalyse

2.6.3.2 Anwendung der optischen Verformungserfassung und technische Daten

Die Grauwertkorrelationsanalyse, mit Hilfe derer auf Basis der Photogrammetrie Verformungen und indirekt Verzerrungen einer Bauteilgeometrie erfasst werden können, findet in vorliegender Arbeit mit Hilfe des Deformationsanalysesystems ARAMIS von der Fa. GOM in Braunschweig Anwendung [GOM (2007)]. Das Verformungserfassungssystem ist in der Lage, dreidimensionale Verformungen von Bauteilen mit hoher Genauigkeit zu erfassen und wird hier zur Bestimmung von Längs- und Querdehnungen auf der Prüfkörperoberfläche eingesetzt. Aussagekräftig werden die wie in Abschnitt 2.6.3.1 beschrieben ermittelten Verschiebungs- und Dehnungswerte jedoch erst, wenn sie in Bezug zur beaufschlagten Kraft beziehungsweise Spannung gesetzt werden. Eine Möglichkeit besteht darin, sich neben dem Deformationserfassungssystem einer weiteren Hardwarekomponente der Fa. GOM, der sog. Triggerbox, zu bedienen, die das am Materialprüfstand vorliegende Kraftsignal abgreift.



Q

Versuchsablauf

Die Experimente starten mit dem **Einrichten** und Kalibrieren des optischen Sensors. Eingerichtet werden Winkel und Abstand der zwei Kameras zueinander, Blende und Fokus (in Bild 2.49 mit a und b gekennzeichnet). Beim **Kalibrieren**, das vor jedem Messzyklus durchzuführen ist, wird eine Kalibrierplatte, die als Referenz dient und das gewünschte Messvolumen repräsentiert, eingemessen (siehe Bild 2.48), um z. B. optische Fehler der Kameralinsen auszugleichen. Dabei erleichtert eine Halterung die geforderten Ausrichtungen (Anstellwinkel) der Kalibrierplatte. Für ein optimales Kalibrierergebnis sorgt eine gleichmäßige Ausleuchtung der Prüfkörperoberfläche im betrachteten Bildausschnitt, idealerweise mit anpassbarem Lichteinfall. Wichtig ist jedoch dabei, dass es sich um Licht gleicher Wellenlänge handelt (entweder Leuchtstofflampen- oder Halogenlicht, etc.), da andernfalls Messabweichungen die Folge sein können [KLEIN (2008)].



Bild 2.48: Kalibriervorgang, Einmessen der Kameras auf vorgegebenes Messvolumen mit Kalibrierplatte in bestimmter Ausrichtung auf eigens dafür konstruiertem Kalibrierplattenhalter (links), Detailzeichnung des Halters (rechts)

Bereits vor Start des eigentlichen Zugversuchs und nach dem möglichst vorspannungsfreien Einspannen des zuvor präparierten Prüfkörpers wird die Aufzeichnung des ersten Bildpaares als Referenz des unbelasteten Zustands ausgelöst. Das geschieht manuell per Handschalter mittels eines Steuergeräts (Triggerbox), das *"auf externe Signale"* (z. B. analoge Spannungssignale von –10 V bis +10 V) *"eine Bildaufnahme auszulösen"* vermag. Gleichermaßen ist das das Startsignal für das Steuergerät, auf das Eintreten der Triggerereignisse zu unterschiedlichen Zeitpunkten während der Belastung des Prüfkörpers zu warten, was nach dem Start der Zugversuchsprozedur passiert. Dann werden analogwertgesteuert anhand des abgegriffenen Kraftsignals (ggf. mit Verstärkungs- und Umrechnungsfaktor der elektrischen Spannung) gemäß einer sog. Triggerliste alle weiteren Aufnahmen von zeitgleich zwei Fotos aus unterschiedlichen Perspektiven mit einem definierten Winkel zueinander (12,5°) getriggert (siehe Bild 2.49). Diese Listenfunktion kann auch komplizierte Triggerevents benutzerdefiniert und prüfsituationsbedingt abbilden. Im Verlauf des Versuchs wird die Bildaufzeichnungsrate nach

Erreichen eines vordefinierten Ereignisses (bestimmter Spannungswert) erneut verringert, da hier insbesondere der elastische Versuchsbereich interessiert. Gleichzeitig zeichnet das Steuergerät mit jeder Bildaufnahme zwei Analogkanäle auf: den Weg des Hydraulikzylinders und das Kraftsignal von der Kraftmessdose, die vom Servoregler des Prüfstands eingespeist werden. [KLEIN (2005)]

Die Kameras erfassen das im Vorfeld präparierte Punktmuster der Prüfkörper (vgl. Abschnitt 2.5.7) während des Zugversuchs. Das optische Deformationsanalysesystem ermittelt daraus über die Verschiebungen der Grauwerte mit Hilfe der Grauwertkorrelation die lokalen Verschiebungen der Prüfkörperoberfläche relativ zur ersten Bildaufnahme, die den unverformten Zustand repräsentiert. Die Verschiebungen beziehen sich auf Bereiche einer bestimmten Größe (sog. Facetten), die zuvor festzulegen ist, wie auch deren Überlappung. Aus der Ableitung der Verschiebung, entweder in den Hauptverformungsrichtungen oder entlang eines beliebig gewählten Koordinatensystems, wird die Dehnung berechnet.



Bild 2.49: Zum Deformationsanalysesystem gehörende hochauflösende Kameras auf Kamerabalken mit Laserpointer und Software, die eine Aufnahme der präparierten Materialprobe auf dem Bildschirm im Hintergrund beim Einrichtevorgang der Kameras zeigt [Bildquelle: DAU (2007), modifiziert]

Technische Daten

Die technischen Daten des optischen 3D-Verformungsanalysesystems können der nachfolgenden Tabelle 2.8 entnommen und weitere Informationen in ARAMIS (-ol), GOM (2005) und (2007) nachgelesen werden. Tabelle 2.8: Technische Spezifikationen des eingesetzten ARAMIS 4M Deformationsanalysesystems [GOM (2005), (2007), KLEIN (2005)]

ARAMIS Version	6.0 bis 6.1.0-5		
	3D		
Zwei Kameras (4M):	4 Megapixel		
Kameraauflösung:	2048 x 2048 Pixel		
Max. Bildrate:	7 Hz		
Messbereich:	$1 \text{ mm}^2 \text{ bis} > 1 \text{ m}^2$		
Verwendetes Messvolumen:	65 mm x 58 mm		
Dehnungsmessbereich:	0,01 % bis zu > 100 %		
Dehnungsmessgenauigkeit (lokal):	bis zu 0,01 %		
ARAMIS Steuergerät (Triggerbox)	Einsatz des Steuergeräts erhöht die Bildaufnahmege- schwindigkeit des Sensors von 1 Hz auf 12 Hz.		
Zwei AD-Eingänge zur Trigge- rung auf Spannungswerte:	→ Abtastfrequenz: max. 96 kHz bei einem Analog- kanal, 48 kHz bei zwei Kanälen, 10 kHz für Bildauslösung bei speziellem AD-Wert ¹⁸		
	\rightarrow AD-Wandler: 12 bit		
Ein Triggereingang für direkte Bildauslösung zur Triggerung auf	 → z. B. optoentkoppelt mittels Schalter f ür manuel- le Auslösung der 1. Bildaufzeichnung 		
digitale Signale:	→ Zeitversatz Signal-Bildaufnahme: $< 0,001$ ms		

2.6.3.3 Was optische Deformationsanalyse (nicht) kann

Das wahre Können des optischen Deformationsanalysesystems zeigt sich bei großen Verformungen [GOM (2007)]. Hohe Umformgrade lassen sich damit gut erfassen und abbilden. Hingegen kleine und kleinste Verschiebungen können von optischen Effekten wie Bildrauschen oder Moiré überlagert werden. Daher gilt es, die Versuchsparameter wie Messvolumen, aufzubringende Oberflächen-Textur etc. so zu wählen, dass die gewünschten experimentellen Effekte klar von den unerwünschten fotografietypischen Nebeneffekten isoliert hervortreten.

So zeigt sich in der flächigen, in Falschfarben dargestellten Auswertung das bei verarbeitetem Gewebe vorliegende Webmuster, welches offenbar zu lokal unterschiedlichen Oberflächendehnungen führt. Ebenso treten an den Randbereichen der untersuchten Faser-Kunststoff-Verbundproben Abweichungen auf. Zum Probenrand hin erscheint dieses sich abzeichnende Muster unregelmäßiger bzw. "Ausreißer" zeigen sich (siehe auch Abschnitt 2.6.3.5). Worauf die Herkunft dieser Auffälligkeiten zurückzuführen ist, ob numerischer Fehler oder tatsächlich lokal auftretender Peak, lässt sich nicht immer eindeutig zuweisen.

Q

¹⁸ Die "AD-Werte werden eingelesen und mit einem Zielwert verglichen. Dabei beträgt die Verzögerungszeit von Ereignis bis Bildaufnahme max. 50 µs." [KLEIN (2005)]



2.6.3.4 Mess(un)genauigkeit

Ein gemessener Wert wird erst durch die Angabe der Messunsicherheit zu einem verlässlichen und aussagekräftigen Messergebnis. Die Messgenauigkeit des verwendeten 4M-Systems, was bedeutet, dass zwei hochauflösende 4 Megapixel-Kameras eingesetzt werden, liegt für die aus den Verschiebungen abgeleiteten Dehnungen bei maximal 0,1 %. Diese Herstellerangabe lässt sich durch die Betrachtung des Bildrauschens zweier Aufnahmen bei identischer (keiner) Last belegen. Diese vermeintlichen Dehnungen können entlang einer virtuellen Linie auf der Probenoberfläche, wie in Bild 2.50 zu sehen, sichtbar gemacht werden. Die ermittelten Dehnungswerte spiegeln den messtechnischen Fehler wieder. Hier lässt sich ein Bildrauschen bei kleinen Dehnungen von max. \pm 0,04 % mit einer Standardabweichung von 0,0225 % feststellen.



Bild 2.50: Messfehler bei Dehnungsanalyse der Bauteiloberfläche (unbelasteter Zustand)

Die Messgenauigkeit beträgt bei der Verschiebung in *x*-, *y*-Richtung $\approx \pm 1 \,\mu\text{m}$, Verschiebung in *z*-Richtung $\approx \pm 1,5 \,\mu\text{m}$, Dehnung $\varepsilon_x, \varepsilon_y \approx \pm 0,03 \,\%$ (... 0,05 %) in Abhängigkeit von der Güte der Kalibrierung, die vor jedem Einsatz des Deformationsanalysesystems standardmäßig zu erfolgen hat. Die Messgenauigkeit bezüglich der Spannung setzt sich aus folgender Kette zusammen: Das Kraftsignal wird am Zugprüfstand mittels Kraftmessdose abgegriffen (die relative Genauigkeit beträgt ca. 1 %). Das Rauschen des mittels Steuergerät des Verformungsanalysesystems eingelesenen Kraftsignals liegt bei einem Messbereich von 0 bis 10 V bei 2,5 bis 5 mV [KLEIN (2008)]. Damit die Datenpaare Spannung und Dehnung zu jedem beliebigen Messpunkt (Bildpaar einer Stufe) synchron vorliegen, ist eine interne Umrechnung des Kraftsignals in eine Spannung durch Eingabe eines Verstärkungs- bzw. Umrechnungsfaktors erforderlich, der systemintern nach der 4. Nachkommastelle gerundet wird. Der Zeitversatz, bis das Triggersignal auslöst, beträgt gemäß Herstellerauskunft nur ca. ½ ms [KLEIN (2008)].

2.6.3.5 Geometrisches Dehnungsphänomen der Deckschicht bei Anwendung auf Faserverbundstrukturen

Bei der Anwendung optischer Messverfahren auf Faserverbundkunststoffe tritt die Besonderheit auf, dass das lokale Verhalten der Faser durch das umgebende Harz repräsentiert wird und die Farbdeckschicht diese ebenfalls verfolgt. Bei jedweder Auswertung optischer Deformationsanalysen eines Faserverbundes sind die lokal abweichenden Dehnungen in der Deckschicht des Harzes zu berücksichtigen. Bei der Analyse von Geweben treten diese insbesondere als Reaktion auf die Streckung der verwobenen Fasern im Verbund zum Vorschein. So zeichnen sich bspw. für $[0^{\circ}/90^{\circ}]_{6}$ -Versuche diagonale Strukturen in der farbskalierten qualitativen Auswertung der Dehnungsinformation ab, wie Bild 2.51 zeigt (vgl. auch KOKE et al. (2008)).



Bild 2.51: In Falschfarbendarstellung gekennzeichnete Entwicklung des Dehnungsfeldes mit steigender Last einer GFK-Zugprobe [0°/90°]₆ aus 163 g/m²-Glasfasergewebe

Daher werden nun zunächst die unterschiedlichen Auswertemöglichkeiten der Versuchsdaten diskutiert.

2.6.3.6 Vergleich photogrammetrischer Analyse mit klassischem Extensometer

Die Resultate der zeitaufwändigen Experimente können auf unterschiedlichen Wegen mittels der photogrammetrischen Analyse generiert werden: zum einen aus **homogenisierten Flächeninformationen**, zum anderen aus **Abweichungen einzelner Punkte zueinander**. Ein Vergleich der Verfahren untereinander soll Aufschluss bringen in Bezug auf deren Aussagefähigkeit und Wahrheitsgehalt. Um die Qualität der Messergebnisse bewerten zu können, wird bei der Ermittlung des Verformungsverhaltens faserverstärkter Kunststoffe unter Last zunächst redundant verfahren. In den Vorversuchen erfasst zum einen ein herkömmliches mechanisches Extensometer die Deformation des Prüfkörpers in Richtung der Lastaufbringung. Zum anderen erfolgt mittels der Nachbearbeitung (Post-Processing) mit der Deformationsanalysesoftware eine Auswertung, bei der sowohl eine Betrachtung der Verschiebung zweier Punkte zueinander in Relation zu deren Ausgangsabstand als auch die Studie des gesamten

Dehnungsfeldes bzw. exklusive des numerisch schlechter zu erfassenden Randbereichs¹⁹ der flächigen Messungen erfolgen kann. Der erfasste Abstand der Oberflächenpunkte in Lasteinleitungsrichtung und senkrecht dazu kann als virtuelles Pendant zum mechanischen Extensometer verstanden werden, welches Linienabstände auf der Probenoberfläche erfasst, daher wird es hier als "**virtuelles Extensometer**" bezeichnet. Eine Gegenüberstellung der unterschiedlichen Dehnungsinformationen (lokal und global), die mittels optischer Verformungsanalyse ausgewertet werden können, und einem herkömmlichen mechanischen Dehnungsaufnehmer (Extensometer der Fa. HBM Typ D01) erfolgt anschließend und soll Aufschluss über die Qualität der später zu ermittelnden Kennwerte geben.

Vergleich photogrammetrischer Analysemöglichkeiten untereinander

Zunächst stellt Bild 2.52 die quantitativen Analysemöglichkeiten der mittels Grauwertkorrelation erhobenen Datenpunkte vergleichend gegenüber. Dabei bezeichnet die "Bereichsstatistik" bzw. – was insbesondere im Falle von nicht durchgängigen Verstärkungsfasern wie z. B. bei [15°/105°]-Versuchen sinnvoll erscheint – die "Teilbereichsstatistik" die **homogenisierten Flächeninformationen** aller Datenpunkte bzw. derer aus einem begrenzten Bereich der Probenoberfläche. Das "virtuelle Extensometer" erfasst die Dehnungsinformation aus der Änderung des Abstands zweier zuvor gewählter Punkte (präziser gesagt: Facetten) zueinander.



Bild 2.52: Vergleich einzelner Messverfahren anhand der aufgezeichneten Spannungs-Dehnungs-Verläufe, hier am Beispiel einer 0°-Probe aus GFK im stark vergrößerten Bereich linear-elastischer Dehnungen

Es zeigt sich, dass die angewendeten Verfahren des Verformungserfassungssystems allesamt recht übereinstimmende Ergebnisse liefern. Den besten (stetigen) Verlauf erzielt die Auswertung der Bereichsstatistik, da die statistische Genauigkeit aufgrund der vielen lokalen Infor-

¹⁹ Daten im Randbereich sind numerisch schlecht zu berechnen, weil Differenzenquotienten am Rand ggf. nicht definiert sind.

mationen, über die ein Dehnungsmittelwert pro Lastschritt gebildet wird, am größten ist. Leichte Schwankungen ergeben sich bei der statistischen Auswertung eines vorher definierten Bereichs auf der Probenoberfläche, der bewusst die ggf. numerisch nicht definierten Randbereiche der Probe auslässt. Aufgrund der geringeren Anzahl von lokalen Dehnungswerten scheint sich hier jedoch eine nicht ganz so konstante Steigung zwischen den Einzelmesswerten (vgl. die Strich-Punkt-Linie in Bild 2.52) einzustellen. Wie nicht anders zu erwarten, schneiden die ausgewerteten Punkt-zu-Punkt-Informationen, die als Basis der Berechnung bei den virtuellen Extensometern dienen, etwas schlechter ab. Die immer noch geringen Schwankungen sind etwas größer als bei den statistischen Bereichs- und Teilbereichsauswertungen.

Vergleich photogrammetrischer Analysemöglichkeiten mit herkömmlichem, mechanischem Extensometer

Wie bewährt sich die vorgestellte optische Verformungserfassungstechnik nun gegenüber einem herkömmlichen Dehnungsaufnehmer? Vergleichen wir dazu die mittels Grauwertkorrelationsanalyse ermittelten Spannungs-Dehnungs-Ergebnisse mit denen, die ein klassisches mechanisches Extensometer erfasst hat, so zeigt sich der Sachverhalt wie in Bild 2.53 dargestellt. Wie bereits zuvor als Fazit festgehalten, liefert die Bereichsstatistik die zuverlässigeren Messwerte gegenüber den virtuellen Extensometern. Lässt man den Offset der Werte, die mit dem klassischen mechanischen Extensometer ermittelt wurden, außen vor und betrachtet lediglich die Steigung der Verbindungslinien durch die Messpunkte, so stellt man fest, dass sich nur eine sehr geringe/nahezu keine Abweichung der Steigung zwischen ausgewerteter Bereichsstatistik und mechanischem Extensometer abzeichnet.



Bild 2.53: Vergleich einzelner photogrammetrischer Messverfahren mit einem klassischen Extensometer anhand der aufgezeichneten Spannungs-Dehnungs-Verläufe, hier am Beispiel einer 0°-Probe aus GFK im stark vergrößerten linear-elastischen Dehnungsbereich Ergebnis (vgl. auch [KOKE et al. (2007)]):

- \rightarrow Eine gute erste Näherung ergibt sich bei der Anwendung virtueller Extensometer.
- → Stabilere Ergebnisse, jedoch mit höherem Aufwand bei der Generierung verbunden, liefert die statistische Dehnungsfeldauswertung ("Bereichsstatistik"), die zur Generierung der im folgenden Abschnitt 2.7 vorgestellten Ergebnisse dient.

Die folgenden **Vorteile photogrammetrischer Messmethoden** gegenüber klassischen Verfahren sind zu nennen:

- → Kontaktbedingte messtechnische Probleme wie Biegemomente durch den Messaufbau oder Abrutschen des Extensometers können nicht auftreten.
- → Mehrere Materialparameter können mit nur einem Experiment bestimmt werden, wie z. B. Elastizitätsmodul E_y , POISSONzahl v_{xy} , Schubmodul G, Feldinformationen zu Verschiebungen u_x und u_y sowie Dehnungen ε_x und ε_y .
- → Das mikromechanische Verhalten von inhomogenen Faserverbundkunststoffen, wie z. B. bei GFK (Einsetzen von Faserbruch, Inhomogenitäten im Dehnungsfeld, Heterogenitäten verursacht durch den Herstellungsprozess des Laminats, etc.) kann untersucht werden.

2.7 Versuchsauswertung und Ergebnisbetrachtung

Dieser Abschnitt beschreibt zunächst das experimentell ermittelte Materialverhalten anhand von Spannungs-Dehnungs-Diagrammen. Daraus werden im weiteren Verlauf die Kennzahlen extrahiert. Als Zugspannung wird dabei die "*auf den Probekörper zu jedem Zeitpunkt der Prüfung wirkende Zugkraft pro Flächeneinheit des Ausgangsquerschnittes in der freien Einspannlänge*" [DIN EN 2561 (1995)] bezeichnet und über der axialen Dehnung, die wie im vorherigen Abschnitt 2.6 ermittelt wird, aufgetragen. Zur Beschreibung von Kompositen ist es gemäß KAW (2006) akzeptabel, von linearem und elastischem Materialverhalten auszugehen; es wäre inakzeptabel, so zu tun, als verhielten sich Komposite isotrop. Dieses linear-elastische Verhalten soll nun genauer untersucht werden.

Das "Knie" im Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Charakteristisch für Gewebeverstärkung eines Faser-Kunststoff-Verbundes ist das sich bei näherer Betrachtung des Verlaufs ausbildende leichte "*Abknicken der Spannungs-Dehnungs-Linie*", das häufig als sog. "Knie" bezeichnet und schematisch in Bild 2.54 illustriert wird. Der zweite Abschnitt nach dem "Knie" verläuft dann wiederum nahezu linear bis zum Erreichen von etwa 80 bis 90 Prozent der Bruchspannung. EHRENSTEIN (1969) führt dies darauf zurück, dass die Gewebeverstärkung aufgrund des gewöhnlich erzielbaren höheren Faservolumenanteils und den insgesamt längeren Verstärkungsfasern mehr Traglast übernimmt. Des Weiteren erläutert er: "*Ein deutlicher Knick tritt nur bei orthotroper Verstärkung (Gewebe) ein. Wenn kein Querverbund vorhanden ist, wie z. B. bei einachsiger Rovingverstärkung, fehlt das "Knie".*" EHRENSTEIN (1969) nennt zwei Ursachen für das Eintreten des "Knies":

1. "Da die Glasfasern im Querverbund (das sind die Glasfasern senkrecht zur Belastungsrichtung) sich wegen des verglichen mit dem Harz um den Faktor 20 höheren E-Moduls nahezu wie starre Körper verhalten, muss die äußere Dehnung vor allem durch die Harzbereiche aufgenommen werden, die zwischen den Glasfasern liegen. Es entsteht eine Dehnungsvergrößerung des Harzes" [PUCK (1967a)].

2. Bedingt durch die Geometrie der Fasern und den Unterschied zwischen E-Modul Harz und (Glas-) Faser "*erfolgt eine Störspannungskonzentration am Scheitel der Fasern im Querverbund, die erheblich höhere Werte erreicht als die äußerlich angelegten Spannungen*" [EH-RENSTEIN (1967)].



Bild 2.54: Der charakteristische Spannungs-Dehnungs-Verlauf mit "Knie" bei Gewebeverstärkung [Ehrenstein (2006)]

"Eine Überlagerung beider Erscheinungen führt zu Überbeanspruchung des Querverbundes und durch Ablösen des Harzes vom Glas zu irreversiblen Schädigungen, so dass von einer direkten Schadensgrenze gesprochen werden kann, die sich von der Streckgrenze vieler Metalle vor allem dadurch unterscheidet, dass sie, bezogen auf die Bruchfestigkeit, bereits bei sehr viel niedrigeren Belastungen auftritt, d. h. dass die Festigkeitsreserven bei den GFK sehr viel größer sind." Ein Streitpunkt war in der Literatur zum damaligen Zeitpunkt, welchen Einfluss der Glasfasergehalt auf die Dehnung hat, bei der sich das Knie ausprägt. Dem Nachweis von PUCK (1967a) anhand der Analyse von Spannungs-Dehnungs-Kurven von Glasfasergewebelaminaten zufolge, erfolgt mit steigendem Glasfaseranteil der Querfaserlagen eine Verschiebung des Knies zu niedrigeren Dehnungen. Eine andere Quelle (O. SCHWARZ) stellte hingegen akustisch aufgrund des einsetzenden Knisterns, das auf ein Lösen des Harzes von den Fasern zurückzuführen ist, anhand von Mattenlaminaten mit steigendem Glasfasergehalt eine Verschiebung des Knies zu höheren Dehnungen fest. [EHRENSTEIN (1969)]

Zur Charakterisierung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von Verbundwerkstoffen, hier speziell von SMC²⁰ mit "Knie", schlagen RENZ et al. (1986) die in Bild 2.55 skizzierten Auswertemöglichkeiten vor. Die erste davon wenden wir auf eine bei Zugbelastung gemessene

²⁰ SMC steht für Sheet Molding Compounds. Dabei werden Pre-Formlinge, sog. nasse Halbzeuge, i.d.R. aus Glas-Kurzfasern und weiteren Füllstoffen sowie Harz hergestellt, die eine Zeit lang unter bestimmten klimatischen Bedingungen ablagern und dann erst später in einem getrennten Verfahrensschritt zu Bauteilen verarbeitet werden. Das geschieht gewöhnlich in einem Pressverfahren.
2



Bild 2.55: Beschreibungsversuche des charakteristischen SD-Verlaufs mit "Knie" bei SMC [RENZ et al. (1986)]

Kurve einer Glasfaserverbundkunststoffprobe, die Bild 2.56 im rechten Diagramm zeigt, an. Im linken Diagramm ist darin deren Linearisierung gegenübergestellt, die die von der Ideallinie abweichende Krümmung veranschaulicht. Eine lineare Regression und die damit erhaltene Steigung würde zu einer niedrigeren Materialkenngröße zur Quantifizierung der Elastizität führen als rechts daneben der bimodale Ansatz, der die zwei Bereiche, getrennt durch das "Knie", einzeln betrachtet. Dabei wird gem. DIN EN ISO 527 und DIN EN 2747 (1998) zur Beschreibung des linear-elastischen Materialverhaltens der Sekantenmodul (später mehr dazu in Abschnitt 2.7.2.1) vor dem sich ausbildenden "Knie" ausgewertet, und hinter dem "Knie" gem. RENZ et al. (1986) der sog. "zweite Modul".



Bild 2.56: Ansätze zur Auswertung einachsiger Spannungs-Dehnungs-Daten [Bildquelle: KOKE et al. (2008)]

2.7.1 Spannungs-Dehnungs-Verhalten der geprüften fasergewebeverstärkten Kunststoffe (Messkurven)

Bevor die mechanischen Materialkenngrößen berechnet werden, betrachten wir zunächst das charakteristische richtungsabhängige Spannungs-Dehnungs-Verhalten der geprüften faserverstärkten Kunststoffe. Dazu werden die protokollierten Messkurven gemäß Bereichsstatistik (Erklärung siehe Abschnitt 2.6.3.6) ausgewertet und für den jeweiligen Faser-Kunststoff-Verbund in den nun folgenden Diagrammen in Bild 2.57 bis Bild 2.60 zusammengestellt. Dabei werden die Spannungs-Dehnungs-Antworten aller geprüften Laminatorientierungswinkel (je nach Fasermaterial vier bis sechs eng zusammenliegende experimentelle Kurven) darin einander und mit Versuchsergebnissen anderer ausgewählter Faserwinkel gegenübergestellt.

2.7.1.1 Glasfaserverstärkter Kunststoff

Bild 2.57 veranschaulicht das richtungsabhängige Materialverhalten von glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK). Aufgetragen sind darin die Messwerte von je vier Versuchen pro Laminatorientierungswinkel. Die untersuchten GFK-Proben zeigen lediglich eine sehr geringe Streuung zwischen den Versuchen je Orientierungswinkel. Die Vergleichswerte aus der Literatur geben mit 335 MPa (Kette bzw. 0°) und 320 MPa (Schuss bzw. 90°) für einen Faservolumenanteil φ von 43 ±2 % und EP-Harz (WL 5.3200 Teil 1+2) etwas höhere Zugfestigkeiten²¹ an [R&G (2006)].



Bild 2.57: Gegenüberstellung Spannungs-Dehnungs-Verhalten von GFK für Hauptfaserrichtungen $\alpha_{\text{Kett}} = 0^{\circ}, 5^{\circ}, 15^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}$, Messpunkte dargestellt von je vier Prüfkörpern

89

Q

²¹ Anmerkung: Die experimentelle Erfassung der Zugfestigkeit ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Ggf. müssen die jeweils zuletzt erfassten Spannungs-Dehnungs-Messwerte mit Einschränkung interpretiert werden, da diese u. U. einige Zeit vorm tatsächlichen Versagen aufgezeichnet wurden. Das kann passieren, wenn die Beschaffenheit der Probenoberfläche bei großen Lasten und starker Deformation eine ausreichende Wiedererkennung des stochastischen Musters nicht mehr zulässt.

2.7.1.2 Aramidfaserverstärkter Kunststoff

In Bild 2.58 sind die Messdaten des richtungsabhängigen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von aramidfaserverstärktem Kunststoff (AFK) aufgetragen.



Bild 2.58: Gegenüberstellung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von AFK für die Hauptfaserrichtungen $\alpha_{\text{Kett}} = 0^\circ$, 15°, 30°, 45° und 90°; dargestellt sind die Messpunkte von jeweils fünf bzw. vier Prüfkörpern

Man beobachtet bei den 30°-Versuchen, dass eine Messkurve deutlich sichtbar unter den anderen verläuft. Es könnte sein, dass diese Probe beim Einspannprozess höheren Druckkräften als die anderen ausgesetzt war, denn insbesondere bei der Materialprüfung von AFK fällt auf, dass die Einwirkung bereits minimaler Drücke, die beim Einspannprozess in den Prüfstand leicht auftreten können, aufgrund der Knickempfindlichkeit der Aramidfaser eine Verringerung der Festigkeit bewirken. Praktisch bedeutet dies für die Spannungs-Dehnungs-Kurve, dass sich der linear-elastische Bereich verkürzt bzw. der 2. lineare Bereich oberhalb des "Knies" nach unten verschiebt.

Die jeweils zuletzt aufgezeichneten Spannungs-Dehnungs-Werte unterliegen einer zusätzlichen Einschränkung bei ihrer Interpretation: neben der bereits erwähnten Schwierigkeit, den Prüfkörper ohne Einwirkung von Druckkräften einzuspannen, kommt hier hinzu, dass die Versuche teilweise nicht zu Ende geführt wurden (aus Zeitgründen infolge der geringen Belastungsrate, was insbesondere im Fall der 30°- und 45°-Versuche zum Tragen kommt). Da es sich bei Aramid um einen sehr schlagzähen Werkstoff handelt, ist es in der Tat schwierig, die Proben bis zum vollständigen Versagen zu bringen. Man beachte die hohen erreichten Dehnungswerte, bis zu deren Erreichen die Proben zwar nicht zerreißen, dennoch stark deformieren. Andererseits, wenn sich der Prüfkörper unter hoher Zuglast extrem längt und die Probenoberfläche dabei zu stark deformiert, wie bei den 30°- und 45°-Versuchen mit AFK, oder gar stellenweise Textur abplatzt, dann ist die Berechnung der Dehnungen anhand des Grauwertabgleichs mit den zuletzt aufgenommenen Bildpaaren ohnehin nicht mehr möglich.

Die Zugfestigkeit dieses 170 g/m²-Aramidgewebes eingebettet in EP-Harz (WL 5.3200 Teil 1+2) wird in der Literatur für einen Faservolumenanteil φ von 43 ±2 % mit 410 MPa (Kettfäden) bzw. 360 MPa (Schussfäden) angegeben [R&G(2006)] (vgl. auch Fußnote 21 auf S. 89).

2.7.1.3 Basaltfaserverstärkter Kunststoff

Ein Vergleich des richtungsabhängigen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von basaltfaserverstärktem Kunststoff (BFK) wird für ausgewählte Faserorientierungen in Bild 2.59 dargestellt.



Bild 2.59: Gegenüberstellung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von BFK für die Hauptfaserrichtungen $\alpha_{\text{Kett}} = 0^\circ, 5^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ und 45°; zu sehen sind die Messpunkte von jeweils fünf Prüfkörpern aus Basaltfasergewebe

Zum Vergleich: Für ein im Resin Transfer Moulding-Verfahren (RTM) gefertigtes Basalt-Laminat, das aus fünf Lagen nicht näher spezifiziertem Basaltgewebe mit Stapelfolge [0°/90°] und einem vergleichbaren Faservolumenanteil von 44% aufgebaut ist, gibt SARAVANAN (2006) (mit Verweis auf VAN DE VELDE et al. (2003), die über diese Versuche jedoch leider nicht berichten) eine Zugfestigkeit von 578,8 MPa an (bei einer Bruchkraft von 46,205 kN, Probenbreite: 24,9 mm, Probendicke: 3,25 mm). Die hier anhand von handlaminiertem BFK beobachtete Zugfestigkeit ist um nahezu ein Drittel geringer (vgl. dazu Fußnote 21 auf S. 89). SARAVANAN (2006) ermittelte einen E-Modul von 33,94 GPa bei einer Querkontraktionszahl von 0,193. Wie später Bild 2.70 zeigen wird, konnte hier ein E-Modul von ca. 20 GPa realisiert werden mit einer Querkontraktionszahl unter 0,1 (vgl. Bild 2.77).

2.7.1.4 Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff

Das richtungsabhängige Materialverhalten von kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) veranschaulicht Bild 2.60. "*Bei Belastung parallel zur Faser verläuft die Spannungs-Dehnungskurve im Zugbereich linear bis zum Bruch*", beschreibt WURTINGER (1977) das Verhalten von UD-CFK-Laminaten, was sich hier für die Gewebelaminate bestätigt. Bei genauerer Betrachtung nimmt die Steigung im 0°-Versuch sogar mit zunehmender Dehnung – im Gegensatz zu den übrigen getesteten Fasermaterialien – leicht zu.





Als Referenzwert zu den dargestellten Messungen gibt R&G (2006) eine Zugfestigkeit von 660 MPa sowohl für die Kett- als auch die Schussrichtung bei einem Faservolumenanteil φ von 43 ±2 % und Matrixmaterial EP-Harz (WL 5.3200 Teil 1+2) an. Siehe auch Fußnote 21 auf S. 89.

Fazit für alle geprüften Materialien

- → Bemerkenswert ist, wie stetig die experimentellen Messkurven verlaufen und wie nah die der einzelnen Zugproben beieinander liegen, gingen wir doch von einem bedingt durch den Herstellungsprozess mit Fehlern und Imperfektionen behafteten Material aus.
- → Geringe Unsicherheit bleibt in Bezug auf 15°-Versuche, da während der Belastung deutliche Sprünge im Dehnungsfeldverlauf beobachtet wurden. Die Prüfkörper – insbesondere aus AFK – scheinen für diesen Anwendungsfall nur bedingt geeignet. Eine Tendenz ist jedoch auch hier klar erkennbar.



2.7.1.5 Vergleich des materialabhängigen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens (bei gleicher Faserorientierung)

Bild 2.61: Gegenüberstellung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von AFK, BFK, CFK und GFK für den Laminatorientierungswinkel α_{Kett} = 0° (oben links), 15° (unten links), 30° (oben rechts) und 45° (unten rechts) ggü. der Belastungsrichtung

In Bild 2.61 ist ein Vergleich der fasergewebeverstärkten Kunststoffe, unter 0° belastet, zu sehen. Aufgetragen wird darin das Mittel mehrerer Messkurven, deren Messpunkte in den vorherigen Abschnitten 2.7.1.1 bis 2.7.1.4 gezeigt wurden. Werden die Werte der einzelnen Messkurven zu gemittelten Werten pro Laminat verdichtet (mit den in der Software Origin zur Verfügung stehenden Algorithmen), so kann eine – wenn auch nur aufgrund ungleicher Faservolumenanteile qualitative – Gegenüberstellung des Materialverhaltens von unterschiedlichen Verstärkungsfasern erfolgen.

- → Die Vergleichbarkeit von basalt- und glasfaserverstärktem Kunststoff in Bezug auf die Steifigkeit wird bei der Betrachtung beider 0°-Messkurven deutlich.
- → Die 45°-Kurven weisen auf eine starke Abhängigkeit von der jeweiligen Webart hin. Die braune Kurve für basaltfaserverstärkten Kunststoff verläuft relativ weich ohne ausgeprägtes "Knie", was an der Leinwandbindung (vgl. Abschnitt 2.2.6) des verwendeten Gewebes mit seinen vielen Fadenkreuzungspunkten liegt. Die übrigen Verstärkungsfasergewebe lagen in Köperbindung vor.

93

(2.15)

2.7.2 Kenngrößenbestimmung aus dem Experiment (DIN 527-1, DIN EN 2747)

"Die wichtigsten Kenndaten für das Auslegen von Verbundbauteilen sowie für eine Spannungs- und Deformationsanalyse im Sinne der Kontinuumstheorie" sind WURTINGER (1977) zufolge "die Elastizitätskenngrößen und Festigkeiten des Verbundwerkstoffs parallel und senkrecht zur Faserrichtung". Bevor wir zur Auswertung der Experimente hinsichtlich der mechanischen Kenngrößen vorstoßen, muss zunächst der Frage nachgegangen werden, wie diese Parameter zu bestimmen sind. Bei der Recherche einschlägiger Normen zu Zugversuchen mit faserverstärkten Kunststoffen schließt sich zwangsläufig eine weitere Frage an: Welche Kenngröße ist die richtige? Diesen Fragen wurde zum Teil bereits eingangs in diesem Abschnitt nachgegangen ("Knie", Sekantenmodul und 2. Modul) und soll im nun Folgenden durch Analysen und Vergleiche weiter vertieft werden.

2.7.2.1 Der Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul (kurz: E-Modul) bezeichnet einen Materialkennwert aus der Werkstoffkunde, der den (linear-elastischen) Zusammenhang zwischen Spannung und Verformung bei mechanischer Beanspruchung eines Materials beschreibt und somit eine *"unmittelbare Vergleichsgröße der Steifigkeit eines Bauteils*" ist. Diese charakteristische Kenngröße ist werkstoff- und temperaturabhängig und kann darüber hinaus richtungsabhängig sein. [BEITZ/GROTE (2001)] Ferner zeigt sich als weitere Besonderheit bei Faserverbundwerkstoffen die Abhängigkeit vom Faservolumenanteil. Der E-Modul *E* wird aus dem Verhältnis von Zugspannung (Zugkraft *F* bezogen auf den Ausgangsquerschnitt *A*) und Dehnung ε_y (Längenänderung Δl pro Ausgangslänge l_0) bestimmt:



Bild 2.62: Schematische Darstellung eines Zugversuchs

Die Kenngröße bezieht sich auf das elastische (reversible) Werkstoffverhalten und beschreibt die Steigung in dem Bereich des Spannungs-Dehnungs-Diagramms, "*in dem Spannung und Dehnung zueinander proportional sind*" (=HOOKEsches Gesetz), was typischerweise zu Beginn der Belastung vorliegt [MÜLLER/FERBER (2008)]. Es gibt mehrere Möglichkeiten, den E-Modul zu bestimmen: u. a., indem eine Tangente durch den Ursprung gelegt wird. Aufgrund des größeren Einflusses von Messfehlern bei kleinen Werten und wegen Einspanneffekten ist

das jedoch nicht ratsam. Nach DIN EN 2747 (1998) "wird empfohlen, den Sekantenmodul bei 0,1% anstelle des Tangentenmoduls zu bestimmen, wenn letzterer nicht bestimmt werden kann und diesen als Tangentenmodul aufzuzeichnen." DIN EN ISO 527-1 (1996) beschreibt den "Elastizitätsmodul aus dem Zugversuch; Zugmodul E_t " als "Quotient aus dem Spannungsunterschied σ_2 minus σ_1 und dem entsprechenden Dehnungsunterschied $\varepsilon_2 = 0,0025$ minus $\varepsilon_1 = 0,0005$ " (siehe Bild 2.63, in dem exemplarisch am Beispiel von Kurve d Wertepaare eingetragen sind):

$$E_{0,2\%} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}.$$
 (2.16)



Bild 2.63: Typische Spannungs-Dehnungs-Verläufe im Zugversuch für "Kurve a: spröde Werkstoffe, Kurven b und c: zähe Werkstoffe mit Streckpunkt, Kurve d: zähe Werkstoffe ohne Streckpunkt" [Bildquelle: nach DIN EN ISO 527-1 (1996)]

Des Weiteren merkt DIN EN ISO 527-1 (1996) an: "Bei rechnerunterstützten Prüfeinrichtungen kann die Ermittlung des Zugmoduls" $E_{0,2\%}$ "über 2 ausgewählte Spannungs-/ Dehnungswerte durch eine auf den Kurvenbereich zwischen diesen ausgewählten Punkten angewandte lineare Regressionsrechnung ersetzt werden." Auf letztgenannter Ermittlungsmethode basieren die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten experimentellen Sekantenmoduln $E_{0,2\%}$, die im Folgenden mit E-Moduln bezeichnet werden. Dazu wurde die gemessene Kraft normiert auf den Ausgangsprobenquerschnitt als Funktion der Dehnungswerte, die über die gesamte Probenoberfläche gemittelt wurden (=,,Bereichsstatistik" ε_y , vgl. Abschnitt 2.6.3.6), im Spannungs-Dehnungs-Diagramm aufgetragen und im Wertebereich von 0,05 bis 0,25 % axialer Dehnung via linearer Regressionsanalyse ausgewertet.

95

2.7.2.1.1 Handelt es sich überhaupt um linear-elastisches Materialverhalten? – Spannungs-Dehnungs-Verhalten im zyklischen Zugversuch

Nun soll der Frage nachgegangen werden, ob im Falle der geprüften FVK tatsächlich linearelastisches Materialverhalten vorliegt. "Linear" wäre es dann, wenn der Spannungs-Dehnungs-Verlauf zu Beginn des Zugversuchs proportional ansteigt (HOOKEsches Gesetz). Darüber hinaus wäre es "elastisch", wenn nach Entlastung keine (plastische) Verformung im linearen Bereich zurückbleibt [SCHÜRMANN (2007)]. Der in Abschnitt 2.6.2 beschriebene zyklische Zugversuch liefert am Beispiel von CFK das in Bild 2.64 dargestellte Spannungs-Dehnungs-Verhalten. Dabei wurde die Probe bis 0,35 % Dehnung – was den Bereich einschließt, in dem aus der Steigung der E-Modul ermittelt wird – be- und anschließend wieder entlastet (Belastungsstufe 2, vgl. Abschnitt 2.6.2). Deutlich erkennbar sind die übereinander liegenden Kennlinien bei ansteigender und wieder abfallender Belastung.



axiale Dehnung [%]



Der darüber hinaus für jeden Prüfkörper ermittelte E-Modul (Sekantenmodul 0,2 %) ergibt – verglichen mit den Steigungen der weiteren Lastzyklen (jeweils für die Belastungsphase) – eine max. Abweichung von ± 2 % ggü. des E-Moduls, was auf Messungenauigkeit zurückgeführt werden kann. Die Versuche zur Belastungsstufe 1 liefern logischerweise dasselbe Ergebnis, weshalb hier auf die ausführliche Darstellung verzichtet wird.

Fazit: Die Frage, ob linear-elastisches Materialverhalten bei faserverstärkten Kunststoffverbunden vorliegt, es also einen linearen Anstieg in der Spannungs-Dehnungs-Kurve gibt, lässt sich damit eindeutig bejahen. Was passiert, wenn der linear-elastische Bereich überschritten wird? Ein konkretes Experiment mit aramidfaserverstärktem Kunststoff, der über das Knie hinweg bis 0,7 % Dehnung axial belastet wird, ist in Bild 2.65 oben dargestellt. Unten links in Bild 2.65 ist dies schematisch anhand eines qualitativen Beispiels aus der Literatur zu sehen. Man erkennt, wie sich nach einem "Einfahren" der Probe ein neuer linear-elastischer Zustand einstellt.



Bild 2.65: Charakteristisches Materialverhalten von AFK bei zyklischer Zugbelastung über den elastischen Bereich hinaus [Bildquelle: nach TOMBERS (2008)], der wiederholten Belastung eines Faserverbundkunststoffes aus der Literatur gegenübergestellt [Bildquelle: SCHÜRMANN (2007)]

Davon abweichend lässt sich im Falle eines über den elastischen Bereich hinaus zyklisch belasteten CFK-Prüfkörpers beobachten, dass die Steigungen der weiteren Belastungszyklen ggü. dem Ausgangs-E-Modul – wenn auch nur leicht – zunehmen (siehe Bild 2.66).

Q



Bild 2.66: Charakteristisches Materialverhalten von CFK bei zyklischer Zugbelastung über den elastischen Bereich hinaus [Bildquelle: nach TOMBERS (2008)]

2.7.2.1.2 Einfluss des Faservolumenanteils auf den E-Modul

Aufgrund seines Einflusses auf das mechanische Verhalten der Faserverbundkunststoffe, sind die berechneten Kennwerte immer im Zusammenhang mit dem entsprechenden Faservolumenanteil zu sehen [EHRENSTEIN (2006), SCHÜRMANN (2007)]. Zur Darstellung der Kenngrößenabhängigkeit vom Faservolumenanteil werden die experimentell ermittelten E-Moduln nun in Bild 2.67 bis Bild 2.70 als Funktion von φ aufgetragen. Dabei repräsentiert jeder Punkt in den Diagrammen das Resultat eines Zugversuchs. Maximal sechs der getesteten Zugprüfkörper, die verglichen werden, entstammen aus einem Prüflaminat, was sich durch den identischen Faservolumenanteil bemerkbar macht. Der E-Modul wird dabei durch den Sekantenmodul repräsentiert. Die Auswirkung der Winkelabweichung von Belastungs- und Faserrichtung wird im Abstand von 15° gemessen. Aus Gründen des symmetrischen oder – im Falle der Glas- und Aramidfasern – nahezu symmetrischen Gewebes in Kett (0°)- und Schussrichtung (90°) wurde vor dem Hintergrund des erheblichen experimentellen Aufwands auf 60°- und 75°-Prüfkörper verzichtet. Das Verhalten lässt sich aus den 15°- und 30°-Versuchen auf Basis der Abweichung der 90°-Messergebnisse ggü. den 0°-Ergebnissen extrapolieren.

Zunächst wollen wir die im Rahmen dieser Arbeit am umfangreichsten untersuchten glasfasergewebeverstärkten Kunststoffe in Bild 2.67 betrachten. Dafür lässt sich aus den Experimenten ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen E-Modul und Faservolumenanteil herauslesen, der bspw. für GFK-0°-Versuche durch die Gleichung

$$E_{0.2\%}(\varphi)[\text{GPa}] = 19,5[\text{GPa}] \cdot \varphi[-] + 10,6[\text{GPa}]$$
(2.17)

näherungsweise charakterisiert werden kann. Es ist bemerkenswert, dass sich für alle betrachteten Faserorientierungswinkel nahezu dieselbe Steigung ergibt. Diese beiden Effekte sind auch deshalb besonders gut zu sehen, weil die Unterschiede im Faservolumenanteil doch erheblich sind, nämlich nahezu zehn Prozent. Der Grund dafür ist darin zu suchen, dass die Probelaminate von verschiedenen Personen hergestellt wurden.



Bild 2.67: E-Modul $E_{0.2\%}$ von glasfasergewebeverstärktem Kunststoff in Abhängigkeit von φ

Auch die kohlenstoff- und aramidfasergewebeverstärkten Kunststoffe in Bild 2.68 und Bild 2.69 folgen im Wesentlichen diesen Trends. Die Variation des Faservolumenanteils (nur ein Laminierer!) ist hier jedoch mit ca. fünf Prozent kleiner und weniger deutlich als bei GFK.



Bild 2.68: E-Modul $E_{0.2\%}$ von kohlenstofffasergewebeverstärktem Kunststoff abhängig von φ

Q



Bild 2.69: E-Modul $E_{0,2\%}$ von aramidfasergewebeverstärktem Kunststoff in Abhängigkeit des Faservolumenanteils φ

Die Abhängigkeit des E-Moduls vom Faservolumenanteil und der Faserorientierung bei bidirektional gewebeverstärktem GFK, AFK und CFK, die wir bereits in Bild 2.67 bis Bild 2.69 einzeln betrachtet haben, soll nun im folgenden Bild 2.70 gegenübergestellt werden. Des Weiteren ist darin das Materialverhalten von basaltfaserverstärktem Kunststoff, welches offensichtlich am ehesten vergleichbar zu dem von glasfaserverstärktem Kunststoff ist, ergänzt. Es wird darüber hinaus deutlich, welchen starken Einfluss selbst eine nur geringe Winkelabweichung von z. B. 5° von der Faserverstärkungsrichtung auf das Steifigkeitsverhalten des Werkstoffverbundes besitzt. Insbesondere bei den Messpunkten der kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffe konterkariert der Versuch, möglichst gleichbleibende Faservolumenanteile beim Laminiervorgang einzustellen, den Effekt eines linearen Zusammenhangs. Folgendes wird trotz Messungenauigkeit des angegebenen Faservolumenanteils (weniger als $\pm 0,3$ %, siehe Abschnitt 2.7.3) und E-Moduls (rel. Fehler ca. 3%, vgl. Abschnitt 2.7.3) dennoch deutlich:

- → Der Faservolumenanteil nimmt entscheidenden Einfluss auf die Steifigkeitskennwerte und kann bei der Angabe eines jeden Verbundwerkstoffkennwertes – wie leider häufig in der Literatur vorgefunden – vor dem Hintergrund der Aussagekräftigkeit nicht vernachlässigt werden.
- → Die Faservolumenanteile pro Materialpaarung streuen gar nicht so sehr, wie vielleicht gemeinhin angenommen. Sie liegen in einem Fenster von max. 10 %. Mit der Tabelle 2.6 findet der Laminierer Anhaltspunkte für das sich im Handlaminierverfahren einstellende Faser-Volumen-Verhältnis bei verpressten (0,7 bar) und unverpressten (luftgetrockneten) Laminaten. Erfahrene Laminierer erzielen Abweichungen von unter ± 2%, was im Bereich des Messfehlers für die Bestimmung des Wertes liegt.

- → Unter dem Leichtbauaspekt ist entscheidend, dass die erzielten Faservolumenanteile von CFK grundsätzlich höher sind als die von GFK. Das kann an der guten Benetzbarkeit der Kohlenstofffaser liegen oder daran, dass sich die Glasfaser aufgrund ihrer geringeren Biegesteifigkeit stärker bzw. besser um die anderen Glasfasern im Gewebe herumlegt, hingegen die Kohlefasern im Wesentlichen flacher aufeinander aufliegen und weniger biegsam sind.
- → Die Abnahme der Steifigkeit (E-Modul) mit Abweichung der Belastungs- von der Faserrichtung wird ebenfalls deutlich.
- → Mit einem nahezu identischen Zusammenhang (Steigung) zwischen Faservolumenanteil und E-Modul f
 ür die einzelnen Belastungsrichtungen des Laminats kann gerechnet werden.
- → Insbesondere wird die bereits in Abschnitt 2.2.4 angepriesene Vergleichbarkeit der Eigenschaften von Glas- und Basaltfasern deutlich: Die Geraden, welche das Verhalten der Glasfasern kennzeichnen, gehen, wenn extrapoliert, durch die jeweiligen Steifigkeitswerte für BFK.



Bild 2.70: E-Modul $E_{0,2\%}$ der untersuchten gewebefaserverstärkten Kunststoffe in Abhängigkeit der Faserorientierung und des Faservolumenanteils φ

Vor dem Hintergrund der Abhängigkeit vom Faservolumenanteil schlägt die Interessengemeinschaft Deutscher akademischer Fliegergruppen in KICKERT (1988) vor, charakterisierende Materialkennwerte zu wählen, die gänzlich querschnittsunabhängig sind und sich ausschließlich auf die maßgebliche Angabe der tragenden eingebetteten Fasermenge beziehen, anstatt auf die Bauteildicke. KICKERT (1988) kommt zu diesem Schluss, da ein "*flächenbezo*gener Materialkennwert²² … nur in Verbindung mit der Angabe des Faservolumenanteils gültig" ist, es bei der Bauteilfertigung im Handlaminierverfahren aber schier unmöglich ist, gleichbleibende Faservolumenanteile einzustellen.

2.7.2.2 Der Schubmodul

Der Schubmodul *G* stellt analog zum Elastizitätsmodul den Zusammenhang zwischen Schubspannung τ und Scherdehnung γ (auch Scherwinkel genannt) durch die Beziehung

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \tag{2.18}$$

her. Der Schubmodul beschreibt den Widerstand des Werkstoffs gegenüber Scherverformung [MÜLLER/FERBER (2008)].

2.7.2.2.1 In welchem Wertebereich und wie genau wird G_{12} ermittelt?

Der **Schubmodul** kann gemäß DIN EN ISO 14129 (1998) ebenfalls im Zugversuch anhand von Prüfkörpern, deren Fasern um $\pm 45^{\circ}$ zur Längsachse der Probe orientiert sind, ermittelt werden. Wie bei CARLSSON und PIPES (1989) beschrieben, lässt sich der Schubmodul aus der Schubspannung, die wie in Bild 2.72 über dem Scherwinkel aufgetragen wurde, ablesen.



Bild 2.72: Scherspannungs-Scherdehnungs-Kurve aus Zugversuch zur Schubmodulbestimmung am Beispiel einer [±45°]₂₅-Kohlenstofffaser/Epoxidharz-Probe [Bildquelle: CARLSSON/PIPES (1989)]

²² wie z. B. der E-Modul

Dabei berechnet sich die Schubspannung aus der halben Zugspannung (siehe Gleichung (2.22)). Der Scherwinkel ist die Summe aus dem Betrag der Quer- und Längsdehnung (siehe Formel (2.20)). Die Dehnungen in und quer zur Belastungsrichtung werden in unserem Fall in einem Experiment durch flächige Dehnungsfeldauswertung erfasst, was klassischerweise nur punktuell über aufgeklebte Dehnungsmessstreifen möglich war. Die Steigung der ermittelten Messkurve entspricht dem Schubmodul G_{12} . Analog zum in Abschnitt 2.7.2.1 bestimmten Sekantenmodul wird $G_{0.3\%}$ mittels linearer Regression im Intervall der Scherdehnung von 0,05 % bis 0,35 % bestimmt.

2.7.2.2.2 Schubmodulbestimmung – Begründung der Vorgehensweise

Die Erklärung, warum der Schubmodul in der vorgestellten Weise bestimmt werden kann, liefert der MOHRsche Kreis, und zwar sowohl für den Dehnungs- als auch für den Spannungsraum aufgetragen [in Anlehnung an MÜLLER/FERBER (2008), FERBER (1996)]. Rechts in Bild 2.73 ist der zugehörige Zugversuch zu sehen, der dem links daneben abgebildeten Dehnungskreis zugrunde liegt. Beim MOHRschen Dehnungskreis werden die Scherdehnungen über den Normaldehnungen aufgetragen.



Bild 2.73: MOHRscher Dehnungskreis nach MÜLLER/FERBER (2008) und FERBER (1996)

Für den in Bild 2.73 dargestellten Versuch gilt offenbar für $\varepsilon_{yy} > 0$:

$$\mathcal{E}_{xx} = -\mathcal{V}\mathcal{E}_{yy} < 0. \tag{2.19}$$

Aus dem dazugehörigen Dehnungskreis lässt sich für den Radius abgelesen:

$$\frac{1}{2}\gamma = \frac{\varepsilon_{yy} + |\varepsilon_{xx}|}{2}.$$
(2.20)

Es folgt somit für den Scherwinkel:

$$\gamma = \varepsilon_{yy} + \left| \varepsilon_{xx} \right|. \tag{2.21}$$

Q



Um die Verbindung zu den Schubspannungen herzustellen, müssen wir uns außerdem den MOHRschen Spannungskreis in Bild 2.74 anschauen.



Bild 2.74: MOHRscher Spannungskreis nach MÜLLER/FERBER (2008) und FERBER (1996)

Für den in Bild 2.74 auf der rechten Seite dargestellten Versuch ist $\sigma_{yy} > 0$ und $\sigma_{xx} = 0$. Wir lesen aus dem daneben abgebildeten MOHRschen Spannungskreis ab:

$$\tau = \frac{\sigma_{yy} + \sigma_{xx}}{2} \equiv \frac{\sigma_{yy}}{2},$$

$$2\alpha_0 = \frac{\pi}{2} \implies \alpha_0 = \frac{\pi}{4} = 45^{\circ}.$$
(2.22)

Nach HOOKE gilt:

$$\tau = G\gamma \implies G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{\sigma_{yy}/2}{\varepsilon_{yy} + |\varepsilon_{xx}|},$$
 (2.23)

was die Eingangsbehauptung beweist.

2.7.2.2.3 Einfluss des Faservolumenanteils auf den Schubmodul

In analoger Weise zum E-Modul kann auch der Schubmodul aus den einzelnen Versuchen für die vier Verstärkungsfasern und unterschiedlichen Faserorientierungswinkel über dem Faser-volumenanteil aufgetragen werden (siehe Bild 2.75). Beachte: die in Bild 2.75 angegebenen Faserorientierungswinkel beziehen sich auf die Zugversuche, aus denen die Schubmoduln generiert wurden. Um den Winkel zu erhalten, unter dem der Schubmodul wirkt, muss zum darin angegebenen Winkel $\alpha_0 = 45^{\circ}$ hinzuaddiert werden.



Bild 2.75: Schubmodul G der untersuchten gewebefaserverstärkten Kunststoffe in Abhängigkeit des Faservolumenanteils φ

2.7.2.3 Die Querkontraktionszahl (Poissonzahl)

Die **Querkontraktionszahl** ν wird aus dem Quotient von Quer- zu Längsdehnung ε_y ermittelt, der mit negativem Vorzeichen versehen wird, um eine positive Kenngröße zu erhalten:

$$v = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}.$$
 (2.24)

Dabei berechnet sich die Querdehnung ε_x aus der Änderung der Prüfkörperbreite bezogen auf die Ausgangsbreite (vgl. Bild 2.62):

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta b}{b_0}.$$
(2.25)

Grundsätzlich erfolgt die Auswertung, indem die Querdehnung in einem Diagramm über der Längsdehnung aufgetragen und die Querkontraktionszahl v als Steigung der Messkurve im linearen Anfangsbereich abgelesen wird [DIN EN 527-1 (1997)]. Für Off-Axis-Versuche (5°, 15°, 30° und 45°) funktioniert das wie beschrieben, wenn zur Auswertung die Wertepaare innerhalb eines Dehnungsintervalls von $0,05 \% \le \varepsilon_y \le 0,4 \%$ für die lineare Regression herangezogen werden.

Das Verfahren wird für 0°- bzw. 90°-Proben geringfügig modifiziert, da hier insbesondere bei den ersten gemessenen Wertepaaren des $\varepsilon_x(\varepsilon_y)$ -Diagramms aufgrund der extrem kleinen ε_x -

Werte Signalschwankungen starken Einfluss nehmen und somit die berechnete Regressionsgerade verrauschen würden. Daher wird in diesen Fällen der Quotient $-\varepsilon_x/\varepsilon_y$ für jede Last-

105

stufe der photogrammetrischen Dehnungsfeldanalyse berechnet und im Diagramm über den Laststufen aufgetragen (vgl. Bild 2.76). Der Startwert des auszuwertenden Intervalls wird nun empirisch über die Standardabweichung der Quotienten $-\varepsilon_x/\varepsilon_y$ gegenüber ihrer Vorgänger ermittelt, wenn diese einen Wert $\leq 0,02$ erreicht. Endwert des Intervalls bildet der Quotient $-\varepsilon_x/\varepsilon_y$, der bei 80 % der Laststufen auftritt.



Bild 2.76: POISSONzahlbestimmung für 0°- und 90°-Versuche nach DAU (2007) [Bildquelle: TOMBERS (2008)]

Die vorgestellte Vorgehensweise erzielt in den Vorversuchen für die untersuchten Glasfaser-Kunststoff-Proben gute Übereinstimmung mit den von Lami*Cens*[©] berechneten Querkontraktionszahlen (vgl. auch Bild 3.31, Bild 3.47 und Abschnitt 3.8.3.2 zu GFK).

2.7.2.3.1 Einfluss des Faservolumenanteils auf die Querkontraktionszahl

Die Abhängigkeit der Querkontraktionszahl vom Faservolumenanteil ist in Bild 2.77 dargestellt. Es gelten im Wesentlichen die im Abschnitt 2.7.2.1.2 (zu Bild 2.70) gemachten Aussagen in analoger Weise. Bemerkenswert ist, dass die Querkontraktionszahlen der einzelnen faserverstärkten Kunststoffe für die jeweiligen Faserorientierungswinkel relativ nah beieinander liegen.

2.7.2.3.2 V_{21} größer 0,5 – geht das?

Bei isotropen Ingenieurwerkstoffen erwartet man, dass die Querkontraktionszahl um 0,3 liegt und aufgrund von Volumenkonstanz des Materials nicht größer als 0,5 ist. Hingegen bei anisotropen Materialien kann sie größer als 0,5 sein, wissen wir nach TSAI et al. (1988) und TSAI (1992). Bspw. führen erstgenannte für einen $[\pm 45^\circ]$ -CFK eine Querkontraktionszahl von 0,747 an, bei $[\pm 30^\circ]$ betrage sie sogar 1,37. Teilweise lässt sich dies durch den Schereneffekt veranschaulichen. TSAI et al. (1988) deuten an, dass man diesen Effekt im Rahmen eines mikromechanischen Modells quantifizieren kann.



Bild 2.77: Querkontraktionszahl ν der untersuchten gewebefaserverstärkten Kunststoffe in Abhängigkeit des Faservolumenanteils ϕ

2.7.3 Fehlerabschätzung für Faservolumenanteil und E-Modul

Wir setzen uns zum Ziel, eine Formel zur Bestimmung des Fehlers im experimentell generierten **Faservolumenanteil** $\Delta \varphi$ herzuleiten und auszuwerten. Dazu starten wir von Gleichung (2.11) und bemerken, dass die folgenden Größen bedingt durch den Präparationsprozess fehlerbehaftet sind: Masse der Fasern $m_{\rm F} + \Delta m_{\rm F}$, Masse des Verbundes $m_{\rm Composit} + \Delta m_{\rm Composit}$. Mangels besseren Wissens nehmen wir hingegen an, dass die Herstellerangaben für die Dichte von Faser und Harz keine Fehler enthalten. Eine mögliche Schwankung des realen ggü. dem nominellen Flächengewicht des Gewebes, das laut Herstellerangabe um maximal 10 % schwanken könnte, wird hier ebenfalls nicht berücksichtigt. Eine lineare Fehleranalyse liefert dann folgende Gleichung:

$$\Delta \varphi = \left(\frac{A}{1 - (1 - D)A} \left[(1 + D)B + C \right] + B \right) \frac{D}{1 - (1 - D)A} , \qquad (2.26)$$

wobei:

$$A = \frac{m_{\rm F}}{m_{\rm Composit}}, \ B = \frac{\Delta m_{\rm F}}{m_{\rm Composit}}, \ C = \frac{\Delta m_{\rm Composit}}{m_{\rm Composit}}, \ D = \frac{\rho_{\rm H}}{\rho_{\rm F}}.$$
 (2.27)

Wir notieren die folgenden Werte für die darin auftretenden Größen (Worst-Case-Betrachtung):

- $\rightarrow m_{\rm F} = 36 \, {\rm g},$
- $\rightarrow m_{\text{Composit}} = 60 \text{ g},$
- → $\Delta m_{\rm F} = m_{{\rm Faser},k} \cdot \Delta A_{{\rm Laminat}} \cdot n \approx 0,112 \text{ g}$, mit $\Delta A_{{\rm Laminat}} = \Delta l \cdot (l+b)$ (nach Gleichung (2.9), wobei $\Delta l = 0,1$ mm der Fehler in der Längenmessung und l und b Länge und Breite des Laminats bezeichnen: $l+b \approx 500$ mm; für $m_{{\rm Faser},k}$ wird im Folgenden der Wert von Basalt genommen, so, wie er in Tabelle 2.1 zu finden ist),
- $\rightarrow \Delta m_{\text{Composit}} = 10^{-3} \text{g},$
- → für $\rho_{\rm H} = 1,135$ g/cm³ und $\rho_{\rm F} = 1,45$ g/cm³ nach Tabelle 2.5 (Epoxidharzsystem L1100 + EPH 294) und Tabelle 2.1 (Aramid).

Es ergibt sich damit ein Fehler für den Faservolumenanteil $\Delta \varphi$ von 3,4 · 10⁻³, also ca. 0,3 %.

Für die **Fehlerabschätzung des E-Moduls** starten wir mit Gleichung (2.15). Diesmal sind die folgenden Größen bedingt durch den Messprozess fehlerbehaftet: Zugkraft $F + \Delta F$, Probenquerschnitt $A + \Delta A$ und Längsdehnung $\varepsilon_v + \Delta \varepsilon_v$. Eine lineare Fehleranalyse liefert diesmal:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta A}{A} + \Delta \varepsilon_{y} . \qquad (2.28)$$

Die folgenden Zahlenwerte für die darin auftretenden Größen wurden verwendet:

- → $\frac{\Delta F}{F} \approx 0.01$ [MTS (2004)],
- → $\frac{\Delta A}{A} = \frac{(d+b)\Delta d}{d \cdot b} \approx 0,0208$, wobei $\Delta d = 0,02$ mm der Fehler in der Dicken- und Breitenmessung und $d \approx 1$ mm und b = 25 mm Dicke und Breite des Probenquerschnitts bezeichnen,
- → $\Delta \mathcal{E}_y \approx 4 \cdot 10^{-4}$ (siehe Bild 2.50).

Somit ergibt sich ein relativer Fehler für den E-Modul von etwa 3%. Für den Schubmodul ergibt sich aufgrund der Ähnlichkeit der Formel ein vergleichbar großer Fehler.

Q

3 Theorie zum Labor – Einführung in die Laminattheorie und Vergleich mit Experimenten

Zum besseren Verständnis der Grundgleichungen der Laminattheorie sind zu Beginn dieses Kapitels einige hierfür relevante kontinuumsmechanische Begriffe zusammengestellt, da sich die Laminattheorie mit kontinuumstheoretischen Konzepten entwickeln lässt. Anschließend wird näher auf die Laminattheorie eingegangen und deren prognostizierte Materialkennwerte mit experimentell in der vorliegenden Forschungsarbeit ermittelten Ergebnissen verglichen.

ALTENBACH/ALTENBACH (1994) fassen die Aufgabe der Kontinuumsmechanik dahingehend zusammen, dass von der Betrachtung eines diskreten, mikrostrukturellen Materiemodells unter Beachtung des Größenmaßstabes Schlüsse auf ein phänomenologisches Materiemodell (= das Kontinuum) gezogen werden. Dabei ist "ein Kontinuum eine Punktemenge, die den Raum oder Teile des Raumes zu jedem Zeitpunkt stetig ausfüllt. Den Punkten werden bestimmte Materieeigenschaften zugeordnet".

3.1 Bilanzgleichungen

Ein zentraler Bestandteil der Kontinuumsmechanik sind Bilanzgleichungen. Diese stellen allgemeine Naturgesetzte dar. Sie spiegeln beispielsweise die Massenerhaltung wieder, was gemeinhin bedeutet, dass in einem geschlossenen System keine Masse verloren geht. Eine weitere Gleichung resultiert aus der Tatsache, dass der Impuls ebenfalls erhalten bleibt bzw. dessen zeitliche Änderung der Einwirkung resultierender Kräfte entspricht (NEWTONS Grundgesetz). Beide Bilanzgleichungen sind zunächst einmal global, in dem Sinn, dass sie sich auf ein (materielles) System beziehen. Wie wir zeigen werden, lassen sich aus den globalen Bilanzgleichungen jedoch auch lokale Bilanzen (partielle Differentialgleichungen) herleiten, in denen Zeit- und Ortsableitungen der primär interessierenden Feldgrößen Massendichte und Geschwindigkeitsfeld vorkommen. In der lokalen Impulsbilanz beispielsweise treten so Zeit- und Ortsableitungen des Geschwindigkeitsfeldes in einen direkten Zusammenhang mit dem Spannungsfeld. Da jedoch das Spannungsfeld noch nicht als Funktion von Dichte und Geschwindigkeitsfeld bzw. deren Ableitung bekannt ist, bleibt das Gleichungssystem unterbestimmt und somit sind weitere Formeln (Materialgleichungen für die Spannung) notwendig.

3.1.1 Ziel der Kontinuumsmechanik: Bestimmung von vier Feldern

Die Kontinuumsmechanik hat die Bestimmung von fünf Feldgrößen zum Ziel, nämlich das Feld der Dichte ρ und der Geschwindigkeit (vektorwertige Größe = drei Komponenten) $v_i = dx_i/dt$ sowie der Temperatur. In dieser Arbeit interessieren insbesondere die erstgenannten vier Feldgrößen. Die fünfte wäre nur relevant, wenn wir über die Mechanik hinaus Wärmeleitungsprobleme lösen wollten. Alternativ zur Geschwindigkeit wird insbesondere in der Festkörpermechanik das Feld der Verschiebungen betrachtet, nämlich $u_i = x_i - X_i$, wobei x_i die aktuelle und X_i die Referenzlage eines materiellen Punktes bezeichnen. Beachte, dass es sich bei all diesen Feldern um Funktionen des Ortes x_i und der Zeit t handelt. Ferner stehen die Indizes i für die drei kartesischen Koordinaten des Raumes, also i = x, y, z oder (rechentechnisch einfacher) i = 1, 2, 3. Zur Bestimmung dieser vier Felder sind offenbar vier Gleichungen erforderlich. Diese basieren auf der Massen- sowie der Impulsbilanz (= NEWTONS Grundgesetz), wie nachstehend erläutert wird.

3.1.2 Massenbilanz

Für die Masse M eines stets aus denselben Teilchen bestehenden, zeitveränderlichen Volumens V(t) (vgl. Bild 3.1) gilt:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}M=0\,,\tag{3.1}$$

d. h. sie ändert sich nicht mit der Zeit t. Die Gesamtmasse selbst lässt sich durch "Addieren" der Massenbeiträge der kleinen Untervolumina dV (vgl. Bild 3.1) ermitteln:

$$M = \int_{M} \mathrm{d}m \,. \tag{3.2}$$

Für das Massenelement d*m* lässt sich mit der Volumendichte $\rho(\underline{x},t)$ (in Masse pro Volumeneinheit) schreiben:

$$\mathrm{d}m = \rho(\underline{x}, t)\mathrm{d}V \ . \tag{3.3}$$

Also ergibt sich durch Einsetzen:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \iiint_{V(t)} \rho(\underline{x}, t) \mathrm{d}V = 0.$$
(3.4)

3.1.3 Impulsbilanz

NEWTONS Axiom besagt allgemein, dass die zeitliche Änderung des Gesamtimpulses P_i gleich der angewandten Kräfte K_i ist, also in Formeln:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}P_i = K_i, \quad \text{mit } i = 1, 2, 3.$$
 (3.5)

Für eine Punktmasse m berechnet sich der Impuls gemäß

$$p_i = m \cdot v_i = m \frac{\mathrm{d}x_i}{\mathrm{d}t} \,. \tag{3.6}$$

Für den Impuls des kleinen Elementes aus Bild 3.1 folgt dann entsprechend der Gleichung (3.3):

$$\mathrm{d}p_i = \mathrm{d}m \cdot v_i = \rho v_i \mathrm{d}V \,. \tag{3.7}$$



Bild 3.1: Volumenelement mit geschlossener Oberfläche

Der gesamte Impuls eines materiellen Gebietes $V(t)^{23}$ wird durch "Aufsummieren" aller Einzelimpulse ermittelt und beträgt:

$$P_i = \iiint_{V(t)} \rho v_i \mathrm{d} V \,. \tag{3.8}$$

Angewendet auf NEWTONS Grundgleichung (3.5) ergibt sich:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \iiint_{V(t)} \rho v_i \mathrm{d}V = K_i.$$
(3.9)

Es ist in der Kontinuumsmechanik üblich, die Kräfte K_i additiv in Volumenkräfte F_i und Oberflächenkräfte T_i zu zerlegen:

$$K_i = F_i + T_i. aga{3.10}$$

Zu den Volumenkräften zählen z. B. die Gravitation, die durch eine spezifische Kraft f_i , nämlich die Erdbeschleunigung g_i , ermittelbar ist. Es gilt:

$$F_i = \iint_M f_i dm = \iiint_{V(t)} \rho \ f_i dV \equiv \iiint_{V(t)} \rho \ g_i dV .$$
(3.11)

Wählen wir die x_3 -Richtung entgegen der Schwerkraft, so folgt:

$$g_i = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -9,81 \text{ m/s}^2 \end{pmatrix} = \text{const.} \implies F_i = g_i \iiint_{V(i)} \rho \, \mathrm{d}V \equiv Mg_i, \quad (3.12)$$

wobei im letzten Gleichungsschritt von der Definition der Gesamtmasse gemäß den Gleichungen (3.2) und (3.3) Gebrauch gemacht wurde.

111

²³ Ein materielles Gebiet besteht stets aus *denselben* Teilchen. Mithin bleibt seine Gesamtmasse erhalten, d. h. sie ist zeitlich konstant.

Auch die Oberflächenkräfte T_i folgen durch Summation von Oberflächenkraftdichten t_i , welche anschaulich die Bedeutung eines Kraftvektors pro Flächenelement haben:

$$T_i = \oint_{\partial V(t)} t_i dA.$$
(3.13)

dA steht für das Oberflächenelement aus Bild 3.2. Es folgt für den Ausdruck (3.9):

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \iiint_{V(t)} \rho \upsilon_i \mathrm{d}V = \iiint_{V(t)} \rho f_i \mathrm{d}V + \bigoplus_{\partial V(t)} t_i \mathrm{d}A.$$
(3.14)

Nach dem sog. CAUCHYschen Tetraederargument lässt sich der Vektor t_i (siehe Bild 3.2) als Skalarprodukt zwischen dem Spannungstensor σ_{ij} und dem Einheitsnormalenvektor n_j schreiben:

$$t_i = \sigma_{ij} n_j \,. \tag{3.15}$$



Bild 3.2: Oberflächenkraft = Kraft pro Flächenelement dA

Bemerkung 3.1: In dieser Arbeit wird häufig von der sog. EINSTEINSchen Summenkonvention Gebrauch gemacht, wonach automatisch über doppelt vorkommende Indizes summiert wird, etwa

$$\underline{x} = x_i \underline{e}_i = x_1 \underline{e}_1 + x_2 \underline{e}_2 + x_3 \underline{e}_3 \text{ oder}$$

$$a_i b_i = a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3 \equiv \underline{a} \cdot \underline{b}$$
, wobei a_i, b_i

die kartesischen Komponenten zweier beliebiger Vektoren bezeichnen. Dieses gilt in analoger Weise auch für Skalarprodukte zwischen höherwertigen, tensoriellen Größen, so wie in Gleichung (3.15).

In invarianter Schreibweise heißt das:

$$\underline{t} = \underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{\underline{n}}, \qquad (3.16)$$

wobei $\underline{t} = \underline{t}(\underline{x}; t; \underline{n})$ und $\underline{\sigma} = \underline{\sigma}(\underline{x}, t)$ ebenfalls Feldfunktionen sind. Mit anderen Worten: es ist gelungen, den Normalenvektor linear abzuspalten und der Spannungstensor ist nunmehr eine Funktion des Ortes und der Zeit und nicht länger auch von der Normalen.

Die Gleichung (3.15) lässt sich schließlich alternativ auch noch als Matrizenprodukt schreiben.

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix}.$$
 (3.17)

Ausgeschrieben lautet dies z. B. für die zweite Komponente:

$$t_2 = \sigma_{2j} \cdot n_j = \sigma_{21} \cdot n_1 + \sigma_{22} \cdot n_2 + \sigma_{23} \cdot n_3.$$
(3.18)

Indem wir Ausdruck (3.15) in Gleichung (3.14) einsetzen, entsteht:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \iiint_{V(t)} \rho v_i \mathrm{d}V = \iiint_{V(t)} \rho f_i \mathrm{d}V + \bigoplus_{\partial V(t)} \sigma_{ij} n_j \mathrm{d}A, \quad \text{mit } i = 1, 2, 3.$$
(3.19)

3.1.4 Umformung der Massen- und Impulsbilanz

In der letzten Gleichung lässt sich zur Umformung des Oberflächenterms der GAUßsche Satz verwenden. Dieser lautet:

Es sei $\zeta(\underline{x})$ *ein beliebiges, stetig differenzierbares Feld. Dann gilt:*

$$\oint_{\partial V(t)} \zeta n_j \, \mathrm{d}A = \iiint_{V(t)} \frac{\partial \zeta}{\partial x_j} \mathrm{d}V \,. \tag{3.20}$$

Damit lässt sich das Oberflächenintegral aus Formel (3.19) in ein Volumenintegral umschreiben und es gilt:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \iiint_{V(t)} \rho \upsilon_i \mathrm{d}V = \iiint_{V(t)} \rho f_i \mathrm{d}V + \iiint_{V(t)} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \mathrm{d}V.$$
(3.21)

Im Zusammenhang mit den Gleichungen (3.4) und (3.21) stellt sich das Problem, dass zur Ausführung der Zeitableitung d/dt beachtet werden muss, dass sowohl der Integrand, also $\rho(\underline{x},t)$ bzw. $\rho(\underline{x},t)v_i(\underline{x},t)$, als auch die Integrationsgrenzen V(t) von der Zeit abhängen. Wie man eine solche Differenziation korrekt durchführt, lehrt das REYNOLDSsche Transporttheorem (zum Beweis, vgl. z. B. BECKER/BÜRGER (1975) oder HAUPT (2002). Es sei $h(\underline{x},t)$ ein beliebiges zeitabhängiges Feld, dann gilt:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \iiint_{V(t)} h(\underline{x}, t) \mathrm{d}V = \iiint_{V(t)} \frac{\partial h}{\partial t} \mathrm{d}V + \bigoplus_{\partial V(t)} h \upsilon_j n_j \mathrm{d}A.$$
(3.22)

Wenn wir auf den Oberflächenterm hierin nun den GAUßschen Satz nach Gleichung (3.20) anwenden, entsteht:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \iiint_{V(t)} h \,\mathrm{d}V = \iiint_{V(t)} \left[\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (h \,\upsilon_j) \right] \mathrm{d}V \,. \tag{3.23}$$

Q

R

Angewendet auf die Massenbilanz nach Gleichung (3.4) ergibt sich:

$$\iiint_{V(i)} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) \right] dV = 0$$
(3.24)

und für die Impulsbilanz nach Gleichung (3.21) folgt:

$$\iiint_{V(t)} \left[\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_i v_j) \right] dV = \iiint_{V(t)} \left[\rho f_i + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \right] dV.$$
(3.25)

Beide Beziehungen gelten auch für beliebige materielle Untervolumina dV, so dass (Stetig-keit aller Felder vorausgesetzt) folgt:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + v_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \tag{3.26}$$

und

$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho v_i v_j \right) = \rho f_i + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}.$$
(3.27)

Gleichung (3.26) lässt sich aufgrund von:

$$v_i = \frac{\mathrm{d}u_i}{\mathrm{d}t} \equiv \dot{u}_i \tag{3.28}$$

auch schreiben als:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \rho \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_i} = 0.$$
(3.29)

Aufgrund der Kettenregel lässt sich schreiben:

$$\dot{\rho} \equiv \frac{\mathrm{d}\rho(x_i,t)}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial\rho}{\partial x_i}\frac{\mathrm{d}x_i}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial\rho}{\partial x_i}\upsilon_i.$$
(3.30)

Mithin folgt, dass:

$$\dot{\rho} + \rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right) = 0, \qquad (3.31)$$

wobei bei der Umformung des zweiten Terms mehrfach zwischen Referenzkonfiguration \underline{X} und momentaner Lage \underline{x} (LAGRANGE- und EULERsche Darstellung) gewechselt wurde, wie folgt:

$$\frac{\partial \dot{u}_{i}}{\partial x_{i}} \equiv \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left[u_{i} \left(x_{i} \left(\underline{X}, t \right), t \right) \right]^{*} = \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left[u_{i} \left(\underline{X}, t \right) \right]^{*} \\
\equiv \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left[\frac{\partial u_{i}}{\partial t} \left(\underline{X}, t \right) \right] = \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial u_{i}}{\partial x_{i}} \left(\underline{X}, t \right) \right] \equiv \left[\frac{\partial u_{i}}{\partial x_{i}} \left(\underline{X}, t \right) \right]^{*} = \left(\frac{\partial u_{i}}{\partial x_{i}} \right)^{*}.$$
(3.32)

Mit der Definition für die linearen Verzerrungen, die als klein angenommen werden,

$$\mathcal{E}_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right), \tag{3.33}$$

wird daraus:

$$\dot{\rho} + \rho \,\dot{\varepsilon}_{ii} = 0\,,\tag{3.34}$$

oder

$$\frac{\dot{\rho}}{\rho} = -\dot{\varepsilon}_{ii} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \ln \rho = -\dot{\varepsilon}_{ii}, \qquad (3.35)$$

bzw. nach Integration zwischen Referenzzustand Null (= dehnungsfreier Zustand) und aktueller Konfiguration:

$$\ln \frac{\rho}{\rho_0} = -\varepsilon_{ii} \implies \rho = \rho_0 \exp(-\varepsilon_{ii}) \approx \rho_0 (1 - \varepsilon_{ii}).$$
(3.36)

Diese Gleichung dient dazu, bei bekannter Deformation ε_{ij} zu errechnen, wie sich die aktuelle Massendichte gegenüber der Referenzmassendichte verändert hat.

Betrachten wir zur Illustration dieser Gleichung einen 1D-Zugstab aus isotropem Material, wobei die Last in 1-Richtung angebracht wurde. In diesem Fall gibt es 3 Dehnungen; die Axial- oder Längsdehnung ε_{11} und die beiden Querdehnungen ε_{22} und ε_{33} . Scherdehnungen gibt es in diesem Fall nicht. Aufgrund der Isotropie des Materials gilt außerdem $\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = \varepsilon_0$, wobei der Index Q auf "Querdehnung" hinweisen soll. Es stellt sich heraus, dass die Querdehnung proportional zur Längsdehnung ist und zwar über die sog. POISSON- oder Querkontraktionszahl: $\mathcal{E}_0 = -\nu \mathcal{E}_{11}$. Also folgt $\mathcal{E}_{ii} = (1 - 2\nu) \mathcal{E}_{11}$ ²⁴. Für den Grenzwert $\nu = 0.5$ folgt somit $\varepsilon_{ii} = 0$ und wegen (3.36) auch $\rho = \rho_0$. Da die Dichte der Quotient aus der (konstanten) Masse und dem (unter Verformung – hier Längsdehnung – i. a. veränderlichen) Volumen ist, nennen wir ein durch $\nu = 0.5$ gekennzeichnetes Material auch inkompressibel. Bei unterstellter Volumenkonstanz und Nichtnegativität des Volumens gilt daher für den Wertebereich der Querkontraktionszahl: $\nu \le 0.5$. Es gibt jedoch auch eine untere Grenze, die anschaulich gesprochen dadurch gekennzeichnet ist, dass unter Zugbelastung der Werkstoff quer dazu expandiert, d.h. der Quotient von Querdehnung zu Längsdehnung kann nicht negativ sein: $0 \le v \le 0.5$. Es gibt davon abweichend einige exotische Materialien (zumeist Polymer-Schäume), bei denen negative POISSONzahlen beobachtet werden. Man spricht in diesem Zusammenhang im angelsächsischen von "auxetic materials" (vgl. LAKES (1987 a, b), FRIIS et al. (1988), LAKES (-ol)).

Von dem einfachen Schema $0 \le v \le 0.5$ abweichende POISSONzahlen gibt es auch bei Faserverbundkunststoffen, wenn diese abweichend von ihrer Faserlängsrichtung belastet werden. Wir werden sehen, dass Querkontraktionszahlen $v_{21} > 0.5$ ²⁵ resultieren, falls die Belastungs-

$$\varepsilon_{ii} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} \quad , \text{mit } \varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = \varepsilon_{Q} = -\nu\varepsilon_{11}$$

$$= \varepsilon_{11} + (-\nu\varepsilon_{11}) + (-\nu\varepsilon_{11})$$

$$= \varepsilon_{11} - 2\nu\varepsilon_{11} = (1 - 2\nu)\varepsilon_{11}$$

²⁵ Die Indizierung der Querkontraktionszahl erfolgt im deutschsprachigen Raum in der Abfolge Wirkung-Ursache. Der erste Index bezeichnet daher die Verformungsrichtung der Querdehnung (Wirkung) und der zweite richtung um einen gewissen Winkel von der axialen Faserrichtung abweicht (vgl. dazu [TSAI (1992)]). Es existieren mikromechanische Materialmodelle sowohl für dieses als auch *auxetisches* Materialverhalten, die diese Phänomene erklären.

Im Zusammenhang mit der Impulsbilanz (3.27) ist es ferner oft angebracht, statische Verhältnisse anzunehmen ($v_i = 0$), sodass dann gilt:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} = -\rho f_i. \tag{3.37}$$

3.1.5 Zusammenfassung wichtiger Erkenntnisse

Man beachte, dass mit der Gleichung (3.36) die Massenbilanz vollständig ausgewertet ist, denn bei bekanntem Dehnungsfeld erlaubt diese Gleichung die Bestimmung der aktuellen Massendichte, was oben als eines der Ziele der Kontinuumsmechanik angegeben war. Das Dehnungsfeld selber, das ja eine aus dem primär gesuchten Feld der Geschwindigkeit abgeleitete Größe ist, muss allerdings noch bestimmt werden und dazu dient die Impulsbilanz in der Form der Gleichung (3.37). Dieses jedoch bereitet einige Probleme:

- \rightarrow Gleichung (3.37) enthält zunächst einmal gar nicht das Dehnungsfeld.
- → Das Dehnungsfeld ε_{ij} besteht aufgrund seiner Symmetrie (vgl. Definitionsgleichung (3.33)) aus sechs Unbekannten, die vektorwertige Impulsbilanz jedoch liefert nur drei Gleichungen.

Der Ausweg aus diesem Dilemma besteht darin, den Spannungstensor in materialabhängiger Weise mit den Komponenten ε_{ii} in Verbindung zu setzen. Davon soll nun die Rede sein.

3.2 Materialgesetz

Materialgesetze liefern weitere Gleichungen, um die lokalen Bilanzgleichungen in *Feldgleichungen* für das Dichte- und Geschwindigkeitsfeld (respektive davon abgeleitete Größen wie die Verschiebung) zu überführen, indem sie Dehnungen und Spannungen in einen direkten Zusammenhang setzen. Das Verhältnis zwischen Spannungs- und Dehnungstensor wird durch die Steifigkeitsmatrix bzw. deren Inverse, die Nachgiebigkeitsmatrix, ausgedrückt. Da es sich beim Dehnungs- und Spannungsfeld um Tensoren 2. Ordnung handelt, muss deren Verhältnis, wie sich mathematisch zeigen lässt, durch einen Tensor 4. Ordnung beschrieben werden, welcher bei drei Raumrichtungen 81 Komponenten enthält. Aufgrund von Symmetrien müssen jedoch weitaus weniger experimentell ermittelt werden. Im Übrigen wird der Dehnungstensor als Summe mehrerer Anteile aufgefasst, wobei neben der mechanisch hervorgerufenen Dehnung auch noch andere wie z.B. thermische oder hygroskopische Dehnungen auftreten.

die (verursachende) Kraftrichtung, welcher die primäre Dehnung folgt. Beachte: die amerikanische Nomenklatur, welche auch in manchen Finite-Elemente-Programmen verwendet wird, indiziert umgekehrt.

3.2.1 Allgemeine Formulierung des HOOKEschen Gesetzes für beliebige anisotrope linear-elastische Materialien

Nach HOOKE lautet der allgemeinste lineare Ansatz für den Zusammenhang zwischen Spannungstensor σ_{ii} und elastischem Dehnungstensor ε_{kl}^{el} :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}^{\text{el}}.$$
(3.38)

 C_{ijkl} bezeichnet die (anisotrope) Steifigkeitsmatrix, die weiter unten für verschiedene Kristallklassen spezifiziert wird.

3.2.2 Totaler Dehnungstensor

Die Dehnung ist der symmetrisierte Gradient der Ortsableitung und somit ein Gradient der Verschiebungen. ε_{kl} bezeichnet den totalen Dehnungstensor. Die totale Dehnung wird additiv in elastische (ε_{kl}^{el}) und nicht-elastische Dehnungsanteile (ε_{kl}^{*}) zerlegt:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{kl} = \boldsymbol{\varepsilon}_{kl}^{\text{el}} + \boldsymbol{\varepsilon}_{kl}^{*} \,. \tag{3.39}$$

Die nicht-elastischen Dehnungen werden wiederum additiv zerlegt, und zwar in temperaturabhängige Dehnungen $\varepsilon_{kl}^{\text{th}}$, Dehnung aufgrund von hygroskopischen Quellungen $\varepsilon_{kl}^{\text{qu}}$, Dehnungen aufgrund von Phasenumwandlungen mit Gestalt- und Volumenänderung $\varepsilon_{kl}^{\text{ph}}$, geschwindigkeitsabhängiger Dehnung $\varepsilon_{kl}^{\Delta v/v}$, zeitunabhängiger bleibender – also plastischer – Dehnung $\varepsilon_{kl}^{\text{pl}}$ und bleibender Verformung zeitabhängig in Form von Kriechen $\varepsilon_{kl}^{\text{cr}}$:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{kl}^{*} = \boldsymbol{\varepsilon}_{kl}^{\text{th}} + \boldsymbol{\varepsilon}_{kl}^{\text{qu}} + \boldsymbol{\varepsilon}_{kl}^{\text{ph}} + \boldsymbol{\varepsilon}_{kl}^{\text{pl}} + \boldsymbol{\varepsilon}_{kl}^{\text{cr}} + \boldsymbol{\varepsilon}_{kl}^{\Delta \nu / \nu}.$$
(3.40)

Anknüpfend an der Grunddefinition der totalen Dehnung nach Gleichung (3.33) wird nun der Zusammenhang zu der Verschiebungen $\underline{u}_k = \underline{x}_k - \underline{X}_k$ aus didaktischen und methodischen Gründen nochmals in Bild 3.3 illustriert.



Bild 3.3: Verschiebung eines Masseninkrements

R

Mit x_k wird die aktuelle Lage von dm benannt, X_k beschreibt die Ausgangslage von dm. Beispielhaft seien drei Komponenten der ε_{kl} -Matrix bestimmt:

$$\mathcal{E}_{11} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right) = \frac{\partial u_1}{\partial x_1}, \qquad (3.41)$$

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) = \varepsilon_{21} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right).$$
(3.42)

 \mathcal{E}_{kl} lässt sich somit in einer symmetrischen Matrix, gekennzeichnet durch das (+), abbilden:

$$\mathcal{E}_{kl} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) \\ & \frac{\partial u_2}{\partial x_2} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) \\ (+) & \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \end{bmatrix}.$$
(3.43)

In dieser Arbeit werden neben elastischen Dehnungen lediglich thermische und quellinduzierte Dehnungen berücksichtigt. Darum folgt aus Kombination der Gleichungen (3.38)–(3.40):

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \left(\varepsilon_{kl} - \varepsilon_{kl}^{\text{th}} - \varepsilon_{kl}^{\text{qu}} \right).$$
(3.44)

Im Folgenden werden die thermischen sowie Quelldehnungen konkretisiert.

3.2.2.1 Thermische Dehnungen

Eigendehnungen haben viele physikalische Bedeutungen. Ein Beispiel ist die thermische Ausdehnung ε_{kl}^{th} :

$$\varepsilon_{kl}^{\rm th} = \alpha_{kl} \,\,\Delta T \,\,. \tag{3.45}$$

Mit $\Delta T = T - T_R$ wird die Temperaturdifferenz und mit α_{kl} die Matrix der thermischen Ausdehnungskoeffizienten beschrieben. Fällt das Koordinatensystem des Kristalls mit dem Laborsystem zusammen, so lässt sich α_{kl} wie folgt schreiben:

$$\alpha_{kl} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{33} \end{bmatrix}.$$
 (3.46)

Für einen vollständig anisotropen Werkstoff gilt $\alpha_{11} \neq \alpha_{22} \neq \alpha_{33}$. Ist die Kristallstruktur jedoch tetragonal (\square), so lässt sich anschaulich festhalten, dass $\alpha_{11} = \alpha_{22} \neq \alpha_{33}$. Bei kubischer Kristallanordnung (\square) sind die Koeffizienten identisch: $\alpha_{11} = \alpha_{22} = \alpha_{33}$. Für ein Polykristall wie z.B. Eisen oder Stahl gilt im Mittel:

$$\alpha_{kl} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix} = \alpha \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \alpha \delta_{kl}.$$
 (3.47)

Weitere Details zu Kristallstrukturen werden in den Abschnitten 3.3.2 und 3.4 erläutert.

3.2.2.2 Quellungen

Darüber hinaus gibt es Eigendehnungen in Form von Quellungen, welche z. B. bei Wasseraufnahme in einem faserverstärkten Komposit auftreten. Um die Quelldehnung \mathcal{E}_{kl}^{qu} zu ermitteln, sei an Gleichung (3.36) in ihrer linearisierten Form erinnert und dass gilt:

$$\rho = \rho_0 \left(1 - \mathcal{E}_{kk}^{\text{qu}} \right) \tag{3.48}$$

mit $\varepsilon_{kk}^{qu} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$, der Spur von ε . Es folgt:

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = -\mathcal{E}_{kk}^{\text{qu}} \,. \tag{3.49}$$

Mit $\rho = \frac{m}{V}$ und dem die Ausgangslage beschreibenden Referenzzustand $\rho_0 = \frac{m}{V_0}$:

$$\frac{\frac{m}{V} - \frac{m}{V_0}}{\frac{m}{V_0}} = -\varepsilon_{kk}^{qu} = \frac{\frac{V_0 - V}{VV_0}}{\frac{1}{V_0}} = \frac{V_0 - V}{V}$$
(3.50)

und abschließend multipliziert mit (-1) ergibt sich:

$$\Rightarrow \frac{V - V_0}{V} = \frac{\Delta V}{V} = +\mathcal{E}_{kk}^{qu}.$$
(3.51)

Weitere mögliche Eigendehnungen beruhen auf Phasenumwandlungen, auf plastischer sowie auf Kriechdeformation. Phasenumwandlungen sind bei faserverstärkten Kunststoffen im Allgemeinen nicht von Belang, Kriechen der Matrix (Epoxid), d. h. Viskoelastizität, wird an dieser Stelle nicht weiter vertieft.

3.2.3 Steifigkeitsmatrix

Aufgrund der vier Indizes in der Steifigkeitsmatrix stellt man zunächst fest, dass sie $3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$ Komponenten besitzt. Diese sind jedoch nicht allesamt unabhängig voneinander, denn

- \rightarrow der Spannungstensor ist symmetrisch: $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$
- \rightarrow der elastische Dehnungstensor ist symmetrisch: $\varepsilon_{kl}^{el} = \varepsilon_{lk}^{el}$

und somit reduziert sich gemäß Gleichung (3.38) die Anzahl der unabhängigen Komponenten der Steifigkeitsmatrix auf $6 \times 6 = 36$, die wir in folgendem Schema arrangieren:

$$C_{ijkl} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1131} & C_{1112} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2212} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3331} & C_{3312} \\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2331} & C_{2312} \\ C_{3111} & C_{3122} & C_{3133} & C_{3123} & C_{3131} & C_{3112} \\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1231} & C_{1212} \end{bmatrix}.$$
(3.52)

Bei linear elastischen Materialien ist diese Matrix darüber hinaus symmetrisch. Das hängt mit der gespeicherten elastischen Energie im Körper zusammen: Die gespeicherte elastische Energie ist im σ - ε -Diagramm durch die Fläche unterhalb der Spannungs-Dehnungs-Kurve repräsentiert. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von der Formänderungsenergiedichte (engl.: stored energy density).



Bild 3.4: Formänderungsenergiedichte repräsentiert als Flächeninhalt unterhalb/ Integrand der Spannungs-Dehnungs-Funktion

Wenn die Formänderungsenergiedichte w gleich dem komplementären Flächeninhalt w', welcher als Ergänzungsformänderungsenergiedichte bezeichnet wird (engl.: complementary strain energy density), ist – und genau dies ist in Bild 3.4 für linear-elastische Materialien illustriert – dann gilt:

$$w = w'. \tag{3.53}$$

Um diese Behauptung zu belegen, werden zunächst Ausdrücke für w und w' hergeleitet. Nach MÜLLER/FERBER (2008) gilt für die Bilanz der inneren Energie:

$$\rho \dot{u} + \frac{\partial q_j}{\partial x_i} = \rho r + \sigma_{ji} \frac{\partial v_i}{\partial x_j}$$
(3.54)

mit dem Wärmefluss q_j und der Strahlungsdichte r. In der linearen Theorie und für kleine Verformungen (bis 3% Dehnungen, evtl. sogar bis 10%) lässt sich zeigen, dass gilt:

$$\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}t} = \sigma_{ji} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \sigma_{ji} \frac{\mathrm{d}\varepsilon_{ji}}{\mathrm{d}t}.$$
(3.55)

Somit kann dw folgendermaßen beschrieben werden:

$$dw = \sigma_{ij} d\mathcal{E}_{ji}$$

= $\sigma_{i1} d\mathcal{E}_{1i} + \sigma_{i2} d\mathcal{E}_{2i} + \sigma_{i3} d\mathcal{E}_{3i}$
= $\sigma_{11} d\mathcal{E}_{11} + \sigma_{21} d\mathcal{E}_{12} + \sigma_{31} d\mathcal{E}_{13} + \sigma_{12} d\mathcal{E}_{21} + \sigma_{22} d\mathcal{E}_{22} + \sigma_{32} d\mathcal{E}_{23} + \sigma_{13} d\mathcal{E}_{31} + \sigma_{23} d\mathcal{E}_{32} + \sigma_{33} d\mathcal{E}_{33}.$ (3.56)

Wird Formel (3.44) integriert, so erhält man folgenden Ausdruck:

$$w = \int_{\underline{\widetilde{\varepsilon}}=\underline{0}}^{\underline{\widetilde{\varepsilon}}=\underline{\varepsilon}} \sigma_{ij}(\underline{\widetilde{\varepsilon}}) d\widetilde{\varepsilon}_{ji} .$$
(3.57)

Unter Anwendung des Hauptsatzes der Integralrechnung ergibt sich der 1. Satz von CASTIGLIANO:

$$\frac{\partial w}{\partial \varepsilon_{ji}} = \sigma_{ij}(\underline{\varepsilon}). \tag{3.58}$$

Aus Gleichung (3.57) und unter Ausnutzung des Materialgesetzes aus Formel (3.38) für $\sigma_{ii}(\tilde{\varepsilon})$ lässt sich schreiben, wenn die Konstanten vor das Integral gezogen werden:

$$w = \int_{\underline{\widetilde{\varepsilon}}=\underline{0}}^{\underline{\widetilde{\varepsilon}}=\underline{\varepsilon}} C_{ijkl} \widetilde{\varepsilon}_{kl} \, \mathrm{d}\widetilde{\varepsilon}_{ji} = C_{ijkl} \int_{\underline{\widetilde{\varepsilon}}=\underline{0}}^{\underline{\widetilde{\varepsilon}}=\underline{\varepsilon}} \widetilde{\varepsilon}_{kl} \, \mathrm{d}\widetilde{\varepsilon}_{ji} \, .$$
(3.59)

Nun wird die Ergänzungsformänderungsenergiedichte betrachtet:

$$w' = \int_{\underline{\widetilde{\sigma}}=\underline{0}}^{\underline{\sigma}=\underline{\sigma}} \mathcal{E}_{ji}(\underline{\widetilde{\sigma}}) d\widetilde{\sigma}_{ij} .$$
(3.60)

Unter Anwendung des Hauptsatzes der Integralrechnung ergibt sich der 2. Satz von CASTIGLIANO:

$$\frac{\partial w'}{\partial \sigma_{ij}} = \varepsilon_{ji} \left(\underline{\sigma}\right). \tag{3.61}$$

Aus Gleichung (3.60), unter Ausnutzung des Materialgesetzes aus Formel (3.38) für $\tilde{\sigma}_{ij} = C_{ijrs}\tilde{\varepsilon}_{rs}$ und Herausziehen der Konstanten vor das Integral lässt sich schreiben:

$$w' = \int_{\underline{\widetilde{\varepsilon}}=\underline{0}}^{\underline{\widetilde{\varepsilon}}=\underline{\varepsilon}} d(C_{ijrs}\widetilde{\varepsilon}_{rs}) = C_{ijrs} \int_{\underline{\widetilde{\varepsilon}}=\underline{0}}^{\underline{\widetilde{\varepsilon}}=\underline{\varepsilon}} d\widetilde{\varepsilon}_{rs} .$$
(3.62)

121

Q

(3.65)

Um zu zeigen, dass die Ausdrücke (3.59) und (3.62) identisch sind, wird abschließend ein Austausch der Index-Variablen $(j \rightarrow k, i \rightarrow l, r \rightarrow j, s \rightarrow i)$ in der letztgenannten Gleichung vorgenommen:

$$w' = C_{lkji} \int_{\underline{\tilde{\varepsilon}} = \underline{0}}^{\underline{\tilde{\varepsilon}} = \underline{\varepsilon}} \widetilde{\tilde{\varepsilon}}_{kl} \, \mathrm{d}\tilde{\varepsilon}_{ji} \,.$$
(3.63)

Wird nun in den für linear elastische Werkstoffe charakteristischen Zusammenhang w=w' aus Gleichung (3.53) eingesetzt:

$$C_{ijkl} \underbrace{\tilde{\vec{\mathcal{E}}}}_{\underline{\vec{\mathcal{E}}}} = \underline{0}^{\underline{\vec{\mathcal{E}}}}_{kl} d\tilde{\boldsymbol{\mathcal{E}}}_{ji} = C_{lkji} \underbrace{\tilde{\vec{\mathcal{E}}}}_{\underline{\vec{\mathcal{E}}}} = \underline{0}^{\underline{\vec{\mathcal{E}}}}_{kl} d\tilde{\boldsymbol{\mathcal{E}}}_{ji} , \qquad (3.64)$$

folgt daraus:

Als Konsequenz aus w = w' folgt somit für linear elastische Materialien die paarweise Vertauschbarkeit der Indizes:

 $\underline{C_{ijkl}} = C_{lkji} = \underline{C_{klij}} \,.$

$$C_{ijkl} = C_{klij} \,. \tag{3.66}$$

Also besitzt die Steifigkeitsmatrix maximal 21 unabhängige Komponenten, und es ist möglich, sie in Form einer *symmetrischen* 6×6 -Matrix darzustellen:

$$C_{ijkl} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1131} & C_{1112} \\ & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2231} & C_{2212} \\ & & C_{3333} & C_{3323} & C_{3331} & C_{3312} \\ & & & C_{2323} & C_{2331} & C_{2312} \\ & & & & C_{3131} & C_{3112} \\ & & & & & & C_{1212} \end{bmatrix} = C_{IJ} .$$
(3.67)

In dieser Gleichung (3.67) wurde bereits von einem sog. Superindex I bzw. J – erkennbar durch die Schreibweise in Großbuchstaben – Gebrauch gemacht und dieser ist über Index-Kombinationen wie folgt definiert:

$$I = (11, 22, 33, 23, 31, 12)$$
(3.68)

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{pmatrix}$$
(3.69)

Für J gilt dies analog. Die Anwendung des Superindex auf das HOOKEsche Gesetz und seine Vorteile werden in den folgenden Abschnitten 3.2.4 und 3.2.5 erörtert.

3.2.4 Superindex angewendet auf HOOKEsches Gesetz

Weiterhin wird der Fall linear-elastischer Dehnungen betrachtet. Um die Handhabung zu vereinfachen, soll das HOOKEsche Gesetz

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \, \mathcal{E}_{kl}^{\text{el}} \tag{3.70}$$

umgeschrieben werden unter Anwendung des Superindexes. Dazu sei beispielhaft der vollständige Ausdruck für die Scherkomponente σ_{12} aus Formel (3.70) analog zu TSAI (1992) ausgeschrieben:

$$\sigma_{21} = C_{21kl} \varepsilon_{kl}$$

$$\sigma_{21} = C_{211l} \varepsilon_{1l} + C_{212l} \varepsilon_{2l} + C_{213l} \varepsilon_{3l}$$

$$\sigma_{21} = C_{2111} \varepsilon_{11} + C_{2112} \varepsilon_{12} + C_{2113} \varepsilon_{13} + C_{2121} \varepsilon_{21} + C_{2122} \varepsilon_{22} + C_{2123} \varepsilon_{23} + C_{2131} \varepsilon_{31} + C_{2132} \varepsilon_{32} + C_{2133} \varepsilon_{33} .$$
(3.71)

Unter Ausnutzung der Symmetrie $C_{ijkl} = C_{jikl}$ lässt sich der expandierte Ausdruck verkürzen zu:

$$\sigma_{21} = C_{1211} \varepsilon_{11} + C_{1222} \varepsilon_{22} + C_{1233} \varepsilon_{33} + 2C_{1212} \varepsilon_{12} + 2C_{1231} \varepsilon_{31} + 2C_{1223} \varepsilon_{23}.$$
(3.72)

Auf VOIGT geht die Idee zurück, die sechs Spannungs- und Verzerrungskomponenten in einem Spaltenvektor zusammenzufassen, und zwar zunächst die drei Normalkomponenten und dann die drei Scherkomponenten. Die Struktur der VOIGTschen Notation stellt sich folgendermaßen dar:

$$\sigma_{ij} \rightarrow \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{1} \\ \sigma_{2} \\ \sigma_{3} \\ \sigma_{4} \\ \sigma_{5} \\ \sigma_{6} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Normal - \\ komponenten \\ Scher - \\ komponenten \end{pmatrix}, \quad \mathcal{E}_{ij} \rightarrow \begin{pmatrix} \mathcal{E}_{11} \\ \mathcal{E}_{22} \\ \mathcal{E}_{33} \\ 2\mathcal{E}_{23} \\ 2\mathcal{E}_{31} \\ 2\mathcal{E}_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathcal{E}_{1} \\ \mathcal{E}_{2} \\ \mathcal{E}_{3} \\ \mathcal{E}_{4} \\ \mathcal{E}_{5} \\ \mathcal{E}_{6} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Normal - \\ komponenten \\ Normal - \\ komponenten \end{pmatrix}. \quad (3.73)$$

Die Vorfaktoren 2 bei den Scherdehnungskomponenten in Formel (3.73) einzuführen, erweist sich im Hinblick auf Gleichung (3.72) (und entsprechend für σ_{23} und σ_{31}) als günstiger, denn es lässt sich feststellen, dass sich anstelle von (3.70) für das HOOKEsche Gesetz unter Verwendung des Superindexes schreiben lässt:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{1} \\ \sigma_{2} \\ \sigma_{3} \\ \sigma_{4} \\ \sigma_{5} \\ \sigma_{6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1131} & C_{1112} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2212} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3331} & C_{3312} \\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2331} & C_{2312} \\ C_{3111} & C_{3122} & C_{3133} & C_{3123} & C_{3131} & C_{3112} \\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1231} & C_{1212} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{1} \\ \varepsilon_{2} \\ \varepsilon_{3} \\ \varepsilon_{4} \\ \varepsilon_{5} \\ \varepsilon_{6} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \sigma_{I} = C_{IJ} \varepsilon_{J} .$$
(3.74)

Die Steifigkeitsmatrix C_{IJ} besitzt offenbar 36 Elemente, davon sind 21 unabhängige Komponenten, da sie wegen (3.53) bis (3.66) symmetrisch ist. Ein Vorfaktor 2 bei einzelnen Komponenten der Steifigkeitsmatrix, wie er aus dem Beispiel zu (3.70) bis (3.72) konsequenterweise folgen würde, kommt hier nicht zum Tragen, da dieser bereits im Spaltenvektor in den Scherdehnungskomponenten (siehe (3.73)) Berücksichtigung findet.

Q
\mathbb{Q}

3.2.5 Nachgiebigkeitsmatrix

Außer der Kompaktheit des Ausdruckes (3.74) liegt ein weiterer Vorteil der Verwendung von Superindizes in der Möglichkeit der sofortigen Invertierung:

$$\varepsilon_J = C_{JI}^{-1} \sigma_I = S_{JI} \sigma_I. \tag{3.75}$$

 S_{JI} heißt Nachgiebigkeitsmatrix. Aus der Mathematik ist bekannt, dass die Inverse einer symmetrischen Matrix wiederum symmetrisch ist (vgl. dazu beispielsweise [ZURMÜHL (1964)], was die Vertauschbarkeit der Indizes wie folgt ermöglicht:

$$S_{JI} = S_{IJ} \,. \tag{3.76}$$

Selbstverständlich muss es auch möglich sein, die zu (3.70) inverse Gleichung

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \,\,\sigma_{kl} \tag{3.77}$$

aufzustellen. Mithin stellt sich die Frage nach dem Zusammenhang zwischen S_{IJ} und S_{ijkl} . Für S_{iikl} gelten folgende Symmetrien:

\rightarrow	der elastische Dehnungstensor ist symmetrisch: $\mathcal{E}_{ij}^{el} = \mathcal{E}_{ji}^{el}$	$\implies S_{ijkl} = S_{jikl} ,$
\rightarrow	der Spannungstensor ist symmetrisch: $\sigma_{kl} = \sigma_{lk}$	$\implies S_{ijlk} = S_{ijkl} ,$
\rightarrow	das Materialgesetz ist linear-elastisch gemäß (3.53)bis (3.66)	$\implies S_{ijlk} = S_{lkij} .$

Am Beispiel von I = 1 und I = 4 sei der Zusammenhang aufgezeigt, zunächst für I = 1 mit Gleichung (3.75):

Wird Gleichung (3.77) für $\varepsilon_1 = \varepsilon_{11}$ mit i = 1 und j = 1 expandient, so erhält man:

$$\varepsilon_{11} = S_{11kl} \sigma_{kl}
\varepsilon_{11} = S_{111l} \sigma_{1l} + S_{112l} \sigma_{2l} + S_{113l} \varepsilon_{3l}
\varepsilon_{11} = S_{1111} \sigma_{11} + S_{1112} \sigma_{12} + S_{1113} \sigma_{13} + S_{1121} \sigma_{21} + S_{1122} \sigma_{22} + S_{1123} \sigma_{23} + S_{1131} \sigma_{31} + S_{1132} \sigma_{32} + S_{1133} \sigma_{33} .$$
(3.79)

Daraus folgt: $S_{11} = S_{1111}$, $S_{12} = S_{1122}$, $S_{13} = S_{1133}$, $S_{14} = S_{1123} + S_{1132}$, $S_{15} = S_{1113} + S_{1131}$ und $S_{16} = S_{1112} + S_{1121}$.

Für I = 4 lässt sich gemäß Gleichung (3.75) schreiben:

$$\varepsilon_{4} = S_{4I} \sigma_{I}$$

$$= S_{41} \sigma_{1} + S_{42} \sigma_{2} + S_{43} \sigma_{3} + S_{44} \sigma_{4} + S_{45} \sigma_{5} + S_{46} \sigma_{6}$$

$$= S_{41} \sigma_{11} + S_{42} \sigma_{22} + S_{43} \sigma_{33} + S_{44} \sigma_{23} + S_{45} \sigma_{31} + S_{46} \sigma_{12} = 2\varepsilon_{23} .$$
(3.80)

Nach (3.77) werden für $\varepsilon_4 = 2\varepsilon_{23}$ als Komponenten der Nachgiebigkeitsmatrix ermittelt:

$$\varepsilon_{23} = S_{23kl} \sigma_{kl}$$

$$\varepsilon_{23} = S_{231l} \sigma_{1l} + S_{232l} \sigma_{2l} + S_{233l} \varepsilon_{3l}$$

$$\varepsilon_{23} = S_{2311} \sigma_{11} + S_{2312} \sigma_{12} + S_{2313} \sigma_{13} + S_{2321} \sigma_{21} + S_{2322} \sigma_{22} + S_{2323} \sigma_{23} + S_{2331} \sigma_{31} + S_{2332} \sigma_{32} + S_{2333} \sigma_{33} .$$
(3.81)

Es folgt somit $\frac{1}{2}S_{41} = S_{2311} \iff S_{41} = 2S_{2311}, \frac{1}{2}S_{42} = S_{2322} \iff S_{42} = 2S_{2322}, \frac{1}{2}S_{43} = S_{2333} \iff S_{43} = 2S_{2333}, \frac{1}{2}S_{44} = S_{2323} + S_{2332} \iff S_{44} = 2(S_{2323} + S_{2332}), \frac{1}{2}S_{45} = S_{2313} + S_{2331} \iff S_{45} = 2(S_{2313} + S_{2331}) \text{ und } \frac{1}{2}S_{46} = S_{2312} + S_{2321} \iff S_{46} = 2(S_{2312} + S_{2321}).$

Für das inverse HOOKEsche Gesetz unter Verwendung der Steifigkeitsmatrix in Superindex-Nomenklatur lässt sich somit schreiben:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{1} \\ \varepsilon_{2} \\ \varepsilon_{3} \\ \varepsilon_{4} \\ \varepsilon_{5} \\ \varepsilon_{6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{1} \\ \sigma_{2} \\ \sigma_{3} \\ \sigma_{4} \\ \sigma_{5} \\ \sigma_{6} \end{bmatrix}.$$
(3.82)

Unter Verwendung von vier Indizes stellt sich die Nachgiebigkeitsmatrix folgendermaßen dar:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{1111} & S_{1122} & S_{1133} & (S_{1123} + S_{1132}) & (S_{1113} + S_{1131}) & (S_{1112} + S_{1121}) \\ S_{2211} & S_{2222} & S_{2233} & (S_{2223} + S_{2232}) & (S_{2213} + S_{2231}) & (S_{2212} + S_{2221}) \\ S_{3311} & S_{3322} & S_{3333} & (S_{3323} + S_{3332}) & (S_{3313} + S_{3331}) & (S_{3312} + S_{3321}) \\ 2S_{2311} & 2S_{2322} & 2S_{2333} & 2(S_{2323} + S_{2332}) & 2(S_{2313} + S_{2331}) & 2(S_{2312} + S_{2321}) \\ 2S_{3111} & 2S_{3122} & 2S_{3133} & 2(S_{3123} + S_{3132}) & 2(S_{3113} + S_{3131}) & 2(S_{3112} + S_{3121}) \\ 2S_{121} & 2S_{1222} & 2S_{1233} & 2(S_{1223} + S_{1232}) & 2(S_{1213} + S_{1131}) & 2(S_{1212} + S_{1221}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}$$
(3.83)

und da $S_{ijkl} = S_{ijlk}$ gilt, kann der Ausdruck (3.83) kompakter geschrieben werden:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{1111} & S_{1122} & S_{1133} & 2S_{1123} & 2S_{1131} & 2S_{1112} \\ S_{2211} & S_{2222} & S_{2233} & 2S_{2223} & 2S_{2211} \\ S_{3311} & S_{3322} & S_{3333} & 2S_{3323} & 2S_{3331} & 2S_{3312} \\ 2S_{2311} & 2S_{2322} & 2S_{2333} & 4S_{2323} & 4S_{2331} & 4S_{2312} \\ 2S_{3111} & 2S_{3122} & 2S_{3133} & 4S_{3123} & 4S_{3131} & 4S_{3112} \\ 2S_{1211} & 2S_{1222} & 2S_{1233} & 4S_{1223} & 4S_{1231} & 4S_{1212} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}.$$

$$(3.84)$$

Der Faktor 2 in Formel (3.83) lässt sich herauskürzen, sodass alternativ die an mancher Stelle in der Literatur bevorzugte Schreibweise

$$\begin{array}{c} \varepsilon_{1} \\ \varepsilon_{2} \\ \varepsilon_{3} \\ \varepsilon_{4}/2 \\ \varepsilon_{5}/2 \\ \varepsilon_{6}/2 \\ \varepsilon_{6}/2 \end{array} = \begin{bmatrix} S_{1111} & S_{1122} & S_{1133} & (S_{1123} + S_{1132}) & (S_{1113} + S_{1131}) & (S_{1112} + S_{1121}) \\ S_{2211} & S_{2222} & S_{2233} & (S_{2223} + S_{2232}) & (S_{2213} + S_{2231}) & (S_{2212} + S_{2221}) \\ S_{2311} & S_{3322} & S_{3333} & (S_{3323} + S_{3332}) & (S_{3313} + S_{3331}) & (S_{3312} + S_{3321}) \\ S_{2311} & S_{2322} & S_{2333} & (S_{2323} + S_{2332}) & (S_{2313} + S_{2331}) & (S_{2312} + S_{2321}) \\ S_{3111} & S_{3122} & S_{3133} & (S_{3123} + S_{3132}) & (S_{3113} + S_{3131}) & (S_{3112} + S_{3121}) \\ S_{1211} & S_{1222} & S_{1233} & (S_{1223} + S_{1232}) & (S_{1213} + S_{1231}) & (S_{1212} + S_{1221}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{1} \\ \sigma_{2} \\ \sigma_{3} \\ \sigma_{4} \\ \sigma_{5} \\ \sigma_{6} \end{bmatrix}$$
(3.85)

übrig bleibt. Auch dieser Ausdruck kann unter Ausnutzung der Symmetrie $S_{iikl} = S_{iilk}$ kompakter gefasst werden zu:

Die ungekürzte Nachgiebigkeitsmatrix (3.84) beinhaltet jedoch den Vorteil der Symmetrie.

3.3 Werkstoffeigenschaften Homogenität und Anisotropie

٦

Die Werkstoffeigenschaften Homogenität und Anisotropie sollen zunächst näher betrachtet werden, um daraus weitere Vereinfachungen der Steifigkeits- bzw. Nachgiebigkeitsmatrix ableiten zu können.

3.3.1 Homogenität

Homogenität bedeutet Unabhängigkeit einer Materialgröße vom Ort.

eine beliebige Materialeigenschaft sich für Allgemein lässt Hformulieren $H = H(\underline{x}), \underline{x} \in V(t)$. Speziell der Begriff homogen bedeutet, dass $H = \text{const.}_{x} \forall \underline{x} \in V(t)$. Einfluss nimmt die Homogenität beispielsweise auf die Steifigkeitsmatrix $\underline{C}(\underline{x})$ oder auf den Temperaturausdehnungskoeffizienten $\underline{\alpha}(\underline{x})$. Speziell ein homogener Körper hat $\underline{C} = \text{const.}_{x}$.

Ein Faserverbundwerkstoff ist dem Grunde nach nicht homogen. Hier gilt, wie in Bild 3.5²⁶ illustriert:

²⁶ Der Querschnitt eines Fasermaterials kann auch in Zwiebelstruktur vorliegen. Mithin ist streng genommen auch die Faser im Allgemeinen nicht homogen.

$$\underline{\underline{C}} = \underline{\underline{C}}(\underline{x}) = \begin{cases} \underline{\underline{C}}_{F} = \text{const.}_{\underline{x}} \ \forall \ \underline{x} \in V_{F} \\ \underline{\underline{C}}_{M} = \text{const.}_{\underline{x}} \ \forall \ \underline{x} \in V_{M} \end{cases} \quad \text{mit } \underline{\underline{C}}_{F} \neq \underline{\underline{C}}_{M} . \tag{3.87}$$

Analog verhält es sich mit $\underline{\alpha} = \underline{\alpha}(\underline{x})$.



Bild 3.5: Inhomogenität eines faserverstärkten Kunststoffverbundes im Querschnitt

Für die in den folgenden Abschnitten angesprochenen Berechnungsgrundlagen wird jedoch eine gedankliche Homogenisierung des Faserverbundkunststoffs vorgenommen, in der die Eigenschaften sozusagen über den Werkstoffquerschnitt *verschmiert* werden.

3.3.2 Anisotropie

Anisotropie beschreibt die Richtungsabhängigkeit von Materialeigenschaften. Sie ist in Bezug auf Kristalle definiert für die Steifigkeit \underline{C} (sowie für Wärmeausdehnung $\underline{\alpha}$, Härte, Leitfähigkeit von Wärme, elektrische Leitfähigkeit, Lichtbrechung, etc.). Auch im Hinblick auf Faserverbundwerkstoffe kommt ihr eine besondere Bedeutung zu.

Nun wird der Begriff der Anisotropie für zwei wichtige Werkstoffgrößen, nämlich die Steifigkeitsmatrix \underline{C} (siehe dazu Abschnitt 3.4) und die Matrix der Ausdehnungskoeffizienten $\underline{\alpha}$ aus Gleichung (3.45), erläutert. Für letztere gilt beispielsweise

$$\underline{\underline{\alpha}} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3 \end{bmatrix},$$
(3.88)

wenn die Koordinatenachsen des Laborsystems mit denen des Kristallsystems (oder bei faserverstärkten Kunststoffen mit dem durch die Faserorientierung in der Einzelschicht vorgegebenen Koordinatensystem) zusammenfallen. Ist dies nicht der Fall, finden die im folgenden Abschnitt 3.3.3 und weiter in Abschnitt 3.6 behandelten Koordinaten-Transformationsformeln Anwendung.

3.3.3 Koordinatentransformation mit Dreh- und Symmetriematrizen

Wir stellen einleitend fest, dass es je nach Material verschiedene Stufen der Anisotropie gibt. Diese Stufen, die sich auf das Eigensystem des Werkstoffes beziehen, werden weiter unten (Abschnitt 3.4) im Detail erläutert. Wir stellen weiterhin fest, dass, wenn man das Material in Ebenen "schneidet", die nicht mit dem Eigensystem des Materials zusammenfallen, sich dann

(3.90)

der soeben festgestellte Grad der Anisotropie ändert. Man darf behaupten, dass sich bei einem solchen "Schnitt" (Drehung) die Anisotropie im Allgemeinen verschärft, d. h. z. B. Komponenten der Steifigkeitsmatrix, die bisher Null waren, nunmehr nicht länger verschwinden. Um diese Änderungen der Anisotropie zu quantifizieren, müssen wir uns mit allgemeinen Drehungen und deren Auswirkungen auf Materialgrößen beschäftigen:

Nach MÜLLER (1985) habe eine Größe A in einem materiellen Punkt P (siehe Bild 3.6) die kartesischen Komponenten $A_{j_1 j_2 \dots j_k}$ in einem Bezugssystem Σ und die kartesischen Komponenten $A_{i_1 i_2 \dots i_k}^*$ in einem sich dagegen drehenden EUKLIDischen Koordinatensystem Σ^* , wobei gilt

 $O_{ik}O_{ik} = \delta_{ii}, \ O_{ki}O_{ki} = \delta_{ii}.$

$$x_i^* = O_{ij}(t)x_j + b_i(t).$$
(3.89)

 O_{ii} ist eine (zeitabhängige) Dreh- oder Spiegelungsmatrix mit den Eigenschaften



Bild 3.6: Euklidische Koordinatentransformation

Dann heißt diese Größe ein objektiver Tensor vom Rang k falls gilt:

$$A_{i_1i_2\dots i_k}^* = \left(\operatorname{sign}\left[\operatorname{det}\underline{\underline{O}}\right]\right)^p O_{i_1j_1}O_{i_2j_2}\dots O_{i_kj_k}A_{j_1j_2\dots j_k}.$$
(3.91)

Wir sagen außerdem, dass *A* ein absolut objektiver Tensor ist, falls für die Zahl p = 0 gilt; dann ist $(sign[det \underline{O}])^p = +1$. *A* heißt axialer objektiver Tensor, falls p = 1.

Wenn vorausgesetzt wird, dass sowohl der Spannungsvektor t_i als auch der Normalenvektor n_i absolut objektive Tensoren vom Rang 1 sind, also objektive Vektoren, dann lässt sich unter Verwendung der CAUCHYformel

$$t_i = n_j \sigma_{ji} \tag{3.92}$$

zeigen, dass es sich beim Spannungstensor um einen absolut objektiven Tensor vom Rang 2 handelt:

$$\sigma_{ij}^* = O_{ik}O_{jl}\sigma_{kl} \,. \tag{3.93}$$

Ebensolches gilt für den (linearen) Verzerrungstensor:

$$\mathcal{E}_{rs}^* = O_{ro}O_{sp}\sigma_{op} \,. \tag{3.94}$$

Dieses wiederum bedingt im Kontext mit dem HOOKEschen Gesetz, welches sowohl in Σ als auch in Σ^* in gleicher Form gelten soll:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} ,$$

$$\sigma_{rs}^* = C_{rstu}^* \varepsilon_{tu}^* ,$$
(3.95)

dass die Steifigkeitsmatrix ein absolut objektiver Tensor vom Rang 4 ist, also:

$$C_{rstu}^* = O_{ri}O_{sj}O_{tk}O_{ul}C_{ijkl}.$$
(3.96)

Dieser Gedankengang lässt sich darüber hinaus auch auf das erweiterte HOOKEsche Gesetz

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \left(\varepsilon_{kl} - \alpha_{kl} \Delta T \right)$$
(3.97)

übertragen. Weil es sich bei ΔT um einen Skalar, somit einen Tensor vom Rang 0 handelt, muss für die Temperaturausdehnungskoeffizienten α aus (3.45) gelten, dass

$$\alpha_{rs}^{*} = O_{rk}O_{sl}\alpha_{kl} \,. \tag{3.98}$$

In den folgenden Abschnitten werden nun die Auswirkungen auf die Steifigkeits- und Nachgiebigkeitsmatrix durch die in der physikalischen Literatur unter Kristallklassen bekannten Arten von Anisotropie dargestellt.

3.4 Steifigkeits- und Nachgiebigkeitsmatrizen in Abhängigkeit von der Werkstoffsymmetrie (Kristallklasse)

Ist ein Werkstoff inhomogen, so bedeutet dies nicht zwingend, dass er auch anisotropes Werkstoffverhalten aufweist. Liegt Anisotropie vor, muss diese wiederum nicht total sein, d.h. Anisotropie bedingt nicht automatisch die unterschiedliche Ausprägung der Werkstoffeigenschaft in allen Orientierungsrichtungen. Die Unterscheidungen werden im nun folgenden Teil ausgehend vom Fall größter Anisotropie in Anlehnung an NYE (1972) erörtert. Anschließend werden Werkstoffe charakterisiert, bei denen richtungsabhängig vereinzelt Übereinstimmungen des Materialverhaltens vorliegen. Unter Ausnutzung der Werkstoffsymmetrie kann so eine Vereinfachung der Steifigkeitsmatrix C_{iikl} herbeigeführt werden.

Die erörterten Spezialfälle von C_{ijkl} beziehen sich gemäß der Nomenklatur in der physikalisch-technischen Literatur auf Kristallklassen; in den Ingenieurwissenschaften wird in diesem Zusammenhang von unterschiedlicher Werkstoffsymmetrie gesprochen, die über die Art der Anisotropie Auskunft gibt. Die Begrifflichkeiten sollen hier in Übereinstimmung gebracht werden.

In diesem Abschnitt entspricht dabei das Koordinatensystem des Kristalls dem Laborsystem, welches als globales Koordinatensystem der Materialprüfung zugrunde liegt.

3.4.1 Triklin

Trikline Werkstoffe bedürfen 21 unabhängiger Komponenten, um das Materialgesetz zu beschreiben. Sie weisen keinerlei Material-Symmetrie auf, verhalten sich also in Richtung der drei Koordinatenachsen gänzlich unterschiedlich. Anwendungsbeispiele für trikline Kristallsysteme sind die meisten Silikat-Minerale wie z. B. Feldspate, Kaolinit, Kyanit (Disthen), ebenso das Mineral Türkis, bei dem es sich um kein Silikat handelt [WIKIPEDIA (2009a-ol)].

Bild 3.7: Steifigkeits- und Nachgiebigkeitsmatrix eines triklinen Materials

3.4.2 Monoklin

Sobald eine Materialsymmetrie existiert, reduziert sich die Anzahl der unabhängigen Komponenten. Das HOOKEsche Gesetz vereinfacht sich daraufhin. Monoklin ist eine Kristallstruktur dann, wenn zwei Koordinatenrichtungen eine Symmetrieebene in der Gitterstruktur aufspannen. Im Folgenden wollen wir den Begriff monoklin dadurch erläutern, dass wir die in Bild 3.8 veranschaulichte Ebene 1-2 für *z* bzw. $x_3 = 0$ als Symmetrieebene auszeichnen. Folglich soll als Voraussetzung gelten:

$$C_{ijkl}(x_1, x_2, -x_3) = C_{ijkl}(x_1, x_2, +x_3).$$
(3.99)

Wir schließen, wo immer eine ungerade Anzahl von Dreien in den Indizes der C_{ijkl} - bzw. S_{ijkl} -Komponenten vorkommt, so wird diese Komponente zu Null. Im Hinblick auf die Definition des Superindizes in den Gleichungen (3.68) und (3.69) ergibt sich somit die in Bild 3.8 dargestellte Form für Steifigkeits- und Nachgiebigkeitsmatrizen. Diese anschauliche Erklärung kann auch analytisch untermauert werden. Es sei zunächst bemerkt, dass die in Gleichung (3.99) dargestellte Spiegelung auch durch folgende Spiegelungsmatrix:

$$O_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$
(3.100)

beschrieben werden kann. Betrachten wir nun z. B. die Komponente C_{1113} , dann ergibt die Anwendung von Formel (3.96):

$$C_{1113}^* = -C_{1113}. \tag{3.101}$$

Diese Bedingung ist nur für eine Zahl erfüllbar, nämlich die Null.

Von lediglich 13 verbleibenden unabhängigen Komponenten ist bei monokliner Symmetrie auszugehen. Die monokline Kristallstruktur kommt bei Mineralien wie Kryolith, Titanit, Natriumcarbonat und Gips vor [WIKIPEDIA (2009a-ol)].

Bild 3.8: Schematische Darstellung mit Symmetrieebene 1-2 [nach TSAI (1992)], Steifigkeits- und Nachgiebigkeitsmatrix eines monoklinen Materials

Welche Komponenten der Matrix besetzt sind, hängt letztendlich von der Wahl der Symmetrieebenen ab. NYE (1972) gibt darüber hinaus auch das Besetzungsschema für die Symmetrieebene 1-3 bei gleicher verbleibender Komponentenanzahl an, wobei dann gilt, dass die Komponenten 15-35 besetzt sind anstatt 16-36, die dann zu Null-Komponenten werden. Ebenfalls vertauscht sich die Wertigkeit zwischen Komponente 45 und 46. Darauf soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden.

3.4.3 Orthotrop/ Orthorhombisch

Mit steigender Materialsymmetrie, nimmt die Anzahl der zu bestimmenden unabhängigen Materialkonstanten stetig ab. Ein orthotropes (oder orthorhombisches) Material ist gegeben, wenn Symmetrie des Materials gegenüber 3 orthogonalen Ebenen besteht. Wir schließen analog zur Gleichung (3.99):

$$C_{ijkl}(-x_1, x_2, x_3) = C_{ijkl}(+x_1, x_2, x_3),$$

$$C_{ijkl}(x_1, -x_2, x_3) = C_{ijkl}(x_1, +x_2, x_3),$$

$$C_{iikl}(x_1, x_2, -x_3) = C_{iikl}(x_1, x_2, +x_3).$$
(3.102)

Somit fallen alle Komponenten der Steifigkeits- und Nachgiebigkeitsmatrix weg, bei denen eine ungerade Anzahl von Einsen, Zweien oder Dreien in den Indizes vorkommt. Und es ergibt sich das in Bild 3.9 dargestellte Ergebnis. Es verbleiben 9 unabhängige Komponenten. Entsprechen die Symmetrieebenen den gewählten Koordinatenachsen, so beträgt die Anzahl der Null-Komponenten 12. Die Anzahl der verbleibenden Komponenten ist von der Wahl der Koordinatenrichtungen unabhängig.

An der Bezeichnung dieses Sachverhalts scheiden sich die physikalische und die ingenieurwissenschaftliche Terminologie bzw. Lehrmeinung. Beide Begrifflichkeiten beziffern jedoch die Anzahl der unabhängigen Komponenten mit 9. Während beispielsweise TSAI (1992) von

orthotroper Symmetrie schreibt, bezeichnet z. B. NYE (1972) die Kristallstruktur als orthorhombisch.



Bild 3.9: Schematische Darstellung dreier Symmetrieebenen [nach TSAI (1992)], Steifigkeitsund Nachgiebigkeitsmatrix eines orthorhombischen/orthotropen Materials

Ein orthotroper Werkstoff kann daran erkannt werden, dass in seiner Steifigkeits- oder Nachgiebigkeitsmatrix die Koppelterme bei den Schubdehnungen nicht besetzt sind, d. h. Schubspannungen führen nicht zu Dehnungen. Zum Aufstellen des Elastizitätsgesetzes sind 9 unabhängige Größen notwendig; wie wir noch sehen werden, ist es nicht möglich, die sog. Schubmoduln aus den sog. Elastizitätsmoduln und den sog. Querkontraktionszahlen zu ermitteln. Die Schubmoduln gehören hier zu den Grundelastizitätsgrößen [ALTENBACH et. al. (1996)].

Werkstoffbeispiele sind gewisse homogene Einkristalle, Schwefel und Konstruktionswerkstoffe mit unterschiedlichen Elastizitätsmoduln wie Faserverbundwerkstoffe. Letztere sind je nach Betrachtung homogen aber anisotrop (auf Homogenisierung basiert die Klassische Laminattheorie), alternativ – wenn auch rechentechnisch ineffizient – wäre es denkbar, beide Komponenten Faser und Matrix als homogene isotrope Werkstoffe zu behandeln und so das Problem mikromechanisch anzugehen [WIKIPEDIA (2009a-ol)].

3.4.4 Tetragonal

Die Anzahl unabhängiger Konstanten beläuft sich bei tetragonaler Eigenschaftssymmetrie auf 7 oder 6. Die in Bild 3.10 gezeigten dazugehörigen Matrizen weisen eingeklammerte Komponenten auf; je nach deren Entfallen oder Berücksichtigung wird gemäß NYE (1972) ein tetragonales Gitter mit 6 oder 7 unabhängigen Konstanten beschrieben. Die durch Verbindungslinien () gekennzeichneten Komponenten sind gleich. Die eingeklammerten Komponenten sind gleichen Betrages, jedoch von entgegengesetztem Vorzeichen ().

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & (C_{16}) \\ C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & (C_{26}) \\ & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{44} & 0 & 0 \\ (+) & & C_{55} & 0 \\ & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & (S_{16}) \\ S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & (S_{26}) \\ & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & S_{44} & 0 & 0 \\ (+) & & S_{55} & 0 \\ & & & & S_{66} \end{bmatrix}$$

Bild 3.10: Steifigkeits- und Nachgiebigkeitsmatrix eines tetragonalen Materials

Beispiel eines tetragonalen Gitters mit 6 unabhängigen Konstanten ist Ammonium Dihydrogen Phosphat (ADP). Dabei handelt es sich um ein Salz, das zur Kristallzucht geeignet oder bei Weinbauern beliebt ist, um es als Hefenährstoff neben Vitamin B1/B6 der Maische mit ca. 250g/hl zuzusetzen [WIKIPEDIA (2009a-ol)].

3.4.5 Trigonal

Es treten 7 (unter Berücksichtigung der Komponenten in Klammern) oder 6 unabhängige Konstanten beim trigonalen Fall auf. Die Beziehungen der Komponenten untereinander sind komplexer. Die durch Verbindungslinien (¹) in Bild 3.11 gekennzeichneten Komponenten sind gleich. Darüber hinaus gibt es Komponenten gleichen Betrages, jedoch mit entgegengerichtetem Vorzeichen, welche durch ungleich endende Verbindungslinien gekennzeichnet

Beispiele trigonaler Kristallsysteme sind Korund, Quarz, Selen, Arsen, Dolomit und Hämatit [WIKIPEDIA (2009a-ol)].



Bild 3.11: Steifigkeits- und Nachgiebigkeitsmatrix eines trigonalen Materials

3.4.6 Transversale Isotropie

Auf 5 Konstanten kommt man bei transversal-isotroper Anordnung. Es handelt sich hier um Faserverbund-Nomenklatur. Die isotrope Ebene befindet sich normal zur Faserachse. Nach Bild 3.12 liegen gleiche Materialeigenschaften rotationssymmetrisch um die 1-Achse vor. Eine Rotation um einen beliebigen Winkel α um die 1-Achse wird durch die folgende Matrix beschrieben:

$$O_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ 0 & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}.$$
 (3.103)

Betrachten wir nun z. B. die Komponente C_{1133}^* , dann ergibt die Anwendung von Formel (3.96) auf die Steifigkeitsmatrix der monoklinen Materialsymmetrie aus Bild 3.8:

$$C_{1133}^* = \sin^2(\alpha) C_{1122} + \cos^2(\alpha) C_{1133}. \qquad (3.104)$$

Wählen wir nun 2 Winkel, nämlich $\alpha = 0^{\circ}$ und $\alpha = 90^{\circ}$, so folgt für den ersten Winkel $C_{1133}^* = C_{1133}$ und für den zweiten $C_{1133}^* = C_{1122}$. Also ist bei Verwendung von Superindizes $C_{13} = C_{12}$. In analoger Weise zeigt man, dass gilt: $C_{33} = C_{22}$ und $C_{55} = C_{66}$. Wie C_{44} aussieht,

ist etwas schwieriger zu zeigen. Die Anwendung von Formel (3.103) auf $C_{44}^* \equiv C_{2323}^*$ führt auf:

$$C_{2323}^{*} = \cos^{2}(\alpha) \sin^{2}(\alpha) (C_{2222} + C_{3333}) - 2\cos^{2}(\alpha) \sin^{2}(\alpha) C_{2233} + (\cos^{2}(\alpha) - \sin^{2}(\alpha))^{2} C_{2323} = 2\cos^{2}(\alpha) \sin^{2}(\alpha) C_{22} - 2\cos^{2}(\alpha) \sin^{2}(\alpha) C_{23} + (\cos^{2}(\alpha) - \sin^{2}(\alpha))^{2} C_{44},$$
(3.105)

wobei im letzten Schritt das Ergebnis $C_{33} = C_{22}$ sowie Superindizes verwendet wurden. Wählen wir nun als Winkel $\alpha = 45^{\circ}$, so folgt $C_{44}^* = \frac{1}{2}(C_{22} - C_{23})$. Alle diese Ergebnisse sind in Bild 3.12 zusammengetragen.



Bild 3.12: Schematische Darstellung der isotropen Ebene normal zur Faserachse [Bildquelle: TSAI (1992)], Steifigkeits- und Nachgiebigkeitsmatrix eines transversal isotropen Materials

Unidirektional faserverstärkte (Einzel-)Schichten eines Komposits weisen transversale Isotropie auf.

3.4.7 Kubisch

Die kubische Symmetrie bedingt verbleibende 3 unabhängige Konstanten (vgl. Bild 3.13). Unabhängig davon, ob die Gitterstruktur kubisch raum- oder flächenzentriert ist, liegt die kubische Kristallstruktur vor. Anwendungsbeispiele sind Si, Al, Fe und Diamant [WIKIPEDIA (2009a-ol)].



Bild 3.13: Steifigkeits- und Nachgiebigkeitsmatrix eines kubischen Materials

Diese grafischen Zusammenhänge nach NYE (1972) bei kubischer Werkstoffsymmetrie wirken sich auch auf weitere mögliche Vereinfachungen der formalen Ausdrücke aus, siehe dazu Abschnitt 3.4.8, wo diese näher erläutert werden.

3.4.8 Isotrope Materialien

Bei vollständiger Isotropie eines Werkstoffes wird das Minimum an verbleibenden unabhängigen Komponenten, die zur Charakterisierung des linear-elastischen Materialverhaltens zu bestimmen sind, erreicht. Es herrscht Rotationssymmetrie um alle Achsen. Alle Scherkomponenten können in Abhängigkeit zu den Normalkomponenten ausgedrückt werden. Lediglich zwei unabhängige Konstanten bleiben übrig. Bild 3.14 veranschaulicht den Zusammenhang grafisch in Anlehnung an NYE (1972) in der Steifigkeits- und Nachgiebigkeitsmatrix.



Bild 3.14: Schematische Darstellung vollständig symmetrischen Materialverhaltens [Bildquelle: TSAI (1992)], Steifigkeits- und Nachgiebigkeitsmatrix eines isotropen Materials

Anstelle von C_{IJ} können für **kubische und isotrope** Kristallstrukturen der Werkstoffe auch handliche Formeln für C_{iikl} angegeben werden:

$$C_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) + \mu' \delta_{ijkl}$$
(3.106)

mit den KRONECKERsymbolen

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 \text{ für } i = j \\ 0 \text{ für } i \neq j \end{cases}$$
(3.107)

$$\delta_{ijkl} = \begin{cases} 1 \text{ für } i = j = k = l \\ 0 \text{ für sonstige.} \end{cases}$$
(3.108)

Bemerkung 3.2 zu δ_{ij} : Ein Skalarprodukt $\underline{a} \cdot \underline{b} = (a_i \underline{e}_i) \cdot (b_j \underline{e}_j) = a_i b_j \underline{e}_i \underline{e}_j$, mit i = 1, 2, 3 lässt sich auf zwei Arten beschreiben; entweder mittels der indizistischen Formulierung mit Hilfe des KRONECKER-Symbols δ_{ij} :

$$\delta_{ij} = \begin{bmatrix} \underline{e}_1 \cdot \underline{e}_1 & \underline{e}_1 \cdot \underline{e}_2 & \underline{e}_1 \cdot \underline{e}_3 \\ \underline{e}_2 \cdot \underline{e}_1 & \underline{e}_2 \cdot \underline{e}_2 & \underline{e}_2 \cdot \underline{e}_3 \\ \underline{e}_3 \cdot \underline{e}_1 & \underline{e}_3 \cdot \underline{e}_2 & \underline{e}_3 \cdot \underline{e}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{z. B. } \underline{a} \cdot \underline{b} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = a_i b_j \delta_{ij} = a_j \cdot b_j = a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3.$$
Alternativ kann in absoluter Schreibweise die Einheitsmatrix verwendet werden: $\underline{1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$

Für isotrope Werkstoffe gilt:

$$C_{klij} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}).$$
(3.109)

Mit μ wird dabei die 2. LAMÉsche Konstante, welche in technischer Literatur auch als der Schubmodul *G* bekannt ist, und mit λ die 1. LAMÉsche Konstante bezeichnet. Somit bleiben lediglich 2 unabhängige Konstanten zur Beschreibung des linear-elastischen Materialgesetzes nach HOOKE übrig. λ und μ hängen mit E-Modul und Poissonzahl der elementaren Mechanik wie folgt zusammen:

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)}, \ \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}.$$
(3.110)

3.5 Einführung von Ingenieurkonstanten

Wie man bereits an Gleichung (3.110) sieht, ist es in der Technik üblich, Ingenieurkonstanten wie den E-Modul und die POISSONzahl zu verwenden. Es fragt sich, wie man im Fall der Anisotropie "experimentell" vorgehen muss, um entsprechende "E-Moduln", "Schubmoduln", "POISSONzahlen" anstelle von C_{IJ} zu benutzen, z. B. $E_1 = \frac{\sigma_1}{\epsilon_1}$. Wir erläutern diese "Experimente" im Folgenden für ein monoklines Material und spezialisieren dann auf die für Faserverbundmaterialien wichtigen Materialklassen orthotrop und transversal isotrop [TSAI (1992)].

3.5.1 "Experimente" bei monoklinen Werkstoffen

Ein **Zugversuch** in 1-Richtung mit einem monoklinen Werkstoff kann belastungsseitig wie in Bild 3.15 charakterisiert werden.



Bild 3.15: Monokliner Werkstoff axial auf Zug belastet

Ausgehend von
$$\varepsilon_I = S_{IJ}\sigma_J$$
 wird für $\sigma_I = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ eingesetzt. Das Materialgesetz lautet dann:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{1} \\ \varepsilon_{2} \\ \varepsilon_{3} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & S_{36} \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & S_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{54} & S_{55} & 0 \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}\sigma_{1} \\ S_{21}\sigma_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} .$$
(3.111)

Betrachtet man die resultierenden Gleichungen im Einzelnen, so lassen sich die Komponenten der Nachgiebigkeitsmatrix wie folgt in Ingenieurkonstanten überführen:

$$\sigma_1 = \frac{1}{S_{11}} \varepsilon_1 \stackrel{\text{\tiny Def.}}{=} E_1 \varepsilon_1, \text{ mit } E_1 = \frac{1}{S_{11}} \implies S_{11} = \frac{1}{E_1}.$$
 (3.112)

Analog gilt für eine Zugbelastung

in 2-Richtung:

$$\sigma_2 = \frac{1}{S_{22}} \varepsilon_2 \stackrel{\text{\tiny Def.}}{=} E_2 \varepsilon_2, \text{ mit } E_2 = \frac{1}{S_{22}} \implies S_{22} = \frac{1}{E_2},$$
 (3.113)

in 3-Richtung:

$$\sigma_3 = \frac{1}{S_{33}} \varepsilon_3 \stackrel{\text{\tiny Def.}}{=} E_3 \varepsilon_3, \text{ mit } E_3 = \frac{1}{S_{33}} \implies S_{33} = \frac{1}{E_3}.$$
 (3.114)

Diese Formulierung erinnert an $\sigma = E\varepsilon$ aus den Mechanikgrundlagen. Nun betrachten wir die Dehnungskomponenten senkrecht zur Zugrichtung aus Bild 3.15 und erinnern dazu an $\nu = -\frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_1}$ aus den Mechanikgrundlagen. Für die Querkontraktionen gilt bei isotropen Materialien, dass $\nu = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}}$ und $\nu = -\frac{\varepsilon_{33}}{\varepsilon_{11}}$ gleich groß sind.²⁷ Hier im Fall von monokliner Werkstoffsymmetrie lässt sich schreiben:

$$\begin{cases} S_{11}\sigma_{1} = \varepsilon_{1} \\ S_{21}\sigma_{1} = \varepsilon_{2} \end{cases} \Rightarrow -\frac{\varepsilon_{2}}{\varepsilon_{1}} = -\frac{S_{21}}{S_{11}} = -E_{1}S_{21} = v_{21} \Rightarrow S_{21} = -\frac{v_{21}}{E_{1}}$$
(3.115)

und

$$S_{11}\sigma_{1} = \varepsilon_{1} \\ S_{31}\sigma_{1} = \varepsilon_{3}$$
 $\Rightarrow -\frac{\varepsilon_{3}}{\varepsilon_{1}} = -\frac{S_{31}}{S_{11}} = -E_{1}S_{31} = v_{31} \Rightarrow S_{31} = -\frac{v_{31}}{E_{1}}.$ (3.116)

Darüber hinaus wird die Komponente 61 im Zugversuch nach Bild 3.15 angesprochen:

$$S_{61}\sigma_1 = \varepsilon_4 = 2\varepsilon_{12}. \tag{3.117}$$

Entsprechend dem Verfahren mit den Querdehnungen, die zu den Längsdehnungen ins Verhältnis gesetzt wurden, um darüber die POISSONzahlen zu definieren, kann man auch für die Scherdehnungen vorgehen:

$$\frac{S_{11}\sigma_{1} = \varepsilon_{1}}{S_{61}\sigma_{1} = 2\varepsilon_{12}} \Rightarrow \frac{2\varepsilon_{12}}{\varepsilon_{1}} = \frac{S_{61}}{S_{11}} = E_{1}S_{61} = v_{61} \Rightarrow S_{61} = \frac{v_{61}}{E_{1}}.$$
(3.118)

²⁷ Für die Indizierung der Querkontraktionszahlen v_{ij} gilt [vgl. z. B. MICHAELI et al. (1995)]:

^{1.} Index i: Richtung der Verformung

^{2.} Index *j*: Richtung der Spannung, die diese Verzerrung bewirkt.

Analog lässt sich für eine Zugbelastung in 2-Richtung zeigen:

$$\begin{cases} S_{12}\sigma_{2} = \varepsilon_{1} \\ S_{22}\sigma_{2} = \varepsilon_{2} \end{cases} \Rightarrow -\frac{\varepsilon_{1}}{\varepsilon_{2}} = -\frac{S_{12}}{S_{22}} = -E_{2}S_{12} \stackrel{\text{\tiny Def.}}{=} v_{12} \Rightarrow S_{12} = -\frac{v_{12}}{E_{2}} \end{cases}$$
(3.119)

und

$$\begin{cases} S_{22}\sigma_2 = \varepsilon_2 \\ S_{32}\sigma_2 = \varepsilon_3 \end{cases} \Rightarrow -\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_2} = -\frac{S_{32}}{S_{22}} = -E_2 S_{32} \stackrel{\text{Def.}}{=} v_{32} \Rightarrow S_{32} = -\frac{v_{32}}{E_2}. \tag{3.120}$$

Ebensolches lässt sich für eine Zugbelastung in 3-Richtung zeigen:

$$\begin{cases} S_{13}\sigma_3 = \varepsilon_1 \\ S_{33}\sigma_3 = \varepsilon_3 \end{cases} \Rightarrow -\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3} = -\frac{S_{13}}{S_{33}} = -E_3 S_{13} = v_{13} \Rightarrow S_{13} = -\frac{v_{13}}{E_3} \end{cases}$$
(3.121)

und

$$S_{23}\sigma_3 = \varepsilon_2 \\ S_{33}\sigma_3 = \varepsilon_3$$

$$\Rightarrow \quad -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_3} = -\frac{S_{23}}{S_{33}} = -E_3 S_{23} = v_{23} \quad \Rightarrow S_{23} = -\frac{v_{23}}{E_3}.$$
 (3.122)

 v_{62} bzw. S_{62} und v_{63} bzw. S_{63} bekommt man nach analogem Vorgehen wie in (3.118) beschrieben aus Zugversuchen um die anderen Achsen. Als Zwischenergebnis lässt sich aus dem reinen Zugversuch eines monoklinen Materials unter Belastung jeweils einer der drei Achsenrichtungen folgende Nachgiebigkeitsmatrix ableiten:

$$S_{IJ} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{V_{12}}{E_2} & -\frac{V_{13}}{E_3} & 0 & 0 & S_{16} \\ -\frac{V_{21}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{V_{23}}{E_3} & 0 & 0 & S_{26} \\ -\frac{V_{31}}{E_1} & -\frac{V_{32}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & S_{36} \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & S_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{54} & S_{55} & 0 \\ \frac{V_{61}}{E_1} & \frac{V_{62}}{E_2} & \frac{V_{63}}{E_3} & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix}.$$
(3.123)

Betrachten wir nun einen **Schubversuch**, um zu prüfen, welche Komponenten der Nachgiebigkeitsmatrix darin angesprochen werden. Dazu wählen wir den in Bild 3.16 illustrierten Versuchsaufbau.



Bild 3.16: Monokliner Werkstoff auf Schub belastet

Nun wird zur Abbildung einer Schubbelastung $\sigma_{I} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \tau = \sigma_{6} \end{bmatrix}$ gesetzt. Das Materialgesetz lautet dann: $\begin{bmatrix} \varepsilon_{1} \\ \varepsilon_{2} \\ \varepsilon_{3} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & S_{36} \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & S_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{54} & S_{55} & 0 \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{16}\sigma_{6} \\ S_{26}\sigma_{6} \\ 0 \\ 0 \\ S_{66}\sigma_{6} \end{bmatrix}.$ (3.124)

Die Betrachtung der Gleichung:

$$2\varepsilon_{12} = S_{66}\sigma_6 \doteq \gamma \tag{3.125}$$

führt auf die Definition der Scherdehnung γ . σ_6 ist ebenfalls bekannt als Schubspannung τ , die sich wie folgt beschreiben lässt:

$$\sigma_6 = \frac{2}{S_{66}} \varepsilon_{12} \triangleq \tau. \tag{3.126}$$

Somit lässt sich mit bekannten Ingenieurkonstanten formulieren:

$$\tau = G\gamma, \text{ mit } G_{12} = \frac{1}{S_{66}} = E_6 \implies S_{66} = \frac{1}{E_6}.$$
 (3.127)

Die Komponenten S_{16} , S_{26} und S_{36} treten ebenfalls in Kombination mit den Normaldehnungen zur Materialbeschreibung auf. Am Beispiel von S_{16} sei deren Umschreibung in Ingenieurkonstanten erläutert:

$$\frac{S_{16}\sigma_{6} = \varepsilon_{11}}{S_{66}\sigma_{6} = 2\varepsilon_{12}} \Rightarrow \frac{\varepsilon_{11}}{2\varepsilon_{12}} = \frac{S_{16}}{S_{66}} = E_{6}S_{16} = V_{16} \Rightarrow S_{16} = \frac{V_{16}}{E_{6}}.$$
(3.128)

Mit all diesen Komponenten können wir für die Nachgiebigkeitsmatrix schreiben:

$$S_{IJ} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{V_{12}}{E_2} & -\frac{V_{13}}{E_3} & 0 & 0 & \frac{V_{16}}{E_6} \\ -\frac{V_{21}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{V_{23}}{E_3} & 0 & 0 & \frac{V_{26}}{E_6} \\ -\frac{V_{31}}{E_1} & -\frac{V_{32}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & \frac{V_{36}}{E_6} \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & S_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{54} & S_{55} & 0 \\ \frac{V_{61}}{E_1} & \frac{V_{62}}{E_2} & \frac{V_{63}}{E_3} & 0 & 0 & \frac{1}{E_6} \end{bmatrix}.$$
(3.129)

Auch die noch verbliebenen Elemente der Nachgiebigkeitsmatrix S_{IJ} kann man durch Ingenieurkonstanten ausdrücken wie z. B. bei TSAI et al. (1988) nachzulesen ist. Darauf gehen wir jedoch nicht näher ein, da wir uns nachher auf den Fall ebener Spannungszustände und orthotroper Materialien beschränken werden. Man erhält die vollständig in Ingenieurkonstanten ausgedrückte Nachgiebigkeitsmatrix:

$$S_{IJ} = \begin{vmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{V_{12}}{E_2} & -\frac{V_{13}}{E_3} & 0 & 0 & \frac{V_{16}}{E_6} \\ -\frac{V_{21}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{V_{23}}{E_3} & 0 & 0 & \frac{V_{26}}{E_6} \\ -\frac{V_{31}}{E_1} & -\frac{V_{32}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & \frac{V_{36}}{E_6} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{E_4} & \frac{V_{45}}{E_5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{V_{54}}{E_4} & \frac{1}{E_5} & 0 \\ \frac{V_{61}}{E_1} & \frac{V_{62}}{E_2} & \frac{V_{63}}{E_3} & 0 & 0 & \frac{1}{E_6} \end{vmatrix} .$$
(3.130)

3.5.2 "Experimente" bei orthotropen Werkstoffen



Bild 3.17: Orthotroper Werkstoff axial auf Zug belastet mit entsprechendem Spannungstensor

Wird für einen orthotropen Werkstoff eine **Zugbelastung** in 1-Richtung wie in Bild 3.17 initiiert, so lautet das Materialgesetz:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{1} \\ \varepsilon_{2} \\ \varepsilon_{3} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{1} \\ 0 \\ S_{21}\sigma_{1} \\ S_{31}\sigma_{1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$
(3.131)

Wie im monoklinen Fall in Abschnitt 3.5.1 dargestellt, gelten auch hier bei Orthotropie für eine Zugbelastung die Zusammenhänge (3.112) bis (3.116) und (3.119) bis (3.122). Wir erhalten $\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1$ (analog für Zug in 2- bzw. 3-Richtung $\sigma_2 = E_2 \varepsilon_2$ bzw. $\sigma_3 = E_3 \varepsilon_3$) mit $E_1 = \frac{1}{S_{11}}$ normal zur Belastung und für die Querdehnungen: $-\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = v_{21} \implies S_{21} = -\frac{V_{21}}{E_1}$ und $-\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} = v_{31} \implies S_{31} = -\frac{V_{31}}{E_1}$.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.



Bild 3.18: Orthotroper Werkstoff auf Schub belastet mit entsprechendem Spannungstensor

Für eine Schubbelastung, wie in Bild 3.18 dargestellt, lautet das Materialgesetz dann:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{1} \\ \varepsilon_{2} \\ \varepsilon_{3} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ S_{66} \sigma_{6} \end{bmatrix}.$$
(3.132)

Es lässt sich wie bereits in Abschnitt 3.5.1 für monokline Materialien der Zusammenhang aus den Gleichungen (3.126) und (3.127) aufzeigen: $\sigma_6 = \frac{2}{S_{66}} \varepsilon_{12} \triangleq \tau = G_{12} \gamma$. Die Nachgiebigkeitsmatrix lautet folglich für den orthotropen Fall in Ingenieurkonstanten ausgedrückt:

$$S_{IJ} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{V_{12}}{E_2} & -\frac{V_{13}}{E_3} & 0 & 0 & 0\\ -\frac{V_{21}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{V_{23}}{E_3} & 0 & 0 & 0\\ -\frac{V_{31}}{E_1} & -\frac{V_{32}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{E_6} \end{bmatrix}.$$
(3.133)

3.5.3 "Experimente" bei transversal-isotropen Werkstoffen

Nun werden transversal-isotrope Werkstoffe unter **Zugbelastung**, wie in Bild 3.19 dargestellt, betrachtet.





Unter Ausnutzung der Materialsymmetrien ergibt sich für reinen Zug eingesetzt in das Materialgesetz:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{1} \\ \varepsilon_{2} \\ \varepsilon_{3} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} = 2(S_{22} - S_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}\sigma_{1} \\ S_{21}\sigma_{1} \\ S_{31}\sigma_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} .$$
(3.134)

Wie im monoklinen Fall in Abschnitt 3.5.1 dargestellt, gelten auch hier bei transversalisotroper Werkstoffsymmetrie für eine Zugbelastung die Zusammenhänge (3.112) bis (3.116) und (3.119) bis (3.122): $\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1$ (analog für Zug in 2- bzw. 3-Richtung $\sigma_2 = E_2 \varepsilon_2$ bzw. $\sigma_3 = E_3 \varepsilon_3$) mit $E_1 = \frac{1}{S_{11}}$ normal zur Belastung und für die Querdehnungen $-\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = v_{21}$ $\Rightarrow S_{21} = -\frac{v_{21}}{E_1}$ und $-\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} = v_{31} \Rightarrow S_{31} = -\frac{v_{31}}{E_1}$. Infolge der Materialsymmetrie (in Gleichung (3.134) gekennzeichnet durch die Verbindungslinien) gilt außerdem $S_{31} = S_{21}$ und somit ist $v_{31} = v_{21}$.



Bild 3.20: Transversal-isotroper Werkstoff auf Schub belastet mit Spannungstensor

Für eine Schubbelastung, wie in Bild 3.20 dargestellt, lautet das Materialgesetz dann:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{1} \\ \varepsilon_{2} \\ \varepsilon_{3} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} = 2(S_{22} - S_{23}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ S_{66} \sigma_{6} \end{bmatrix}.$$
(3.135)

Es lässt sich wie bereits in Abschnitt 3.5.1 für monokline Materialien der Zusammenhang (3.127) aufzeigen: $\sigma_6 = \frac{2}{S_{66}} \varepsilon_{12} \triangleq \tau = G_{12} \gamma$. Für Transversal-Isotropie stellt sich die Nachgiebigkeitsmatrix unter Ausnutzung der Symmetriebeziehungen bei den Werkstoffeigenschaften somit folgendermaßen dar:

$$S_{IJ} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{V_{12}}{E_2} & -\frac{V_{12}}{E_2} & 0 & 0 & 0\\ -\frac{V_{21}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{V_{23}}{E_3} & 0 & 0 & 0\\ -\frac{V_{21}}{E_1} & -\frac{V_{32}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+V_{32})}{E_2} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{E_6} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{E_6} \end{bmatrix}.$$
(3.136)

3.6 Transformation richtungsabhängiger Einzelschichtinformationen zur Laminatsteifigkeit

Um der Faserorientierung jeder beliebigen Einzelschicht im Verbund gerecht zu werden, müssen die Einzelschichtinformationen zunächst in ein globales Koordinatensystem transformiert werden. Aus den transformierten Einzelschichtmatrizen wird die Laminatsteifigkeit ermittelt.

Die dazu erforderlichen Transformationsformeln seien im Folgenden genannt:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \,\,\varepsilon_{kl} \,, \tag{3.137}$$

$$\sigma'_{uv} = O_{ui}O_{vj} \ \sigma_{ij} \ , \quad \varepsilon'_{uv} = O_{ui}O_{vj} \ \varepsilon_{ij} \ , \tag{3.138}$$

$$C'_{rstu} = O_{ri}O_{sj}O_{tk}O_{ul}C_{ijkl} , (3.139)$$

$$S'_{rstu} = O_{ri}O_{sj}O_{tk}O_{ul}S_{ijkl} {.} {(3.140)}$$

Eine Drehung des Koordinatensystems um die x_3 -Achse (out of plane) ist in Bild 3.21 veranschaulicht.



Bild 3.21: Projektion eines Punktes P auf unterschiedliche Koordinatensysteme

Obwohl die Ausführungen hier allgemein mathematischen Charakter haben und auf viele physikalische Situationen anwendbar sind, interessiert uns ganz speziell die folgende: Die x'_1 -Richtung aus der Abbildung soll in Abschnitt 3.7.1.3 die Faserrichtung bezeichnen. Ferner

wird in dem besagten Abschnitt der Winkel α diskrete Werte α_k annehmen, wobei der Laufindex *k* die betreffende Einzelschicht kennzeichnet. Ferner ist der hier verwendete Winkel α mit dem gleichnamigen Winkel aus den Abschnitten 3.7.4 bis 3.8.1, auch "Laminatwinkel" in der Software Lami*Cens*[©] [FUNKE (2005c)] genannt, zu identifizieren, der dort im Falle der untersuchten Gewebe die Winkelrichtung zwischen Kettfäden und späterer Zugrichtung angibt. Man beachte, dass letzterer auch in den experiment- mit theorievergleichenden Abschnitten 3.8.3 und 3.8.4 vorzufinden ist. Zuvor im Abschnitt 2.5.2 zu den Versuchen wird dieser Gewebelaminatwinkel eingeführt und präziser mit α_{Kett} im Falle der Orientierung der Kettfäden und mit α_{Schuss} im Falle der Orientierung der Schussfäden bezeichnet.

$$\frac{\underline{x}' = \underline{x},}{\underline{x}' = x_i' \underline{e}'_i,}$$

$$\underline{x} = x_j \underline{e}_j,$$

$$\frac{\underline{x}' = x_j \underline{e}_j,}{\underline{e}'_i = x_j \underline{e}_j,}$$

$$\frac{\underline{e}'_i \cdot \underline{e}'_k = x_j \underline{e}_j \cdot \underline{e}'_k.}{(3.142)}$$

Es folgt:

Mit Hilfe des KRONECKER-Symbols $\delta_{ik} = \underline{e'}_i \cdot \underline{e'}_k$, welches als Synonym für die Einheitsmatrix fungiert, da $\delta_{ik} = \begin{cases} 1, \text{ falls } i = k \\ 0, \text{ falls } i \neq k \end{cases}$ (vgl. auch Bemerkung 3.2 auf S. 135 dazu), folgt daraus:

 x'_{i}

$$x'_{k} = x_{j}\underline{e}_{j} \cdot \underline{e}'_{k} = \underline{e}'_{k} \cdot \underline{e}_{j}x_{j}.$$
(3.143)

Wegen $\underline{e'_1} \cdot \underline{e_1} = |\underline{e'_1}| \cdot |\underline{e_1}| \cos(\alpha) = \cos(\alpha)$ und $x'_k = \underline{O}_{kj} x_j$, $O_{kj} \stackrel{\text{\tiny Def}}{=} \underline{e'_k} \cdot \underline{e}_j$ lässt sich schreiben:

$$O_{kj} = \begin{bmatrix} \underline{e'_1} \cdot \underline{e_1} = \cos(\alpha) & \underline{e'_2} \cdot \underline{e_1} = \sin(\alpha) & \underline{e'_3} \cdot \underline{e_1} = 0 \\ \underline{e'_1} \cdot \underline{e_2} = -\sin(\alpha) & \underline{e'_2} \cdot \underline{e_2} = \cos(\alpha) & \underline{e'_3} \cdot \underline{e_2} = 0 \\ \underline{e'_1} \cdot \underline{e_3} = 0 & \underline{e'_2} \cdot \underline{e_3} = 0 & \underline{e'_3} \cdot \underline{e_3} = 1 \end{bmatrix}$$
(3.144)

oder kurz:

$$O_{kj} = \begin{bmatrix} c & s & 0 \\ -s & c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{mit} \quad \begin{array}{c} c = \cos(\alpha) \\ s = \sin(\alpha). \end{array}$$
(3.145)

Beispielsweise gilt für einen Drehwinkel von $\alpha = 45^{\circ}$:

$$O_{kj} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0\\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$
 (3.146)

Die Einzelschichten in der Laminattheorie liegen in der x_1 - x_2 -Ebene. Zur Bestimmung ihrer Steifigkeits- und Nachgiebigkeitseigenschaften ist es notwendig, Drehungen um die x_3 -Achse zu untersuchen. Durch Kombination der Gleichungen (3.138) und (3.145) erhalten wir

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11}' \\ \sigma_{22}' \\ \sigma_{12}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2cs \\ s^2 & c^2 & -2cs \\ -cs & cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}' \\ \varepsilon_{22}' \\ \varepsilon_{12}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & cs \\ s^2 & c^2 & -cs \\ -2cs & 2cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{22} \end{bmatrix}.$$
(3.147)

Diese komplexen Beziehungen schreiben wir kurz wie folgt:

$$\{\sigma'\} = [T]\{\sigma\} \text{ mit } \{\sigma'\} \stackrel{\text{Def.}}{=} \begin{bmatrix} \sigma'_{11} \\ \sigma'_{22} \\ \sigma'_{12} \end{bmatrix}, [T] \stackrel{\text{Def.}}{=} \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2cs \\ s^2 & c^2 & -2cs \\ -cs & cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix}, \{\sigma\} \stackrel{\text{Def.}}{=} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}, (3.148)$$
$$\{\varepsilon'\} \stackrel{\text{Def.}}{=} \begin{bmatrix} \varepsilon'_{11} \\ \varepsilon'_{22} \\ 2\varepsilon'_{12} \end{bmatrix}, [K] \stackrel{\text{Def.}}{=} \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & cs \\ s^2 & c^2 & -cs \\ -2cs & 2cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix}, \{\varepsilon\} \stackrel{\text{Def.}}{=} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix}. (3.149)$$

Die "out of plane"-Spannungen und -Dehnungen werden hier nicht weiter ausgeführt, da sie für die Laminattheorie nicht von Belang sind. Außerdem stellt man durch Nachrechnen fest, dass sich die Matrix [K] aus der Matrix [T] wie folgt bestimmen lässt:

$$[K] = [T^{T}]^{-1}. (3.150)$$

3.7 Laminattheorie - Spezielles Materialgesetz für den orthotropen Fall 2D

Im Folgenden wird das globale Koordinatensystem des Faserverbundes mit x, y, z, das der Einzelschicht mit 1, 2, 3 bezeichnet.

3.7.1 Die Einzelschicht (ein Ply)

Wir unterstellen, dass bei faserverstärkten Kunststoffverbunden die totalen Dehnungen lediglich durch den elastischen Anteil gegeben sind, also $\varepsilon_{kl}^* = 0$ ist. Diese Annahme erfährt in den vorhergehenden Abschnitten eine Begründung durch die experimentellen Messergebnisse.

3.7.1.1 Ebener Spannungszustand bei orthotropen Werkstoffen, Eigensystem (x_1, x_2, x_3)

Im Dreidimensionalen gilt für orthotrope Materialien die Gleichung (vgl. Bild 3.9):

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}.$$
(3.151)

Laminierte Verbunde sind aus orthotropen Schichten (Lagen) aufgebaut, die unidirektionale Fasern (eingebettet in Epoxidharzmatrix) oder Fasergewebe beinhalten. Letztere Formel gilt dann, wenn die Fasern wie in Bild 3.22 dargestellt verlaufen; der Index 1 bezeichnet die Koordinatenachse parallel zur Faserrichtung, Index 2 weist quer zur Faser. Bei einer solchen Einzelschicht (ES) handelt es sich per Definition um ein sehr dünnes Laminat. Die Schichtdicke ist um ein Vielfaches geringer als die Ausdehnung des Laminats in Länge und Breite, sodass die mechanische Konstellation des **ebenen Spannungszustandes** (im Folgenden mit ESZ abgekürzt, engl.: plane stress) zutrifft:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & 0 \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$
(3.152)



Bild 3.22: Orthotropes dünnes Material im Eigensystem, Faserorientierung in x₁-Richtung

Eingesetzt in die Formel (3.151) ergibt sich daraus:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}\sigma_{11} + S_{12}\sigma_{22} \\ S_{21}\sigma_{11} + S_{22}\sigma_{22} \\ S_{31}\sigma_{11} + S_{32}\sigma_{22} \\ 0 \\ 0 \\ S_{66}\sigma_{12} \end{bmatrix}.$$
 (3.153)

Für den ESZ gilt, wie der Name bereits andeutet, dass keine Spannungen aus der **Ebene** heraus auftreten. Wenige mathematische Beziehungen verbleiben:

aus denen im Zugversuch die Konstanten ermittelt werden können, wie noch zu sehen sein wird.

Zu beachten ist, dass trotz der ebenen Betrachtung die Normaldehnung "out of plane" mit $\varepsilon_3 = \varepsilon_{33} = S_{31}\sigma_{11} + S_{32}\sigma_{22}$ auftritt, die Scherdehnungen ε_{31} und ε_{23} "out of plane" sind jedoch Null. Die Normaldehnung ε_{33} kann ausgerechnet werden, wenn die Ingenieurkonstanten in den Komponenten S_{31} und S_{32} bekannt sind.

Die verbliebenen Gleichungen (3.154) des ESZ lassen sich auch in Matrixform schreiben, was gewisse rechentechnische Vorteile hat, wie sich noch zeigen wird:

$$\{\varepsilon\} = [S]\{\sigma\} \text{ mit}$$

$$\{\varepsilon\} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix}, \quad [S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix}, \quad \{\sigma\} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}.$$
(3.155)

Erinnert sei an dieser Stelle an die Einführung von Ingenieurkonstanten für monokline / orthotrope Materialien aus den Abschnitten 3.5.1/ 3.5.2, speziell an die Elastizitätsmoduln E_1 , E_2 , E_6 und die Querkontraktionszahlen v_{12} und v_{21} , deren erster Index die Verformungsund zweiter Index die (verursachende) Kraftrichtung beschreibt. Mit $S_{11} = \frac{1}{E_1}$, $S_{12} = -\frac{v_{12}}{E_2}$, $S_{21} = -\frac{v_{21}}{E_1}$, $S_{22} = \frac{1}{E_2}$ und $S_{66} = \frac{1}{E_6}$ lässt sich schreiben:

$$\{\varepsilon\} = [S]\{\sigma\} \text{ mit } [S]^{\text{Def.}} \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{V_{12}}{E_2} & 0\\ -\frac{V_{21}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0\\ 0 & 0 & \frac{1}{E_6} \end{bmatrix}.$$
(3.156)

Die Inverse zu der 3×3-Matrix aus Gleichung (3.155) (reduzierte "S-Matrix") kann leicht gefunden werden:

$$\{\sigma\} = [Q] \{\varepsilon\} \text{ mit } [Q] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix}$$
(3.157)

und mit den nachstehenden Komponenten ausgedrückt durch Ingenieurkonstanten:

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - v_{12}v_{21}}, \quad Q_{12} = Q_{21} = \frac{v_{12}E_1}{1 - v_{12}v_{21}} = \frac{v_{21}E_2}{1 - v_{12}v_{21}},$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - v_{12}v_{21}} \quad \text{und} \quad Q_{66} = E_6 \equiv G_{12} = \frac{1}{S_{66}}$$
(3.158)

ergibt sich zusammengefasst in Matrixschreibweise:

$$\bigtriangledown$$

$$[Q] = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - v_{12}v_{21}} & \frac{v_{12}E_1}{1 - v_{12}v_{21}} & 0\\ \frac{v_{21}E_2}{1 - v_{12}v_{21}} & \frac{E_2}{1 - v_{12}v_{21}} & 0\\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} = [S]^{-1}.$$
(3.159)

Anmerkung: Manche Autoren (wie z.B. CARLSSON und PIPES (1989)) nutzen eine abweichende Reihenfolge der Indizes von v_{ij} , was dazu führt, dass die Nicht-Diagonalkomponenten von den hier angegebenen abweichen (siehe auch den Kommentar bei TSAI (1992), S. 2-10/11). Die zu ermittelnden Komponenten der Steifigkeitsmatrix weisen fünf verbleibende Ingenieurkonstanten aus. Diese Anzahl lässt sich jedoch weiter reduzieren, denn es muss gelten:

$$S_{12} = S_{21} \implies v_{12}E_1 = v_{21}E_2 \implies v_{12} = \frac{E_2}{E_1}v_{21}.$$
 (3.160)

Unter Ausnutzung von (3.158) und (3.160) lässt sich die Anzahl der verbleibenden Konstanten reduzieren:

$$[Q] = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - v_{21}^2 \frac{E_2}{E_1}} & \frac{v_{21}E_2}{1 - v_{21}^2 \frac{E_2}{E_1}} & 0\\ \frac{v_{21}E_2}{1 - v_{21}^2 \frac{E_2}{E_1}} & \frac{E_2}{1 - v_{21}^2 \frac{E_2}{E_1}} & 0\\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix}.$$
(3.161)

Zur Kennzeichnung dieses dünnen Materiestreifens sind somit vier voneinander unabhängige Grund-Elastizitätsgrößen, wie SCHÜRMANN (2007) sie bezeichnet, erforderlich, die in geeigneter Weise bestimmt werden müssen:

$$E_1, E_2, G_{12} \ (\equiv E_6) \text{ und } V_{21}.$$
 (3.162)

Diese vier Konstanten für das Elastizitätsgesetz der unidirektionalen Einzelschicht, die den ebenen Spannungszustand charakterisieren, können auf unterschiedliche Weise bestimmt werden. Will man kein "*weit verbreitetes Faser-Matrix-System*" verwenden, von dem die Daten bekannt sind oder auf bekannte, aber ungenauere, Kenndaten einer ähnlichen Werkstoffkombination ausweichen, so bleibt im Prinzip nur, sich diese entweder aus den mikromechanischen Formeln, die im folgenden Abschnitt 3.7.1.2 vorgestellt werden, abzuschätzen oder selbst Experimente an Probekörpern im ESZ-Versuch durchzuführen (vgl. Abschnitt 2.5 bis 2.7). Die letztgenannten Experimente liefern *"die genaueste Wiedergabe der Realität"* und somit *"die sichersten Daten"*. Darin spiegeln sich *"Einflüsse, die bei einer mechanischen Modellierung einer UD-Schicht kaum alle berücksichtigt werden können,"* wieder, wie z. B. Fertigungseinflüsse (die vom Pressdruck abhängigen Faservolumen- und Porenanteile), die Richtungsabhängigkeit der Fasermaterialeigenschaften, *"die an der Einzelfaser kaum exakt messbar"* sind und die *"Nichtlinearität der Spannungs-Verzerrungskurven"*, da die *"Grund-* Elastizitätskenngrößen... eigentlich keine Konstanten (sind), sondern... nur im Anfangsbereich linearisiert werden (können)". Allerdings ist die experimentelle Bestimmung dieser Grund-Elastizitätsgrößen aufwändig und kostspielig, erst recht bei einem erforderlichen Stichprobenumfang, der eine gewisse statistische Sicherheit verspricht. Experimente sind häufig sowieso erforderlich, wenn die Kenntnis der Festigkeiten entscheidend ist, die "sinnvollerweise nur durch Versuche" erhoben werden können, da die "Berechnung, z. B. aus den Festigkeiten der Einzelkomponenten, ... unzuverlässig (ist)". [SCHÜRMANN (2007)]

Die Kennzahl E_2 können wir für die Einzelschicht im Rahmen dieser Arbeit nicht experimentell bestimmen (vgl. mit Abschnitten 2.5 bis 2.7), weil aufgrund der Verwendung von bidirektionalen Geweben nicht allein quer zur Faserachse belastet werden kann.

3.7.1.2 Mischungsregeln für mechanische Eigenschaften der Einzelschicht (Mikromechanik)

Für einen Übergang von den elementaren Materialparametern der Fasern und der diese umhüllenden Matrix auf die elastischen Konstanten der Laminattheorie sind Mischungsregeln notwendig, um eine "gedachte" Homogenisierung des Werkstoffverhaltens einzelner Schichten zu erreichen: die lokalen Werkstoffeigenschaften werden quasi "verschmiert". MICHAELI et al. (1995) beschreiben die mikromechanische Berechnung der mechanischen Eigenschaften einer unidirektionalen Einzelschicht anhand folgender **Mischungsregeln**:

$$E_{1} = \varphi E_{F} + (1 - \varphi) E_{H}, \quad E_{2} = \frac{E_{H} E_{F2}}{\varphi E_{H} + (1 - \varphi) E_{F2}},$$

$$V_{21} = \varphi V_{F} + (1 - \varphi) V_{H}, \quad G_{12} = \frac{G_{F} G_{H}}{\varphi G_{H} + (1 - \varphi) G_{F}}.$$
(3.163)

Hierin bezieht sich der Index F auf Eigenschaften in Faserlängsrichtung, der Index F2 auf Eigenschaften in Faserquerrichtung, der Index H steht für die Eigenschaften des umgebenden Harzes und φ repräsentiert den Volumenanteil der Fasern, d. h. $(1-\varphi)$ ist der Volumenanteil des Harzes. Zur Wahrung der Konsistenz in den verwendeten Bezeichnungen wird abweichend von MICHAELI et al. (1995) die Indizierung der longitudinalen (oder "major") POISSONzahl V_{21} gemäß der Empfehlung von TSAI /HAHN (1980) und TSAI (1992) vorgenommen. Diese Mischungsregeln resultieren aus den Gleichungen für die Addition von Federkonstanten in Parallel- und in Serienschaltung. Serienschaltung sehen wir in Bild 3.23 links, die Parallelschaltung rechts daneben.



Bild 3.23: Serien- und Parallelschaltungen von Federn nach PFEFFERKORN (1988) bei Belastung quer zur Faserrichtung (links) und in Faserrichtung (rechts)

Es gilt für Federn:

$$c = c_1 + c_2$$
 bzw. $\frac{1}{c} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2}$, (3.164)

also folgt, wenn man die Federsteifigkeiten mit den E-Moduln identifiziert, sofort, dass gilt:

$$E_1 = \varphi E_F + (1 - \varphi) E_H$$
 bzw. $\frac{1}{E_2} = \frac{\varphi}{E_{F2}} + \frac{1 - \varphi}{E_H}$. (3.165)

Dass für die POISSONzahlen ein Parallelschaltungs- und für die Schermoduln ein Reihenschaltungsgesetz gilt, ist weniger augenfällig. Dies hängt gem. VDI-RICHTLINIE 2014 (1989) davon ab, ob der Kennwert durch die Faser (dann Parallelschaltung) oder durch das Harz (dann Reihenschaltung) dominiert wird. Auf die Details des Beweises sei auf die Literaturhinweise in MICHAELI et al. (1995) bzw. auf die VDI-RICHTLINIE 2014 (1989) verwiesen, ebenso auf den Beweis der folgenden modifizierten Mischungsregeln nach

CHAMIS (1969):
$$E_2 = \frac{E_H}{1 - \varphi^{0.5} (1 - E_H / E_{F2})}, \quad G_{12} = \frac{G_H}{1 - \varphi^{0.5} (1 - G_H / G_F)}$$
 (3.166)

und

PUCK
(1967),
$$E_2 = \frac{E_H^* (1+0.85\varphi^2)}{\varphi E_H^* / E_F + (1-\varphi)^{1.25}}, \quad E_H^* = \frac{E_H}{(1-\nu_H^2)}, \quad G_{12} = \frac{G_H (1+0.6\varphi^{0.5})}{\varphi G_H / G_F + (1-\varphi)^{1.25}}.$$
 (3.167)
(1969):

3.7.1.3 Drehung einer Einzelschicht

Sind nun die Materialeigenschaften des gesamten Laminats von Interesse, welches aus mehreren Einzelschichten mit unterschiedlichen Orientierungen bestehen kann, dann wird die Transformation der Einzelschichtkoordinaten in globale Laborkoordinaten erforderlich. Konstruktiv zu beachten ist dabei jedoch, dass ein symmetrischer Aufbau um die Mittelachse zu erfolgen hat, um ein Verwölben aus der Ebene heraus zu vermeiden. Bevor wir lernen, wie wir die Materialeigenschaften mehrerer unterschiedlich gedrehter Einzelschichten zu einer Gesamtsteifigkeits- respektive Gesamtnachgiebigkeitsmatrix zusammenfassen, beschäftigen wir uns mit der Berechnung der Steifigkeit einer beliebig gedrehten dünnen Einzelschicht. Diese ist in Bild 3.24 zu sehen.

Die Transformationsvorschrift für eine Drehung um die x_3 -Achse, wie sie in Bild 3.24 veranschaulicht ist, lautet:

$$O_{ij} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_k) & \sin(\alpha_k) & 0 \\ -\sin(\alpha_k) & \cos(\alpha_k) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{\text{Def.}} \begin{bmatrix} c & s & 0 \\ -s & c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$
(3.168)

wobei wir $\cos(\alpha_k)$ und $\sin(\alpha_k)$ mit c bzw. s abgekürzt haben (manche nennen sie m, n). Wenn man diese Transformationsvorschrift in Gleichung (3.140) einsetzt, und dabei die Nachgiebigkeitsmatrix *S* mit der des Eigensystems und die Matrix *S'* mit der des globalen Laborsystems (mit Strich gekennzeichnet) identifiziert, dann stellt man fest, dass:



Bild 3.24: Faserbündel eingebettet in Matrixmaterial mit Koordinatensystem der Einzelschicht, Drehung um x_3 -Achse aus dem Laborsystem in das Eigensystem der orthotropen Einzelschicht um den Winkel α_k [Bildquellen: WUTTKE (2009), modifiziert]

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1' \\ \varepsilon_2' \\ 2\varepsilon_{12}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}' & S_{12}' & S_{16}' \\ S_{21}' & S_{22}' & S_{26}' \\ S_{61}' & S_{62}' & S_{66}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1' \\ \sigma_2' \\ \sigma_1' \\ \sigma_2' \end{bmatrix} \iff \{\varepsilon'\} = [S']\{\sigma'\}.$$
(3.169)

Um [S'] zu berechnen, verknüpfen wir die Gleichungen (3.169), (3.149) und (3.148), um zu finden, dass gilt:

$$[S'] = [T]^T [S] [T].$$
(3.170)

Es ist offenbar sehr lästig, immer Striche bei den Symbolen zur Kennzeichnung des Laborsystems mitführen zu müssen und deshalb wollen wir uns darauf einigen, dass wir Größen im Laborsystem fortan ohne Strich und anstelle der Indizes 1, 2 und 6 die Buchstaben x, y und sverwenden wollen. Also schreiben wir anstelle von Gleichung (3.169):

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{y} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xs} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{ys} \\ S_{sx} & S_{sy} & S_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{x} \\ \sigma_{y} \\ \sigma_{y} \end{bmatrix}.$$
 (3.171)

Das Ausmultiplizieren von (3.170) ergibt schließlich:

$$S_{xx} = c^{4}S_{11} + c^{2}s^{2}(2S_{12} + S_{66}) + s^{4}S_{22} ,$$

$$S_{yx} = S_{xy} = c^{2}s^{2}(S_{11} + S_{22} - S_{66}) + S_{12}(c^{4} + s^{4}),$$

$$S_{yy} = s^{4}S_{11} + c^{2}s^{2}(2S_{12} + S_{66}) + c^{4}S_{22} ,$$

$$S_{sx} = S_{xs} = 2c^{3}s(S_{11} - S_{12}) + 2cs^{3}(S_{12} - S_{22}) - cs(c^{2} - s^{2})S_{66} ,$$

$$S_{sy} = S_{ys} = 2cs^{3}(S_{11} - S_{12}) + 2c^{3}s(S_{12} - S_{22}) + cs(c^{2} - s^{2})S_{66} ,$$

$$S_{ss} = 4c^{2}s^{2}(S_{11} - S_{12}) - 4c^{2}s^{2}(S_{12} - S_{22}) + (c^{2} - s^{2})^{2}S_{66} .$$

(3.172)

Man beachte, dass die $3 \times 3 S$ -Matrix in Gleichung (3.171) im Gegensatz zu der entsprechenden Gleichung (3.155) für das Eigensystem voll besetzt ist.

Eine Invertierung von Gleichung (3.170) ist ebenfalls möglich und ergibt:

$$[Q'] = [T]^{-1} [Q] [T^T]^{-1}, \qquad (3.173)$$

wobei die einzelnen Komponenten lauten:

$$Q_{xx} = c^{4}Q_{11} + 2c^{2}s^{2}(Q_{12} + 2Q_{66}) + s^{4}Q_{22} ,$$

$$Q_{yx} = Q_{xy} = c^{2}s^{2}(Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) + (c^{4} + s^{4})Q_{12} ,$$

$$Q_{yy} = s^{4}Q_{11} + 2c^{2}s^{2}(Q_{12} + 2Q_{66}) + c^{4}Q_{22} ,$$

$$Q_{sx} = Q_{xs} = c^{3}s(Q_{11} - Q_{12}) + cs^{3}(Q_{12} - Q_{22}) - 2cs(c^{2} - s^{2})Q_{66} ,$$

$$Q_{sy} = Q_{ys} = cs^{3}(Q_{11} - Q_{12}) + c^{3}s(Q_{12} - Q_{22}) + 2cs(c^{2} - s^{2})Q_{66} ,$$

$$Q_{ss} = c^{2}s^{2}(Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) + (c^{4} + s^{4})Q_{66} .$$
(3.174)

Hier wurden anstelle der Strich-Kennzeichnungen wiederum Buchstaben verwendet. Auch diese Matrix ist voll besetzt im Gegensatz zu der des Eigensystems aus Gleichung (3.157). Wir dürfen schreiben:

$$\{\sigma'\} = [Q']\{\varepsilon'\} \iff \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{yx} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_y \end{bmatrix}.$$
(3.175)

Wie wir noch sehen werden, ist es sowohl zum Vergleich mit den experimentellen Daten aus der Deformationsanalyse als auch mit den vom Softwaretool Lami*Cens*[©] vorhergesagten Kennwerten ratsam, den Drehwinkel auf die globale *y*-Richtung zu beziehen, da diese in den realen Versuchen die Krafteinleitungsrichtung repräsentiert. Die zu den Versuchsdaten angegebenen Winkel beschreiben die Winkelabweichung zwischen x_1 und *y*-Richtung.

3.7.2 Ein symmetrisches Laminat

Wird hingegen ein Gewebe betrachtet, so ist dieses für die mikromechanische Betrachtung gedanklich in zwei um 90° gegeneinander versetzte Einzelschichten zu separieren. Entgegen dem realen Laminat durchdringen sich die gekreuzten Fasern nicht, sondern werden gemäß der CLT aufeinander gestapelt mit senkrecht zueinander angeordneter Faserorientierung der

Einzelschichten. Bei der Stapelfolge der Einzelschichten ist dabei auf Symmetrie zur Mittelebene zu achten.

Ein solches symmetrisches Laminat ist in Bild 3.25 schematisch im Schnitt dargestellt. Für jede Einzelschicht des Laminats sind die Dehnungen ε_k allesamt gleich einem festen Wert ε_0 , aufgrund der Tatsache, dass die Einzelschichten miteinander verklebt sind. ε_0 ist dabei die dem Laminat aufgeprägte Gesamtdehnung. Aufgrund der unterschiedlichen Steifigkeiten im HOOKEschen Gesetz sind dann jedoch die Spannung σ_k zwischen den Einzelschichten unterschiedlich.



Bild 3.25: Schematischer Aufbau eines symmetrischen Laminats, links Dehnungs- und rechts Spannungsverteilung aufgetragen über der Dickenkoordinate z [Bildquelle: nach TSAI (1992)]

3.7.3 Berechnung der globalen Laminatsteifigkeit eines symmetrischen Laminats

Für die Spannungen in jeder Einzelschicht des Laminats dürfen wir gemäß Abschnitt 3.7.2 und Formel (3.175) schreiben:

$$\{\sigma'\}_{k} = [Q']_{k} \{\varepsilon'\}_{k} = [Q']_{k} \{\varepsilon_{0}\}.$$
(3.176)

Dabei bezeichnen $\{\varepsilon_0\}$ die in-plane Dehnungen des Laminats, die auch gleich den Dehnungen in jeder einzelnen Schicht sind aufgrund der Tatsache, dass die einzelnen Einzelschichten kohärent miteinander verbunden werden. Die für ein Laminat gemittelten Spannungen $\{\sigma\}$ sind mit besagten Dehnungen $\{\varepsilon_0\}$ über die globale Laminatsteifigkeit [A] verknüpft:

$$\{\sigma\} = [A] \{\varepsilon_0\}. \tag{3.177}$$

Da sich die Kräfte, die auf die Laminatseitenflächen der Höhe t_{Lam} wirken, auf die Unterflächen mit Höhe t_k additiv aufteilen, gilt:

$$\{\sigma\} = \sum_{k} \frac{t_k}{t_{\text{Lam}}} \{\sigma'\}_k.$$
(3.178)

Durch Verknüpfung der letzten drei Gleichungen stellt man fest, dass gilt:

$$[A] = \sum_{k} \frac{t_{k}}{t_{\text{Lam}}} [Q']_{k} .$$
(3.179)

3.7.3.1 Berechnung der Einzelschichtdicke *t_k*

Häufig werden Laminate aus Geweben oder Gelegen aufgebaut, die unterschiedliche Faserorientierungen, z. T. auch unterschiedliche Fasertypen pro Halbzeug beinhalten. Das führt dazu, dass für jede Faserorientierung und jede Fasersorte eine eigene Einzelschicht definiert werden muss. Die Schichtstärke t_k (vgl. Bild 3.25) lässt sich für jede Einzelschicht k gemäß FUNKE (2005a) nach folgender Gleichung ermitteln:

$$t_{k}[\text{mm}] = \frac{m_{\text{Faser},k}[\text{g/m}^{2}]}{\rho_{\text{Faser},k}[\text{g/cm}^{3}] \cdot \varphi_{k}[\%]} \cdot 10^{-3}$$
(3.180)

mit der jeweiligen Faserdichte $\rho_{\text{Faser},k}$, dem Faservolumenanteil φ_k (Laminatkennwert) und dem Fasergewicht $m_{\text{Faser},k}$, das sich aus Herstellerangaben wie folgt bestimmen lässt:

$$m_{\text{Faser},k}[g/m^2] = \text{Fadenstärke}[\text{tex}] \cdot \text{Fadendichte}[1/\text{cm}] \cdot 10^{-1}.$$
 (3.181)

Die Fadenstärke wird auch als Garnfeinheit bezeichnet und in der Einheit tex angegeben, wobei 1 tex=1 g/km. Für die Fadendichte wird auch der Ausdruck Fadenzahl pro Zentimeter (oder engl.: number of ends per cm) verwendet. Die Fadenstärke und die Fadendichte sind übliche Angaben, die der Produktbeschreibung des Fasergewebes, gesondert für Kett- und Schussfäden, in der Regel zugrunde liegen (vgl. Abschnitt 2.2.6 und 2.2.7 zu Geweben).

Die Formel für die Laminatstärke einer Einzelschicht lässt sich laut FUNKE auf Grundlage des fasereigenen Flächengewichts $m_{\text{Faser},k}$, angegeben in Masse/Fläche [g/m²] für das jeweilige Gewebe oder Gelege, herleiten. Bekanntlich gibt die Dichte eines Körpers dessen Masse pro Volumen an: $\rho = \frac{m [\text{in g}]}{V [\text{in cm}^3]}$ oder hier bezogen auf die Einzelschicht k: $\rho_{\text{Faser},k} = \frac{m [\text{in g}]}{V_k [\text{in cm}^3]}$. Umgestellt nach dem Volumen

$$V_{k} = \frac{m [\text{in g}]}{\rho_{\text{Faser},k}}$$
(3.182)

ergibt sich damit als Schichtstärke t_k , ausgedrückt als Volumen dividiert durch die Fläche:

$$t_k = \frac{V_k}{A_k} = \frac{m [\text{in g}]}{A_k \cdot \rho_{\text{Faser},k}}.$$
(3.183)

Da das Flächengewicht $m_{\text{Faser},k}$ von Geweben oder Gelegen auf die Fläche von 1 m² normiert angegeben wird, folgt

$$t_k = \frac{m_{\text{Faser},k} \, [\text{in g/m}^2]}{\rho_{\text{Faser},k}},\tag{3.184}$$

wenn man davon ausgeht, dass das Fasermaterial (hier: Gewebe) das ganze Volumen der Einzelschicht füllt. Wie wir aber wissen, gibt der Faservolumenanteil das Faservolumen der Einzelschicht an. Der Rest ist Harzvolumen. Also: Bei 50% Faservolumenanteil teilen wir durch 0,5; d.h., die Schichtdicke verdoppelt sich. Bei 40% Faservolumenanteil teilen wir durch 0,4; d.h., die Schichtdicke vergrößert sich um den Faktor 2,5, was den Faktor φ_k in Formel (3.180) motiviert! Am Beispiel eines 400 g/m² Kohlefasergewebes bedeutet dies:

$$\begin{aligned} &\text{für } \varphi_k = 100\%: \quad t_k = \frac{400\text{g}}{\text{m}^2 \cdot 1,78\text{g/cm}^3} = \frac{400}{1,78} \cdot \frac{\text{g} \cdot \text{cm}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{g}}, \\ &\text{für } \varphi_k = 40\%: \quad t_k = \frac{400\text{g}}{\text{m}^2 \cdot 1,78\text{g/cm}^3 \cdot 0,4} = \frac{400}{1,78 \cdot 0,4} \cdot \frac{\text{g} \cdot \text{cm}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{g}}. \end{aligned}$$
(3.185)

Der Rest ist Umrechnung der Einheiten und geschicktes Kürzen.

Über die Schichtdicke werden die Matrizen der Einzelschichten im Verhältnis zur Dicke des Gesamtlaminats gewichtet, so wie es sich aus der Stapelsequenz ergibt.

3.7.4 Ableitung der benötigten Anzahl von Versuchen

Mögliche Ziele sind zum einen die Berechnung von vier Ingenieurkonstanten im Eigensystem einer Einzelschicht, nämlich nach Gleichung (3.161) E_1 , E_2 , G_{12} ($\equiv E_6$) und v_{21} oder zum anderen darauf aufbauend die Rückrechnung auf die sog. Elementarkonstanten von Faser und Harz, wie sie in den Mischungsregeln in den Abschnitten 3.7.1.2 und 3.8.2.1 aufgeführt sind. Diese Ziele werden wir hier nicht erreichen: Es sei daran erinnert, dass in der vorliegenden Arbeit Laminate aus Geweben erstellt werden, wobei ein Gewebe aus zwei miteinander verwobenen Einzelschichten besteht (vgl. Abschnitt 2.2.6). Deren Elementarkonstanten interessieren letztendlich, aber wir werden uns in dieser Arbeit auf die Bestimmung der vier Ingenieurkonstanten von aus jenen Geweben symmetrisch aufgebauten Faserverbundkunststoff-Laminaten beschränken, deren konkreter Aufbau in Abschnitt 2.5 erklärt ist. Das heißt, man bestimmt für verschiedene Belastungsrichtungen $E_y(\alpha)$, $G_{xy}(\alpha)$ (nach CHAWLA (1987) wird vorgeschlagen, nur $G(\alpha)$ zu sagen) und $v_{xy}(\alpha)$, so, wie es in den Abschnitten 2.6 und 2.7, insbesondere 2.7.2, zu den Experimenten erklärt wurde.

Es stellt sich die Frage, wie viele Experimente dazu benötigt werden. Wenn man vier Ingenieurkonstanten bestimmen will, hat man verschiedene Möglichkeiten. Im Prinzip würde es ausreichen, $E_y(\alpha)$ (oder $G(\alpha)$ oder $v_{xy}(\alpha)$) unter vier verschiedenen Winkeln zu messen.²⁸ Genauso gut wäre es möglich, bei einem Winkel $E_y(\alpha)$ und bei drei weiteren unabhängigen Winkeln $v_{xy}(\alpha)$ zu bestimmen, etc. Misst man mehr, so ist das entstehende Gleichungssystem überbestimmt, was aber nicht schadet.

Wir wählen fünf repräsentative, voneinander unabhängige Winkel für jeden Verbundwerkstoffaufbau, so wie in Tabelle 3.1 auf S. 169 dargestellt, um daraus jeweils die drei Elastizitätskenngrößen $E_{v}(\alpha)$, $G(\alpha)$ sowie $v_{xv}(\alpha)$ zu bestimmen.

²⁸ Bei Geweben mit gleichen Kett- und Schussfäden wäre die Untersuchung von $\alpha = 0^{\circ}$ und $\alpha = 90^{\circ}$ nicht erlaubt, da nicht voneinander unabhängig.

3.8 Vergleich Experiment und Vorhersage mit Bewertung

Bevor wir zur Gegenüberstellung von experimentellen und theoretischen Werten kommen, soll erklärt werden, worauf der Vergleich zwischen Experiment und Theorie beruht. Dazu wird zunächst die Software Lami*Cens*[®] vorgestellt, mit der die Steifigkeitsberechnungen durchgeführt werden. Lami*Cens*[®] steht kostenlos zum Download bei R&G (2011-ol) zur Verfügung. Vergleichbare Softwareprodukte wurden bspw. von der TU Dresden entwickelt [AL-FALAM[®] (2009-ol)]. Im Anschluss werden die Berechnungsgrundlagen zu Lami*Cens*[®] kompakt und schrittweise zusammengefasst, um schließlich die theoretisch und experimentell ermittelten Materialeigenschaften gegenüberzustellen und bewerten zu können.

3.8.1 Funktionsweise des Softwaretools LamiCens®

Mit Hilfe von Lami*Cens*[©] werden die Ingenieurkonstanten Elastizitätsmodul $E_y(\alpha)$, Schubmodul $G(\alpha)$ und Querkontraktionszahl $v_{xy}(\alpha)$ zur Beschreibung des Materialverhaltens eines gesamten Faserverbundkunststoff-Laminats beliebigen Aufbaus bestimmt. Lami*Cens*[©] ist eine makro-gestützte Microsoft Excel[®]-Anwendung, die auf der Berechnungsmethode der klassischen Laminattheorie basiert (siehe auch FERBER et al. (2005)). Die klassische Laminattheorie gibt hierbei Mischungsregeln vor, nach denen sich die Materialeigenschaften der Einzelkomponenten des Komposits in bestimmter Form additiv zusammensetzten, wie bereits in Abschnitt 3.7.1.2 beschrieben und im nachfolgenden Abschnitt 3.8.2.1 erneut aufgegriffen. Lami*Cens*[®] verwendet die modifizierten Mischungsregeln nach PUCK. Die Funktionsweise von Lami*Cens*[®] lässt sich anhand der Berechnungsvorschriften der klassischen Laminattheorie (engl. Classical Laminate Theory, kurz: CLT), beschrieben in Abschnitt 3.8.2 bzw. allgemeiner vor kontinuumsmechanischem Hintergrund in Abschnitt 3.7, nachvollziehen (z. B. mit Mathematica).

Lami*Cens*[©] trägt die Werte der Ingenieurkonstanten als Funktion des Winkels in Form von Polardiagrammen auf (siehe Bild 3.26). Bei den von uns geprüften nahezu symmetrischen Laminataufbauten sind die errechneten Werte für v_{xy} und v_{yx} fast identisch, dieses ist eine Konsequenz der Gleichung (3.160), da im vorliegenden Fall eines Gewebes E_y ungefähr gleich E_x ist.

Welche Eingaben sind bei LamiCens[®] erforderlich?

Zur Berechnung der Ingenieurkonstanten mithilfe des Softwaretools Lami*Cens*[©] ist die Kenntnis bestimmter Eingabeparameter erforderlich. Manuell einzugeben sind:

- a) das verwendete Harzsystem,
- b) die Anzahl der Verstärkungsfaserlagen,
- c) die verwendeten Verstärkungsfasern (Gewebe, Gelege bzw. Glas-, Aramid-, Dyneema-, Kohlenstofffaser) pro Lage,
- d) die Stapelfolge des Faserhalbzeugs über die Reihenfolge der Eingabe,
- e) der Orientierungswinkel der jeweiligen Faserhalbzeuglage und

f) der Faservolumenanteil (es wird ein Vorschlag gemacht, zur Verifikation dienten die Ergebnisse aus KOKE (2005), diesen vorgeschlagenen Wert kann man übernehmen oder ändern) für jede Faserhalbzeuglage.

Die Faserhalbzeuge bzw. Harzsysteme können aus einem Auswahlmenü ausgewählt werden. Die Produktdaten (Dichte, tex-Zahl, ...) zu den dort aufgeführten Produkten der Fa. R&G sind in einer Datenbank hinterlegt. Diese Information sind für die hier interessierenden Gewebe und Harze mit den Angaben in Tabelle 2.4 und Tabelle 2.5 identisch.

Wie ist LamiCens[©] anzuwenden?

Lami*Cens*[©] ist am einfachsten zu bedienen und nachzuvollziehen, wenn man einen Laminataufbau beginnend bei einer 0°-Faserlage wählt. Für ein wie im Rahmen dieser Arbeit in den Experimenten verwendetes Gewebe bedeutet dies, dass Fasern unter 0° und 90° anzutreffen sind. Genauer gesagt sind die Kettfäden unter 0° und die Schussfäden unter 90° angeordnet. Die unter diesen Winkeln in Polardiagrammen aufgetragenen Ingenieurkonstanten – wie in Bild 3.26 am Beispiel eines CFK-Laminats für die angegebene Laminatsteifigkeitsmatrix A zu sehen – repräsentieren die quantitative Materialeigenschaft, wenn das Laminat nun unter 0° (der Kettfaserrichtung), unter 90° (der Schussfaserrichtung) oder einem anderen gewählten Winkel belastet wird. So erkennt auch der Laie sofort, dass die E-Moduln in Faserrichtung (hier: 0°) am größten, bei 90° fast (oder genauso) groß, die Werte für Schubmodul und Querkontraktionszahl für diese Winkel jedoch am geringsten ausfallen. Werden in den Polardiagrammen die Werte für einen Winkel von 45° abgelesen, so repräsentieren diese das Materialverhalten mit der geringsten Elastizität *E*, gleichzeitig dem größten Schubmodul und der größten Querkontraktion.



Bild 3.26: Darstellung der richtungsabhängigen Ingenieurkonstanten mit LamiCens®

3.8.2 Berechnung nach klassischer Laminattheorie (CLT)

In den Abschnitten 3.2 bis 3.7 haben wir bereits die Laminattheorie in einen kontinuumsmechanischen Kontext eingebettet und im Detail erläutert. Für die Leser, die diese Details nicht

interessieren, fassen wir die wesentlichen Eigenheiten und Schritte im Rahmen der Laminattheorie vom Standpunkt von Lami $Cens^{\odot}$ aus noch einmal zusammen:

Die Laminattheorie geht davon aus, dass ein Faserverbund-Kunststoff in mehreren Schichten (Laminaten) aufgebaut ist. Ein Gewebe wird für die Berechnung nach Laminattheorie gedanklich in zwei senkrecht zueinander angeordnete Gelege separiert. Mit Hilfe von Abminderungsfaktoren wird dann der Einfluss von der durch Fadenkreuzungen und -umlenkungen bedingten Faserwellung im Gewebe berücksichtigt, vgl. Abschnitt 3.8.2.3. Letztgenannte Abminderungsfaktoren sind derzeit nicht in der Software implementiert.

Um einen schichtweise aufgebauten faserverstärkten Kunststoffverbund zu berechnen, müssen dessen einzelne Schichten rechnerisch zu einem Gesamtlaminat zusammengefügt, die gegenseitigen Wechselwirkungen berechnet und anschließend die Auswirkungen auf jede Einzelschicht geprüft werden. Dabei verlässt einen recht bald die Anschauung und man findet sich in für den Maschinenbau eher abstrakten mathematischen Koordinatensystemen wieder (siehe auch WUTTKE (2008) und WUTTKE (2009), der diese Problematik aufgreift und eine Adaption für die Online-Lehre entwickelt).

3.8.2.1 Mischungsregeln

Eine Homogenisierung innerhalb jeder einzelnen Schicht ist notwendig, um die Fasereigenschaften mit den Matrixeigenschaften zu kombinieren. Dazu werden aus den Elementarkenngrößen von Faser und Matrix die vier Ingenieurkonstanten E_1 , E_2 , G_{12} und v_{21} zur Beschreibung der jeweiligen Einzelschicht bestimmt [MICHAELI et al. (1995)]. Dabei kann man den Werkstoff mit Federn und deren Steifigkeiten vergleichen: In Richtung der Fasern verhalten sich die Steifigkeiten der Fasern und die der Matrix wie eine **Parallelschaltung**. Damit ergibt sich der E-Modul in dieser Richtung, indem man einen linearen Mischungsansatz vornimmt:

$$E_{1} = \varphi E_{F} + (1 - \varphi) E_{H}.$$
(3.186)

Diese Formel ist wie folgt zu verstehen: Wenn der Faservolumenanteil $\varphi = 0$ ist, so liegt lediglich Harz vor, folglich gilt: $E_1 = E_H$. Im anderen Extrem liegt ein Faservolumenanteil von $\varphi = 1$ vor; in diesem Fall gibt es kein Harz, sondern nur Fasern. Hier gilt: $E_1 = E_F$. Beide Fälle stellen im eigentlichen Sinne keinen Verbundwerkstoff dar. Sämtliche Fälle zwischen beiden Extremen sind lineare Mischungen. Entsprechendes gilt auch für die Querkontraktionszahl:

$$v_{21} = \varphi v_F + (1 - \varphi) v_H.$$
(3.187)

Anschaulich kann man sich vorstellen, dass die Belastung quer zu den Fasern wie eine **Hintereinanderschaltung** von Federn zu betrachten ist. Damit ergibt sich die Gesamtsteifigkeit aus der Formel für seriell angeordnete Federn, die eine reziproke Addition der beiden Federkonstanten (hier: E-Moduln für Faser und Matrix) vorsieht:

$$\frac{1}{E_2} = \frac{\varphi}{E_{F2}} + \frac{1-\varphi}{E_H}.$$
(3.188)

Dies lässt sich algebraisch überführen in:

$$E_2 = \frac{E_H E_{F2}}{\varphi E_H + (1 - \varphi) E_{F2}}.$$
(3.189)

Analog erhält man für den Schubmodul:

$$G_{12} = \frac{G_F G_H}{\varphi G_H + (1 - \varphi) G_F}.$$
(3.190)

Grafisch lassen sich die nach Mischungsregeln berechneten Laminatelastizitätskenngrößen wie in Bild 3.27 für z. B. einen typischen GFK, wie er auch im Rahmen dieser Arbeit geprüft wurde, veranschaulichen, dessen Komponenten durch $E_F = E_{F2} = 73 \text{ GPa}$, $G_F = 10 \text{ GPa}$, $E_H = 3,16 \text{ GPa}$ und $G_H = 1,03 \text{ GPa}$ charakterisiert sind (vgl. Tabelle 2.1 und Tabelle 2.5).



Faservolumenanteil φ

Bild 3.27: Mischungsregeln der Einzelschicht angewendet für E_1 , E_2 und G_{12} und aufgetragen als Funktion des Faservolumenanteils [Bildquelle: Verfasserin in Anlehnung an FUNKE (2001) und MICHAELI/WEGENER (1990)]

Der Mischungsregel zufolge steigt der E-Modul in Faserrichtung linear mit dem Faservolumenanteil an. Hingegen verzeichnet der matrixdominierte Schubmodul und E-Modul senkrecht zur Faserachse demnach erst oberhalb von 80 % Faservolumenanteil einen deutlich überproportionalen Anstieg. In der Praxis treten Faservolumenanteile jedoch lediglich im Intervall zwischen 30 und 60 % auf.

Die Mikromechanik beschäftigt sich u. a. mit der Frage, ob diese sehr modellhaften Annahmen zur Abschätzung der Verbundeigenschaften tatsächlich zutreffen und in der Tat findet man gemäß PUCK (1967), (1969) und MICHAELI et al. (1995) heraus, dass in Bezug auf die Eigenschaften in Faserrichtung (E_1 und V_{21}) gute Übereinstimmung gegeben ist, jedoch hier für E_2 und G_{12} erste Grenzen der Genauigkeit auftreten. Eine präzisere Beschreibung in Be-

159
zug auf empirische Ergebnisse für den Quer- und den Schubmodul liefern gemäß PUCK (1967) und (1969) die folgenden Abschätzungsformeln:

$$E_{2} = \frac{E_{H}^{*}(1+0.85\varphi^{2})}{\varphi E_{H}^{*}/E_{F} + (1-\varphi)^{1.25}}$$
(für isotrope Fasern wie z.B. aus Glas)
mit $E_{H}^{*} = \frac{E_{H}}{(1-v_{H}^{2})}, \quad G_{12} = \frac{G_{H}(1+0.6\varphi^{0.5})}{\varphi G_{H}/G_{F} + (1-\varphi)^{1.25}},$ (3.191)

oder die Formeln (3.166) nach CHAMIS (1969), die "*auf halbempirischen Modellen, die durch Messungen ,kalibriert' worden sind*", basieren [MICHAELI/WEGENER (1990)]. Die Untersuchungen umfassen jedoch ausschließlich (isotrope) Glasfasern, bei denen die gefundenen modifizierten Mischungsregeln recht gut zutreffen. Bei den gefundenen Beziehungen wird implizit Isotropie des Faser- und auch des Matrixwerkstoffs vorausgesetzt, die bei der inneren Beschaffenheit von Kohlenstoff- oder auch Aramidfasern nicht gegeben ist [WURTINGER (1977)], sodass deren Vorhersagegenauigkeit angezweifelt werden muss. Beachte, dass nach SCHÜRMANN (2007) in die Gleichung (3.191)₁ für anisotrope Verstärkungsfasern wie z. B. solche aus Kohlenstoff oder Aramid die Faserquermoduln im Nenner einzusetzen sind, was einleuchtend erscheint, da die Laminatkenngröße quer zur Faserrichtung vermutlich eher durch die Fasersteifigkeit in selbiger Richtung beeinflusst wird, und daher gilt:

$$E_{2} = \frac{E_{H}^{*}(1+0.85\varphi^{2})}{\varphi E_{H}^{*}/E_{F2} + (1-\varphi)^{1.25}}.$$
(3.192)

Diese Notwendigkeit lässt sich wie folgt belegen. Würde man für einen kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff isotropes Materialverhalten der Faser unterstellen, so, wie das in den Mischungsformeln nach PUCK (1967) angenommen wird, dann errechnet sich für ein unidirektionales **CFK-Laminat** den Elementarkenndaten $E_F = 210000 \text{ N/mm^2}$ mit und $E_{H} = 3800 \text{ N/mm}^2$ der Elastizitätsmodul E_1 in Faserrichtung und E_2 in Faserquerrichtung in Abhängigkeit vom Faservolumenanteil wie in Bild 3.28 links dargestellt. Aus der Gegenüberstellung mit experimentell ermittelten Werten, die als schwarz umrandete Punkte eingetragen sind, wird deutlich, dass sich für die Faserrichtung eine recht gute Übereinstimmung des Elastizitätsmoduls E_1 (schwarze Kurve) ergibt. Quer zur Faserrichtung liegen hingegen sämtliche experimentell bestimmten Daten unterhalb der gem. modifizierter Mischungsformel (3.191)1 nach PUCK prognostizierten Kurve für E_2 . Daraus folgert WURTINGER (1977), dass das Werkstoffverhalten der C-Faser anisotrop und der Faserquermodul niedriger sein muss als der längs der Faserachse.

Nun soll der Bildausschnitt zu E_2 etwas genauer betrachtet werden, vgl. dazu Bild 3.28 rechts, in dem wiederum die experimentellen Werte als schwarz umrandete Punkte und die modifizierte Mischungsformel nach PUCK (1967), (1969) als schwarze Kurve abgetragen wurden. Zieht man nun den Vergleich mit der ursprünglichen Mischungsregel aus Formel (3.189), dargestellt als hellblaue Kurve, so unterschätzt deren Prognose die experimentellen Elastizitätsmoduln E_2 . Um dem anisotropen Aufbau von Fasern wie Kohlenstoff (oder auch Aramid) entsprechend gerecht zu werden, setzt man nun in besagte Mischungsformel (3.192) nach PUCK/SCHÜRMANN [SCHÜRMANN (2007)] für E_2 anstelle des Faser-E-Moduls in Faserrichtung diesen in Faserquerrichtung $E_{F2} = 15000$ N/mm² und $\nu = 0,1$ [FUNKE (2001),

(2005c)] ein. Es ergibt sich die mittelblaue Kurve, die wesentlich besser mit den experimentell bestimmten Werten übereinstimmt. Ein Vergleich dieser und weiterer Mischungsregel-Ansätze kann in ANDERS (2008) nachgelesen werden. Dezidiert hergeleitet werden die Mischungsregeln bspw. in SCHÜRMANN (2007).



Bild 3.28: Links: Theoretisch nach Puck-Mischungsformeln und experimentell ermittelte E-Moduln faserparallel und quer dazu für UD-CFK-Laminate in Abhängigkeit vom Faservolumenanteil [Bildquelle: WURTINGER (1977)]

rechts: Vergleichsrechnung Mischungsregeln für E-Modul quer zur Faserrichtung E_2 : ursprünglich, nach PUCK (1967) bzw. (1969) und modifiziert [SCHÜRMANN (2007)] ggü. experimentellen Daten von CFK, in Anlehnung an WURTINGER (1977)

FLEMMING/ROTH (2003) bemängeln, dass "sich die Mischungsformeln für den Modul senkrecht zur Faserrichtung und beim Schubmodul (nicht sonderlich bewährt haben), was sicherlich auch damit zusammenhängt, dass man bei anisotropen Fasern wie z. B. der Kohlenstoff-, Aramid- und Polyethylenfaser die E- und G-Moduli senkrecht zur Faser nicht genau kennt." Da die experimentelle Bestimmung der Elementarkenndaten für E_{F2} im Falle von Kohlenstoff- und Aramidfaser nicht so einfach ist, empfiehlt WURTINGER (1977), um sicherzugehen, die Verbundmaterialkennwerte direkt anhand von getesteten Kompositen zu bestimmen.

3.8.2.2 Zehn Schritte zur Berechnung der Spannungen in den Einzelschichten

In Anlehnung an MICHAELI et al. (1995) führt man bei Anwendung der klassischen Laminattheorie zehn Berechnungsschritte durch, wobei die **ersten vier** das Vorgehen bis hin zur Bestimmung der elastischen Kenngrößen des Gesamtlaminats beschreiben. Es wird angenommen, dass die unidirektionalen Einzelschichten a) orthotrop sind und b) eine symmetri-

sche Stapelfolge um die Mittelebene aufweisen. Mithin ist es gerechtfertigt, für eine Einzelschicht einen ebenen Spannungszustand anzunehmen und somit werden Spannungen außerhalb der 1-2-Ebene als nicht vorhanden betrachtet. Weiterhin nehmen wir nur kleine Verformungen an, was ebenfalls idealisiert ist. Experimente zeigen nämlich, dass bei einsetzender Plastizität durchaus starke Verformungen out-of-plane auftreten. Rechnerisch und praktisch kann man diese allerdings ignorieren, wenn man von einem vollkommen symmetrischen Werkstoff ausgeht. In der Praxis jedoch ist diese Annahme aufgrund der komplexen Struktur von Geweben, Gelegen, Geflechten, etc. problematisch.

3.8.2.2.1 1. Schritt: Bestimmung der Einzelschicht-Steifigkeiten

Zwischen den Spannungen und Dehnungen der Einzelschichten gilt, wie wir im Detail bereits in Abschnitt 3.7 erläutern, der grundlegende Zusammenhang:

$$\{\sigma\} = [Q] \cdot \{\varepsilon\},\$$

$$\{\varepsilon\} = [S] \cdot \{\sigma\}$$
(3.193)

mit $[Q] = [S]^{-1}$. Es gibt 6 mögliche Dehnungen (ε_{11} , ε_{22} , ε_{33} , ε_{23} , ε_{31} und ε_{12}). Da hier der ebene Spannungszustand betrachtet wird, sind die Dehnungen in der 3-Richtung Null. Konstruiert man nun Matrizen derart, dass Null-Spalten und Null-Zeilen wegfallen, erhält man (vgl. Gleichung (3.154)/(3.155)):

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ 2\varepsilon_{12} = \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} = \tau_{12} \end{bmatrix}.$$
 (3.194)

Es ist [S] die Nachgiebigkeitsmatrix, die Inverse von [Q], der Steifigkeitsmatrix. Die Elemente, die in dieser Nachgiebigkeitsmatrix angeordnet sind, haben somit eine festgeschriebene Bedeutung. Z. B. gibt das Element S_{11} an, wie eine Spannung in 1-Richtung in eine Dehnung in 1-Richtung überführt wird, d. h. $\varepsilon_{11}=S_{11}\cdot\sigma_{11}$. Offensichtlich kann man S_{11} also in Form des E-Moduls ausdrücken, sie ist dessen Inverse: $S_{11}=\frac{1}{E_1}$. Analog gilt für die 2-Richtung: $S_{22}=\frac{1}{E_2}$. Betrachtet man die Schubspannung τ_{12} bzw. σ_{12} , so gilt auch hier: $S_{66}=\frac{1}{E_6}$, wobei E_6 der Schubmodul G_{12} ist. Somit verbleiben die beiden Richtungen, in denen Spannungen senkrecht zu ihrer Wirkrichtung Dehnungen verursachen. Hier kommt die Querkontraktion ins Spiel: $S_{12}=-\frac{v_{12}}{E_2}$ und $S_{21}=-\frac{v_{21}}{E_1}$:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ 2\varepsilon_{12} = \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{E_6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} = \tau_{12} \end{bmatrix}.$$
 (3.195)

Anschließend wird diese Matrix invertiert. Man erhält:

$$\begin{bmatrix} Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - v_{12}v_{21}} & \frac{v_{12}E_1}{1 - v_{12}v_{21}} & 0 \\ \frac{v_{21}E_2}{1 - v_{12}v_{21}} & \frac{E_2}{1 - v_{12}v_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix}.$$
 (3.196)

Von den hierin auftretenden fünf Ingenieurkonstanten sind vier voneinander unabhängig. Es gilt:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{v_{21}}{v_{12}} \implies v_{12} = \frac{E_2}{E_1} v_{21} .$$
(3.197)

Man erhält durch Einsetzen:

$$[Q] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - v_{21}^2 \frac{E_2}{E_1}} & \frac{v_{21}E_2}{1 - v_{21}^2 \frac{E_2}{E_1}} & 0 \\ \frac{v_{21}E_2}{1 - v_{21}^2 \frac{E_2}{E_1}} & \frac{E_2}{1 - v_{21}^2 \frac{E_2}{E_1}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix}.$$
 (3.198)

Diese Matrix repräsentiert die Steifigkeitsmatrix einer unidirektionalen Einzelschicht. Wird sie mit den angreifenden Spannungen multipliziert, erhält man Dehnungen. Zu würdigen ist bei dieser Matrix insbesondere die geringe Zahl an Unbekannten: Es müssen lediglich vier Ingenieurkonstanten– experimentell oder nach dem in 3.8.2.1 beschriebenem Muster – ermittelt und anschließend eingesetzt werden.

Eine Spezialisierung erfährt diese mikromechanische Betrachtung, wenn Verstärkungsfasern in Form von Geweben in den Verbund eingebracht werden. Man spricht in diesem Zusammenhang von der "*Mikromechanik 2D-textilverstärkter Einzelschichten*". Ein Gewebelaminat wird mithilfe dieses Konzepts zunächst gedanklich durch zwei unidirektionale "Sublaminate" ersetzt. Nachdem die Eigenschaften der UD-Einzelschichten berechnet wurden, soll die Faserwellung (Ondulation) berücksichtigt werden. [MICHAELI et al. (1995)] Das geschieht z. B. durch einen Korrekturfaktor κ , den sog. Ondulationsfaktor. In der Literatur (z. B. VDI-RICHTLINIE 2014, BLATT 2 (1993)) findet man für diesen Abminderungsfaktor vorgeschlagene Werte in Abhängigkeit der jeweiligen Webart (vgl. Abschnitt 2.2.6) zwischen $\kappa_{Leinwand} \approx 0,9$ und $\kappa_{Adas} \approx 0,95$, siehe auch Abschnitt 3.8.2.3.

3.8.2.2.2 2. Schritt: Transformation der Einzelschicht-Steifigkeiten

Die Ergebnisse aus dem ersten Schritt helfen, die Einzelschicht zu verstehen: Wie wirken Spannungen und welche Dehnungen rufen sie hervor? Außerdem wurde beschrieben, wie Ingenieurkonstanten und richtungsspezifische Steifigkeiten übersichtlich in einer Matrix angeordnet werden können. In dem nun folgenden 2. Schritt wird die Vorbereitung für eine

(3.202)

ganzheitliche Betrachtung des Laminats getroffen. Dazu müssen für sämtliche Schichten die Steifigkeitsmatrizen [Q] transformiert werden, indem sie anschaulich um einen Winkel α_k gedreht werden. Die Transformation einer 3×3-Matrix erfolgt nach folgendem Muster:

$$[Q'] = [T]_k [Q] [T]_k^T 29.$$
(3.199)

Dabei ist [Q] die Matrix, die sich auf das 1-2-Koordinatensystem der Einzelschicht k bezieht, [Q'] dagegen bezieht sich bereits auf das x - y-Koordinatensystem des Verbundes. $[T]_k$ ist eine Rotationsmatrix, die die zugehörige Transformation von [Q] vornimmt:

$$[T]_{k} = \begin{bmatrix} c^{2} & s^{2} & 2cs \\ s^{2} & c^{2} & -2cs \\ -cs & cs & c^{2} - s^{2} \end{bmatrix},$$
 (3.200)

wobei $c = cos(\alpha_k)$ und $s = sin(\alpha_k)$. Die positive Drehrichtung geht aus Bild 3.24 (unten rechts) hervor. Wir multiplizieren mit dieser Matrix von links und anschließend mit ihrer Transponierten von rechts.

3.8.2.2.3 3. Schritt: Berechnung der Laminatsteifigkeitsmatrix

Um die Gesamtsteifigkeitsmatrix für das Laminat aufzustellen, wird anschaulich ein gewichteter arithmetischer Mittelwert berechnet, bei dem die Dicke jeder Schicht ihr Gewicht darstellt. Man erhält eine "homogenisierte" Laminatsteifigkeit und bezeichnet diese mit [A]:

$$[A] = \sum_{k} \frac{t_{k}}{t_{\text{Lam}}} [Q']_{k}, \qquad (3.201)$$

wobei

3.8.2.2.4 4. Schritt: Invertieren der Laminatsteifigkeitsmatrix zur -nachgiebigkeitsmatrix

Es wird nun die Gesamtsteifigkeitsmatrix invertiert, man erhält die Gesamtnachgiebigkeitsmatrix:

 $t_{\text{Lam}} = \sum_{k} t_{k}$.

$$[a] = [A]^{-1}. (3.203)$$

Aus [a] lassen sich folgende konkrete Größen ableiten:

$$E_{y_{\text{Lam}}} = \frac{1}{a_{11}}, E_{x_{\text{Lam}}} = \frac{1}{a_{22}}, G_{xy_{\text{Lam}}} = \frac{1}{a_{33}},$$

$$V_{xy_{\text{Lam}}} = \frac{a_{21}}{a_{11}}, V_{yx_{\text{Lam}}} = \frac{a_{12}}{a_{22}},$$
 (bezogen auf experimentelles Labor-KS). (3.204)

Mit Hilfe der erwähnten Transformationsmatrizen kann man daraus analog zum 1. und 2. Schritt die Werkstoffkennwerte in beliebigen Richtungen bestimmen. Dieses wird hier jedoch

²⁹ Wie ein Vergleich zwischen TSAI (1992) und MICHAELI et al. (1995) zeigt, wird bei MICHAELI et al. (1995) der Laminatwinkel α_k gegenläufig gezählt. In Gleichung (3.173) unterstellen wir die Definition wie in der angloamerikanischen Literatur üblich.

nicht weiter ausgeführt, ist jedoch in Lami*Cens*[©] bzw. dem virtuellen Labor von E-MechLAB (vgl. Abschnitt 4.5) implementiert und resultiert in dazugehörigen Polardiagrammen.

In den nun folgenden Abschnitten werden die weiteren Schritte zur Laminattheorie angerissen, die zwar zum Vergleich mit den experimentellen Ingenieurkonstanten nicht erforderlich sind, jedoch im virtuellen Labor zur Faserverbundmechanik behandelt werden.

3.8.2.2.5 5. Schritt: Laminatverzerrungen

Verzerrungen im Laminat entstehen aus verschiedenen Gründen. Davon werden in der klassischen Laminattheorie nach MICHAELI et al. (1995) die folgenden drei behandelt: mechanische Spannungen { ε_{Lam} }^{mech 30}, Temperaturänderung { ε_{Lam} }th und Quellung { ε_{Lam} }^{qu}. Man erhält:

$$\{\mathcal{E}_{Lam}\} = \{\mathcal{E}_{Lam}\}^{mech} + \{\mathcal{E}_{Lam}\}^{th} + \{\mathcal{E}_{Lam}\}^{qu}.$$
(3.205)

Laminatverzerrungen aufgrund mechanischer Lasten

Für den Fall der mechanischen Spannungen gilt:

$$\{\mathcal{E}_{\text{Lam}}\}^{\text{mech}} = [a]\{\sigma\}_{\text{Lam}}^{\text{mech}}, \qquad (3.206)$$

wobei:

$$\left\{ \varepsilon_{\text{Lam}} \right\}^{\text{mech}} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \text{ und } \left\{ \sigma \right\}_{\text{Lam}}^{\text{mech}} = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}.$$
(3.207)

Die Belastung wird häufig in Form von Linienkräften angegeben. Darunter versteht man eine Kraft, die sich über eine bestimmte Breite über das Laminat verteilt. Dies setzt lediglich voraus, dass die Laminatbreite zu Beginn bekannt ist; die Stärke (Dicke t_{Lam}) des Materials wird erst bei Auslegung berücksichtigt. Wenn die Belastung durch N gegeben ist mit

$$\{N\} = \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix}$$
(3.208)

erhält man die Spannungen durch

$$\{\sigma\}_{\text{Lam}}^{\text{mech}} = \frac{1}{t_{\text{Lam}}} \{N\}.$$
(3.209)

Laminatverzerrungen aufgrund thermischer Belastung

Wie alle anderen Stoffe dehnen bzw. stauchen sich auch Faserverbund-Kunststoffe, wenn sie erwärmt bzw. gekühlt werden. Aufgrund der Anisotropie ist die relative Ausdehnung allerdings nicht in jeder Richtung gleich. Entscheidend ist bei thermischen Dehnungen der relative

Q

³⁰ Die mechanisch induzierten Dehnungen werden an anderer Stelle im Skript in Abschnitt 3.2.2 als elastischer Dehnungsanteil bezeichnet. Hier wird die Sprechweise nach MICHAELI et al. (1995) verfolgt.

Temperaturunterschied zwischen dem spannungsfreien und dem aktuellen Zustand. Die Temperaturdifferenz wird ΔT genannt. Es gilt:

$$\{\mathcal{E}_{\text{Lam}}\}^{\text{th}} = \{\alpha_{\text{Lam}}\} \cdot \Delta T , \qquad (3.210)$$

wobei $\{\alpha_{Lam}\}$ ein Vektor ist, der die richtungsabhängigen Temperaturausdehnungskoeffizienten beinhaltet. Er wird wie folgt berechnet:

$$\{\alpha_{\text{Lam}}\} = [a] \cdot \sum_{k} \frac{t_{k}}{t_{\text{Lam}}} [T]_{k}^{-1} \cdot [Q] \cdot \{\alpha_{\text{ES}}\}_{k}.$$

$$(3.211)$$

Ohne diese Gleichung im Detail zu diskutieren, erkennt man, dass ähnlich wie bei den Steifigkeitsmatrizen der einzelnen Schichten nun die thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Einzelschichten betrachtet werden, anschließend über die Dicke gewichtet addiert und dann auf die Inverse der Laminatsteifigkeitsmatrix [a] bezogen werden. $[T]^{-1}$ ist die Inverse der in Gleichung (3.200) eingeführten Matrix. Der zweite Faktor in (3.210) ergibt sich aus:

$$\Delta T = T - T_{\rm spannungsfrei} \,. \tag{3.212}$$

Laminatverzerrungen aufgrund von Feuchtigkeitsaufnahme oder -abgabe

Feuchtigkeit im Laminat führt zu weiteren Dehnungen. Genau wie bei den Temperaturen ist auch hier eine Differenz, nämlich die der Feuchtigkeit ΔM , entscheidend:

$$\left\{ \mathcal{E}_{\text{Lam}} \right\}^{q_{\text{u}}} = \left\{ \beta_{\text{Lam}} \right\} \cdot \Delta M , \qquad (3.213)$$

mit

$$\{\beta_{\text{Lam}}\} = [a] \cdot \sum_{k} \frac{t_{k}}{t_{\text{Lam}}} [T]_{k}^{-1} \cdot [Q] \cdot \{\beta_{\text{ES}}\}_{k}$$
(3.214)

und

$$\Delta M = M - M_{\rm spannungsfrei}, \qquad (3.215)$$

wobei M, der Feuchtigkeitsgehalt in %, wie folgt definiert ist:

$$M = \frac{\text{Gewicht des eindiffund ierten Mediums}}{\text{Gewicht des trockenen FVK}} \cdot 100 \% .$$
(3.216)

3.8.2.2.6 6. Schritt: Berechnung der Gesamtverzerrungen des Laminats

Nun werden die in Schritt 5 berechneten Dehnungen addiert:

$$\{\varepsilon_{\text{Lam}}\} = \{\varepsilon_{\text{Lam}}\}^{\text{mech}} + \{\varepsilon_{\text{Lam}}\}^{\text{th}} + \{\varepsilon_{\text{Lam}}\}^{\text{qu}}.$$
(3.217)

3.8.2.2.7 7. Schritt: Berechnung der Einzelschichtspannungen

Nachdem die Dehnungen für das Gesamtlaminat berechnet worden sind, müssen deren Auswirkungen auf die einzelnen Schichten zurückgerechnet werden. Erneut können die drei unterschiedlichen Ursachen der Dehnungen zunächst getrennt voneinander betrachtet werden.

Mechanische Dehnung

Für die mechanischen Dehnungen gilt:

$$\left\{ \varepsilon_{\text{sp, ES}} \right\}_{\text{LamKS, }k}^{\text{Imech}} = \left\{ \varepsilon_{\text{Lam}} \right\}^{\text{mech}}.$$
(3.218)

Die Abkürzung "sp" steht dabei für spannungswirksam und "KS" für Koordinatensystem. Dies kann entweder das *x-y*-Koordinatensystem des Laminats sein (LamKS) oder das 1-2-Koordinatensystem der jeweiligen Einzelschicht (ESKS).

Thermische Dehnung

Bei der thermischen Dehnung wird die Differenz zwischen dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Laminats und dem der Einzelschicht betrachtet. Sind beide gleich, so treten keine effektiv-spannungswirksamen Dehnungen auf. Die Differenz wird mit der Temperaturdifferenz multipliziert. Somit tritt effektiv der thermisch-spannungsfreie Zustand genau dann ein, wenn entweder der Temperaturausdehnungskoeffizient des Laminats dem der Einzelschicht entspricht oder die aktuell vorliegende Temperatur gleich der Temperatur des spannungsfreien Zustands ist:

$$\left\{ \mathcal{E}_{\text{sp, ES}} \right\}_{\text{LamKS, }k}^{\text{th}} = \left(\left\{ \alpha_{\text{Lam}} \right\} - \left\{ \alpha_{\text{ES}} \right\}_{k} \right)_{\text{LamKS, }k} \cdot \Delta T .$$
(3.219)

Quelldehnung

Für Quell-Dehnungen gilt dieselbe Überlegung wie für thermische Dehnungen. Ceteres paribus gilt: Je höher die Differenz der Quelldehnungskoeffizienten von Laminat und Einzelschicht, desto höher sind die spannungswirksamen Dehnungen. Außerdem gilt ebenfalls ceteres paribus: Je höher die relative Feuchtigkeitsgehaltsdifferenz, desto höher sind die spannungswirksamen Dehnungen:

$$\left\{ \mathcal{E}_{\text{sp, ES}} \right\}_{\text{LamKS, }k}^{\text{qu}} = \left(\left\{ \beta_{\text{Lam}} \right\} - \left\{ \beta_{\text{ES}} \right\}_{k} \right)_{\text{LamKS, }k} \cdot \Delta M .$$
(3.220)

3.8.2.2.8 8. Schritt: Summe der spannungswirksamen Verzerrungen

Auch bei der Einzelschicht müssen nun die entsprechenden spannungswirksamen Dehnungen addiert werden. Dabei beziehen sich die Koordinaten wie zuvor auf das *x-y*-Koordinaten-system, also das des Laminats:

$$\left\{ \mathcal{E}_{\text{sp, ES}} \right\}_{\text{LamKS, }k} = \left\{ \mathcal{E}_{\text{sp, ES}} \right\}_{\text{LamKS, }k}^{\text{mech}} + \left\{ \mathcal{E}_{\text{sp, ES}} \right\}_{\text{LamKS, }k}^{\text{th}} + \left\{ \mathcal{E}_{\text{sp, ES}} \right\}_{\text{LamKS, }k}^{\text{qu}}.$$
(3.221)

3.8.2.2.9 9. Schritt: Rücktransformation der spannungsfreien Verzerrungen in das jeweilige Einzelschicht-Koordinatensystem

Um später Spannungen in den Einzelschichten berechnen zu können, muss zunächst eine Rücktransformation in das jeweilige 1-2-Koordinatensystem der Einzelschicht vorgenommen werden. Dazu ist der Dehnungsvektor von links mit der Transponierten der Transformationsmatrix zu multiplizieren:

$$\left\{ \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{sp, ES}} \right\}_{\text{ESKS}, k} = \left[T^T \right]_k^{-1} \cdot \left\{ \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{sp, ES}} \right\}_{\text{LamKS}, k}, \qquad (3.222)$$

wobei $[T]_k$ wie gehabt die Transformationsmatrix darstellt.

3.8.2.2.10 10. Schritt: Berechnung der Spannungen in den Einzelschichten

Im letzten Schritt werden die Spannungen in den Einzelschichten berechnet:

$$\{\boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{ES}}\}_{k} = [\mathcal{Q}] \{\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{sp, ES}}\}_{\mathrm{ESKS}, k} .$$
(3.223)

Diese sind letztendlich für die Auslegung entscheidend.

3.8.2.3 Korrekturfaktoren

Reale Laminate bestehen nicht zwingend aus unidirektionalen Einzelschichten. Vielmehr können (u. U. multidirektionale, durch Wirkfäden zusammengehaltene) Gelege, Gewebe oder Geflechte etc. verwendet werden (vgl. auch Abschnitt 2.2.6). Um Gewebe und Geflechte zu berechnen, wird vorgeschlagen, die klassische Laminattheorie zu verwenden und für die Ingenieurkonstanten einen sog. Ondulationsfaktor κ anzusetzen. Dieser beträgt ca. 90 % bis 95 % [VDI-RICHTLINIE 2014 (1993)] und sorgt dafür, dass der berechnete Steifigkeitswert kleiner wird, sich somit der Realität anpasst. Dies ist notwendig, da bei Geweben und Geflechten die Fasern nicht gestreckt, sondern in gewölbter Form vorliegen. Dieser Ondulationsfaktor stammt aus empirischen Untersuchungen.

In der Industrie bzw. aus der Praxis heraus wird behauptet, dass bei hoher Flottierung (vgl. Abschnitt 2.2.6) die Ondulation kaum noch einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften (z. B. eine Verringerung des E-Moduls) hat. Die Umlenkungen der Fasern/Umschlingungen sind dann zwar auch noch vorhanden, aber nicht so gravierend. Hohe Flottierung beginnt den Aussagen zufolge bei Köperbindung. Hier seien Abschlagsfaktoren nicht erforderlich. Bei geringer Flottierung, die z. B. bei Leinwandbindung vorliegt, sei der Einfluss der Ondulation hingegen nicht zu vernachlässigen. Man stellt dort eine merkliche Verringerung des E-Moduls fest.

BEYER/SCHAAB (1969) sprechen in dem Zusammenhang von einem weiter gefassten Abminderungsfaktor α_z für Gewebe und Matten, in dem über die Bindungsart hinaus sowohl der Oberflächenzustand, die Fadendrehung etc. Berücksichtigung finden sollen. Für eine Glasfaserverstärkung in Form eines Köpergewebes K 1800 geben sie diesen Abminderungsfaktor mit 0,8 an.

3.8.2.4 Festigkeitskriterien

Die zehn Schritte der klassischen Laminattheorie zeigen, wie man die effektiven Spannungen in allen Einzelschichten des Laminats bestimmen kann. Diese Ergebnisse müssen in einem weiteren Schritt dazu verwendet werden, zu entscheiden, ob das Bauteil versagt oder nicht. Dazu können diverse Festigkeitskriterien verwendet werden, die dazu dienen, maximal zulässige Werte mit den realen Bauteilbelastungen zu vergleichen. Besonders interessante Fälle sind die Überlagerungen in mehreren Achsen. Diese Festigkeitskriterien sind allerdings nicht Bestandteil dieser Arbeit, da sie eng mit Versagensfällen verbunden sind. Je nach erwartetem Versagen muss eine andere Hypothese verwendet werden. Aufgrund der Richtungsabhängigkeit der elastischen Werkstoffkennwerte benötigen wir für eine perfekte Überprüfung eigentlich unendlich viele diskrete Werte aus dem Experiment, die das Materialverhalten unter jedem möglichen Winkel, unter dem das Laminat belastet werden kann, repräsentieren, um diese den prognostizierten Werten gegenüberzustellen. Für die dieser Arbeit zu Grunde liegenden Untersuchungen wurden pro Fasermaterial und Stapelfolge fünf repräsentative Winkel ausgewählt. In einer Reihe von Experimenten wurden die in Tabelle 3.1 aufgelisteten und mit \checkmark gekennzeichneten Fälle untersucht. Dabei bezeichnen die angegebenen Laminatorientierungswinkel α_{Kett} die Lage des Kettfadens gegenüber der Belastungsrichtung (siehe Abschnitt 2.5.2).

Verstärkungsfaser im Kunststoff	0 °	5 °	15°	30 °	45 °	90 °	
Glasfaser (GFK)	\checkmark	×	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	✓: untersuchte
Kohlenstofffaser (CFK)	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	×	Faserorientierung
Aramidfaser (AFK)	\checkmark	×	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	× nicht untersuchte
Basaltfaser (BFK)	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	×	Konstellation

Tabelle 3.1: Versuchsprogramm

Wegen Redundanz der Information kann sowohl bei CFK wie auch BFK auf die Untersuchung der 90°-Orientierung verzichtet werden, da hier ein symmetrisches Gewebe (Kett- und Schussfäden sind gleich) vorliegt. Um auch hier insgesamt fünf Winkel zu untersuchen, wurden zusätzlich Proben unter 5° Faserorientierung der Kettfäden relativ zur Lasteinleitungsrichtung angefertigt.

3.8.3.1 Elastische Materialkenngrößen in Polardiagrammen aufgetragen

Eine erste qualitative Übersicht über die Güte der Übereinstimmung von experimentell ermittelten und prognostizierten Kennzahlen für glasfaserverstärkte Kunststofflaminate liefern die Polardiagramme der Ingenieurkonstanten E_y , G und v_{xy} in Bild 3.29 bis Bild 3.31. Darin sind einerseits die mit Lami*Cens*[©] für einen durchschnittlichen Faservolumenanteil von 40 % berechneten Werte aufgetragen. Andererseits finden sich daneben Datenpunkte für die gemittelten experimentellen Kennwerte mehrerer Zugproben aus den Vorversuchen unter Angabe des jeweiligen Faservolumenanteils des Probelaminats, aus dem sie gefertigt wurden. Die Zugproben bestehen aus 6 Lagen 163 g/m²-Glasfasergewebe in Epoxidharzmatrix L1100 / 5194/H. Im Experiment variieren die Faservolumenanteile je Probelaminat leicht. Eine exakte Übereinstimmung sämtlicher Faservolumenanteile ist fertigungstechnisch im Handlaminierverfahren nicht einstellbar. Als Fazit kann festgehalten werden, dass sich trotz der unterschiedlichen Faservolumenanteile der experimentellen Proben gegenüber den konstant gehal-

Q



tenen Faservolumenanteilen in der Lami*Cens*[©]-Berechnung in Bild 3.29 bis Bild 3.31³¹ allgemein eine gute Übereinstimmung der aufgetragenen Ingenieurkonstanten zeigt.

Bild 3.29: Vergleich Prognose E_y gemäß klassischer Laminattheorie mit experimentellen Werten für ausgewählte Winkel im Falle von GFK



• 2 virtuelle Extensometer

• statistische Bereichsauswertung



³¹ Die in den Bildern auftretenden Begriffe "virtuelle Extensometer" und "statistische Bereichsauswertung" sind in Abschnitt 2.6.3.5 erläutert. Man beachte außerdem die Korrelation zwischen den Farben der Wertepunkte im Polardiagramm und den Farben der Zahlenwerte (Achtung: der Punkt im Zahlenwert bezeichnet Tausender!).



Faserorientierung	Querkontraktions-		
ggü. Belastungs-	zahl		
richtung	(Faservolumenanteil)		
0°	0,107	0,13	
(Laminat 20)	(40,98%)	(40,98%)	
15°	0,344	0,377	
(Laminate 25, 26)	(40,83%)	(42,92%)	
30°	0,579	0,584	
(Laminate 23, 24)	(40,93%)	(40,51%)	
45°	0,635	0,640	
(Laminat 18, 21)	(40,33%)	(40,39%)	
90°	0,097	0,095	
(Laminat 19, 22)	(39,88%)	(41,41%)	

Bild 3.31: Vergleich Prognose V_{xy} gemäß klassischer Laminattheorie mit experimentellen Werten für ausgewählte Winkel im Falle von GFK

Speziell beim **E-Modul** E_{y} ist anzumerken, dass die für einen Laminatwinkel von 0° bzw. 90° prognostizierten Werte augenscheinlich am stärksten von den experimentellen Daten abweichen, und zwar sind die gemessenen Steifigkeiten geringer als die von LamiCens[©] prognostizierten. Wie man durch Einsetzen der gemessenen Faservolumenanteile nachprüfen kann, lässt sich der Unterschied nicht aus der Abweichung derselben erklären. Mögliche weitere Gründe für den Unterschied könnten ein Einfluss durch die Ondulation im Gewebe (Faserwellung), eine fehlerhafte Einspannung der Probe (Versatz und Verdrillung) oder das verwendete Auswerteverfahren sein. Man beachte nämlich, dass uns die Methode "statistische Bereichsauswertung" (siehe Abschnitt 2.6.3.6) näher an den von LamiCens[©] prognostizierten Wert heranführt (relativ gute Übereinstimmung der Kennwerte bei handlaminierten glasfaserverstärkten Kunststoffen mit der Vorhersage von LamiCens[©] (CLT): Abweichungen kleiner 5-10 % bei Dehnungsfeldstatistik, 10-17 % bei virtuellem Extensometer). Schließlich kann ein weiterer Grund auch die nicht präzise Kenntnis der Elementarkenndaten sein. Beim Schubmodul erkennt man größere Abweichungen sowohl bei 0° als auch bei 90°, aber auch bei 30° und 45° mit derselben Begründung wie bei E_{y} . Für die **Querdehnzahl** schließlich ist allgemein eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Theorie gegeben. Offenbar ist der Wert dieser Ingenieurkonstante wesentlich unempfindlicher gegen Schwankungen der Faservolumenanteile, Ondulations- oder Einspannungseinflüsse, etc.

Die für GFK allgemein gute Übereinstimmung ist nicht notwendigerweise für andere Verstärkungsfasern gegeben. Das soll jetzt genauer in Form von Balkendiagrammen für Versuche unter ausgewählten Winkeln bei verschiedenen Verstärkungsfasern in Epoxidharz untersucht werden.

Q

3.8.3.2 Elastische Materialkenngrößen in Balkendiagrammen gegenübergestellt

Wie gut ist die Theorie nun wirklich, wenn man einen handlaminierten faserverstärkten Kunststoffverbund damit beschreiben möchte? Der Frage soll im nun folgenden Teil nachgegangen werden. Dabei ist zu beachten, dass die Faservolumenanteile, wenn auch nur geringfügig, fertigungsbedingt zwischen den Versuchsserien variieren, sodass deren Einfluss die Faserwinkelabhängigkeit der anisotropen Materialeigenschaften stellenweise verzerrt.

In den nachfolgenden Abbildungen wurden in alphabetischer Reihenfolge Faserverbund-Kunststoffe mit den Verstärkungsfasern Aramid (Bild 3.32, Bild 3.33), Basalt (Bild 3.34), Kohlenstoff (Bild 3.35, Bild 3.36) und Glas (Bild 3.38) untersucht. Jedes der genannten Bilder zeigt erstens den E-Modul E_y , zweitens den Schubmodul G und drittens die Querkontraktionszahl v_{xy} als Funktion des Laminatwinkels α_{Kett} ³². Die Diagramme für E_y enthalten als Unterinformationen die mit Lami*Cens*[©] berechneten Werte sowie die über mehrere Proben gemittelten experimentellen Daten für den Sekanten- sowie den 2. Modul. Als Fehlerbalken sind die Standardabweichungen der Messwerte eingetragen. Ferner sind die gemessenen Faservolumenanteile zu sehen, welche direkt in die Lami*Cens*[©]-Berechnung Eingang gefunden haben. Die Diagramme für den Schubmodul G sowie für die Querdehnzahl v_{xy} enthalten naturgemäß als Unterinformationen nur die mit Lami*Cens*[©] berechneten Daten im Vergleich mit experimentell bestimmten Mittelwerten. Wieder sind die jeweiligen Faservolumenfraktionen vermerkt, die selbstverständlich mit denen bei E_y notierten Werten übereinstimmen.

Ergebnisbetrachtung für AFK:

Für **aramidfaserverstärkten Kunststoff** (AFK) erfolgen Materialtests in zwei Versuchsreihen. Es werden nämlich jeweils zwei Probelaminate für die Laminatorientierungswinkel $\alpha_{\text{Kett}} = 0^\circ$, 15°, 30°, 45° und 90° gefertigt, daraus acht Proben gesägt und fünf davon im quasi-statischen Zugversuch geprüft. Für jedes der Probelaminate wird der Faservolumenanteil φ aufwändig bestimmt und notiert (vgl. Abschnitt 2.5.5). In Bild 3.32 sind Ergebnisse für die jeweils kleineren Faservolumenanteile zu sehen (sog. "Serie 1"), wohingegen in Bild 3.33 die Ergebnisse für die jeweils größeren Faservolumenanteile (sog. "Serie 2") dargestellt sind. Dieses geschieht in der Absicht, Tendenzen im Verlauf der Ingenieurkonstanten als Funktion des Laminatwinkels erkennbar zu machen. Es sei daran erinnert, dass idealerweise alle Versuche mit demselben Faservolumenanteil durchzuführen wären, um diese Tendenzen zu studieren. Aus herstellungsbedingten Gründen ist jedoch das Einstellen exakt identischer φ bei mehreren handlaminierten Probelaminaten nicht möglich.

Im Falle des E-Moduls E_y stellt man zunächst fest, dass die Verläufe über dem Laminatwinkel aus der Vorhersage der Laminattheorie mit denen des Sekantenmoduls und des 2. Moduls qualitativ übereinstimmen, in dem Sinne, dass wenn der eine wächst (abnimmt) auch der andere wächst (abnimmt). Absolut jedoch ist ein recht großer Unterschied zwischen dem prog-

³² In anderen Worten: Die Ingenieurkonstanten sind über dem Faserorientierungswinkel der ausgesägten Proben aufgetragen. Um es ganz genau zu sagen: Wenn man in Bild (3.28) z. B. den zu dem Faserorientierungswinkel 0° gehörigen Schubmodul ablesen möchte, so hat man von 12 Uhr entgegen dem Uhrzeigersinn 45° abzutragen.

nostizierten Wert der Laminattheorie und dem Sekantenmodul zu verzeichnen (mehrere 1000 MPa). Der 2. Modul ist stets – bei anderen Laminatwinkeln als 0° und 90° sogar deutlich – kleiner als der Sekantenmodul. Dies ist auch nicht weiter verwunderlich, kennzeichnet der 2. Modul doch die nichtlinearen Eigenschaften des Verbundes, hat also nicht direkt etwas mit dem aus der Laminattheorie prognostizierten Wert zu tun. Wie man weiter den Fehlerbalken des Sekantenmoduls entnehmen kann, lässt sich der Unterschied zur Laminattheorie **nicht** durch Messwertstreuungen erklären. Folgende Gründe sind hier maßgeblich: Ondulation im Gewebe (Faserwellung), fehlerhafte Einspannung der Probe (Versatz und Verdrillung), das jeweils verwendete Auswerteverfahren (virtuelle Extensometer bzw. statistische Bereichsauswertung, vgl. Abschnitt 2.6.3.6 bzw. 2.7³³) und schließlich unzutreffende Elementarkenndaten sein. Beim Schermodul und bei der Querkontraktionszahl gelten entsprechende Bemerkungen wie zum E-Modul. Speziell bei der Querdehnzahl ist noch zu bemerken, dass ihr stetiger Anstieg auf ein Maximum bei 45° im Rahmen der Laminattheorie trotz deutlich unterschiedlicher Faservolumenanteile wiedergegeben wird. Dies ist auch der Fall bei den Messwerten, wenn man die Fehlerbalken berücksichtigt. Weiterhin ist zu bemerken:

- → Überraschenderweise liegen der 2. und der Sekantenmodul $E_{0,2\%}$ für 0° näher beieinander als das beispielsweise bei Glas als Verstärkungsfaser (siehe Bild 3.38) der Fall ist.
- → Die 2. Moduln für off-axis Lastfälle, wenn also Faserachse und Kraftrichtung nicht übereinstimmen, sinken extrem mit steigendem Winkel zwischen beiden Richtungen. Bei einem Laminatwinkel $\alpha_{\text{Kett}} = 45^{\circ}$ wird das Minimum erreicht.
- → Bei dem untersuchten Aramidfasergewebe sind geringfügig mehr Kettfäden (0°-Richtung) vorhanden als Schussfäden (90°-Richtung), sodass sowohl der E- als auch der G-Modul in 0°-Richtung eigentlich höher als der in 90°-Richtung sein müsste. Aufgrund des höheren Faservolumenanteils der 90°-Proben in beiden Serien wird dieser Effekt jedoch verzerrt.
- → Interessanterweise bricht der 2. Modul (2. Serie) bei den 90°-Proben relativ stark ein, bei großer Streuung. Das kann evtl. herstellungs- bzw. zuschnittbedingte Gründe haben, da selbst gemäß DIN EN 2747 (1998) beim Ablagewinkel eine Toleranz ± 1° unvermeidbar und daher erlaubt ist. Möglicherweise ist hier die erlaubte Ablagewinkel-Toleranz ausgereizt.
- → Verwunderlich mag auf den ersten Blick erscheinen, dass in der 2. Serie die 30°-Proben im Mittel eine höhere Querkontraktionszahl aufweisen als die 45°-Proben. Das hängt mit dem herausragend hohen Faservolumenanteil von über 48 % der 45°-Proben zusammen, der damit fast 5 % über dem der 30°-Proben liegt und so den Eindruck verfälscht.
- → Die Querkontraktionszahl kann bei faserverstärkten Kunststoffen Werte über 0,5 annehmen (vgl. TSAI (1992)).

Q

³³ Beachte, dass in Bild 3.29 der mit Hilfe der statistischen Bereichsauswertung ermittelte Wert näher an der theoretischen Kurve liegt als der über zwei virtuelle Extensometer bestimmte Modul. Dies mag ein Zufall sein. Wir glauben jedoch, dass aufgrund der Statistik in der Auswertung jenen Werten eine größere Signifikanz zugesprochen werden sollte (Abweichungen kleiner 5-10% bei Dehnungsfeldstatistik, 10-17% bei virtuellem Extensometer). Es wurde daher in Bild 3.32 bis Bild 3.38 stets die statistische Bereichsauswertung zugrunde gelegt.





Aramidfaserverstärkter Kunststoff (AFK)

Bild 3.32: E-Modul sowie 2. Modul (oben), Schubmodul (mittig) und Querkontraktionszahl (unten) theoretisch und experimentell von AFK Serie 1 in Abhängigkeit von Faserorientierung und Faservolumenanteil



Bild 3.33: E-Modul sowie 2. Modul (oben), Schubmodul (mittig) und Querkontraktionszahl (unten) theoretisch und experimentell von AFK Serie 2 in Abhängigkeit von Faserorientierung und Faservolumenanteil

Ergebnisbetrachtung für BFK:

Man stellt bei Auswertung der Versuche mit **basaltfaserverstärktem Kunststoff (BFK)** (siehe Bild 3.34) qualitativ Übereinstimmung mit dem Verlauf bei den übrigen getesteten Fasern fest. Für Basaltfaser liegen leider keine Elementarkenndaten vom Hersteller vor, sodass hier keine theoretisch berechnete Kennwertprognose möglich ist. In Bezug auf Preis und Steifigkeit des Verbunds braucht die Basaltfaser jedoch den Vergleich mit der Glasfaser nicht zu scheuen. Dieses – in Kombination mit einer den edlen Kohlenstofffasern sehr ähnlichen Optik und leichter Verarbeitbarkeit – lässt künftig auf eine stärkere Verbreitung in der westlichen Welt schließen. Man beachte, dass bei relativ gleichen Faservolumenanteilen das Maximum der Querkontraktionszahl bei einem Laminatwinkel von 45° deutlich erkennbar ist. Außerdem sind die Standardabweichungen auf einheitlich niedrigem Niveau, was die insgesamt gute Verarbeitbarkeit unterstreicht. Im Übrigen sind die getroffenen Aussagen zu aramidfaserverstärkten Kunststoffen größtenteils auf basaltfaserverstärkte Kunststoffe übertragbar.

Ergebnisbetrachtung für CFK:

Das Vorgehen bei den experimentellen Untersuchungen von **kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK)** ähnelt dem bei aramidfaserverstärkten Polymeren. Es wurden zwei Serien vermessen, danach wieder nach minimalen und maximalen Faservolumenanteilen aufgeteilt. Die Ergebnisse stellen Bild 3.35 und Bild 3.36 dar. Im Wesentlichen gelten die bereits gemachten Ausführungen zu AFK in analoger Weise, speziell stellen wir jedoch fest:

- → Wie auch bei den Aramidverstärkungsfasern stellt sich auch bei Kohlenstofffasern im Experiment eine beträchtliche Differenz zu den theoretischen Werten der Laminattheorie heraus. Insbesondere im Falle des E- und des Schubmoduls lässt sich das beobachten, wahrscheinlich mit denselben Gründen, d. h. insbesondere vermutlich unzureichend bekannte Elementarkenndaten. Darüber hinaus findet bei unserer Vergleichsrechnung die Ondulation keine Berücksichtigung. Um dieser Rechnung zu tragen, könnte ein empfohlener Ondulationsfaktor von z. B. 0,9 unterstellt werden, was eine Verringerung der theoretischen Steifigkeitswerte um zehn Prozent bewirken würde.
- → Die Querkontraktionszahl kann Werte über 0,5 für faserverstärkte Polymere erreichen, vgl. Abschnitt 2.7.2.3.2.
- → Erstaunlicherweise liegen der Sekantenmodul E_{0.2%} und der 2. Modul für CFK mit einem Laminatwinkel von 0° näher beieinander als das bei AFK der Fall war. Der 2. Modul ist in Faserrichtung sogar höher als der Sekantenmodul. In diesem Zusammenhang ist auf die Fehlerbalken hinzuweisen, die anscheinend gleiche Werte von 2. und Sekantenmodul implizieren. Schaut man jedoch direkt auf die Spannungs-Dehnungs-Kurven, so ist in jedem Versuch klar erkenntlich, dass bei einem unter 0° belasteten CFK-Laminat der 2. Modul über dem Sekantenmodul liegt (dies ist im Prinzip direkt in Bild 2.60 bzw. Bild 2.61 links oben zu sehen, insbesondere, wenn man die Skalierung der Dehnung noch vergrößert, was Bild 3.37 zeigt). Dieses wird durch HEIBLER (1986) bekräftigt, der feststellt, dass der E-Modul des Ausgangswerkstoffs Kohlenstofffaser mit ansteigender Belastung um ca. zehn Prozent zunimmt (vgl. Abschnitt 2.2.2), wohingegen bei Glas- oder Aramidfasern lineares Materialverhalten bis nahezu zum Versagen beobachtet werden kann.

Basaltfaserverstärkter Kunststoff (BFK)



Bild 3.34: E-Modul sowie 2. Modul (oben), Schubmodul (mittig) und Querkontraktionszahl (unten) theoretisch und experimentell von BFK in Abhängigkeit von Faserorientierung und Faservolumenanteil

177





Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK)

Bild 3.35: E-Modul sowie 2. Modul (oben), Schubmodul (mittig) und Querkontraktionszahl (unten) theoretisch und experimentell von CFK Serie 1 in Abhängigkeit von Faserorientierung und Faservolumenanteil

Q



Bild 3.36: E-Modul sowie 2. Modul (oben), Schubmodul (mittig) und Querkontraktionszahl (unten) theoretisch und experimentell von CFK Serie 2 in Abhängigkeit von Faserorientierung und Faservolumenanteil

→ Die 2. Moduln für off-axis Lastfälle, wenn also Faserachse und Kraftrichtung nicht übereinstimmen, sinken auch hier im Falle der CFK-Prüfkörper in Bild 3.35 und Bild 3.36 extrem mit steigendem Winkel zwischen beiden Richtungen bis einschließlich $\alpha_{\text{Kett}} = 45^{\circ}$.



Bild 3.37: Ausschnitt aus Spannungs-Dehnungs-Diagramm von 0°-FVK-Versuchen mit angedeuteter bimodaler Auswertung links und rechts des "Knies": Mit Ausnahme von CFK ist in Faserrichtung ein genereller Steifigkeitsverlust mit zunehmender Dehnung festzustellen (durchgezogene Linien: gemittelte Messkurven einer Versuchsserie, groß gestrichelte Linien: Sekantenmodul, klein gestrichelte Linien: 2. Modul)

Ergebnisbetrachtung für GFK:

Die Experimente mit **glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK)** umfassen lediglich eine repräsentative Serie, deren Ergebnisse Bild 3.38 veranschaulicht. Die Streuung in den Faservolumenanteilen ist moderat (Toleranzband von etwa 1 %). Im Einzelnen heißt das:

- → In Bezug auf den Sekantenmodul $E_{0,2\%}$ korrespondieren die experimentellen Werte für GFK sehr gut mit der Vorhersage der klassischen Laminattheorie.
- \rightarrow Der 2. Modul ist stets geringer als der mittels Laminattheorie vorhergesagte E-Modul.
- → Die 2. Moduln für off-axis Lastfälle, wenn also Faserachse und Kraftrichtung nicht übereinstimmen, sinken auch diesmal extrem mit steigendem Laminatwinkel, bis sie ihr Minimum bei $\alpha_{\text{Kett}} = 45^{\circ}$ erreichen.
- → Für Schubmodul *G* sowie POISSONzahl ν liegen die Vorhersagen ebenfalls zutreffend nah an den experimentellen Daten.
- → Die ermittelten Querkontraktionszahlen ν erreichen Werte knapp über 0,5 im Fall der 30°- und 45°-Versuche mit glasfasergewebeverstärkten Kunststoffen.

Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK)



Bild 3.38: E-Modul sowie 2. Modul (oben), Schubmodul (mittig) und Querkontraktionszahl (unten) theoretisch und experimentell von GFK in Abhängigkeit von Faserorientierung und Faservolumenanteil

3.8.3.3 Einfluss des Faservolumenanteils auf elastische Kenngrößen aus Experiment und Theorie

Nach der serienweisen Vorstellung der experimentell ermittelten Laminatkenngrößen, aufgetragen über dem jeweiligen Laminatwinkel, sollen diese Kennwerte pro Werkstoff nun mit dem Mischungsregelansatz nach PUCK und SCHÜRMANN, der in Lami*Cens*[©] implementiert ist, verglichen werden. Dazu werden die Erkenntnisse aus Abschnitt 2.7.2 erneut aufgegriffen. Die mit Mischungsregeln homogenisierten Einzelschichteigenschaften gehen in die Berechnung nach der klassischen Laminattheorie ein und werden als Funktion des Faservolumenanteils aufgetragen. Die zum Vergleich abgebildeten Datenpunkte repräsentieren dabei jeweils das Ergebnis eines Zugversuchs. Die Farben kennzeichnen den jeweiligen Werkstoff, die Geometrie des Datenpunkts die Faserorientierung im Laminat.

Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK)

Bild 3.39 zeigt die Gegenüberstellung der experimentell erhobenen Datenpunkte für CFK-Laminate aus vierlagigem 245 g/m² Kohlenstofffasergewebe (vgl. Tabelle 2.1 und Tabelle 2.4) in Epoxidharz L 1100/EPH 294 (vgl. Tabelle 2.5) mit Berechnungen des Laminat-**Elastizitätsmoduls** nach der klassischen Laminattheorie, in die die halb-empirischen Ansätzen nach PUCK (1967) bzw. PUCK/SCHÜRMANN [SCHÜRMANN (2007)] für die Abschätzung von E_2 einfließen. Die Verwendung des semi-empirischen Ansatzes gemäß PUCK/SCHÜR-MANN wird den Ergebnissen der "World-Wide Failure Exercise" zufolge empfohlen [ANDERS (2008)]. Es wird deutlich, dass die Prognosen die aus dem Experiment bestimmten Daten übersteigen. Noch nicht berücksichtigt sind bei der Vorhersage etwaige Korrekturfaktoren für die Faserwellung im Gewebe.



Bild 3.39: Experimentelle Datenpunkte des Elastizitätsmoduls von CFK und berechnete Kennlinien aus Mischungsregeln nach PUCK, modifiziert in SCHÜRMANN (2007), über dem Faservolumenanteil aufgetragen

Nachfolgend stellt Bild 3.40 einen Vergleich zwischen CFK-**Schubmoduln** dar, die im Experiment für fünf verschiedene Faserorientierungswinkel ermittelt und nach der Mischungsregel von PUCK (1967) bzw. (1969) und CLT für die entsprechenden Winkel in Abhängigkeit des Faservolumenanteils bestimmt wurden. Zu beachten ist dabei, dass bei den experimentellen Datenpunkten die Winkel des Experiments angegeben sind, aus dem sie bestimmt wurden. In die CLT gehen die Winkel ein, unter denen der Schubmodul wirkt, dieser ist um $\alpha_0 = +\pi/4$ versetzt, vgl. dazu die Erläuterung in Abschnitt 2.7.2.2. Auch hier lässt sich wie bereits beim Elastizitätsmodul feststellen, dass die experimentell bestimmten Daten allesamt unterhalb der semi-empirischen Prognose liegen.

ANDERS (2008) erwähnt in seiner Dissertation, dass für den Laminatschubmodul G von einer Kommission ("World-Wide Failure Exercise") die Verwendung der Formulierung nach FÖRSTER (1971) empfohlen wurde und nicht die modifizierte Mischungsregel nach PUCK (1967) und (1969) [MICHAELI/WEGENER (1990), MICHAELI et al. (1995), FLEMMING/ROTH (2003)]. Dort wird eine PUCK/SCHÜRMANN Formel benannt, die nicht der von uns verwendeten (3.167)₃ entspricht. Man könnte den experimentellen Ergebnissen Abschätzungen nach beiden Mischungsregeln gegenüberstellen, worauf an dieser Stelle jedoch verzichtet wird.



Bild 3.40: Experimentelle Datenpunkte des Schubmoduls und Mischungsregeln semiempirisch modifiziert nach Puck (1967) und (1969) aufgetragen über dem Faservolumenanteil für CFK

Eine Gesamtübersicht über **Querkontraktionszahlen**, die experimentell für CFK bestimmt und dem gegenüber gemäß klassischer Laminattheorie berechnet wurden, liefert Bild 3.41. Zum Vergleich sind darin auch gleich die Kennzahlen aus den Materialtests mit den übrigen drei Werkstoffkombinationen eingefügt. Obwohl bei allen untersuchten Verbundwerkstoff-

kombinationen dasselbe $v_F = 0,1$ in die Abschätzungsformel der Querkontraktionszahl eingeht (siehe Tabelle 2.1 zu den Elementarkenndaten der Faser), weichen die Theorielinien für die unterschiedlichen Verstärkungsfasern voneinander ab (vgl. auch Bild 3.50), da die Ingenieurkonstanten untereinander voneinander abhängig sind. Hier, in Bild 3.41, wurde im Diagramm ausschließlich die Berechnung für CFK eingetragen.

Die experimentell in den 0°- und 5°-Versuchen anhand von CFK-Proben ermittelten Werte sind größer als die gem. Laminattheorie abgeschätzten, in die die ursprüngliche Mischungsregel für v_{21} der Einzelschicht einfließt. Das ist insofern verwunderlich, weil die Verwebung der Fasern eher vermuten ließe, dass diese die Querdehnung behindern würde. Andererseits kann eine gewisse herstellungsbedingte Abweichung des Faserorientierungswinkels bei den Zugprüfkörpern nicht ausgeschlossen werden. Die Vorhersagen für die 15°-, 30°- und 45°-Versuche treffen relativ genau zu bzw. überschreiten die experimentell festgestellten Querkontraktionszahlen tendenziell leicht.

Besonders deutlich wird im Vergleich der unterschiedlichen Werkstoffe, dass die Querkontraktionszahlen für CFK und AFK durchaus ähnlich ausgeprägt sind, sodass die CLT-Prognose für CFK auf beide Verbundkunststoffe gleichermaßen gut zutreffen würde. Wir werden später sehen, ob die CLT-Vorhersage der Querkontraktionszahl für AFK genauso gut übereinstimmt. Die experimentellen Werte für GFK und BFK weichen deutlich von denen bei den beiden erstgenannten Werkstoffkombinationen ab.



Bild 3.41: Querkontraktionszahl aus dem Experiment bestimmt und berechnet nach CLT (ursprüngliche Mischungsregel) aufgetragen über dem Faservolumenanteil für CFK

Nun folgen die Gegenüberstellungen von Experiment und Theorie in Abhängigkeit vom Faservolumenanteil für AFK-Laminate aus vierlagigem 170 g/m² Aramidfasergewebe (vgl. Tabelle 2.1 und Tabelle 2.4) in Epoxidharzmatrix L 1100/EPH 294 (vgl. Tabelle 2.5).

Wie Bild 3.42 und Bild 3.43 deutlich zeigen, weisen die experimentell ermittelten **Elastizitäts-** und **Schubmoduln** für die untersuchten aramidfaserverstärkten Kunststoffe offensichtliche Abweichungen nach unten gegenüber den mittels Laminattheorie prognostizierten Kennlinien auf. Dieser Effekt stellt sich ähnlich wie bei den kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen dar. Der positiv ansteigende Trend der Vorhersage deutet sich hingegen auch aufgrund der experimentellen Datenbasis an.



Bild 3.42: Elastizitätsmodul aus dem Experiment bestimmt und berechnet nach CLT (Mischungsregel PUCK modifiziert [SCHÜRMANN (2007)]) aufgetragen über dem Faservolumenanteil für AFK

Bezüglich der **Querkontraktionszahl** des untersuchten AFK, dargestellt in Bild 3.44, lässt sich feststellen, dass die 0°- und 90°-Versuche von der CLT bzw. dem verwendeten Prognosetool sehr gut beschrieben werden. Die Querkontraktionszahl der 15°-, 30°- und 45°-Versuche wird jedoch unterschätzt. Einschränkend muss hier eine nicht unerhebliche Streuung der ausgewerteten Experimentaldaten berücksichtigt werden.





Bild 3.43: Schubmodul aus dem Experiment bestimmt und berechnet nach CLT (Mischungsregel PUCK (1967) und (1969)) aufgetragen über dem Faservolumenanteil für AFK



Bild 3.44: Querkontraktionszahl aus dem Experiment bestimmt und berechnet nach CLT (ursprüngliche Mischungsregel) aufgetragen über dem Faservolumenanteil für AFK

Die Gegenüberstellung experimenteller und theoretischer Kenngrößen betrachten wir nun abhängig vom Faservolumenanteil für GFK-Laminate aus achtlagigem 163 g/m² Glasfasergewebe (vgl. Tabelle 2.1 und Tabelle 2.4) in Epoxidharzmatrix L 1100/EPH 294 (vgl. Tabelle 2.5). Die experimentellen Werte für die **Elastizitätsmoduln** der geprüften glasfaserverstärkten Kunststoffe liegen, wie Bild 3.45 zeigt, allesamt wesentlich näher an den mit der CLT prognostizierten Kennlinien als das bei kohlenstoff- und aramidfaserverstärkten Kunststoffen der Fall war. Insbesondere in den Off-Axis-Versuchen (15°, 30°, 45°) trifft die Prognose bemerkenswert gut zu. Das verwundert insofern, da hier noch keinerlei Korrekturfaktoren für die Ondulation bei der CLT-Prognose Berücksichtigung finden. Es deutet sich darüber hinaus an, dass der Elastizitätsmodul nicht in demselben Maße mit zunehmendem Faservolumenanteil ansteigt, wie die PUCKsche Mischungsregel in Verbindung mit der klassischen Laminattheorie vorhersagt.



Bild 3.45: Elastizitätsmodul im Experiment bestimmt und berechnet nach CLT (Mischungsregel modifiziert nach PUCK) aufgetragen über dem Faservolumenanteil für GFK

Gemäß Bild 3.46 treffen auch im Falle des GFK-**Schubmoduls** die Prognosen recht gut zu, am besten ist dies der Fall für die niedrigen Faservolumenanteile. Aus dem gezeigten Diagramm in Bild 3.46 wird ebenfalls deutlich, dass durchaus Vergleichbarkeit zwischen den mechanischen Eigenschaften von glas- und basaltfaserverstärkten Kunststoffen, zumindest im Hinblick auf die Schubmoduln, gegeben ist. Daher mag der Vergleich mit den theoretischen Kennlinien des glasfaserverstärkten Kunststoffes in Betracht zu ziehen sein.

Bei der **Querkontraktionszahl** in Bild 3.47 zeichnet sich ein ähnliches Bild ab: GFK-Prognose und GFK-Experiment führen zu sehr gut übereinstimmenden Aussagen zum Werkstoffverhalten. Aber auch für BFK kann, sofern keine fundiertere Abschätzung möglich ist,

durchaus auf die Berechnungen für GFK zurückgegriffen werden. Der Trend stimmt durchaus, die Abweichungen sind vernachlässigbar.



Bild 3.46: Schubmodul aus dem Experiment bestimmt und berechnet nach CLT (Mischungsregel PUCK (1967) und (1969)) aufgetragen über dem Faservolumenanteil für GFK, verglichen mit experimentellen Werten für BFK



Bild 3.47: Querkontraktionszahl aus dem Experiment bestimmt und berechnet nach CLT (ursprüngliche Mischungsregel) aufgetragen über dem Faservolumenanteil für GFK

Kennzahlenvergleich von CFK, AFK und GFK in Abhängigkeit vom Faservolumenanteil

Abschließend werden in Bild 3.48 bis Bild 3.50 die jeweiligen Kennlinien und experimentell ermittelten mechanischen Kenngrößen der einzelnen Faser-Kunststoff-Verbunde im jeweils erzielten Wertebereich des Faservolumenanteils (FVA) gegenübergestellt.



Bild 3.48: Gegenüberstellung theoretischer Kennlinien berechnet nach CLT (Mischungsregel PUCK modifiziert [SCHÜRMANN (2007)]) und experimenteller Daten der Elastizitätsmoduln für einzelne Werkstoffkombinationen aufgetragen über dem FVA

Wir halten zum Vergleich der Elastizitäts- und Schubmoduln in Bild 3.48, Bild 3.49 fest:

- → Die Übereinstimmung bei GFK zwischen Experiment und Theorie mit der Mischungsformel nach PUCK ist exzellent, was nicht weiter verwundert, da diese anhand von Glasfaserverbunden etabliert wurde.
- → Für CFK und AFK weicht die Vorhersage doch wahrnehmbar von den gemessenen Werten ab. Hier wäre es unter Umständen nützlich sollte sich die Abweichung nicht durch die Ungenauigkeit der Elementarkenndaten oder weiterer Eingangsgrößen vom Berechnungstool Lami*Cens* erklären lassen –, materialabhängig neue Mischungsregeln einzuführen. U. U. auch wegen der höheren Faservolumenanteile, die diese Fasern im Komposit erzielen, könnte dies sinnvoll sein. Allein an fertigungsbedingten Einflüssen (Poren, ...) durch das Handlaminierverfahren können die Abweichungen nicht liegen, sonst müssten sich diese gleichermaßen in den GFK-Versuchsergebnissen widerspiegeln. Gleiches gilt für das in allen Faser-Kunststoff-Verbunden verwendete Epoxidharz, dessen in der Software hinterlegte Daten im Falle von GFK zu sehr guter Übereinstimmung führen.

Die im Experiment bestimmten **Querkontraktionszahlen** von aramid- und kohlenstoffgewebefaserverstärktem Kunststoff sind durchaus vergleichbar, wie Bild 3.50 veranschaulicht,

auch wenn das prognostizierte Materialverhalten in Bezug auf die Querkontraktion recht deutliche Unterschiede erwarten lässt.



Bild 3.49: Gegenüberstellung theoretischer Kennlinien und experimenteller Daten der Schubmoduln für einzelne Werkstoffkombinationen in Abhängigkeit des Faservolumenanteils



Bild 3.50: Gegenüberstellung für einzelne Werkstoffkombinationen: Querkontraktionszahlen, aus Experimenten bestimmt und nach CLT berechnet (ursprüngliche Mischungsregel), aufgetragen über dem Faservolumenanteil

3.8.3.4 Abschließende Diskussion

Zusammenfassend kann festgehalten werden:

- → Die Ergebnisse der GFK-Proben stimmen sehr gut mit den von Lami*Cens*[©] errechneten Werten überein.
- → Ein Vergleich der experimentell ermittelten Ingenieurkonstanten der AFK- und CFK-Proben mit den von Lami*Cens*[®] berechneten Werten zeigt, dass die Werte relativ stark voneinander abweichen. Der Grund für die unterschiedlichen Ergebnisse wird in der Art der Berechnung (Mischungsregeln in Kombination mit unzureichend untermauerten Elementarkonstanten, vgl. Tabelle 2.1) vermutet. Man beachte: Die klassische Laminattheorie stützt sich ursprünglich auf empirische Untersuchungen von GFK-Laminaten [PUCK (1967) und (1969)]. In den Folgejahren wird unterstellt, dass diese Zusammenhänge gleichermaßen für andere Werkstoffkombinationen wie z. B. CFK oder AFK gelten. Die im Experiment ermittelten Kenngrößen scheinen diese Vermutung zu bestätigen. Wird diese Art der Berechnung nun auf andere Materialien wie aramid- oder kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe angewendet, kommt es offensichtlich zu Abweichungen, die prozentual beziffert den Werten in Klammern in Tabelle 3.2 zu entnehmen sind. Auch die Berücksichtigung des abweichenden Faserquermoduls nach PUCK/SCHÜRMANN [SCHÜRMANN (2007)] für die letztgenannten Verbunde vermag diese Abweichungen zwar zu verbessern, aber nicht gänzlich zu kompensieren.
- → Zur Bewertung des Berechnungstools und der damit prognostizierten mechanischen Kenngrößen, weist Tabelle 3.2 die bereits in der Einleitung versprochenen Korrekturfaktoren aus, die auf die mit Lami*Cens*[©] berechneten Ingenieurkonstanten angewendet werden müssten, um die im Rahmen dieser Forschungsarbeit experimentell verifizierten Laminatkennwerte zu erhalten.

Mechanische Kenngröße	AFK [-]	CFK [-]	GFK [-]
E _{0,2%}	0,66 (-34,2 %)	0,78 (-21,9%)	1,01 (+1,0%)
$G_{0,3\%}$	0,63 (-36,6%)	0,80 (-19,9 %)	1,02 (+1,6 %)
V	1,23 (+22,8 %)	1,21 (+21,3 %)	1,02 (+1,5 %)

Tabelle 3.2:	Anzuwendender Korrekturfaktor auf LamiCens [©] -Prognose
	(Ø prozentuale Abweichung des experimentellen ggü. dem berechneten Wert)

Für ausgewählte AFK- und CFK-Laminate können zusätzlich Referenzwerte der Firma R&G Faserverbundwerkstoffe [R&G (2003)] für Laminate mit demselben Gewebe und ähnlichen Faservolumenanteilen herangezogen werden.³⁴ Eine Gegenüberstellung zeigt Tabelle 3.3. Darin sind die in vorliegender Arbeit erzielten Laminat-Faservolumenanteile zu finden, die

Q

³⁴ verwendetes Harzsystem der Referenzwerte: EP-Harz (WL 5.3200 Teil 1+2)

leicht von dem angegebenen Toleranzbereich der Referenzwerte für φ abweichen. Eine Umrechnung solcher faservolumenanteilbezogener Dimensionierungsrichtwerte, wie sie z. B. in der IDAFLIEG-Broschüre für $\varphi = 0,35$ angegeben werden, auf bekannte Faservolumenanteile ist gemäß [KICKERT (1988)] unter der Annahme, dass $E_H \ll E_F$ ist, möglich:

$$E, G(\varphi_2) = E, G(\varphi_1) \frac{\varphi_2}{\varphi_1}.$$
 (3.224)

Die experimentellen Ergebnisse stimmen mit guter Genauigkeit mit den Referenzwerten überein. Zur Berechnung des durchschnittlichen Laminat-E-Moduls (Tabelle 3.3, Spalte zwei) wird der Mittelwert der E-Moduln der Zugproben des entsprechenden Laminats herangezogen (vgl. Abschnitt 2.7.2.1). Ein Vergleich der Basaltkennwerte mit einem Referenzwert ist derzeit mangels hinterlegter Faserkenndaten für das Basaltgewebe in Lami*Cens*[©] nicht möglich.

Tabelle 3.3:Ausgewählter Vergleich der experimentell ermittelten Elastizitätsmoduln mit
Referenzwerten der Fa. R&G [R&G (2003)] und berechneten Werten (LamiCens®)

Werkstoff	Ø Laminat-E-Modul experimentell	Referenzwert Zug- E-Modul DIN EN 2561	mit Lami <i>Cens[©]</i> berechneter Wert
AFK 0° (Kettrichtung)	$E_{0,2\%} =$ 24496 N/mm² (Serie 1: A170-04-0°-GW-46, $\varphi = 42,13$ %)	$E = 23000 \text{ N/mm}^2$ (Kettrichtung,	$E = 29505 \text{ N/mm}^2$ ($\varphi = 42,13 \%$)
AFK 0° (Kettrichtung)	$E_{0,2\%} = 24758 \text{ N/mm}^2$ (Serie 2: A170-04-0°-GW-41, $\varphi = 43,24 \%$)	$\varphi = 43 \pm 2 \%)$	$E = 30202 \text{ N/mm}^2$ ($\varphi = 43,24 \%$)
AFK 90° (Schussrichtung)	$E_{0,2\%} = 26067 \text{ N/mm}^2$ (Serie 1: A170-04-90°-GW-50, $\varphi = 44,98 \%$)	$E = 20000 \text{ N/mm}^2$ (Schussrichtung,	$E = 30103 \text{ N/mm}^2$ ($\varphi = 44,98 \%$)
AFK 90° (Schussrichtung)	$E_{0,2\%}$ = 25261 N/mm² (Serie 2: A170-04-90°-GW-45, φ = 46,30 %)	$\varphi = 43 \pm 2\%)$	$E = 30899 \text{ N/mm}^2$ ($\varphi = 46,30 \%$)
CFK 0° (Kett- und Schussrich- tung identisch)	$E_{0,2\%} =$ 50945 N/mm² (Serie 1: C245-04-0°-GW-51, $\varphi = 50,83$ %)	<i>E</i> = 55000 N/mm² (Kett-/Schussrichtung,	$E = 64783 \text{ N/mm}^2$ ($\varphi = 50,83 \%$)
CFK 0° (Kett- und Schussrich- tung identisch)	$E_{0,2\%} = 51092 \text{ N/mm}^2$ (Serie 2: C245-04-0°-GW-57, $\varphi = 53,19 \%$)	$\varphi = 50 \pm 2 \%$)	$E = 67742 \text{ N/mm}^2$ ($\varphi = 53,19 \%$)
GFK 0° (Kettrichtung)	$E_{0,2\%} = 17426 \text{ N/mm}^2$ (G163-08-0°-GW-36, $\varphi = 34,38 \%$)	$E = 18000 \text{ N/mm}^2$ (Kettrichtung, $\varphi = 43 \pm 2 \%$)	$E = 17176 \text{ N/mm}^2$ ($\varphi = 34,38 \%$)
GFK 90° (Schussrichtung)	$E_{0,2\%} = 15505 \text{ N/mm}^2$ (G163-08-90°-GW-40, $\varphi = 33,57 \%$)	$E = 18000 \text{ N/mm}^2$ (Schussrichtung, $\varphi = 43 \pm 2 \%$)	$E = 16395 \text{ N/mm}^2$ ($\varphi = 33,57 \%$)

 \mathbb{Q}

Ebenfalls möglich erscheint als Ursache für Abweichungen zwischen den experimentellen und den theoretischen Ergebnissen, dass bei der Berechnung mit Lami*Cens*[©] ein größerer Fehler mit der Annahme der Faserquerkontraktion von $v_{21_F} = 0,1$ – unabhängig vom Fasertyp – gemacht wird. KAW (2006) weist faserabhängige Werte zwischen 0,2 und 0,36 aus. Das Berechnungstool ALFALAM[©] (2009-ol) der TU Darmstadt schlägt hier einen Wert von ca. 0,3 vor. Auf die nähere Herkunft der Werte wird nicht verwiesen. Es ist leicht ersichtlich, dass sich durch Anpassung der Eingangskenngrößen die berechneten Querkontraktionszahlen des Verbundes für die Gewebe verändern.

Man beachte weiterhin, dass in Lami*Cens*[©] die Faserwinkelangaben als Eingangsgröße für die Berechnung präzise vorgegeben werden. In der Realität ist jedoch eine Abweichung der Winkel um $\pm 1^{\circ}$, die auch DIN EN 2747 (1998) erlaubt, durchaus möglich. Das hat sicherlich einen Einfluss auf die sich ergebenden elastischen Materialkennwerte. Eine detaillierte Untersuchung dieses Effekts wird hier jedoch nicht vorgenommen, weil eine nachträgliche Vermessung des Winkels im fertigen Laminat schwer möglich ist.

Es ist darüber hinaus zu bedenken, dass Proben mit einer Faserorientierung ungleich [0°/90°] unweigerlich unterschiedliche Faserlängen aufweisen bzw. nicht alle Fasern in die Spannbacken eingeklemmt sind und die Kraftübertragung somit nur über den Matrixwerkstoff erfolgt. Insbesondere bei den [15°/105°]-Proben sind bei höheren Belastungen lokale Abweichungen im Dehnungsfeld infolge der Prüfkörpergeometrie mit dem hier gewählten Prüfverfahren hinzunehmen. Auf das linear-elastische Verhalten dürfte das jedoch keinen Einfluss haben.

Aufgrund der in Abschnitt 2.7.3 durchgeführten Messfehlerabschätzung für den Faservolumenanteil, der bis auf 0,3 % genau bestimmt wurde, erscheint es unwahrscheinlich, die hier zur Diskussion stehenden Abweichungen damit erklären zu wollen.

Unterstellt man schließlich in Bezug auf die nach CLT berechneten Werte einen Ondulationsfaktor von 0,9 bzw. 0,95 (vgl. auch Abschnitte 3.8.2.2.1 und 3.8.2.3), wie in der VDI-RICHTLINIE 2014, BLATT 2 (1993) angegeben, dann muss man bis zu 10 Prozent Steifigkeitsverlust in Rechnung stellen. Auch das könnte ein Grund für den Unterschied zwischen experimentell beobachteten und theoretischen Werten sein. Dagegen spricht jedoch, dass diese Steifigkeitskorrektur lediglich bei kohlenstoff- und aramidfaserverstärkten Kunststoffverbunden vorgenommen werden müsste. Für glasfaserverstärkte Kunststoffverbunde ist die Anwendung eines ondulationsbedingten Korrekturfaktors auf die prognostizierten Steifigkeitswerte aufgrund der ohnehin schon gut übereinstimmenden experimentellen und theoretischen Ergebnisse nicht angeraten.

Aus diesen Überlegungen resultiert der Vorschlag der Autorin, die in die CLT eingehenden Mischungsformeln nach PUCK in materialabhängiger bzw. verstärkungsfaserabhängiger Weise zu modifizieren. Man denke daran, dass die PUCKschen Formeln ursprünglich für Glasfasern kalibriert wurden und für diesen Verstärkungsfasertyp sehr gut zutreffen. Bei der materialabhängig guten oder eher mäßigen Übereinstimmung mit der Theorie spielen ggf. weitere Faktoren wie bspw. die Haftung von Faser und Matrix rein, die Abschnitt 2.2 zufolge recht unterschiedlich in Abhängigkeit vom Fasertyp ist. Diese Modifikation wäre selbstverständlich zunächst rein phänomenologisch. Daher käme in einem zweiten Schritt die Entwicklung eines mikromechanischen Modells noch hinzu.

3.8.4 Ausblick

Die im vorigen Abschnitt präsentierten experimentellen Ergebnisse für die Elemente der Laminatsteifigkeitsmatrix – E-Modul E_y , Schubmodul G, Querdehnzahl v_{xy} als Funktion des Laminatwinkels α_{Kett} – könnten im Prinzip als Eingangsdaten bei der Bestimmung der sieben Elementarkonstanten der einzelnen Bestandteile des Verbundes E_F , E_{F2} , E_H , G_F , G_H , v_F und v_H helfen. Dazu muss man sich zuerst an die Zusammenhänge zu den vier Ingenieurkonstanten E_1 , E_2 , G_{12} und v_{21} erinnern, die auf mikromechanischen Modellen beruhen, wie sie z. B. in den Gleichungen (3.186) bis (3.192) zu sehen sind. Weiterhin ist zu bedenken, dass diese vier Ingenieurkonstanten Eingangsgrößen zu den Gleichungen der klassischen Laminattheorie sind und somit eine Brücke zwischen Elementarkonstanten der Komponenten und den experimentellen Ergebnissen entsteht. Die vermittelnden Gleichungen sind natürlich höchstgradig nichtlinear, und daher ist die Rückkehr auf die elementaren Ingenieurkonstanten kein triviales Problem und kann nur Gegenstand einer weiterführenden Arbeit sein. An dieser Stelle soll jedoch stichwortartig diskutiert werden, welche Probleme dabei auftreten werden:

- → Entweder beziehen wir uns auf eine Einzelschicht und es erfolgt eine komponentenweise Zuordnung der Komponenten der [S]-Matrix zu experimentellen Steifigkeitsergebnissen gemäß dem 1. Schritt der CLT oder
- → wir starten mit einem Gewebe im Verbund und ordnen die Komponenten der zugehörigen Steifigkeitsmatrix [a] den gemessenen Steifigkeiten geeignet zu. Das ist jedoch problematisch, da die 0°- und 90°-Gewebe-Lagen additiv miteinander verbunden sind und schwierig auf die Elementarkonstanten der Lagen geschlossen werden kann.
- → In jedem Fall muss ein nichtlineares, überbestimmtes Gleichungssystem gelöst werden, da mehr experimentelle Daten als gesuchte Elementarkonstanten von den Komponenten Faser und Harz zur Verfügung stehen. Das bedeutet, dass sich ein Optimierungsverfahren anzuschließen hat, dergestalt, dass ein Minimum der Abweichung zwischen den per Laminattheorie, auf Elementarkonstanten beruhenden Steifigkeitswerten und experimentellen Steifigkeitsdaten ermittelt werden muss. Die zu diesem Minimum gehörenden Elementarkonstanten erachten wir als die "richtigen". Dabei gilt es, ein bereits in der Habilitation von MAHNKEN (1996) und in der Dissertation von STERTHAUS (2008) angesprochenes Problem zu lösen: Gibt man einen Startwert vor, der nicht sehr genau bei den zu ermittelnden Werten von E_1, E_2, v_{21} und G_{21} liegt, dann werden schnell physikalisch unsinnige Werte als vermeintlich optimale Lösung ausgewiesen. In einer weiterführenden Arbeit sollte daher untersucht werden, was man machen muss, damit das nicht passiert, sondern dass sich die Vorhersage stabilisiert. Dieses wird dann auf ein komplexes mathematisches Optimierungsproblem führen.

In der Arbeit KOKE et al. (2009) wurde dieses Konzept ansatzweise verfolgt.



4 Mechanik und virtuelle Labore - neue Lehrmethoden für eine traditionsreiche Wissenschaft

"Man kann zwar jemanden für sich arbeiten, jedoch nicht für sich lernen lassen." [KEIL (2009)]

Bekanntermaßen existieren unterschiedliche Lerntypen. Nicht jeder potenziell Lernwillige wird gleichermaßen gut durch Frontalunterricht angesprochen. In Zeiten steigender Studierendenzahlen und daraus folgendem, sich stetig verschlechterndem Pro-Kopf-Betreuungsverhältnis an den Universitäten wird es immer schwieriger, die Studenten zu erreichen, zu motivieren, ihren Lerneifer zu wecken, geschweige denn, sie für eine faszinierende Wissenschaft mit andauerndem Innovationsbedarf wie den Maschinenbau zu begeistern. In Maschinenbauveranstaltungen betragen die Anfängerzahlen pro Semester z. B. an der Technischen Universität Berlin bereits weit über 500 Studenten³⁵. Die Erhöhung der Studienanfängerquote ist politisch gewollt. Im Jahr 2010 soll sie pro Jahrgang eine Zielgröße von 40 Prozent erreichen [KMK (2008-ol)] von ausgangs 34 Prozent in 2007. 2001 lag sie vergleichsweise noch bei 32 Prozent laut OECD (2009). Die abgelegten Prüfungen spiegeln bereits jetzt beispielsweise in der Grundlagenveranstaltung "Technische Mechanik" mit Durchschnittsnoten von 4,2 und schlechter³⁶ ein verheerendes Bild wieder. Bis 2020 wird sogar eine europaweite Hochschulabsolventenquote von 40 Prozent bei der Bevölkerungsschicht der 30- bis 34-jährigen von 31 Prozent in 2010 angestrebt - so die Zielvorgabe der Bildungsminister der Europäischen Union –, um mit den USA und Japan gleichzuziehen (auf Vergleichbarkeit der universitären Ausbildung im Ländervergleich wird dabei nicht eingegangen) [KAUBE (2010)]. Was das für die Qualität der Lehre bedeutet, ist abzusehen. Es ist im Hinblick auf die Vergangenheit davon auszugehen, dass sich die Situation auch in Zukunft nicht verbessern, sondern eher verschlimmern wird.

Einerseits liegt also die Problematik bei Grundlagenveranstaltungen in den großen Teilnehmerzahlen. Andererseits kommt in den Vertiefungsveranstaltungen bei kleineren Gruppengrößen die Schwierigkeit der Vermittlung von sehr komplexen, für das bisherige Verständnis eher außergewöhnlichen Sachverhalten hinzu. Daher gilt es, neue Wege zu suchen, die Studenten trotz schwieriger werdender Rahmenbedingungen im Bildungssystem (nicht zuletzt vor dem Hintergrund des erwarteten Abitur-Doppeljahrgangs wegen der Schulzeitverkürzung in 2012³⁷) für die Lehrveranstaltungsinhalte zu begeistern und zu besseren Studienleistungen anzuspornen. Ein Ansatz eines solchen neuen Weges soll in dieser Arbeit mit virtuellen Laboren in einer traditionsreichen Wissenschaft wie der Mechanik vorgestellt werden.

³⁵ TU Berlin: 535 Studienanfänger im Wintersemester (kurz: WS) 2004/05, 636 im WS 2005/06, 600 im Sommersemester (kurz: SS) 2006 und 852 (!) im WS 2006/07

³⁶ Durchschnittsnoten TU Berlin: 4,22 im WS 2004/05 bzw. 4,28 im SS 2006 (Mechanik 1), 4,32 im SS 2005 bzw. 4,38 im WS 2006/07 (Mechanik 2) und 4,21 im WS 2005/06 (Mechanik 3)

³⁷ Angabe gilt für Berlin


Der abschließende Teil und Schwerpunkt dieses Kapitels beschäftigt sich mit der konkreten inhaltlichen Umsetzung. Diese wurde prototypisch anhand von zwei Pilotprojekten realisiert, nämlich (1.) den Grundlagen der Technischen Mechanik und insbesondere (2.) der Faserverbundmechanik. Die jeweiligen Lernziele werden vorgestellt und die unter den jeweiligen Gegebenheiten gewählten Umsetzungsansätze erörtert. Besondere Bedeutung wird dabei der Systematisierung des Wissens in sog. Wissensnetzen beigemessen.

4.1 Zielsetzung

Nach Auffassung von EBERLEIN et al. (2005) verpufft das unbestritten große Potenzial der neuen Medien für die Lehre ungenutzt, wenn daraus lediglich Wissensablagesysteme entstehen. Sie bemängeln am sog. E-Learning der ersten Generation, dass dieses zu statisch ist und eher auf die Studienorganisation als auf den Lern- und Verständnisprozess Einfluss nimmt. Allein die Bereitstellung von Dokumenten zu deren Distribution reicht nicht aus, um bessere Lernmotivation und somit bessere Lernergebnisse zu erzielen, argumentiert KERRES (2003).

Hochschulen setzen in jüngster Vergangenheit vermehrt auf E-Learning, das individuell auf die Bedürfnisse des einzelnen zugeschnitten ist, eher als das die Präsenzlehre zu leisten vermag. Mit den beiden im Folgenden kurz skizzierten Projekten wurde der Grundstein für die Konzeption und den Entwurf der Online-Lehrinhalte gelegt, die Gegenstand dieser Arbeit sind und der beiliegenden DVD "E-MECHLAB" bzw. dem Internetauftritt E-MECHLAB (2011-ol) entnommen werden können. Eine Bestrebung zum Generieren von interaktiven Arbeits- und Lernumgebungen zur Mechanik wurde gefördert im Rahmen des BMBF-Projekts "Nemesis – New Media Support and Infrastructure" (hier: Teilprojekt B3: "Content-ReUse in Virtuellen Laboren", Förderung 10/2005 bis 06/2008) und durch das Projekt "OWL – Offensive Wissen durch Lernen" der TU Berlin, welches zu einem Teil "Neue Lehr- und Lernmaterialien in der Mechanik" (NeLe-Mech) unterstützt (Förderung 07/2006 bis 06/2008).

New Media Support and Infrastructure (Nemesis): Das Teilprojekt B3 dient der Bereitstellung konkreter Problemstellungen, des sog. Content-Pools, aus den Themenschwerpunkten zweier Pilotprojekte der Mechanik. Für diese zunächst zu definierenden Mechanik-Pilotprojekte sind virtuelle Labore zu konzipieren und auf einer gemeinsamen Plattform unter Berücksichtigung des Nutzerfeedbacks zu implementieren. Ebenso wie ein reales Labor sollte auch ein virtuelles Labor für unterschiedliche Zielgruppen nutzbar sein. Es sind also geeignete Schwerpunkte bei der Auswahl der Inhalte zu setzen. Dies erfordert sowohl eine klare didaktische Struktur als auch eine flexible Softwarearchitektur.

Neue Lehrmethoden in der Mechanik (NeLe-Mech) baut mit seiner Zielsetzung darauf auf. Es beinhaltet die Content-Entwicklung für die Lehre zur Technischen Mechanik, speziell angepasst auf und zur Integration in die Grundstudiumslehre der Mechanik 1 bis 3 an der TU Berlin. Klare Zielvorgabe ist hier die Verbesserung der Lehre bei und trotz stetig ansteigender Studentenzahlen.

4.2 Begriffsdefinitionen und Grundlagen

Die Konzeption einer optimalen Lehr- und Lernumgebung setzt notwendigerweise das Verständnis um die Prozesse des Wissenserwerbs und der Wissensvermittlung voraus. Daher beschäftigt sich dieser Abschnitt zunächst mit zentralen Begriffen dazu und greift einzelne wesentliche Aspekte daraus auf, beginnend mit den virtuellen Laboren. Anschließend folgt eine Begriffsklärung und historische Betrachtung zur Wissensvermittlung mit E-Learning, woran sich didaktische Überlegungen zur Aufnahme von Wissen anschließen. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Themenfelder aufgrund von deren Komplexität jeweils nur angerissen werden und dies nicht als abschließende Literaturrecherche verstanden werden kann.

4.2.1 Virtuelle Labore

Virtuelle Labore sind per Definition von JESCHKE (2009) "virtuelle Räume, die realen Laboren nachempfunden sind, und in denen – computergestützt – Experimente entworfen, "aufgebaut" (erstellt) und durchgeführt werden können." Sie dienen dem vereinfachten Verständnis von bestimmten technischen Problemstellungen und bilden einen Ausschnitt aus der realen Welt ab. Virtuelle Labore werden in der Lehre eingesetzt, wenn reale Experimente

 \rightarrow zu gefährlich,



Bild 4.1: Idee eines virtuellen Labors [Bildquelle: JESCHKE (2004)]



- \rightarrow zu kostspielig (die Idee stammt aus der kostenintensiven Mediziner-Ausbildung),
- \rightarrow zu groß,
- \rightarrow zu betreuungsintensiv (hohe Studierendenzahlen),

etc. wären. Weiter führt JESCHKE (2009) aus, dass im virtuellen Labor, wie es Bild 4.1 skizziert, keine Beschränkung besteht, ausschließlich das Experiment durchzuführen, sondern auch der "*Prozess des Versuchsdesigns und Versuchsaufbaus*" selbst kann Gegenstand des Lernerlebnisses sein und abgebildet werden. Virtuelle Labore können gänzlich virtuell durchführbare, simulationsbasierte Experimente beinhalten oder das Fernsteuern von realen Experimenten zum Ziel haben ("Remote Experiments"), ebenso sind Mischformen zwischen diesen beiden Extremen denkbar, stellt JESCHKE (2004) fest. Der Fokus dieser Arbeit richtet sich ausschließlich auf erstere, virtuell der Realität nachempfundene Experimente, da die in Betracht kommenden Versuche zu gefährlich und ihrem Wesen nach nicht geeignet sind, um ferngesteuert zu werden.

Als allgemeine Veranschaulichung eines virtuellen Labors für Ingenieure zeigt Bild 4.2 einen exemplarischen Aufbau mit Exponaten zur Technischen Mechanik und zur Spannungsoptik. Durch die 3D-Form des Raumes können sich Studenten frei bewegen und mit unterschiedlichen Objekten agieren. Die bereits bekannten Darstellungen von Objekten ermöglichen somit eine Umgebung, in welcher eingetaucht, nachgeschlagen, und virtuell gelernt werden kann. Die Oberfläche eines virtuellen Raumes ist der Wahrnehmungsbereich des Nutzers. Unterschiedliche Nutzergruppen der virtuellen Räume fassen Informationen unterschiedlich auf. Unter dem Aspekt ist es besonders wichtig, einheitliche und verständliche Formen wie beispielsweise Möbelstücke oder Versuchsgegenstände in den Raum zu integrieren.

Das virtuelle Labor kann darüber hinaus um eine beliebige Anzahl an Mechanikmodulen erweitert werden. Diese werden auf den folgenden Seiten näher erklärt. Das hat den Vorteil, dass ein virtuelles Labor mit unterschiedlichen Modulen aufgefüllt und somit der virtuelle Raum an die jeweilige Lehre angepasst werden kann. Dies ermöglicht, für Studenten mit unterschiedlicher Fachherkunft ein individuelles Labor einzurichten.

Weiterhin unterscheidet NOWACZYK (2005) simulationsbasierte virtuelle Labore anhand der Ausprägung der Medienfunktionen in solche, bei denen die möglichst realitätsgetreue virtuelle Nachbildung des Laborraums in 3D und der Abläufe darin im Vordergrund stehen, wobei die Handlungsoptionen des Anwenders und die Reaktionen der Lernanwendung darauf häufig ggü. der Realität eingeschränkt sind, wie NOWACZYK (2005) bemängelt und solchen, "*die eher Konstruktionsumgebungen für Versuchsaufbauten aus abstrakten Symbolen bilden*". Mit letzteren sind Lernanwendungen gemeint, die für den Anwender Werkzeuge bereithalten, "*mit denen er selbst Objekte kreieren, Ideen visualisieren oder Modelle entwerfen kann*" [SCHUL-MEISTER (2003)]. "*Experimentierfähig werden diese Umgebungen dadurch, dass ausgehend von den erstellten Modellen Simulationsroutinen diese berechnen*" [NOWACZYK (2005)], somit der Einfluss der Veränderung einzelner (Konstruktions-) Parameter studiert werden kann. NOWACZYK (2005) tituliert letztere "*experimentierfähige grafische Konstruktionsumgebungen*" als interessanteste Klasse von virtuellen Laboren, zu denen er auch die im Rahmen seiner Arbeit entstandenen Mechanik-EXPLORATIONEN (MechADO, Beamex, etc., vgl. Abschnitt 4.4.2.3) zählt und auf die wir uns in den Folgenden Abschnitten konzentrieren.



Bild 4.2: Visualisierung von möglichen experimentellen Aufbauten aus dem Themengebiet der Mechanik [FERBER (2000)]

Die Arbeiten von NOWACZYK (2005) und JESCHKE (2004) vertiefen und diversifizieren diese Begriffsdefinitionen noch weiter, auf welche daher an dieser Stelle verwiesen sei.

4.2.2 E-Learning und Online-Lehre

E-Learning ist ein weit gefächerter Begriff. SCHEFFER/HESSE (2003) zufolge sind zur Erschließung des Begriffs die beiden Komponenten "E" + "Learning" gesondert zu betrachten, wobei das "E" in erster Näherung seines Wortursprungs mit "electronic" gedeutet werden kann, oder weiter gefasst mit "easy", "effective", "entertaining" und "elaborated". Der Trugschluss könnte jedoch darin liegen, dass diese Interpretationen unterstellen mögen, das Lernen

R



Der Begriffsbestandteil "Learning" ist Untersuchungsgegenstand der Lernpsychologie und mündet in den unterschiedlichen Lerntheorien Behaviorismus, Kognitivismus und Konstruktivismus. Näheres dazu ist u. a. in BAUMGART (2007), KIESEL/KOCH (2011) und HOBMAIR (2008) nachzulesen.

Betrachtet man die zugegebenermaßen recht kurze Geschichte des E-Learnings im heutigen Sinne, so beschränkt sich diese auf die vergangenen sechs Jahrzehnte und ist durch die rasante Entwicklung und Verbreitung von Internet und Computern geprägt. JÄGER (2006) sieht die Anfänge in der Lehre der Telekollegs in den 1960er Jahren und die weiteren Meilensteine in der Entwicklung der Telekommunikationsmedien mit Usenet ab 1979, E-Mail ab 1995 und HTML ab 1989. LITTLEJOHN/PEGLER (2007) ergänzen den Meilenstein Computer als technische Voraussetzung um die Anpassungsfähigkeit von deren Benutzern als weitere wichtige Bedingung. Einfluss auf den Wandel in der universitären Lehre hat die Etablierung von E-Learning z. B. in Form von blended Learning oder gänzlich virtuellen Hochschulen genommen.

Die Vorteile von E-Learning gegenüber dem klassischen Lehrangebot liegen in der zeitlichen und örtlichen Unabhängigkeit vom Lehrenden: der Lernwillige lernt wann und wo er möchte in der von ihm eigens bestimmten Lerngeschwindigkeit sowie der Priorisierung von Lehrinhalten nach individuellen Interessen (siehe z. B. BAUMGARTNER/REINMANN (2007)). Die Grundlagen zu modernen Einsichten in das E-Learning sind daneben bspw. in SCHULMEISTER (2006) und (2007) oder EBNER/SCHÖN (2011) zu finden.

4.2.3 Der didaktische Ansatz

Aufnahme von Informationen

Um eine möglichst optimale Lehr- und Lernumgebung zu konzipieren, ist es ratsam, zunächst die Prozesse des Wissenserwerbs und der Wissensvermittlung zu verstehen. In Tabelle 4.1 ist dargestellt, wie sich unterschiedliche Präsentationsweisen von Lehrinhalten beim Lernenden zu einem Gesamtlernerfolg akkumulieren.

Verteilung der Informationsaufnahme im Gedächtnis	[%]
akustisch	20
optisch	30
akustisch und optisch	50
akustisch und optisch im Zusammenhang angewendet (z. B. Film)	90

Tabelle 4.1: Abspeicherung von Informationen im menschlichen Gehirn [BAAKE et al. (2005)]

Wie muss Online-Lehre nun gestaltet sein, um zu einem möglichst großen Lernerfolg beizutragen? Zum didaktischen Konzept dieser virtuellen Laborumgebung halten wir gemäß der von SCHULMEISTER (2000) aufgestellten Aspekte fest:

→ Aufmerksamkeit erlangen und aufrecht erhalten:

Fiktive Alltagsprobleme, bekannte Beispiele nennen \Rightarrow schafft Vertrautheit, nimmt Befangenheit ggü. Unbekanntem \Rightarrow regt den Lerner an, durch Interesse an der richtigen Antwort, Lösungen anzudenken.

→ Lernende über **Lernziele** informieren:

Eindeutige, aussagekräftige Überschriften wählen; dann Ausschweifen möglich; am Ende auf Ausgangsposition zurückkommen, um den Kreis zu schließen (Ringerklärweise).

→ Frühere Lernerfahrungen einbeziehen, die Erinnerung wecken und daran anknüpfen: Assoziationen in Form eines Beispiels einbringen.

→ Lernmaterial (gut) präsentieren:

Übersichtlich und selbsterklärend, mit kurzem und aussagekräftigem Text, konsistentem Webseiten-Aufbau nach wiederkehrendem Muster (Wiedererkennungseffekt!) mit Navigationsleiste und ausreichend großer, serifenloser Schrift.

→ den Lernenden unterstützen:

Erläuterungen, Erklärungen, Beispiele und Informationsaustauschplattformen anbieten.

- → den Lernenden Gelerntes anwenden lassen, informatives Feedback anbieten und Lernfortschritte evaluieren (auswerten, beurteilen):
 Übungen zur Wissensüberprüfung mit Rückmeldungen vorsehen, die die Aussage bestätigen oder mit Begründung korrigieren.
- → Erlerntes behalten und den Wissenstransfer fördern:
 Diskussionen über analoge Beispiele auf Austauschplattformen anregen.

Interaktives Lernen

Eine Recherche des Begriffs "E-Learning" führt unweigerlich zu Interaktivität als zentralem Aspekt digitaler Lernmedien (vgl. bspw. NOWACZYK (2005)). "*Interaktives Lernen beinhaltet die bewusste Einflussnahme des Lernenden auf den Lerninhalt und -umfang.*" In Bezug auf die Wirksamkeit des Lernens liefert eine Studie aus dem Jahr 1985 zum Phänomen Computer, die nach einer Begründung für die stundenlange Nutzung bei Jugendlichen suchte, folgende Erkenntnisse [SCHULMEISTER (2000)]:

- → Die Anwendung gibt unmittelbar Rückmeldung auf jede Handlung des Benutzers (Interaktion). Verschiedene Anwender bauen sogar absichtlich Fehler ein, um möglichst viele Rückmeldungen zu erhalten.
- \Rightarrow Fazit: Interaktionen fördern Eigeninitiative und Neugier des Users.
- → Zwischenmenschlich hat Handeln soziale Konsequenzen: es führt zu positiven/negativen Reaktionen beim Gegenüber. Im Gegensatz dazu ist bei der Mensch-Maschine-Inter-

aktion zwischen Anwender und Computer das Handeln frei von Konsequenzen, das Revidieren von Fehlern ist möglich und bleibt ungestraft. Daraus folgt angstfreier Umgang mit dem Computer.

⇒ Fazit: Die Anonymität bietet die Chance für unbeschwerte Wissensvermittlung und insbesondere misserfolgsgewöhnten Jugendlichen einen Rückzugsort für effizientes Lernen.

4.3 E-MechLAB – virtuelle Labore für die Ingenieurausbildung im Bereich der Mechanik

E-MechLAB steht für die Idee, elektronische Lehre (E-Learning) auf die Ingenieurausbildung mit den gewohnten Elementen aus der Präsenzlehre zu adaptieren – explorativ in Laborform. Die Lerninhalte der Technischen Mechanik werden dabei vermittelt, die dazu in einem komplexen, hierarchisch strukturierten Dokumentenbereich organisiert sind. Diese Online-Lernumgebung mit integrierten virtuellen Laboren hat es sich zum Ziel gesetzt, diverse Lerntypen und Nutzer mit unterschiedlichster Vorbildung bedienen und optimal unterstützen zu wollen. Durch anschauliche Beispiele und interaktive Aufgabenstellungen richten wir einen Appell an den Spieltrieb in jedem, sich in unserer virtuellen Laborumgebung nach Herzenslust auszutoben. Mit all dem möchten wir vermitteln: Mechanik macht Spaß!

Die Internetpräsenz von E-MechLAB bietet zwei Anwendungsfelder (sog. "Pilotlehrveranstaltungen"), in die virtuelle Labore integriert werden. E-MechLAB entsteht in Kooperation der Technischen Universität Berlin mit der Universität Paderborn – und wächst stetig weiter – zur Unterstützung und Ergänzung der Mechanik-Lehre auf Basis einer kooperativen Wissensplattform. Hier wird ein Ansatz präsentiert, wie eine solche Wissensplattform um virtuelle Labore angereichert und zu einem bestimmten Wissensgebiet aufgebaut werden kann, die mehr als ein fachbezogenes Dokumentenmanagement-System darstellt. Als kooperative Wissensplattform wird dazu ^{open}sTeam genutzt. Näheres kann zu dem Open Source-Projekt ^{open}sTeam u. a. in HAMPEL/KEIL-SLAWIK (2001), KEIL-SLAWIK/HAMPEL (2001), HAM-PEL/KEIL-SLAWIK (2002), GEIBLER et al. (2004) und ^{OPEN}sTEAM (-ol) nachgelesen werden.

4.3.1 Konzept der Generierung von Online-Lehrmaterialien

Die Konzeption der Lernumgebung verfolgt die Frage, welcher Lehrinhalt mit welchen Methoden dargestellt werden soll und wie diese strukturell zu gliedern ist (zu letztgenanntem mehr im nächsten Abschnitt 4.3.2). Der Empfehlung von SAUTER et al. (2004) folgend steht die Festlegung auf den Inhalt zunächst im Vordergrund. Danach folgt erst die Klärung von Methoden und Techniken zur Implementierung, um zu vermeiden, dass entwickelt wird, was den geringsten technischen Aufwand erfordert im Gegensatz zu dem, was didaktisch sinnvoll wäre.

In diesem Abschnitt soll der Frage nachgegangen werden, was es bei der Aufbereitung von Lerneinheiten für die Online-Lehre zu beachten gilt. Gibt es spezielle Anforderungen, wie ein Wissensraum für den angehenden Ingenieur ausgestaltet sein muss oder ist generell – provokant gesprochen – je mehr, bunter, schneller und lauter auch gleichzeitig desto besser? Dazu bemerkt VESTER (2000) kritisch: "*Die Flucht in die moderne Informationstechnologie – in* der Hoffnung, durch Zugang zu mehr und genaueren Daten Komplexität besser durchschauen zu können – beschert uns eher einen Info-Overkill als eine reale Analyse." Die im World Wide Web er, surften" Informationen sind unvernetzt und i. d. R. unbewertet. Ein Sachverhalt kann auf diese Weise kaum in Gänze erschlossen werden. "Komplexität hat sehr viel mit Vernetzung zu tun, ja kommt erst durch Vernetzung zustande. Komplexe Vorgänge verlangen daher zu Ihrem Verständnis ein Denken in Zusammenhängen…", folgert VESTER (2000).

Die sich bei der Konzipierung eines virtuellen Labors stellende Kernfrage ist, wie vermittelt man ein bestimmtes visuelles oder haptisches Erlebnis virtuell? Dabei zählen Farbeindrücke ebenso wie die Bewegungswahrnehmung. Gleichzeitig soll eine ansprechende, hochwertige Optik des Webinterfaces einladend wirken. Indes befindet man sich auf der Suche nach der besten "Verpackung" des Lerngegenstands im Spannungsfeld zwischen einerseits "technischen Spielereien" durch das, was software-seitig möglich ist³⁸ und andererseits der Präsentation von nüchternem Faktenwissen [WUTTKE (2008)].

Unterschiedliche Schwerpunkte werden bei der Konzipierung beider Pilotprojekte gesetzt, wobei die vorliegenden andersgearteten Voraussetzungen und Rahmenbedingungen (viele vs. wenige Vorarbeiten, sofortige Einbeziehung in die Lehre vs. neu konzipierte Lehrveranstaltung, Grundlagen- vs. Vertiefungsveranstaltung, ...) genutzt werden, um parallel Lösungsstrategien zu erarbeiten. So steht im Pilotprojekt "Verbundwerkstoff-Mechanik", das Abschnitt 4.5 ausführlich beschreibt, vorrangig die Generierung und Einbindung interaktiver Elemente und experimentierfähiger Lern-Applikationen in die Laborumgebung sowie optionale Wissensüberprüfung im Mittelpunkt. Diese Bausteine dienen zusammen mit einer graphisch und inhaltlich dargestellten Struktur des gesamten Themengebietes als Gerüst der virtuellen Laborumgebung. Dabei entsteht in Summe ein möglichst geschlossener Kurs. Beim Pilotprojekt "Technischen Mechanik" hingegen, das Abschnitt 4.4 behandelt, werden lediglich punktuell nach Bedarf Lernangebote konzipiert, die die bereits vorhandenen multimedialen Lehrinhalte aus den früheren Multimedia-Projekten sinnvoll ergänzen.

4.3.2 Systematisierung und Navigation

Der Zugang zum Wissen ist der Schlüssel jedweden erfolgreichen Lernens. Wie navigiert sich der Anwender also erfolgreich online durch die Lerneinheiten?

Ausgehend von einer Einstiegswebseite werden bei E-MECHLAB unterschiedliche Zugänge zu Inhalten und virtuellen Laboren, die neigungsbedingt vom Anwender gewählt werden können, angeboten. Neben der herkömmlichen Navigationsleiste, wie sie bei den meisten Internetauftritten üblich ist, geschieht dies über grafisch aufbereitete Übersichten über das jeweilige Themengebiet, deren einzelne Elemente zu den Sub-Themengebieten verlinkt sind (siehe Bild 4.5 und Bild 4.23). Die Übersichtsgrafiken dienen als interaktive Visualisierungen zu den jeweiligen Lerneinheiten und die Visualisierung von deren Vernetzung untereinander ist zentraler Bestandteil des Konzepts der virtuellen Laborumgebung. WEDEKIND (2007) zufolge ist "Veranschaulichung… die am häufigsten genannte Funktion, wenn vom didaktischen Nut-

³⁸ Bspw. gehen KEIL-SLAWIK/NOWACZYK (2000) auf die Gefahr ein, "… dass nicht mehr die Funktionalität umsetzt wird, die für die Anwendung angedacht war, sondern nur die Effekte präsentiert werden, die die Entwickler des Autorensystem als prototypisch vorgesehen haben".



zen der Visualisierung gesprochen wird". Inhalte gewinnen durch deren Positionierung einen Mehrwert an Information (=semantische Strukturierung, vgl. z. B. EßMANN (2003), HAMPEL et al. (2005)). Werden Themengebiete nach ihrer inhaltlichen Verknüpfung angeordnet, erfahren die Anwender, wie einzelne Lerneinheiten voneinander abhängen oder aufeinander aufbauen. Eine Einordnung der Lerneinheiten in das globale Themengebiet der Technischen Mechanik bzw. Mechanik der Faserverbundkunststoffe und die Erschließung eines neuen Zugangs zu den dargebotenen, strukturierten Lerninhalten ist so jederzeit gegeben. "Als didaktische Visualisierung wird dann die zweck- und lernzielbezogene Veranschaulichung durch grafische Reduktion der Komplexität sinnlich wahrnehmbarer Erscheinungen auf die für den intendierten Lernprozess wichtigen Informationen bezeichnet" [ARMBRUSTER/ HERTKORN (1978)]. "Diese Darstellungen können Zustände, Verläufe und Strukturen beinhalten, d. h. es werden abstrakte Daten oder Zusammenhänge in eine grafische bzw. visuell erfassbare Form gebracht. Dafür haben sich einige Grundformen der Darstellung herausgebildet: Charts, Diagramme, Piktogramme sowie schematische bis realistische Abbildungen" [WEDEKIND (2007), vgl. auch BALLSTAEDT (1997)].

Zentrale Frage dazu ist: Wie zerlegt man Wissen (anschaulich und möglichst objektiv) zu kleinen Lerneinheiten? VESTER (2000) spricht von der "Klassifizierungsinformation". "*Das Klassifizierungs-Universum ist dasjenige unserer abendländischen Tradition.*" Dieses Klassifizierungs-Universum ist hierarchisch aufgebaut und seine Inhalte sind in Kategorien einteilbar, die sich gegenseitig ausschließen. Eine solche Unterteilung ist statisch und objektiv. Die übergeordneten Kategorien sind allgemeiner Natur, die untergeordneten spezieller; möglichst eindeutige Überbegriffe sind dafür zu finden. [VESTER (2000)]

Begriffsnetze

Begriffsnetze sind ein großer Gegenstand der Didaktikforschung. Sie werden am häufigsten verwendet, um die Struktur und Wechselwirkung von Wissen bildlich darzulegen [JA-NETZKO/STRUBE (2000)]. Zu beachten ist dabei jedoch, dass der Vorteil der gesteigerten Übersichtlichkeit mit zunehmender Größe des Netzes und Anzahl der Begriffe verloren geht ("lost in hyperspace"-Phänomen [EDWARDS/HARDMAN (1989)]). Es gilt folglich, einen Kompromiss zwischen möglichst vollständigem Umfang der relevanten Informationen und Überschaubarkeit des Netzes zu finden, um dem Adressaten den bestmöglichen Informationsgehalt – möglichst selbsterklärend und erfassbar – zu präsentieren.

Eines der seltenen Beispiele in der Literatur für die Anwendung eines Begriffsnetzes auf mechanische Sachverhalte, die im Rahmen dieser Arbeit von besonderem Interesse sind, soll mit Bild 4.3 gezeigt sein. Darin beschreiben PLÖTZNER et al. (2000), "wie Mapping-Techniken bei der Analyse von Wissensstrukturen im Bereich der klassischen Mechanik eingesetzt werden können". Sie stellen die These auf, dass bei Lernenden im Vergleich zu Experten häufig die Koordinationsleistung zur Vernetzung des Wissens fehlt, sodass sie bei komplexen Aufgabenstellungen nicht in der Lage sind, die einzelnen ihnen bekannten Bausteine zur richtigen Problemlösungsstrategie zusammenzufügen. "Die Wissensbestände… sind… oft in nahezu unverbundenen Strukturen organisiert… . Im Gegensatz dazu verfügen Fachleute über umfangreiche Wissensbestände, die in hierarchisch geordneten Strukturen mit zahlreichen Querverbindungen organisiert sind." Daraus folgern PLÖTZNER et al. (2000), dass das Aneignen



Bild 4.3: Beispiele für die Anwendung eines Begriffsnetzes in der Lehre zur Technischen Mechanik: "Die Gewichtskraft auf der Erde" [Bildquelle: PLÖTZNER et al. (2000)]

von Wissensstrukturen durch "die Vermittlung von Wissen mit Begriffsnetzen" "unterstützt werden" kann und "dass in Gegenstandsbereichen wie der klassischen Mechanik die systematische Unterstützung der Anwendung von konzeptuellem Wissen" die Anwender "in die Lage versetzt, sich zunächst nicht erkennbare und abstrakte Merkmale von Problemen zu verdeutlichen und darauf aufbauend bekannte Formeln zielführend anzuwenden bzw. noch fehlende Formeln abzuleiten".

Hierarchische Strukturierung der Mechanik-Inhalte anhand von Wissensnetzen

Als innovative Gedanken zur konkreten Umsetzung bieten sich einerseits

- → ein holistischer (ganzheitlicher) Ansatz (hierarchisch aufgebaute Themenübersicht wie z. B. in Bild 4.23) und andererseits
- \rightarrow ein serieller Ansatz (Lehrpfad durch die Lerneinheiten, vgl. Bild 4.24)

als Zugang zu den einzelnen Wissensgebieten der Online-Lehre an. Das setzt einen vollständig modularen Aufbau der einzelnen Lektionen voraus, der dem Anwender idealerweise ermöglicht, überall einzusteigen und in der Lage zu sein, die Lerneinheit zu verstehen.

Eine Präsentation der Lerneinheiten erfolgt nach **holistischem Ansatz** und wurde als Parallelangebot zu einem **geführten Kurs für serielle Lerner** generiert. In den Ingenieurwissenschaften gibt es überwiegend visuell-haptische Lerntypen, somit wurde überwiegend auf bildliche Darstellungen und quantitative Einordnungen Wert gelegt. Die eigentlichen virtuellen Labore sind thematisch eingebettet in den Lernkontext.



4.3.3 Softwareergonomie der Lernumgebung

"Die Aufgabe des Designers von Multimediaumgebungen besteht darin, die Interaktionssemantik des Benutzers mit der Interaktionssyntax des Programms in Deckung zu bringen." [SCHULMEISTER (2007)]

Das Maß der Interaktivität des Benutzers mit einer Online-Lehr- und -Lernumgebung wird zwischen reinem Betrachten von dargebotenem Wissen oder Grafiken, bewegten Bildern in Form von Animationen, der Manipulation von Ansichten, der Variation von Parametern, dem Kreieren bzw. Konstruieren eigener Inhalte mit dafür bereitgestellten Werkzeuge und letzterem incl. Expertenrückmeldungen unterschieden (=Taxonomien³⁹ der Interaktivität) [WEDE-KIND (2007)]. Wichtig ist dabei jedoch, den Anwender nicht zu überfordern und im Rahmen seines Erfahrungshorizonts zu bleiben. Wird dieser überschritten, sind Hilfestellungen und Anleitungen in der Online-Lehr- und -Lernumgebung erforderlich.

HESSE/MANDL (2001) fordern als Bedingung einer effektiven Lernumgebung ein Maximum an interaktiven Elementen und unterscheiden dabei nach dem Maß der Interaktivität folgende Arten von Lernbausteinen: grafische Navigation, Clickables, Rückmeldungen sowie Simulationen, wobei sie virtuelle Labore als Beispiel zu den letztgenannten zählen. Wir nutzen eine Kombination aus den unterschiedlichen Lernbausteinen, um die virtuellen Labore in Kontext einzubetten, der hier als virtuelle Laborumgebung bezeichnet wird. Über eine Einstiegswebseite, die Bild 4.4 zeigt, gelingt der Zugang. Auf seinem Weg durch die Laborumgebung findet der Anwender innerhalb der bebilderten Texte neben eingebetteten Audio- und Video-Dateien weitere Lernanwendungen wie Animationen, Übungen oder virtuelle Labore. Andersfarbig abgesetzt erhält er die Aufforderung, etwas zu tun, auszuprobieren oder zu erleben.

T			STERATE (Almelder)	t.
			d' Navigation D Suche & Ruckaack M Nachrichten 10 Gruppen Suchlageff	uchen
2 and	TU Berlin 🛛 Multimediazentrum MeLT 🔹 Projekt Nemesia 🖬 Projekt CWL 🔛 E MechLAB		Webauftritt With Annu The methating labe software The Webaufter	
Home TechnischeMechanik	E-MechLAB		🔄 Inhait 🛛 🗿 Egenschaften 🗧 😋 Aktonen 🖉 🛃 Kommentare 🖉 🖵 Recitte 🗍	
Verbundwerkstoff-	Virtuelle Labore für die Ingenieursausbildung im Bereich der Mechanik	Kontakt	Name Golde Rearbeitstate Details	
Mechanik public relations Impressum Eigener Bereich	E-MechLAB staht für die ldee, elektronische Lehre (E-Learning) auf die Ingenieursausbildung mit den gewohnten Elementen aus der Plasseruchter zu adaptieren - explorativ in Laboform. Die Leminhalte der Technischen Mechanik werden werntett. Biese Online-Lemungsbung aus vituellen Laboren hat es sich zum Zeil gesetzt, diverse Lemtypen und Nutzer mit unterschellichter Vorbitationg bedenen und orginal unterstätzen zu weißen.	kabel Kole Universitä Padarborn Fatutät für Maschinenbeu Pohweg 99 33096 Paderborn	Technischethechant Presentatie Lakongeberg der Ochsthulumenwasstahlung. Deser Presentatie Lakongeberg der Staten auf dem Lakhads zu der Gendungen Presentatie Lakongeberg der Staten auf dem Lakhads zu der Gendungen Presentatie Lakongeberg der Staten auf dem Lakongeberg Presentatie Lakongeberg der Staten auf dem Lakongeberg Presentatie der Staten auf der Staten auf dem Lakongeberg Offentatie Auf die Statenbart verVerlenunge über selle Jahre, Die Offentatie Presentatienen	
	Auf den folgenden Webseiten finden Sie zwei erste Anwendungsbeispiele solcher virtueller Labore. Hier entstand in Kooperation von der Technischen Universität Berlin mit der Universität Paderborn eine	Raum: W 3.101 Telefon: +49 5251 60-5560 Telefax: +49 5251 60-5579	Verbundwerkstoff-Hechanik 6 visualle Labourgebung zur Hauptstudiumsveranstationg 6 Objekte 15516 0 0 0 10 11 10 10 10 10 10 10 10 10 10	
	E Learning Plattform zur Unterstützung und Ergänzung der Mechanik Lehre und wächst weiter.	E-Mail:	public relations 3 20.06.2007. 0 % 20.27	
	Name Beschreibung	Isabel.Koke@TU-Berlin.de	Außendarstellung von Nemesis Objekte marting	
	vituele Laborningsborg zur Grundstudumsveisnistating. Dieser E-Laming-Bereich basier auf dem Lehrbechz zu den Grundlagen der Technischen Mechanik Technische Mechanik für Ingenieure Technischellechanik für mechAlvilm tarekzi-vinn verblagen zur Auflier und Ferderand Fehrer und ist das Resultat von Vorlesungen über wiel. Jahre. Die multimedialen Lehrmetanelien in sind vorlesungsbegleitend		Impression 10	a .
	entstanden.	I	abstract-r.html 1 ki <u>17:06 - koke</u> 0 % <u>17:06 - koke</u>	۳
	Mechanik virtuelle Laborumgebung zur Hauptstudiumsveranstaltung	I	□ <u>config.xml</u> 1 ×8 26.06.2007. 18:02 - koke 0 👟 🚮 🗢	P
	public relations Außendarstellung von Nemesis	I	News 6 02.06.2008. 0 92 P	
	Impressum Namen und Fakten zu den Autoren, kreativen Köpfen und Gestaltern dieses E-Learning-Bereichs		Alle Objekte	
	News:		Aktingen und Dateilteansfer	
	Ende des Normeis-Projekts Das Projekt liemessis kurlt Ende Juni 2008 aux. Semantlich: Markhäridet Lernelahöleten Im Wege einer semantlischen Strukturierung von Lerneinheiten gewinnen Inhalte durch deren Prolitionierung einen Mehrwert an Information. Dieses Konzept wird verfolgt durch die grafischen		The solution (a) (b) (c) (c) (c) (c) (c) (c) (c) (c) (c) (c	
	Übersichtsschaubilder zur Technischen Mechanik, Statik, Festigkeitslehre, Dynamik, Kontinuumsmechanik und den Energiemethoden auf der einen Seite und auf der anderen bei der Verbundwerkstoff-Mechanik.		hochiaden <u>Container</u> Link Forum Dokumen	5

Bild 4.4: Einstiegswebseite zur virtuellen Laborumgebung und Backend der Kooperationsplattform ^{open}sTeam

³⁹ Taxonomie = "ein systematisches Klassifikationsschemata zur Ordnung von Dingen, Erscheinungen, Prozessen etc. nach einheitlichen sachlogischen Prinzipien, Verfahren und Regeln" [BAUMGARTNER (2011)]

 \mathbb{Q}

Auf eine strikte Vermeidung von (störenden) Medienbrüchen⁴⁰, was bspw. NOWACZYK (2005) als positives Merkmal von digitalen Medien hervorhebt, wird hier bei der Adaption auf die Ingenieurwissenschaften bewusst verzichtet, da es situativ sinnvoll erscheint, dem Anwender den Gebrauch des Mediums Papier bspw. zum Herleiten einer Formel oder dem Durchführen einer Nebenrechnung als einfachstes Medium anzuraten. Darin dürfte einer der wesentlichen Unterschiede im Vergleich zu E-Learning-Anwendungen in den Geisteswissenschaften oder der Informatik wie auch allgemein Bereichen, in denen es hauptsächlich um das geschriebene Wort geht, handeln! Dahinter steckt jedoch nicht die Problematik der Weitergabe von Zeichen (Zwischenergebnissen) von einer Anwendung zur nächsten, sondern das aus didaktischen Gründen sinnvolle Nachvollziehen einzelner Schritte und die alltagspraktische Unterstützung dieses Prozesses.

4.3.4 Farbpsychologie und Corporate Design

Wie beim ersten Eindruck, den ein Mensch beim erstmaligen Aufeinandertreffen bleibend oder nicht bleibend hinterlässt, entscheidet die (Farb-) Gestaltung einer Webseite darüber, ob sie ihn anspricht oder nicht. Falls nicht, kann sich der didaktisch wertvollste Inhalt dahinter verbergen, er bleibt dennoch unbetrachtet. Dabei spielt sich eine Menge im Unterbewusstsein ab. Farbpsychologie ist solch ein spannendes Thema, dessen Einfluss auf die Akzeptanz eines Produktes häufig unterschätzt wird. Grundsätzlich empfiehlt die Literatur – was gleichermaßen für Präsentationen als auch Webauftritte gilt –, pro Seite lediglich zwei Farben plus deren Schattierungen neben schwarz und Graustufen einzusetzen. Die größte Farbspannung und somit den besten Kontrast ergeben komplementäre Farben wie z. B. blau und orange (das wussten schon die Macher von der "Sendung mit der Maus"...), wobei orange als warme Farbe näher im Vordergrund empfunden wird im Gegensatz zum kalten blau, das vom menschlichen Gehirn als weiter weg interpretiert wird. Es sei an den zeitweisen Trend erinnert, bei Präsentationen orange Schrift auf blauem Hintergrund zu verwenden, da der Kontrast hervorragend ist, die Augen jedoch nicht so stark davon angestrengt werden wie bei der Verwendung von schwarz auf weiß.

Bei der Gestaltung der Lernumgebung wird in der vorliegenden Arbeit viel Wert auf die Verwendung eines einheitlichen Layouts und Farbschemas gelegt, welches sich durch die einzelnen Online-Lernanwendungen in der virtuellen Laborumgebung zieht. In Analogie zum gesagten greifen wir die warmen dunklen Rot- und kühlen hellen Blautöne aus dem Internetauftritt der TU Berlin auf, sodass eine darauf abgestimmte Farbwahl im Sinne des Corporate Design-Konzepts den E-MechLAB-Webauftritt auszeichnet. Durch die optische Angleichung des Erscheinungsbildes von E-MechLAB wird die Eingliederung in das Corporate Design der TU Berlin bzw. an deren Online-Präsenz erzielt. So fügt sich die Webpräsenz nahtlos in das vertraute virtuelle Umfeld der Studenten ein und sorgt für den Wiedererkennungseffekt. Die Lernplattform zeigt eine optische Rahmenstruktur, ein sog. Stylesheet, welches bekannte Elemente repräsentiert. Das erhöht die Akzeptanz bei der Zielgruppe der studentischen Lerner

⁴⁰ Als Medienbruch wird dabei HAMPEL (2001) zufolge der *"technologisch erzwungene Wechsel des verwendeten Mediums"* verstanden, der beispielsweise *"bei der Ausübung von Handlungen an Materialien"* wie dem Ausdrucken von Skripten und Notieren individueller Anmerkungen darin vorkommt, die später nicht mehr jedem Anwender ortsunabhängig und in digitaler Form zugänglich sind.



4.3.5 Anwenderzentriertes Konzept

Anwender kennen ihre Verständnisschwierigkeiten aus eigener Erfahrung am besten. Daher wird hier das Konzept "von Studierenden für Studierende" verfolgt, was gleichermaßen durch ein niedriges Einstiegsniveau verschiedene Anwendergruppen anzusprechen versucht, um damit einen Beitrag zu leisten, die von MICHAELI et al. (1995) beschriebene, "zwischen 'Anfänger und Spezialistenliteratur' klaffende inhaltliche Lücke" zu schließen.

Gender-Gedanken

Um der häufig bemängelten geringen Frauenquote in den Ingenieurwissenschaften mit unter 20 % entgegen zu wirken, gibt es Bestrebungen seitens der Politik, das Interesse an den sog. MINT-Fächern (= Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften, Technik) zu steigern, woran Schulen und Hochschulen intensiv zusammen arbeiten, vgl. z. B. KMK (2008-ol). Zurückgeführt wird dies neben einem gesellschaftlich anerzogenen Geschlechterrollenbild in Bezug auf die Berufswahl zum Teil auch darauf, dass die Lehre und die Lehrmethoden (Didaktik) in einem Bereich von dem geprägt sind, der sie lehrt. "Wenn es in einer klassischen Disziplin überwiegend männliche Forscher gibt, dann sind die Modelle auch durch deren Sicht der Dinge geprägt" [GÖTSCHEL (2009)]. In den Ingenieurwissenschaften dominieren männliche Professoren. Somit liegt der Verdacht nahe, dass ein männlicher Professor Wissen in einer Form vermittelt, die – ausgehend von dem, was er kennt und auf den eigenen Lernerfolg in seiner Vita zurückführen kann – überwiegend auf männliche Lerner zugeschnitten ist. Wie sollte Lernstoff also aufbereitet sein, der gleichermaßen weibliche wie auch männliche Lerner anspricht?

Unterschiedliche Zugänge zum Lernstoff sind auch vor dem Gender-Aspekt mit in die Überlegungen zum Umsetzungskonzept einzubeziehen. "Gender' ist das englische Wort für das "soziale Geschlecht" abweichend zur Bezeichnung des "biologischen Geschlechts" ("Sex'). Die Genderforschung betrachtet Prozesse von einer Metaebene und hinterfragt, warum sich etwas in einer Disziplin wie entwickelt hat. Ein sich hartnäckig haltendes Gerücht/These besagt, dass "die individuell unterschiedliche Herangehensweise beim Aneignen neuen Wissens Auswirkungen auf das Lernen sowie die persönliche Leistung hinsichtlich des Lernergebnisses hat" [STAEMMLER (2007)]. Die Informationsorganisation wird dabei nach dem Grad der Detailorientierung unterschieden [STANGL (-ol)]. So sollen weibliche Lerner Inhalte eher fassen können, wenn sie sie in einen gesamten Themenkomplex einordnen können: erst die Übersicht, Zusammenhänge, dann werden die einzelnen Schubladen mit Wissen gefüllt (= holistische Lernstrategie: vom Allgemeinen ins Spezielle, eingangs verschafft sich der Lerner einen Überblick und betrachtet gewöhnlich mehrere Gesichtspunkte gleichzeitig ("top-down-Vorgehensweise aus dem Gesamtzusammenhang", wobei sie gem. STANGL (-ol) dazu neigen, Details weniger Bedeutung beizumessen). Dem gegenüber sollen männliche Lerner eher serielle Lerntypen sein (=serialistische Lernstrategie: Schritt für Schritt wird der Lernstoff dabei anhand einer festen Struktur durchgearbeitet mit starkem Fokus auf Details. "Erst später wird ein allgemeines Konzept aufgebaut (bottom-up). Die Vorgehensweise ist überwiegend linear. Serialisten tendieren dazu, wichtige Querverbindungen zu übersehen." [STANGL (-ol)]). Beide

Q

Lernstrategien führen dabei gleichermaßen zum Erfolg, wie PASK/SCOTT (1972) feststellen (vgl. z. B. DITTMAR (2011)).

Es sei an den holistischen und den seriellen Ansatz für den Zugang zu den Wissensgebieten aus Abschnitt 4.3.2 erinnert, wobei wir nun wissen, dass Frauen dieser These zufolge vorwiegend holistisch aufbereitete Lernwelten bevorzugen, hingegen der serielle Ansatz im Regelfall eher männliche Lerner bedient (in Anlehnung an GÖTSCHEL (2009)) und wir somit in E-MechLAB ein Paradebeispiel für ein im Sinne der Geschlechterforschung aufbereitetes Selbstlernangebot finden.

4.3.6 Anwendungsbezogenes Konzept

"Wissenschaft und Wirtschaft – zwei ungleiche Partner, die sich nicht immer leiden können. Die eine Seite wird als zu praxisfern gescholten, die andere als zu profitorientiert. Wechselt ein Student nach seinem Abschluss die Seiten, prallen oft zwei Welten aufeinander. Doch das muss nicht so sein. …" [FIEDLER (2009)]

Die Ingenieurausbildung wird häufig als zu praxisfern gescholten. Beispiele konkreter technischer Anwendungen sind jedoch oft sehr komplex. Unter anderem sollte auch ein Ziel von E-Learning bzw. elektronisch unterstützter Lehre sein, solche komplexen Zusammenhänge zunächst modular in Teilprobleme zu zerlegen und dann wieder geeignet zusammenzufügen. Ein Beispiel für das Erreichen dieses anspruchsvollen Ziels ist das schrittweise Verständnis der Bestandteile und des Zusammenwirkens der Komponenten eines Baggers und schließlich seine kostengerechte Auslegung, wie in Bild 4.9 angedeutet [JÜTTE (1998)]. Ein Wiki spannt dabei den Bogen zur benutzerintegrierten Weiterentwicklung mittels Online-Lehre.

In den nun folgenden Abschnitten 4.4 und insbesondere 4.5 wird die inhaltliche Umsetzung der virtuellen Labore und ihrer kontextuell einbettenden Lernumgebung anhand von Pilotprojekten näher erläutert. Alle folgenden Erläuterungen sind sehr statisch und greifen nur punktuell einige Beispiele heraus. In Gänze lässt sich die Umsetzung erst auf der der gedruckten Dissertation beiliegenden DVD bzw. in dem Internetauftritt zu E-MechLAB (-ol) erfassen. Eine Erklärung kann das Erleben der DVD nicht vollständig wiedergeben.

4.4 Virtuelle Labore für die Grundlagen der Technischen Mechanik

Aus dem Bereich der ingenieurwissenschaftlichen Grundlagenveranstaltungen fällt die Wahl auf die Technische Mechanik als Pilotprojekt. Zum Forschungsgegenstand der multimedialen Wissensvermittlung in der Technischen Mechanik kann auf diversen Vorarbeiten u. a. von MÜLLER/FERBER (1998), (2003) sowie (2004), FERBER/HAMPEL (1998), KOKE/HUNEKE (2004) und den darin gewonnenen Erfahrungen mit der Lern-CD-ROM "mechANIma^{teach}" aufgebaut werden. Die angegebenen Quellen spiegeln die Entwicklung im Bereich der neuen Medien in der Ingenieurausbildung und die technische Weiterentwicklung, die diese erst möglich gemacht hat, wider. Die Anfänge dieser technischen Weiterentwicklung werden auch von KEIL-SLAWIK/NOWACZYK (2000) beschrieben, so dass hier der Fokus auf der Erarbeitung von strukturierten Zugriffsmöglichkeiten und virtuellen Laboren zu ausgewählten Themengebieten liegt. Die Konzipierung eines in sich geschlossenen Online-Lehre-Kurses zur Technischen



Zur näheren Spezifikation erfolgt zunächst im Sommersemester 2006 eine versuchsweise Nutzung bereits existierender Explorationen zur Technischen Mechanik, beschrieben in No-WACZYK (2005). Dabei gesammelte Erfahrungen fließen in deren Umgestaltung (vgl. dazu Abschnitt 4.4.2.3) bzw. die Konzipierung weiterer virtueller Labore ein. Parallel zur Verwendung der Explorationen erfolgt ab dem Wintersemester 2006/2007 die Nutzung der Lernplattform ^{open}sTeam, auf der die herkömmlichen digitalen Vorlesungs- und Übungsunterlagen durch weitere Lernanwendungen (siehe auch Abschnitt 4.4.2) zu den Vorlesungen des Instituts für Mechanik sukzessive ergänzt und angereichert werden, um somit allen Studenten der Mechanik eine zusätzliche Lernhilfe zu schaffen. Über die semesterbegleitenden Materialien werden die Studenten zunächst einmal in die virtuelle Laborumgebung E-MechLAB "gelockt", wo sie dann deren weiteren Features erfahren, erproben und damit "experimentieren" können. U. a. entsteht bedingt durch die aufkeimende Problematik um die Darstellung und Manipulation von Formeln im WWW eine virtuelle Bibliothek für die einzelnen Themengebiete der Mechanik, das Mechanik-Wiki. Die Kommunikations- und Kooperationsmöglichkeiten, die opensTeam bereithält, werden dabei zunächst von den Lehrenden und studentischen Hilfskräften zur Administration des Internetauftritts der Online-Lernumgebung und zur Abstimmung der zu generierenden Inhalte genutzt.

4.4.1 Übersichtsschaubilder

Das große Lernfeld der Technischen Mechanik wurde in oberflächenaktiven Übersichtsschaubildern gegliedert. Die Übersichtsschaubilder zeigen eine thematische Gliederung, die auch gleichermaßen die Verbindungen zwischen den einzelnen Lerneinheiten verdeutlichen soll. Sie spannen quasi den strukturellen Rahmen auf und geben die Wege für die Navigation – wie eine Art Landkarte – vor (siehe auch Abschnitt 4.3.2). Die dargestellten inhaltlichen Zusammenhänge orientieren sich an MÜLLER/FERBER (2008). Bei der Generierung der Übersichtsschaubilder wurde versucht, die Kapitelstruktur des Lehrbuchs in Sinneinheiten zu unterteilen, die mit den für die Studenten zu berechnenden Übungsaufgabenthemen korrespondieren. Die Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen diesen Sinneinheiten werden darin ebenfalls veranschaulicht.

Bild 4.5 zeigt die Verquickung der Lerneinheiten zur Technischen Mechanik. Fährt der Student mit dem Mauszeiger über die Grafik, werden ihm zusätzliche Informationen zu den Unterkapiteln über sog. "Mouseover" angezeigt (siehe Bild 4.6), klickt er darauf, gelangt er ins entsprechende Unterkapitel.

Q



Home

TechnischeMechanik Einführungs-Film Statik Festigkeitslehre

Dynamik Kontinuumsmechanik Energiemethoden

Mechanik-Wiki Inhaltsverzeichnis Themenübergreifende Aufgabenstellung

Mechanik-WHM Mechanik-UvW

Experimente am Institut für Mechanik Verbundwerkstoff-Mechanik public relations

Impressum

Eigener Bereich

Einführung in die Themengebiete der Technischen Mechanik

Das Gebiet der Technischen Mechanik wird nach seiner Grundaufgabe – der Untersuchung von Kräften und Bewegungen – in Kinematik und Dynamik unterteilt.

Die Kinematik beschäftigt sich ausschließlich mit dem zeitlichen und geometrischen Bewegungsablauf und ist ein essentielles Werkzeug, um die in der Dynamik betrachteten Kräfte und die dadurch verursachten Bewegungen zu untersuchen. Dabei befasst sich die Statik mit den Kräften und dem Gleichgewicht als Sonderfall der Ruhe, während die Kinetik tatsächliche Bewegungen unter der Wirkung von Kräften untersucht.

Ein weiterer umfassender Bereich der Technischen Mechanik ist die Festigkeitslehre. Hier wird beispielsweise die Stabilität eines Trag- oder Bauwerks mit Hilfe der in der Statik und Dynamik ermittelten Kräfte untersucht.



Dieser E-Learning-Bereich basiert auf dem Lehrbuch zu den Grundlagen der Technischen Mechanik "Technische Mechanik für Ingenieure mit mechANima teach" von den Herren Prof. Wolfgang H. Müller und PD Dr.-Ing. Ferdinand Ferber, welches aus aus deren Vorlesungstätigkeit über viele Jahre resultiert. Der Grundstein für die mit dem Lehrbuch zusammen herausgegebenen multimedialen Lehrmaterialien sind vorlesungsbegleitend entstanden. Aufbauend auf diesen Erfahrungen wurden zwei Projekte zur Online-Lehre ins Leben gerufen, deren Ergebnisse auf diesen Webseiten im "E-MechLAB" eingesehen werden können. Nähere Informationen dazu finden Sie im Impressum.

Name	Beschreibung
Einführungs-Film	Vorlesungsausschnitt von Herrn Prof. Müller zur Einordnung der Technischen Mechanik
Statik	Statik ist die Lehre von Kräften, die an ruhenden Objekten - also solchen, die gerade nicht in Bewegung sind - wirken. Im Zustand der Ruhe befindet sich ein Körper, wenn sich die auf ihn einwirkenden Kräfte gegenseitig kompensieren. Es herrscht Kräftegleichgewicht.
Festigkeitslehre	Die Annahme des unverformten Körpers aus der Statik wird aufgegeben. Zusätzlich werden die Eigenschaften des verwendeten Materials berücksichtigt (Elastostatik), um Spannungen und Verformungen des Bauteils zu bestimmen.
Dynamik	Die Körper werden in Bewegung versetzt. Die Mechanik ist die Lehre von den Kräften und den aus ihnen resultierenden Bewegungen.
Kontinuumsmechanil	e Mechanik von ausgedehnten Körpern, die eine kontinuierlich verteilte Masse besitzen, also nicht wie in der elementaren Dynamik als Punkt betrachtet werden.
Energiemethoden	Energiemethoden sind alternative Ansätze zum Aufstellen der Gleichgewichtsbedingungen nach Newton, um damit Auflagerreaktionen und innere Kräfte zu bestimmen.
Mechanik-Wiki	Was ist Technische Mechanik? Einordnung der Mechanik und Grundbegriffe bzw. solche, die für gewöhnlich bei Studenten Kopfzerbrechen verursachen, sind in diesem "Glossar" aufgelistet. Klicken Sie einen der Begriffe an und erfahren Sie mehr darüber. Ebenso sind gängige Abkürzungen hier zu finden.
Inhaltsverzeichnis	Wo finde ich was?
Themenübergreifend Aufgabenstellung	le Anhang der Auslegung eines Baggers werden sämtliche Fragestellungen der Technischen Mechanik behandelt
Mechanik-WHM	Ergänzende Materialien zur Vorlesung von Herrn Prof. Müller
Mechanik-UvW	Ergänzende Materialien zur Vorlesung von Herrn Prof. von Wagner
Experimente am Institut für Mechanik	Hier wird eine Übersicht über alle Experimente gegeben, die am Institut fuer Mechanik zur Verfügung stehen.
	Forum:

Bild 4.5: Startseite mit Übersicht über die Themengebiete der Technischen Mechanik [E-MECHLAB TECHNISCHE MECHANIK (2011-ol)]



Fahren Sie mit dem Mauszeiger über das Schaubild, um mehr Informationen zu den einzelnen Themen zu erhalten!

Bild 4.6: Einblendung eines unterstützenden Erklärtextes im Übersichtsschaubild zur Festigkeitslehre, z. B. zur Lerneinheit Gleitungen [E-MECHLAB FESTIGKEITSLEHRE (2011-ol)]

4.4.2 Online-Lernbausteine für die Mechaniklehre

Ausgefüllt wird der durch die Übersichtsschaubilder vorgegebene strukturelle Rahmen mit vielen einzelnen Lernbausteinen. Exemplarisch werden nun einzelne der entwickelten Lernbausteine zu den Themengebieten Statik und elementare Festigkeitslehre, Kinematik und Dynamik sowie Energiemethoden der Mechanik und Kontinuumsmechanik herausgepickt und kurz vorgestellt.

4.4.2.1 Anschauliche Beispiele

Die Online-Lernanwendungen (virtuelle Labore, Explorationen) selbst werden eingebettet in einen Kontext aus anschaulichen Beispielen und erklärenden Texten, ggf. in Form von Lehrvideos oder Vorlesungsmitschnitten. Beispiele aus dem Themengebiet "Statik und elementare Festigkeitslehre" zeigen Bild 4.7 zur Schwerpunktsbestimmung und Bild 4.8 zur Biegelinie. Letzteres stimmt ein auf die Exploration DEFLECTEX (vgl. Abschnitt 4.4.2.3).

Begleitet werden die vorgestellten Lernanwendungen darüber hinaus von verschiedenen bekannten Typen der Wissensüberprüfung wie Multiple Choice (MC), Bild Multiple Choice oder Freitexteingabe. Dabei werden bspw. in den Lerneinheiten zur Statik Modelle mechanischer Körper (Balken, Scheiben, gekoppelte Systeme) in der Ebene betrachtet, die das Verständnis für die statische Lagerung, Verbindungsreaktionen und das Zusammenwirken aller Lager auf die Bewegung des Systems trainieren. Nach einer einleitenden Erklärung der Vorgehensweise und Kurzwiederholung der Theorie zur statischen Bestimmtheit werden dazu

verschiedene Aussagen über das dargestellte/beschriebene System zur Auswahl gestellt, gegebenenfalls Hinweise angezeigt und schließlich die Korrektheit der gewählten Antworten aufgelöst. Auch Sonderzeichen für mathematische Variablen können dabei nach einer Erweiterung der Programmierung verwendet werden.

Der Schwerpunkt

Fosbury-Flop.gif

Eine elementare Hilfsgröße in der Mechanik ist der Schwerpunkt, Denn mit Hilfe des Schwerpuntes lokalisieren wir den Angriffspunkt der Gewichtskraft an einem Körper (dabei handelt es sich um eine idealisierte Annahme, die durchaus zum Ziel führt). Sei es, um vorherzusagen, ob ein auf einer Tischkante liegendes Buch gleich herunterfallen wird, wenn wir seinen Schwerpunkt über der Kippkante wähnen. Der Hochsprungsport hat entscheidend von der Erkenntnis der Schwerpunktverlagerung profitiert mit Entwicklung des Fosbury-Flop.



Der Fosbury-Flop

unten: Dick Fosbury using the Fosbury flop technique. AR/Wide World



	Contract of the second second	Part House
s		CAA
		ABC
9		-94

	and the second s
Name	Beschreibung
Ersatzkraft-Film	Film einer Vorlesungssequenz von Herrn Prof. Müller über die Bestimmung einer Ersatzkraft (Punktlast) anstelle eines Lastkollektivs: Herleitung des Angriffspunkte und des Betrages der Ersatzkraft
SchwerpunktDreieckslast	Film einer Vorlesungssequenz von Herrn Prof. Müller zur Herleitung des Angriffspunktes einer Ersatzkraft bei einer dreieckigen Streckenlast (Methode: Schwerpunktsintegration)
	Autor: Ralf Pfeifer, selbst erstellt. Dieses Bild wurde unter der GNU-Lizenz für freie Dokumentation veröffentlicht. Es ist erlaubt, das Bild unter den Bedingungen der GNU-Lizenz für freie Dokumentation. Version 1.2 oder einer späteren Version.

Umschlagtext und keinen hinteren Umschlagtext. Bild 4.7: Anschauliches Beispiel zur Anreicherung der Laborumgebung: Ausschnitt zur Lerneinheit über den Schwerpunkt [E-MECHLAB SCHWERPUNKT (2011-ol)]

veröffentlicht von der Free Software Foundation, zu kopieren, zu verbreiten und/oder zu modifizieren. Es aibt keine unveränderlichen Abschnitte, keinen vorderen

Die Biegelinie

Die Biegelinie ist eine mathematische Funktion, welche die Verformung eines Balkens oder eines Stabes bei Biegung darstellt. Dabei entspricht die Biegelinie der Achse des verformten Trägers.

In der linear-elastischen Balkentheorie (nach Bernoulli) wird angenommen, dass sich der Balkenquerschnitt nicht verformt und somit alle Punkte des Querschnitts die selbe Verschiebung erfahren. Wird der ursprünglich gerade Balken (Stab) auf Biegung beansprucht, beschreibt demnach die gebogene Balkenachse, also die Biegelinie, die Gesamtform des Balkens

Die Biegelinie oder elastische Linie des Biegeträgers kann mit Hilfe von zwei Verfahren berechnet werden:

- Differentialgleichung Hierbei werden die Zusammenhänge von Querkraft und Biegemoment mit der Biegelinie ausgenutzt.
- MOHRsche Analogie (grafisch-rechnerisches Verfahren)



	Name	Beschreibung
inne.	Deflectex	Die Exploration Deflectex soll das rechnerisch-zeichnerische Verfahren der Mohrschen Analogie verdeutlichen.
No.	Mohrsche Analogie.pdf	Ermittlung der Biegelinie
E	Schaukel	Aufgabe zur Biegelinie. Benutzen sie Deflectex!

Bild 4.8: Anschauliches Beispiel zur Anreicherung der Laborumgebung: Webseiten-Ausschnitt über die Biegeverformung von Balkentragwerken [E-MECHLAB BIEGELINIE (2011-ol)]



Home TechnischeMechanik Einführungs-Film Statik Festigkeitslehre Dynamik Kontinuumsmechanik Energiemethoden Mechanik-Wiki Inhaltsverzeichnis Themenübergreifende Aufgabenstellung	Schrittweise Konstruktion eines Baggers erfordert die unterschiedlichsten Überlegungen, auch mechanischer Art. Hier finden sich gebündelt an einem praktischen Beispiel nahezu sämtliche Fragestellungen aus Statik und Festigkeitslehre zur Dimensionierung des Baggers wieder. Anhand dieser Teilaufgaben können Sie die Theorie in die Praxis umsetzen. Die Aufgabenstellung zeht sich wie ein roter Faden durch Statik und Festigkeitslehre und verweist auf die entsprechenden thematischen Schwerpunkte Einige Hinweise zu den wichtigsten Begriffen sind den Baggeraufgaben zugeordnet und sollen die Lösung erleichtem.Bild rechts: "Sandkasten-Ingenieure", VDI-Nachrichten, t8. August 2006, Fedr. Mauritus
Mechanik-UvW	Name Beschreibung
Experimente am Institut für Mechanik	Wiki-Bagger
Verbundwerkstoff-	
Mechanik	Geometrieberechnung.pdf
public relations	02 - Winkel berechnen ndf
Impressum	
Eigener Bereich	durch Freischnitt.pdf
	04 - Schnittgrößen am Ausleger,pdf
	05 - Trägheits- und Widerstandsmomente des Auslegers.pdf
	06 - Schubspannung im Ausleger.pdf
	07 - Durchbiegung des Auslegers.pdf
	08 - Stabkräfte im oberen Ausleger,pdf
	09 - Stabkräfte im oberen Ausleger (2).pdf



Daneben wird anhand einer themenübergreifenden Aufgabenstellung am Beispiel der technischen Struktur eines Baggers (siehe Bild 4.9) verdeutlicht, wie die einzelnen Themengebiete aus der Statik und Festigkeitslehre der Technischen Mechanik ineinander greifen und aufeinander aufbauen [JÜTTE (1998)]. Alle technisch relevanten Aspekte rund um die Auslegung des Baggers werden aus mechanischer Sicht beleuchtet. Andererseits sorgt der bekannte Anwendungsfall für einen Wiedererkennungseffekt. Ergänzt werden die Aufgabenstellungen um ein Wiki, in dem die Fragestellungen rund um den Bagger anwenderseitig erweitert und diskutiert werden können, siehe auch E-MECHLAB BAGGER (2011-ol).

4.4.2.2 Interaktive Lernanwendungen

Insbesondere in Grundlagenveranstaltungen wie der Technischen Mechanik werden starke Vereinfachungen bei der modellhaften Analyse von ingenieurwissenschaftlichen Problemstellungen vorgenommen. Mit den nachfolgend vorgestellten virtuellen Laboren können potenzielle Aufgabenstellungen für den zukünftigen Ingenieur am praktischen Beispiel experimentell erschlossen werden.

Virtuelles Labor zum Mohrschen Spannungskreis

Das in Bild 4.10 gezeigte virtuelle Labor zum MOHRschen Spannungskreis ermöglicht das Experimentieren mit dem Zusammenspiel von Normal- und Schubspannungen, die an einem Bauteil angreifen. Die interaktive Lernanwendung aus dem Themengebiet der Festigkeitslehre

Q

veranschaulicht einen zweidimensionalen Spannungszustand durch die Darstellung in einem MOHRschen Kreis, wie sie bspw. in Abschnitt 2.7.2.2.2 insbesondere in Bild 2.74 angewendet wird. Die Anwendung zum MOHRschen Spannungskreis startet damit, dass der Benutzer für einen bestimmten Belastungsfall an einem Flächenelement (z. B. eines Bauteils) die Komponenten der Spannungsmatrix in Bezug auf kartesische Koordinaten frei vorgibt, woraufhin der MOHRsche Kreis gezeichnet wird. Ist die Hauptspannungsrichtung bei vorgegebenen Spannungskomponenten nicht bekannt, kann diese aus dem MOHRschen Kreis abgelesen werden, ebenso wie der Betrag der dort wirkenden Hauptspannungen. Zur Bestimmung der maximal auftretenden Normal- und Schubspannungen wird ein Freischnitt unter dem Winkel φ durch ein infinitesimales Element durchgeführt, der "die in dieser Richtung wirkenden Spannungen sichtbar macht" und dessen Spannungszustand durch die Spannungsmatrix bestimmt ist. Die Spannungen in der Schnittebene werden ebenfalls im MOHRschen Kreis visualisiert, um dem Benutzer die komplexeren Zusammenhänge eines mehrachsigen Spannungszustandes näher zu bringen und so den Bogen zu den Vergleichspannungen zu schlagen. Eine Veränderung des Winkels, unter dem der Freischnitt durchgeführt wird, ggü. dem durch die Spannungskomponenten vorgegebenen (Haupt-) Koordinatensystem führt zur Ausgabe der in dieser Richtung des Bauteils vorherrschenden Spannungen in der Matrix rechts oben im Bild. Durch eine Änderung der Belastung kann der Anwender erfahren, wann und wie sich der Kreis auf der Abszisse verschiebt oder die Größe ändert.



Bild 4.10: Virtuelles Labor zum Experimentieren mit dem Zusammenhang von Normal- und Schubspannungen im MOHRschen Spannungskreis und zum Erfahren der Hauptspannungsrichtungen [E-MECHLAB MOHRSCHER KREIS (2011-ol)]

Virtuelle Labore zum Reibungsphänomen auf schiefer Ebene

Das erste der drei im folgenden vorgestellten virtuellen Labore zum Phänomen der Reibung verdeutlicht anhand eines Klotzes auf schiefer Ebene auf simpele Weise eines der Grundprinzipien der Mechanik: die **COULOMBsche Reibung**. In diesem mechanischem Modell wird, wie Bild 4.11 zeigt, die Reibkraft als eine entgegen der Bewegung gerichtete Kraft dargestellt, die von zwei Faktoren abhängig ist: dem Reibungskoeffizienten und der Normalkraft zur Ebene. Der Reibungskoeffizient ist wiederum in der Ruhelage unter Gesichtspunkten der Statik ein anderer als im Falle des Gleitens des Körpers, wenn ein dynamisches Problem vorliegt. Alle Parameter können verändert werden, indem in den Eingabefeldern auf der rechten Seite der Anwendung die Werte für die Masse des Klotzes, den Neigungswinkel der Ebene sowie die Reibungskoeffizienten für Haften und Gleiten variiert werden. Betätigt der Anwender die "Start"-Schaltfläche, so sieht er, was tatsächlich in der Realität passieren würde, wenn ein Klotz unter den vorgegebenen Randbedingungen auf einer Schräge verweilt oder sich ggf. in Bewegung setzt und – wenn auch durch die Reibung gebremst – herunterrutscht, nachdem ein Grenzzustand⁴¹ überwunden wurde.



Bild 4.11: Virtuelles Labor zum Experimentieren mit der Wirkung von Reibung: Reibungsphänomen unter statischer Betrachtung [E-MECHLAB REIBUNG (2011-ol)]

⁴¹ Die Aufgabenstellung in den Mechanik-Klausuren zur Statik zielen gewöhnlich auf diesen Grenzzustand ab, in dem nach der minimalen Zugkraft oder dem maximalen Neigungswinkel gefragt wird, die oder der erforderlich ist, damit der Klotz gerade noch in Ruhe verharrt.

Zusätzlich lässt sich eine Seil- oder Stabkraft definieren, die an den Klotz mit einer vorzugebenden Kraft angreift. Durch Klicken auf die jeweilige Schaltfläche können der Freischnitt und die berechneten freigeschnittenen Kräfte angezeigt werden. Das im unteren Bereich der Lernanwendung abgebildete Diagramm zeigt synchron zur Bewegung den Weg und die Geschwindigkeit an. Ziel des virtuellen Labors ist, das Verständnis für das Phänomen Reibung durch die Veranschaulichung von deren Wirkung in animierter Form zu vermitteln und dem Anwender eine Parameterstudie durch sukzessive Anpassung der einzelnen Eingangsgrößen zu ermöglichen.

Das in Bild 4.12 dargestellte virtuelle Labor stellt eine Erweiterung der Lernanwendung zur Reibung auf schiefer Ebene aus der Statik um die **Anwendung der NEWTONschen Gesetze** dar. Auch kinematische und dynamische Betrachtungen werden nun mitberücksichtigt. Das dargestellte mechanische Modell kombiniert die Kinematik, die Kinetik und die COULOMB-sche Reibung.



Bild 4.12: Komplexes Labor zum Experimentieren mit der Wirkung von Reibung in Kombination mit dem Widerstandskoeffizienten des Wassers [E-MECHLAB REIBUNG (2011-ol)]

Die Massen, sowie die Reibungskoeffizienten (für Haften und Gleiten) und die Neigung der Ebene sind in den Eingabefeldern auf der rechten Seite veränderlich, was Einfluss auf den Bewegungsablauf nimmt, bzw. darauf Auswirkung hat, ob sich das System überhaupt bewegt. In diesem Experiment wird die Masse m_1 vereinfacht als Punktmasse angesehen. Keine Be-

 \bigtriangledown

rücksichtigung findet dabei das Volumen von m_1 , das eine Auftriebskraft erzeugen würde. Für zusätzliche Optionen kann sich der Anwender eine Hilfefunktion (unten rechts in Bild 4.12 zu sehen) anzeigen lassen, die zum weiteren Verständnis des Applets und der Mechanik dient. Der Student wird angeregt, eine bestimmte Konfiguration (Einstellung von Variablen) zu wählen, den daraus resultierenden Bewegungsablauf auf dem Papier, mit der Methode des Freischnitts etc. zu errechnen und dies dann im Applet zu überprüfen, beispielsweise indem die zurückgelegte Strecke *x* zu einem bestimmten Zeitpunkt *t* von Rechnung und Applet verglichen wird.

Das virtuelle Labor "**Das rollende Rad mit Schlupf auf der schiefen Ebene**" ist eine Lernanwendung aus dem Themengebiet der Dynamik, die dem Benutzer zeigt und ihn untersuchen lässt, welche Faktoren Einfluss auf den Schlupf haben (siehe Bild 4.13).



Bild 4.13: Virtuelles Labor zum Experimentieren mit der Auswirkung von Schlupf auf ein einen Abhang herunterrollendes Rad [E-MECHLAB SCHLUPF (2011-ol)]

Der Benutzer lässt in diesem virtuellen Experiment einen runden Gegenstand, der je nach Aufgabenstellung ein Rad, eine Kugel oder eine Rolle sein kann, eine schiefe Ebene herunterrollen. Falls Schlupf besteht, ist keine hundertprozentige Bodenhaftung vorhanden. Dies hängt aber von folgenden, auf der rechten Seite der Benutzeroberfläche veränderbaren Parametern ab: der Masse der Rolle oder Kugel, dem Durchmesser, dem Neigungswinkel der Ebene sowie dem Beiwert für Haften und Gleiten. Zu den Beiwerten findet der Anwender Vorschläge, die von der Materialpaarung, die in einem Drop-Down-Menü hinterlegt und auswählbar ist, abhängen. Zum weiteren Verständnis kann sich der Benutzer folgende zwei Optionen einblenden lassen, die für das mechanische Phänomen wichtig sind:

- → eine "Markierung" am äußeren Rand der Scheibe, die bei deren Bewegung dafür sorgt, dass die globale Position dieses Punktes in Form einer Linie geplottet wird, und
- \rightarrow den Momentanpol, um den sich das System zu einem bestimmten Zeitpunkt dreht.

An diesen beiden Dingen lässt sich sofort ablesen, ob Schlupf besteht oder nicht. Der Anwender kann dadurch die animierte Realität mit seinen Rechnungen vergleichen. Da das Herunterrollen des Rades in der Realität, je nach Wahl der Parameter, sehr schnell vonstattengehen kann, lässt sich die Geschwindigkeit der Animation im unteren Eingabefeld regeln.

Die soeben beschriebenen drei Lernanwendungen aus Bild 4.11 bis Bild 4.13 starten jeweils mit der Beschreibung einer schiefen Ebene, auf der die Reibungsparameter, die zwischen Körper und Untergrund aufgrund der Materialpaarung gelten sollen, zu definieren sind. Die Ebeneneigenschaften (Neigungswinkel) wie auch die Masse des Körpers müssen festgelegt werden. Auf bereits programmierte Elemente des Content-Pools kann dabei zurückgegriffen werden (**Content-ReUse**). Daraufhin kann im Falle des ersten Labors noch eine extern am Klotz angreifende Kraft mit Betrag und der entsprechenden Richtung angegeben werden, beim zweiten Labor kommt außerdem der Widerstandskoeffizient des Wassers hinzu und im Falle des dritten Labors sind zusätzlich die Abmessungen des Rades variabel. Allen gemein ist, dass bei fehlerhaften Eingaben Hinweise eingeblendet werden. Nebenstehend wird das jeweilige betrachtete System noch einmal im Zusammenhang erklärt, es werden Anregungen, Lösungshinweise und Hilfestellungen gegeben.

Virtuelles Labor zu Schwingungen bei Ein- und Zweimassenschwingern

Mit dem virtuellen Labor zu Schwingungen bei Ein- und Zweimassenschwingern kann sich der Anwender einen Überblick über den Einfluss verschiedener Parameter und die Auswirkung von deren Veränderung an einem schwingenden System verschaffen. Vier verschiedene "Grundsysteme" aus Ein- oder Zweimassenschwingern stehen zur Auswahl. An diesen schwingfähigen Systemen können Feder- und Dämpfungskonstanten, Massen, äußere Kräfte, sowie beliebige Anfangsbedingungen zum Experimentieren mit der Auswirkung der jeweiligen Parameteränderung verändert werden. Mit diesen Einstellungen können dabei viele Eigenschaften solcher Systeme simuliert und dargestellt werden (Resonanz, Eigenform). In einem Diagramm wird zusätzlich der zeitliche Verlauf der Auslenkungen angezeigt. Durch die Visualisierung soll der Anwender ein besseres Verständnis für das Zusammenspiel der Eingangsgrößen erlangen. Die Anwendung wurde modular entsprechend des Baukastenprinzips entwickelt, sodass bei Bedarf weitere "Grundsysteme" ergänzt werden können.

219





Bild 4.14: Komplexes virtuelles Labor zur Untersuchung unterschiedlicher schwingfähiger Systeme (Ein- und Zweimassenschwinger) zum Experimentieren mit und Vergleichen von deren Schwingverhalten [E-MECHLAB SCHWINGUNGEN (2011-ol)]

Virtuelles Labor zum Heronsbrunnen

Das kontinuumsmechanische virtuelle Labor, von dem Bild 4.15 einen Bildschirmausschnitt zeigt, thematisiert **die Hydromechanik des sogenannten "Heronsbrunnens"**, dessen Funktionsweise nachgebildet wird. Die Eingangsparameter können dabei durch den Anwender variiert werden. Der elementare Vorteil an diesem virtuellen Experiment ist, dass sich mit dessen Hilfe gleich mehrere Prinzipien der Hydromechanik veranschaulichen lassen (BER-NOULLI bzw. Druck, Kontinuitätsgleichung, kommunizierende Röhren), die im Rahmen einer dreiteiligen Aufgabenstellung vertieft werden können. Zunächst wird der statische Fall betrachtet, zu dem auf dem Papier Berechnungen zur Hydrostatik durchzuführen sind:

- → Der Druck im unteren und im oberen Becken sowie der Luftdruck sollen berechnet werden. Daraus ist dann die Höhe der Fontäne zu ermitteln. Die Düse bleibt für diesen Fall unverändert.
- → Der Austrittsquerschnitt der Düse ist nun veränderlich, jedoch die Höhen der Becken bleiben fest.

→ Schließlich folgt der dynamische Fall, in dem der Anwender berechnen soll, wie lange der Brunnen läuft. Abschließend ist eine Animation zu sehen, in der man die Veränderung der Wasserspiegel beobachten kann.



Bild 4.15: Virtuelles Labor zum Experimentieren mit den Wasserständen und Röhrendurchmessern eines Heronsbrunnens aus dem Themenkomplex der Hydromechanik [E-MECHLAB HYDROMECHANIK HERONSBRUNNEN (2011-ol)]



4.4.2.3 Explorationen – experimentierfähige grafische Konstruktionsumgebungen

Ein zentrales Anliegen dieser Arbeit besteht in der Einbettung bestehender und bewährter Lernanwendungen namens "Explorationen"⁴² [HAMPEL et al. (1999), NOWACZYK (2002) und NOWACZYK (2005)] in die virtuelle Laborumgebung E-MechLAB. Explorationen stellen No-WACZYK (2005) zufolge eine "*neue Art von Lernanwendungen*" dar, *"bei denen die Bereitstellung eines hohen Interaktivitätsgrades ein wesentliches Designziel bildete*". Sieben Themengebiete aus der Technischen Mechanik können mit Hilfe von Explorationen spielerisch erschlossen und vertieft werden, mit deren Einsatz in der Lehre die Verfasserin bereits im Vorfeld zu dieser Arbeit Erfahrungen sammeln konnte. Die Explorationen, die im Rahmen von Studien- und Diplomarbeiten an der Universität Paderborn generiert wurden, gilt es, geeignet in das Laborkonzept zu implementieren.

Vor der Wieder- bzw. Weiterverwendung dieser gelungenen, bereits vorhandenen Lernprogramme soll eine mögliche explorationsübergreifende Vereinheitlichung der Menüführung und des Layouts geprüft werden sowie eine Klärung von Fragen der Webdarstellung mit aktuellen Standards erfolgen. NAPIORKOWSKA (2007) zieht dazu zehn leicht anwendbare Gestaltungskriterien vom bekannten Usability-Künstler Jakob NIELSEN (1993), einem Berater im Bereich Software- und Webdesign-Gebrauchstauglichkeit, der Heuristiken für eine gute Benutzbarkeit entwickelte, für das Re-Design der Explorationen zu Rate. Sie analysiert anhand dieser einfachen Design-Regeln zur Gestaltung von Benutzeroberflächen, die bei richtiger Anwendung zu einer benutzerfreundlichen Software führen sollen, den Ist-Zustand der bereits existierenden virtuellen Labore. Mögliche Design-Fehler können somit im Vorfeld entdeckt und für das allgemeine Layout der neuen bzw. überarbeiteten virtuellen Labore berücksichtigt werden. Die Analysen münden in Überarbeitungsansätze, die ausschließlich innerhalb des Medi@rena Composers – dabei handelt es sich um eine Art "Shared Whiteboard" von ^{open}sTeam, siehe z. B. NIEHUS et al. (2007), FLYWHEEL (-ol) – nutzbar sind.

Bspw. führt die Überprüfung des vierten Kriteriums "*Konsistenz*" zu der Erkenntnis, dass gleiche Symbole je nach Anwendung mit unterschiedlichen Icons belegt wurden. Die Gegenüberstellung in Bild 4.16 beweist, dass die Explorationen BEAMEX zur Bestimmung von Schnittgrößen und DYNAMEX, die sich mit schwingfähigen mechanischen Systemen befasst,

🥒 Dynam	Xei
Projekt B	earbeiten <u>H</u> inzufügen <u>M</u> odus Hilfe
	Exploration: Beamex
A	Datei Bearbeiten Hilfe
0	
_	
nn	
م ،	

Bild 4.16: DYNAMEX und BEAMEX - gleiche Bedeutung unterschiedlicher Icons

⁴² gefördert durch das Centrum für eCompetence in Hochschulen NRW (CeC)

beide die identische Lagerart (Festlager) als Konstruktionselement für die jeweiligen mechanischen Systeme benötigen, jedoch sind die Symbole dafür auf den Schaltflächen unterschiedlich dargestellt. Informationen, die den gleichen Effekt erzeugen, sollten jedoch gleich aussehen, um den Benutzern einen Wiedererkennungswert zu liefern und eine didaktisch sinnvolle Einbindung in E-MechLAB zu ermöglichen.

Der in NAPIORKOWSKA (2007) gewählte Lösungsansatz zum Aufbau einer explorationsübergreifenden Konsistenz sieht wie in Bild 4.17 gezeigt aus. Darin ist eine Iconübersicht vom Prototyp und vier exemplarisch ausgewählten Explorationen dargestellt, deren Vereinheitlichung dafür sorgen soll, dass sich die Studenten einfacher zurecht finden und ihre volle Aufmerksamkeit dem Konstruieren und Bewältigen der Aufgaben widmen können. Der zweite Teil der Menüleiste mit den individuellen Funktionen jeder Anwendung ist austauschbar und ebenso erweiterbar, falls in einer Anwendung weitere Funktionen hinzugefügt oder nicht mehr benötigte entfernt werden sollen.

Bei der angestrebten Vereinheitlichung von Layout, Icons und Navigation können jedoch nicht alle Komponenten der Benutzeroberfläche aufgrund des hinzukommenden Parameters Zeit bei den Explorationen zur Dynamik einheitlich zusammengefasst werden. Die zeitliche Abfolge der Bewegungen des mechanischen Systems wird dann bei den dynamischen Anwendungen in einer Simulation dargestellt und in Form von Diagrammen ausgegeben, was beides bei den statischen Explorationen (z. B. Beamex oder MechADO) keine Verwendung findet. Um jedoch die Konsistenz nicht zu verletzen, werden die Besonderheiten einer Exploration in ein separates Fenster ausgelagert. Das Aussehen und die Anordnung dieses Fensters werden jedoch bei allen Explorationen gleich sein. Der einzige Unterschied ist, dass innerhalb des Fensters einzelne Segmente existieren, die an jede Exploration angepasst werden können.

Datei Bearbeiten H	tinzufügen Modus Ansicht Hilfe		
Beamex Auflagerreaktion	Werkzeugleiste X A A F F Image: Second structure Image: Second structure Image: Second structure Image: Second structure Normalkraftverlauf Querkraftverlauf	MechADO	Werkzeugleiste
Dynamex	Messfenster öffnen	Pipe	Verforeugleiste X Verforeugleiste X Darstellung anpassen Startbedingung

Bild 4.17: Iconübersicht der explorationseigenen austauschbaren Menü- und Werkzeugleisten

Vereinigt im Medi@rena Composer stellt sich der Sachverhalt wie in Bild 4.18 am Beispiel der integrierten Exploration MECHADO veranschaulicht dar. (Zum Vergleich ist in Bild 4.19 das ursprüngliche Labor MechADO vor Integration abgebildet.) Die Grundarchitektur bestehend aus Menüleiste, vertikaler Werkzeugleiste, Zeichenfläche und Berechnungsfeld bleibt erhalten, wird jedoch ggf. anders angeordnet. Mit der Exploration MECHADO können Stab-

R

werke konstruiert und berechnet werden, die statisch bestimmt sind. Das schränkt die konstruktiven Möglichkeiten zwar ein, hat jedoch den Vorteil, dass die Studenten mit dieser Exploration nur solche Stabwerke zeichnen, die sie auch mit den Ihnen in der Grundstudiums-Lehre vermittelten Methoden nachrechnen können. Gleichzeitig vertiefen sie ihr Wissen über statische Bestimmtheit.

Die Nummerierung der Stäbe zeigt die Reihenfolge an, in der sie gezeichnet wurden. Günstiger erscheint, die Nummerierung mit Stab (1) anstatt Stab (0) beginnen zu lassen, da ein "Null"-Stab in der Mechaniklehre eine andere, vorbelegte Bedeutung hat und sonst ggf. Verwirrung stiftet. Der Student muss sich die von der Exploration ermittelten Stabkräfte für einen späteren Vergleich mit seinen berechneten Kräften nicht merken, die Ausgabe erfolgt. Zug-, Druck- und Nullstäbe werden in MECHADO farblich gekennzeichnet, was dem Anwender eine Plausibilitätsprüfung erleichtert. Die Legende zu den Farben wird bei den Annotationen immer angezeigt. Somit wird die Gedächtnisbelastung durch die genannten Punkte minimiert.



Bild 4.18: Exploration MECHADO zur Bestimmung von Stabkräften integriert in die Medi@rena

Die Explorationen werden jeweils als eigenständige Plug-Ins aufgebaut und realisiert, dadurch können Gemeinsamkeiten jeder einzelnen Anwendung leichter zusammengefasst werden. Im Anschluss dieser Entwicklung werden die entwickelten Plug-Ins in den Medi@rena Composer integriert und dabei in einem Editor-Fenster innerhalb der Arena anwendbar sein, wie Bild 4.18 am Beispiel von Exploration MechADO zeigt.

Auf dem Weg zu einem netzwerkfähigen Labor ist als Zwischenerfolg das Abspeichern von Arbeitsergebnissen (=Einfrieren des letzten Bearbeitungsstandes des Experiments) im virtuellen Wissensraum (=Labor) über die Whiteboard-Ansicht gelungen, um diese Ergebnisse anderen Anwendern zugänglich machen zu können.



Bild 4.19: Ausgangssituation: Exploration MechADO zur Berechnung von Stabkräften als eigenständiges Applet

Da der Medi@rena Composer virtuelle wissensbasierte Räume in Form eines grafischen Editors darstellen kann und das semantische Strukturieren von deren Inhalten ermöglicht, fördert die Einbindung der Explorationen das kooperative Lernverhalten der Studenten.

4.4.2.4 Katalogisierung der institutseigenen experimentellen Aufbauten

Bei der Katalogisierung von experimentierfähigen Exponaten und deren Einbindung in E-MechLAB findet eine Verquickung realer und virtueller Experimente auf einer Plattform statt. In den Kellern der beiden Gebäude des Instituts für Mechanik "schlummern" einige interessante experimentelle Aufbauten, welche sich gut für die Vorführung in einer Vorlesung oder einem Tutorium eignen. Leider wissen die meisten Mitarbeiter nicht, was wo zu finden ist bzw. mit welchem Gerät welche mechanischen Effekte veranschaulicht werden können. Deswegen wurde durch die Projektmitarbeiter angefangen, diese Experimente zu katalogisieren. Dabei wurden besonders geeignete Experimente gefilmt und zu Lehrvideos z. B. zu den folgenden Themen verarbeitet:

- → Belastungsarten eines Balkens werden anhand der **Bernoullihypothese** filmisch vorgestellt.
- → Der Lehrfilm "**Spannungen sichtbar machen**" veranschaulicht mit Hilfe eines Stressopticons, wie auftretende Spannungen an einem Probestück aus spannungsoptisch aktivem Kunststoff bei aufgebrachter Belastung durch Interferenzmuster sichtbar werden.

225



Für die vorhandenen Experimente wurde so ein Katalog angelegt, auf den zum einen die Lehrkräfte, aber zum anderen auch Studenten zugreifen können.

Name des Experimentes	Standort	Video / Bild	Was wird gezeigt	Anwendung	Ansprechpartner
Spannungsvisualisierung (Stress Opticon)	MS Gebäude		Spannungen können durch verschiedene Belastungen aufgebaut und sichtbar gemacht werden. Hier gehts zum Lehrvideo auf E-MechLAB!	ME 1	Herr Thaten
Balken mit versch. Querschnitten und aus versch. Materialien	MS Gebäude		Für eine Genauere Übersicht hier klicken!	ME 1/3	Herr Thaten
Stabwerk	MS Gebäude		Stabwerk aus 7 Stäben bei dem in jedem Stab die Kraft gemessen werden kann und verschiedenen Knoten belastet werden können.	ME 1	Herr Thaten
Stabilität	MS Gebäude		eingespannter Blechstab, einstellbar, mit Gewichten belastbar	ME 1/2	Herr Thaten
Stabilität	MS Gebäude		eingespannter Blechstab, einstellbar, mit Gewichten belastbar	ME 1/2	Herr Thaten
Drehimpuls	MS Gebäude		Durch den Drehimpuls hebt sich das Rad an der einen Seite.	ME 2	Herr Thaten
Drehstuhl	MS Gebäude		Mit Hilfe eines Rades und dem Drehstuhl lässt sich die Wirkung des Drehimpulses zeigen.	ME 2	Herr Thaten
Coriolisrad	MS Gebäude	A	rote Kunstoffbölle sind mit Blattfedern befestigt und lenken seitlich aus	ME 2	Herr Thaten
Kegel unterschiedlicher Dichte	MS Gebäude		3 unterschiedliche Dichteverhältnisse zu Wasser, auf der Unterseite bezeichnet	ME 3	Herr Thaten

Bild 4.20: Katalogisierung institutseigener experimenteller Aufbauten [E-MECHLAB MECHANIK-EXPERIMENTE IFM (2011-ol)]

Umfangreiche Untersuchungen zur Akzeptanz der hier vorgestellten virtuellen Labore in der Grundlagenmechanik wurden in engem Kontakt mit einem Pädagogen des angrenzenden Nemesis-Teilprojekts angestellt [DATHE (2005-2011)], deren Ergebnisse HENDRICKS/DATHE (2008) zusammenfassen. Die Studenten wurden dabei zu den in der Projektlaufzeit seit Oktober 2005 erarbeiteten E-Learning-Inhalten befragt, ob und in welchem Umfang sie die online bereitgestellten Materialien ergänzend zur Präsenzveranstaltungen nutzen, ob ihnen die Inhalte gefallen, ob die Schwerpunkte richtig gesetzt sind, sie die ausgiebigere Behandlung spezieller Themen vermissen und was sie sich darüber hinausgehend wünschen. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Rückläufen der Evaluationsbögen wurden analysiert, die gezogenen Rückschlüsse aus den Multiple-Choice-Antworten und Freitexteingaben flossen wiederum in die Weiterentwicklung einerseits der virtuellen Labore und andererseits der Evaluationsbögen für das nächste Semester ein. Insgesamt gab es drei Iterationsvorgänge. Näheres über die verschiedenen Validierungsverfahren von Online-Lehranwendungen diskutiert bspw. JESCHKE (2004).

- → Zu Projektbeginn durchgeführte Interviews mit dem Ziel, die Wünsche der Studenten in Bezug auf ergänzende E-Learning-Materialien in Erfahrung zu bringen, förderten eher überschaubare Kreativität der Studenten zutage; überwiegend wurden vertraute Dinge gewünscht wie z. B. viele Praxisbeispiele, etc.
- → Ursprünglich geplant war eine projektbegleitende "4-Phasen-Befragung" in schriftlicher Form. Dazu werden die Studenten in zwei Gruppen eingeteilt, die eine Hälfte wird zu Beginn und am Ende des Semesters befragt, die andere Gruppe ausschließlich am Ende des Semesters. So möchte man Beeinflussungen der Befragungsergebnisse durch die Vorabbefragung herausfiltern. Allerdings überzeugten die Ergebnisse dieser Methode nicht sehr, möglicherweise da sich die Studenten zu Beginn des Semesters nicht vorstellen konnten, was sie erwartet.
- → Die Qualitätssicherung findet daraufhin in der Grundstudiumsveranstaltung "Technische Mechanik" gemäß Projektvorgabe im Wege einer Evaluation zwei Mal während des Semesters (Mitte und Ende) statt.

Darüber hinaus gibt es mehrere **Vorführungen** besonders interessanter Online-Inhalte während des Semesters, die zum "Selberdurchstöbern der Plattform" anregen sollen. Dabei und auf der Plattform wird in Form von Fragen zum Feedback geben angeregt. Sehr positiv überrascht, dass mehrfach substanzielle, konstruktive Kritik von Studenten geäußert wurde, zu bestimmten Lernbausteinen teilweise anderthalb Seiten Text umfassend.

R



Das zweite Pilotprojekt aus dem ingenieurwissenschaftlichen Vertiefungsstudium beschäftigt sich mit der Mechanik der Faserverbundkunststoffe.

Infolge des zunehmenden Einsatzes von Faser-Kunststoff-Verbunden entsteht Nachfrage nach qualifiziertem Personal. Um diesen Bedarf zu bedienen, besteht ein hoher Wissens- und Weiterbildungsbedarf. "Firmen suchen nach alternativen Werkstoffen, wissen aber oft nicht deren Materialeigenschaften einzuschätzen, sowie Vor- und Nachteile abzuwägen. Das Internet bietet bislang unzählige Informationsquellen an, welche zumeist aus sehr langen oder kurzen, schwerpunktbezogen Texten bestehen. Schnelle, und dennoch umfassende und korrekte Informationen sind schlecht zu finden." Infolge der Entwicklung auf dem Gebiet der Faserverbundtechnologie und dessen vielversprechendem Potenzial begrüßen die Unternehmen, wenn Mitarbeiter schon vorab mit dem Thema Faserverbundwerkstoffe vertraut sind oder schnell die notwendigen Kenntnisse erlangen können. "Die Wissensvermittlung geschieht herkömmlich in den Schulen, an den Universitäten oder autodidaktisch." Aber auch innerbetriebliche Weiterbildung nimmt einen immer größeren Anteil ein und wird mittlerweile in großen Konzernen als strategische Ressource gesehen, für die eine mittelfristige Planung erfolgt, um besser auf sich am Markt abzeichnende Entwicklungen reagieren zu können. Dafür werden geeignete Lehrmaterialien und -konzepte gesucht. "Insbesondere der Selbstunterricht ist ein schwieriges Unterfangen. Komplizierte Formulierungen und konzeptlose Informationsbeschaffung vermitteln oft völlig falsche Zusammenhänge und beanspruchen einen hohen Arbeits- und Zeitaufwand." [KÜCKELHEIM (2006)] Daher ist die Wissensvermittlung zur "Mechanik der Faserverbundkunststoffe" ein zentrales Anliegen dieser Arbeit, die dazu einen Ansatz mit der Entwicklung einer E-Learning-Anwendung mit integrierten virtuellen Laboren aufzeigt.

Die Konzeption, das Anforderungsprofil, das Pflichtenheft und die Ausgestaltung des Online-Lehr- und Lernangebots für die Mechanik der Faserverbundwerkstoffe werden im nun folgenden Teil dargestellt.

4.5.1 Zielsetzung und Ansatzpunkt der Umsetzung

Die faszinierende, jedoch in Bezug auf die Bauteilauslegung hochgradig komplexe Thematik der Verbundstrukturen soll für Studenten durch den Einsatz neuer Medien greifbarer und praxisnäher gestaltet werden. Es versteht sich von selbst, dass die Komplexität der Berechnungsverfahren dadurch nicht gemildert werden kann. Der Schwierigkeitsgrad ist hier – auch und nicht zuletzt hinsichtlich der Mathematik – höher als bei anderen Veranstaltungen des Vertiefungsstudiums. Der durchschnittliche Maschinenbauer, sofern es diesen gibt, mag es lieber anschaulich, plakativ, gespickt mit Anwendungen und Beispielen, anknüpfend an Vorwissen, welches er entweder mitgebracht oder im Rahmen seines Studiums erworben hat. Es bleibt jedoch zu hoffen, dass ein Anreiz, sich dennoch mit der "mühsamen" Mechanik der Faserverbundkunststoffe zu befassen, mit Hilfe der virtuellen Laborumgebung E-MECHLAB geschaffen werden kann.

Ziel dieser E-Learning-Anwendung ist die Bereitstellung multimedialer Selbstlernangebote mit individuellen Lernpfaden durch das Angebot gemäß BREMER (2006) parallel zu einem vorgeschlagenen chronologischen Lehrpfad. Dazu ist das bestehende Konzept der Präsenzveranstaltung, welches sehr mathematisch orientiert und theorielastig aufgebaut ist, mit einem ergänzenden Online-Lehr- und Lernangebot bestehend aus virtuellen Laboren zur Mechanik der Faserverbund-Kunststoffe anzureichern. Inhaltlich baut die Lernumgebung auf FUNKE (2005a), R&G (2003) und jünger, MICHAELI/WEGENER (1990), MICHAELI et al. (1995), MÜL-LER (1994) und TSAI (1992) auf. Im Einzelnen empfiehlt sich bei der Adaption für die Online-Lehre die in Bild 4.21 veranschaulichte methodische **Herangehensweise**, bei der insbesondere auf die leichte Zugänglichkeit und die gute Verständlichkeit für den Adressatenkreis aus Studenten und anderem interessiertem Publikum zu achten ist.



Bild 4.21: Phasen und Meilensteine bei Adaption von Lehrinhalten für die Online-Lehre

Um mehr Anwendungsbezug zu erreichen, wäre die Einführung eines Praktikums denkbar, in dem die Studenten selbst Faserhalbzeuge und Matrixwerkstoffe zu Faserverbundlaminaten verarbeiten. Der nächste Schritt könnte dann das Laminieren eines komplexen Bauteils (z. B. eines Modellflugzeugrumpfs mit Wabensandwichkern) sein. Ebenfalls wäre möglich, eine mechanische Prüfung (Zugprüftest) mit Ermittlung der Kenngrößen an einer bereits vorbereiteten Materialprobe durchzuführen. Allerdings setzt ein solches Praktikum kleine Gruppengrößen voraus. Die Gruppengröße ist im Vorfeld schwer kalkulierbar. Außerdem nehmen die praktische Einweisung in die Laminiertätigkeit, die Bauteilherstellung sowie die Materialprüfung viel Zeit in Anspruch und sind betreuungsintensiv. Darüber hinaus stellen die Werkstoffe in der Anschaffung einen nicht unerheblichen Kostenfaktor dar. Daher wird ein E-

R

Learningangebot mit eingebetteten virtuellen Laboren (eine sog. "virtuelle Laborumgebung") konzipiert, welches...

- → ... die Studenten freiwillig durchlaufen können. Der Inhalt soll das Verständnis für Mechanik trainieren und Spaß im Umgang damit bei den Studenten induzieren.
- → ... zeitlich flexibel für die Studenten zur Nutzung zur Verfügung steht (es gibt keine festen Laborzeiten).
- → ... so offen gestaltet sein soll, dass die Zielgruppe nicht auf das studentische Umfeld beschränkt ist. Die Inhalte sollen frei zugänglich für alle im Internet verfügbar sein. Daher soll das Einstiegsniveau möglichst niedrig sein. Es soll kein spezielles Vorwissen vorausgesetzt werden, sondern an bestehendes Wissen aus Alltagssituationen angeknüpft werden (= "Berücksichtigung unterschiedlicher Lernvoraussetzungen" gemäß BREMER (2006)).
- → … die "trockenen" Vorlesungsinhalte versüßt, die Relevanz für die Praxis aufzeigt und Hintergrundinformationen zu den möglichen Werkstoffen und Werkstoffkombinationen liefert.

4.5.2 Mehrwert des Medieneinsatzes

Der Mehrwert einer Präsenzveranstaltung wird in der Erhöhung der Anschaulichkeit gegenüber dem "trockenen" Theoriestudium gesehen. Hingegen liegen die E-Learning-Mehrwerte des multimedialen Lehrangebots mit integrierten virtuellen Laboren darin, dass…

- → … sanktionsfrei Wissen in Online-Übungen durch den Anwender überprüft werden kann. Das System gibt Rückmeldung nach Prüfung des Ergebnisses (= ,,*Motivation und Lerner-folg durch Online Selbsttests*" gemäß BREMER (2006)).
- → ... spielerisch mit Hilfe von Animationen und Interaktivität Wissen erarbeitet wird (= zur "Verbesserung der kognitiven Lernprozesse" siehe BREMER (2006)).
- → ... zahlreiche Beispiele und Vergleiche aus dem täglichen Leben sowie "Eselsbrücken" zum nachhaltigen Lernerfolg führen sollen.
- → ... die (hoffentlich) ansprechenden multimedialen Materialien so vielseitig gestaltet sind, dass f
 ür jeden Lerntyp etwas dabei ist, was die Motivation, sich n
 äher mit dem Thema zu besch
 äftigen, nach sich zieht.
- → … kurze und knappe Selbstlernmaterialien in Verbindung mit Visualisierungen eine präzisere Aussagekraft haben als viel Text. Jeder Student wie auch Mitarbeiter in der Industrie steht schließlich unter Zeitnot und möchte sich effektiv und gezielt informieren.
- → ... Lehrfilme z. B. über die Herstellung von Faserverbundbauteilen im Kontext gezielt zur Verfügung gestellt werden können. Auditive Informationen zusammen mit Visualisierungen ergeben einen Mehrwert ggü. reinem Text, siehe BREMER (2006).

- → ... das mathematische Vorwissen zielgerecht trainiert oder reaktiviert sofern nicht (mehr) verfügbar – werden kann. Wenn eine Wissenslücke besteht, soll der Student bzw. andere Anwender die Möglichkeit haben, dieses Wissen punktuell nachzuarbeiten.
- → ... der Lerner räumlich und zeitlich unabhängig beim Erarbeiten der Inhalte ist (Stichwort "Überwindung von Schranken durch E-Learning", vgl. SCHULMEISTER (2006)).
- → ... Zielgruppen über die Grenzen der Hochschule hinweg angesprochen werden, da das virtuelle Labor öffentlich publiziert ist, und so u. U. Kooperationen entstehen können.
- → ... nicht zuletzt eine verbesserte Außendarstellung (=Reputation, auf die verwiesen werden kann) entsteht.

4.5.3 Zielgruppe

Streng genommen gibt es zwei Arten von Zielgruppen, die mit den virtuellen Faserverbundkunststoff-Laboren und deren Lernumgebung erreicht werden sollen:

- **2.** Die andere Zielgruppe setzt sich aus interessiertem Publikum zusammen, wie auch immer motiviert, das nicht die Präsenzveranstaltung besucht (Methode: **Virtualisierungskonzept**, siehe Abschnitt 4.5.4.4). Das können sein:
 - a) Schüler, die sich für Faserverbundkunststoffe interessieren: Da es bundesweit "zu wenig Nachwuchskräfte für Ingenieursberufe, Informatik und Naturwissenschaften" gibt, werden diesbezüglich Förderinitiativen für die Etablierung von Schülerexperimenten gemäß Pressebericht [NW (2009)] gestartet, um das Interesse für die sog. MINT-Fächer (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik) schon früh bei dem potenziell technikbegeisterten Nachwuchs zu wecken. Laborkurse sollen bereits für verschiedene Schulformen und Altersklassen ab dem Grundschulalter initiiert werden mit Schülerlabors zum Entdecken der Faszination am Experimentieren. In dieselbe Richtung denkt auch E-MechLAB. Frei nach dem berühmten Zitat des französischen Schriftstellers FRANCOIS RABELAIS (Anfang 16. Jh.) sind "Kinder… keine Fässer, die gefüllt, sondern Flammen, die entzündet werden sollen." Demnach sollte Wissensdurst als der Motor wahren Interesses geweckt und nicht bloß Stoff konsumiert, auswendig gelernt, abgeprüft und dann wieder vergessen werden. So habe man Kindern bis heute systematisch ihren Entdeckertrieb verleidet [KAHL (2009)];
 - b) Menschen mit Praxisbezug, die sich entweder als Hobby mit dem Bau von Faserverbundbauteilen beschäftigen oder beruflich mit den Werkstoffen zu tun haben und sich daher Hintergrundwissen zu Grundlagen, Konstruktionen und Berechnungen aneignen wollen. Diese Zielgruppe interessiert uns besonders, da eine standortübergreifende kooperative Vernetzung besteht, u. a. auch mit dem Lieferanten unserer für Experimente benötigten Faserverbundwerkstoffe, Fa. R&G Faserverbundwerkstoffe in Waldenbuch,


4.5.3.1 Motivation zum Lernen

Da das gesteigerte Interesse auf den in jüngster Zeit etablierten Einsatzmöglichkeiten der Faserverbundkunststoffe basiert (Beispiele: Airbus A380, Boeing Dreamliner, Kohlenstofffaserverbundkunststoffe im Notebookgehäuse der Marke Acer machen dieses extrem leicht mit 2,4 kg für 17" incl. Netzteil, Windkraftanlagen besitzen glasfaserverstärkte Kunststoffflügel), liegt der Gedanke nahe, die Motivation für die Lerneinheiten ebenso darauf auszurichten. Der Einstieg sollte über diese populären und immer wieder in den Medien auftauchenden Anwendungsbeispiele gewählt werden.

Gerade Zielgruppe 2 verfügt über ausreichend **intrinsische Motivation**. Aus durch Hobby oder Beruf motivierten Gründen sind diese Anwender an bestimmten Informationen zu Faser-verbundkunststoffen interessiert und sollen diese möglichst prägnant in der virtuellen Laborumgebung zur Faserverbundkunststoff-Mechanik vorfinden.

Zielgruppe 1 ist ein gewisses Maß an intrinsischer Motivation und echtem Interesse an faserverstärkten Kunststoffverbunden ebenfalls zu unterstellen, weil es sich bei dem hier behandelten Kurs um eine Wahlveranstaltung aus dem Vertiefungsstudium handelt. Erfolgreich abgeschlossen wird die Lehrveranstaltung durch eine Prüfung (mündlich, zu einer vorher schriftlich ausgearbeiteten Hausaufgabe, deren Lösung vorgetragen wird), so dass auch **extrinsische Motivation** durch die Präsentation von alleine bzw. kollaborativ erarbeitetem Wissen oder Prüfungsfragen zu den Online-Lerninhalten vorstellbar ist.

4.5.3.2 Zeit zum Lernen

Die Zeit zum Lernen eines Studenten ist eher als knapp bemessen zu charakterisieren. Nacharbeit der Inhalte aus der Präsenzlehre ist allerdings erforderlich, mindestens im selben Umfang wie die Präsenzlehre. Allerdings sollte diese knappe Zeit effektiv genutzt werden. Wünschenswert wäre, wenn sie nicht für das Zusammensuchen von Zusatzinformationen und Erklärungen (z. B. Google-Suche, Wikipedia, …), die für das Verständnis wichtig wären, vergeudet würde, sondern kanalisiert werden könnte auf die wesentlichen Zusatzinformationen. Fakt ist, dass man recht wenig z. B. zu den Versagensfällen von Verbundbauteilen im Web findet, zu mechanischen Kennwerten infolge der Fülle von möglichen Materialpaarungen nahezu gar nichts. Bei unverständlichen Lerninhalten kann sich der geneigte Student buchstäblich "totsuchen" ohne merklichen Lernerfolg.

Q

4.5.3.3 Computerzugang, Medienkompetenz, Einstellung zum Onlinelernen

Zugang zu Computern ist für die studentische Zielgruppe in ausreichendem Maße gegeben. Diverse Poolräume sind für sie zugänglich. Die gängigsten Software-Plug-Ins sind dort installiert (z. B. Java, FlashPlayer) und auf dem neusten Stand.

Von Medienkompetenz ist bei Studenten des Maschinenbaus und angrenzender Disziplinen auszugehen. In einer Evaluation zu Projektbeginn wurden Studenten zu deren Lernverhalten befragt, u. a. auch, wie sie kommunizieren, wenn sie gemeinsam lernen oder Fragen haben. E-Mail wurde häufig genannt. Somit haben wir belegt, was man zunächst vermuten konnte, nämlich dass eine Affinität zur Technik vorliegt; ein Großteil der schnellen Informationsbeschaffung wird auf das Internet verlagert, E-Mail ist als gängiges Kommunikationsmedium etabliert.

Bis auf wenige Ausnahmen lässt sich von einer grundsätzlich positiven Einstellung zum Online-Lernen ausgehen. Die derzeitige Generation der Studenten wächst mit dem Internet auf, das World Wide Web ist als schnelle Informationsquelle etabliert, viele Studenten haben Computernetzwerke über Rollenspiele kennengelernt und sind mit dem Raumgedanken von Lernplattformen vertraut. In diese Aufzählung lassen sich Online-Lernangebote lückenlos einreihen. Es ist lediglich eine Minderheit der Studenten, die sich durch Online-Lerninhalte ausgegrenzt oder benachteiligt fühlt.

4.5.3.4 Vorerfahrung mit dem Lernstoff, E-Learning und Lernplattformen

Berechnungsverfahren für Verbundmaterialien setzten voraus, dass man sich näher mit den Werkstoffen auseinander gesetzt hat. Das ist üblicherweise bei Maschinenbau-Studenten nicht der Fall, da sich deren Vorkenntnisse auf metallische, somit homogene Werkstoffe beschränken. Also muss an dieser Stelle Wissenserweiterung in Bezug auf das Materialverhalten inhomogener und anisotroper (=richtungsabhängiger) Werkstoffe betrieben werden. Folglich soll sich dieses Projekt mit der Vermittlung von anschaulichen Grundkenntnissen über das Werkstoffverhalten von Faserverbundkunststoffen beschäftigen.

Webbasiertes und multimediagestütztes Lernen gewinnt sicherlich immer mehr an Popularität, inwiefern es jedoch in die Lernkultur eines Studenten des Maschinenbaus übergegangen ist, ist schwierig zu beantworten. Mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit lässt sich feststellen, dass jeder Student fehlende Informationen zunächst mal "googelt", dann wird er bei Wikipedia vorbeisurfen. Ob ihm das immer weiterhilft, sei dahin gestellt. Dieses Vorgehen scheint jedoch mittlerweile etabliert. Vor dem Hintergrund kann festgestellt werden, dass die studentische Klientel keine grundsätzliche Scheu oder Abneigung ggü. Lernplattformen und E-Learning hegt, weil es sich nicht anders darstellt, als das Wissensangebot, dass sie ohnehin kennen und frequentieren. Vielmehr scheint zu befürchten, dass allmählich ein Überangebot an Plattformen, Logins, Foren, etc. auf die Studenten im Rahmen ihres Studiums und ihrer Freizeit einstürmt, zusätzlich zu der Informationsflut, die das Internet im Allgemeinen schon bereithält und die Frage gerechtfertigt sein dürfte, ob sie sich in dem Dschungel noch zurechtfinden oder angesichts der Wissensflut kapitulieren!?



4.5.4.1 Lernziele

Der Anwender des virtuellen Labors soll ein "Gefühl" für den Faserverbundkunststoff vermittelt bekommen. Das Verständnis für den Werkstoff und das, was bei Belastung mechanisch in den Einzelschichten passiert, soll vertieft, wenn nicht sogar im Langzeitgedächtnis verankert werden. Im Einzelnen bedeutet das:

- → Werkstoffbesonderheiten wie Anisotropie sollen verstanden und deren Auswirkungen begriffen und verinnerlicht werden.
- → Der Grund für die wesentlich komplexere Auslegung als bei metallischen Werkstoffen soll verstanden werden. (= Hintergründe der Berechnung: WARUM? Wird WAS? WIE? gemacht).
- → Herstellung und Formgebung des Werkstoffs erfolgen gleichzeitig. Die Anwender sollen verstehen, welche konstruktiven Möglichkeiten und welche Flexibilität, aber auch welche Grenzen bei der Gestaltung dadurch bedingt sind.
- → Die Anwender sollen das Werkstoffversagen und die Versagensmechanismen im Unterschied zu denen von Metallen – kennen lernen und verstehen. Sie sollen ein Bild zu den zerstörten Bauteilen vor Augen haben, wenn sie die Berechnungsvorschriften für die Belastungsgrenzen anwenden oder Bauteilgeometrien auf kritische Stellen hin analysieren.

Wobei es sich bei den vorgenannten Lernzielen um **kognitive Lernziele** (Wissen, Verstehen, Anwenden, Analysieren, Synthetisieren, Evaluieren) handelt, die in Bezug auf die Bewertung der Lerninhalte in **affektive Lernziele** (emotionale Zustände wie Interesse, Einstellungen, Wertschätzungen, Werte und Haltungen) übergehen sollen (Definitionen gemäß BREMER (2006)). Für einen Ingenieur ist maßgeblich, dass er Sachverhalte bewerten kann und zwar wünschenswerter Weise aus dem Gefühl heraus. Häufig sind die Lebenssachverhalte so komplex, dass keine überschlägige Berechnung ad hock möglich ist. Folglich braucht der Ingenieur einen Spürsinn dafür, an welcher Stelle "es knirscht", also die Konstruktion kritisch ist. Dann kann er dieses Faktum gezielt untersuchen, wobei für unkritische Stellen ruhigen Gewissens vereinfachende Annahmen getroffen werden können. Das Problem an numerischen Berechnungen sind nach wie vor die Rechenzeiten. Nahezu unmöglich ist die Simulation und feinste Analyse eines ganzen Bauteils. Daher ist die frühe Erkenntnis möglicher Problemstellen letztendlich eine Zeit- und Kostenersparnis.

Kognitives Lernziel in Bezug auf die mechanische Berechnung der Faserverbundkunststoffe ist das Anwenden von Wissen. Die Anwender sollen:

- \rightarrow die Berechnungsverfahren für die Einzelschicht anwenden können,
- → die Transformation der Einzelschicht aus den Einzelschichtkoordinatensystemen in globale Koordinaten vornehmen können,
- → die Einzelschichten, die in globalen Koordinaten ausgedrückt werden, mathematisch zum Gesamtlaminat zusammenfassen können und

Q

 \rightarrow die mechanischen Kenngrößen aus dem Laminat bestimmen können.

Ebenso sollen z. T. **psychomotorische Lernziele** vermittelt werden, wie der Herstellungsprozess eines Faserverbundlaminats. Mit Hilfe der neuen Medien lassen sich diese Abläufe in bewegten Bildern viel besser vermitteln (in Form eines Videos oder Animated Gifs) als mit viel erklärendem Text oder schwarz-weiß kopierten – und damit häufig schlecht erkennbaren – Fotos, wie das zuvor gewöhnlich in Lehrveranstaltungsskripten gehandhabt wurde.

4.5.4.2 Lerninhalte

Der konkrete Ablaufplan der Veranstaltung mit den Feinzielen der jeweiligen Lerneinheiten findet sich in Abschnitt 4.5.5.2. Zur Strukturierung der Inhalte sei vorab zum besseren Verständnis die Ausgangslage geschildert, um daran anknüpfend das neue, überarbeitete Konzept der Ausrichtung der Lehrveranstaltung darzulegen.

4.5.4.2.1 Ausgangslage und Problematik

Die Lehrinhalte einer vor ca. 10 Jahren konzipierten Lehrveranstaltung "Berechnungsverfahren in der Kompositmechanik I und II" (Vorlesung mit Übung) dienen als Ausgangsbasis, um nun in überarbeiteter Form mit einer etwas geänderten Zielrichtung in eine Blended Learning⁴³-Veranstaltung an der TU Berlin, ergänzt durch ein virtuelles Labor, überführt zu werden. Es existiert ein Skript (Fließtext und Bilder darin).

Komposite beschreiben ganz allgemein jeglichen Verbund von mindestens zwei Werkstoffen, daher sind die in dieser Vorlesung behandelten Berechnungsverfahren ebenso allgemeiner Natur. Ein Teilbereich daraus sind Faserverbundkunststoffe, der in der bestehenden Konzeption nicht explizit behandelt wird. Die derzeitige Arbeitsmarktlage stellt sich so dar, dass in der Industrie (bspw. bei Airbus) händeringend Berechnungsingenieure für FVK gesucht werden. Es ist jedoch nicht sichergestellt, dass jemand, der das herkömmliche Veranstaltungskonzept durchläuft, in der Lage wäre, das erlernte allgemeine Wissen über Komposite auf den speziellen Anwendungsfall des faserverstärkten Kunststoffverbundes herunterzubrechen und zu extrahieren. Daher wird eine Verschiebung der inhaltlich und didaktisch abgeschlossenen Lerneinheiten zugunsten des aktuell populären Faserverbundkunststoffs angestrebt.

4.5.4.2.2 Neukonzept der Lehrveranstaltung

Das vorhandene Konzept einer mathematisch-theorielastigen Lehrveranstaltung bestehend aus Vorlesung und Vorrechenübung erfährt mehr Praxis- und Anwendungsbezug durch Anreicherung mit einer experimentierfähigen Lernumgebung, die das Verständnis für die Werkstoffe fördert. Die überarbeiteten Vorlesungsinhalte "Berechnungsverfahren in der Kompositmechanik I und II" beschäftigen sich ausschließlich mit einem immer stärker in den Fokus des Interesses gerückten Teilbereich der Komposite, nämlich den Faserverbundwerkstoffen und hier

⁴³ Blended Learning ist ein hybrider Ansatz, der Präsenzveranstaltungen mit Online-Lehre vermengt. Häufig geschieht das dergestalt, dass die Präsenzveranstaltungen zu Beginn des Veranstaltungszeitraums zum gegenseitigen persönlichen Kennenlernen überwiegen, später jedoch das Lernangebot im Internet stärker vertreten ist, was auch von Feedback in Chat-Räumen oder Foren begleitet sein kann [LITTLEJOHN/PEGLER (2007)].

speziell den faserverstärkten Kunststoffverbunden. Somit wird der Schwerpunkt von bisher eher allgemeinen Überlegungen zu Berechnungen von kombinierten Werkstoffen auf die durch die Luftfahrt- (Airbus, Boeing) und Windkraftindustrie immer populärer werdenden Faserverbundkunststoffe gelenkt und konkretisiert. Für die **Struktur der Lerninhalte** (siehe Bild 4.23) bedeutet das, zu Beginn werden Lerneinheiten zu

- → der Einführung der Leichtbaukonzeption (= Zielsetzung bei der Verwendung von Faserverbundmaterialien ist die Ausnutzung des Leichtbaupotenzials. Mit diesem Vorteil erkauft man sich jedoch die komplexere Berechnung, ist also ein Abwägungsprozess unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten.),
- \rightarrow der Darstellung von Vor- und Nachteilen der Faserverbundbauweise,
- \rightarrow der Vorstellung der Werkstoffkomponenten (Faser- und Matrixhalbzeuge),
- → exemplarischen Herstellungsverfahren von Faserverbundkunststoffen, im Zuge derer die Materialparameter erst festgelegt werden und
- → Gestaltungsrichtlinien für konstruktive Elemente und Krafteinleitungen in Verbundstrukturen

eingefügt, die zum Theoriekapitel "Berechnung" hinleiten. Dafür werden im Gegenzug die allgemein gehaltenen Berechnungsvorschriften für Verbunde jeglicher Art (z. B. Stahlbeton) schnell auf die Auslegung von Faserverbundkunststoffen konkretisiert und wiederum angereichert durch Online-Lehreinheiten zu

- → den kontinuumsmechanischem Hintergrund der Berechnungsverfahren, erweitert um Multiple-Choice-Fragen und den Einschub zur klassischen Laminattheorie, um dann schließlich in einem Berechnungs-Applet und zwei virtuellen Laboren zu münden (ersteres beschäftigt sich mit dem Aufbau des Laminats, zweiteres simuliert den Zugversuch zur Bestimmung der Materialeigenschaften, wobei die für die Berechnung erforderlichen Elementarkenndaten für bestimmte reale Halbzeuge bereits hinterlegt sind) und
- → methodischem Herangehen an eine experimentelle Materialprüfung. Die Lerneinheiten zu den Experimenten werden aus realen Experimenten generiert. Sie zeigen, wie aufwändig die elastischen mechanischen Laminatkenndaten bestimmt werden, die bei der Berechnung anhand semi-empirischer Formeln herauskommen.

4.5.4.2.3 Verzahnungspunkte von virtueller Laborumgebung und Präsenzveranstaltung

Für Zielgruppe 1 (zur Erinnerung: Studenten der Verbundwerkstoff-Mechanik, vgl. Abschnitt 4.5.3) wird eine Verflechtung der Präsenzveranstaltung mit dem Online-Lehr- und Lernangebot E-MechLAB und den darin eingebetteten virtuellen Laboren angestrebt, um dessen Nutzung bei den Studenten anzuregen. Bereits in der ersten Präsenzveranstaltung soll daher die Internetplattform mit dem Lernangebot ein- und vorgeführt werden. Diese Präsentation des Online-Lehrangebotes dient zur Verzahnung mit bzw. Verankerung in der Lehrveranstaltung und als Einladung, das Angebot rege zu nutzen. Darin wird der inhaltliche Aufbau des Internet-Angebotes vorgestellt, die Navigation und Orientierung beschrieben, die Zielsetzung vermittelt, in die Sammlung der Lehr- und Übungsmaterialen eingeführt und die Mechanik-Anwendungen vorgestellt. Anreize zum Besuch der Plattform werden geschaffen, indem regelmäßig auf Online-Inhalte, die zum derzeitigen Stand bearbeitbar sind, verwiesen wird. Auch Pre-Learning, wie bspw. an der TU Berlin bei den Mathematikern in der Ingenieurausbildung mit dem Projekt "MUMIE" etabliert (vgl. z. B. DAHLMANN et al. (2003)), wäre denkbar, indem bestimmte Aufgaben online als Vorbereitung auf die nächste Veranstaltung durchlaufen werden müssen. Eine direkte Verankerung der Online-Lerneinheiten ist ebenfalls möglich, indem an geeigneten Stellen des Lernstoffs die Studenten in Selbsterarbeitungsphasen an PC-Arbeitsplätzen anhand der virtuellen Labore bestimmtes Wissen erarbeiten, vertiefen und anschließend der Gruppe vorstellen. Beispiele für **Vorlesungsthemen** und deren **Anreicherung durch Online-Elemente**:

- → Einleitung: Anreicherung der vielseitigen Einsatzmöglichkeiten von Faserverbundstrukturen mit Praxisbeispielen, Filmen (z.B. Start zum Jungfernflug des Airbus 380)
- → Einleitung: Was sind Faserverbundwerkstoffe/-kunststoffe? Definition mit interaktiver Übung vertiefen
- → Berechnung einer Einzelschicht: dazu eine Präsentation im Web, die folgende Fragen klären soll: Wie ist die Einzelschicht überhaupt aufgebaut und was für Einflussfaktoren gibt es hinsichtlich der Qualität? Wie erfolgt die Herstellung eines Faserverbundkunststoffes? Wie sieht ein realer Verbund aus und wie wird dieser für die Berechnung idealisiert? Was hat das für Konsequenzen auf die berechneten Ergebnisse?
- → Linearer Mischungsansatz: Federmodell zur Visualisierung einer Parallelschaltung der Komponenten Harz und Härter für eine Belastungsrichtung längs zur Faser oder Reihenschaltung bei Belastung quer zur Faserrichtung.

4.5.4.3 Lehrmethoden

Die Wissensvermittlung im virtuellen Labor – hier ausschließlich auf den Online-Anteil bezogen; dieser unterlag dem Einfluss der Autorin, die in der Präsenzlehre nicht beteiligt war – findet mittels folgender Lehrmethoden statt:

- Darstellung und Präsentation durch Selbstlernmaterialien zur Vermittlung eines inhaltlich spezifizierten, klar strukturierten und abgegrenzten Wissensbereichs (aufnehmendes Lernen gemäß BREMER (2006)). Beispielsweise wird die Definition eines Faserverbundwerkstoffs vorgestellt, die unterschiedlichen Faser- und Matrixmaterialien werden erörtert oder dessen Funktionen werden anhand vieler, teils animierter Bilder und kurzer Lehrtexte dargestellt.
- 2. Konstruktivistische Elemente kommen in der Abwandlung einer Fallstruktur in einer Aufgabenstellung zum Einsatz (multipler Konstruktivismus bei fallbasiertem Lernen). Für den Anwender können folgende interaktive Übungsaufgaben zur Verfügung gestellt werden:
 - → In Bezug auf das Beispiel der Faserverbundwerkstoff-Definition bedeutet dies, der Anwender soll für verschiedene Anwendungsbeispiele, die er in Bildform vorgegeben

bekommt, entscheiden, ob es sich dabei gemäß der Definition um einen Faserverbundwerkstoff handelt oder nicht;

- → die Fasereigenschaft der Anisotropie ist vom Nutzer zu abstrahieren und an vorgegebenen Fotos von Beispielen aus der Umwelt zu bejahen oder zu verneinen;
- → für die einzelnen Matrixwerkstoffe sind ihre jeweiligen Eigenschaften, die verbal vorgegeben werden, infolge des ihm eigenen chemischen Verhaltens des Kunststoffes zu analysieren und gekennzeichneten Feldern zuzuordnen;
- → Matrixfunktionen werden anhand einer bildhaften Darstellung durch den Anwender aufgedeckt und erhalten einen kurzen erklärenden und einprägsamen Text.

Zu all diesen Beispielen gibt es eine systemseitige Rückmeldung, wenn eine Zuordnung richtig erfolgt, eine Begründung, warum die Antwort falsch ist, bzw. bei mehreren zur Auswahl stehenden Alternativen die Möglichkeit, sich durch erneutes Überlegen mit einer falschen Antwort auseinanderzusetzen.

- 3. Das virtuelle Labor soll so wäre wünschenswert eher lernerzentriert sein, indem dieser Lerner z. B. seine eigene Aufgabenstellung generieren kann, die er dann in seinem virtuellen Labor nachbaut und löst. Das setzt eine eigenständige Auseinandersetzung mit dem Thema (u. U. auch eine Recherche/Analyse) voraus. Zum jetzigen Zeitpunkt ist das eine Vision.
- 4. Ein lehrerzentrierter Anteil, in dem Wissen bereitgestellt und präsentiert wird, lässt sich schwerlich umgehen. Zumal bereits die Vorgabe einer Softwareumgebung der virtuellen Labore und um sie herum **lehrerzentriert** ist, denn die Programmgestaltung wird bedingt durch die Technik gewissen Einschränkungen unterliegen, sodass sich der Lerner nicht gänzlich frei entfalten kann.

4.5.4.4 Szenarien netzbasierten Lernens

Um einerseits gute Verständlichkeit der Inhalte und andererseits leichten Zugang dazu für die Zielgruppen aus Studenten und weiterem interessiertem Publikum zu gewährleisten, wird konzeptionell eine zweigleisige Strategie verfolgt (vgl. auch BACHMANN et al. (2001), KER-RES (2001), SAUTER et al. (2004)):

- → Zum einen soll Blended Learning im Wege des Anreicherungskonzepts erfolgen, wobei die Präsenzlehre wie bisher klassisch im Frontalunterricht praktiziert bestehen bleibt. In Bezug auf Intensität und Funktion des Online-Lehreanteils lässt sich sagen, dass die im Internet bereitgestellten Informationen reines optionales Zusatzangebot (Anreicherungskonzept) nach der in BREMER (2007) gegebenen Definition sein sollen.
- → Zum anderen kann darüber hinaus ein breiterer Adressatenkreis sofern Interesse besteht – von dem Online-Angebot profitieren, ohne Studentenstatus zu besitzen oder den Präsenzkurs absolvieren zu wollen (Virtualisierungskonzept).

Bei dem hier vorgestellten Vorhaben wird für Zielgruppe 1 (vergleiche Abschnitt 4.5.3) das Anreicherungskonzept angestrebt. Die Präsenzlehre zur "Mechanik der Faserverbundkunst-

stoffe" soll durch die Bereitstellung begleitender und ergänzender multimedialer Materialien, die optional genutzt werden können, angereichert werden. Es sollen also keine Präsenzveranstaltungen substituiert werden, der **Virtualisierungsgrad** ist somit gering. Die Anreicherung soll im Wege eines virtuellen Labors zur freiwilligen Benutzung geschehen.

Seit einigen Jahren ist es in der Mechanik üblich, Zusatzmaterialien und ggf. auch Skripte zur Vorlesung sowie Aufgaben und Musterlösungen zur Übung auf den Lehrstuhlhomepages zur Verfügung zu stellen (frei verfügbar, nicht passwortgeschützt). Des Weiteren gibt es Newsboards (\approx Foren für die Betreuer der Lehrveranstaltung), in denen aktuelle Ankündigungen gemacht werden. Hier sollen bewusst keine weiteren Foren zur Kommunikation der Studenten untereinander zum Einsatz kommen, da ein vorhandenes (sog. "Moses"-)Forum der TU Berlin genutzt werden soll, wenn über Lehrveranstaltungen unter Studenten diskutiert wird. Die Studenten sollen nicht mit weiteren Logins, Passwörtern und nahezu gleichen Tools wie Foren, die zwar dasselbe können, aber plattformabhängig immer anders zu bedienen sind, behelligt werden. Die TU Berlin hält derzeit ohnehin schon diverse unterschiedliche und uneinheitliche Plattformangebote bereit, die diese angesprochene Problematik mit sich bringen, was bei den Studenten verständlicherweise für Verwirrung sorgt. Ein weiteres Argument, Kommunikationsmedien der Plattform nicht für die Anwender nutzbar zu machen, liegt darin begründet, dass es sich bei den Zielgruppen des Online-Angebots nicht um eine geschlossene und homogene Zielgruppe mit identischem Zeitplan handelt, da gleichermaßen Studenten als auch Externe angesprochen werden sollen und dieser externe Personenkreis nicht mit Benutzerkonten im Hochschulrechenzentrum ausgestattet werden kann.

Die in BREMER (2006) angesprochenen Elemente des Integrationskonzepts (= Mischung aus Online- und Präsenzphasen) sollen den Usern im Rahmen der virtuellen Laborumgebung zur freiwilligen Nutzung angeboten werden. Das Angebot besteht aus:

- → Online-Übungen und -Selbsttests,
- → Selbstlernmaterialien zur Bereitstellung von Wissen, welches dann angewendet und überprüft werden kann,
- \rightarrow Visualisierungen und
- \rightarrow interaktiven Animationen.

Für externe Benutzer des virtuellen Labors (Zielgruppe 2) liegt ein hoher Virtualisierungsgrad vor, sodass vom **Virtualisierungskonzept** gesprochen werden kann.

Das Backend der ^{open}sTeam-Kooperationsplattform wird derzeit ausschließlich von den Betreuern als Autorensystem zur kollaborativen Erstellung und Pflege der Webinhalte verwendet. Die virtuellen Räume können dabei zum webgestützten Austausch gemeinsamer Dokumente, deren Verwaltung, Rechtevergabe und daneben auch zu semantischer (flächiger) Strukturierung dieser gemeinsamen Dokumente mit dem Whiteboard von ^{open}sTeam, dem so genannten Medi@rena Composer, dienen.

R

4.5.4.5 Medien

Die Lernmedien sollen möglichst abwechslungsreich und viele Sinne ansprechend gewählt und eingesetzt werden. Erste Untersuchungen zur sinnvollen Umsetzung der Inhalte mit Multimedia-Elementen wurden in KÜCKELHEIM (2006) durchgeführt, daran schlossen sich WUTTKE (2008) und (2009) an. Das Umsetzungsszenario beinhaltet öffentlich zugänglich (ohne Passwortschutz) in der virtuellen Laborumgebung zur Faserverbundmechanik die folgende Lernmedien:

- → anschaulich dargebotenes Wissen in kleinen "Lernhäppchen" auf vernetzten, inhaltlich modular aufgebauten Webseiten (textbasiert), die die Laborumgebung der virtuellen Labore darstellen. Das angeeignete Wissen aus diesen Selbstlernmaterialien kann dann direkt in Online-Übungen angewendet und somit auf Verständnis überprüft werden; Im einzelnen dargeboten durch
 - Texte gespickt mit Visualisierungen zur besseren Veranschaulichung;
 - o Beispiele und "Eselsbrücken" zum längerfristigen Behalten;
 - darin eingebettet finden sich Formeln (zur Herausforderung bei der Darstellung von Formeln im Web vgl. Abschnitt 4.5.5.4).
- → zahlreiche Bilder und Animationen: Animated Gifs oder Flash-Animationen, die bestimmte Abläufe darstellen;
- \rightarrow Audiodateien, die bebildert sind, zur besseren Orientierung im gesprochenen Text;
- → interaktive Wissensbereitstellung und -überprüfung mittels Multiple-Choice-Tests;
- → interaktive Aufgaben zum Üben und Vertiefen der "Lernhäppchen", umgesetzt mittels Flash-Programmierung als Selbsttests für die Nutzer;
- → Java-Applets, wo der Lernende zur Verankerung des Wissens interagieren muss: zum Nachvollziehen und Durchführen
 - o wesentlicher Schritte der klassischen Laminattheorie,
 - o vorgelagerter Berechnungen von Laminat- bzw. Einzelschichtdicke und
 - o der Mischungsregeln;
- → virtuelle Labore (in Java-3D programmiert) zum Stapeln und Variieren von Laminateinzelschichten, die zusammengefügt als Gesamtlaminat im Anschluss einer Zugprüfung unterzogen werden können. Java wird von MÜLLER/DÜRR (2002) als "der Königsweg" bezeichnet, da es weitgehend unabhängig vom Betriebssystem und entweder als eigenständige Programme, die sehr umfangreich werden können, oder in Form von Applets in HTML eingebunden werden. Die mit Hilfe der Java-Programmierung erzielbare Rechengenauigkeit der Lernanwendung ist hier das ausschlaggebende Kriterium⁴⁴. Die insge-

⁴⁴ Mit dem Datentyp "double", einer Gleitkommazahl doppelter Genauigkeit, steht mit 64 Bit ein Wertebereich von $\pm 4,9 \cdot 10^{-324}$ bis $\pm 1,7 \cdot 10^{308}$ zur Verfügung [CADENHEAD/LEMAY (2005)].

samt eingesetzten Programme zur Umsetzung der Lernbausteine am Beispiel des Berechnungskapitels zur Mechanik der Faserverbundkunststoffe können Bild 4.22 entnommen werden.

	Videoerstellung	Virtuelles Labor	Internetseiten: Erklärungen
Format	Animation	Interaktion	Statischer Text + Interaktion
Didaktischer Mehrwert	 Reduzierung des <i>Cognitive Loads</i> Verwendung mehrerer Sinne Motivationssteigerung: Nicht nur Formeln 	 Veranschaulichung Feedback durch Interaktivität Motivationssteigerung: selber experimentieren 	 Erklärungen Hyperreferencing: Steigerung der Individualität Feedback durch MC
Software/ Sprache	 Povray LaTeX ImageMagick Cinelerra, Mencoder 	 Eclipse Javac, Java Misfit Model 3D 	HTML JavaScript XML CSS 2.0 LaTeX
Aspekte	 Umsetzung von Theorie in Skizzen Abstrahierung der Objekte in "mathematisches" Modell Erstellung von Objekten in Povray Beschreibende Texttafeln Bewegungsabläufe Rendern von 14886 Einzelbildern Zusammenfügen zu einem Video Erstellung eines Textes Aufnahme der Tonspur Hinzufügen einer Audiospur Erstellen des Gesamtvideos 	 Konzeptionierung einer 3D-Welt Einarbeitung in 3D Programmierung Erstellung eines virtual Universe: Sichteinstellungen, Lichtquelle, etc. Erstellen von 3D- Geometrien (Zugprüf- maschine, Raum etc.) Texturen für Geometrien Programmierung von Schnittstellen zwischen Applet und 3D-Welt Animationen (automatische Bewegungsabläufe) Interaktionen (Tastatur, Maus) 	 Aufbereitung der Theorie Identifizierung und Beurteilung von Alternativen zur Formeldarstellung Einarbeitung in HTML, XML, CSS, JavaScript Umsetzung des Konzepts in Abstracts Erstellen und Berechnen eines ausführlichen Beispiels Erstellung von etwa 40 MC Fragen Übersichtsgraphiken (als Imagemaps) Weiterführende Verlinkung zu externen Seiten Anreicherung durch zusätzliche Abbil- dungen und Bilder

Bild 4.22: Wesentliche Bestandteile und Medien der (technischen) Realisierung des Faser-Kunststoff-Verbund-Berechnungskapitels [WUTTKE (2009)] Q/

Noch nicht realisiert, aber darüber hinaus denkbar wäre die geeignete Einbindung von Filmen über die Herstellung von Faserverbundbauteilen in die Laborumgebung. Entsprechendes Videomaterial existiert bereits.

4.5.5 Planung der konkreten Umsetzung

4.5.5.1 Zeitplan für die Einführung

Bereits seit 2007 steht das Online-Angebot der virtuellen Labore der Zielgruppe 2 (siehe Abschnitt 4.5.3) in Teilen zur Verfügung. Mit der schrittweisen Konzipierung der Lerninhalte und Ausgestaltung für die Online-Lehre wurden diese veröffentlicht, beginnend mit den Lerneinheiten "Einleitung" und "Aufbau von Faserverbundkunststoffen" (vgl. dazu auch Umsetzungskapitel Abschnitt 4.5.6). Unter anderem wirbt der uns unterstützende Faserverbundwerkstoff-Lieferant R&G dafür auf seiner Firmen-Homepage, direkt auf der Startseite [R&G (-ol)].

Die Einführung bei Zielgruppe 1 erfolgt mit Wiederaufnahme der neukonzipierten und überarbeiteten Vorlesung "Mechanik der Faserverbundkunststoffe" zum Wintersemester 2010/11, wie in Abschnitt 4.5.4.2.2 aufgezeigt.

4.5.5.2 Ablaufplan der Veranstaltung

An dieser Stelle sei in Tabelle 4.2 ausschließlich die Planung der virtuellen Laborumgebung vorgestellt, deren Ablaufplan für ein E-Learning-Szenario im Sinne des **Virtualisierungs-konzept**s konzipiert ist, wie es die Zielgruppe 2 nutzt (vgl. Abschnitt 4.5.3). Die Planung der Präsenzphasen erfolgt erst nachgelagert, daher kann darauf kein Einfluss genommen werden. Bei passender Gelegenheit werden lediglich Verzahnungspunkte zu (möglichen) Vorlesungs-inhalten aufgezeigt.

Anmerkungen zu Tabelle 4.2:

Zur **Struktur der Veranstaltung** ist festzustellen, dass die virtuellen Labore und ihre umgebende Lernumgebung ein reines Online-Lernangebot darstellen. Der "virtuelle Labor-Rundgang" wird als Selbstlernangebot konzipiert, um Zielgruppe 2 (siehe Abschnitt 4.5.3) gerecht zu werden.

Die **Lernzeiten** für die Studierenden wurden mit einigen Akteuren der potentiellen Zielgruppe getestet (siehe Zahl in Klammern hinter der Zeitvorgabe). Sie arbeiteten die Aufgaben und Texte durch und notierten ihre Lernzeiten, zur Überprüfung der von den Lehrenden angenommenen, geschätzten Lernzeiten. Die Überprüfung erfolgte durch studentische Hilfskräfte, die mit der Materie nicht vertraut sind. Im Berechnungskapitel werden dem Anwender zum Einstieg in jede Lerneinheit die Richtwerte für die Bearbeitungszeit angegeben (vgl. Bild 4.35), die daher in der Tabelle nicht näher aufgeschlüsselt sind, damit ein Benutzer eine Übung auch zeitlich einplanen kann.

Tabelle 4.2: Lerneinheit, Inhalte, Methoden und Medien zur Mechanik der Faserverbundkunststoffe (Konzept) [E-MECHLAB VERBUNDWERKSTOFF-MECHANIK (2011-ol)]

Lerneinheit Name	Dauer	Inhalte	Methoden/	Medien
	[Min.]		Aufgaben	
Was sind Faser-	5 (4)	Definition:	Schriftliche Präsentation der Definition	Text
verbundwerkstoffe? "		Faserverbundwerkstoff	lesen	
a) Nachbereitung der 1.	10 (4)	Ubung: Handelt es sich bei	Visuell + psychomotorisch: Interaktive	Flash-Applet
Präsenzeinheit, die		gegebenen Beispielen um	Ubung für den Anwender, in der er/sie	
Einleitung, Überblick,		Faserverbundwerkstoffe:	durch Zuordnung von Beispielen	
Nachteile beinhaltet		Ja/INCHI?	Rückmeldung vom System bekommt	
			Ruckmendung vom System bekommt	
Einleitung:	20 (10)	** *		A 1' 1 / ' ' T 1/ .
geschichtliche	30 (10)	Historie der	Auditiv + visuell: Prasentation der	Audiodatei mit Fakten +
Entwicklung		des Finsatzes in früherer Zeit	anschauen	Dilucili
Verteile (Nechteile a)	30	Vorteile und Nachteile der	Präsentation der Inhalte lesen und	Beispielbilder und Text
vortelle/Inachtelle	(6+6)	Werkstoffe und Ihrer	Bilder zur Verstärkung betrachten	Deispiciolidei ulla Text
Grundgedanken des	30 (8)	Zweckleichtbau mit Animation	Präsentation des Wissens lesen.	Animated gifs zum
Leichthaus ^{a)}	20(0)	Sparleichtbau mit Übung	Eselsbrücken aus dem täglichen Leben:	Veranschaulichen von
Lorentotuus		C C	steigern Merkfähigkeit,	Abläufen, interaktive
		Ökoleichtbau	Anwender können anhand eigener	Übung: Flash-Applet
			Überlegungen üben	
Aufbau				
von Faserver-	90 (4)	Die Bestandteile:	Präsentation des Wissens lesen,	Animated gifs zum
bundwerkstoffen b)		– Fasern (4), Faserwerkstoffe	Eselsbrücken zum täglichen Leben,	Veranschaulichen von
b) Nachbereitung der 2.		(10) und deren -anordnung $(10),$	Übungen bearbeiten - zur Anisotropie	Abläufen, interaktive
Präsenzeinheit, in der		Matrix (16) und deren	(4) zur Unterscheidung der	Ubung: Flash-Applet
die Werkstoffe und		Matrixaufgaben	Matrixwerkstoffe (Duroplaste,	
Halbzeuge behandelt			Elastomere, Thermoplaste) (8)	
werden				
Produktentwicklung:				
Herstellungsverfahren ^{c)}	70 (18)	Manuelle und industrielle Herstellungsverfahren	Präsentation des Wissens durcharbeiten, ggf. Übung bearbeiten	Text und einige Bilder der Verfahren
	•			
Bauteilgestaltung	20	Was 1st zu beachten/besonders	Prasentation des Wissens lesen,	Text und Bilder
c) Nachbereitung der 3.		Easerverbundbauteilen?	ggf. Ubung bearbeiten	
Präsenzeinheit über		i aserverbundbautenen.		
	40	Internalisishing dar börfi satar	Drüsentetion des Wissens lesen	Taut und Dildan
Bauteilversagen "	40	Versagensfälle von	agf Übung bearbeiten	möglichst systematisjert
d) Nachbereitung der 4.		Faserverbundbauteilen:	ggi. Obung bearbenen	Fragen zur
den Materialeigen-		 Delatmination 		Wissensüberprüfung
schaften Anisotropie		(=Zwischenfaserbruch)		
Elastiziät und		– Faserbruch		
Steifigkeit anknüpft				
Experimente ^{e)}	60	Ablauf der Probenherstellung	Präsentation des Wissens lesen.	Text und Bilder:
e) Exkurs zur exp		Versuchsaufbau und -ablauf	Anleitung zum Selbermachen	Verlinkte
Parameterbestimmung		Ergebnisse	durchschauen, evtl. nachmachen	Ablaufschemata zur
zu 5. Präsenzeinheit		Ligeomote		Visualisierung von
über Materialgesetze				Zusammenhängen und
-				Abfolgen
Berechnungsverfahren ^{f)}	lange	Theorie zur Laminatberechnung	Präsentation des Wissens lesen,	Einführungsvideo, Text,
f) Begleitende	-	angefangen bei der Einzel-	ggf. Übung und Veranschaulichung	Formeln, Zeichnungen,
Vertiefung der		schicht, Koordinatentransfor-	durchgehen: überführter	Animationen, Multiple-
Präsenzeinheiten 6-12,		mation, Aufsummation der	formelgespickter Text in einen	Choice-Fragen zur
die die einzelnen		winkelabhängig abgelegten	ansprechenden Webauftritt, teilweise	Uberprüfung des
Berechnungsverfahren		Einzelschichten zum Gesamt-	konnten Einflussfaktoren aus Formeln	Erlernten, virtuelles
zum Thema haben, ggf.		Iaminai, berechnungsprogramm	Auswirkung bei Verönderung des	Labor zum Laminat-
mit Pre-Learning-		sischen Laminattheorie (CLT)	Parameters dargestellt werden	stand (Java 3D)
Antellen				Sund (Java JD)

 \mathbb{Q}



4.5.5.3 Technische Ausstattung und Aspekte

Bei der Umsetzung der Lerneinheiten für die Online-Lehre steht die Benutzerfreundlichkeit der Anwendungen im Vordergrund. Daher ist erklärtes Ziel, die technischen Voraussetzungen für die Anwender so gering wie möglich zu halten. Doch was wird benötigt, um eine erfolgreiche E-Learning-Anwendung zu gestalten? Schnell wird deutlich, eine gewisse Notwendigkeit an Softwareinstallation und Hardwareausstattung ergibt sich dennoch zur Nutzung virtueller Labore. Eine Analyse der Frage nach studentischen Standards an Rechnerkapazitäten ist nicht leicht und einheitlich zu beantworten. Es ist jedoch davon auszugehen, dass Zugang zu einem internetfähigen PC mit entsprechenden Hard- und Softwarevoraussetzungen gegeben ist – wenn nicht privat, dann über studentische Poolraum-Rechner. Werden Lerneinheiten der virtuellen Labore zum eigenständigen Erarbeiten von Wissen in Präsenzlehrveranstaltungen eingebunden (Blended Learning), ist bei der Raumplanung die Verfügbarkeit von PC-Arbeitsplätzen oder wireless LAN zu berücksichtigen, was jedoch grundsätzlich im Bereich des Möglichen liegt.

Die Gestaltung der Webseiten erfolgt im Rahmen der Stylesheettechnik mit HTML optimiert für einen Internet-Browser [MOZILLA FIREFOX (-ol)]. Zur Umsetzung interaktiver Übungen oder animierter Präsentationen sowie von Filmen dient weitestgehend ein augenblicklich etablierter Standard für "*die Darstellung multimedialer, interaktiver und animierter Inhalte*", der sich durch einfache Bedienbarkeit auszeichnet [ADOBE FLASH (-ol)]. Der Genauigkeit sind dort jedoch stellenweise Grenzen gesetzt, wenn es beispielsweise um numerisch exakte Berechnungen von mechanischen Problemen geht. In solchen Fällen wird auf java-Programme zurückgegriffen. Ebenso im Falle der Visualisierung dreidimensionaler Laborumgebungen, die mit Hilfe von java3D umgesetzt werden. Eine weitere Anforderung stellt die Darstellung von Formeln im Web dar, auf die näher im folgenden Abschnitt 4.5.5.4 eingegangen wird.

4.5.5.4 Eigenart ingenieurwissenschaftlicher Online-Lehrinhalte – Formeln im Web

Wie in der Mathematik und Physik sind auch die Ingenieurwissenschaften recht "formellastig", worin gleichzeitig ihre Stärke wie auch ihre Schwäche liegt: Formeln sind mathematisch präzise, aber für "junge Studenten" im Allgemeinen recht "langweilig" anzuschauen, da sich der Sinn für den Anfänger von vornherein meistens nicht erschließt. Ihre Einbindung in die Ingenieurpraxis und der damit verbundene Nutzen kann durch virtuelle Labore verdeutlicht werden. Die Darstellung von Formeln im Web ist jedoch nicht trivial. Da die Mechanik aber auf Formeln basiert, gilt es, diese in einer entsprechenden E-Learning-Umgebung formal korrekt und lesbar darzustellen.

Hindernisse, Grenzen und Lösungsansätze

Obwohl HTML am renommierten schweizer CERN entwickelt wurde [KORPELA (-ol)], bietet es dennoch nur unzureichende Möglichkeiten zur Darstellung von Formeln im Web, wie Formel (4.1) exemplarisch anhand des sog. "linearisierten Darstellungsansatzes" verdeutlicht:

$$[(x + y)^{(1/3)}]/z.$$
 (4.1)

Darüber hinaus gibt es zwar KORPELA (-ol) zufolge einige Ansätze, denen es jedoch für ungeübte Leser an Klarheit und Struktur mangelt. Eine Auswahl möglicher Lösungsansätzen, um

Q

dennoch Formeln in einer E-Learning-Umgebung veranschaulichen zu können, ist im Folgenden kurz zusammengetragen:

- → Das Zeichensetzungssystem LaTeX, aufbauend auf dem 1977 entwickelten TeX, mit dessen Unterstützung wissenschaftliche Texte verfasst und übersichtlich gestaltet werden können, legt besonderes Augenmerk auf die korrekte und normenkonforme Darstellung von Formeln [MITTELBACH/GOOSSENS (2004)]. Das Ergebnis liegt bspw. in Form einer PDF-Datei vor, die ihrerseits zwar in einem Content Management System hochgeladen, dann jedoch nicht mehr zukünftig kooperativ bearbeitet oder weiterentwickelt werden kann. Die Erweiterungen LaTeX2HTML [DRAKOS/MOORE (2001-ol)] oder TeX4ht [GURARI (2010-ol)] ermöglichen eine einfache Konvertierung bereits existierender LaTeX-Dokumente in HTML, wobei Formeln als Grafiken exportiert und als solche im HTML mit Verweis auf die externe Bildquelle eingebunden werden. "Für die Qualität dieser gut formatierten (Formeln in) Grafiken muss man allerdings den Nachteil der schlechteren Skalierbarkeit der Website in Kauf nehmen" [WUTTKE (2009)], was bei den heutzutage üblichen Displayauflösungen von Netbooks, Tablet-PCs und Smartphones auf der einen und großzölligen Arbeitsplatzbildschirmen auf der anderen Seite keine optimale Ausgangslage zum Lernen erzeugt.
- → Bei WebEQ und WebTeX [MIT (2000-ol), KORPELA (-ol)] "werden Formeln ähnlich wie bei LaTeX formuliert, aber durch jeweils ein Java-Applet (WebEQ) ausgewertet und dargestellt", beschreibt WUTTKE (2009). Java unterstützt darüber hinaus interaktive Prozesse, werden diese jedoch nicht genutzt, verzögern die Applets die Webseitenanzeige unnötig und die Formeln weisen optische Schwachpunkte auf.
- → Daneben existiert MathML zur Generierung von Formeln für die Darstellung im Web, die nicht LaTeX-basiert sind und dessen Einsatz im Test ebenfalls nicht überzeugen konnte. Schwachpunkt ist auch hier, dass MathML nicht browserunabhängig unterstützt wird.
- \rightarrow Eine vielversprechende Alternative dazu bietet CHAVCHANIDZE (2007-ol) zufolge die Einbettung der Formeln direkt in die Webseite. Dies geschieht wie üblicherweise bei der Webseitenerstellung über den Einsatz von Cascading Style Sheets (CSS), indem eine CSS-Datei das Format von Objekten einer Webseite und eine weitere Datei (z. B. XML oder HTML) die Inhalte festlegt [Bos (2011-ol)]. Die Formel selbst wird programmiert, Sonderzeichen darin über ihren ASCII-Code aufgerufen, sodass dieser Umstand bei den vielen in der Mechanik verwendeten griechischen Buchstaben autorenseitig für eine gute Darstellung in Kauf genommen werden muss. Da die hier verwendete Kooperationsplattform opensTeam für die Generierung einer Webseite eine Datei namens abstract.html erwartet, kann darin zur Einbindung der im xml-Format vorliegenden Formel auf sog. <ir>iframes> zurückgegriffen werden. Vorteilhaft daran ist, dass Formel und umgebender</r> Text wie aus einem Guss aussehen, da sie optisch angeglichen werden können. Ein weiteres Argument für diese Umsetzungsalternative ist neben der guten Skalierbarkeit die Barrierefreiheit. PDF-Dateien, Bilder und Java sind nicht barrierefrei und können daher nicht von Personen mit Sehbehinderungen unter Zuhilfenahme von Screenreadern erfasst werden, HTML/CSS hingegen schon. Leider wird CSS 2.1 nicht von allen Browsern unterstützt, stellt CHAVCHANIDZE (2007-ol) fest, wohl aber vom MOZILLA FIREFOX (-ol), auf den E-MechLAB optimiert wurde.



Eher unzureichende Lösungen liefern LaTeX-Derivate mit entweder der Möglichkeit, Formeln als Grafiken oder innerhalb eines Java-Applets darzustellen. Letzteres verlangsamt den Webseitenaufbau enorm, wenn gleichzeitig mehrere Applets geladen werden müssen. Ersteres bringt den Nachteil mit sich, dass kooperative nachträgliche Manipulation der einmal erzeugten Bilder schwerlich möglich ist. Daher wird der Weg über die Einbindung von Klassen mittels CSS, die auf bestimmte Zeichenbibliotheken zurückgreifen, beschritten. Über die direkte Einbettung der Formeln in der Webseite mittels XML und CSS 2.1 können bereits beachtliche Ergebnisse erzielt werden, zudem sind die Formeln im Text gut skaliert und die Webseite ist barrierefrei. Ein Standard, der browserunabhängig korrekt angezeigt wird und gleichzeitig einfach (alltagspraktisch) zu generieren ist, scheint sich zum Zeitpunkt der Implementierung des E-MechLAB-Berechnungskapitels noch nicht etabliert zu haben⁴⁵, demzufolge bringt die Entscheidung für diesen Umsetzungsweg die Einschränkung mit sich, dass die fehlerfreie Darstellung der Formeln aktuell lediglich mit dem Browser MOZILLA FIREFOX (-ol) gewährleistet ist.

4.5.5.5 Zu erwartende Schwierigkeiten bei der Umsetzung

Die Aufgabenstellung verspricht bereits Interdisziplinarität. Darin liegt der Reiz, aber auch die Krux an einer solchen Aufgabe. Personen aus der inhaltlichen Disziplin (Maschinenbau) versuchen sich an der technischen Umsetzung von E-Learning. Sie sind allerdings keine Experten für Didaktik oder Informatik, daher kann hier der Schwerpunkt nicht auf dem didaktisch-methodischen Vorgehen oder der Informationstechnik gesehen werden, sondern in der Auswahl und Aufbereitung der Inhalte. Alles andere wäre vermessen zu behaupten.

Die inhomogene Zielgruppe kann dazu führen, dass einzelne Anwender die Art der Aufbereitung der Lerninhalte nicht ansprechend oder zu trivial empfinden. Im Maschinenbau findet man zwei Arten von Lerntypen ausgeprägt: nennen wir sie der Einfachheit halber "Theoretiker" und "Praktiker". Theoretiker ziehen den formalen Beweis vor, verstehen eine Schwingung beim Anblick einer Dgl. 2. Ordnung. Der Praktiker hingegen ist ein eher praktischanschaulich veranlagter Mensch, der zunächst die Wellenausbreitung verursacht durch einen Tropfen auf der Wasseroberfläche sehen möchte, um die Ausbreitung einer Schwingung zu verinnerlichen. Ihm kommt das Online-Angebot entgegen. Theoretiker hingegen fühlen sich durch komplexe formale Ausdrücke und Herleitungen angesprochen und werden somit auch bereits durch das als Ausgangslage dienende Vorlesungsskript ihren Bedürfnissen entsprechend bedient. Sie könnten das Zusatzangebot durch das virtuelle Labor ablehnen, weil es nicht in ihr bevorzugtes Lernschema hineinpasst.

Eine naturgemäß uneinheitliche Ausgangslage an Vorkenntnissen kann bei dem inhomogenen Adressatenkreis der virtuellen Lernumgebung ebenfalls dazu führen, dass diese von den einen als trivial und den anderen als zu kompliziert empfunden wird. Die Strategie, das Einstiegsniveau möglichst gering zu gestalten, kann u. U. die höher qualifizierten Nutzer verprellen, sofern sie den Anstieg des Niveaus und die Möglichkeit des späteren Einstiegs verkennen.

⁴⁵ In diesem Bereich zeichnen sich jedoch gegenwärtig einige vielversprechende Entwicklungen von fertigen Javascript Libraries für die Formeldarstellung ab, vergleiche z. B. MATHJAX (2011-ol) oder JQMATH (-ol).

4.5.6 Umsetzung – Lerneinheiten zur "Mechanik der Faserverbundwerkstoffe"

4.5.6.1 Strukturentwurf

Eine grundlegende Voraussetzung sowie Dreh- und Angelpunkt einer jeden anforderungsgerechten E-Learning-Umgebung ist eine klar gegliederte Startseite. Sie dient dazu, dem Lernenden einen geeigneten Überblick über die angebotenen Themengebiete, die ihn erwarten, zu verschaffen. Der Benutzer kann von dort aus individuell in Lerneinheiten, die ihn interessieren, einsteigen und dazwischen navigieren. Als Hilfestellung dazu dienen hierarchische Übersichten der Inhalte, die auf der in Bild 4.23 gezeigten Einstiegsseite des Online-Lehrangebots



Bild 4.23: Startseite zur Mechanik der Faserverbundwerkstoffe mit Übersichtsschaubild und Inhaltskonzeption [E-MECHLAB VERBUNDWERKSTOFF-MECHANIK (2011-ol)]

zur Mechanik der Faserverbundkunststoffe bereitgestellt sind. Logische Zusammenhänge zwischen den einzelnen Webseiten werden über diese Organigrammstruktur und aussagekräftige Schlagworte, die die jeweilige Webseite betitelt, umgesetzt. Die einzelnen Inhaltskapitel sind jeweils von dort aus mittels der aktiven Schaltflächen im Organigramm verlinkt.

Die optischen Elemente und aktiven Schaltflächen in den Übersichtsschaubildern der Laborumgebung zur Faserverbundkunststoff-Mechanik sind mit dem Muster eines Kohlenstofffasergewebes hinterlegt. Die Kohlenstofffaser stellt den "Mercedes" unter den Verstärkungsfasern dar. Ihre schwarz-bläulich glänzende Färbung wird als edel empfunden. Liegt die Faser als Gewebe vor, verleiht dies der Oberflächenbeschaffenheit zusätzlich Textur und wird daher mittlerweile auch gerne für Sichtbauteile verwendet, wie z. B. im Segelyachtenbau (obwohl deren Einsatz aus strukturmechanischen Gründen vielleicht gar nicht notwendig wäre). Analog nutzt das Design des Webauftritts zu den virtuellen Laboren eine Kombination aus dem Corporate Design der TU Berlin und der Optik dieses prägnanten Kohlenstofffasergewebes, in der Hoffnung, es möge dem Internetauftritt ebenfalls einen edlen Anstrich verleihen.





Q

Alternativ existiert das Angebot, einem seriellen "Lehrpfad", der in Bild 4.24 zu sehen ist, durch die Lerneinheiten zu folgen. "Auf diese Weise fügen sich die einzelnen Lektionen zu einem sinnvollen Zusammenhang, wie das im Rahmen einer Vorlesungsreihe üblich ist. … Da der Webseitenbesucher oft keine konkreten Informationen sucht, sondern sich allgemein über Faserverbundwerkstoffe informieren möchte, wird ihm" mit diesem hellblau gekennzeichneten Lehrpfad "eine gezielte Führung durch die" implementierten Lerninhalte angeboten. Dabei lernt der Anwender zunächst allgemeine Eigenschaften von Faser-Kunststoff-Verbunden kennen, dann die Historie, gefolgt von Vor- und Nachteilen, den einzelnen Komponenten, der Herstellung bis hin zu Versagensursachen, der Berechnung und Experimenten. "Auch wenn sich der Anwender themenbezogen einzelne" der konzipierten Internetseiten "anschaut, kann er sich jederzeit dem logischen Lehrpfad anschließen und durch die nachfolgenden Kapitel führen lassen. Um ein Springen in andere Ebenen zu vereinfachen, befindet sich auf jeder" Webseite "eine Navigationsleiste mit dem aktuellen Aufenthaltsort und den Auswahlmöglichkeiten." [KÜCKELHEIM (2006)]

Die folgenden Unterabschnitte geben einen punktuellen Einblick in die im Rahmen dieser Arbeit kreierten Webseiten. Dieser erfolgt entlang des vorgeschlagenen Lehrpfades. KÜCKEL-HEIM (2006) legte den Grundstein mit ihrer Arbeit, in der weite Teile der Struktur sowie Inhalte der einleitenden Lektionen bis einschließlich der Herstellungsverfahren von Faserverbundkunststoffen konzipiert wurden. Abschnitt 4.5.6.2 behandelt die in die Faserverbundkunststoff-Technologie einführenden Inhalte (Was sind Faserverbundwerkstoffe?, Historie, Vor- und Nachteile, Leichtbau, Aufbau aus Fasern und umgebender Matrix, Herstellungsverfahren), die später ihrerseits technisch und optisch überarbeitet wurden. Eine Sonderstellung im Rahmen der Umsetzung als Online-Lehrumgebung nimmt schließlich der Bereich der Berechnung von Faserverbund-Kunststoffen ein [WUTTKE (2008, 2009)], daher wird auf ihn gesondert und ausführlich in Abschnitt 4.5.6.3 eingegangen. Bei der Berechnung werden über eine Homogenisierung der Einzelschichteigenschaften und mittels Koordinatentransformation in ein globales Koordinatensystem die Ingenieurkonstanten für das gesamte Laminat bestimmt. Dann gilt das Augenmerk den Versagensarten und den Fällen, wann diese eintreten [HELLMANN (2008)]. Eine weitere Besonderheit stellt die Beschreibung der experimentellen Arbeit in der Lektion **Experimente** dar, die in einer ausgearbeiteten Methodik von DAU (2006) umgesetzt wurde und näher in Abschnitt 4.5.6.4 beschrieben wird.

4.5.6.2 Von der Einleitung bis zur Gestaltung mit Faser-Kunststoff-Verbunden

Die Lektionen "Einleitung" bis "Gestaltung mit FVK" dienen als eine Hinführung zu den mechanischen Hintergründen in den Lerneinheiten zur Berechnung und zu den Experimenten und insbesondere dem unbedarften Anwender dazu, zunächst die wesentlichen Besonderheiten von Faserverbundkunststoffen zu verstehen. Dazu zählen die Funktionsweise von Fasern und Matrix im Verbund wie auch die gegenwärtigen Einsatzgebiete. Zuvor wird der Frage nachgegangen, was ein Faserverbundwerkstoff eigentlich ist.

Implementierung der Lektion Faserverbundwerkstoffe

Zum Einstieg erfolgen eine Definition und die Einordnung der Faserverbundwerkstoffe in die Gruppe der Verbundwerkstoffe. Lernziel ist, diese zu erkennen und von ähnlichen Werkstoffpaarungen zu unterscheiden. "Die Definition liefert die Basis für eine einheitliche Vorstellung

von Faserverbundwerkstoffen. Auf dieser Wortbedeutung basieren sämtliche der nun folgenden Internetseiten." [KÜCKELHEIM (2006)] Ausgehend von dieser theoretischen Abgrenzung wird das Erlernte anhand der in Bild 4.25 gezeigten Übung zur Identifizierung von Faserverbundwerkstoffen in die Praxis umgesetzt. Der Anwender soll sich über die Zuordnung von abgebildeten Materialien (Holz, Erdnuss, Muskeln, ...) Gedanken machen und per Mausklick Faserverbundwerkstoffe identifizieren. Daraufhin erfolgt die Auflösung: richtig ausgewählte Abbildungen von FVW erhalten eine grüne Umrandung und es erscheint eine kurze Erläuterung neben einer Nahaufnahme des jeweiligen Werkstoffs. Einen roten Rahmen erhält ein falsch zugeordneter Werkstoff mit der entsprechenden Begründung.





Implementierung der Lektion Historie

Verbundwerkstoffe blicken auf eine lange Entwicklungsgeschichte zurück. Das Wissen über sie vertieft das Verständnis und liefert Ideen für zukünftige Entwicklungen. Die Lerneinheiten zur Historie halten die Möglichkeit bereit, sich die Geschichte anzuhören (oder durchzulesen, falls die technischen Voraussetzungen zum Abspielen der Audiodateien nicht gegeben sind). Die Geschichte ist in vier kurze Sequenzen, sog. Tracks, unterteilt. Hinter jedem "Track"-Button verbirgt sich jeweils eine Webseite mit einer Audiodatei. Diese startet automatisch, sobald die Seite vollständig hochgeladenen ist oder nach Anklicken der Schaltfläche mit dem Startsymbol darauf. Dies ist vom verwendeten Media-Player abhängig. In Bild 4.26 ist exemplarisch die Webseite zu Track 1 der Historie zu sehen.

Jeder Track ist ungefähr 1,5 Minuten lang, da dies durchschnittlich dem **akustischen Auffassungsvermögen** von Sachtexten entspricht. Die Inhalte werden durch aneinander gereihte Bilder visualisiert. Zusätzlich findet man vorgetragene Schlagworte unter den Bildern wieder, um eine Zuordnung zu dem Gehörten zu erleichtern, siehe dazu ebenfalls Bild 4.26. Sollte keine Wiedergabeeinheit für die Audiodateien im verwendeten Rechner vorhanden sein, kann die Historie der Faserverbundwerkstoffe auch durchgelesen werden. Die Texte sind bebildert, dabei untermalen die Bilder die Aussagekraft des Textes und erhöhen über die Assoziation zum Bild den Lerneffekt.



Bild 4.26: Eingebettete Audio-Datei zur Geschichte der FVK [E-MECHLAB HISTORIE (2011-ol)]

Implementierung der Lektion zum Aufbau von Faserverbundwerkstoffen

Die Lektion "Aufbau" vermittelt Wissen zu der grundlegenden Zusammensetzung von Faser-Kunststoff-Verbunden und führt die Begriffe "unidirektional", "multidirektional" und "Faservolumenanteil" anschaulich ein, den letztgenannten anhand einer sich aufbauenden Logikkette. KÜCKELHEIM (2006) begründet das damit, dass "Menschen (dazu) neigen …, logische Zusammenhänge beim Lesen zu überfliegen und als selbstverständlich zu akzeptieren. Werden *diese jedoch Aussage für Aussage nacheinander aufgezeigt, bleiben sie dem Lernenden länger in Erinnerung.*" Im Anschluss wird näher auf die Verstärkungsfasern eingegangen. Der Aufbau einer Lerneinheit wird exemplarisch anhand dieses Beispiels in Bild 4.27 gezeigt. Eine Animation stellt darin die Bedeutung der Belastungsweise heraus. Die Lektion sensibilisiert für die Faseranordnung im Werkstoff mit der sich dadurch einstellenden Anisotropie.



Bild 4.27: Lernumgebung mit Animation + Übung zu den Fasern [E-MECHLAB FASER (2011-ol)]

Aufgrund von deren Wichtigkeit für das Gesamtverständnis von Faserverbundwerkstoffen wird Anisotropie und das damit verbundene Werkstoffverhalten in einer interaktiven Übung

(vgl. Bild 4.28) thematisiert, die "*Selbsterfahrungen mit unterschiedlichsten Werkstoffen wach(ruft)*" und dadurch die Verinnerlichung des Lehrinhalts verstärkt [KÜCKELHEIM (2006)]. Dabei prüft der Anwender Alltagsgegenstände in Bezug auf vorliegende Richtungsabhängigkeit und trifft dementsprechend Zuordnungen, woraufhin er systemseitig Rückmeldung erhält.



Bild 4.28: Übung zur Anisotropie [E-MECHLAB FASER-ÜBUNG (2011-ol)]

Des Weiteren wird auf die unterschiedlichen Verstärkungsfasern und deren mechanische Eigenschaften plakativ eingegangen, bevor die Aufmerksamkeit auf die zweite Komponente des Verbundes, die Matrix gelenkt wird, die gleich zu Beginn auf die hier interessierenden Polymermatrixsysteme eingegrenzt wird.

Implementierung der Lektion Produktentwicklung

Die Lektion "Produktentwicklung" behandelt die Herstellung anhand von exemplarisch ausgewählten Verfahren, die Gestaltung und Auslegung von Faser-Kunststoff-Verbunden. Letzteres beinhaltet sowohl die Berechnungsvorschriften als auch die experimentelle Absicherung, worauf in den nachfolgenden beiden Abschnitten 4.5.6.3 und 4.5.6.4 näher eingegangen wird.

4.5.6.3 Grundgedanken zur Konzeption der Lerneinheit zur Berechnung von FVK

Der bis hierhin recht anschauliche "virtuelle Labor-Rundgang" mündet nun in den wesentlich komplexeren Lernstoff der Berechnungsmethoden. WUTTKE (2008, 2009) bereitete die komplexe Theorie, die sich in Kapitel 3 dieser Arbeit ausgearbeitet findet, in einer für Studenten ansprechenden Weise zu einem Online-Kurs auf. Der besondere Anspruch besteht dabei darin, wissenschaftlich korrekt zu bleiben, aber die Inhalte gleichzeitig leicht nachvollziehbar zu gestalten.



Bild 4.29: Dreisäulig konzipierter struktureller Aufbau der Lektion zur Berechnung von Faserverbundkunststoffen in Organigrammform [E-MECHLAB BERECHNUNG (2011-ol]

Den Strukturentwurf der Lehrinhalte zur Berechnung von Faserverbundkunststoffen zeigt Bild 4.29 in Form eines Organigramms dargestellt. Dabei wird das mithilfe der Kontinuumsmechanik zu vermittelnde Grundlagenwissen von der klassischen Laminattheorie, die den stärkeren Anwendungsbezug aufbaut, abgespalten. Parallel dazu existiert die Möglichkeit, direkt mit der Anwendung der Berechnung nach CLT zu beginnen, wobei dann erst sukzessi-

ve auf die einzelnen Schritte eingegangen wird. Diese Dreiteilung ist so angelegt, dass jeweils innerhalb eines Astes eine Bottom-Up-Struktur entsteht, d. h. aufbauend auf einem geringen Ausgangsniveau wird sukzessive vertiefendes Wissen hinzugefügt. So werden "Just-in-time" notwendige Begriffe, bspw. aus der Mathematik, eingeführt.

Eine durchgeführte Best Practice-Recherche im Rahmen von WUTTKE (2009) mündet in folgende konzeptuelle Erkenntnisse für den Berechnungsteil. Jeder Lektion vorangestellt findet der Anwender klar definierte Lernziele (Goal-Based-Scenario, vgl. EDMONDS (2006)). In einem einheitlichen Design präsentieren sich interaktive Anwendungen und etliche Fragen (siehe bewertete Erfahrungen aus dem E-Learning-Mathevorkurs für theoretische Physik an der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg in HEFFT (2006)), die in Form von Multiple Choice angeboten und mit direktem Feedback gekoppelt sind, "*sodass ein medialer Unterschied zwischen dem Internetauftritt und einem klassischen Buch deutlich wird*" [WUTTKE (2009)].

Implementierung der Lektion Kontinuumsmechanik

In den Lerneinheiten zur Berechnung von Faser-Kunststoff-Verbunden erwartet den Anwender zunächst ein anspruchsvoller Exkurs zur Kontinuumsmechanik, mit deren Hilfe Formeln hergeleitet werden, die in der klassischen Laminattheorie Anwendung finden können. Das Skript wird unverändert aus Kapitel 3 dieser Arbeit übernommen, jedoch an geeigneten Schlüsselstellen aufgebrochen, z. B. durch Aufforderung des Anwenders, mit der gezeigten Herleitung fortzufahren – unter Vorgabe der dafür notwendigen Gleichungen, "*sodass seine kognitive Belastung nicht überstrapaziert wird*" – und seine Lösung im Anschluss zu vergleichen oder Fragen zu beantworten [WUTTKE (2009)]. Um der "grauen Theorie" den Schrecken zu nehmen und unter Ausnutzung der multimedialen Mehrwerte (vgl. Abschnitt 4.5.2), findet die Einführung im Wege eines aufwändig von WUTTKE (2009) produzierten Films mit 3D-Animationen zur Veranschaulichung statt. Bild 4.30 zeigt einen Ausschnitt daraus.



Bild 4.30: Sequenz des Einführungsvideos in die Kontinuumsmechanik [E-MECHLAB KONTINUUMSMECHANIK-VIDEO (2011-ol)]





Implementierung der Lektion über die klassische Laminattheorie

Bild 4.31: Struktureller Ablauf eines Besuchs der virtuellen Laborumgebung zu den Berechnungsverfahren der Faserverbundkunststoffe [Bildquelle: WUTTKE (2009)] Einen Überblick über den strukturellen Ablauf und die Wege, die ein Anwender durch die Lektion der klassischen Laminattheorie beschreiten kann, zeigt Bild 4.31. Die Ablauforganisation der Lektion über die klassische Laminattheorie führt zunächst über die Vorbereitung. Ein Detailausschnitt des Strukturablaufs ist exemplarisch anhand eines Besuchs der Vorbereitungslektion in Bild 4.32 gezeigt.



Bild 4.32: Schaubild des Ablaufs eines Besuchs der Lektion Vorbereitung für die klassische Laminattheorie [Bildquelle: nach WUTTKE (2009)]

Der Einstieg gestaltet sich über die in Bild 4.33 gezeigte, verlinkte Grafik. Die Vorbereitung beinhaltet die Einführung in Begrifflichkeiten und formale Konventionen wie Koordinatensysteme der Einzelschicht und unterstreicht den modularen Aufbau. Darüber hinaus wird die Berechnung der Laminatdicke thematisiert und mit einem von dort aus verlinkten Schichtdicke-Applet vertieft. Ebenso gelangt der Anwender von hier aus zur (Lern-)Anwendung der Mischungsregeln aus Abschnitt 3.8.2.1 mit Hilfe des Mischungsregel-Applets, das in Bild 4.34 zu sehen ist. Die Eingabefelder sind darin zunächst mit Beispielwerten vorbelegt, können jedoch jederzeit durch eigene Faser- und Matrix-Elementarkenndaten ausgetauscht werden.





Bild 4.33: Übersicht zur Vorbereitung auf die CLT [E-MECHLAB VORBEREITUNG CLT (2011-ol)]



Bild 4.34: Anwendung der Mischungsregel zur Homogenisierung der Einzelschichtkenngrößen [E-MECHLAB MISCHUNGSREGEL-APPLET (2011-ol)]

Jeder Lerneinheit zu den einzelnen Schritten der CLT vorangestellt ist eine exemplarisch in Bild 4.35 für Schritt 2 gezeigte Einschätzung, wie sie sich gliedert und wie lange das Durchlaufen von deren einzelnen Bausteinen dauern mag. "*Es geht nicht darum, was* (der User) *lernen muss, sondern… lernen möchte…*" [WUTTKE (2009)]. Transparenz ist jedoch eine wesentliche Voraussetzung, um eine solche Auswahlentscheidung sinnvoll treffen zu können. Hier wird auch die Verquickung mit der dritten Säule der Lektion über die FVK-Berechnung und den darin enthaltenen einzelnen, speziell entwickelten Lernanwendungen deutlich, die klar strukturiert und nachvollziehbar die ersten vier Schritte der klassischen Laminattheorie mit hinreichender Genauigkeit berechnen.



Bild 4.35: Zeitangabe für die voraussichtlich benötigte Zeit zum Durcharbeiten einer Lektion am Beispiel von Schritt 2 der CLT [E-MECHLAB CLT-SCHRITT 2 (2011-ol)]

Implementierung der Lektion Anwendung (Berechnungstool und virtuelle Labore)

Den krönenden Abschluss bildet ein Berechnungstool zu den ersten vier Schritten der klassischen Laminattheorie, das im Rahmen von WUTTKE (2008) entstanden ist. Mit Hilfe dieser Lernanwendung können die wesentlichen Berechnungsabläufe zur Auslegung eines Laminats sukzessive durchlaufen und nachvollzogen werden. Um die Brücke zur experimentellen Bestimmung von Materialkennwerten zu schlagen, sind die als Beispieldaten hinterlegten elementaren Werkstoffeigenschaften von Verstärkungsfaser und Harzsystem der den realen Experimenten zugrunde liegenden Materialpaarungen angepasst. Unterstützt wird der Lernerfolg durch zwei integrierte virtuelle Labore:

- \rightarrow eins zum Laminataufbau,
- \rightarrow das zweite zum Zugversuch [WUTTKE (2009)].

Der zuvor selbst gewählte Laminataufbau bestehend aus diversen aufeinander gestapelten Einzelschichten nimmt nun im virtuellen Labor, das in Bild 4.36 zu sehen ist, Gestalt an. Die Transparenz der Matrix ist bei der Visualisierung des virtuellen Laminats veränderbar. Das Laminat kann dreidimensional gedreht werden. Die Rotation erfolgt bei gedrückter Maustaste um die Achse, der man mit dem Mauszeiger am nächsten ist. Den virtuellen Laborversuch zeigt schließlich Bild 4.37. Darin kann mit einem Prüfstand bzw. dem darin eingespannten Materialprüfkörper experimentiert werden (die Reduktion der Grafik erfolgte auf die wesentlichen Elemente).



Bild 4.36: Screenshots des virtuellen Labors zum Laminataufbau mit Visualisierung aller Einzelschichten [E-MECHLAB VIRTUELLES LABOR LAMINATAUFBAU (2011-ol)]



Bild 4.37: Bildschirmausschnitt des virtuellen Zugprüfstandlabors für Faserverbundprüfkörper [E-MECHLAB VIRTUELLES ZUGPRÜFLABOR (2011-ol)]

4.5.6.4 Methodisches Vorgehen zur Definition der Arbeitsabläufe und geeigneten Darstellung des Herstellprozesses von Faserverbundkunststoffen in Online-Lehreinheiten

Unter dem Stichpunkt "Experiment" wird eine Methodik zur Herstellung von Faserverbund-Kunststoffprüfkörpern veranschaulicht. DAU (2006) stellt in seiner Studienarbeit ein methodisches Vorgehen für die Materialprüfung von faserverstärkten Kunststoffverbunden vor, welches er recherchiert, adaptiert und im Sinne einer webgestützten Anleitung ausgewertet hat. Die Online-Lerneinheit vereint zwei Dinge gleichermaßen – reale Experimente in einer echten Laborumgebung mit virtuellen Laboren, wie sie im Berechnungs-Kapitel beschrieben werden. Diese Methodik soll zum einen potenziellen Anwendern der Experimentaltechnik ein Leitfaden sein, als auch Studenten einen Einblick in die Bestimmung von Werkstoffkennwerten liefern, die in der Literatur sehr schwer oder leider allzu oft nicht zu finden sind und das aus gutem Grund, da ihre experimentelle Bestimmung nicht trivial ist.

Die der Konstruktionstechnik entliehene Methode der Faktorisierung des Gesamtproblems in Teilprobleme [PAHL/BEITZ (1997)] wird verwendet, um diese komplexe Aufgabenstellung zu strukturieren und dann über Teillösungen zu einer Gesamtlösung zu gelangen. Eine Zerlegung in feingliedrigere Prozessschritte erfolgt nur, insoweit die gesonderte Betrachtung sinnvoll erscheint. Nebenbei entsteht so ein Leitfaden für weitere Anwender der Experimentaltechnik zur Bestimmung elastischer Werkstoffeigenschaften gewebefaserverstärkter Kunststoffe. Dabei lassen sich die einzelnen Stationen:

- → Versuchsvorbereitungen (umfasst dispositive Aufgaben wie die Material- und Werkzeugplanung),
- → Prüflaminat herstellen (beinhaltet das Zuschneiden der Gewebe, Laminieren, An- und Aushärten des Laminats),
- → Prüfkörper herstellen (beschreibt das Heraustrennen der Zugproben-Streifen aus dem Prüflaminat, die Herstellung von Aufleimerlaminaten und Aufbringung auf das Prüflaminat),
- → Zugversuch mit photogrammetrischem System vorbereiten (meint das Einrichten und Starten von Pr
 üfstand und Steuerung sowie das Kalibrieren des optischen Deformationsanalyse -Systems bzw. das Anbringen und Ausrichten des Dehnungsaufnehmers),
- → Zugversuch mit photogrammetrischer Analyse (erläutert Einspannvorgang, Durchführung des Zugversuchs, Ausspannen der Zugprobe) und
- → Versuchsauswertung (befasst sich mit der Bearbeitung der aufgezeichneten Daten: Spannungs-Dehnungs-Diagramme generieren, Materialkenndaten ermitteln).

Eine Visualisierung der Phasen und Meilensteine (vgl. Bild 4.38) in Form einer Baumstruktur, die in bis zu fünf Unterebenen zerlegt wurde, aus der Methodik zur Herstellung von Faserverbund-Kunststoff-Zugproben kann unter [E-MECHLAB EXPERIMENTE (2011-ol)] eingesehen werden.





Bild 4.38: Phasen- und Meilensteindiagramm zur Herstellung von FVK-Zugproben [Bildquelle: nach DAU (2006)]

Grundsätzlich ist ein Phasen-Meilenstein-Diagramm so aufgebaut, dass mit den Phasen die Arbeitsschritte genannt und mittels eines Meilensteins abgeschlossen werden. Die Ergebnisse, die in der Phase zu erzeugen sind, werden als Resultate rechts neben dem Meilenstein vermerkt. Hinter jeder Phase in Bild 4.38 verbergen sich weitere Schritte, die diese genauer skizzieren und erläutern. Der Aufbau der von DAU (2006) beschriebenen Methode basiert somit auf dem Prinzip der Faktorisierung zur Erarbeitung der Struktur des Fertigungsprozesses aus den kleinteilig zerlegten Arbeitsschritten und der übersichtlichen Darstellung des sukzessiven Arbeitsablaufs im Phasen-Meilenstein-Diagramm. Es handelt sich um einen sequenziellen Prozess, da i. d. R. eine Phase beendet sein muss, bevor die nächste starten kann.

Q

4.6 Ergebnisse und abschließende Diskussion der finalen Realisierung

Es wurden virtuelle Labore für die Pilotprojekte "Technische Mechanik" und "Mechanik der Faserverbundkunststoffe" aufgebaut, auf einer gemeinsamen Plattform implementiert, in Benutzung genommen und in der Lehre mit guter Resonanz eingesetzt. Von den verschiedenen Usergruppen wird die Plattform sehr gut angenommen, wie die Evaluationsberichte zeigen. Auch seitens externer Personen besteht reges Interesse, was durch durchgängig positives Feedback bestätigt wird. Sowohl von Lehrenden an Berufsschulen und betriebsinternen Schulungsabteilungen von Modellbaubetrieben, der RD Technik-Akademie Daimler AG in Sindelfingen als auch Hochschuldidaktikeinrichtungen wurde an uns herangetragen, dass diese im E-MechLAB-Internetauftritt speziell zur Faserverbundmechanik ein gelungenes Beispiel für die Umsetzung von Online-Lehre sehen. Somit wird das Anliegen eines niedrigen Einstiegsniveaus bestätigt und die Praxis findet Anwendungsfelder weit über die in der Antragsplanung angedachten Zielgruppen hinaus.

Da der Einstieg in umfassende Wissensgebiete wie die Faserverbundmechanik als gemeinhin sehr beschwerlich gilt, bietet die geschaffene Lernumgebung E-MECHLAB einen optimalen Ausgangspunkt, um den Zugang zum Erschließen dieses Wissensgebietes zu erleichtern und als Nachschlagewerk zur Vertiefung für mechanische Fragestellungen zu dienen. E-MECHLAB beginnt mit einem grundlegenden Überblick über Faserverbundwerkstoffe, in dem der interessierte Anwender essentielle Informationen zum grundsätzlichen Aufbau, den Eigenschaften der Komponenten und von deren Zusammenspiel im Verbund erhält. Visualisierungen, Animationen und Audiosequenzen unterstützen dabei die Darbietung von Fachinformationen. Kleine Übungen fragen das dargebotene Wissen in freiwilligen Selbstkontrollen ab und vertiefen den Lernerfolg somit spielerisch. Insbesondere sei hier erneut auf das große virtuelle Labor zur Laminatberechnung nach klassischer Laminattheorie mit vorgeschalteter Mischungsregel-Anwendung hingewiesen, das im virtuellen Zugversuch gipfelt und ein schrittweises Ausprobieren, Nachvollziehen, Parameter Verändern und das Studieren der Auswirkungen davon auf die Ergebnisse ermöglicht. Der Anwender durchläuft das Labor vom lagenweisen Stapeln der Gewebe bis hin zum virtuellen Zugversuch des zuvor geschichteten Faserverbundkunststoff-Laminats, stets geleitet und begleitet von ausführlichen Hilfe-Funktionen. Pädagogische Ansätze bilden die Basis für den Aufbau der Online-Lehrinhalte, die in die Kooperationsplattform ^{open}sTeam eingebunden sind. Dadurch entsteht eine vielfältige virtuelle Lern- und Laborumgebung, die stetig erweiterbar ist. Mit dem Erreichten wird ein wertvoller Beitrag für die Lehre geleistet.

Um den Umfang der im Rahmen dieser Arbeit entstandenen virtuellen Laborumgebung zu verdeutlichen, seien an dieser Stelle exemplarisch ein paar Zahlen und Fakten aufgeführt: Allein die komplexe Lektion zur Berechnung von Faser-Kunststoff-Verbunden umfasste die Konzipierung von 95 Webseiten, ein zwölfminütiges Video, zwei dreidimensionale und animierte Grafiken, die Formulierung von 40 Multiple-Choice-Fragen und die Programmierung von drei Berechnungsanwendungen und zwei virtuellen Laboren.

Die finale Realisierung des hier beschriebenen Konzepts findet sich auf der beiliegenden DVD bzw. im Online-Auftritt E-MECHLAB (-ol).



Die auf Basis der Wissensorganisations- bzw. Content Management-Plattform ^{open}sTeam entstandenen Lerneinheiten zur "Technischen Mechanik" und "Mechanik der Faserverbundkunststoffe" könnten in eine ko-aktive Lern- und Arbeitsumgebung [KOALA (-ol)] überführt werden, die ebenfalls an der Universität Paderborn als konsequente Weiterentwicklung von ^{open}sTeams virtuellen Wissensräumen designt wurde und das Konzept von Web 2.0 umsetzt. So würde die Einbettung von E-mechLAB in semesterbegleitendes und veranstaltungsbezogenes E-Learning ermöglicht.

Wünschenswert wäre die Ergänzung der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten zwei Pilotprojekte zur "Technischen Mechanik" und "Faserverbundmechanik" um weitere angrenzende Wissensgebiete zu einer Art Universum der Mechanik. Die einzelnen Fachdisziplinen wären darin analog zu Planeten oder – je nach Grad der Komplexität – (eigenen) Sonnensystemen zu sehen. Über ein solches Universum aus virtuellen Laboren zur Mechanik wäre es möglich, Vernetzungen und Wechselwirkungen zwischen den Disziplinen untereinander abzubilden und auch Umgebungsparameter zu berücksichtigen. Altenbach, J., Altenbach, H. (1994), *Einführung in die Kontinuumsmechanik*, Carl Hanser Verlag, Stuttgart.

Altenbach, H., Altenbach, J., Rikards, R. (1996), *Einführung in die Mechanik der Laminatund Sandwichtragwerke*, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart.

Anders, S. (2008), Sensitivitätsanalyse des Eigenspannungszustandes eines Composite-Hybridhochdruckbehälters, Dissertation, Fakultät Verkehrs- und Maschinensysteme, TU Berlin, BAM-Dissertationsreihe, Band 37, Hrsg.: Bundesanstalt für Materialforschung und prüfung, Berlin.

Armbruster, B., Hertkorn, O. (1978), Allgemeine Mediendidaktik, Greven Verlag, Köln.

Ashton, J. E., Halpin, J. C., Petit, P. H. (1969), *Primer on Composite Materials: Analysis*, Technomic Publishing, 750 Summer St., Stanford Conn. 06901.

Baake, S., Kovac, V., Strutzberg, N., Verlemann, T., Zorn, R. (**2005**), *Multimediale Gestaltung: Audio-, Animations- und Videogestaltung beim eLearning*, E-Learning-Seminar von Prof. Dr. Niclas Schaper, 12.11.2005, Universität Paderborn.

Ballstaedt, S. (1997), Wissensvermittlung, Beltz Verlag, Weinheim.

Barnet, F. R., **Norr**, M. K. (**1974**), *Carbon Fibres*, Plastics and Polymers Conference Supplement No. 6, pp. 32-43, The Plastics Institute, London, GB.

Baumgart, F. (**2007**), *Entwicklungs- und Lerntheorien – Erläuterungen, Texte, Arbeitsaufgaben*, 2. Auflage, Verlag Julius Klinkhardt, Bad Heilbrunn.

Baumgartner, P., **Reinmann**, G. (**2007**), *E-Learning: Beschränkt oder schrankenlos?*, in: Überwindung von Schranken durch E-Learning, S. 9-14, Hrsg.: Baumgartner, P., Reinmann, G., Studienverlag, Innsbruck.

Baumgartner, P. (**2011**), *Taxonomie von Unterrichtsmethoden*, Vortrag 31.05.2011, Fachwissenschaftstag 2011, PH Wien.

Becker, E., Bürger, W. (1975), Kontinuumsmechanik, Teubner Verlag, Wiesbaden.

Beitz, W., Grote, K.-H. (2001), Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer-Verlag, 20. Auflage, Berlin.

Beyer, W., Schaab, H. (1969), *Glasfaserverstärkte Kunststoffe*, Kunststoff-Verarbeitung Folge 2, 4. Auflage, Carl Hanser Verlag, München.

Brandes, J., **Gebauer**, I. (1996), *Entwicklung beheizbarer Leichtgewichtsformen*, Studienarbeit, Universität-GH Paderborn.

Bremer, C. (**2006**), Online Lehren leicht gemacht! Leitfaden für die Gestaltung und Planung von eLearning-Veranstaltungen in der Hochschullehre, Skriptum zur Weiterbildung "Online Lehre lernen", TU Berlin.

Bremer, C. (**2007**), *Überblick über die Szenarien netzbasierten lehrens und Lernens*, Skriptum zur Weiterbildung "Online Lehre lernen", TU Berlin.

Cadenhead, R., **Lemay**, L. (**2005**), *Java 5 – Schritt für Schritt zum Profi*, 4. Auflage, Markt+Technik Verlag, München.

Carlsson, L. A., **Pipes**, R. B. (**1989**), *Hochleistungsfaserverbundwerkstoffe: Herstellung und experimentelle Charakterisierung*, Teubner Verlag, Stuttgart.

Chamis, C. C. (**1969**), *Failure Criteria for Filamentary Composites*, Composite Materials: Testing and Design (1st conference) ASTM STP 460, pages 336-351.

Chawla, K. K. (1987), *Composite Materials, Science and Engineering*, Springer-Verlag, Berlin.

Dahlmann, N., Jeschke, S., Seiler, R., Sinha, U. (**2003**), *MOSES meets MUMIE: Multimediabased Education in Mathematics*, Hrsg.: Freddy Malpica, Andrés Tremante, Nicoletta Sala, In: EISTA 2005 – International Conference on Education and Information Systems: Technologies and Applications, 31.07.-02.08.2003, pages 370–375, International Institute of Informatics and Systemics, Orlando, Florida, USA.

Dathe, S. (**2005-2011**), persönliche Mitteilungen von 2005 bis 2011, IBI – Institut für Bildung in der Informationsgesellschaft e.V., unter der Leitung von Prof. Dr. Wilfried Hendricks, c/o TU Berlin, FR 0-1, Franklinstraße 28/29, 10587 Berlin.

Dau, J. (**2006**), Methodik der Herstellung von Faserverbundkunststoff-Zugproben sowie zur Untersuchung des Deformationsverhaltens, insbesondere bei GFK, Studienarbeit, Universität Paderborn (Betreuer: I. Koke, F. Ferber).

Dau, J. (2007), Experimentelle Untersuchung zum richtungsabhängigen Deformationsverhalten von handlaminierten Glasfaserverbundkunststoffen durch photogrammetrische Analysen einachsiger Zugversuche, Diplomarbeit, Universität Paderborn (Betreuer: I. Koke, F. Ferber).

Dau, J., Homberg, W., Koke, I., Ferber, F., Funke, H., Mahnken, R. (**2007a**), *Photogrammetrische Bestimmung des Werkstoffverhaltens typischer Leichtbauwerkstoffe*, Tagungsband AG Composite 2007 – 20. Workshop Composite Forschung in der Mechanik, 06./07.12.2007, Universität Paderborn.

Digel, W. **Kwiatkowski**, G. (Chefred.) (**1983**), *Meyers Großes Taschenlexikon*, Hrsg.: Lexikonredaktion des Bibliographischen Instituts, Meyers Lexikonverlag, Mannheim.

DIN EN 2561 (**1995**), Kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe – Unidirektionale Laminate Zugprüfung parallel zur Faserrichtung, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 2747 (1998), *Luft- und Raumfahrt – Glasfaserverstärkte Kunststoffe – Zugversuch*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 923 (2008), *Klebstoffe – Benennungen und Definitionen*, Deutsche Fassung EN 923:2005+A1:2008, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN ISO 527-1 (1996), *Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften, Teil 1: Allgemeine Grundsätze*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN ISO 527-4 (1997), Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften, Teil 4: Prüfbedinungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN ISO 527-5 (**1997**), Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften, Teil 5: Prüfbedinungen für unidirektional faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN ISO 14129 (**1998**), Faserverstärkte Kunststoffe – Zugversuch an 45°-Laminaten zur Bestimmung der Schubspannungs/Schubverformungs-Kurve, des Schubmoduls in der Lagenebene, Beuth Verlag, Berlin.

Dittmar, J. (**2011**), *Identifikation von Lernstrategien in der sozialwissenschaftlichen Statistikausbildung (Pask)*, Projekt Statistik Lernen!, Universität Kassel.

Domininghaus, H. (1992), Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften, VDI-Verlag, Düsseldorf.

Dow, N. F., Rosen, B. W. (1965), NASA CR 207, April 1965.

Eberlein, D., Enss, V., Jeschke, S., Seiler, R., Vachenauer, P. (**2005**), *"Next Generation" in der eLearning Technologie: Wandel am Beispiel des Virtuellen Wissensraumes "Mumie"*, http://www.mumie.net/en/publications.php, TU Berlin.

Ebner, M., **Schön**, S. (Hrsg.) (**2011**), *Lehrbuch für Lernen und Lehren mit Technologien* (*L3T*), Verlag epubli GmbH, Berlin.

Edmonds, R. (2006), *Best practices for e-learning*, in: Handbook on Quality and Standardisation in E-Learning, S. 485-500.

Edwards, D. M., Hardman, L. (1999), "Lost in hyperspace": cognitive mapping and navigation in a hypertext environment, in: Hypertext: Theory into Practice, 2. Auflage, S. 90-105, Hrsg.: McAleese, R., Verlag Intellect Books, Oxford, Großbritannien.

Ehrenstein, G. W. (**1967**), *Grenzflächenenergetische Vorgänge und Eigenspannungszustände in glasfaserverstärkten Kunststoffen*, Dissertation, TH Hannover.

Ehrenstein, G. W. (**1969**), *Mechanische Eigenschaften der glasfaserverstärkten Kunststoffe*, in: Konstruieren und Berechnen von GFK-Teilen, Beiheft zur Fachzeitschrift "Kunststoff-Berater", Hrsg.: Ehrenstein, G. W., Martin, H.-D., Umschau Verlag, Frankfurt am Main, S. 44-66.
R.

Ehrenstein, G. W. (**2006**), *Faserverbund-Kunststoffe*, *Werkstoffe* – *Verarbeitung* – *Eigenschaften*, 2., völlig überarbeitete Auflage, Carl Hanser Verlag, München.

Eßmann, B. (**2003**), Semantische Strukturierung virtueller Räume – Konzeption und Umsetzung eines Navigationswerkzeuges für das sTeam-System, Diplomarbeit, Universität Paderborn.

Ferber, F. (**1996**), *Experimentelle Methoden der Spannungsanalyse*, Skriptum zur Vorlesung, Universität Paderborn.

Ferber, F. (**2000**), *Möglichkeiten der Neuen Medien in der Technischen Mechanik*, Habilitationsvortrag, Universität Paderborn.

Ferber, F., **Hampel**, T. (**1998**), *mechANIma - ganzheitliche Sicht auf neue Medien in der Mechaniklehre*, in: GI-Fachtagung 98 Informatik und Ausbildung, 30.03.-1.04.1998, Stuttgart, Reihe: Informatik aktuell, Hrsg.: Volker Claus, Springer-Verlag, Berlin, S. 198-209.

Ferber, F., Koke, I., Funke, H. (**2005**), *Experimentelle Ermittlung mechanischer Kenngrößen von Faserverbundwerkstoffen*, in: Tagungsband Strukturanalyse, VDI-Berichte Band 1899 (2005), Hrsg.: VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, Gemeinschaft Experimentelle Strukturanalyse, Konferenz-Einzelberichte GESA-Symposium Saarbrücken 21./22. September 2005, VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 337-346.

Fiedler, F. (**2009**), *Uni & Co KG: Wenn Hochschulen und Firmen kooperieren*, Artikel dpa vom 19.10.2009 in: Aachener Zeitung http://www.az-web.de/, Bonn/Hamburg.

Fitzer, E. (1985), Carbon Fibres and Their Composites, Springer-Verlag, Berlin.

Flemming, M., Ziegmann, G., Roth, S. (**1995**), *Faserverbundbauweisen – Fasern und Matrices (Band 1)*, Springer Verlag, Berlin.

Flemming, M., Ziegmann, G., Roth, S. (**1996**), *Faserverbundbauweisen – Halbzeuge und Bauweisen (Band 2)*, Springer Verlag, Berlin.

Flemming, M., Ziegmann, G., Roth, S. (**1999**), *Faserverbundbauweisen – Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix (Band 3)*, Springer Verlag, Berlin.

Flemming, M., **Roth**, S. (**2003**), *Faserverbundbauweisen – Eigenschaften (Band 4)*, Springer Verlag, Berlin.

Friis, E. A.; Lakes, R. S.; Park, J. B. (1988), *Negative Poisson's ratio polymeric and metallic materials*, Journal of Materials Science Vol. 23, pages 4406-4414.

Funke, H. (**2000-2001**), persönliche Mitteilungen, FH Dortmund, Fachbereich Maschinenbau, Lehrgebiet Fahrzeugkonstruktion, Sonnenstraße 96, 44047 Dortmund.

Funke, H. (**2001**), Systematische Entwicklung von Ultra-Leichtbaukonstruktionen in Faserverbund-Wabensandwichbauweise am Beispiel eines Kleinflugzeuges, Dissertation, Universität Paderborn. Funke, H. (2005a), *Leichtbau mit Faserverbundwerkstoffen*, Skript zur gleichnamigen Vorlesung, Universität Paderborn.

Funke, H. (**2005b**), *LamiCens – aus der Praxis für die Praxis ein einfaches Werkzeug zur Ermittlung mechanischer Eigenschaften faserverstärkter Kunststofflaminate*, Tagungsband AG Composite 2005 – 18. Workshop Composite Forschung in der Mechanik, 06./07.12.2005, Universität Paderborn.

Funke, H. (**2005c**), Lami*Cens*[©], Software, Version 0.98, Stand: Dezember 2005, in Kooperation mit R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH, kostenloser Download: http://www.r-g.de/laminatberechnung.html, letzter Abruf am 29.09.2011.

Geißler, S., Hampel, T., Keil, R. (**2004**), Vom virtuellen Wissensraum zur Lernumgebung -Kooperatives Lernen als integrativer Ansatz für eine mediengestützte Bildung, in: i-com, 3. Jahrgang, Heft 2/2004, S. 5-12.

Götschel, H. (2009), Gender und Naturwissenschaften, Vortrag 11.11.2009, Universität Paderborn.

Götz, K. (2000), Die innere Optimierung der Bäume als Vorbild für technische Faserverbunde – eine lokale Approximation, Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH), erschienen in: Wissenschaftliche Berichte FZKA 6552, Institut für Materialforschung, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH.

GOM (2005), *ARAMIS: Optische 3D-Verformungsanalyse – Flächenhafte Dehnungsmessung in Material- und Bauteilprüfung,* ARAMIS-Datenblatt, Rev. D (de) 200407, Eigendruck Fa. GOM mbH.

GOM (**2007**), *Benutzerhandbuch ARAMIS v 6.1*, dritte Korrektur vom 25.04.2007, Eigendruck Fa. GOM mbH.

Griffith, A. A. (**1920**), *The phenomena of rupture and flow in solids*, Philosophical Transactions of the Royal Society 221A, pages 163-198, London, GB.

Grüninger, G. (**1977**), *Möglichkeiten der Krafteinleitung in faserverstärkte Bauteile*, in: Kohlenstoff- und aramidfaserverstärkte Kunststoffe, S. 123-154, Hrsg.: VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.

Hampel, T., Keil-Slawik, R., Ferber, F. (1999), *Explorations - A New Form of Highly Interactive Learning Materials*, in: Proceedings of WebNet 99 - World Conference on the WWW and Internet, Charlottesville (Va.), USA, Association for the Advancement of Computing in Education, Hrsg.: de Bra, P., Leggett, J., pp. 463-468.

Hampel, T., Keil-Slawik, R. (2001), *sTeam - Designing an Integrative Infrastructure for Web-Based Computer Supported Cooperative Learning*, in: Proceedings of the 10th International World Wide Web Conference, May 1-5, 2001, Hong Kong, pp. 76-85.

Hampel, T. (**2001**), *Virtuelle Wissensräume – Ein Ansatz für die kooperative Wissensorganisation*, Dissertation, Universität Paderborn.

Hampel, T., **Keil-Slawik**, R. (**2002**), *sTeam: Structuring Information in a Team – Distributed Knowledge Management in Cooperative Learning Environments*, ACM Journal of Educational Resources in Computing, 1(2) 2002, pp. 1-27.

Hampel, T., Keil-Slawik, R., Selke, H. (**2005**), *Verteilte Wissensorganisation mit Semantischen Räumen – Distributed Knowledge Organization with Semantic Spaces*, in: i-com Zeit-schrift für interaktive und kooperative Medien, 4. Jahrgang, Heft 1/2005, S. 34-40.

Hartmann, H., Nußbaum, H. J. (1981), Neues über Aluminiumoxidfaserverstärkte Verbundstoffe, Vortrag 20. Internationale Chemiefasertagung, Dornbirn, Österreich.

Haupt, P. (2002), *Continuum Mechanics and Theory of Materials* (Advanced Texts in Physics), Springer-Verlag, Berlin.

Hefft, K. (**2006**), *Kein Mathe-Schock mehr am Studienbeginn – Elf Semester Erfahrungen mit dem Heidelberger Online-Kurs "Mathematischer Vorkurs zum Studium der Physik"*, in: Multimedia für Bildung und Wirtschaft, Tagungsband zum 10. Workshop 14.-15.09.2006, S. 9-14, TU Illmenau.

Heißler, H. (1977), *Kohlenstoff- und aramidfaserverstärkte Kunststoffe*, in Kohlenstoff- und aramidfaserverstärkte Kunststoffe, S. 1-8, Hrsg.: VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.

Heißler, H. (1986), Verstärkte Kunststoffe in der Luft- und Raumfahrttechnik, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart.

Hellmann, M (**2008**), Konzeption und Implementierung einer Lern- und Lehrumgebung über das Versagensverhalten von Faser-Kunststoff-Verbunden auf Basis der Kooperationsplattform ^{open}sTeam, Studienarbeit, Universität Paderborn (Betreuer: I. Koke, F. Ferber).

Hendricks, W., Dathe, S. (2008), Bericht zur Evaluation des Teilprojekts B3 – Content-ReUse in virtuellen Laboren im Rahmen des Projektes Nemesis, IBI – Institut für Bildung in der Informationsgesellschaft e.V., c/o TU Berlin, FR 0-1, Franklinstraße 28/29, 10587 Berlin.

Hesse, F. W., **Mandl**, H. (**2001**), *Neue Technik verlangt neue pädagogische Konzepte*, in: Studium Online – Hochschulentwicklung durch neue Medien, 2. Auflage, S. 31-49, Hrsg.: Bertelsmann Stiftung, Heinz Nixdorf Stiftung, Gütersloh.

Hobmair, H. (Hrsg.) (2008), Pädagogik, 4. Auflage, Bildungsverlag EINS, Köln.

Hörsch, F. (1965), Kunststoffe, Bd. 55, S. 706/08.

Hofmann, W., Finsterwalder, R. (1968), *Photogrammetrie*, 3. Auflage, De Gruyter-Verlag, Berlin.

Hughes, J. D. H., Moreley, H., Jackson, E. E. (1980), J. Phys. D., Appl. Phys. Volume 13 (1980), pages 921-936.

Jäger, H. D. (2006), *E-Learning leicht gemacht! Überblick und Einstieg*, Workshop im Rahmen des 4. Tag der Hochschuldidaktik, 23.06.2006, Universität Paderborn.

Janetzko, D., Strube, G. (2000), *Knowledge Tracking – Eine neue Methode zur Diagnose von Wissensstrukturen*, in: Wissen sichtbar machen – Wissensmanagement mit Mapping-Techniken, S. 199-217, Hrsg.: Mandl, H., Fischer, F., Sammelband zum Workshop "Begriffsnetze und Wissensstukturdarstellungen zur Förderung von Lehr- und Lernprozessen" im Juni 1998 in München, Hogrefe-Verlag, Göttingen.

Jeschke, S. (**2004**), *Mathematik in Virtuellen Wissensräumen - IuK-Strukturen und IT-Technologien in Lehre und Forschung*, Dissertation, Fakultät II - Mathematik und Naturwissenschaften, Technische Universität Berlin, URN: urn:nbn:de:kobv:83-opus-7500, URL: http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2004/750/.

Jeschke, S., Richter, T., Seiler, R. (**2005**), *VideoEasel: Architecture of Virtual Laboratories for Mathematics and Natural Sciences*, http://eprints.physik.tu-berlin.de/23/.

Jeschke, S. (**2009**), (*BW-*)*eLabs* – *Wissensmanagement in Virtuellen und Remote Laboren*, Vortrag, Dini/DFG Workshop Virtuelle Forschungsumgebungen, 17.-18.02.2009, Berlin.

Jütte, R. (**1998**), Veranschaulichung der Grundlagen zur Technischen Mechanik: Statik/Festigkeitslehre hinsichtlich des Einsatzes neuer Medien in der Lehre – Auswahl, Konzeption und didaktische Aufarbeitung am Beispiel einer Technischen Struktur –, Examensarbeit, Laboratorium für Technische Mechanik, Universität Paderborn.

Kahl, R. (2009), *Der Raum ist der dritte Pädagoge – Von der Belehrungsanstalt zu herausfordernden Lernlandschaften*, Vortrag, 1. Paderborner Sek-1-Tag "Lernprozesse professionell begleiten in der Sekundarstufe I" am 30.09.2009, Zentrum für Bildungsforschung und Lehrerbildung PLAZ, Paderborn.

Kalnin, I. L., Jäger, H. (1985), Carbon Fibre Surfaces – Characterization, Modification and Effect on the Fracture Behaviour of Carbon Fibre–Polymer Composites, in: Carbon Fibres and Their Composites, Hrsg.: Fitzer, E., Springer-Verlag, Berlin.

Kalweit, A., Paul, C., Peters, S. (Hrsg.) (2006), Handbuch für Technisches Produktdesign – Material und Fertigung – Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure, Springer-Verlag, Berlin.

Kaube, J. (**2010**), *Immer intelligenter*, FAZ - Frankfurter Allgemeine Zeitung vom 17.02.2010, Rubrik Forschung und Lehre.

Kaw, A. K. (**2006**), *Mechanics of composite materials*, 2nd edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, USA.

Keil, S. (2004), Schulungsunterlage, MVQ, Quality Engineering, Airbus, Hamburg.

Keil, R. (**2009**), *Chemische Industrie und Wissenschaft gestalten Zukunft*, Pressemitteilung zu Projekt DAWINCI, 08.12.2009, http://www.uni-paderborn.de/mitteilung/67361/, letzter Abruf am 29.09.2011.

Keil-Slawik, R., Nowaczyk, O. (2000), Von der geschlossenen Multimediaproduktion zur offenen Lernumgebung, in: Campus 2000 – Lernen in neuen Organisationsformen, S. 265-277, Hrsg.: Scheuermann, F., Waxmann Verlag, Münster.

Keil-Slawik, R., Hampel, T. (2001), ^{open}sTeam - Ein Open Source-Projekt zur kooperativen Struturierung von Informationen im Team, in: DFN Mitteilungen, Heft 55, 02/2001, ISSN 0177-6894, S. 16-20.

Kerres, M. (2003), Wirkungen und Wirksamkeit neuer Medien in der Bildung, Education Quality Forum, Hrsg.: R. Keil-Slawik, Waxmann-Verlag, Münster.

Kickert, R. (Hrsg.) (**1988**), *Interessengemeinschaft Deutscher akademischer Fliegergruppen* (*IDAFLIEG*): *Dimensionierungsrichtwerte für den Segel- und Mororsegelflugzeugbau*, Stand: März 1988, Broschüre erhältlich beim Luftfahrtbundesamt (LBA), Braunschweig.

Kiesel, A., Koch, I. (2011), Lernen – Grundlagen der Lernpsychologie, VS Verlag, Wiesbaden.

Klein, M. (**2005**), persönliche Mitteilungen, E-Mail vom 16.11.2005, Fa. GOM Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH, Mittelweg 7-8, 38106 Braunschweig.

Klein, M. (2008), persönliche Mitteilungen, Fa. GOM Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH, Mittelweg 7-8, 38106 Braunschweig.

Kneppe, G. (**1986**), *Direkte Lösungsstrategien zur Gestaltoptimierung von Flächentragwerken*, Fortschrittsberichte VDI, Reihe 1, Nr. 135, Düsseldorf.

Koke, I., Huneke, V. (2004), Konzeption, Gestaltung und Umsetzung einer Lernplattform für die Technische Mechanik, Studienarbeit, Lehrstuhl für Technische Mechanik, Universität Paderborn.

Koke, I. (2005), *Experimentelle Ermittlung mechanischer Kenngrößen von Faserverbundwerkstoffen*, Diplomarbeit, Universität Paderborn.

Koke, I. (2005a), Verarbeitungseigenschaften verschiedener Faserhalbzeuge im Handlaminierverfahren - Erfahrungsberichte, Universität Paderborn, http://mb-s1.upb.de/E-MechLAB/ Verbundwerkstoff-Mechanik/Produkt/Experimente/!Erfahrungsberichte%20Handlaminieren/, letzter Abruf am 29.09.2011.

Koke, I., Ferber, F., Funke, H., Mahnken, R. (**2005**), *Kenngrößenermittlung für Handlaminate und Überprüfung mit LamiCens*, Tagungsband AG Composite 2005 – 18. Workshop Composite Forschung in der Mechanik, 06./07.12.2005, Universität Paderborn.

Koke, I., Ferber, F., Mahnken, R., Funke, H., Müller, W. H. (2006), *3D Photogrammetric Analysis of Handmade Glass Fibre-Reinforced Composites*, Proceedings International Workshop "Research in Mechanics of Composites 2006", 26.-29.11.2006, Bad Herrenalb.

Koke, I., Müller, W. H., Ferber, F., Funke, H., Mahnken, R. (2007), Einsatz der Photogrammetrie zur Bestimmung der elastischen Konstanten in handlaminierten Faser-Kunststoff*Verbunden*, Tagungsband AG Composite 2007 – 20. Workshop Composite Forschung in der Mechanik, 06./07.12.2007, Universität Paderborn.

Koke, I., Müller, W. H., Ferber, F., Mahnken, R., Funke, H. (2008), *Measuring mechanical parameters in glass fiber-reinforced composites: Standard evaluation techniques enhanced by photogrammetry*, Composites Science and Technology Volume 68, Elsevier Verlag, Issue 5, April 2008, Pages 1156-1164, doi:10.1016/j.compscitech.2007.08.026.

Koke, I., Müller, W. H., Ferber, F., Mahnken, R. (**2009**), *Photogrammetric Methods Used for Measuring Elastic Constants in Hand-Laminated Fiber-Plastics-Composites*, Proceedings Composites 2009, 2nd ECCOMAS Thematic Conference on the Mechanical Response of Composites, 01.-03.04.2009, Imperial College London, GB, pages 1 - 8.

Kraus, K. (**1982**), *Photogrammetrie – Band 1: Grundlagen und Standardverfahren*, Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn.

Kraus, K. (**1996**), *Photogrammetrie – Band 2: Verfeinerte Methoden und Anwendungen*, 3. Aufl., Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn.

Kückelheim, K. (2006), Grundlagen der Faserverbundwerkstoffe – Konzeption und Implementierung einer interaktiven Lern- und Lehrumgebung auf Basis der Kooperationsplattform ^{open}sTeam, Diplomarbeit, Universität Paderborn (Betreuer: I. Koke, F. Ferber).

Lakes, R. S. (1987 a), Foam structures with a negative Poisson's ratio, Science, Vol. 235, pages 1038-1040.

Lakes, R. S. (1987 b), Negative Poisson's ratio materials - reply, Science, Vol. 238, page 551.

Langhorst, P. (**1993**), Von der Kohlenstoffaser zum Prepreg – die neue Fasertechnologie, Technik heute, Nr. 3, 1993.

Littlejohn, A., Pegler, C. (2007), *Preparing for Blended e-Learning*, Routledge, London.

Lütze, S. (2002), Experimentelle Untersuchungen des mikromechanischen Schädigungsverhaltens polymerer Faserverbundwerkstoffe, Dissertation, Universität Stuttgart.

Mahnken, R. (**1996**), *Theoretische und numerische Aspekte zur Parameteridentifikation und Modellierung bei metallischen Werkstoffen*, Habilitation, Universität Hannover.

Michaeli, W., Huybrechts, D., Wegener, M. (1995), *Dimensionieren mit Faserverbundkunst-stoffen: Einführung und praktische Hilfen*, Carl Hanser Verlag, München u.a..

Michaeli, W., **Wegener**, M. (**1990**), *Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe*, Carl Hanser Verlag, München.

Militký, J., Kovačič, V. (1996), *Ultimate Mechanical Properties of Basalt Filaments*, Textile Research Journal, Vol. 66, No. 4, 225-229 (1996), DOI: 10.1177/004051759606600407.

Militký, J., Kovačič, V., Bajzík, V. (**2007**), *Mechanical Properties of Basalt Filaments*, Dept. of Textile Materials, Technical University of Liberec, Czech Republic, in: Fibres & Textiles in Eastern Europe, Lodz, January/December 2007, Vol. 15, No. 5-6 (64-65).

Mittelbach, F., Goossens, M. (2004), *The LaTeX Companion*, 2. Auflage, Verlag Addison-Welsey Professional, Boston, USA.

Moser, K. (**1992**), *Faser-Kunststoff-Verbunde – Entwurfs- und Berechnungsgrundlagen*, VDI-Verlag, Düsseldorf.

MTS (2004), MTS Transducer Calibration Data für Kraftmessdose Typ 661.21B-03, Berlin.

Müller, R., Dürr, J. (2002), *Plattformen und Programme – Grundlegende Verfahren und Tools des E-Learnings*, In: E-Learning – Die Revolution des Lernens gewinnbringend einsetzen, Hrsg.: Scheffer, U., Hesse, F.W., S. 164-184, 2. Auflage, Klett-Cotta Verlag, Stuttgart.

Müller, I. (1985), *Thermodynamics*, Interaction of Mechanics and Mathematics Series, Pitman Advanced Publishing Program, London, GB.

Müller, W. H. (1994), *Berechnungsverfahren in der Kompositmechanik I und II*, Skript zur Vorlesung, Laboratorium für Technische Mechanik, Universität Paderborn.

Müller, W. H., **Ferber**, F. (**1998**), *!Switch OnLINE – Technische Mechanik mit mechANImateach*, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München.

Müller, W. H., **Ferber**, F. (**2003**), *Technische Mechanik für Ingenieure*, mit CD mechANIma^{teach}, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München.

Müller, W. H., Ferber, F. (2004), *Technische Mechanik für Ingenieure*, mit CD mechANIma^{teach}, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München.

Müller, W. H., Ferber, F. (2005), Übungsaufgaben zur Technischen Mechanik, Carl Hanser Verlag, München.

Müller, W. H., Ferber, F. (2008), *Technische Mechanik für Ingenieure*, mit CD Technische Mechanik mit mechANIma-LAB, 3. Auflage, Carl Hanser Verlag, München.

Napiorkowska, A. (2007), Integration von Explorationen für den Maschinenbau in kooperative Wissensräume, Studienarbeit, Universität Paderborn (Betreuer: I. Koke, F. Ferber).

Neitzel, M., **Breuer**, U. (**1997**), *Die Verarbeitungstechnik der Faser-Kunststoff-Verbunde*, Carl Hanser Verlag, München.

Neitzel, M., **Mitschang**, P. (**2004**), *Handbuch Verbundwerkstoffe – Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*, , Carl Hanser Verlag, München.

NW (**2009**), *Tüfteln im Schülerlabor – Uni und Computermuseum gewinnen Landeswettbewerb*, Neue Westfälische, Tageszeitung, Lokalteil Paderborn, Ausgabe: 26./27. September 2009, Zeitungsverlag Neue Westfälische GmbH & Co. KG, Bielefeld.

Niederstadt, G., Block, J., Geier, B., Rohwer, K., Weiß, R. (1985), *Leichtbau mit kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen*, Hrsg.: Bartz, W. J., Wippler, E., Expert Verlag, Sindelfingen.

Niehus, D., Erren, P., Hampel, T. (2007), *Ein Framework für die kooperative Wissensorganisation – Informelles semantisches Strukturieren und Einsatz in der Praxis*, in: Proceedings S. 245-256 zu DeLFI – 5. e-Learning Fachtagung Informatik, 17.-20. September 2007, Hrsg.: Eibl, C. J., Magenheim, J., Schubert, S. E., Wessner, M., Siegen.

Nielsen, J. (1993), Usability Engineering, Academic Press Inc., San Diego, USA.

Nowaczyk, O. (2002), Explorationen: Lernen durch Konstruktion, in: Referenzmodelle netzbasierten Lerhrens und Lernens, Medien in der Wissenschaft, Band 19, S. 137-155, Hrsg.: Rinn, U., Wedekind, J., Waxmann Verlag, Münster.

Nowaczyk, O. (**2005**), *Explorationen: Ein Ansatz zur Entwicklung hochgradig interaktiver Lernbausteine*, Dissertation, Universität Paderborn.

Nye, J. F. (1972), Herausgeber: Vivian Ridler, *Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices*, 6. Aufl., Oxford University Press, Ely House, London, GB.

OECD (2009), Bildung auf einen Blick: OECD-Indikatoren, Bericht, Paris, deutsch: BMBF.

Ott, S. (**2009**), persönliche Mitteilungen, E-Mails vom 08.01.2009, Technischen Beratung/Anwendungstechnik, Fa. R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH, im Meißel 7, 71777 Waldenbuch.

Pahl, G., **Beitz**, W. (1997), *Konstruktionslehre – Methoden und Anwendungen*, 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin.

Pask, G., **Scott**, B. (**1972**), *Learning Strategies and Individual Competence*, International Journal of Man-Machine Studies, Vol. 4, Issue 3, Pages 217-253, Academic Press, New York, USA.

Pavlovski, D., Mislavsky, B., Antonov, A. (**2007**), *CNG cylinder manufacturers test basalt fibre*, in: Reinforced Plastics, Volume 51, Issue 4, April 2007, Pages 36-39, Elsevier Verlag, München.

Peipe, J., **Dorrer**, E. (**1989**), *Photogrammetrie*, in: Handbuch für experimentelle Spannungsanalyse, S. 419–428, Hrsg.: Rohrbach, C., VDI Verlag, Düsseldorf.

Pfefferkorn, D. (1988), *Faserverbundwerkstoffe im Flugmodellbau*, Neckar-Verlag, Villingen.

Piechel, J. (**1991**), *Anwendungen in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung*, in: Digitale Bildverarbeitung, Hrsg.: Bähr, H.-P., Vögtle, T., Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe.

Plötzner, R., Beller, S., Härder, J. (2000), Wissensvermittlung, tutoriell unterstützte Wissensanwendung und Wissensdiagnose mit Begriffsnetzen, in: Wissen sichtbar machen – Wissens-

management mit Mapping-Techniken, S. 180-198, Hrsg.: Mandl, H., Fischer, F., Hogrefe-Verlag, Göttingen.

Puck, A. (**1967**), Zur Beanspruchung und Verformung von GFK-Mehrschichtverbund-Bauelementen – Teil 1. Grundlagen der Spannungs- und Verformungsanalyse, Kunststoffe Bd. 57, Heft 4, S. 284-293, Carl Hanser Zeitschriftenverlag GmbH, München.

Puck, A. (**1967a**), Zur Beanspruchung und Verformung mehrschichtiger Verbundstoff-Bauelemente aus Glasseidensträngen und Kunststoff, Dissertation, TU Berlin.

Puck, A. (**1969**), *Einführen in das Gestalten und Dimensionieren*, in: Konstruieren und Berechnen von GFK-Teilen, Beiheft zur Fachzeitschrift "Kunststoff-Berater", S. 44-66, Hrsg.: Ehrenstein, G. W., Martin, H.-D., Umschau Verlag, Frankfurt am Main.

Puck, A. (**1996**), *Festigkeitsanayse von Faser-Matrix-Laminaten: Modelle für die Praxis*, Carl Hanser Verlag, München.

Raack, W. (2004), *Mechanik*, 13. Auflage, Technische Universität Berlin, Institut für Mechanik, Berlin.

R&G (2003), *Handbuch Faserverbundwerstoffe*, Fa. R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH, im Meißel 7, 71777 Waldenbuch, Edition 01-2003.

R&G (2009), *Handbuch Faserverbundwerstoffe*, Fa. R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH, im Meißel 7, 71777 Waldenbuch, Edition 06-2009.

R&G (2005), *Katalog 2005*, Fa. R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH, im Meißel 7, 71777 Waldenbuch, Edition 3/05.

R&G (2008), *Katalog 2008*, Fa. R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH, im Meißel 7, 71777 Waldenbuch, Edition 4/08.

Römpp, H. (**1995**), Chemie Lexikon, CD-Version 1.0, Hrsg.: Falbe, J., Regitz, M., Georg Thieme Verlag, Stuttgart.

Rösler, J., Harders, H., Bäker, M. (**2006**), *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*, 2. durchgesehene und erweiterte Auflage, B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden.

Rose, P. G. (**1977**), *Hochfeste Kohlenstoffasern: Herstellung und Eigenschaften*, in Kohlenstoff- und aramidfaserverstärkte Kunststoffe, pp. 9-28, Hrsg.: VDI-Gesellschaft Kunststoff-technik, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.

Saravanan, D. (2006), *Spinning the Rocks - Basalt Fibres*, IE(I) Journal-TX, Vol 86, Issue February 2006, Pages 39-45, http://www.ieindia.org/pdf/86/ext4f6a3.pdf, letzter Abruf am 29.09.2011.

Sauter, W., Sauter, A. M., Bender, H. (**2004**), *Blended Learning – Effiziente Integration von E-Learning und Präsenztraining*, 2. Auflage, Hermann Luchterhand Verlag, Neuwied.

Scheffer, U., **Hesse**, F. W. (**2003**), *E-Learning – Die Revolution des Lernens gewinnbringend einsetzen*, 2. Auflage, Klett-Cotta Verlag, Stuttgart.

Schulmeister, R. (**2000**), *Didaktische Aspekte hypermedialer Lernsysteme - Lernvoraussetzungen, kognitive Re-Interpretation und Interaktion*, in: Computerunterstütztes Lernen, Kammerl, R. (Hrsg.), Oldenbourg Verlag, München.

Schulmeister, R. (**2003**), *Lernplattformen für das virtuelle Lernen: Evaluation und Didaktik*, Oldenbourg Verlag, München.

Schulmeister, R. (2006), *eLearning: Einsichten und Aussichten*, Oldenbourg Verlag, München.

Schulmeister, R. (**2007**), *Grundlagen hypermedialer Lernsysteme: Theorie – Didaktik – Design*, 4. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München.

Schürmann, H. (2007), Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, 2., bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag, Berlin.

Seiler, U. (1987), Zur Auslegung statisch und dynamisch belasteter Bauteile aus Verbundwerkstoffen am Beispiel von GFK-Blattfedern, Dissertation, Technische Hochschule Aachen.

Siebenlist, J. (**2009**), *Wie eine Idee die Praxis revolutioniert*, SciTechs EXTRA – Magazin für Technologietransfer, Ausgabe 2/2009, Beilage zu VDInachrichten, Ausgabe 46/2009, Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

Slayter, G. (1962), *Two Phase Materials*, Scientific American, Vol. 206, January 1962, pages 124-134.

Spickenheuer, A. (**2008**), Using tailored fibre placement technology for stress adapted design of composite structures, journal PLASTICS RUBBER AND COMPOSITES, Volume 37, Issue 5-6, Pages 227-232, DOI: 10.1179/174328908X309448, Maney Publishing, Leeds, GB.

Staemmler, D. (**2007**), Lernstile und interaktive Lernprogramme. Kognitive Komponenten des Lernerfolgs in virtuellen Lernumgebungen, GWV Fachverlage, Wiesbaden.

Sterthaus, J. (**2008**), *Parameteridentifikation an metallischen Werkstoffen basierend auf numerischen Simulationen und instrumentierter Eindringprüfung*, Dissertation, Technische Universität Berlin.

Tombers, A. (**2008**), *Experimentelle Reihenuntersuchungen an faserverstärkten Kunststoffen insbesondere von AFK-Laminaten – Versuchsplanung, Prüfkörperherstellung und Ergebnisauswertung unter besonderer Berücksichtigung der Nachbearbeitungsproblematik –*, Diplomarbeit, Universität Paderborn (Betreuer: I. Koke, F. Ferber).

Tsai, S. W., Hahn, H. T. (1980), *Introduction to Composite Materials*, 4. Auflage, Technomic Publishing Company.

R

Tsai, S. W., Massard, T. N., Susuki, I. (1988), *Composites Design*, 4. Aufl., Think Composites, Dayton, Ohio, USA.

Tsai, S. W. (1992), Theory of Composites Design, Think Composites, Dayton, Ohio, USA.

van Krevelen, D. W. (1983), *Verbundwerkstoffe (Composites)*, 22. Internationale Chemiefasertagung für die Textilindustrie, 8.-10. Juni 1983, Dornbirn, Österreich.

Van de Velde, K., Kiekens, P., Van Langenhove, L. (2003), *Basalt Fibres as Reinforcement for Composites*, Department of Textiles, Ghent University, Technologiepark 907, B-9052 Zwijnaarde, Belgium, http://www.basaltex.com/en/r-d.aspx, letzter Abruf am 29.09.2011.

Vester, F. (**2000**), *Die Kunst vernetzt zu denken – Ideen und Werkzeuge für einen neuen Um*gang mit Komplexität, Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, Stuttgart.

VDI-Richtlinie 2014 (1989), Blatt 1: *Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund: Grundlagen*, Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Berlin.

VDI-Richtlinie 2014 (1993), Blatt 2: *Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund: Konzeption und Gestaltung*, Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Berlin.

VDI-Richtlinie 2014 (2006), Blatt 3: *Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund: Berechnungen*, Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Berlin.

Wedekind, J. (2007), *Lernen mit interaktiven Visualisierungen*, in: Überwindung von Schranken durch E-Learning, S. 57-76, Hrsg.: Baumgartner, P., Reinmann, G., Studienverlag, Innsbruck.

Wegener, W., Hausmann, K.-H. (1964), Melliand Textilberichte 45, S. 981/83, 1107/11, 1229/37.

Wegener, W., Hausmann, K.-H. (1966), Kunststoff-Rundschau 13, S. 521/29.

Weißenbach, W. (2007), Werkstoffe – Strukturen, Eigenschaften, Prüfung, 16. Aufl., Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.

Westfälisches Volksblatt Paderborn (2009), Tageszeitung, Westfalen-Blatt Vereinigte Zeitungsverlage GmbH, Ausgabe: 30. September 2009.

Wiedemann, J. (1996), Leichtbau 1: Elemente, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin.

Wiedemann, J. (2007), *Leichtbau – Elemente und Konstruktion*, Buchreihe: Klassiker der Technik, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin.

Witten, E. (Hrsg.) (2010), Handbuch Faserverbundkunststoffe – Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen, 3. Auflage, Hrsg.: AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V., Vieweg+Teubner Verlag, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden.

Wurtinger, H. (1977), *Mechanische Eigenschaften der Verbundwerkstoffe*, in Kohlenstoffund aramidfaserverstärkte Kunststoffe, pp. 73-84, Hrsg.: VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.

Wuttke, D. (**2008**), Entwicklung einer interaktiven Anwendung zur Berechnung wesentlicher Schritte der Klassischen Laminattheorie für Faserverbund-Kunststoffe, Studienarbeit, Universität Paderborn.

Wuttke, D. (2009), Konzeption und Realisierung einer E-Learning-Umgebung zur Veranschaulichung der komplexen Berechnungsschritte bei der Auslegung von Faserverbund-Kunststoffen, Diplomarbeit, Universität Paderborn. http://mb-s1.upb.de/E-MechLAB/Verbundwerkstoff-Mechanik/Produkt/Berechnung/

Ziegmann, G. (**1996**), *Bauweisenkonzepte für Faserverbundwerkstoffe unter Automatisierungsaspekten*, Habilitationsschrift, eingereicht an der ETH-Zürich, Schweiz.

Zurmühl, R. (1964), Matrizen, 4. Auflage, Springer-Verlag, Berlin.

Zwick (2008), Prüfmaschinen und Prüfsysteme für Kunststoffe und Gummi – Prüfen mit Verstand, Katalog, Fa. Zwick GmbH & Co. KG, August-Nagel-Str. 11, 89079 Ulm, Edition 30.08.2008.

WWW-Referenzen (kenntlich gemacht durch Zusatz "-ol")

Adobe Flash, http://www.adobe.com/de/products/flash.html, letzter Abruf am 29.09.2011.

ALFALAM[©] (2009), Berechnungstool ALFALAM[©] TU Darmstadt, Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen, http://www.klub.tu-darmstadt.de/forschungsbericht/downloads_3/ downloads_3.de.jsp, letzter Abruf am 29.09.2011.

Aramis – Optische 3D-Verformungsanalyse, GOM mbH – Gesellschaft für Optische Messtechnik, Mittelweg 7-8, 38106 Braunschweig, http://www.gom.com/de/ messsysteme/systemuebersicht/aramis.html, letzter Abruf am 29.09.2011.

ASA.TEC ASAMER BASALTIC FIBERS GMBH, Ohlsdorf, Österreich, http://www.asatec.at/, letzter Abruf am 29.09.2011.

Bos, B. (**2011**), *Cascading Style Sheets*, 1994-2011: http://www.w3.org/Style/CSS/, letzter Abruf am 19.09.2011.

Chavchanidze, G. (2007), *Mathematics and CSS*, http://xml-maiden.com/, letzter Abruf am 19.09.2011.

Drakos, N., Moore, R. (2001), *LaTeX2HTML*: http://www.latex2html.org/, letzter Abruf am 19.09.2011.

E-MechLAB, Online-Lehrangebot zur Technischen Mechanik und Mechanik der Faserverbundkunststoffe, http://mb-s1.uni-paderborn.de/E-MechLAB/, verantwortlich für den Inhalt: Isabel Koke, Universität Paderborn, letzter Abruf am 29.09.2011.

E-MechLAB Bagger, Online-Lehrangebot zur Technischen Mechanik – Themenübergreifende Aufgabenstellung, http://mb-s1.upb.de/E-MechLAB/TechnischeMechanik/Themen%C3 %BCbergreifende%20Aufgabenstellung/, Universität Paderborn, letzter Abruf am 29.09.2011.

E-MechLAB Berechnung, Online-Lehrangebot zur Faserverbundmechanik – Berechnung, http://mb-s1.uni-paderborn.de/E-MechLAB/Verbundwerkstoff-Mechanik/Produkt/Berechnung/, verantwortl. für den Inhalt: Isabel Koke, Universität Paderborn, letzter Abruf am 29.09.2011.

E-MechLAB Biegelinie, Online-Lehrangebot zur Technischen Mechanik – Bereich Biegeverformung von Balkentragwerken, http://mb-s1.upb.de/E-MechLAB/TechnischeMechanik/ Festigkeitslehre/Biegelinie/, TU Berlin, letzter Abruf am 29.09.2011.

E-MechLAB CLT-Schritt 2, Online-Lehrangebot zur Faserverbundmechanik – Bereich Berechnung, http://mb-s1.upb.de/E-MechLAB/Verbundwerkstoff-Mechanik/Produkt/Berechnung/ CLT/Schritt 02/, verantwortlich für den Inhalt: Isabel Koke, Universität Paderborn, letzter Abruf am 29.09.2011.

E-MechLAB Experimente, Online-Lehrangebot zur Faserverbundmechanik – Bereich Experimentaltechnik, http://mb-s1.uni-paderborn.de/E-MechLAB/Verbundwerkstoff-Mechanik/ Produkt/Experimente/, verantwortlich für den Inhalt: Isabel Koke, Universität Paderborn, letzter Abruf am 29.09.2011.

E-MechLAB Faser, Online-Lehrangebot zur Mechanik der Faserverbundkunststoffe – Bereich Fasern, http://mb-s1.upb.de/E-MechLAB/Verbundwerkstoff-Mechanik/Aufbau/Fasern/, verantwortl. f. d. Inhalt: Isabel Koke, Universität Paderborn, letzter Abruf am 29.09.2011.

E-MechLAB Faser-Übung, Online-Lehrangebot zur Mechanik der Faserverbundkunststoffe – Bereich Verstärkungsfasern, http://mb-s1.upb.de/E-MechLAB/Verbundwerkstoff-Mechanik/ Aufbau/Fasern/Uebung/, verantwortlich für den Inhalt: Isabel Koke, Universität Paderborn, letzter Abruf am 29.09.2011.

E-MechLAB Festigkeitslehre, Online-Lehrangebot zur Technischen Mechanik – Bereich Festigkeitslehre, http://mb-s1.upb.de/E-MechLAB/TechnischeMechanik/Festigkeitslehre/, verantwortlich f. d. Inhalt: Isabel Koke, Universität Paderborn, letzter Abruf am 29.09.2011.

E-MechLAB FVW-Übung, Online-Lehrangebot zur Mechanik der Faserverbundkunststoffe – Bereich Faserverbundwerkstoff, http://mb-s1.upb.de/E-MechLAB/Verbundwerkstoff-Mechanik/Faserverbundwerkstoff/Uebung/, verantwortlich für den Inhalt: Isabel Koke, Universität Paderborn, letzter Abruf am 29.09.2011.

E-MechLAB Historie, Online-Lehrangebot zur Mechanik der Faserverbundkunststoffe – Einleitung, http://mb-s1.upb.de/E-MechLAB/Verbundwerkstoff-Mechanik/Einleitung/Historie/ Hoeren/_track1/, verantwortlich für den Inhalt: Isabel Koke, Universität Paderborn, letzter Abruf am 29.09.2011. **E-MechLAB Hydromechanik Heronsbrunnen**, Online-Lehrangebot zur Technischen Mechanik – Bereich Kontinuumsmechanik, http://mb-s1.upb.de/E-MechLAB/Technische Mechanik/Kontinuumsmechanik/Hydromechanik/Hydromechanik%20Applet/, Lernanwendung "Die Hydromechanik des Heronsbrunnens" erstellt von Tobias Bungers, TU Berlin, letzter Abruf am 29.09.2011.

E-MechLAB Kontinuumsmechanik-Video, Online-Lehrangebot zur Mechanik der Faserverbundkunststoffe – Bereich Berechnung, http://mb-s1.upb.de/E-MechLAB/Verbundwerk stoff-Mechanik/Produkt/Berechnung/Kontinuumsmechanik/Einführungsvideo/, Einführungsvideo erstellt von David Wuttke, Universität Paderborn, letzter Abruf am 29.09.2011.

E-MechLAB Mechanik-Experimente IfM, Online-Lehrangebot zur Technischen Mechanik, http://mb-s1.upb.de/E-MechLAB/TechnischeMechanik/Experimente am Institut für Mechanik/, Katalogisierung institutseigener experimenteller Aufbauten erstellt von Daniel Bude und Marcel Schreiber, TU Berlin, letzter Abruf am 29.09.2011.

E-MechLAB Mischungsregel-Applet, Online-Lehrangebot zur Mechanik der Faserverbundkunststoffe – Bereich Berechnung CLT, http://mb-s1.upb.de/E-MechLAB/Verbundwerkstoff-Mechanik/Produkt/Berechnung/CLT/Vorbereitung/Mechanische%20Größen/Mischungsregel/ Applet/, Lernanwendung erstellt von: David Wuttke, verantwortlich für den Inhalt: Isabel Koke, Universität Paderborn, letzter Abruf am 29.09.2011.

E-MechLAB MOHRscher Kreis, Online-Lehrangebot zur Technischen Mechanik – Bereich MOHRsche Spannungskreise in 2D, http://mb-s1.upb.de/E-MechLAB/TechnischeMechanik/ Festigkeitslehre/Vergleichsspannungen/MOHRsche%20Spannungskreise/, Lernanwendung erstellt von: Markus Vöse, verantwortlich für den Inhalt: Isabel Koke, TU Berlin, letzter Abruf am 29.09.2011.

E-MechLAB Reibung, Online-Lehrangebot zur Technischen Mechanik – Bereich Reibung, http://mb-s1.upb.de/E-MechLAB/TechnischeMechanik/Statik/Reibung/, Lernanwendungen: \rightarrow , Der Klotz auf der schiefen Ebene" und

 \rightarrow "Reibung an der schiefen Ebene" zur Anwendung der NEWTONschen Gesetze

erstellt von Tobias Bungers, verantwortlich für den Inhalt: Isabel Koke, TU Berlin, letzter Abruf am 29.09.2011.

E-MechLAB Schlupf, Online-Lehrangebot zur Technischen Mechanik – Bereich Starrkörperkinematik, http://mb-s1.upb.de/E-MechLAB/TechnischeMechanik/Dynamik/Kinematik/ Starrk%C3%B6rperkinematik/Schlupfi/, Lernanwendung "Das rollende Rad mit Schlupf auf der schiefen Ebene" erstellt von Tobias Bungers, verantwortlich für den Inhalt: Isabel Koke, TU Berlin, letzter Abruf am 29.09.2011.

E-MechLAB Schwerpunkt, Online-Lehrangebot zur Technischen Mechanik – Bereich Schwerpunktsbestimmung, http://mb-s1.upb.de/E-MechLAB/TechnischeMechanik/Statik/ Schwerpunkt/, verantwortlich für den Inhalt: Isabel Koke, Universität Paderborn, letzter Abruf am 29.09.2011.

E-MechLAB Schwingungen, Online-Lehrangebot zur Technischen Mechanik – Bereich schwingfähige Systeme, http://mb-s1.upb.de/E-MechLAB/TechnischeMechanik/Dynamik/

 \mathbb{Q}

Kinetik/Schwingungen/Applet%20zu%20Schwingungen/, Lernanwendung erstellt von Daniel Bude, verantwortlich für den Inhalt: Isabel Koke, TU Berlin, letzter Abruf am 29.09.2011.

E-MechLAB Technische Mechanik, Online-Lehrangebot zur Technischen Mechanik, http://mb-s1.upb.de/E-MechLAB/TechnischeMechanik/, verantwortlich für den Inhalt: Isabel Koke, Universität Paderborn, letzter Abruf am 29.09.2011.

E-MechLAB Verbundwerkstoff-Mechanik, Online-Lehrangebot zur Mechanik der Faserverbundkunststoffe, http://mb-s1.upb.de/E-MechLAB/Verbundwerkstoff-Mechanik/, verantwortlich für den Inhalt: Isabel Koke, Universität Paderborn, letzter Abruf am 29.09.2011.

E-MechLAB virtuelles Zugprüflabor und

E-MechLAB virtuelles Labor Laminataufbau, Online-Lehrangebot zur Mechanik der Faserverbundkunststoffe – Bereich CLT-Berechnung, http://mb-s1.upb.de/E-MechLAB/ Verbundwerkstoff-Mechanik/Produkt/Berechnung/CLT-Anwendung/Applet 3D/, virtuelles Labor erstellt von David Wuttke, Universität Paderborn, letzter Abruf am 29.09.2011.

E-MechLAB Vorbereitung CLT, Online-Lehrangebot zur Mechanik der Faserverbundkunststoffe – Bereich CLT-Berechnung, http://mb-s1.upb.de/E-MechLAB/Verbundwerkstoff-Mechanik/Produkt/Berechnung/CLT/Vorbereitung/, letzter Abruf am 29.09.2011.

Fibretemp – beheizbare Formen, Homepage: http://www.fibretemp.de/, Herausgeber: Funke, H., Fachhochschule Dortmund, Fachbereich 5 / Maschinenbau, letzter Abruf am 29.09.2011.

Flywheel – Shared Whiteboard Next Generation, Homepage: http://www.flywheel.open-steam.org/, letzter Abruf am 29.09.2011.

Gurari, E. M. (2010), *LaTeX4ht: LaTeX and TeX for Hypertext*, http://www.tug.org/ applications/tex4ht/, Ohio State University, USA, letzter Abruf am 29.09.2011.

jqMath – Put Math on the Web: http://mathscribe.com/author/jqmath.html, letzter Abruf am 29.09.2011.

Kamenny Vek – Advanced Basalt Fibre, Firmen-Homepage des Basaltfaserherstellers: http://www.basfiber.com/, Dubna, Moscow Region, Russia, letzter Abruf am 29.09.2011.

KMK (2008), *Nationale Strategien zur sozialen Dimension des Bologna-Prozesses*, Bericht der Kultusministerkonferenz (KMK): http://www.kmk.org/fileadmin/pdf/Wissenschaft/ BE_081010_NatBericht_Teilll_SozialeDimension_endg.pdf, letzter Abruf am 29.09.2011.

koaLA – ko-aktive Lern- und Arbeitsumgebung, **https://koala.upb.de**/, letzter Abruf am 29.09.2011.

Korpela, J., *Math in html (and css)*: http://www.cs.tut.fi/~jkorpela/math/, letzter Abruf am 29.09.2011.

Lakes, R., Department of Engineering Physics, University of Wisconsin: http://silver.neep.wisc.edu/~lakes/Poisson.html, letzter Abruf am 29.09.2011.

MathJax (2011), *Beautiful math in all browsers*: http://www.mathjax.org/, Verbundprojekt von: American Mathematical Society, Design Science, Inc., and the Society for Industrial and Applied Mathematics, letzter Abruf am 29.09.2011.

MIT Academic Computing (2000), *Displaying Math on the Web -- Samples and Tools*, http://web.mit.edu/acs/faq/webmath/samples_and_tools.html, letzter Abruf am 29.09.2011.

MIT Stuff (2000), Webtex: A markup language for webeq, http://stuff.mit.edu/afs/ athena/software/webeq/currenthome/docs/webtex/toc.html, letzter Abruf am 12.04.2009.

Mozilla Firefox, http://www.mozilla.com/de/firefox/, letzter Abruf am 29.09.2011.

^{open}sTeam, http://www.open-steam.org/, letzter Abruf am 29.09.2011.

R&G, Fa. R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH, im Meißel 7, 71777 Waldenbuch, Homepage, http://www.r-g.de/, letzter Abruf am 29.09.2011.

Race-Ing. Team der FH Dortmund, Homepage, http://www.race-ing.com/, letzter Abruf am 29.09.2011.

Silence Aircraft, Fa. Silence Aircraft GmbH, Kapellenweg 54a, 33415 Verl, Homepage, http://silence-aircraft.de/, letzter Abruf am 29.09.2011.

Stangl, W., *Werner Stangls Arbeitsblätter: Lernstrategien – Lerntypen – Lernstile*, http://www.stangl-taller.at/ARBEITSBLAETTER/LERNEN/Lernstrategien.shtml, Abschnitt: Kognitionsstile, letzter Abruf am 29.09.2011.

TextilienWiki, http://www.textilienwiki.de/index.php/Textilien, letzter Abruf am 01.10.2010.

TohoTenax, Firmen-Homepage, Datenblätter zu Kohlenstofffasern: http://www.tohotenaxeu.com/, letzter Abruf am 29.09.2011.

Torayca, Firmen-Homepage: http://www.torayca.com/techref/index.html, letzter Abruf am 29.09.2011.

Tüv-Süd, www.tuev-sued.de, letzter Abruf am 29.09.2011.

UPBracingTeam, Formula Student Team der Universität Paderborn, Homepage, http://formulastudent.uni-paderborn.de/, letzter Abruf am 29.09.2011.

Wikipedia – Die Freie Enzyklopädie (**2009**), Themenbeitrag: *Glasfaser*, http://de.wikipedia.org/wiki/Glasfaser, letzter Abruf am 29.09.2011.

Wikipedia – Die Freie Enzyklopädie (**2009a**), Themenbeitrag: *Kristallsystem*, http://de.wikipedia.org/wiki/Kristallsystem, letzter Abruf am 29.09.2011.

Dieses erk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch. 2

Dieses erk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch. Q/

Dieses erk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch. Q/