



Technische
Universität
Braunschweig



Beobachtung der Aushärtungsreaktion von Epoxidharz durch Anpassung von Modellparametern an gemessene elektrische Impedanzspektren

Masterarbeit

an der Technischen Universität Braunschweig

Verfasser: Samir Charif

im Studiengang: Master Maschinenbau

Matr.-Nr: 4992228

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius (TU Braunschweig- ima)

Betreuer:

M.Sc. Alexander Kyriazis (TU Braunschweig- ima)

Bearbeitungszeitraum: 6 Monate

Abgabedatum: 25.02.2022



Studienarbeit
für
Christoph Lüneburg
Matr. Nr. 4578367

**Thema: Parameterstudie der mechanischen Eigenschaften sensorintegrierter
Strukturen mithilfe von Python und Abaqus**

Für die Konstruktion von Hochleistungsstrukturen vor allem in Luft- und Raumfahrt spielen duroplastische Kunststoffe, insbesondere Epoxidharze eine wichtige Rolle. Sie werden sowohl als Klebstoffe für hochbelastete Verbindungen eingesetzt als auch als Matrixmaterial faserverstärkter Verbunde. Die mechanischen Eigenschaften der Epoxidharze wie zum Beispiel die erreichbare Festigkeit sind stark davon abhängig, dass der Kunststoff vollständig ausgehärtet ist. Andererseits sind Epoxidharze spröde und anfällig für Rissausbreitung. Im Rahmen einer Zustandsüberwachung können mögliche Risse zum Beispiel in Klebeverbindungen detektiert werden. Für diese und weitere Fragestellungen bietet sich die Integration von Foliensensoren in das Epoxidharz an.

Damit die Sensoren mechanische Eigenschaften wie den Rissausbreitungswiderstand oder die Festigkeit nicht negativ beeinflussen, müssen sie an das Epoxidharz angepasst sein. Als Substratmaterial für Foliensensoren bieten sich Thermoplaste besonders an, da sie flexibel sind und nicht zu Rissen neigen. Aufgrund ihrer von den Duroplasten abweichenden Eigenschaften weisen Thermoplaste eine gewisse Fehlanpassung einiger Eigenschaften auf. Im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte wird bewertet, ob diese Fehlanpassungen nicht auch zum Nutzen der mechanischen Eigenschaften verwendet werden können. Ein Ansatz dabei ist, die plastische Verformbarkeit der Thermoplaste auszunutzen um den Rissausbreitungswiderstand des Verbundes zu verbessern.

Die Studienarbeit baut auf diesem Ansatz auf. Die Auswirkungen der Fehlanpassung zwischen Thermoplast und Epoxidharz werden zu diesem Zweck mit parametrischen Simulationsmodellen untersucht. Konkret werden die Einflüsse der plastischen Verformbarkeit und abweichender Elastizitätsmoduln untersucht. Als Zielgrößen können beispielsweise der Widerstand gegen Rissausbreitung oder Spannungsüberhöhungen in repräsentativen Lastzuständen dienen.

1. Erstellung eines Exposés zur Studienarbeit mit einer Zeitplanung des Projekts und einer Beschreibung der Erwartungen an die Simulationsergebnisse.
2. Literaturrecherche über die parametrische Modellerstellung und Simulation mittels Python und Abaqus.

3. Formulieren der Zielgrößen und Erarbeiten geeigneter Belastungszustände und Einbettungssituationen zur Untersuchung der mechanischen Einflüsse von Sensorfolien.
4. Entwickeln parametrischer Simulationsmodelle für die in (3) erarbeiteten Modellbelastungszustände und Einbettungssituationen.
5. Absichern der Modelle durch Netzkonvergenzstudien.
6. Durchführung einer Parameterstudie zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Einflussgrößen und Zielgrößen.
7. [Optional:] Validierung der Methodik anhand von Messdaten an realen Probekörpern.
8. Schritthaltende Dokumentation in Form einer wissenschaftlichen Arbeit und Präsentation der Ergebnisse in einem Vortrag.

Die Studienarbeit wird im Institut für Adaptronik und Funktionsintegration (iAF) der TU Braunschweig durchgeführt. Für die Arbeit können die Einrichtungen und die Software-Lizenzen des iAF genutzt werden. Die Betreuung übernehmen Alexander Kyriazis und Julian Steinmetz.

Änderungen der Aufgabenstellung sind nur mit Zustimmung des iAF möglich. Die Studienarbeit ist fristgemäß elektronisch im WISA-Portal und gebunden in doppelter Ausfertigung im Institut für Adaptronik und Funktionsintegration der TU Braunschweig einzureichen.

Hiermit bestätige ich den Empfang der Aufgabenstellung:

Prof. Dr.-Ing Michael Sinapius

Bearbeitungszeit: 4 Monate

Ausgegeben am:

Abgegeben am:

Christoph Lüneburg

Danksagung

...Danksagung einfügen...

Erklärung

Die vorliegende Arbeit habe ich selbstständig ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen angefertigt. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise im Rahmen einer oder anderer Prüfungen noch nicht vorgelegt worden.

Braunschweig, den

Samir Charif

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung	i
Nomenclature	vi
Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	viii
1 Formatierung	1
1.1 Kurzer Title	1
1.2 Nomenklatur	1
1.2.1 Akronyme	1
1.2.2 SIUINtX	2
1.3 Bilder	4
1.4 Tabellen	4
1.5 Quellen	4
A Anhang: Expose	II
A.1 Problemstellung	II
A.2 Fragestellung	II
A.3 Ziel der Arbeit	II
A.4 Vorgehensweise	II
B Anhang: Aufgabenliste	III
B.1 Aufgabenlise	III
C Anhang: GanttChart	IV
Literatur	V

Nomenclature

Latin symbols

D	m^2/s	molecular diffusion coefficient
d	m	diameter
k		discrete time
m	kg	mass
T	K	temperature
z	m	height

Greek symbols

ρ	kg/m^3	density
--------	------------------------	---------

Vectors and matrices

\mathbf{A}	matrix
\mathbf{b}	vector

Subscripts

a	air
v	vessel
w	water
i	Laufindex

Operators

$\dot{\bullet}$	flow rate of \bullet
$\bar{\bullet}$	average of \bullet
\bullet, \circ	in subscript : from \bullet to \circ

Abbreviations

kS	kleine schreibweise
ODE	ordinary differential equation
TL	Laplace transform

Abbildungsverzeichnis

1.1	Ü-kurz	4
-----	------------------	---

Tabellenverzeichnis

1.1	Kurz SIUNITX	3
1.2	Kurz für Verzeichnis	4

1 Formatierung

1.1 Sehr sehr sehr sehr sehr sehr sehr sehr langer Title

1.2 Nomenklatur

Die Verwendung der einzelnen Befehle der Nomenklatur wird im Folgenden erklärt. Indices werden nicht kursiv geschrieben, außer es sind Laufindices. Das nicht kursiv schreiben in der Indices wird erreicht, indem bei der Erstellung eines neuen Glossary-eintrags der Befehl `\mathrm{}` verwendet wird (siehe Beispieldatei).

Variable aufrufen: `\glsc{rho}` -> ρ
`\glsc{mat.A}` -> \mathbf{A}

Index `\glsub{mat.A}D_i`

Tiefgestellt aufrecht: `\glsub{d}{v}` -> d_v .

2xTiefgestellt: $D_{w,a}$, beide Indices auf gleicher Höhe.

Index anhängen T_k

Index 2x anhängen T_{z_v} , Index tiefer angehängt.

Aktzente: \dot{m} und \bar{T}

Mein Formelzeichen: k , \mathbf{A} and \mathbf{b} d_v k \bar{T} ρ

1.2.1 Akronyme

Befehle des Glossarie Paketes:

Akronym: Akronyme werden beim ersten Mal ausgeschrieben `\gls{ODE}` ordinary differential equation (ODE)

Akronym ausgeschrieben in gewählter Sprache: `\gls{ODE}` ODE

Akronym kurz&klein: `\acrshort{kS}` kS

Akronym erster Buchstabe&kurz: `\Acrshort{kS}` KS

Akronym groß&klein: `\ACRshort{kS}` KS

Akronym klein&ausgeschrieben: `\acrlong{kS}` kleine schreibweise

Akronym erster Buchstabe groß&ausgeschrieben: `\Acrlong{kS}`
Kleine schreibweise

Akronym ausgeschrieben&groß: `\ACRlong{kS}` KLEINE SCHREIBWEISE

Akronym ausgeschrieben+Abkürzung: `\acrfull{TL}` -> Laplace transform (TL)

Akronym erster Buchstabe&ausgeschrieben+Abkürzung: `\Acrfull{TL}` ->
Laplace transform (TL)

Akronym groß&ausgeschrieben+Abkürzung: `\ACRfull{TL}` ->
LAPLACE TRANSFORM (TL)

Akronym hover erter Aufruf: `\acfirst{TL}` -> Laplace transform (TL)

Akronym benutzt hover: TL

1.2.2 SIUNITx

In diesem Abschnitt wird erklärt, wie das Package SIUNITX verwendet wird. Die Verwendung dieses Packages ermöglicht die Aufwandsarme und richtige Formatierung von Formeln und Einheiten. Zwischen Zahlen und Einheiten gehört ein halbes geschütztes Leerzeichen, welches mit `\,` erzeugt werden kann.

Einheit: `\si{\watt} = \si{\square\metre\kilo\gram\per\cubic\second\}` ->
 $W = \text{m}^2 \text{ kg/s}^3$

Zahl+Einheit: `\SI{1}{\mHz}` -> `\SI{1}{\mHz}`
`\SI{1}{\mu\N}` -> $1 \mu\text{N}$

Exponent: `\SI{1e-4}{\meter}` -> $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}$

Range: `\SIrange{1}{7}{\newton}` -> 1 bis 7 N

Liste: `\SIlist{1;3;5;7}{\kN}` -> 1, 3, 5 und 7 kN

Winkel: `\ang{47;59;43}` -> 47°59'43"

Fehler: `\num{9.99 +- 0.09}` -> 9,99 ± 0,09

Eigene Einheiten: Es können eigene Einheiten deklariert werden.

`\DeclareSIUnit\lightyear{ly}` ermöglicht `\SI{1}{\lightyear}` -> 1 ly

Das Paket stellt zwei zusätzliche Spaltentypen S und c zur Verfügung. Wobei S für die Zahlen und s für die Einheit verwendet werden. Die Zahlen werden zentriert am Dezimalkomma beziehungsweise Punkt ausgerichtet. Die Spalte für die Einheiten (c) wird per default zentriert ausgerichtet. Sollen die Spalten für Zahlen (S) beschriftet werden, muss der Text geklammert {Text} werden.

Tabelle 1.1: Lange Überschrift für SIUNITX

SI Prefixes			
Prefix	Symbol	Multiplication Factor	... in Scientific Notation
giga	G	1 000 000 000	10 ⁹
mega	M	1 000 000	10 ⁶
kilo	k	1000	10 ³
deca	da	10	10 ¹
–	–	1	10 ⁰
deci	d	0,1	10 ⁻¹
centi	c	0,01	10 ⁻²
milli	m	0,001	10 ⁻³
micro		0,000 001	10 ⁻⁶
nano	n	0,000 000 001	10 ⁻⁹

Eine deutsche Dokumentation ist unter <https://www.namsu.de/Extra/pakete/Si-unitx.html> zu finden. Die vollständige Dokumentation ist unter [cta.org](https://www.ctan.org) zu finden. In der Originaldokumentation befindet sich eine Tabelle mit weiteren kurzen Einheiten wie `\kN`.

1.3 Bilder



Abbildung 1.1: Test lange Überschrift

1.4 Tabellen

Tabelle 1.2: Randbedingungen der Längsplanung einschließlich Abtastung

Parameter	Minimum	Maximum	Abtastung	Komplexität
Geschwindigkeitsdifferenz	-12	12	3	9
Beschleunigung (Anfang)	-2	2	1	5
Ruck(Anfang)	-2	2	1	5
			Gesamt	225

1.5 Quellen

Meine Quelle:

Quelle: \cite{Dembowski.2011} -> [1]

Anhang

A Anhang: Expose

A.1 Problemstellung

A.2 Fragestellung

A.3 Ziel der Arbeit

A.4 Vorgehensweise

B Anhang: Aufgabenliste

B.1 Aufgabenlise

C Anhang: GanttChart

GanttChart Quer

Literatur

- [1] K. Dembowski, *Energy Harvesting für die Mikroelektronik, Energieeffiziente und -autarke Lösungen für drahtlose Sensorsysteme*, ger. Berlin und Offenbach: VDE-Verl., 2011.