

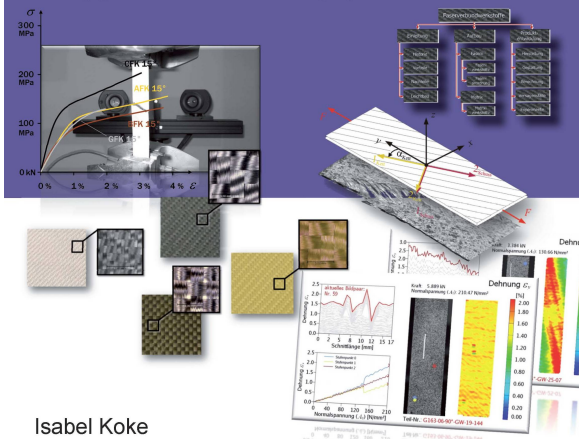


Isabel Koke (Autor)

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

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Kontinuumsmechanik und Materialtheorie
der Technischen Universität Berlin

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



Isabel Koke

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



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/6174>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>



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 Gewebbindung 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 der Laminatherstellung bis zum fertigen Prüfkörper	53
2.5.1	Festlegung des Versuchsprogramms – Versuchsplanung	56
2.5.2	Gewebezuschnitt	57
2.5.3	Faserablage von Geweben, Stapelfolge	59
2.5.4	Laminieren – Fertigungsprozess der Prüflamine	61
2.5.5	Bestimmung des Faservolumenanteils	63
2.5.6	Fertigung der Prüfkörper und Prüfkörpergeometrie	67
2.5.6.1	Vorüberlegungen zum Prüfkörper	67
2.5.6.2	Prüfkörpergeometrie	67
2.5.6.3	Aufleimer zur Krafteinleitung	69
2.5.6.4	Prüfkörper heraustrennen aus vorbereitetem Prüflaminat	71
2.5.7	Probenpräparation mit stochastischem Oberflächenmuster	72
2.6	Messung mechanischer Kenndaten eines Verbundes – Versuchsaufbau, -technik und -durchführung	73
2.6.1	Der Klassiker – quasistatischer Zugversuch	75
2.6.2	Schwellende Belastung – zyklischer Zugversuch	78
2.6.3	Optische Verformungsanalyse mit Hilfe photogrammetrischer Messmethoden	79
2.6.3.1	Wie funktioniert das?	80
2.6.3.2	Anwendung der optischen Verformungserfassung und technische Daten	78
2.6.3.3	Was optische Deformationsanalyse (nicht) kann	81
2.6.3.4	Mess(un)genauigkeit	82
2.6.3.5	Geometrisches Dehnungsphänomen der Deckschicht bei Anwendung auf Faserverbundstrukturen	83
2.6.3.6	Vergleich photogrammetrischer Analyse mit klassischem Extensometer	83
2.7	Versuchsauswertung und Ergebnisbetrachtung	86
2.7.1	Spannungs-Dehnungs-Verhalten der geprüften fasergewebeverstärkten Kunststoffe (Messkurven)	89
2.7.1.1	Glasfaserverstärkter Kunststoff	89
2.7.1.2	Aramidfaserverstärkter Kunststoff	90
2.7.1.3	Basaltfaserverstärkter Kunststoff	91
2.7.1.4	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff	92
2.7.1.5	Vergleich des materialabhängigen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens (bei gleicher Faserorientierung)	93
2.7.2	Kenngößenbestimmung aus dem Experiment (DIN 527-1, DIN EN 2747)	94
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
2.7.2.2	Der Schubmodul	102
2.7.2.2.1	In welchem Wertebereich und wie genau wird G_{12} ermittelt?	102
2.7.2.2.2	Schubmodulbestimmung – Begründung der Vorgehensweise	103
2.7.2.2.3	Einfluss des Faservolumenanteils auf den Schubmodul	104
2.7.2.3	Die Querkontraktionszahl (POISSONZahl)	105
2.7.2.3.1	Einfluss des Faservolumenanteils auf die Querkontraktionszahl	106
2.7.2.3.2	ν_{21} größer 0,5 – geht das?	106
2.7.3	Fehlerabschätzung für Faservolumenanteil und E-Modul	107



3	Theorie zum Labor – Einführung in die Laminattheorie und Vergleich mit Experimenten	109
3.1	Bilanzgleichungen	109
3.1.1	Ziel der Kontinuumsmechanik: Bestimmung von vier Feldern	109
3.1.2	Massenbilanz	110
3.1.3	Impulsbilanz	110
3.1.4	Umformung der Massen- und Impulsbilanz	113
3.1.5	Zusammenfassung wichtiger Erkenntnisse	116
3.2	Materialgesetz	116
3.2.1	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
3.2.4	Superindex angewendet auf HOOKEsches Gesetz	122
3.2.5	Nachgiebigkeitsmatrix	124
3.3	Werkstoffeigenschaften Homogenität und Anisotropie	126
3.3.1	Homogenität	126
3.3.2	Anisotropie	127
3.3.3	Koordinatentransformation mit Dreh- und Symmetriematrizen	127
3.4	Steifigkeits- und Nachgiebigkeitsmatrizen in Abhängigkeit von der Werkstoffsymmetrie (Kristallklasse)	129
3.4.1	Triklin	130
3.4.2	Monoklin	130
3.4.3	Orthotrop/ Orthorhombisch	131
3.4.4	Tetragonal	132
3.4.5	Trigonal	133
3.4.6	Transversale Isotropie	133
3.4.7	Kubisch	134
3.4.8	Isotrope Materialien	135
3.5	Einführung von Ingenieurkonstanten	136
3.5.1	„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
3.7.1	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



3.7.2	Ein symmetrisches Laminat	152
3.7.3	Berechnung der globalen Laminatsteifigkeit eines symmetrischen Laminats	153
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	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. Schritt: Berechnung der Laminatsteifigkeitsmatrix	164
3.8.2.2.4	4. Schritt: Invertieren der Laminatsteifigkeitsmatrix zur -nachgiebigkeitsmatrix	164
3.8.2.2.5	5. Schritt: Laminatverzerrungen	165
3.8.2.2.6	6. Schritt: Berechnung der Gesamtverzerrungen des Laminats	166
3.8.2.2.7	7. Schritt: Berechnung der Einzelschichtspannungen	166
3.8.2.2.8	8. Schritt: Summe der spannungswirksamen Verzerrungen	167
3.8.2.2.9	9. Schritt: Rücktransformation der spannungsfreien Verzerrungen in das jeweilige Einzelschicht-Koordinatensystem	167
3.8.2.2.10	10. Schritt: Berechnung der Spannungen in den Einzelschichten	168
3.8.2.3	Korrekturfaktoren	168
3.8.2.4	Festigkeitskriterien	168
3.8.3	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	Mechanik und virtuelle Labore – neue 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	E-Learning und Online-Lehre	199
4.2.3	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	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	Anwendungsbezogenes Konzept	209



4.4	Virtuelle 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	Virtuelle 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
4.5.6.1	Strukturentwurf	247
4.5.6.2	Von der Einleitung bis zur Gestaltung mit Faser-Kunststoff-Verbunden	249
4.5.6.3	Grundgedanken zur Konzeption der Lerneinheit zur Berechnung von FVK	254
4.5.6.4	Methodisches Vorgehen zur Definition der Arbeitsabläufe und geeigneten Darstellung des Herstellprozesses von Faserverbundkunststoffen in Online-Lehreinheiten	261
4.6	Ergebnisse und abschließende Diskussion der finalen Realisierung	263
4.7	Ausblick	264
5	Literaturverzeichnis	265