

Mechanics and Adaptronics

Reihe herausgegeben von

Markus Böl, Institute of Mechanics and Adaptronics, Technische Universität
Braunschweig, Braunschweig, Deutschland

Michael Sinapius, Institute of Mechanics and Adaptronics, Technische Universität
Braunschweig, Braunschweig, Deutschland

Ziel der Buchreihe ist die Publikation neuer Ansätze in der Mechanik und Adaptronik. Diese Ansätze umfassen zum einen experimentelle Themen als auch solche, die numerischen Charakters sind und erstrecken sich über diverse Größenskalen. Experimentelle, zukunftsweisen Themen beinhalten Untersuchungen auf Mikro- bis hin zur Makroebene und berücksichtigen unterschiedlichste Felder, von der Mechanik über Temperatur bis hin zu unterschiedlichen chemischen Feldern. Auch auf Seiten der numerischen Simulation werden auf Grundlage der experimentellen Untersuchungen neue multiskalige Mehrfeldmodelle entwickelt, kalibriert und validiert. Eine Besonderheit stellt hier die Thematik der Adaptronik dar, die als Ziel die Integration neuer Funktionen in tragende Bauteile durch die Kombination konventioneller Konstruktionswerkstoffe mit aktiven Werkstoffsystemen verfolgt. So werden Funktionswerkstoffe betrachtet, die Energiewandler sind und die die klassischen lasttragenden und formgebenden Funktionen um sensorische und aktorische Funktionen erweitern. Aktorische und sensorische Eigenschaften ermöglichen in Kombination mit adaptiven, schnellen Reglern eine optimale Selbstanpassung an die jeweilige Einsatzumgebung. Durch die Zusammenführung von numerischem und experimentellem Know-how auf mechanische als auch adaptronischer Seite ist es möglich, Erkenntnisse aus der Natur im Sinne des bionischen Gedankens in die Technik zu übertragen und so neue wissenschaftliche Richtungen aufzuschlagen.

Alexander Kyriazis

Bauteilintegrierte Überwachung variothermer Faserverbundfertigungsprozesse mittels minimalinvasiver Foliensensoren auf löslichem Substrat

Alexander Kyriazis
Institute of Mechanics and Adaptronics
Technische Universität Braunschweig
Braunschweig, Niedersachsen, Deutschland

ISSN 2731-6211 ISSN 2731-622X (electronic)
Mechanics and Adaptronics
ISBN 978-3-662-68164-0 ISBN 978-3-662-68165-7 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-68165-7>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2024

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Michael Kottusch

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Das Papier dieses Produkts ist recyclebar.

Bauteilintegrierte Überwachung variothermer Faserverbundfertigungsprozesse mittels minimalinvasiver Foliensensoren auf löslichem Substrat

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von: Alexander Kyriazis
geboren in: Braunschweig

eingereicht am: 14. März 2023
mündliche Prüfung am: 16. Juni 2023

Vorsitz: Prof. Dr. Georg Garnweitner
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius
Prof. Dr.-Ing. Gerhard Ziegmann

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist im Zeitraum zwischen 2018 und 2023 während meiner Tätigkeit am Institut für Adaptronik und Funktionsintegration (inzwischen Institut für Mechanik und Adaptronik) der Technischen Universität Braunschweig entstanden. Wenn ich auf diese Zeit zurückblicke, wird mir einmal mehr die Wichtigkeit von Randbedingungen bewusst. Das gilt nicht nur für mechanische und elektrische Systeme, wie mein Doktorvater nicht müde wurde, mir beizubringen, sondern ganz offensichtlich auch für die Entstehung von Dissertationen. Aus diesem Grund möchte ich zuallererst meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius danken, der mit dem Institut für Adaptronik und Funktionsintegration ein wundervolles Umfeld zum Lernen, Lehren und Forschen geschaffen hat. Ohne ihn wäre diese Arbeit nicht entstanden. Weiterhin möchte ich Prof. Dr.-Ing. Gerhard Ziegmann dafür danken, dass er die Arbeit als Zweitgutachter geprüft hat und Prof. Dr. Georg Garnweitner dafür, dass er den Vorsitz der Prüfungskommission übernommen hat.

Bei den wissenschaftlichen Mitarbeitern an meinem Institut bedanke ich mich ganz herzlich für die vergangenen Jahre. Jeder Einzelne hat zu einem positiven Arbeitsumfeld beigetragen, in dem es Freude gemacht hat zu arbeiten. An dieser Stelle möchte ich Dr.-Ing. Christian Pommer, Julian Steinmetz und Ozan Tamer besonders hervorheben, die während der letzten Jahre auch zu guten Freunden geworden sind. Auch bei meinen Kolleginnen aus dem Geschäftszimmer und unseren beiden akademischen Oberräten Dr.-Ing. Henning Schlums und Dr.-Ing. Naser Al-Natsheh bedanke ich mich, denn sie haben mir vor allem bei organisatorischen Fragen immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden. Während meiner Zeit am Institut hatte ich das Glück, viele motivierte und interessierte Studenten und Studentinnen betreuen zu dürfen. Hervorheben möchte ich Riem Kilian, Julia Feder, Samir Charif und David Lohuis. Diese haben mir – teils in Form studentischer Arbeiten, teils als HiWis – in meiner Forschung sehr weitergeholfen. Mich freut besonders, dass einige von ihnen nach ihrem Studienabschluss am Institut geblieben sind und auf diese Weise zu meinen Kollegen geworden sind.

Weiterhin möchte ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) danken, die mir durch die Finanzierung des Projekts „Eingebettete multifunktionale Sen-

soren zur Steuerung des Aushärteprozesses von Faserverbunden“ (Projektnummer 397053684) die Forschungen ermöglicht hat, die in dieser Arbeit niedergeschrieben sind. Ich danke auch meinem Projektpartner Korbinian Rager vom Institut für Mikrotechnik, der meine anwendungsorientierte Sichtweise auf integrierte Sensoren wertvoll ergänzt hat und viel Mühe in die Entwicklung und Herstellung von Sensoren und Dummysensoren gesteckt hat. Bei der Durchführung der thermoanalytischen Versuche konnte ich sehr viel von Monika von Monkiewitsch vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) lernen und danke ihr an dieser Stelle ganz herzlich dafür. Für die Unterstützung bei der Durchführung der unterschiedlichen mechanischen Tests bedanke ich mich bei Carmen Westphal und Claudia Assing vom DLR sowie bei Benjamin Ellenbeck vom Institut für Füge- und Schweißtechnik.

Der letzte Absatz dieser Danksagung gehört meinen Freunden und meiner Familie. Deren Einfluss macht sich in der dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschung gar nicht direkt bemerkbar. Stattdessen helfen meine Freunde und meine Familie mir durch den Rückhalt, den ich abseits der Arbeit in ihnen finden kann. Die wichtigste Rolle nehmen meine Eltern Beate und Jorgos ein, die mich von Geburt an unterstützt und gefördert haben und die daher in dieser Danksagung als die beiden wichtigsten Personen den Abschluss bilden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Forschungshypothesen und Struktur der Arbeit	5
2.1	Forschungslücke und Hypothesen	5
2.2	Struktur der Arbeit	9
3	Mechanische Auswirkung der Sensorintegration	11
3.1	Geometrischer Störeinfluss integrierter Sensorik	12
3.2	Festigkeitsdegradation durch neu eingebrachte Grenzflächen	13
3.2.1	Zugfestigkeit der Grenzfläche	15
3.2.2	Rissausbreitung an Grenzflächen in Mode I	17
3.2.3	Interlaminare Scherfestigkeit von Grenzflächen	28
3.2.4	Kombiniertes Versagen im Compression After Impact Test	40
3.3	Steifigkeitsfehlanpassungen und plastische Fließvorgänge	46
3.3.1	Mechanische Parallelschaltung von Sensor und Struktur	46
3.3.2	Spannungsüberhöhungen in der Reihen-Parallel-Konfiguration	49
3.3.3	Spannungsumlagerungen und plastisches Fließen	52
3.4	Schlussfolgerungen	57
4	Auflösungseffekte des Sensorsubstrates	59
4.1	Mischbarkeit und Auflösung	59
4.1.1	Modelle der Mischbarkeit	60
4.1.2	Auflösung thermoplastischer Folien	61
4.2	Wirkung der Auflösung auf die Sensorstrukturen	63
4.3	Unabhängigkeit der Adhäsionsfestigkeit von der Auflösung	73
4.4	Schlussfolgerungen	75
5	Aushärteprozess von Epoxidharzen	77
5.1	Eigenschaftsveränderungen während der Aushärtereaktion	78
5.1.1	Gelierung, Viskosität und Mischbarkeit	80

5.1.2	Verfahren der bauteilintegrierten Aushärteüberwachung . . .	81
5.2	Aushärteinduzierte Veränderungen der elektrischen Eigenschaften.	82
5.2.1	Spezifischer Widerstand und Aushärtegrad.	82
5.2.2	Spezifischer Widerstand und Viskosität	85
5.2.3	Epoxidharz als Dielektrikum.	86
5.3	Beziehung zwischen Temperatur und Aushärtegrad	92
5.4	Schlussfolgerungen	94
6	Interpretation dielektrischer Messdaten	97
6.1	Stand der Forschung	98
6.2	Abgrenzung zwischen Interdigitalsensor und Plattenkondensator	99
6.2.1	Zusammenhang zwischen Permittivität und Kapazität	100
6.2.2	Darstellungsvarianten von Impedanzinformationen	106
6.2.3	Einfluss des Elektrodenpolarisationseffektes	107
6.2.4	Räumliche Ausgestaltung der Elektrodenpolarisation	115
6.2.5	Physikalisch motiviertes Ersatzschaltbild eines Interdigitalsensors	117
6.3	Modellbasierte Parameterextraktion aus gemessenen Spektren	121
6.3.1	Fitting-Modell und freie Parameter.	123
6.3.2	Anpassungsalgorithmus und Fehlermaße	124
6.3.3	Zeitlicher Verlauf der gefitteten Parameter und Modellgüte	125
6.4	Störungsbetrachtung	129
6.4.1	Störeinflüsse im Labor- und Autoklavumfeld	129
6.4.2	Impedanzbetrachtung des eingebetteten Sensors	133
6.5	Schlussfolgerungen	137
7	Prozessüberwachung mit minimalinvasiven integrierten Sensoren	139
7.1	Aushärteüberwachung	140
7.2	Detektion von Anmischfehlern	146
7.3	Einfluss des Fasermaterials	151
7.4	Nichtisotherme Aushärteüberwachung im Glasfaserverbund	154
7.5	Schlussfolgerungen	159
8	Zielkonflikte im Sensordesign	161
8.1	Kapselung und elektrische Isolation	161
8.2	Einfluss des Metallisierungsgrades	166
8.3	Weiterentwicklungsprozess integrierter Sensoren	168
9	Zusammenfassung und Ausblick	171
	Anhang A: Bruchoberflächen und Bruchbilder.	175
	Literatur.	181

Abkürzungsverzeichnis

ASTM	American Society for Testing and Materials
CAI	Compression after Impact
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DCB	Double Cantilever Beam
DDS	Diaminodiphenylsulfon
DGEBA	Diglycidylether von Bisphenol A
DGEBF	Diglycidylether von Bisphenol F
DKG	die komplexe Größe
DMS	Dehnungsmessstreifen
DNO	der Nabla-Operator
DSC	Dynamische Differenzkalorimetrie („differential scanning calorimetry“)
DVG	die vektorielle Größe
FE	Finite Elemente
FEA	Finite Elemente Analyse
FEM	Finite Elemente Methode
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
IIMax	Maximum des Imaginärteils der Impedanzkurve
IIMin	Minimum des Imaginärteils der Impedanzkurve
ILS	Interlaminare Scherung
ILSS	Interlaminare Scherfestigkeit („interlaminar shear strength“)
MCDEA	4,4-Methylen-Bis(3-Chlor-2,6-Diethylanilin)
PA6	Polyamid 6
PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyetherimid In einigen Quellen kurz für Polyethylenimin!
PET	Polyethylenterephthalat
PES	Polyethersulfon
PI	Polyimid
PPS	Polyphenylsulfid
PPSU	Polyphenylsulfon

PSf	Polysulfon
PVDF	Polyvenylidendifluorid
PTFE	Polytetrafluorethylen
RMSRE	Wurzel des mittleren quadr. rel. Fehlers („root mean squared relative error“)
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis („signal to noise ratio“)
SRE	Quadratischer relativer Fehler („squared relative error“)
TGMAP	Triglycidyl-m-Aminophenol
UD	Unidirektional

Formelzeichen

Δa	Veränderung der Risslänge
A	Fläche, Querschnittsfläche
A_i	Warburg-Impedanz
b	Probekörperbreite
C	Elektrische Kapazität
C_s	Kapazität eines Interdigitalsensors in Epoxidharz mit Dipolrelaxation
C_∞	Kapazität eines Interdigitalsensors in Epoxidharz ohne Dipolrelaxation
D	Diffusionskonstante Elektrischer Verlustfaktor
e	Elementarladung Auch: Eulersche Zahl
E	Isotroper Elastizitätsmodul Elektrische Feldstärke
E_i	Elastizitätsmodul in Richtung i
E_A	Aktivierungsenergie im Arrhenius-Gesetz
ΔH	Enthalpieänderung aufgrund von Mischung
G_{Ic}	Kritische Energiefreisetzungsrate in Mode I
G_{ij}	Anisotroper Schubmodul
$G_{S/V}$	Speicher- und Verlustanteil des Schubmoduls
ΔG	Veränderung der Gibbs-Energie aufgrund von Mischung
G	Lückenbreite von Interdigitalelektroden
F	Kraft
$f_{\text{Harz/Härter}}$	Funktionalität von Harz und Härter
f	Frequenz
$f_{D/CC/CD/HN}$	Eckfrequenz im Debye-, Cole-Cole-, Cole-Davidson- oder Havriliak-Negami-Modell
h, H	Dicke, Schichtdicke
i	Zeitvariable Stromstärke
j	Imaginäre Einheit
k	Boltzmann-Konstante
K	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante
K_{IDC}, K_R	Sensitivität von Interdigitalsensoren

L	Fingerlänge von Interdigitalelektroden Elektrodenabstand im Elektrodenpolarisationsmodell
m, n	Exponent
N	Fingeranzahl von Interdigitalelektroden
q	Ladung eines Ladungsträgers
Q	Wärme Elektrische Ladung
R	Elektrischer Widerstand Auch: Allgemeine Gaskonstante
ΔS	Entropieänderung aufgrund von Mischung
t	Zeit
T	Temperatur
T_G	Glasübergangstemperatur
u, U	Elektrische Spannung
W	Mechanische Arbeit Fingerbreite von Interdigitalelektroden
x, y, z	Kartesische Koordinaten
Y	Elektrische Admittanz
Z	Elektrische Impedanz
α	Meist: Aushärtegrad Selten: Verteilungsparameter im Cole-Davidson- oder Havriliak-Negami-Modell
β	Verteilungsparameter im Cole-Cole-Modell
δ_{diff}	Differentielle Nachgiebigkeit eines Probekörpers
$\delta_{p/h/d}$	Wechselwirkungsparameter im Hansen-Modell
Δ	Differenz, Laplace-Operator
ϵ_r	Relative Permittivitätszahl
ϵ_0	Permittivitätskonstante
$\epsilon_{r,s}$	Relative Permittivitätszahl unter Dipolrelaxation
$\epsilon_{r,\infty}$	Relative Permittivitätszahl ohne Dipolrelaxation
η	Metallisierungsgrad von Interdigitalelektroden Viskosität von flüssigem Epoxidharz
λ	Skalierungsparameter von Interdigitalelektroden
μ	Ionenbeweglichkeit
ν	Isotrope Querkontraktionszahl
$\nu_{i,j}$	Querkontraktionszahl von Richtung i nach Richtung j
ρ, ρ_0	Spezifischer Widerstand
$\rho_{+/-}$	Ionendichte
σ_i	Mechanische Normalspannung in Richtung i
σ	Elektrische Leitfähigkeit
τ_{ji}	Mechanische Schubspannung in Richtung i in der Ebene, die senkrecht zu j liegt
τ_{ILS}	Interlaminare Scherspannung
ϕ	Elektrisches Potential
φ	Faservolumengehalt
ω	Kreisfrequenz
∂	Partielle Ableitung