

Universität der Bundeswehr München  
Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften

Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg  
Fakultät Maschinenbau

Charakterisierung von gewebeverstärkten Einzellagen  
aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK)  
mit Hilfe einer mesomechanischen Kinematik  
sowie strukturdynamischen Versuchen

Marco Romano

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften  
der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften  
(Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Promotionskommission:

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Ingo Ehrlich
  2. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Norbert Gebbeken
  3. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil., rer. nat. Hans-Joachim Gudladt
- Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Brüning

Die Dissertation wurde am 27. Juli 2015 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht,  
und durch die Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften am 16. März 2016  
angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 12. April 2016 statt.



Schriftenreihe der OTH Regensburg

**Marco Romano**

**Charakterisierung von gewebeverstärkten Einzellagen  
aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK)  
mit Hilfe einer mesomechanischen Kinematik  
sowie strukturdynamischen Versuchen**

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Zugl.: OTH Regensburg, Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5177-3

ISSN 2512-093X

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

*... Zeiten ...*

*... i tempi ...*

*Meinen Eltern und Großeltern.*

*Ai miei genitori e nonni.*



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Labor für Faserverbundtechnik an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg im Umfeld des Aufbaus und der Etablierung des Labors an der Fakultät Maschinenbau.

Mein besonderer Dank gilt dem Leiter des Labors für Faserverbundtechnik der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg, Herrn Prof. Dr.-Ing. Ingo Ehrlich für die vielen, nicht nur fachlichen, Diskussionen und Gespräche. Seine Anregungen und Ideen haben die Arbeit ganz wesentlich geprägt. Seine ausgezeichnete Kritik und die hervorragende Betreuung der Arbeit in Verbindung mit aller wissenschaftlichen Freiheit haben wesentlich zum Gelingen beigetragen.

Darüber hinaus möchte ich besonders dem Leiter des Instituts für Mechanik und Statik der Universität der Bundeswehr München, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Norbert Gebbeken, danken, der meine Arbeit als kooperative Promotion zwischen der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg und der Universität der Bundeswehr München jederzeit ausgezeichnet betreut hat. Seine wertvollen Hinweise in den zahlreichen Gesprächen habe ich stets sehr gerne in die Arbeit aufgenommen.

Für die Übernahme des Amtes des dritten Gutachtes gilt mein Dank dem Leiter des Instituts für Werkstoffkunde der Universität der Bundeswehr München, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil., rer. nat. Hans-Joachim Gudladt, für die fachlichen Gespräche und das große Interesse an der Arbeit.

Für die Bereitschaft als Vorsitzender der Promotionskommission zu agieren sowie für die sehr schöne Leitung des Promotionsverfahrens danke ich dem Inhaber der Professur für Baumechanik, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Brünig.

Es ist mir wichtig, mich bei den Angehörigen der Fakultät Maschinenbau der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg zu bedanken, die durch ihre wohlwollende Förderung und ihr Interesse sehr zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. In diesem Zusammenhang möchte ich stellvertretend die jeweils amtierenden Dekane, Herrn Prof. Dr.-Ing. Georg Rill und Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Briem, besonders erwähnen.

Schließlich möchte ich denjenigen Personen danken, die bei der Entstehung dieser Arbeit keinen unwesentlichen Anteil hatten: Herrn Vinzent Schmid, M.Sc., Herrn Bastian Jungbauer, B.Eng., Herrn Andreas Kastenmeier, M.Sc., Herrn Michael Eisenried, M.Sc., Herrn Matthias Micklitz, M.Sc., Herrn Carl Hoinkes, M.Sc., Herrn Staatl. gepr. Techniker Elmar Lauterborn sowie allen Abschlussarbeitern und Studierenden, die ich im Zuge dieser Arbeit betreuen durfte.

Baar-Ebenhausen, Mai 2016

Marco Romano



## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt die analytische und numerische Identifikation einer mesomechanischen Kinematik in gewebeverstärkten Einzellagen sowie deren Validierung über die Struktur­dynamik von flachen stabförmigen Probekörpern aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK). Unter der Voraussetzung, dass das wiederholte Wirken der Kinematik Energie dissipiert, trägt sie bei zyklischer viskoelastischer Deformation zusätzlich zur reinen viskoelastischen Werkstoffdämpfung in gewebeverstärkten Einzellagen bei.

Die analytischen und numerischen Untersuchungen beschränken sich auf die Betrachtung des ebenen, zweidimensionalen Zusammenhangs einer vollständigen Ondulation bzw. einer repräsentativen Sequenz in Dickenrichtung. Zur Parameteridentifikation werden die geometrischen Abmessungen in definierten Schritten variiert. Dafür wird der Grad der Ondulation in gewebeverstärkten Einzellagen  $\tilde{O} = \frac{A}{L}$  als dimensionslose Kennzahl eingeführt.

Zur Validierung der dämpfungserhöhenden Wirkung der in den analytischen und numerischen Untersuchung identifizierten mesomechanischen Kinematik in gewebeverstärkten Einzellagen werden in experimentellen struktur­dynamischen Untersuchungen frei abklingende Transversal­schwingungen von einseitig fest eingespannten Probekörpern untersucht. Im Detail werden flache stabförmige Probekörper aus kohlenstofffaserverstärktem Epoxidharz mit Lagenaufbauten aus 0°-unidirektionalen und gewebeverstärkten Einzellagen untersucht.

Die Ergebnisse der experimentellen struktur­dynamischen Untersuchungen dienen schließlich der Validierung des analytischen Modells und der numerischen Berechnungen. Die dämpfungserhöhende Wirkung der identifizierten mesomechanischen Kinematik wird schließlich in Abhängigkeit des eingeführten Grades der Ondulation  $\tilde{O}$  quantifiziert.

## Summary

The present work contains an analytical and a numerical identification of a mesomechanic kinematic in fabric-reinforced single-layers as well as its validation by the structural dynamics of flat beam-like specimens of carbon-fiber reinforced plastic (CFRP). Under the presumption, that the repeated acting of the kinematic dissipates energy, it contributes under cyclic viscoelastic deformation to the pure viscoelastic material damping of fabric-reinforced single-layers.

The analytical and numerical investigations consider the plain, two-dimensional correlation of one complete conulation and a representative sequence, respectively, in the through-thickness direction. In order to identify the parameters, the geometric dimensions are varied in defined steps. Therefore the degree of ondulation in fabric-reinforced single-layers  $\tilde{O} = \frac{A}{L}$  is introduced as a dimensionless ratio.

In order to validate the contribution of the analytically and numerically identified mesomechanic kinematic in fabric-reinforced single-layers to the material damping, the free decay of transversal vibrations of single-sided clamped specimens is considered in the experimental structural dynamic investigations. In detail flat beam-like specimens of carbon-fiber reinforced epoxy with layups of 0°-unidirectionally reinforced and fabric-reinforced single-layers are investigated.

The results of the experimental structural dynamic investigations allow the validation of the analytical model and the numerical calculations. The contribution of the identified mesomechanic kinematic is finally quantified depending on the introduced degree of ondulation  $\tilde{O}$ .



# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>v</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>Formelzeichen und Bezeichnungen</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Technischer Hintergrund und Motivation . . . . .	1
1.2 Ausgangssituation . . . . .	2
1.3 Mesomechanisches Wirkprinzip . . . . .	2
1.4 Zielsetzung und Vorgehen . . . . .	4
<b>2 Strukturdynamische Werkstoffdämpfung in faserverstärkten Kunststoffen</b>	<b>7</b>
2.1 Ausgewählte Aspekte . . . . .	7
2.1.1 Unterschiedliche mechanische Wirkprinzipien . . . . .	7
2.1.2 Ermittlung strukturdynamischer Werkstoffkennwerte . . . . .	10
2.1.3 Ondulationen in gewebeverstärkten Einzellagen . . . . .	12
2.2 Abschließende Bemerkungen . . . . .	20
<b>3 Ausgewählte Aspekte zu faserverstärkten Kunststoffen</b>	<b>25</b>
3.1 Verstärkungsfasern . . . . .	25
3.2 Schlichte bzw. Finish und Interphase . . . . .	26
3.3 Polymere Matrixsysteme . . . . .	27
3.4 Textile Halbzeuge . . . . .	28
3.5 Ausgewählte Herstellungsverfahren für faserverstärkte Kunststoffe . . . . .	31
3.6 Exkurs . . . . .	33
<b>4 Lineare anisotrope Elastizität und Materialmodelle</b>	<b>35</b>
4.1 HOOKE'sches Gesetz des isotropen Körpers . . . . .	35
4.1.1 Materialgesetz . . . . .	35
4.1.2 Kinematische Beziehungen . . . . .	38
4.1.3 Lokale Bewegungsgleichungen . . . . .	40
4.2 Materialsymmetrien . . . . .	41
4.2.1 Anisotropie . . . . .	41
4.2.2 Monotropie . . . . .	44
4.2.3 Orthotropie . . . . .	44
4.2.4 Transversalisotropie . . . . .	45
4.2.5 Isotropie . . . . .	46
<b>5 Mikromechanische Homogenisierungsansätze</b>	<b>51</b>
5.1 Vereinfachende Voraussetzungen . . . . .	51
5.2 Steifigkeiten . . . . .	53
5.2.1 Längssteifigkeit $E_{11}$ . . . . .	53
5.2.2 Quersteifigkeit $E_{22}$ . . . . .	53
5.2.3 Längs-Quer-Schubsteifigkeit $G_{12}$ . . . . .	54
5.2.4 Quer-Quer-Schubsteifigkeit $G_{23}$ . . . . .	56

5.3	Querverformungszahlen . . . . .	57
5.3.1	Senkrecht bei Längsverformung $\nu_{12}$ . . . . .	58
5.3.2	Längs bei Querverformung $\nu_{21}$ . . . . .	58
5.3.3	Quer bei Querverformung $\nu_{23}$ . . . . .	58
5.4	Abschließende Bemerkungen . . . . .	59
<b>6</b>	<b>Makromechanik der Einzelschicht und Erfassung von Schichtungen</b>	<b>65</b>
6.1	Vereinfachungen der ebenen Elastizität . . . . .	65
6.1.1	Ebener Spannungszustand . . . . .	66
6.1.2	Ebener Verzerrungszustand . . . . .	67
6.1.3	Grenzen der Idealisierung . . . . .	68
6.2	Koordinatentransformation beim ebenen Spannungszustand . . . . .	69
6.2.1	Transformation der Spannungen und Verzerrungen . . . . .	70
6.2.2	Zusammenhang zwischen den Transformationsbeziehungen . . . . .	71
6.2.3	Transformation der Steifigkeiten und Nachgiebigkeiten . . . . .	72
6.3	Makromechanik des Laminats als Mehrschichtverbund . . . . .	73
6.3.1	Klassische Laminattheorie (CLT) . . . . .	74
6.3.2	Spannungs-Verzerrungs-Beziehungen der faserverstärkten Einzelschicht . . . . .	74
6.3.3	Spannungs- und Verzerrungsverläufe über die Dicke des Laminats . . . . .	75
6.3.4	Schnittgrößen des Laminats . . . . .	76
6.3.5	Schnittgrößen-Verzerrungs-Beziehungen des Laminats . . . . .	78
6.3.6	Definition der Laminatsteifigkeiten zur <i>ABD</i> -Hypermatrix . . . . .	79
<b>7</b>	<b>Aspekte der linearen Viskoelastizität</b>	<b>83</b>
7.1	Definition und Beschreibung von Schwingungen . . . . .	83
7.2	Eindimensionale Betrachtung schwingungsfähiger Systeme . . . . .	83
7.2.1	Eindimensionale Bewegung . . . . .	84
7.2.2	Harmonischer Oszillator . . . . .	85
7.3	Eindimensionale mechanische Schwingungen . . . . .	86
7.3.1	Ungedämpfte Schwingung . . . . .	87
7.3.2	Schwache Dämpfung . . . . .	88
7.3.3	Starke Dämpfung . . . . .	89
7.3.4	Aperiodischer Grenzfall . . . . .	90
7.4	Dynamisches Materialgesetz . . . . .	90
7.4.1	Gedächtnisintegral . . . . .	91
7.5	Frequenzbereichsdarstellung . . . . .	92
7.6	Komplexe strukturdynamische Werkstoffkennwerte . . . . .	93
7.6.1	KELVIN-VOIGT-Element . . . . .	94
7.6.2	Physikalische Interpretation . . . . .	94
7.6.3	Energiedissipation . . . . .	95
<b>8</b>	<b>Transversalschwingungen von Balken</b>	<b>97</b>
8.1	Eigenschaften des Balkens als mechanisches Tragwerk . . . . .	98
8.2	Homogener isotroper Balken . . . . .	99
8.2.1	Gleichgewicht, Verschiebung-Verzerrung, Materialgesetz . . . . .	100
8.2.2	Schubdeformationstheorie erster Ordnung nach TIMOSHENKO . . . . .	103
8.2.3	Schubstarre Theorie nach EULER-BERNOULLI . . . . .	106
8.2.4	Lösung durch Separationsansatz . . . . .	109
8.2.5	Einseitig fest eingespannter Balken . . . . .	111
8.3	Laminatbalken . . . . .	114
8.4	Anmerkungen . . . . .	118

<b>9 Analytische und numerische Untersuchungen</b>	<b>121</b>
9.1 Mesomechanische Betrachtung von Geweben . . . . .	121
9.2 Geometrie und Strukturmechanik . . . . .	122
9.2.1 Geometrische Verhältnisse . . . . .	122
9.2.2 Strukturmechanische Voraussetzungen . . . . .	124
9.3 Grad der Ondulation . . . . .	125
9.4 Analytisches Modell . . . . .	127
9.4.1 Mathematisches Modell und Voraussetzungen . . . . .	127
9.4.2 Analytischer Lösungsansatz . . . . .	129
9.5 Numerische Untersuchungen mit der FE-Methode . . . . .	132
9.5.1 Vorbemerkungen . . . . .	132
9.5.2 FE-Modell der ebenen repräsentativen Sequenzen . . . . .	134
9.5.3 Einstellungen der FE-Analyse . . . . .	137
9.5.4 Randbedingungen und Verschiebungen . . . . .	138
9.5.5 Strukturmechanische Werkstoffkennwerte . . . . .	140
<b>10 Experimentelle Untersuchungen</b>	<b>147</b>
10.1 Verwendete Materialien . . . . .	148
10.1.1 Trockene textile Halbzeuge und Matrixsystem . . . . .	149
10.1.2 Prepregs . . . . .	151
10.2 Herstellung der Prüfplatten . . . . .	151
10.2.1 Vorimprägnierung der trockenen textilen Halbzeuge . . . . .	151
10.2.2 Aufbau der Prüfplatten . . . . .	152
10.2.3 Verwendete Heißluftautoklavzyklen . . . . .	153
10.3 Materialcharakterisierung und Präparation der Probekörper . . . . .	155
10.3.1 Experimentelle Bestimmung von Dichte und Faservolumengehalt . . . . .	155
10.3.2 Präparation der Probekörper . . . . .	157
10.4 Versuchsaufbau . . . . .	159
10.4.1 Laser-Doppler-Vibrometer . . . . .	159
10.4.2 Einspann- und Anregevorrichtung . . . . .	162
10.5 Versuchsdurchführung . . . . .	165
10.5.1 Einspannung und Anregung des Probekörpers . . . . .	165
10.5.2 Position des Messpunktes . . . . .	165
10.5.3 Messtechnische Parameter . . . . .	166
10.5.4 Aufzeichnung des Messsignals . . . . .	166
10.5.5 Konstante Bedingungen . . . . .	166
<b>11 Ergebnisse der Untersuchungen</b>	<b>171</b>
11.1 Analytische und numerische Untersuchungen . . . . .	171
11.1.1 Auswertung . . . . .	171
11.1.2 Ergebnisse des analytischen Modells . . . . .	172
11.1.3 Auswertung der FE-Berechnungen . . . . .	172
11.1.4 Ergebnisse der FE-Berechnungen . . . . .	176
11.2 Experimentelle strukturdynamische Untersuchungen . . . . .	185
11.2.1 Auswertung . . . . .	185
11.2.2 Ergebnisse . . . . .	187
11.2.3 Geometrische Verhältnisse und Grad der Ondulation . . . . .	194
<b>12 Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>199</b>
12.1 Diskussion der analytischen und numerischen Ergebnisse . . . . .	199
12.2 Diskussion der experimentellen Ergebnisse . . . . .	204
12.3 Abschließende Bemerkungen . . . . .	207

---

<b>13 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>213</b>
13.1 Zusammenfassung . . . . .	213
13.2 Ausblick . . . . .	214
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>215</b>
<b>Anhang</b>	<b>227</b>
A.1 Reproduzierbarkeit, Parameteridentifikation und Sensitivitätsanalyse . . . . .	227
A.2 Gewöhnliche, homogene Differentialgleichungen zweiter und vierter Ordnung . . .	233
A.3 Statistische Absicherung der Messwerte . . . . .	235