

# **DLR-IB-SY-BS-2023-52**

**Einbettung von  
Formgedächtnisaktuatoren in  
Faserverbundlamine**

**Masterarbeit**

Dominic Sahyoun



**DLR**

**Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt**

Institut für Systemleichtbau

**DLR-IB-SY-BS-2023-52**

## **Einbettung von Formgedächtnisaktuatoren in Faserverbundlamine**

### **Zugänglichkeit:**

**Stufe 1 - Allgemein zugänglich:** Der Interne Bericht wird elektronisch ohne Einschränkungen in ELIB abgelegt. Falls vorhanden, ist je ein gedrucktes Exemplar an die zuständige Standortbibliothek und an das zentrale Archiv abzugeben.

Braunschweig, *Mai*, 2023

Der Bericht umfasst: 118 Seiten

Abteilungsleiter:

*Prof. Dr.-Ing Hans Peter Monner*

Autor:

*Dominic Sahyoun*

Autor 2 / Betreuer:

*Sven Künnecke*

*Giada Abate*



DLR

Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt



Technische  
Universität  
Braunschweig



Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt  
German Aerospace Center

Masterarbeit

# Einbettung von Formgedächtnisaktuatoren in Faserverbundlamine

Embedding of Shape Memory Actuators into Fibre  
Composite Laminates

von

B.Sc. Dominic Sahyoun

Matrikelnummer: 4792062

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann  
DLR e.V. Institut für Systemleichtbau

Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Peter Wierach  
TU Clausthal, Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik

Betreuer: M.Sc. Sven Christian Künnecke  
DLR e.V. Institut für Systemleichtbau

Institut für Systemleichtbau

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Mai 2023



## **Aufgabenstellung für Masterarbeit**

in der Fachrichtung Luft- und Raumfahrttechnik

für Dominic Sahyoun, Matrikel-Nr.: 4792062

Thema:

### **Einbettung von Formgedächtnisaktuatoren in Faserverbundlaminat**

#### **Übersicht/Beschreibung**

Im adaptiven Systemleichtbau besteht oftmals die Herausforderung, sowohl platzsparend als auch mit möglichst geringem zusätzlichem Gewichtseintrag morphende Strukturen zu realisieren und diese zu aktuierten. Vor diesem Hintergrund gelten Formgedächtnislegierungen (FGL) bereits seit längerem als vielversprechende Alternative zu konventionellen – vergleichsweise großen und schweren – Aktuatoren. Allerdings spielen FGL in der kommerziellen Luftfahrt bislang noch eine eher untergeordnete Rolle.

Die Integration von FGL in formvariable Strukturen stellt dabei einen sehr interessanten Einsatzbereich dar, da diese Ausführungsform sehr platzsparend ist. Allerdings liegt eine besondere Herausforderung in der Einbettung von FGL in Laminat, da sich oftmals die notwendigen Temperaturen zur Aushärtung des Laminates bzw. des Matrixmaterials mit den Aktivierungstemperaturen der FGL überschneiden. Folglich besteht die Herausforderung, einen sich während des Prozesses verformenden FGL-Aktuator in eine Laminatstruktur einzubinden.

#### **Aufgabenstellung**

Im Rahmen dieser Masterarbeit soll im oben genannten Gebiet Know-how aufgebaut werden. Dies umfasst die Herstellung von im Systemleichtbau verwendeten Laminaten sowie die Funktionsweisen von FGL-Aktuatoren. Für die Einbettung der FGL in Laminat werden Aktuatoren der Firma CompActive zur Verfügung gestellt. Zudem sollen die vom Studenten hergestellten FGL-Laminat-Proben vermessen sowie ein entsprechendes Finite-Elemente-Modell erstellt werden. Anschließend sollen diese numerischen Ergebnisse mit denen der Probenvermessung gegenübergestellt und bewertet werden.



## Arbeitsschritte

Im Einzelnen sind folgende Arbeitsschritte zu leisten:

- Literaturrecherche und Einarbeitung in die Aufgabenstellung
- Auswahl oder Entwicklung mindestens eines Verfahrens zur Einbettung und/oder Befestigung von kommerziellen Formgedächtnisaktuatoren (FGL-Aktuatoren) in bzw. auf Faserverbundstrukturen
- Herstellung von Laminatstrukturen mit eingebetteten oder darauf applizierten FGL-Aktuatoren
- Durchführung von Versuchen und Vermessungen der hergestellten Laminat-FGL-Proben
- Erstellung eines FE-Modells mindestens einer untersuchten Laminat-Aktuator-Konfiguration
- Auswertung und Diskussion der Ergebnisse und Erklärung möglicher Probleme
- Zusammenfassung und Dokumentation aller Ergebnisse in Form einer schriftlichen Arbeit und Präsentation im Rahmen eines Vortrags

Die Arbeit wird am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Faserverbundeleichtbau und Adaptronik, Braunschweig, durchgeführt und betreut. Für Planung, Berechnung, Fertigung, Untersuchungen und Dokumentation können Labore, Werkzeuge, Einrichtungen, Programme und Rechenanlagen des DLR benutzt werden.

Die Unterstützung durch das Institut für Faserverbundeleichtbau und Adaptronik umfasst die Beratung sowie Hilfe bei der Einarbeitung in die Theorie und Praxis.

Die Ergebnisse sind entsprechend dem Fortschritt der Arbeit und im Bearbeitungszeitraum mehrfach vorzulegen.

Änderungen der Aufgabenstellung sind nur mit Zustimmung des Instituts möglich. Die Arbeit ist elektronisch im WISA-Portal hochzuladen.

Ein gebundenes Exemplar ist im Institut für Faserverbundeleichtbau und Adaptronik des DLR und im Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik an der TU Clausthal einzureichen.



Beginn: 07.11.2022  
Ende: 07.05.2023

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann  
DLR e.V., Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Peter Wierach  
TU Clausthal, Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik

Betreuer: M.Sc. Sven Christian Künnecke  
DLR e.V., Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

Braunschweig, 07.11.2022

Digital signiert von Martin  
Wiedemann  
DN: C=DE, O=Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR),  
CN=Martin Wiedemann  
Grund: Genehmigt  
Ort: Braunschweig  
Datum: 2022.11.04 07:52:33+01'00'  
Foxit PDF Editor Version: 12.0.1

Unterschrift Erstprüfer

### Selbstständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig, ohne unerlaubte fremde Hilfe oder Beratung und nur unter Verwendung der angegebenen wissenschaftlichen Hilfsmittel und Literatur angefertigt habe.

Braunschweig, den 02.05.2023

# Kurzfassung

In dieser Arbeit wird ein Konzept entwickelt, simuliert und experimentell untersucht, kommerziell verfügbare Formgedächtnisaktuatoren in ein Faserverbundlaminat einzubetten. Es werden drei verschiedene Verfahren entwickelt, die Aktuatoren ohne zusätzlich benötigte Formen in ein Prepreg-Laminat einzubetten und gemeinsam auszuhärten. Eines davon wird ausgewählt und simulativ und experimentell umgesetzt. Eine Simulation des Aushärtevorgangs und der späteren Aktivierung der Aktuatoren im Finite-Elemente-Programm ANSYS zeigt eine grundsätzliche Umsetzbarkeit dieser Methode. Für den Formgedächtniseffekt wird dabei ein Modell implementiert, welches auf einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten beruht. Nach Herstellung der Proben fällt auf, dass der Formgedächtniseffekt nicht mehr nutzbar ist, da das Laminat ausgehärtet ist während die Aktuatoren im kontrahierten Zustand sind. Weitere Proben, welche nach der selben Methodik aber unter Verwendung einer kaltaushärtenden Matrix hergestellt sind, zeigen eine grundsätzliche Eignung des verwendeten Finite-Elemente-Modells. Dieses muss jedoch unter Verwendung zusätzlicher Parameter noch verfeinert werden um eine Vorhersage des Verhalten der Aktuatoren zu ermöglichen, da sich Simulation und experimentelle Ergebnisse stark unterscheiden.

In this work, a concept to embed commercially available shape memory actuators into a fiber composite laminate is developed, simulated and experimentally investigated. Three methods are developed to embed the actuators into a prepreg laminate without additional required molds and to cure them together. One of them is selected and implemented simulatively and experimentally. A simulation of the curing process and the subsequent activation of the actuators in the finite element program ANSYS shows a basic feasibility of this method. A model based on a thermal expansion coefficient is implemented for the shape memory effect. A first attempt in the specimen manufacturing shows that the shape memory effect disappears since the laminate cures while the actuators are in the contracted state. Further samples using a cold-curing matrix show a basic suitability of the finite element model. However, this model needs to be refined using additional parameters to allow prediction of the behavior of the actuators as experimental and simulated results differ greatly.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1	Formgedächtnislegierungen . . . . .	4
2.1.1	Aktorisch nutzbare Effekte von Formgedächtnislegierungen . . . . .	4
2.1.2	Zyklische Aktivierung von Formgedächtnislegierungen . . . . .	8
2.1.3	Anwendungen von Formgedächtnislegierungen . . . . .	9
2.1.4	Einbettung von Formgedächtnislegierungen in Faserverbundlaminat	11
2.2	Faserverbundwerkstoffe . . . . .	12
2.2.1	Grundlagen . . . . .	12
2.2.2	Festigkeitsanalyse . . . . .	13
2.2.3	Prepreg-Herstellungsmethode . . . . .	15
2.3	Grundlagen von Finite-Elemente-Methoden . . . . .	17
2.4	Formgedächtnisaktuatoren von CompActive . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Methoden der Einbettung von Formgedächtnisaktuatoren</b>	<b>21</b>
3.1	Herausforderungen und Lösungsmöglichkeiten . . . . .	21
3.2	Auswahl eines Herstellungsverfahrens . . . . .	24
3.3	Detailkonstruktion . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Simulation in ANSYS und Entwicklung eines Lagenaufbaus</b>	<b>28</b>
4.1	Aufbau eines Ersatzmodells für den Aktuator . . . . .	28
4.1.1	Ersatzmodell für den Formgedächtniseffekt . . . . .	28
4.1.2	Geometrisches Ersatzmodell für den Aktuator . . . . .	29
4.2	Aufbau eines Modells für den Autoklavprozess und Aktivierung des Aktuators	31
4.2.1	Workbench-Modell . . . . .	31
4.2.2	Modell des Autoklavprozesses . . . . .	32
4.2.3	Modell der Biegung der Proben . . . . .	33
4.3	Entwicklung eines Lagenaufbaus . . . . .	34
4.4	Ergebnisse der ANSYS-Simulation . . . . .	36
4.4.1	Ergebnisse des Autoklavprozesses . . . . .	37
4.4.2	Ergebnisse der Biegung . . . . .	40
4.4.3	Analyse des Laminatversagens . . . . .	41
4.5	Netzkonvergenzanalyse . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen</b>	<b>48</b>
5.1	Experimentelle Bestimmung von Materialkennwerten für die Formgedächtnislegierung . . . . .	48
5.1.1	Durchführung und Ergebnisse der Experimente . . . . .	48
5.1.2	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	52
5.2	Herstellung von Proben mit eingebetteten Aktuatoren . . . . .	53

---

5.2.1	Verwendung von Prepreg-Material . . . . .	53
5.2.2	Verwendung einer kaltaushärtenden Matrix . . . . .	54
5.2.3	Untersuchung herstellungsbedingter Effekte . . . . .	56
5.3	Experimente an Proben mit eingebetteten Formgedächtnisaktuatoren . . .	59
5.3.1	Beschreibung des Verlustes des Aktuationsvermögens und Erklärungsansätze . . . . .	59
5.3.2	Temperaturverlauf innerhalb der Proben . . . . .	61
5.3.3	Aktuierung von Proben unter Verwendung einer kaltaushärtenden Matrix . . . . .	62
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>67</b>
6.1	Zusammenfassung . . . . .	67
6.2	Ausblick . . . . .	69
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>XI</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XVII</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XIX</b>
<b>A</b>	<b>Ergebnisse der ANSYS-Simulation</b>	<b>XX</b>
<b>B</b>	<b>Materialkennwerte</b>	<b>XXV</b>
<b>C</b>	<b>Life-Data-Sheets Probenherstellung</b>	<b>XXVIII</b>

# Nomenklatur

## Lateinische Bezeichnungen

$A$	Fläche
$A_f$	Austenit-Finishtemperatur
$A_s$	Austenit-Starttemperatur
$E$	E-Modul
$\mathbf{F}$	Kraftvektor
$G$	Schubmodul
$j$	Sicherheitsfaktor
$\mathbf{K}$	Steifigkeitsmatrix
$M_f$	Martensit-Finishtemperatur
$M_s$	Martensit-Starttemperatur
$T_g$	Glasübergangstemperatur
$R$	Festigkeit
$\mathbf{u}$	Verschiebungsvektor

## Griechische Bezeichnungen

$\alpha$	Temperaturausdehnungskoeffizient
$\Delta$	Differenz
$\varepsilon$	Dehnung
$\varepsilon$	Emissionsgrad
$\sigma$	Spannung
$\tau$	Schubspannung

## Abkürzungen

ACCS	ANSYS Composite Cure Simulation
ACP	ANSYS Composite PrepPost
AFP	Automated-Fibre-Placement
ATL	Automated-Tape-Laying
Au	Gold

---

Cd	Cadmium
CFK	Karbonfaserverstärkter Kunststoff
CLT	Klassische Laminattheorie
Cu	Kupfer
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
FE	Finite-Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
FGE	Formgedächtniseffekt
FGL	Formgedächtnislegierung
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
FVW	Faserverbundwerkstoff
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
LCF	low-cycle fatigue
LGS	lineares Gleichungssystem
Nb	Niob
Ni	Nickel
PCG	Verfahren der konjugierten Gradienten mit Vorkonditionierung
pd	Versagen durch Delamination
PEEK	Polyetheretherketon
PLA	Poly lactide
pmA	Versagen durch Zwischenfaserbruch Modus A
pmB	Versagen durch Zwischenfaserbruch Modus B
pmC	Versagen durch Zwischenfaserbruch Modus C
RTM	Resin-Transfer-Moulding
S/N	Seriennummer
Ti	Titan
UD	unidirektional
ZFB	Zwischenfaserbruch

## Indizes

	faserparallel
⊥	orthogonal
<i>c</i>	Druckbelastung
<i>f</i>	Faser-
<i>m</i>	Matrix-
<i>max</i>	maximal
<i>t</i>	Zugbelastung

# Kapitel 1

## Einleitung

Eine Verminderung der Treibhausgasemissionen ist eine zentrale Forschungsaufgabe in der Luftfahrt. Unter anderem durch den *Flightpath 2050* [15] und den *European Green Deal* [26] werden damit auch politische Ziele verknüpft. Aus diesen Anforderungen leiten sich für verschiedene Forschungsfelder der Luftfahrt unterschiedliche Anforderungen ab. So darf die Energie für den Antrieb nicht mehr durch die Verbrennung fossiler Energieträger bereitgestellt werden, sondern durch elektrische Energie oder durch die Verbrennung von flüssigem Wasserstoff oder synthetischen Kraftstoffen. Diese Energiequellen erreichen jedoch weder die gravimetrische noch, im Falle von flüssigem Wasserstoff, die volumetrische Energiedichte von Kerosin [18]. Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass Flugzeuge noch effizienter werden müssen, um diesen Nachteil ausgleichen zu können. Im Bezug auf die Struktur und die Aerodynamik bedeutet dies, dass eine weitere Gewichtsreduktion beziehungsweise eine Widerstandsreduktion notwendig ist. Problematisch dabei ist, dass im Verlauf eines Fluges verschiedene Randbedingungen herrschen und damit auch konkurrierende Anforderungen an die Form der Struktur gestellt werden. Hier können adaptive, funktionsintegrierte Strukturen helfen, indem sich die aerodynamische Form aktiv an die jeweils vorliegenden Randbedingungen anpassen und damit immer nahe des optimalen Betriebspunkt liegen.

Eine Möglichkeit, adaptive Strukturen herzustellen, ist die Verwendung von Funktionswerkstoffen. Diese Materialien kombinieren die Aufgabe einer Lastaufnahme und -übertragung mit einer Änderung ihrer Werkstoffeigenschaften durch eine Aktivierung des Werkstoffes. Diese Änderung kann unter anderem aktorisch genutzt werden. Eine Gruppe dieser Materialien bilden die Formgedächtnislegierungen (FGL), welche eine Temperatur- oder Spannungsänderung in eine makroskopische Verformung umwandeln. FGL werden bereits seit Jahrzehnten erforscht und werden in unterschiedlichsten Anwendungen eingesetzt [45].

Im Bereich von Kleinflugzeugen werden in [38] Drähte einer FGL verwendet um eine adaptive Flügelhinterkante zu realisieren. Die Drähte verlaufen dabei von einem Holm hin zur Hinterkante und verformen diese, wenn die Drähte aktiviert werden. Dies stellt eine Methode dar, die geringes Gewicht und gute aerodynamische Eigenschaften kombiniert. In [32] werden aktive Wirbelgeneratoren auf ein Laminaiprofil eines Segelflugzeuges

aufgebracht. Durch eine Aktivierung der darin verlaufenden FGL-Drähte klappen die Generatoren hoch und verzögern eine Strömungsablösung auf dem Profil. Werden die Generatoren nicht benötigt, liegen sie flach auf der Flügeloberfläche und erzeugen nur geringen Zusatzwiderstand.

Eine Beeinflussung der Strömung durch FGL-aktivierte Strukturen ist auch bei Transportflugzeugen möglich. So wird in [28] eine FGL-Struktur entworfen, welche durch eine Formänderung des Flügelprofils Stößeffekte in der transsonischen Strömung minimiert und damit eine Widerstandsreduktion erzielt. Auch im Verdichter eines Triebwerks können adaptive Strukturen helfen, eine optimale Auslegung für verschiedene Randbedingungen zu erzielen. In [52] wird das Potential und die Machbarkeit einer formvariablen Verdichterschaufel numerisch mittels FEM- und 3D-CFD-Methoden untersucht. In [1] wird ein Werkzeug für FE- und 2D-CFD-Codes entwickelt, mit welchem diese Fluid-Struktur-Kopplung umgesetzt werden kann. Die Verformung der verwendeten Verdichterschaufel wird in [1] durch eine FGL-Schicht auf der Außenhaut ermöglicht.

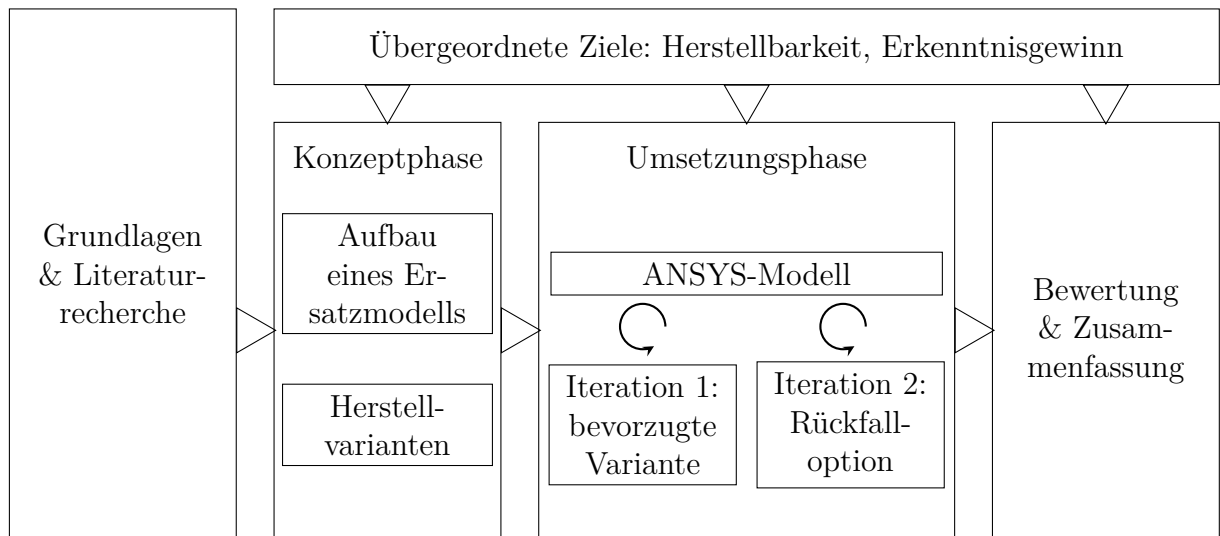
Der Vorteil der FGL gegenüber anderen multifunktionalen Werkstoffen liegt in ihrer hohen spezifischen Energiedichte [46]. Insbesondere beim begrenzten Bauraum einer Verdichterschaufel ist dies wichtig. Zusätzlich wird für die Oberfläche eine hohe aerodynamische Güte gefordert. Eine FGL kann dünn auf die Außenhaut einer Verdichterschaufel appliziert werden und genügt damit beiden genannten Anforderungen.

In dieser Arbeit wird ein Aktuator der CompActive GmbH verwendet, bei welchem zwischen festen Ankern Drähte aus einer Nickel-Titan-FGL (Ni-Ti) gespannt sind. Durch die einfache Handhabbarkeit des Aktuators ist es mit geringem konstruktiven Aufwand verbunden, diesen auf eine vorhandene Struktur zu applizieren. Durch die Verwendung solcher FGL-Drähte ist eine einfache Berechnung des Verhaltens der FGL möglich und diese im Gegensatz zur Verwendung von flächigen FGL-Schichten hinreichend erforscht [17]. Vor dem Hintergrund einer aerodynamischen Oberfläche und geringen Bauräumen kann ein einfaches Aufkleben des Aktuators auf eine vorhandene Struktur jedoch oftmals nicht ausreichen. So kann in diesen Fällen ein Einbetten des Aktuators in den vorhandenen Werkstoff notwendig sein. Zusätzlich ist durch das gleichzeitige Herstellen der Struktur und das Applizieren des Aktuators eine Verringerung des Herstellungsaufwandes möglich. Nicht zu Letzt kann der Aktuator in Bauräumen platziert werden, die nach Herstellung der Struktur nicht mehr zugänglich sind. Viele der beschriebenen Anwendungen verwenden eine Struktur aus einem Faserverbund [1, 28, 32], weswegen Faserverbundwerkstoffe auch in dieser Arbeit verwendet werden sollen.

In dieser Arbeit soll ein Konzept entwickelt, simuliert und umgesetzt werden, kommerziell verfügbare FGL-Aktuatoren in ein Faserverbundlaminat einzubetten. Dies geschieht unter dem besonderen Augenmerk eines einfach umzusetzenden Verfahrens für die Herstellung des Laminates. In Abb. 1.1 ist der Aufbau der Arbeit dargestellt. In einem ersten Schritt werden Grundlagen erarbeitet. Daraus entstehen Ziele für die Arbeit und in einer ersten Konzeptphase fließen diese Ziele in eine Auswahl von Herstellmöglichkeiten sowie in den Aufbau eines Ersatzmodells für die spätere Simulation. Daran anschließend wird in der Umsetzungsphase eine Prozesskette mehrmals durchlaufen. Zuerst wird eine Simulation durchgeführt, die den Lastfall der Aktivierung des Aktuators sowie den Lastfall der Aushärtung des Laminates unter erhöhten Temperaturen berechnet. Zusätzlich wird hier ein

Lagenaufbau berechnet, welcher den auftretenden Belastungen standhält. Nach Abschluss der Simulation werden die Proben hergestellt und im Anschluss daran die eingebetteten Aktuatoren aktiviert. Diese Prozesskette wird sowohl für eine bevorzugte Herstellvariante als auch für die Rückfalloption durchlaufen. Im Anschluss daran wird eine Charakterisierung der Proben sowie eine Untersuchung der festgestellten Effekte durchgeführt.

Die schriftliche Ausarbeitung folgt diesem Prozess nicht in allen Schritten chronologisch. Vielmehr wird nach der Findung von Einbettungsmethoden eine Unterteilung in simulative und experimentelle Prozessschritte gemacht und die Ergebnisse beider Verfahren miteinander verglichen.



**Abb. 1.1:** Aufbau und Konzept der vorliegenden Arbeit

# Kapitel 2

## Grundlagen

### 2.1 Formgedächtnislegierungen

Formgedächtnislegierungen (FGL, engl. *Shape Memory Alloy (SMA)*) bilden eine Gruppe von aktiven Funktionswerkstoffen (engl. *smart materials*), welche Temperaturänderungen in eine reversible, mechanische Verformung umwandeln. Funktionswerkstoffe sind dabei multifunktionale Materialien, welche mehrere Aufgaben innerhalb einer Konstruktion übernehmen können. So dienen diese als Konstruktionswerkstoff, der Lasten in einem Bauteil aufnimmt und überträgt, und zusätzlich als Werkstoff, welcher seine Eigenschaften durch Aktivierung ändert (aktorisch) oder Änderungen in eine Ausgabe der Messgröße umwandelt (sensorisch) [63]. Diese Funktionen sind dabei inhärenter Bestandteil des Werkstoffes selbst und nicht der Konstruktion, in welche dieser eingebracht ist. Weitere bekannte Vertreter aktiver Funktionswerkstoffe sind beispielsweise piezoelektrische Keramiken, welche eine äußere Verformung in eine Ladungstrennung umsetzen bzw. sich durch Anlegen einer elektrischen Spannung verformen. Deren Arbeitsvermögen liegt bei 0,005 bis 0,01 J/cm<sup>3</sup> [63], während Formgedächtnislegierungen ein hohes Arbeitsvermögen im Bereich von 10 J/cm<sup>3</sup> [46] aufweisen. Dies ist ein wesentlicher Vorteil von FGL gegenüber anderen Funktionswerkstoffen. Ein Nachteil ist die große Trägheit des sog. Formgedächtniseffektes, welcher durch die langsamen Temperaturänderungen bedingt ist. Für eine umfassendere Beschreibung von Funktionswerkstoffen sei auf [36], [62] und [63] verwiesen.

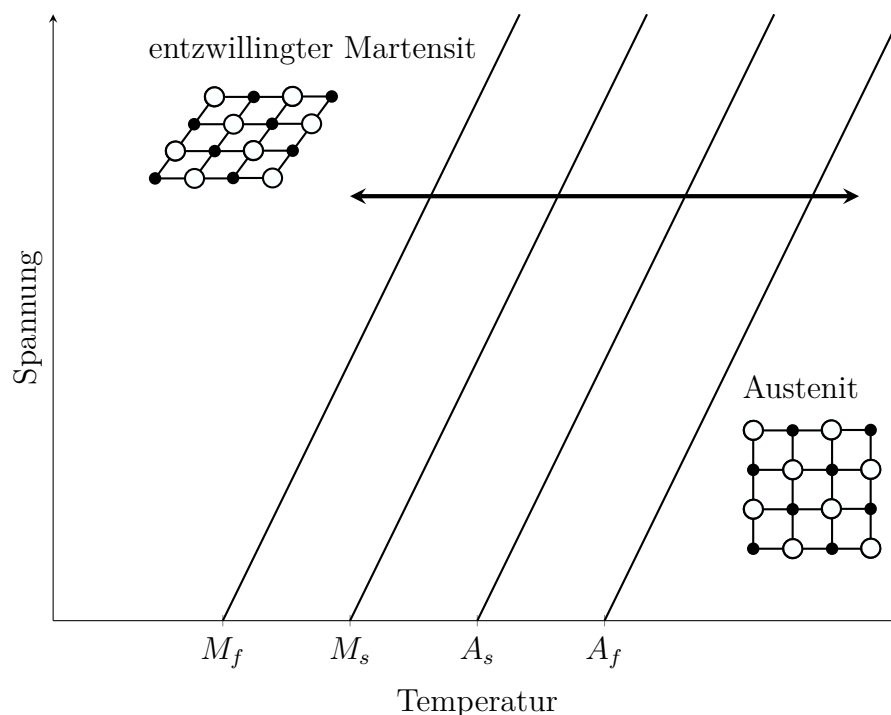
#### 2.1.1 Aktorisch nutzbare Effekte von Formgedächtnislegierungen

Grundlage für den sog. Formgedächtniseffekt (FGE) bei FGL ist eine diffusionslose Umwandlung zwischen zwei Kristallzuständen, welche beim FGE temperaturabhängig aber zeitunabhängig ist [46]. Die Hochtemperaturphase Austenit ( $\beta$ -Phase) wandelt sich dabei bei Unterschreiten einer Umwandlungstemperatur in die Niedrigtemperaturphase Martensit ( $\alpha$ -Phase) um. Entscheidend hierfür ist, dass bei der martensitischen Umwandlung Nachbarschaftsverhältnisse im Atomgitter unberührt bleiben. Die kristalline Ordnung des



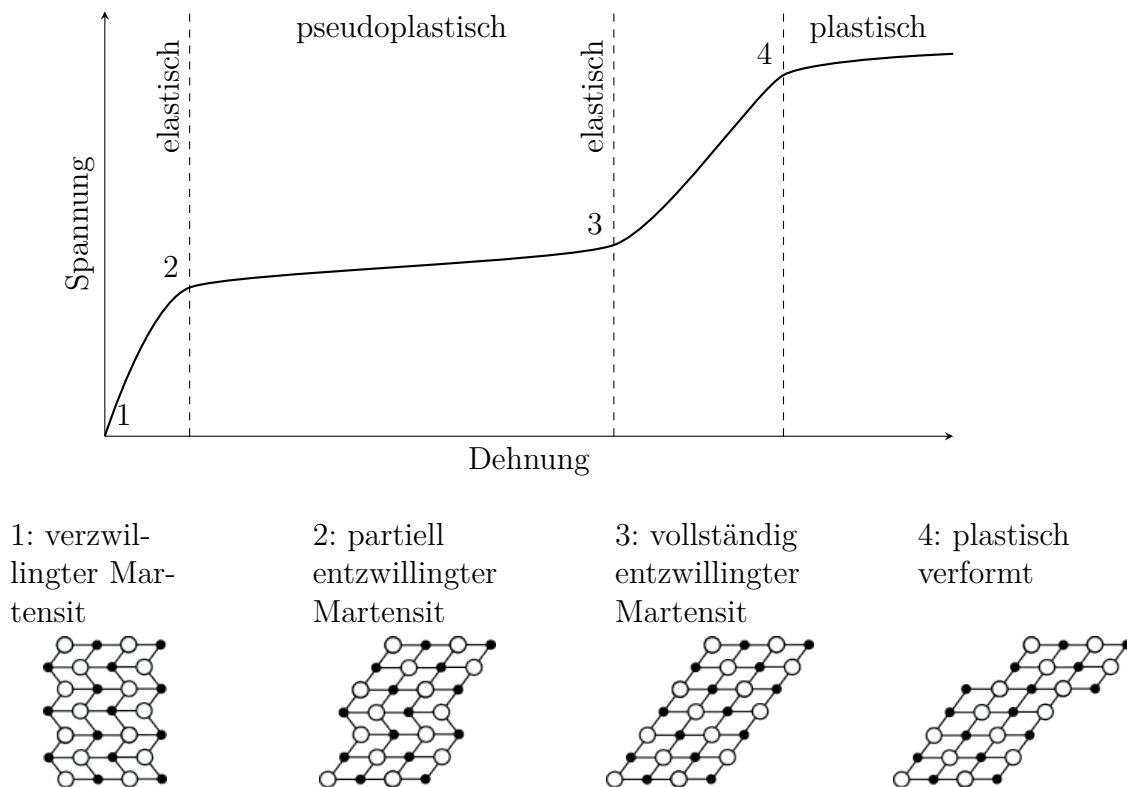
Austenits bleibt auch bei der Zustandsänderung vorhanden und wird lediglich geschert [19, 46]. Damit ist die Umwandlung vollständig reversibel.

Für eine aktorische Nutzung dieses Effektes ist die unterschiedliche Raumerfüllung bei den Kristallzuständen entscheidend. Während Martensit ein kubisch-raumzentriertes Gitter mit, im Fall einer Nickel-Titan-FGL (Ni-Ti), einer Raumerfüllung von 68 % aufweist, besitzt Austenit in diesem Fall ein kubisch-flächenzentriertes Gitter mit einer Raumerfüllung von 74 % [63]. Die Umwandlung zwischen den Kristallzuständen hat damit eine Volumenänderung zur Folge [63]. Die Umwandlung besitzt eine Hysterese, die für den speziellen Fall der NiTi-FGL eine Breite von typischerweise 20 bis 30 K aufweist [63]. In der austenitischen Phase beginnend, startet bei Unterschreiten der Temperatur  $M_s$  die Umwandlung in den Martensit, welche bei  $M_f$  vollständig abgeschlossen ist. Umgekehrt beginnt die Umwandlung in den Austenit bei  $A_s$  und endet bei  $A_f$ . Die Temperaturen sind dabei abhängig von der äußeren anliegenden Spannung auf das Material. Mit steigender Spannung im Material nehmen die Umwandlungstemperaturen zu [44]. Dieser Effekt lässt sich unter Berücksichtigung des thermodynamischen Gleichgewichtszustandes zwischen den beiden Phasen beschreiben. Unter Betrachtung der freien Energie und der Entropie lässt sich herleiten, dass die Temperatur, bei der beide Phasen im thermodynamischen Gleichgewicht sind und die Kraft (in Analogie zur Spannung) abhängig voneinander sind und sich damit gegenseitig beeinflussen (vgl. [19]). Dies wird deutlich in Abb. 2.1 durch die Steigung der Geraden der Umwandlungstemperaturen.



**Abb. 2.1:** Die Übergangstemperaturen von Formgedächtnislegierungen steigen mit zunehmender mechanischer Spannung. Die Umwandlung bei anliegender äußerer Spannung erfolgt entlang des eingezeichneten Pfeils (nach [44]).

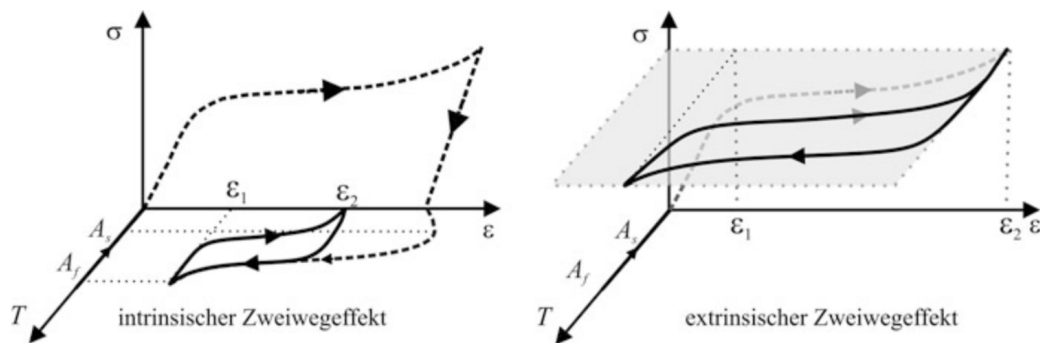
Wird die Kristallstruktur der Niedrigtemperaturphase Martensit betrachtet, fällt auf, dass dieser als verzwillingter Martensit vorliegt. Zwillingsgrenzen sind dabei eine Sonderform eines Gitterfehlers innerhalb der Kristallstruktur von Metallen. Hierbei sind zwei Kristalle mit ihrer Orientierung spiegelsymmetrisch zu einer Korngrenze angeordnet [5]. Wird eine martensitische Probe belastet, liegt zuerst ein linear-elastisches Verhalten vor (vgl. Abb. 2.2 Punkt 1 bis 2). Bei weiterer Belastung ergibt sich ohne signifikante Spannungserhöhung eine deutliche Längenänderung der Probe. Dies liegt an einer Entzwilligung des Martensits. Diese Längenänderung ist vollständig reversibel, weswegen von einem pseudoplastischen Effekt gesprochen wird [46] (vgl. Abb. 2.2 Punkt 2 bis 3). Dehnungen von bis zu 8 % sind dabei bis zum Ende dieses pseudoplastischen Plateaus möglich [46, 63]. Im weiteren Verlauf schließt sich der elastische Bereich des entzwilligten Martensits an (Punkt 3 bis 4), welcher dann in eine plastische Dehnung übergeht. Diese plastische Dehnung ist nicht reversibel und ist von einem Abgleiten der Atomebenen voneinander gekennzeichnet.



**Abb. 2.2:** Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer Formgedächtnislegierung im martensitischen Bereich (nach [63])

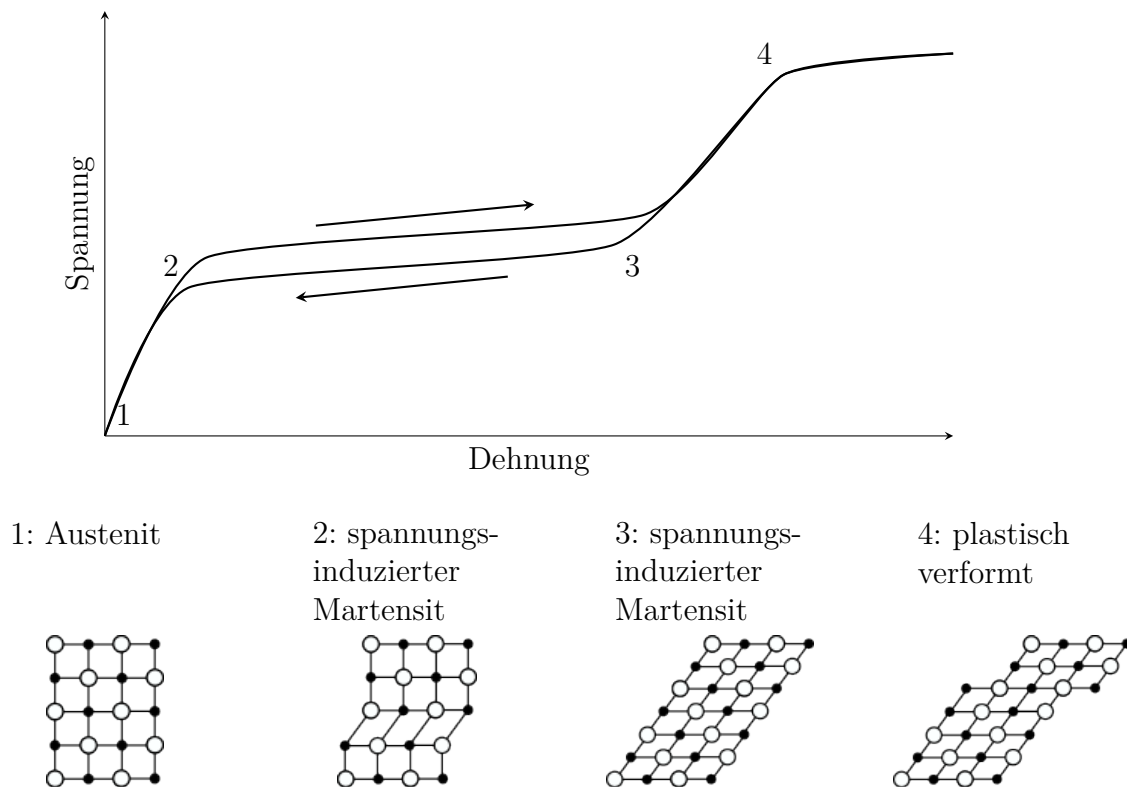
Wird nun der vollständig entzwilligte Martensit über die Starttemperatur der Austenitbildung  $A_s$  erhitzt, wird das Gefüge in ein austenitisches umgewandelt und dadurch eine Volumenabnahme herbeigeführt [63]. Im spannungsfreien Zustand kann die Probe anschließend wieder abgekühlt werden, wodurch es zur Bildung von verzwillingtem Martensit kommt, welche jedoch ohne Volumenänderung stattfindet [46]. Dieser Effekt wird als *Einwegeffekt* bezeichnet.

Durch Einbringen innerer Spannungskonzentrationen können FGL *trainiert* werden, ihnen also ein bestimmtes temperaturabhängiges Verhalten aufgeprägt werden (siehe Kap. 2.1.2). Damit werden Kristallvarianten, welche in der Legierung auftreten, orientiert [46]. Erst dadurch resultiert eine Volumenänderung beim Abkühlen des Martensits [46]. Durch dieses Training resultiert der *intrinsische Zweiwegeeffekt*. Damit *erinnert* sich die FGL sowohl an den martensitischen als an den austenitischen Zustand und kann rein durch eine Temperaturänderung zwischen den beiden Zuständen wechseln [46, 63]. Die Umwandlung besitzt dabei aber ein nur geringes Arbeitsvermögen und ist deswegen technisch von untergeordneter Bedeutung [46]. Beim *extrinsischen Zweiwegeeffekt* wird deshalb eine Legierung mit Einwegeffekt mit einer konstanten, externen Kraft oder externen Federkraft kombiniert, sodass der Einwegeffekt immer wieder von vorne stattfinden kann [19, 46]. Zu erkennen ist dies am erhöhten Spannungsniveau in Abb. 2.3. Das große Arbeitsvermögen des Einwegeffekts wird beim extrinsischen Zweiwegeffekt dadurch mit der besseren Anwendbarkeit des Zweiwegeffekts kombiniert. Die rückstellende Kraft muss dabei einerseits so groß sein, dass der Martensit im Plateau verformt werden kann und andererseits klein genug, um das Arbeitsvermögen der FGL nicht zu sehr einzuschränken [46, 63].



**Abb. 2.3:** Intrinsischer und extrinsischer Zweiwegeeffekt von Formgedächtnislegierungen in einem Spannungs-Dehnungs-Temperatur-Diagramm [63]

Wird nun die Hochtemperaturphase Austenit betrachtet, so zeigt sich ein anderes Verhalten im Vergleich zu dem unterhalb von  $M_f$ . Wird auf eine FGL in der Austenit-Phase eine äußere Last aufgebracht, so entsteht nach einem kurzen linear-elastischen Bereich ein spannungsinduzierter, partiell verzwilligter Martensit (vgl. Abb. 2.4 Punkt 2) [63]. Durch weitere Belastung wird dieser Martensit analog zum pseudoelastischen Verhalten vollständig entzwillingt [19]. Dieses Verhalten ist ebenfalls von einem Plateau gekennzeichnet und ermöglicht makroskopische Dehnungen von bis zu 8 % (vgl. Abb. 2.4 Punkt 2 bis 3) [46]. Nach Wegnahme der äußeren Last wandelt sich der Martensit wieder in Austenit um, da Martensit oberhalb von  $A_f$  instabil ist [19]. Dieses Verhalten wird auch als *Superelastizität* bezeichnet [46]. Deutlich wird dies ebenfalls in Abb. 2.1. Wird bei einer konstanten Temperatur  $T > A_f$  eine Spannung aufgebracht, werden die Umwandlungstemperaturen bei dieser erhöhten Spannung überschritten und die beschriebene Umwandlung der Kristallstruktur findet statt. Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm ist wie auch bei der superelastischen Verformung von einer Hysterese geprägt (vgl. Abb. 2.4). Durch Hinzulegen von verschiedenen Elementen kann die austenitische Phase auf Raumtemperatur



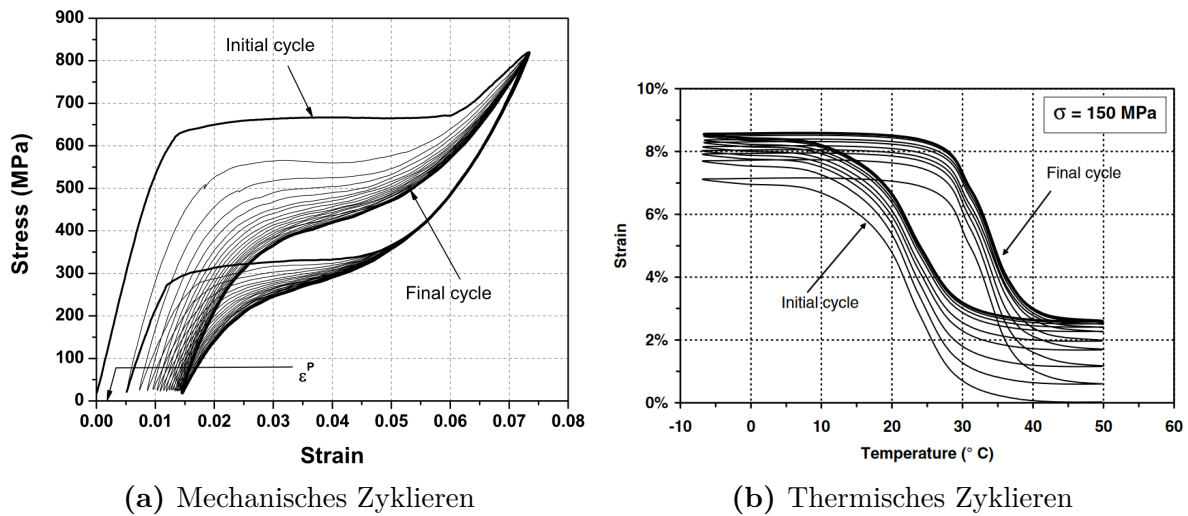
**Abb. 2.4:** Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer Formgedächtnislegierung in der Hochtemperaturphase (nach [63])

gebracht werden, wodurch dieser Effekt technisch einfacher nutzbar wird [46].

Nachdem bereits 1932 der FGE bei einer Gold-Cadmium-Legierung (Au-Cd) durch A. Ölander entdeckt wurde [63], wurde 1959 am Naval Ordnance Laboratory eine NiTi-Legierung gefunden [39], die heute die größte Verbreitung unter den FGL besitzt [63]. Gründe dafür sind die sehr gute Biokompatibilität [63], den unter den FGL größten FGE und die hohe Langlebigkeit [46]. NiTi-Legierungen weisen bei einem stöchiometrischen Verhältnis um 1:1 den FGE auf [63]. Durch Variation der Stöchiometrie und dem Hinzulegieren von anderen Elementen kann die Umwandlungstemperatur zwischen  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  eingestellt werden [46]. Damit kann eine individuelle Legierung ausgewählt werden, die dem im Anwendungsfall geforderten Temperaturbereich und genutzten Effekt am besten entspricht.

### 2.1.2 Zyklische Aktivierung von Formgedächtnislegierungen

Wie bereits beschrieben, setzt der Zweiwegeeffekt ein vorheriges Training der FGL voraus. In [45] wird das Training in drei Arten unterteilt. Bei der ersten Art, der mechanischen Methode, wird der Einwegeffekt aufgeprägt. Dafür wird die Legierung gedehnt und anschließend durch Erhitzung wieder in den Ausgangszustand gebracht. Die Verformung kann jedoch nicht vollständig abgebaut werden, ein kleiner Anteil bleibt nach jeder Zyklisierung bestehen. Durch ständige Wiederholung des Prozesses wird der Anteil immer



**Abb. 2.5:** Zyklierungsarten von Formgedächtnislegierungen [44]

kleiner bis keine Änderung mehr zu beobachten ist [44]. Dieses Verhalten ist in Abb. 2.5(a) zu erkennen. Hier ist die Spannung über die Dehnung aufgetragen. Der pseudoplastische Bereich der Probe ist deutlich zu erkennen. Die Spannung, bei der sich das Plateau bildet, nimmt mit zunehmender Zyklenzahl ab.

Eine weitere Trainingsart ist das thermische Trainieren. Unter einer konstanten Spannung wird die Legierung einem zyklischen Temperaturverlauf unterzogen. Beim Abkühlen bleibt ein kleiner Anteil der Dehnung übrig. Durch ständige Wiederholung wird dieser Anteil immer geringer bis keine Änderung mehr zu beobachten ist. In Abb. 2.5(b) ist dies deutlich erkennbar.

Die dritte Art den Zweivegeeffekt aufzuprägen ist das thermomechanische Trainieren, bei welchem beide vorherigen Trainingsarten kombiniert werden. Auf Kristallebene bewirkt das Training in allen drei Arten ein Einbringen von Defekten und Versetzungen. Diese bilden ein Spannungsfeld innerhalb des martensitischen Gefüges aus, welches auch ohne äußere Last vorhanden ist [45]. Dieses Spannungsfeld ist nun die bevorzugte Gitteranordnung, welche auch ohne äußere Last beim Abkühlen unterhalb von  $M_s$  eingenommen wird [44]. Gleichzeitig bedeutet dies, dass eine Zerstörung dieses Spannungsfeldes beispielsweise durch mechanische Überlastung oder Überhitzung den Zweivegeeffekt verringern bzw. vernichten kann [44].

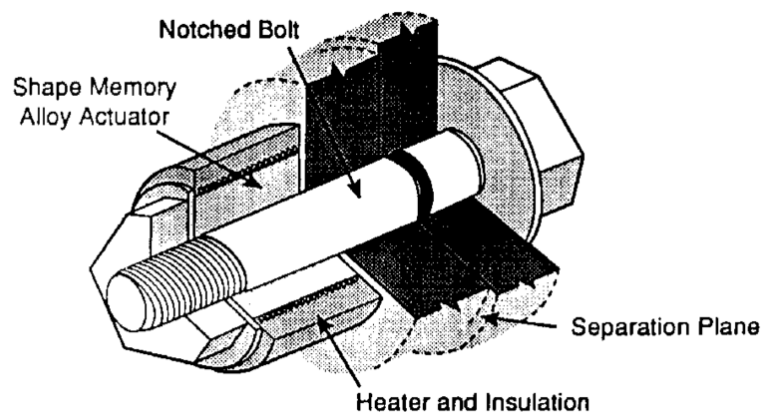
### 2.1.3 Anwendungen von Formgedächtnislegierungen

Generell lassen sich Anwendungsfälle einteilen in solche, bei denen FGL aktorisch genutzt werden und solche, bei denen sie sensorisch genutzt werden. Dehnungsmessstreifen können beispielsweise durch Dehnungssensoren auf FGL-Basis ersetzt werden. Dabei wird der pseudoelastische Bereich verwendet [49]. Durch den Phasenwechsel beim Aufbringen einer Last auf die Probe ändert sich der elektrische Widerstand der FGL. Diese Widerstandsänderung ist proportional zur Dehnung. Vorteile von FGL gegenüber konventionellen Dehnungsmessstreifen sind die deutlich verbesserten Ermüdungseigenschaften sowie

höheren ertragbaren Dehnungen [49].

Eine gleichzeitige Nutzung als Sensor und Aktor ist als FGL-Ventil möglich. Die Feder innerhalb eines Ventils besteht in diesem Fall aus einer FGL. Durch Erwärmung des Fluids im Ventil öffnet oder schließt sich das Ventil. Dies kombiniert die sonst separate Nutzung eines Stellgliedes und eines Sensors. Dies wird beispielsweise angewendet, um bei einem Automobil den Durchfluss von Getriebeöl im Automatikgetriebe bei kalten Zuständen zu kontrollieren [73]. Gleichzeitig kann dieser Effekt auch bei Thermostatventilen im Heimgebrauch angewendet werden.

In der Raumfahrt wird NiTi beispielsweise als Ersatz für Pyrotechnik in einem Entriegelungsmechanismus verwendet. Ein vorgespannter Zylinder aus FGL wird um einen Bolzen gelegt. Durch Aufheizen des Zylinders wird der Bolzen an einer vordefinierten Kerbe zerstört wodurch bei diesem Anwendungsfall Solarpaneele entfaltet werden [57] (vgl. Abb. 2.6).



**Abb. 2.6:** Aufbau des sog. Frangibolts als Ersatz für pyrotechnische Aktivierung [50]

Im Bereich der Luftfahrt wurden bereits bei der F-14<sup>1</sup> im Jahr 1971 FGL für Verbindungselemente im Hydrauliksystem verwendet [29]. Dabei wird der Einwegeffekt ausgenutzt, der nach Montage des Verbindungselements bei Aufheizung ein Schrumpfen des Elements zur Folge hat und damit eine sichere Verbindung ermöglicht. Von 1995 bis 2001 wurde im gemeinsamen DARPA/AFRL/NASA Programm *Smart Wing* der erweiterte Einsatz von FGL-Technik im Flugzeugbau untersucht. An einem skalierten Flügel der F/A-18<sup>2</sup> wurde über einen FGL-Draht ein Querruder angesteuert, welches über ein Festkörpergelenk verbunden ist. Über ein sog. *Torque Tube* (dt. Torsionsrohr) konnte zusätzlich die Verwindung des Flügels geändert werden. Dabei wurde gezeigt, dass dieses Torque Tube nur den Modellflügel verwinden kann, jedoch nicht genügend Kraft für ein Full-Scale Flügel besitzt. In neueren Entwicklungen konnten Torque Tubes an einem Flugzeug in Modellgröße

<sup>1</sup>Von Grumman gebautes zweistrahliges Kampfflugzeug, welches primär für die US Navy entwickelt wurde.

<sup>2</sup>Zweistrahliges Kampfflugzeug von McDonnell Douglas in den 70er Jahren entwickelt. Besitzt anklappbare Flügelenden zur platzsparenden Unterbringung auf Flugzeugträgern

im Flug die Flügelenden nach unten klappen und so an die lokalen Umgebungsbedingungen anpassen [6]. Erstmals wurden hierfür FGL-Legierungen verwendet, die so auch unter den Bedingungen eines typischen Einsatzprofils von Flugzeugen eingesetzt werden können [6]. Im selben Projekt wurde eine vergrößerte Version des Torque Tube mit 2260 N m eingesetzt, um die Flügelenden einer F/A-18 am Boden hochzuklappen.

NASA und Boeing entwickelten parallel formvariable Chevrons an der Hinterkante von Triebwerksverkleidungen. Dadurch kann der Auslassquerschnitt an unterschiedliche Randbedingungen angepasst werden und damit zu einer Schuberrhöhung beitragen. Während in [69] ein einzelner FGL-Aktuator in ein Faserverbundlaminate vor der Aushärtung eingebettet wird, werden in [30] drei FGL-Aktuatoren auf das bereits bestehende Faserverbundlaminate aufgebracht (vgl. Abb. 2.7) und in einem Flugversuch getestet.

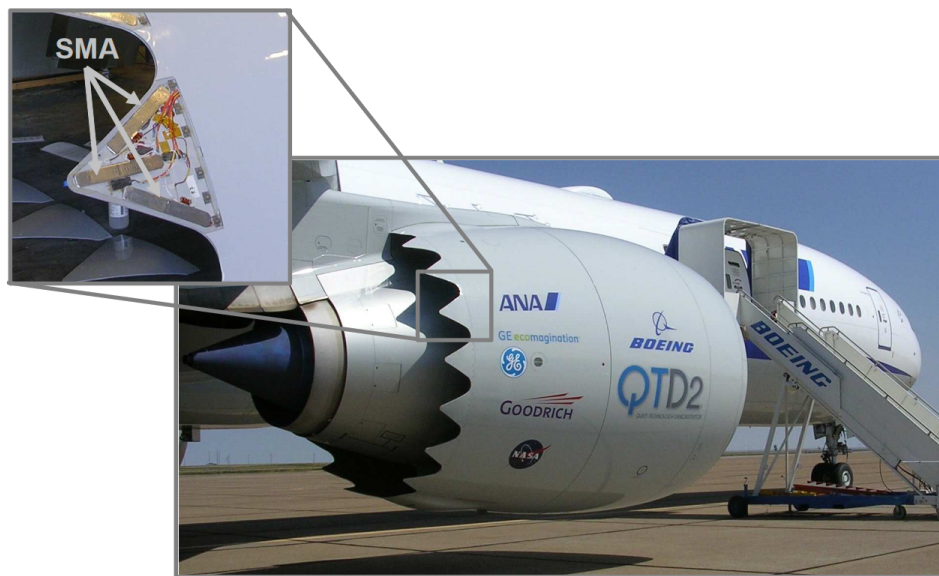


Abb. 2.7: Detail der FGL-aktuierten Chevrons an einer Boeing 777 [30]

#### 2.1.4 Einbettung von Formgedächtnislegierungen in Faserverbundlaminat

Gerade im Flugzeugbau ist eine möglichst leichte Struktur ein wichtiges Ziel, weswegen hier Faserverbundwerkstoffe (FVW) in immer größerem Umfang eingesetzt werden. Als Neuerung sollen diese Strukturen nun nicht nur die zentrale Rolle der Lastaufnahme übernehmen, sondern sich auch an sich ändernde Umgebungsbedingungen anpassen können [9]. Eine solche Funktionsintegration ist zum Beispiel mit der Einbettung von FGL in Faserverbundlaminat möglich. Heutige hybride Faserverbundstrukturen (engl. *SMA hybrid composites (SMAHC)*) beschränken sich dabei weitgehend auf den Einsatz von FGL-Drähten, welche vor dem Aushärtprozess des FVW in diesen eingebracht werden [9]. Durch das aktorische Verhalten der FGL ist eine Gestaltkontrolle, eine Veränderung des Steifigkeitsverhaltens des Bauteils [11] oder auch eine Schadenserkennung und -reparatur möglich (vgl. [42]).

Allen Anwendungsfällen gleich ist eine grundlegende Herausforderung in der Herstellung der hybriden Laminat. Zum einen muss die Glasübergangstemperatur  $T_g$  der Matrix höher sein als  $A_f$ , um keinen Festigkeitsverlust der Anbindung von Matrix und FGL durch die Aktivierung der FGL zu erhalten. Zum anderen muss die Schubfestigkeit zwischen FGL und Matrix so hoch sein, um die Schubspannung, welche durch die FGL erzeugt wird, auf die Matrix übertragen zu können [41]. Ersteres stellt ein Problem dar, da gängige Epoxidharze eine Aushärtetemperatur in der Nähe oder oberhalb von  $T_g$  benötigen und damit zwangsweise eine Aktivierung der FGL während der Temperphase mit sich bringen (im Bezug auf den Zweiwegeeffekt) [9]. Ausreichend steife Rahmen, in die die FGL eingespannt wird und damit an einer Verformung behindert wird, sind eine Möglichkeit, dieses Problem zu umgehen. Diese Methode wird in [4] und [60] erfolgreich angewendet. Hierfür werden NiTiCu-Drähte mit 3 % Vorspannung in Rahmen eingespannt und in ein Aramid-Epoxid-Verbund eingebettet. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist die schlechte Anwendbarkeit und Skalierung auf industrielle Prozesse [41]. In [41] werden deshalb nach dem ersten Aushärten der Matrix die FGL-Drähte aus dem Rahmen genommen und einem angepassten Tempervorgang unterzogen. Die Drähte bleiben dabei mit der Matrix verbunden [41]. Dennoch wird auch hier für das erste Aushärten der Matrix ein Rahmen benötigt, wodurch der Herstellprozess nicht nennenswert vereinfacht werden kann. In [74] wurde eine NiTiNb-Legierung durch Kaltumformung so verändert, dass  $A_s$  oberhalb der Aushärtetemperatur des verwendeten Kohlefaser-Prepregs liegt. Dadurch wird keine Fixierung für die Drähte benötigt. Nach dem Aushärten des Prepregs werden die FGL-Drähte kurzzeitig gegläht, wodurch die ursprünglichen Umwandlungstemperaturen wiederhergestellt werden. Trotz der kurzfristig hohen Temperaturen kann in [74] eine gute Anbindung zwischen Laminat und FGL erzielt werden. Dies wird jedoch nur dadurch ermöglicht, dass die verwendete Legierung eine große Hysterese mit  $M_s < -40^\circ\text{C}$  und  $A_s > 130^\circ\text{C}$  aufweist [74].

## 2.2 Faserverbundwerkstoffe

### 2.2.1 Grundlagen

Als FVW wird meist ein Verbund aus einer polymeren Matrix und einer Faser verstanden. Damit grenzen sie sich innerhalb der Gruppe der Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) von anderen Werkstoffen wie faserverstärkten Metallen oder Keramiken ab [61]. In dieser Arbeit wird sich auf FVW mit gerichteten Endlosfasern konzentriert. Faserverbundwerkstoffe bestehen aus zwei verschiedenen Materialien. Beiden Materialien werden dabei spezifische Aufgaben zuteil. Die Fasern übernehmen die äußere anliegende Last. Die Matrix hält die Fasern in der gewünschten Orientierung, schützt die Fasern vor Umwelteinflüssen, überträgt Lasten zwischen den Fasern und übernimmt Lasten, welche quer zur Faserrichtung dem Bauteil aufgeprägt werden [61].

Der am häufigsten verwendete Matrixwerkstoff ist Epoxidharz [61]. Das Harz wird mit einem Härter vermischt und härtet dann mittels Polyaddition aus [61]. Je nach Epoxidharz geschieht dies bereits bei Raumtemperatur oder bei einer erhöhten Temperatur ab ca.  $80^\circ\text{C}$ . Insbesondere bei kaltaushärtenden Harzsystemen muss nach dem ersten Härten



ein Nachhärten bei erhöhter Temperatur erfolgen, um den Härtungsvorgang vollständig abzuschließen [61].

Faserverbundwerkstoffe sind von einer starken Anisotropie geprägt. Durch genaue Kenntnis der Kraftflüsse innerhalb des Bauteils kann die Ausrichtung der Fasern entlang dieser Kraftflüsse große Vorteile im Bauteilgewicht sowie in der Festigkeit und Steifigkeit erzielen [27]. In der Praxis werden viele Schichten (Lagen) übereinandergelegt und zu einem Laminat verbunden. In jeder Schicht kann die Faserorientierung variieren und so an die auftretenden Spannungen angepasst werden. Die Analyse der Beanspruchung des Laminates muss damit auch schichtweise vorgenommen werden [27]. Die gängige analytische Methode zur Berechnung der Beanspruchung eines Laminates bzw. der einzelnen Schichten ist die *Klassische Laminattheorie* (CLT, engl. *classical laminate theory*). Darin wird zuerst das Elastizitätsgesetz in Form einer Steifigkeitsmatrix des gesamten Laminates berechnet und im Anschluss daran die Spannungen in den einzelnen Schichten (UD-Schicht). Eine umfassende Beschreibung dieser Methode ist in [61] gegeben. Mit den daraus gewonnenen schichtweisen Spannungen kann im Anschluss eine Festigkeitsanalyse durchgeführt werden.

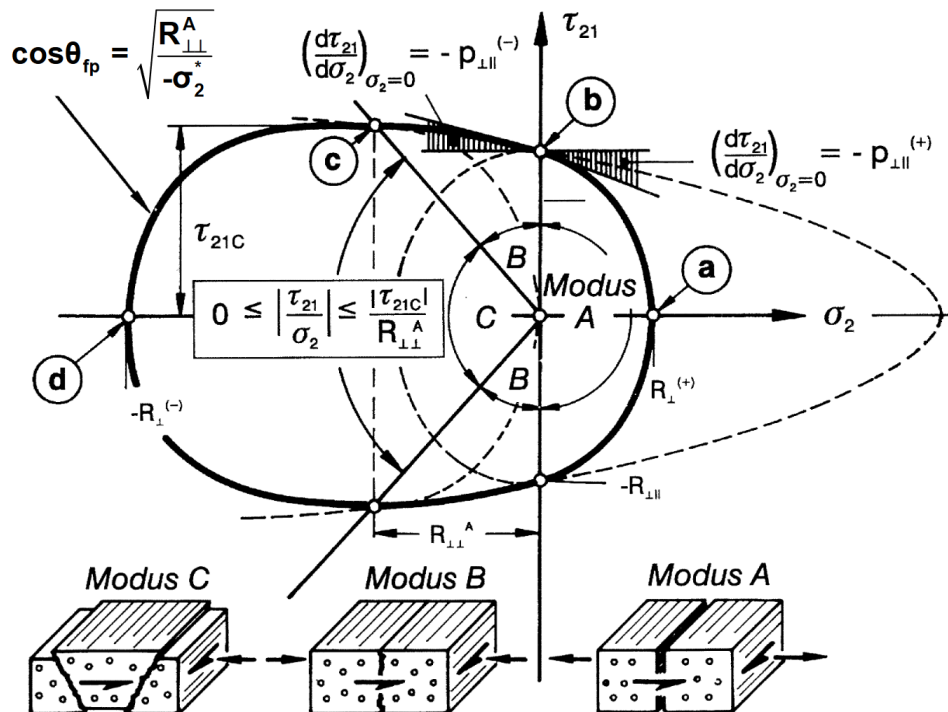
### 2.2.2 Festigkeitsanalyse

In der Praxis wird in den meisten Fällen ein mehrachsiger Spannungszustand in einer Lage des Faserverbundes herrschen. Jedoch sind nur Festigkeitswerte aus Versuchen für einachsige Beanspruchung bekannt [71]. Somit muss ein Versagenskriterium gefunden werden, welches die bekannten Festigkeitswerte mit dem in der UD-Lage herrschenden Spannungszustand vergleichen kann. Damit kann dann eine Aussage darüber getroffen werden, ob die Lage den Beanspruchungen standhält, oder versagt. Mit der Zeit haben sich verschiedene Versagenskriterien entwickelt, welche sich grob in die Gruppe der differenzierenden und der pauschalen Kriterien unterscheiden lassen.

Pauschale Kriterien unterscheiden nicht zwischen einem Versagen der Faser und dem der Matrix. So nimmt das oft eingesetzte Tsai/Wu-Kriterium [66] eine homogene, anisotrope Schicht an [71]. Dieses Bruchkriterium ist dabei eine Abwandlung der Gestaltänderungshypothese nach von Mises, welche jedoch nur für duktile Werkstoffe Gültigkeit besitzt [61]. In Faserverbundwerkstoffen brechen allerdings sowohl die Faser als auch die Matrix spröde, weswegen die Anwendung dieses Kriteriums nur unter genauer Kenntnis der Einschränkungen des Kriteriums gemacht werden sollte. Der Vorteil dieser Methode liegt in der vergleichsweise simplen Berechnung der Festigkeitswerte.

In der Realität soll zwischen einem Faserversagen und einem Zwischenfaserbruch, also einem Matrixversagen, unterschieden werden. Unter Faserbruch wird das plötzliche Versagen einer signifikanten Anzahl von Fasersträngen verstanden, was üblicherweise zu einem Totalversagen der Schicht führt [61]. Zwischenfaserbruch (ZFB) hingegen tritt bereits weit vor einem Totalversagen auf. Kleine mikroskopische Risse in der Matrix führen zu einer Steifigkeitsdegradation des Bauteils (Abfall der effektiven Steifigkeit des Bauteils), zunächst jedoch nicht zu einem Totalversagen. Nimmt die Rissdichte über ein kritisches Maß zu, führt auch ZFB zu einem Totalversagen der Laminatschicht. Eine Unterscheidung zwischen diesen Versagensarten wird im Versagenskriterium nach Puck durchgeführt

(differenzierendes Verfahren). Dabei handelt es sich um ein *wirkebenenbezogenes Bruchkriterium*. Bei diesen Kriterien wird die Mohrsche Versagenshypothese aufgegriffen, die besagt, dass die Bruchgrenze eines Materials von den Spannungen in der Bruchebene bestimmt ist [61]. Es kann dabei gezeigt werden, dass diese Spannungen immer auf einer faserparallelen Bruchebene liegen. Damit können die auftretenden Spannungen auf Spannungen in der Bruchebene transformiert werden. Hiermit ist nun auch eine Berechnung des Winkels der Bruchebene möglich und dadurch eine Unterscheidung zwischen verschiedenen Bruchmodi beim ZFB [71]. Beim Sonderfall des *ebenen Spannungszustandes* (2D) reduziert sich das Spannungsfeld, welches von der Laminatschicht ohne Versagen ertragen werden kann, zu dem in Abb. 2.8 gezeigten (dicke Linie). Dies ist gültig für ZFB. Es kann gezeigt werden, dass faserparallele Spannungen erst bei sehr hohen Werten einen Einfluss auf das ZFB-Kriterium haben [61, 71].



**Abb. 2.8:** Im Zwischenfaserbruch-Kriterium nach Puck wird zwischen drei Versagensmodi unterschieden. Mit  $\sigma_2$  wird die orthogonal zu den Fasern liegende Spannung beschrieben,  $\tau_{21}$  beschreibt die in der Faserebene auftretende Schubspannung. Faserparallele Spannungen liegen senkrecht auf dieser Ebene [61].

Der allgemeine Fall des *räumlichen Spannungszustandes* erlaubt es, Versagensmodi wie Delamination zu berechnen. Delamination tritt häufig an stark gekrümmten Flächen, Lasteinleitungen und Laminaträndern auf. Dabei werden die interlaminaren Spannungen (im Gegensatz zu intralaminaren Spannungen des 2D-Falls) so groß, dass sie ein Ablösen der UD-Schichten voneinander bewirken [61, 71].

In diesem Kapitel kann nur ein allgemeiner Überblick über die Bruchkriterien gegeben werden. Als Berechnungs- und Konstruktionsgrundlage sei auf [61, 71] verwiesen. Ein

Überblick über die mikromechanischen Vorgänge beim Versagen innerhalb eines Laminates wird in [61] gegeben. Die Entwicklung von wirkebenenbezogenen Bruchkriterien wird in [31] aufgezeigt. Das Puck-Bruchkriterium wird in [55, 56, 61] detailliert beschrieben. Neben den beschriebenen Bruchkriterien gibt es eine Vielzahl an weiteren Kriterien. In dieser Arbeit werden diese jedoch nicht angewandt.

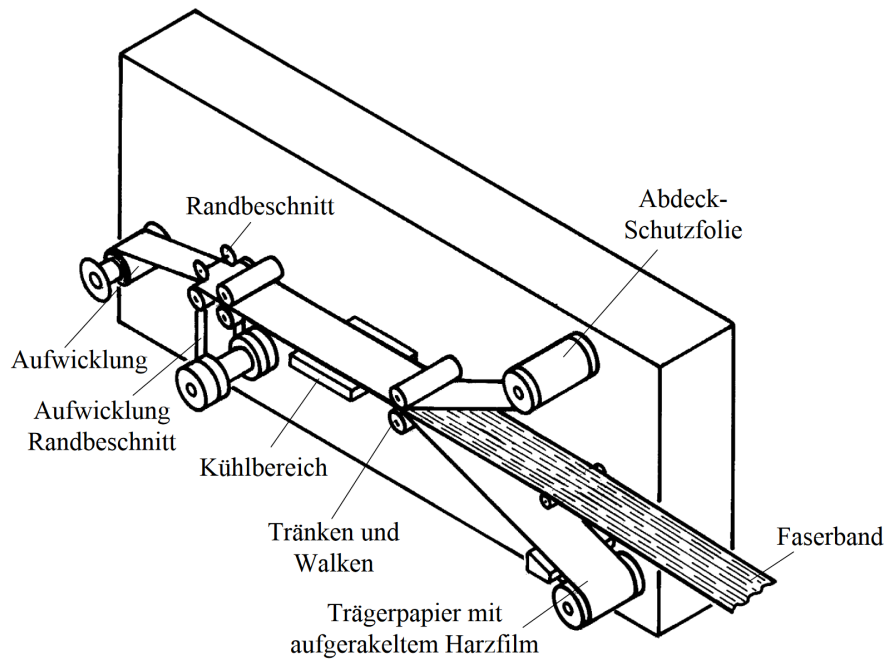
### 2.2.3 Prepreg-Herstellungsmethode

Oft wird das flüssige Harz während des Herstellungsprozesses in das Bauteil gebracht und das Laminat bei Raumtemperatur ausgehärtet. Dieser Imprägniervorgang kann per Hand, durch Walzen oder durch einen Druckunterschied bei der Infusion oder dem RTM-Verfahren (engl. *resin transfer molding*) durchgeführt werden (siehe [27, 61]). Ein hoher Faservolumenanteil<sup>3</sup>, geringe Toleranzen in der Faserausrichtung sowie eine gute Reproduzierbarkeit können jedoch von diesen Verfahren nur eingeschränkt erzielt werden. Prepregs (*Preimpregnated Fibres*) hingegen können diese Anforderungen erfüllen. Bei diesen wird der Imprägnierprozess im Vorfeld vom Hersteller des Halbzeugs übernommen. Dabei werden das Harz-Härter-Gemisch sowie der Faservolumengehalt eingestellt. Da das Harz bei Raumtemperatur allmählich aushärten würde, müssen Prepregs bis zur Verarbeitung tiefgekühlt gelagert werden. Dies ist gültig für Duromere, wie es beispielsweise Epoxidharz ist. Auch eine Matrix aus einem Thermoplast ist möglich, wobei für diese oft andere Methoden und Randbedingungen in der Herstellung und Verarbeitung gelten. Aufgrund dessen wird sich hier auf duromere Prepregs konzentriert.

Während des Herstellprozesses des Prepregs wird, wie in Abb. 2.9 schematisch gezeigt, ein trockenes Faserband mit dem Harz imprägniert. Durch Anpassung des Walzendrucks kann der Faservolumengehalt eingestellt werden. Damit die Fasern nicht aufeinander haften, werden Schutzfolien auf die Fasern gelegt. Nach Einstellen des Faservolumengehalts wird der Prepeg gekühlt, besäimt und auf Rollen aufgewickelt. Für eine umfassendere Beschreibung der Herstellung von Prepregs sei auf [47] verwiesen.

Bauteile aus Prepreg-Material können per Hand hergestellt werden (Handlaminieren). Dazu werden die einzelnen Lagen per Hand zugeschnitten und in eine Form gelegt, welche die Kontur des späteren Bauteils festlegt. Im Gegensatz zur Verarbeitung von *trockenen* Fasern ist jedoch ein nachträgliches Verschieben der Lagen oft kaum mehr möglich, da die Lagen aneinanderhaften. Dennoch, oder gerade deswegen, sind auch per Hand deutlich geringere Toleranzen in der Lagenausrichtung einhaltbar, als es bei trockenen Fasern der Fall ist. Heute ist das Handlaminieren auf kleine Bauteile oder komplexe Geometrien beschränkt. Für große Bauteile werden in der Luftfahrtindustrie mittlerweile automatisierte Legeprozesse wie *Automated-Tape-Laying* (ATL) (siehe Abb. 2.10(a)) und *Automated-Fibre-Placement* (AFP) (siehe Abb. 2.10(b)) verwendet [47, 51]. Mithilfe dieser ist die geforderte Genauigkeit und Reproduzierbarkeit erreichbar. Außerdem kann somit die Produktionsrate deutlich vergrößert werden [51]. ATL wird hauptsächlich für die Herstellung großer, flacher Bauteile wie Flügelschalen verwendet. Mit diesem Verfahren

<sup>3</sup>Unter Faservolumenanteil oder -gehalt wird das volumetrische Verhältnis zwischen Faser und Matrix verstanden. Ein hoher Faservolumenanteil führt zu festeren, leichteren Bauteilen, ein zu großer Gehalt kann jedoch zu einer unvollständigen Vernetzung der Fasern mit der Matrix führen.



**Abb. 2.9:** Schematischer Herstellungsprozess von Prepreg [61]

ist es möglich, ein oder mehrere breite Prepreg Bänder entlang der Formkontur abzulegen [47]. Beim AFP-Verfahren hingegen werden viele kleine schmale Bänder automatisiert abgelegt und zugeschnitten. Durch die schmalen Bänder wird eine bessere Drapierbarkeit erreicht, wodurch komplexe Geometrien automatisiert abgefahren werden können [47]. So werden beispielsweise beim Businessjet *Beechcraft Premier 1A* ganze Rumpfschalen als ein Bauteil hergestellt [51].

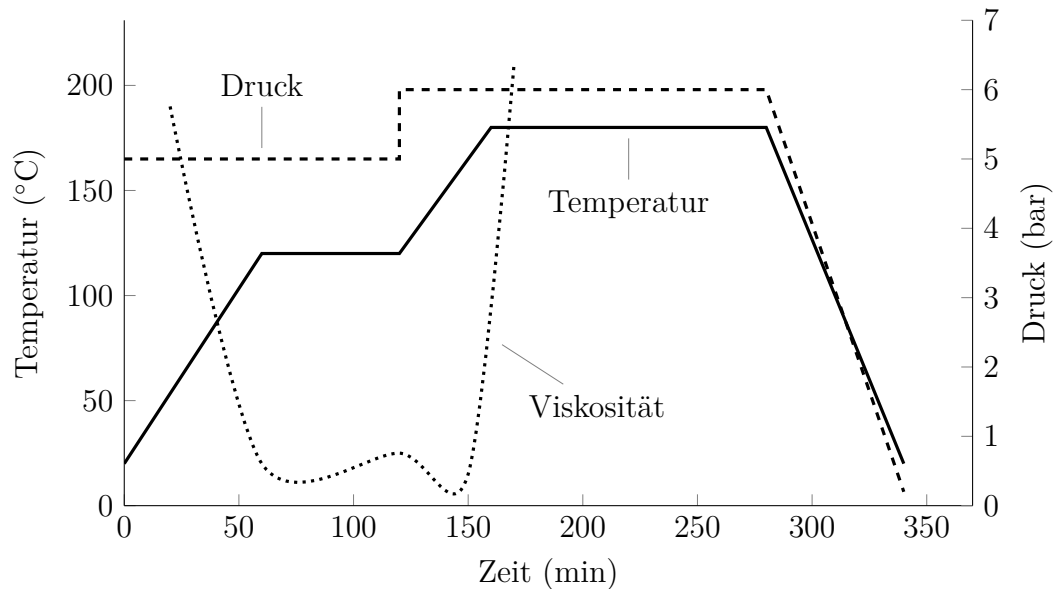


(a) ATL-Prozess eines Rumpfpanels (© Premi- um AEROTEC GmbH [51])

(b) AFP-Prozess der Bugsektion einer Boeing 787 (© Boeing [51])

**Abb. 2.10:** Beispiele der automatisierter Legeprozesse *Automated-Fibre-Placement* (AFP) und *Automated-Tape-Laying* (ATL) in der Luftfahrt

Der Aushärteprozess von Prepregs unterscheidet sich wesentlich von dem kaltaushärtender Faserverbundwerkstoffe. Der Prozess erfolgt meist innerhalb eines Autoklavs unter erhöhter Temperatur und Druck, sowie innerhalb eines Vakuumaufbaus. Die für den Aushärteprozess benötigte Energie wird hier in Form von Wärme bereitgestellt. In der Luftfahrt werden dabei oft Prepregs mit einer Aushärtetemperatur um  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  verwendet [47]. Ein beispielhafter Aushärteprozess innerhalb eines Autoklavs ist in Abb. 2.11 dargestellt.



**Abb. 2.11:** Schematischer Verlauf von Temperatur, Autoklavdruck und daraus resultierender Harzviskosität eines Autoklavprozesses (nach [47])

Während des ersten Aufheizens nimmt die Viskosität des Harzes deutlich ab. Während dieser Phase fängt das Harz an zu fließen, flüchtige Stoffe können ausdiffundieren und Porositäten innerhalb des Bauteils werden geschlossen [47]. Weiterhin wird überschüssiges Harz aus dem Bauteil gedrückt. Dies wird zusätzlich vom Autoklav- und Vakuumdruck unterstützt. Die Aufheizrate darf dabei nicht zu hoch sein. Da die Aushärtung exotherm verläuft, kann sonst zu viel Wärme freigesetzt werden, was bis hin zur Zersetzung der Matrix führen kann [47]. Ab Erreichen des sogenannten Gelpunkts beginnt der Aushärteprozess während dessen Harz und Härter miteinander chemisch reagieren. Dadurch steigt die Viskosität stark an und ein weiteres Fließen der Matrix wird verhindert [47]. Nach der vollständigen Vernetzung der Matrix wird die Temperatur wieder auf Raumtemperatur abgesenkt und das fertige Bauteil kann aus dem Autoklav genommen werden.

## 2.3 Grundlagen von Finite-Elemente-Methoden

Finite-Elemente-Methoden (FEM) sind Methoden, mit Hilfe deren komplexe mathematische Probleme durch Diskretisierung in lineare Gleichungssysteme (LGS) überführt werden können [25]. Diese Systeme sind dann einfach von Computern lösbar. FEM werden in verschiedenen Codes für die Lösung der Gleichungssysteme (Solver) implementiert. Einer davon ist im Computerprogramm ANSYS verfügbar, mithilfe dessen verschiedene

Probleme unter anderem der Mechanik und der Thermodynamik gelöst werden können. In diesem Kapitel sollen verschiedene Einstellmöglichkeiten in ANSYS und deren Einfluss auf die Lösung des Gleichungssystems aufgezeigt werden. Für die mathematischen Grundlagen sei auf [8] und [25] verwiesen. Ein guter praktischer Einstieg in das Programm wird in [20] gegeben, ein tieferer Einblick findet sich in [58].

Dem Anwender wird in ANSYS die Auswahl eines direkten und eines iterativen Solvers ermöglicht. Um ein Verständnis darüber zu erhalten, worin der Unterschied liegt, wird kurz auf die zentrale Formulierung des linearen Gleichungssystems eingegangen. Dieses ergibt sich zu

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F} \text{ bzw. } \mathbf{K}^{-1}\mathbf{F} = \mathbf{u} \quad (2.1)$$

bei der  $\mathbf{K}$  die Steifigkeitsmatrix entweder des Elements oder des Gesamtproblems ist,  $\mathbf{u}$  der Vektor der Verschiebungen und  $\mathbf{F}$  die äußeren angreifenden Kräfte [48]. Durch Formulierung der inversen Steifigkeitsmatrix können durch Kenntnis der äußeren angreifenden Kräfte die Verschiebungen berechnet werden und daraus wiederum abgeleitete Größen wie die Spannung im Körper. Dies wird nochmals deutlich, wenn Gl. 2.1 als Hooke'sches Gesetz betrachtet wird [20].

Wird nun das Augenmerk wieder auf die beiden Solver-Typen gelenkt, lässt sich nun zeigen, dass der direkte Solver dieses Gleichungssystem durch Anwendung des Gauß-Algorithmus löst [58]. Dabei nutzt er den Umstand aus, dass in  $\mathbf{K}$  nur wenige Einträge ungleich null sind. Der iterative Solver hingegen beruht auf dem *Verfahren der konjugierten Gradienten mit Vorkonditionierung* (PCG). Vereinfachend wird dabei die Steifigkeitsmatrix durch eine ähnliche, leicht invertierbare Matrix angenähert [8]. Durch eine Vorkonditionierung geschieht diese Annäherung schneller (siehe [8]). Für große Probleme ist der iterative Solver schneller, jedoch kann bei nichtlinearen Berechnungen (Kontakte mit Reibung, nichtlineare Stoffgesetze, ...) der direkte Solver schneller sein [58]. Standardmäßig verwendet ANSYS meist den iterativen Solver [58].

Wird ein nichtlineares Problem betrachtet, kann ein direktes Lösen über den Gauß-Algorithmus nicht angewandt werden [58]. Hierfür wird dann das *Newton-Raphson-Verfahren* angewandt, welches zur Bestimmung von Nullstellen angewandt wird und auch auf Gleichungssysteme angewandt werden kann [58]. Es wird mit einer Anfangssteifigkeit  $\mathbf{K}_i$  und einer Verschiebung  $\mathbf{u}_i$  gestartet. Daraus werden die inneren Kräfte nach Gl. 2.1 berechnet. Diese müssen gleich der äußeren angreifenden Kräfte sein, um einen Gleichgewichtszustand zu erhalten [48]. Ist dies nicht erreicht wird die Steifigkeitsmatrix angepasst und Gl. 2.1 solange berechnet, bis die Gleichgewichtsbedingung erfüllt ist [48]. Da dies in der Regel nicht exakt möglich ist, wird eine Toleranz  $\varepsilon$  eingeführt [58]. Dem Nutzer stehen verschiedene Optionen zur Steuerung des Verfahrens zur Verfügung, welche in [58] beschrieben werden. Die Nutzung des Newton-Raphson-Verfahrens darf nicht gleichgesetzt werden mit der Verwendung des iterativen Solvers. Die Einstellung des Solver-Typs bezieht sich rein auf die Art der Berechnung des Gleichungssystems, die Verwendung des Newton-Raphson-Verfahrens auf das Aufstellen des Gleichungssystems.

Eine weitere Option der Solver-Einstellungen in ANSYS ist die, *große Verformungen* zu aktivieren. Ist die Option nicht aktiviert, wird für die Berechnung die initiale Steifigkeits-

matrix verwendet. Bei einer sich unter Last verformenden Struktur ist die Steifigkeitsmatrix jedoch eine Funktion der Verschiebung [34]. Dies wird deutlich in der Formulierung der zentralen Gleichung

$$\mathbf{K}(\mathbf{u}) \cdot \mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (2.2)$$

Das Gleichungssystem ist damit nun nichtlinear und lässt sich mithilfe des Newton-Raphson-Verfahrens iterativ lösen.

Des Weiteren sollen Kontakte betrachtet werden. Kontakte werden immer dann benötigt, wenn zwei Körper während einer Simulation interagieren. Dies kann bereits vom Start der Simulation an der Fall sein (eine Schraube hält zwei Körper miteinander verbunden) oder es kann erst im Verlauf der Simulation zu einem Kontakt kommen (eine Schraubenfeder wird komprimiert, bis die Windungen aufeinandertreffen). Durch die Definition eines Kontaktes zwischen zwei Körpern wird überprüft, ob sich die Körper durchdringen. Einer möglichen Durchdringung wird dann in Form einer Kontaktsteifigkeit entgegen gewirkt [20]. Daraus ergeben sich Rückstellkräfte, welche mit den äußeren Kräften ins Gleichgewicht gebracht werden bis die Durchdringung unter einen Grenzwert fällt [20]. In ANSYS können fünf verschiedene Kontakttypen ausgewählt werden. Deren Verhalten ist in Tab. 2.1 aufgelistet. Der standardmäßige Kontakt ist der Kontakttyp *Verbund*, welcher einen festen Kontakt durch Verschrauben, Schweißen oder Ähnlichem wiedergibt. Dem gegenüber steht der Typ *Keine Trennung*, welcher eine tangentiale Relativbewegung zwischen den Kontaktflächen zulässt. Abhebende Kontakte werden immer dann benötigt, wenn sich der Kontaktstatus während der Simulation ändern darf und ein Loslösen des Kontaktes möglich ist. Diese Kontakttypen erfordern eine iterative Berechnung [20]. Ein plötzlicher Wechsel des Kontaktstatus kann von einem iterativen Solver nicht gut berechnet werden, weswegen bei Verwendung abhebender Kontakte der direkte Solver ausgewählt werden sollte [58].

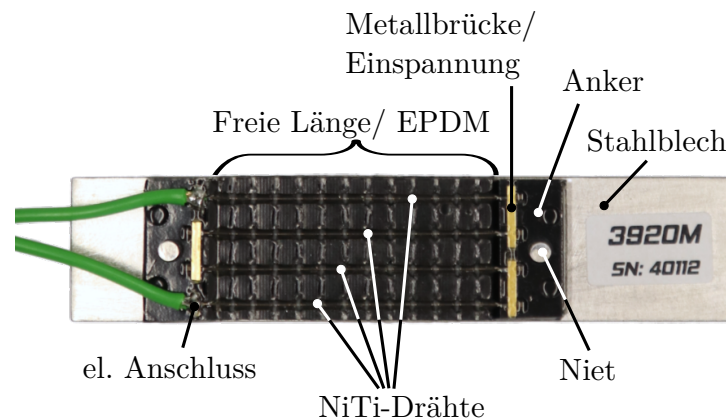
**Tab. 2.1:** Verhalten der verschiedenen Kontakttypen in ANSYS

	Verhalten normal zur Kontaktfläche	Verhalten tangential zur Kontaktfläche
Verbund	kein Abheben	kein Gleiten
Keine Trennung	kein Abheben	reibungsfrei
Reibungsfrei	abhebend	reibungsfrei
Rau	abhebend	kein Gleiten
Reibungsbehaftet	abhebend	Reibfaktor einstellbar

Kontakte sind ein wesentlicher Bestandteil jedes FE-Modells. Eine Kenntnis darüber, wie die Kontakttypen in ANSYS umgesetzt sind und sich verhalten ist fundamental für die Erstellung eines Modells, welches reale Probleme wiedergeben soll. Eine fehlerhafte Kontaktdefinition ist häufig die Ursache sehr langer Rechenzeiten und Konvergenzproblemen [58]. In ANSYS gibt es neben der Auswahl der Kontakttypen eine Vielzahl weiterer Einstellmöglichkeiten für das Kontaktverhalten. Dies kann hier nicht in der Gesamtheit wiedergegeben werden. In [58] werden alle Einstellungen detailliert aufgelistet und deren Auswirkungen auf das Modell beschrieben.

## 2.4 Formgedächtnisaktuatoren von CompActive

In diesem Kapitel soll ein kurzer Überblick über die verwendeten Formgedächtnisaktuatoren geschaffen werden. Die Aktuatoren stammen von der Firma *CompActive*. Die Entwicklung der Aktuatoren startete im Rahmen einer Doktorarbeit [33]. Die Aktuatoren bestehen aus NiTi-Drähten, welche außerhalb der neutralen Faser des Aktuators angeordnet sind. Dadurch kommt es bei einer Aktuierung und der damit verbundenen Kontraktion der Drähte zu einer Biegung des Aktuators. Es stehen verschiedene Konfigurationen zur Verfügung, welche sich in den geometrischen Abmessungen, der Anzahl der Drähte und damit in der tolerierbaren externen Last und dem Biegeradius unterscheiden. Im Rahmen dieser Arbeit wird im Vorfeld das Modell 3920E20 ausgewählt, welches einen guten Mittelweg zwischen Biegeradius und Kraft bietet. Anhand dieses Modells werden die Aktuatoren beschrieben. In Abb. 2.12 ist der Aktuator dargestellt. Dieser besitzt eine Gesamtlänge von 59 mm mit einer Länge der Drähte von 39 mm. Auf einer Breite von 20 mm werden vier FGL-Drähte aufgebracht [13]. Diese sind in den Anker mithilfe einer metallischen Brücke festgesetzt und miteinander verbunden. Das Material der Anker ist unbekannt, in [33] wird das Epoxidharzsystem Araldite<sup>®</sup>LY5052/Aradur<sup>®</sup>5052 verwendet. Diese Anker stellen die Einspannung der Drähte dar. Entlang der freien Länge der Drähte sind diese mit einem Substrat aus EPDM verbunden [33]. Um ein Abheben der Drähte von der EPDM-Schicht zu verhindern, sind die Drähte mit dieser Schicht vernäht.



**Abb. 2.12:** Der Aktuator 3920E20 (frühere Modellbezeichnung: 3920M) ist hier auf einem Edelstahlblech aufgebracht (© CompActive [10])

Es wird ein NiTi-Draht mit einem Durchmesser von 0,5 mm verwendet. Diesem wird im Vorfeld ein intrinsischer Zweiwegeeffekt aufgeprägt [33]. Mithilfe dessen kann eine Last von 0,1 Nm aufgebracht werden [14]. Die genauen Umwandlungstemperaturen der Legierung sind unbekannt, aus [14] lässt sich  $A_s = 60^\circ\text{C}$  und  $A_f = 100^\circ\text{C}$  ablesen. Die maximale Temperatur, welcher der Aktuator dauerhaft ausgesetzt werden darf, beträgt  $130^\circ\text{C}$ .



# Kapitel 3

## Methoden der Einbettung von Formgedächtnisaktuatoren

Ziel dieses Kapitels ist es, Möglichkeiten zu erarbeiten, wie die Aktuatoren von CompActive in ein Faserverbundlaminat eingebettet werden können und damit sowohl die Oberseite als auch die Unterseite des Aktuators vom Laminat umgeben ist.

### 3.1 Herausforderungen und Lösungsmöglichkeiten

Die grundlegende Problemstellung ergibt sich aufgrund der in Kap. 2.1.4 beschriebenen Temperaturdifferenzen. Zum einen muss der Aktuator über  $A_f$  erhitzt werden, um  $T_g$  des Laminates auch bei der späteren Aktivierung des Aktuators nicht zu überschreiten und damit die Anbindung des Aktuators an das Laminat nicht zu degradieren. Zum anderen muss der Aktuator während des Aushärtevorgangs des Laminates an einer Verformung behindert werden. Laut CompActive resultiert die Aktivierung der FGL in einer Kontraktion von etwa 3 %. Wird diese Kontraktion während des Aushärtevorgangs zugelassen, so kann der Zweivegeeffekt nicht mehr genutzt werden und der Aktuator kann keine Arbeit mehr verrichten.  $T_g$  eines Epoxidharzes ist abhängig von der benötigten Temperatur beim Aushärten und liegt üblicherweise in der Region der Aushärtetemperatur.

Bei einer erfolgreichen Einbettung kommt es zu keinem Versagen des Laminates bei einer Aktivierung des Aktuators. Gleichzeitig soll ein Laminataufbau verwendet werden, welcher so auch in realen Anwendungen zum Einsatz kommen kann. Unter diesen Randbedingungen soll die Auslenkung des Aktuators maximiert werden. Im Zuge dieser Arbeit wird sich dabei auf eine rein statische Auslenkung und keine zyklische Auslenkung konzentriert. Der Aushärtevorgang soll im Idealfall ohne zusätzliche Vorrichtungen realisiert werden, um eine einfache Herstellung zu ermöglichen. Der Vorteil in der Benutzung eines vorgefertigten Aktuators liegt darin, dass ein Rahmen, wie in der Literatur in Kap. 2.1.4 beschrieben, schon im Aktuator integriert ist und damit einen deutlich vereinfachten Herstellungsprozess ermöglicht. Zudem ist der Zweivegeeffekt bei den verwendeten Aktuatoren bereits ausgeprägt, sodass ein Trainieren der FGL entfällt.

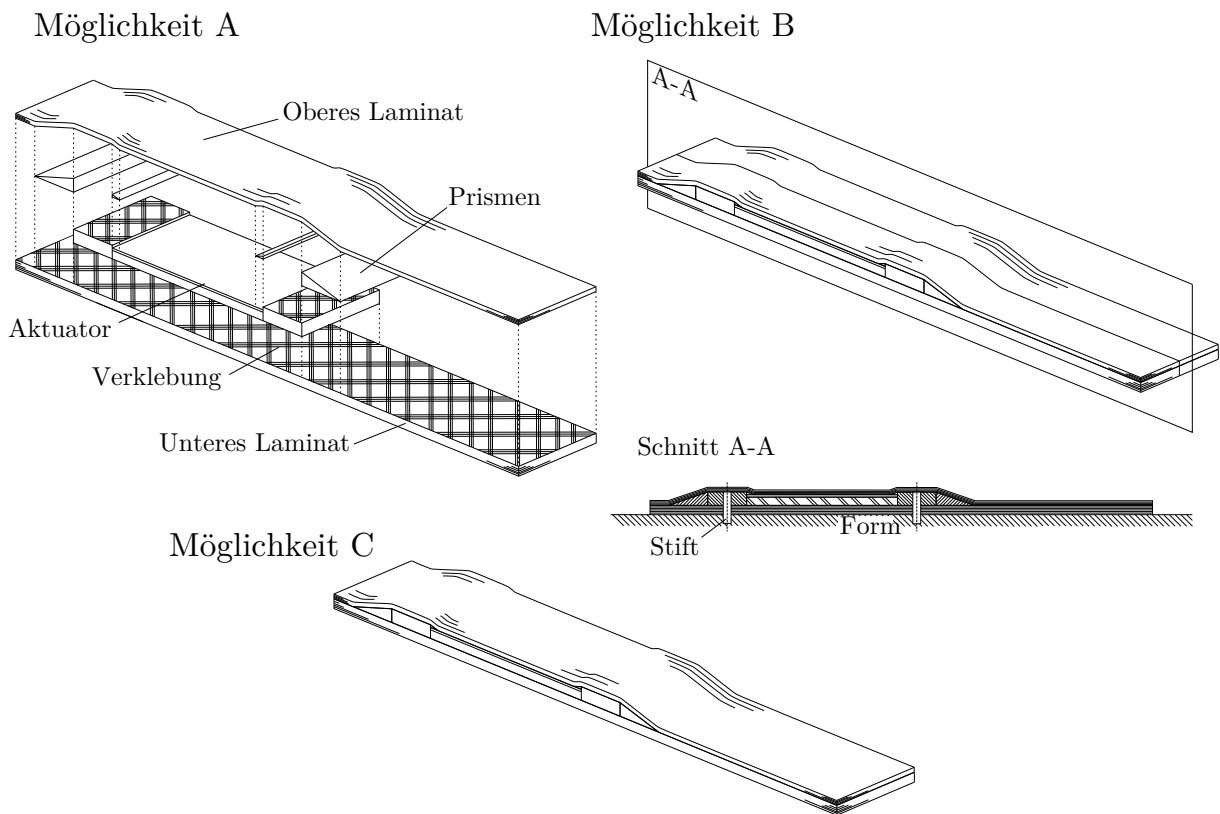
Es wird sich auf den Einsatz von glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) beschränkt. Gegenüber kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) hat GFK den Vorteil einer geringeren Steifigkeit. Dies resultiert bei gleicher Laminatdicke und Faserorientierung in einer größeren Auslenkung des Aktuators. Außerdem ist GFK im Gegensatz zu CFK elektrisch isolierend und vereinfacht dadurch die elektrische Kontaktierung des Aktuators. Ein weiterer Vorteil ist die Transparenz von GFK, wodurch Defekte im Laminat optisch sichtbar sind.

Für die Auswahl des GFK-Werkstoffes ist das wichtigste Kriterium eine Glasübergangstemperatur  $T_g$  des Harzes oberhalb von  $A_f$ , welche bei den Aktuatoren bei  $100\text{ °C}$  liegt. Gleichzeitig soll  $T_g$  nicht zu groß sein, um eine übermäßige thermische Belastung des Aktuators zu vermeiden. Aus dem Datenblatt der Aktuatoren [13] lässt sich eine maximal ertragbare Temperatur der Aktuatoren von  $130\text{ °C}$  herauslesen, wodurch die Auswahl an Epoxidharzen stark eingeschränkt wird. Es wird deshalb das Prepreg HexPly<sup>®</sup>913 von Hexcel ausgewählt. Dieses ist ein UD-Gelege, mit einem Gewichtsanteil der Matrix von 28 % und besitzt eine Aushärtetemperatur von  $125\text{ °C}$ . Es ist ein in der Luftfahrt häufig verwendetes Prepreg-Material und auch innerhalb des Institutes gibt es Erfahrung mit dessen Verarbeitung. Zusätzlich sind bereits Materialkennwerte vorhanden. Eine Übersicht über relevante Temperaturen während des Herstellprozesses ist in Tab. 3.1 gegeben. Gleichzeitig bedeutet die Auswahl des Prepregs, dass ein Autoklav erforderlich ist. Es zeigt sich im weiteren Verlauf der Arbeit, dass der dort verwendete Druck einen deutlichen Vorteil bietet gegenüber einem Aushärten unter Umgebungsdruck bzw. Vakuum, da dieser eine Auslenkung des Aktuators unterdrückt.

**Tab. 3.1:** Überblick über relevante Temperaturen während des Herstellprozesses mit HexPly<sup>®</sup>913

	Temperatur	Wert
	Austenit-Starttemperatur	$60\text{ °C}$
	Austenit-Finishtemperatur	$100\text{ °C}$
	Aushärtetemperatur HexPly <sup>®</sup> 913	$125\text{ °C}$
	Maximale CompActive-Aktuatortemperatur	$130\text{ °C}$

In Abb. 3.1 sind drei in dieser Arbeit herausgearbeiteten Möglichkeiten dargestellt, um die Problemstellung zu lösen, welche sich aus den verschiedenen Temperaturen ergibt. Möglichkeit A beschreibt die Methode, alle Bauteile separat zu fertigen und im Anschluss zu verkleben. Zuerst werden das untere Laminat und das obere Laminat gefertigt. Dabei wird für das obere Laminat eine separate Form benötigt, um den Aktuator umschließen zu können. Zusätzlich werden zwei große und zwei kleine Prismen benötigt. Zwischen dem Aktuator und dem unteren Laminat muss ein sanfter Übergang ermöglicht werden. Dieser ist nötig, um einerseits die Faser der oberen Lagen nicht zu knicken und andererseits, um ein Loslösen der Fasern von der Form während der Herstellung zu vermeiden. Nachdem alle Bauteile separat gefertigt wurden und die beiden Lamine ausgehärtet wurden, können die einzelnen Bauteile miteinander kaltverklebt werden. Dadurch wird das Temperaturproblem umgangen. Zu beachten ist jedoch, dass ein Kleber verwendet werden



**Abb. 3.1:** Drei Herstellungsmethoden für in ein Faserverbundlaminat eingebettete Formgedächtnisaktuatoren

muss, welcher  $A_f$  ertragen kann, um ein Ablösen des Aktuators vom oberen Laminat im späteren Betrieb zu vermeiden.

Möglichkeit B beschreibt das Verfahren, alle Bauteile in einem Vorgang herzustellen und auszuhärten. Aufgrund der Überschreitung von  $A_f$  wird der Aktuator aktiviert. Durch Stifte, welche durch ein Loch in den Ankern des Aktuators geführt sind und in Löchern in der Form stecken, kann eine Kontraktion in Längsrichtung des Aktuators verhindert werden. Während des Autoklavprozesses herrscht ein Umgebungsdruck von 3 bar und zusätzlich ein Vakuum um das Bauteil. Durch diese Kraft wird der Aktuator daran gehindert, sich auszulenken. Löcher in den Ankern des Aktuators stellen kein Problem dar. Bei CompActive ist ein Aktuator erhältlich, welcher mithilfe eines Stiftes auf einem Metallblech aufgebracht ist (vgl. Abb. 4.2, Abb. 2.12). Zusätzlich ergeben sich Löcher im unteren Laminat. Durch Einbringen von einzelnen Rovings, welche um das Loch geführt werden, kann die Last um diese Löcher geführt werden.

Möglichkeit C ist eine Abwandlung von Möglichkeit B. Hier werden die Stifte weggelassen, wodurch der Aktuator an einer Kontraktion in Längsrichtung nur durch die Steifigkeit der EPDM-Schicht des Aktuators und des Formschlusses der umgebenden Faserlagen gehindert wird. Dieser Formschluss kann nur gewährleistet werden, wenn die Lagen durch den von außen anliegenden Druckunterschied des Vakuums und des Autoklavs an einer Verformung verhindert werden.

Eine dieser Optionen soll ausgewählt und umgesetzt werden. Wie in Kap. 1 beschrieben, soll zusätzlich eine Rückfalloption ausgearbeitet werden, falls eine der warmaushärtenden Optionen fehlschlägt. Die größte Herausforderung wird im Aushärteprozess im Autoklav oberhalb von  $A_f$  gesehen. Um eine Aushärtung oberhalb dieser Temperatur zu vermeiden, wird ein kaltaushärtenden Epoxidharz für diese Rückfalloption verwendet. Während des Aushärteprozesses wird  $A_s$  nicht überschritten, sodass es zu keiner Aktivierung der FGL kommt. Dadurch werden keine zusätzlichen Vorrichtungen für ein Festhalten des Aktuators benötigt. Gleichzeitig bedeutet dies unter Verwendung gängiger Harzsysteme auch, dass  $T_g$  der Matrix nicht oberhalb von  $A_f$  liegt und es damit zu einem Aufweichen des Laminates bei Aktivierung der FGL kommen kann. Um zu untersuchen, ob dies eine umsetzbare Möglichkeit darstellt, muss die Temperatur innerhalb des Laminates bestimmt werden. Beispielsweise kann es der Fall sein, dass  $T_g$  während der kurzen Aktivierungszeit des Aktuators nur in der unmittelbaren Nähe der FGL-Drähte überschritten wird und die Temperatur des unliegenden Laminates unterhalb von  $T_g$  bleibt. Dadurch kann eine Kraftübertragung weiterhin möglich bleiben und wäre zumindest im Rahmen dieser Arbeit ausreichend.

## 3.2 Auswahl eines Herstellungsverfahrens

Möglichkeit A bietet den großen Vorteil, das komplexe Zusammenwirken verschiedener Werkstoffe unter Temperatureinfluss sowie unter dem chemischen Prozess des Aushärtens der Matrix zu umgehen. Damit stellt dies einen einfachen Schritt zur Lösung der Herausforderungen dar. Gleichzeitig gibt es deutliche Nachteile im Herstellungsprozess. Zum einen wird für das obere Laminat eine Form benötigt, welche im Vorfeld gefräst und deren Oberfläche poliert werden muss. Soll der Aktuator in einer späteren Anwendung in eine komplexe Geometrie eingebaut werden, wird für jede Position des Aktuators eine individuelle Form benötigt, was den Herstellungsprozess deutlich komplexer und damit teurer werden lässt. Mit dem Laminieren und Aushärten des oberen und unteren Laminats, ergibt sich außerdem ein deutlich verlängerter Herstellungsprozess.

Dem gegenüber steht Möglichkeit B. Dadurch, dass sowohl das Laminieren der Lamine als auch das Einbetten des Aktuators in einem Schritt geschieht, ergibt sich eine einfache Lösung für den Herstellungsprozess und damit auch eine deutlich geringere Komplexität im Bezug auf benötigte Werkzeuge und Formen. Für das obere Laminat wird hier keine weitere Form benötigt. Nachdem das untere Laminat laminiert und der Aktuator aufgelegt worden ist, wird das obere Laminat auf das bereits bestehende Laminat gelegt und bildet so die Kontur des Aktuators ab. Für das untere Laminat ist im Falle einer flachen Probe nur eine ebene Unterlage aus Metall oder aus einem anderen temperaturbeständigen Formwerkstoff notwendig. In diese müssen zwei Löcher gebohrt werden, in welche Stifte gesetzt werden, auf welche wiederum der Aktuator gesteckt wird. Im Bezug auf eine spätere Anwendung mit vielen Aktuatoren, welche in ein komplexes Laminat eingebettet werden, ist diese Lösung einfach umsetzbar und bietet nur einen geringen Mehraufwand gegenüber einem Laminat ohne eingebetteten Aktuator. Ein großer Nachteil ist die Komplexität des Aushärteprozesses. Dadurch, dass der Aktuator aktiviert wird, werden während des Aushärteprozesses Spannungen in das Laminat eingebracht. Durch

das Zusammenwirken von mehreren verschiedenen Werkstoffen mit verschiedenen Temperatureausdehnungskoeffizienten ergeben sich zusätzliche Spannungen im Laminat. Diese können die spätere Lastaufnahme beeinträchtigen. Aufgrund dessen muss der Aushärteprozess im Vorfeld genau bekannt sein, um damit ein Kenntnis des Spannungsfeldes im Bauteil zu erhalten.

Möglichkeit C vereinfacht den Herstellungsprozess im Vergleich zu Möglichkeit B nochmals. Durch den Verzicht der Stifte in der Form, kann der Aktuator während des Laminierens einfach an die vorgesehene Stelle gelegt werden. Dies stellt somit den einfachsten der drei Herstellungsprozesse dar und ist damit einfach für komplexe Lamine sowie Geometrien anwendbar. Zu beachten sind jedoch die gleichen Prozesse während des Aushärtevorgangs wie in Möglichkeit B. Da der Aktuator nicht an einer Kontraktion in Längsrichtung gehindert wird, muss vorab mittels Simulation geklärt werden, ob sich der Aktuator zusammenzieht.

In Tab. 3.2 werden die Möglichkeiten hinsichtlich gewählter Bewertungskriterien beurteilt und eine Übersicht über Vor- und Nachteile gegeben.

**Tab. 3.2:** Bewertung der drei Möglichkeiten zur Einbettung hinsichtlich von Bewertungskriterien (++: gut, o: neutral, --: schlecht)

	Möglichkeit A	Möglichkeit B	Möglichkeit C
Temperaturproblematik	+	o	-
Erkenntnisgewinn	-	o	++
Werkzeugaufwand	-	+	++
Skalierbarkeit in Anwendungen	--	+	++

Aufgrund der in diesem Kapitel bzw. in Tab. 3.2 gezeigten Vor- und Nachteile eines jeden Verfahrens soll Möglichkeit C weiterverfolgt werden. Dies liegt vor allem im geringen Fertigungsaufwand sowie einer Skalierbarkeit auf große Bauteile bzw. komplexe Formen begründet. Als Voraussetzung dafür muss jedoch gezeigt werden, dass eine Längskontraktion nicht auftritt. Damit soll auch gezeigt werden, dass eine Aushärtung des Laminates oberhalb von  $A_f$  möglich ist. Die Umsetzbarkeit wird in Kap. 4 mithilfe von Simulationen untersucht. Zusätzlich soll, wie eingangs erwähnt, die Verwendung einer kaltaushärtende Matrix mit einer Aushärtetemperatur unterhalb von  $A_s$  untersucht werden.

### 3.3 Detailkonstruktion

Die Breite der Proben entspricht der Breite eines Aktuators (20 mm). In Längsrichtung werden die Aktuatoren außermittig platziert. Am kurzen Ende werden die Proben auf einer Länge von 20 mm eingespannt. Das lange Ende vergrößert die Verschiebung in Biegerichtung des Aktuators und macht die Verschiebung damit deutlich erkennbar.

In Längsrichtung müssen die Lagen des oberen Laminates in einem flachen Winkel zum unteren Laminat geführt werden. Dadurch ergibt sich ein im Querschnitt dreieckiger Hohlraum mit einer auf 10 mm festgelegten Länge (vgl. Abb. 3.2). Aufgrund von vorherigen

Erfahrungen wird dieser Hohlraum mit UD-Lagen des HexPly®913 aufgefüllt, welche längs der Tiefenrichtung der Probe verlaufen. Dadurch ergibt sich eine steife Form, bei der die Steifigkeit jedoch aufgrund der Faserorientierung gering gehalten wird. Eine weitere Möglichkeit ist, den Hohlraum mit einem weichen Material wie EPDM aufzufüllen. Der Vorteil dieser Möglichkeit ist eine geringere Gesamtsteifigkeit der Probe und damit eine größere Verbiegung der Probe. Zu untersuchen ist jedoch, ob Lagen des oberen Laminates vom EPDM ausreichend gestützt werden und damit am Knicken gehindert werden. Unter anderem deswegen wird diese Möglichkeit im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht.

Da die Aktuatoren vollständig von GFK umgeben sind, muss eine Möglichkeit gefunden werden, die Drähte aufzuwärmen. Dies wird häufig durch Joulsche Wärme<sup>1</sup> erreicht. Dafür muss der Aktuator elektrisch an eine Stromquelle angeschlossen sein. Die Kontaktflächen des Aktuators befinden sich auf einem der Anker an den beiden äußersten FGL-Drähten. Eine Möglichkeit ist, flächige Lötstützpunkte auf die Kontaktierung des Aktuators zu löten und im Anschluss an das Einbetten ein kleines Loch in das Laminate oberhalb des Lötstützpunktes zu bohren und durch dieses ein Kabel anzulöten. Eine weitere Möglichkeit ist, vor der Einbettung ein Kabel an den Aktuator zu löten und dieses durch das Laminate nach außen zu führen. Dadurch, dass im Herstellungsprozess mehrere Aktuatoren nebeneinander eingebettet werden (vgl. Kap. 5.2), müssen die Kabel in Längsrichtung nach außen geführt werden. Da die Proben am kurzen Ende eingespannt werden und befürchtet wird, dass der Druck der Einspannung die Kabel brechen könnte, werden die Kabel über das lange Ende herausgeführt. Dadurch ergibt sich eine leicht erhöhte Steifigkeit der Proben in Richtung der Probendicke. Da Kupferdrähte mit 0,5 mm Durchmesser verwendet werden können, kann die Erhöhung der Steifigkeit jedoch vernachlässigt werden. Außerdem tragen die Kupferdrähte nicht zur Steifigkeitserhöhung im Bereich des Aktuators bei.

Die Aufheizung des Drahtes kann ebenfalls durch Aufheizen mit einer externen Wärmequelle durchgeführt werden. Dies wird häufig angewandt, wenn FGL als passives Stелеlement in einem System eingesetzt werden, beispielsweise in einem Thermostat. Im vorliegenden Fall ist dies durch die ausreichende Temperaturbeständigkeit des Laminates ebenfalls möglich, jedoch ist diese Methode deutlich komplizierter umzusetzen als eine Aufwärmung durch Joulsche Wärme.

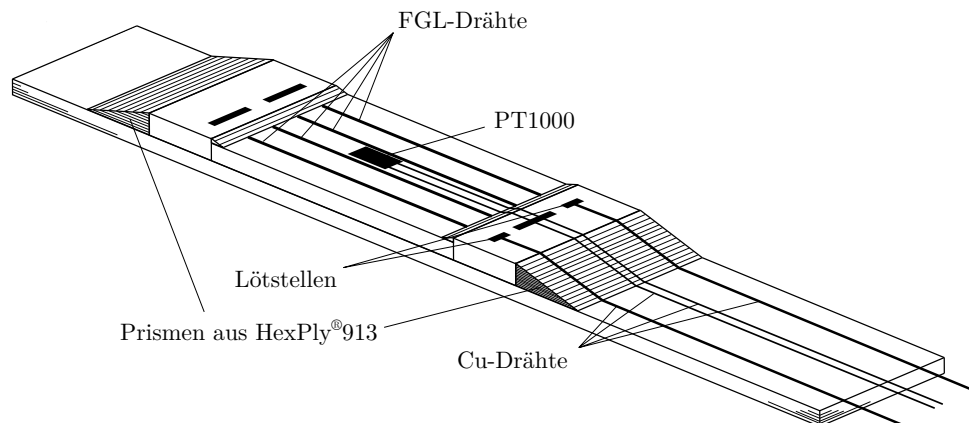
Als letzte Methode kann durch induktive Erwärmung der FGL-Draht innerhalb des Aktuators aufgeheizt werden. Dies hat den Vorteil, dass keine elektrische Kontaktierung durch das Laminate notwendig ist und somit Drähte innerhalb des Laminates entfallen. Nachteilig ist dabei die notwendige Unterbringung der Induktionsspule im Bauteil oder Laminate. Im Rahmen dieser Arbeit wird die induktive Methode jedoch als zu komplex eingeschätzt. Es wird die Methode der elektrischen Kontaktierung mithilfe von im Laminate verlegten Drähten ausgewählt. Die Drähte werden entsprechend Abb. 3.2 im Laminate verlegt.

Um die Temperaturen in der Grenzschicht zwischen EPDM des Aktuators und dem oberen Laminate messen zu können, wird ein Temperatursensorelemente vom Typ PT1000

---

<sup>1</sup>Joulsche Wärme ist Wärme, welche durch einen Stromfluss in einem elektrischen Leiter erzeugt wird. Diese ist proportional zum elektrischen Widerstand des Leiters und quadratisch zur Stromstärke.

mittig zwischen den FGL-Drähten eingebettet. Diese Temperaturelemente weisen einen Messwiderstand auf, welcher proportional zur Temperatur ist. Der nominelle Widerstand ist  $1000\ \Omega$  bei  $0\ ^\circ\text{C}$ . Der Sensor liegt mittig zwischen den Drähten. Es wird eine Zweileiter Messtechnik verwendet, um die Anzahl der Kabel im Laminat gering zu halten (vgl. Abb. 3.2).



**Abb. 3.2:** Detailansicht der Probe mit Formgedächtnislegierung (FGL) mit Leitern aus Kupfer (Cu) (Abbildung ohne oberes Laminat)

# Kapitel 4

## Simulation in ANSYS und Entwicklung eines Lagenaufbaus

Wie in Kap. 3 beschrieben, muss vor der Herstellung der Proben bekannt sein, wie sich die FGL während des Aushärteprozesses im Autoklav verhält. Außerdem soll eine Vorhersage der Durchbiegung gemacht werden, welche sich nach der Aushärtung durch die Aktivierung des Aktuators ergibt. Dafür werden beide Lastfälle in ANSYS unter Verwendung eines in GFK eingebetteten Aktuators modelliert und damit ein Erkenntnis über das Verhalten erzielt. Zusätzlich wird mithilfe der Simulation ein Lagenaufbau entwickelt, welcher den Belastungen im FE-Modell standhält.

### 4.1 Aufbau eines Ersatzmodells für den Aktuator

Um eine Modellierung des Aktuators im Speziellen möglich zu machen, müssen Ersatzmodelle erstellt werden und diese validiert werden. Dieses Ersatzmodell wird dann für die Simulation des Aushärteprozesses und der Durchbiegung der eingebetteten Aktuatoren verwendet.

#### 4.1.1 Ersatzmodell für den Formgedächtniseffekt

Zuerst soll ein vereinfachtes Modell für den Formgedächtniseffekt entwickelt werden. Die vorliegenden Aktuatoren nutzen den intrinsischen Zweiwegeeffekt. In ANSYS kann neben einem Modell für die Superelastizität auch ein Modell für den Formgedächtniseffekt nach [3] implementiert werden [35]. Dieses bildet die makroskopischen Effekte der Transformation zwischen den beiden Kristallzuständen ab [3]. Für die Implementierung dessen sind jedoch einige Stoffparameter notwendig. Da die verwendete Legierung in den Aktuatoren unbekannt ist, müssten diese Parameter in aufwendigen Versuchen ermittelt werden (vgl. [17]). Dies ist im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Zusätzlich hat sich gezeigt, dass der Rechenaufwand bereits für sehr kleine und weniger komplexe Modelle mit wenigen Abhängigkeiten sehr groß ist [17]. Deswegen soll ein vereinfachtes Modell der FGL-Drähte erstellt werden. Für eine Einbettung des Aktuators sind die genauen Um-



wandlungsvorgänge in der FGL nicht relevant. Vielmehr sind die makroskopischen Auswirkungen wie die Verformung, Belastung und die zugehörigen Temperaturen von größerer Wichtigkeit. Das Material der FGL kann deshalb in der Simulation wie eine Unbekannte auftreten, der stoffspezifische Eigenschaften aufgeprägt werden. Aufgrund dessen wird der Zweivegeeffekt stark vereinfachend mithilfe einer negativen Temperaturendeckungskoeffizienten  $\alpha$  modelliert. Zwischen  $A_s$  und  $A_f$  simuliert dieser die Kontraktion, welche sich durch den Zweivegeeffekt ergibt.  $\alpha$  wird vereinfacht als konstant zwischen  $A_s$  und  $A_f$  angenommen. Aus den Produktdatenblättern von CompActive lässt sich für den Aktuator  $A_s = 60^\circ\text{C}$  und  $A_f = 100^\circ\text{C}$  ablesen [13]. Nach Auskunft von CompActive besitzt die FGL eine maximale thermische Dehnung von etwa  $\epsilon_{therm} = 0,03 \text{ mm/mm}$ , welche nach dem vereinfachten Modell im Transformationsbereich auftritt. Damit ergibt sich  $\alpha$  zu

$$\alpha = \frac{\epsilon_{therm}}{\Delta T} = \frac{0,03 \text{ mm/mm}}{-40^\circ\text{C}} = -7,5 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}} \quad (4.1)$$

Wie in der Validierung durch Versuche in Kap. 5.1 gezeigt wird, tritt jedoch nicht immer die maximale Dehnung auf, sodass sich durch eine niedrigere Dehnung ein geringeres  $\alpha$  ergibt. Dies ist in Abb. 4.1 gezeigt. Zusätzlich werden für  $\alpha$  und den E-Modul die Werte in den beiden Phasen Martensit und Austenit benötigt. Für Temperaturen im reinen Martensit und Austenit werden für  $\alpha$  Literaturwerte für Nitinol<sup>1</sup> [12, 70, 72] angenommen (vgl. Anhang B).

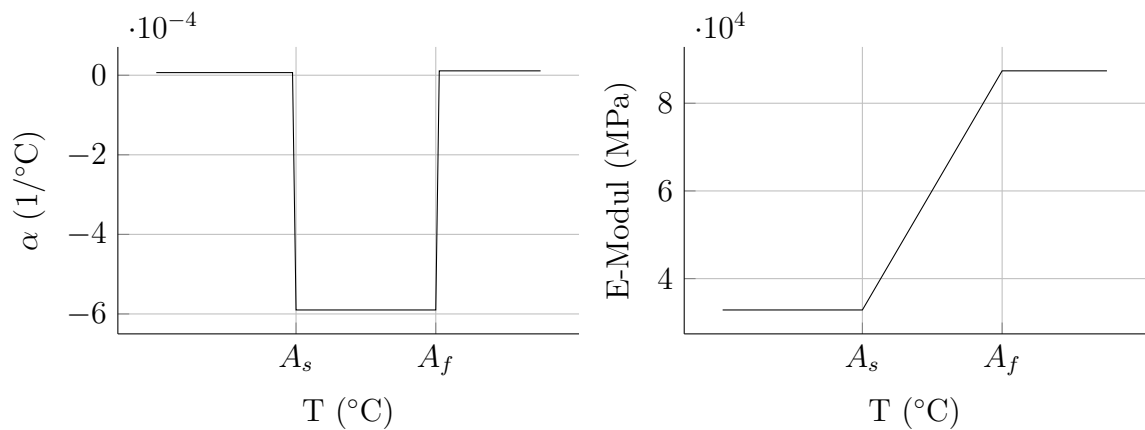
Die Werte für die beiden E-Moduln werden durch Versuche in Kap. 5.1 ermittelt. Zwischen  $A_s$  und  $A_f$  wird ein linearer Verlauf des E-Moduls angenommen. Dies stellt eine deutliche Vereinfachung gegenüber der Realität dar. Im Zuge der Untersuchungen in dieser Arbeit ist dies jedoch ausreichend genau, da nur die makroskopischen Auswirkungen der Dehnung interessieren. Abweichungen von realen Effekten können durch eine Anpassung der Stoffparameter für dieses Modell aufgefangen werden. In Abb. 4.1 sind die Temperatur- und E-Modulverläufe aufgezeigt.

Ein Problem, welches sich aus diesem einfachen Stoffmodell ergibt, ist die Tatsache, dass die angegebene thermische Dehnung immer erreicht wird, unabhängig von der Belastung. Eine höhere Belastung führt dabei zu einer immer größeren Spannung innerhalb der FGL, bis diese die Zugfestigkeit des Werkstoffes überschreitet. Nach Auskunft von CompActive liegt die Zugfestigkeit der FGL bei 300 MPa für eine hohe Zyklenzahl bis 300.000. Für die spätere Auslegung des Laminats wird diese Zugfestigkeit deshalb als Grenzwert für die auftretende Normalspannung in der FGL angenommen.

### 4.1.2 Geometrisches Ersatzmodell für den Aktuator

Um eine Reduktion der Komplexität des Modellaufbaus zu erreichen, soll der Aktuator in ANSYS vereinfacht modelliert werden. Das Modell in ANSYS vereinfacht die FGL-Drähte hin zu einer uniformen Schicht aus FGL mit der selben Dicke wie der Durchmesser der Drähte (vgl. Abb. 4.2). Der wichtigste Grund dafür liegt darin, dass auf diese

<sup>1</sup>Nitinol ist ein Name für eine Gruppe an FGL aus NiTi. Der Name steht für Nickel Titan Naval Ordnance Laboratory, an dem es 1959 entwickelt wurde.

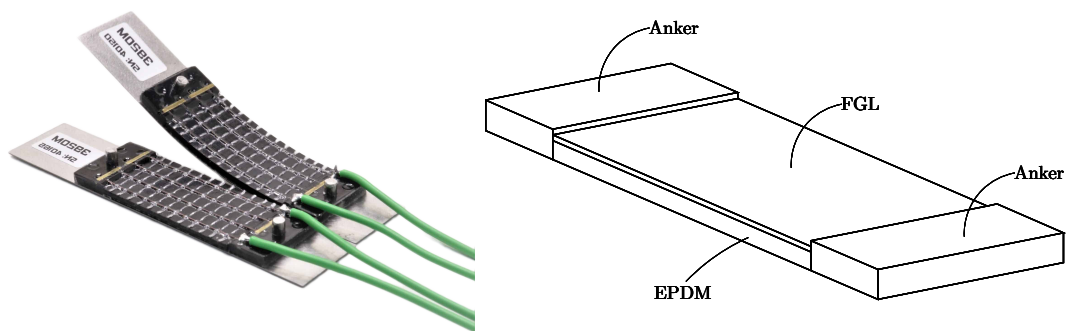


**Abb. 4.1:** Verläufe des Wärmeausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  und des E-Moduls, wie sie für die Simulationen verwendet werden

FGL-Schicht später Faserverbundlagen modelliert werden. Dies ist deutlich einfacher zu erreichen, wenn keine diskreten Drähte, sondern eine flache Schicht vorliegt. Werden nun für die FGL-Schicht die E-Moduln angenommen, welche für den Draht gelten, so würde dies in einer deutlich zu steifen Schicht resultieren. Aufgrund dessen wird das Verhältnis der Querschnittflächen zwischen Drähten und der uniformen Schicht ermittelt und die E-Moduln mit diesem Verhältnis multipliziert. Dieses ergibt sich zu

$$\frac{A_{\text{Drähte}}}{A_{\text{Schicht}}} = \frac{0,758 \text{ mm}^2}{10 \text{ mm}^2} = 0,0785 \quad (4.2)$$

Weiter zu berücksichtigen ist die Querkontraktion in der FGL-Schicht. Diese tritt nur bei der Modellierung der FGL als Schicht auf, ist bei den Drähten jedoch vernachlässigbar klein. Die Temperatureausdehnung ist bei Drähten nur in Längsrichtung relevant. Deshalb wird die Temperatureausdehnungskoeffizient der FGL-Schicht quer zur Längsrichtung zu null gesetzt. Die Querkontraktion durch äußere Lasten lässt sich nicht gleichermaßen verringern, sodass eine genaue Betrachtung der resultierenden Verformung und deren Effekte durchgeführt werden muss.



**Abb. 4.2:** Aktuator 3920M von CompActive (links) und Modell in ANSYS (rechts)

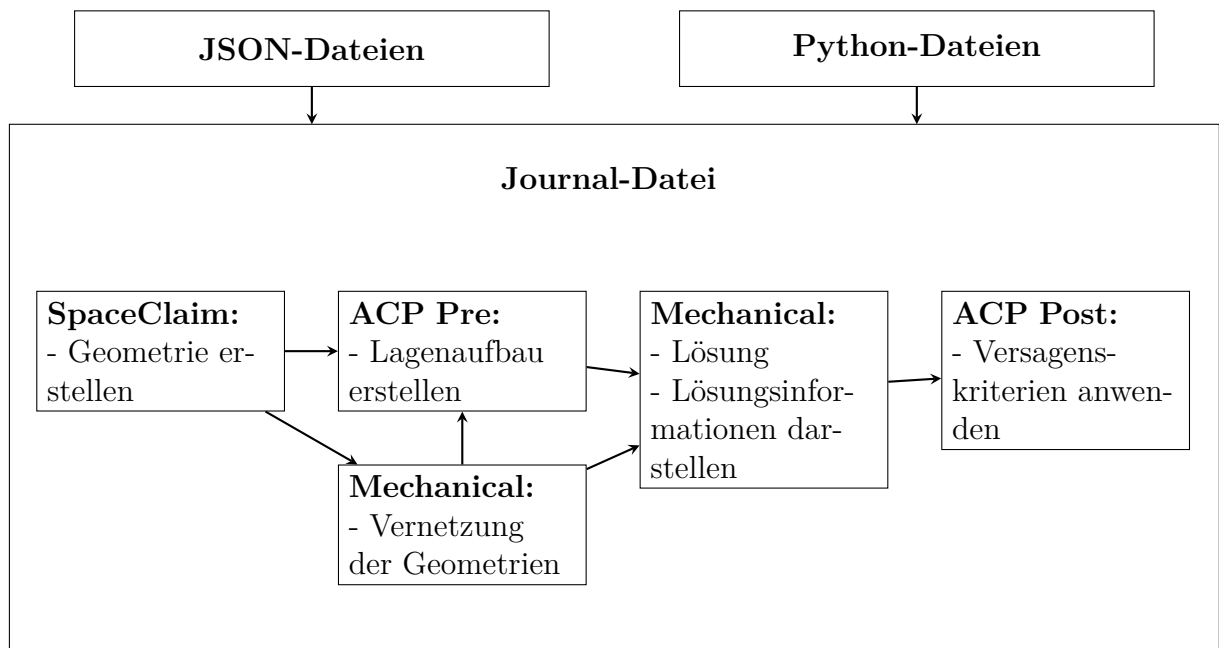
## 4.2 Aufbau eines Modells für den Autoklavprozess und Aktivierung des Aktuators

Im Folgenden wird nun der Aufbau des ANSYS Modells beschrieben, mithilfe dessen der Aushärteprozess im Autoklav und die Biegung der Proben simuliert werden. Dafür werden zuerst die in ANSYS *Workbench* aufgebaute Struktur sowie die in *Mechanical* modellierten Belastungen beschrieben. Im Anschluss wird der Lagenaufbau optimiert und mithilfe des ausgewählten Lagenaufbaus die Ergebnisse der Simulation beschrieben. Abschließend wird der Einfluss des Rechnetzes auf die Ergebnisse beschrieben.

### 4.2.1 Workbench-Modell

Das Modell wird in ANSYS *Workbench* (2022R2) aufgebaut. Um später den Lagenaufbau möglichst einfach variieren zu können, wird die gesamte Berechnung mithilfe eines Skriptes aufgebaut und ausgeführt. Dieses ist in der Sprache *IronPython* geschrieben. Diese sog. Journal-Datei erstellt dabei alle Module innerhalb der *Workbench* Umgebung und verlinkt diese untereinander. Im Anschluss daran ruft diese für jedes Modul eine separate Python-Datei auf und führt die darin enthaltenen Befehle aus. Durch zwei Eingabedateien im *JSON*-Dateiformat können die Geometrie der Proben geändert werden sowie Lagenaufbauten eingegeben und aktiviert werden. Das Schema des Modellaufbaus ist in Abb. 4.3 dargestellt.

Zuerst werden die Geometrien innerhalb des Moduls *SpaceClaim* erstellt. Es werden separate Geometrien für die Prismen, den Aktuator sowie für oberes und unteres Laminat



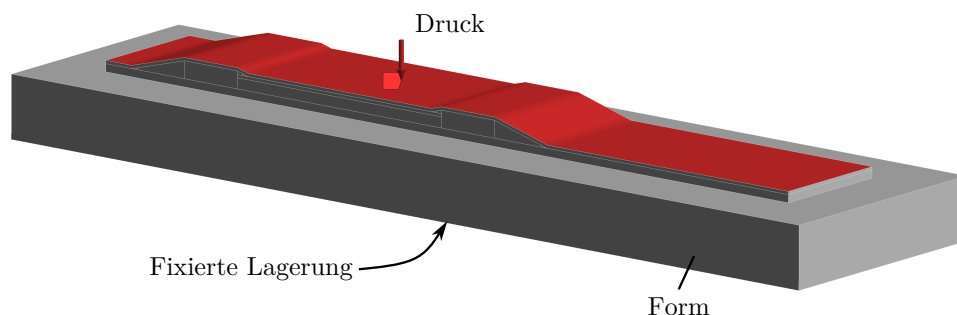
**Abb. 4.3:** Schema der Berechnung innerhalb ANSYS *Workbench*, welches durch das Skript erstellt wird

erstellt. Letztere werden als Flächen erstellt, welche später im Modul *ACP Pre* zu Volumenkörpern umgewandelt werden. Innerhalb *ACP Pre* wird für die beiden Lamine separat ein Lagenaufbau erstellt. Dafür wird aus den Eingabedateien der entsprechende Lagenaufbau eingelesen und auf die Geometrie angewandt. Hierfür werden innerhalb *ACP Pre* die Orientierung der Fasern, die Drapierung und der Lagenaufbau festgelegt und anschließend ein Volumenkörper erstellt. Alle anderen Geometrien aus *SpaceClaim* werden in *Mechanical* vernetzt und einem Material zugewiesen. Alle Volumenkörper werden dann in zwei separate *Mechanical*-Module geladen, in denen für die beiden Lastfälle separat zuerst Kontakte definiert werden, Randbedingungen festgelegt werden und im Anschluss das Modell gelöst wird. Einzelheiten dazu finden sich in Kap. 4.2.2 und Kap. 4.2.3. Innerhalb der *Mechanical*-Module werden zusätzlich Lösungsinformationen wie Spannungen und Dehnungen angezeigt. Die Lösungsdatei aus *Mechanical* für beide Lamine wird zusätzlich in das Modul *ACP Post* geladen. Darin können für Faserverbundwerkstoffe spezifische Versagenskriterien sowie Spannungen angezeigt werden.

## 4.2.2 Modell des Autoklavprozesses

In diesem Kapitel werden die Kontakte und Randbedingungen betrachtet, welche innerhalb des *Mechanical*-Moduls erstellt werden. Diese wirken sich auf die Ergebnisse aus und müssen damit der in der Realität vorhandenen Bedingungen entsprechen.

Während des Autoklavprozesses wird das Bauteil unter Vakuum gehalten. Zusätzlich wird ein Umgebungsdruck von 3 bar aufgeprägt, wodurch sich ein Druckunterschied von näherungsweise 4 bar ergibt. Dieser wird in ANSYS ebenfalls durch einen Druck, welcher auf der Oberfläche der Proben lastet, simuliert. Die Form aus Stahl wird im Raum mithilfe einer *fixierten Lagerung* auf der Unterseite festgelegt. Die Randbedingungen sind in Abb. 4.4 aufgezeigt.



**Abb. 4.4:** Randbedingungen in der Simulation des Autoklavprozesses (Temperaturrandbedingung nicht dargestellt)

Während der Herstellung wird die Temperatur innerhalb des Autoklaven von Raumtemperatur (22 °C) auf die Temperatur von 125 °C gesteigert, dort wird die Temperatur gehalten und schließlich wieder auf Raumtemperatur gebracht. Während des Aufheizvorgangs fängt die Matrix zunächst an sich zu verflüssigen (siehe Kap. 2.2.3). Oberhalb einer bestimmten Temperatur reagieren die beiden Komponenten miteinander, wodurch das Epoxidharz aushärtet. Das ausgehärtete Laminat wird dann wieder abgekühlt. Soll dieser Aufwärm-

und Aushärteprozess genau beschrieben werden, müssen die chemische Reaktion, die daraus resultierende Volumenabnahme des Harzes sowie die Wärmeströme innerhalb des Bauteils berechnet werden. Daraus können dann die durch den Autoklavprozess induzierten Spannungen berechnet werden. In ANSYS steht dafür das Modul *ANSYS Composite Cure Simulation* (ACCS) zur Verfügung. Aufgrund der Komplexität der zu beachtenden Randbedingungen sowie einem Mangel an Werkstoffdaten, welche für die Simulation benötigt werden, kann dies im Rahmen dieser Arbeit nicht verwendet werden. Für eine Anwendung sei auf [37, 43] verwiesen.

In der Simulation wird die Umgebungstemperatur auf 22 °C festgelegt. Diese stellt damit die Temperatur dar, bei der es anfangs keine thermischen Spannungen gibt. Bei allen Körpern wird die Temperatur dann auf die maximal im Autoklav herrschende Temperatur von 125 °C erhöht. Damit wird die Situation so abgebildet, dass durch das Aufweichen der Matrix beim Aufheizen keine Relativbewegung der Körper und damit kein Abbau von inneren Spannungen zugelassen wird. Durch das Aushärten der Matrix wird dieser Spannungszustand dann eingefroren und es findet kein Abbau der Spannungen bei Abkühlen auf Raumtemperatur statt. Ein Wärmeübergang zwischen den verschiedenen Körpern wird nicht simuliert.

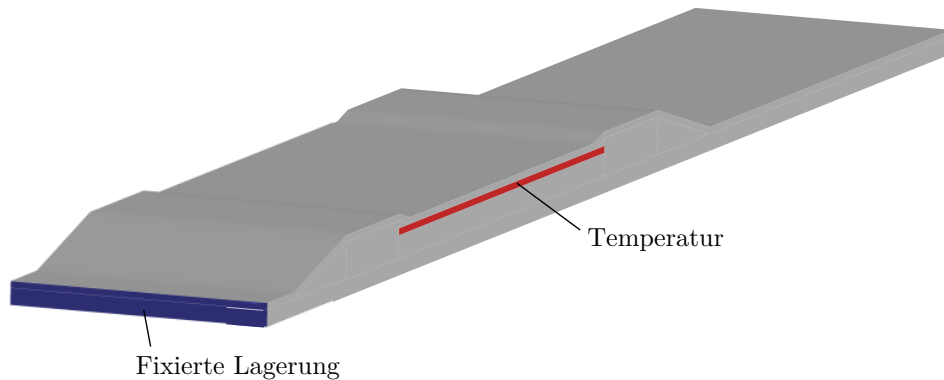
Die einzelnen Körper werden untereinander mit Kontakten verknüpft. Damit wird dem ANSYS-Solver mitgeteilt, wie sich die gegenüberliegenden Knoten beider Körper zueinander verhalten sollen. Am einfachsten ist der Kontakttyp *Verbund*, welcher weder ein Loslösen der beiden Körper voneinander erlaubt, noch eine Relativbewegung der Körper zueinander. Dieser Kontakttyp wird mit zwei Ausnahmen für alle Kontakte verwendet. Dies ist ohne Einschränkung gültig für alle Kontakte innerhalb des Aktuators. Zwischen dem Aktuator und beispielsweise den Prismen kann in der Realität jedoch eine Relativbewegung oder gar ein Abheben möglich sein. Mangels genauerer Informationen, wie sich die Körper zueinander in der Realität verhalten, wird jedoch dieser Kontakttyp gewählt. Da dadurch Spannungen, die sich durch die ungleichen Wärmeausdehnungskoeffizienten ergeben, nochmals verstärkt werden, führt diese Annahme in der Simulation zu höheren Beanspruchungen der Bauteile als in der Realität.

Abweichend von diesen Kontakten wird der Kontakt zwischen der FGL-Schicht und dem oberen Laminat sowie der Kontakt zwischen der EPDM-Schicht und dem unteren Laminat mit dem Kontakttyp *Keine Trennung* modelliert. Dabei ist eine gegenseitige Relativbewegung zulässig, nicht jedoch ein Abheben der beiden Körper. Werden die einzelnen Drähte des realen Aktuators betrachtet, so wird klar, dass die Kraftübertragung von den Drähten in das Laminat nicht über Schub entlang der Länge der Drähte, sondern über eine Zugbelastung in die Anker des Aktuators und von dort über Schub in das Laminat erfolgt. Dieses Verhalten wird über diese Kontaktbedingung in ANSYS übersetzt.

### 4.2.3 Modell der Biegung der Proben

Analog zum Modell des Autoklavprozesses wird dieses Modell aufgebaut. Dabei wird jedoch die Form, welche im Modell des Autoklavprozesses enthalten war, ausgenommen. Die Aktivierung des Aktuators wird über eine Temperaturrandbedingung simuliert. Die Temperatur der FGL-Schicht wird von Raumtemperatur auf 100 °C erhöht. Durch den

definierten, negativen Temperatursausdehnungskoeffizient (siehe Kap. 4.1.2) kontrahiert die FGL-Schicht in Längsrichtung. Wie in Abb. 4.5 gezeigt, wird das Modell im Raum über eine fixierte Lagerung an einer Stirnseite der Probe festgelegt. In der Realität ist diese Art der Lagerung nicht umzusetzen. Hier wird die Probe, wie in vorherigen Versuchen auch, gemäß Abb. 5.1 geklemmt. Gegenüber dem Modell in ANSYS ist die Probe bei den Versuchen deswegen um 20 mm verlängert.



**Abb. 4.5:** Randbedingungen des ANSYS-Modells für die Biegung

Die Kontakte zwischen den Körpern werden analog zu denen aus dem Autoklavprozess modelliert. Wieder wird über den Kontakttyp *Keine Trennung* zwischen der FGL-Schicht und dem oberen Laminat eine Kraftübertragung über Schub verhindert.

### 4.3 Entwicklung eines Lagenaufbaus

Mithilfe des aufgebauten Modells lässt sich ein Lagenaufbau bestimmen, welcher den Belastungen durch den Aushärtezyklus und der Aktivierung der FGL standhält und gleichzeitig die Deformation bei Aktivierung maximiert. Als Ausgangssituation wird ein Laminat gewählt, welches für dieses Prepreg-Material bereits im Institut Anwendung gefunden hat. Dieses ist für das dicke untere Laminat  $[0, -30, 30, 0, -45, 45, 0, 90]_s$ , für das obere Laminat ist es  $[0, -30, 30, 0]_s$ . Ausgehend davon wird nun eine händische Optimierung durchgeführt, welche zum Ziel hat, die Deformation bei Aktivierung des Aktuators zu maximieren und gleichzeitig die auftretenden Beanspruchungen während des Aushärtezyklus und während der Aktivierung zu ertragen. Es werden folgende Kriterien für eine Optimierung des Lagenaufbaus ausgewählt:

- Die FGL-Schicht soll möglichst weit weg von der neutralen Faser sein, um die Auslenkung zu maximieren. Dies resultiert in einem dicken unteren Laminat und einem dünnen oberen Laminat.
- Beide Lamine sollen einen Lagenaufbau besitzen, welcher so auch in einer realen Anwendung verwendet werden kann.
- Beide Lamine sollen symmetrisch sein. Die Kombination beider Lamine ist unsymmetrisch.

- Große Winkeländerungen zwischen den Lagen sollen vermieden werden. Dadurch können Spannungen, welche sich durch Temperaturänderungen ergeben, vermieden werden.

Für die Optimierung der Lagenaufbauten werden für jedes Laminat die Spannungen während der beiden Lastfälle, die Normalspannung in der FGL-Schicht sowie der Versagensmodus einzelner Schichten nach dem 3D-Puck-Kriterium (siehe Kap. 2.2.2) betrachtet. Die Normalspannung in der FGL-Schicht, dient dabei als Kriterium für eine mögliche Überlastung der FGL-Drähte, der Versagensmodus ist hilfreich für die Interpretation des Spannungsfeldes im Laminat und dadurch der Optimierung dessen.

In Tab. 4.1 und Abb. 4.6 sind die untersuchten Lagenaufbauten sowie die zugehörigen Ergebnisse dargestellt. Diese werden im Folgenden kurz beschrieben. Bis Lagenaufbau Nr. 6 wird die Lagenorientierung und -abfolge des unteren Laminates variiert. Hier ergeben sich kaum Unterschiede in den auftretenden Spannungen sowie der Biegung der Proben. Bei Lagenaufbau Nr. 7 werden die  $0^\circ$ -Lagen des oberen Laminates in die neutrale Faser des Laminates gelegt und damit die Steifigkeit deutlich reduziert. Dies resultiert in einer deutlich geringeren von Mises-Spannung im Laminat während des Autoklavzyklus, jedoch nicht in einer Erhöhung der Deformation. Dies liegt darin begründet, dass sich die Position der  $0^\circ$ -Lagen in Bezug auf das Gesamtlaminat kaum verändert hat. Mit Lagenaufbau Nr. 8 und 9 werden zwei, respektive eine  $0^\circ$ -Lage weggelassen. Dies resultiert in einer deutlichen Erhöhung der Deformation und gleichzeitig einer Erhöhung der Spannung innerhalb des Lagenaufbaus bei Biegung des Laminates. Mit Lagenaufbau Nr. 10 wird die Dicke des unteren Laminates halbiert, wodurch die Deformation weiter erhöht werden kann. Durch Weglassen einer  $0^\circ$ -Lage im oberen Laminat bei Nr. 11 kann ein deutlicher Sprung in der Durchbiegung bei Aktivierung des Aktuators erzielt werden. Eine weitere Erhöhung der Durchbiegung kann nicht erzielt werden. Durch die zunehmende Krümmung steigt die Beanspruchung vor allem im oberen Laminat und übersteigt damit dessen ertragbare Festigkeit.

**Tab. 4.1:** Simulierte Lagenaufbauten für die beiden Laminat

Lagenaufbau Nr.	unteres Laminat	oberes Laminat
1	$[0, -30, 30, 0, -45, 45, 0, 90]_s$	$[0, -30, 30, 0]_s$
2	$[0, -45, 45, 0, 90]_s$	$[0, -30, 30, 0]_s$
3	$[0, -30, 30, 0, 90]_s$	$[0, -30, 30, 0]_s$
4	$[90, -45, 45, 90, -45, 45, 90, 0]_s$	$[0, -30, 30, 0]_s$
5	$[90, -30, 30, 90, -30, 30, 90, 0]_s$	$[0, -30, 30, 0]_s$
6	$[90, -30, 30, 90, -30, 30, 90, 0]_s$	$[0, -45, 45, 0]_s$
7	$[90, -30, 30, 90, -30, 30, 90, 0]_s$	$[-45, 45, 0, 0]_s$
8	$[90, -30, 30, 90, -30, 30, 90, 0]_s$	$[-45, 45, 0]_s$
9	$[90, -30, 30, 90, -30, 30, 90, 0]_s$	$[-45, 45, \bar{0}]_s$
10	$[0, -45, 45, 0, 90]_s$	$[-45, 45, \bar{0}]_s$
11	$[0, -45, 45, 0, 90]_s$	$[-45, 45]_s$

Allgemein zeigt sich, dass bei dicken Lagenaufbauten der Autoklavprozess dimensionierend für den Lagenaufbau ist. Mit abnehmender Dicke und damit Steifigkeit der Laminats sinkt die Spannung im Laminat während des Autoklavprozesses und die Spannung im Laminat während der Biegung steigt. Entgegengesetzt dazu sinkt die Normalspannung in der FGL-Schicht mit abnehmender Dicke des Laminats. Bei keinem Lagenaufbau ist die Normalspannung in der FGL-Schicht nahe der maximal ertragbaren Spannung von 300 MPa.

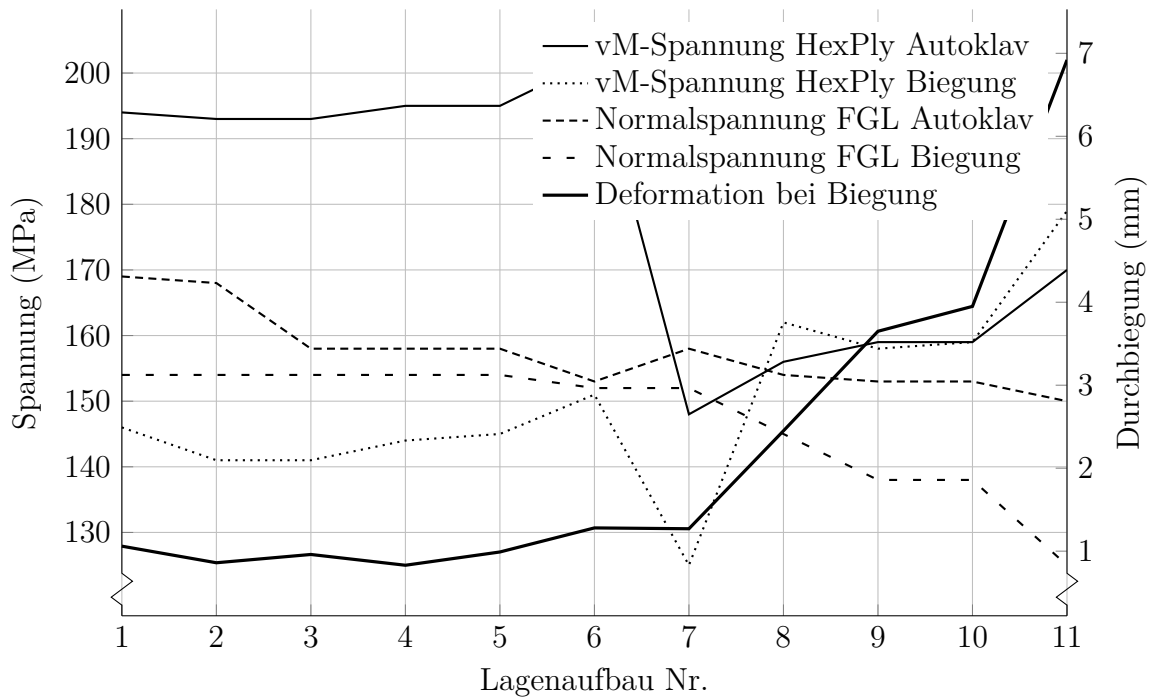


Abb. 4.6: Ergebnisse der Finite-Elemente-Simulation für die untersuchte Lagenaufbauten

Aufgrund der Orthotropie des Lagenaufbaus ist die von Mises-Spannung nur ein erster Indikator für die Beanspruchung des Laminates. In *ACP Post* wird deshalb ein 3D Bruchkriterium nach Puck angewandt. Während die genauen Versagensmechanismen im folgenden Kapitel beschrieben werden, soll hier kurz auf die Ergebnisse eingegangen werden. Bis Lagenaufbau Nr. 6 liegt kein Versagen vor. Ausnahme davon bildet eine Delamination im oberen Laminat. Auf diese wird im folgenden Kapitel eingegangen. Lagenaufbau Nr. 10 und 11 weisen die größte Durchbiegung bei Aktivierung des Aktuators auf. Lagenaufbau Nr. 10 genügt dabei dem in der Luftfahrt weit verbreiteten Sicherheitsfaktor von  $j = 1,5$ , während für Lagenaufbau Nr. 11 nur ein Sicherheitsfaktor von  $1 < j < 1,5$  erreicht wird. Da die Proben keine sicherheitsrelevante Anwendung besitzen, werden sowohl Lagenaufbau Nr. 10 und 11 gefertigt.

## 4.4 Ergebnisse der ANSYS-Simulation

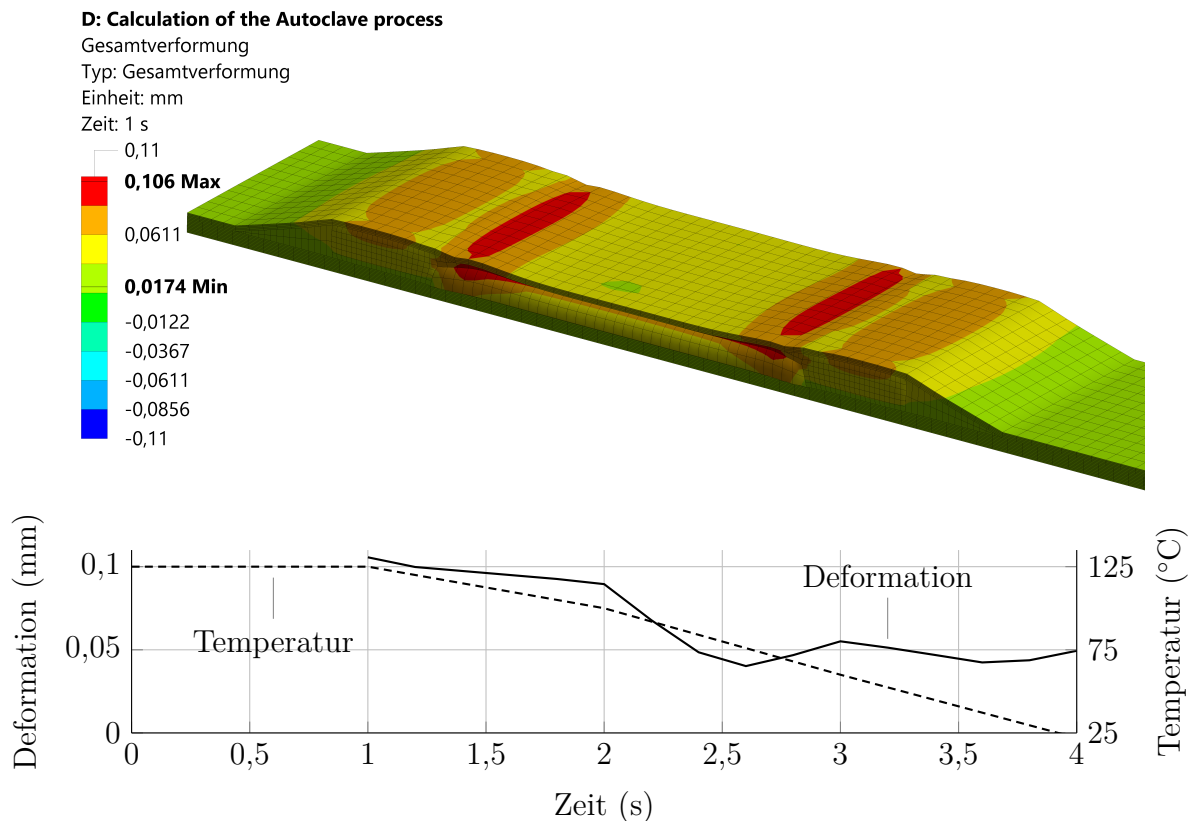
In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Simulation detailliert betrachtet. Falls nicht anders gekennzeichnet, wird hierfür das Modell des Lagenaufbaus Nr. 11 verwendet. Das



Verhalten sowohl während der Biegung als auch während des Aushärtprozesses sind über alle untersuchten Lagenaufbauten gleich. Die Beanspruchung unterscheidet sich lediglich im Betrag der Spannung (siehe Kap. 4.3).

### 4.4.1 Ergebnisse des Autoklavprozesses

Zuerst wird die globale Verformung beim Autoklavprozess in Abb. 4.7 betrachtet. Hier verformt zuerst die Wärmeausdehnung der einzelnen Körper die gesamte Probe. Die FGL-Schicht zieht im oberen Bereich die Anker zusammen und prägt eine Spannung auf diese auf. Beim Absenken der Temperatur nimmt die Verformung aufgrund der Wärmeausdehnung und der FGL-Schicht ab. Im Gegenzug wird die Verformung des anliegenden Drucks des Autoklavs und des Vakuums dominant. Diese wirkt der Temperaturverformung entgegen. Aufgrund der geringen Steifigkeit der EPDM-Schicht wird vor allem diese komprimiert. Im Diagramm aus Abb. 4.7 lässt sich ein Anteil aufgrund des Druckes von ca. 0,05 mm herauslesen (bleibende Verformung nachdem Temperatur bei Raumtemperatur ist). Die Absolutwerte der Verformung bleiben jedoch gering und erreichen ein Maximum von ca. 0,11 mm.



**Abb. 4.7:** Deformation der gesamten Probe während des Abkühlvorgangs des Autoklavprozesses bei einem die Probe umgebenden Druck von 4 bar (dargestellt zur Zeit 1 s, Verformung 10-fach überhöht dargestellt)

Im Besonderen ist die Dehnung in Längsrichtung innerhalb der FGL-Schicht von Interesse. Sie soll minimal bleiben, damit der Aktuator nicht durch das ausgehärtete Laminat im kontrahierten Zustand verbleibt und damit der Zweiwegeeffekt nutzbar bleibt. Um das Ergebnis interpretieren zu können, ist eine Kenntnis darüber notwendig, wie ANSYS die Dehnungen berechnet. Hier muss unterschieden werden zwischen einer thermischen Dehnung  $\varepsilon_{th}$  und einer elastischen Dehnung  $\varepsilon_e$ . Die thermische Dehnung resultiert aus dem Produkt aus Temperaturexpansionskoeffizient  $\alpha$  und der Temperaturänderung. Für die Gesamtdehnung  $\varepsilon_{Tot}$  ergibt sich

$$\varepsilon_{Tot} = \varepsilon_e + \varepsilon_{th} \quad (4.3)$$

mit

$$\varepsilon_{th} = \alpha \Delta T \quad (4.4)$$

Die thermische Dehnung ist damit konstant in der gesamten FGL-Schicht des Aktuators bei allen untersuchten Lagenaufbauten. Sie ergibt sich ausgehend von Raumtemperatur bei der Aushärtetemperatur von 125 °C (ausgehend von Raumtemperatur) zu

$$\varepsilon_{th} = -0,0249 \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \quad (4.5)$$

Diese negative thermische Dehnung ergibt sich rein aus der Modellierung des FGE durch den negativen thermischen Ausdehnungskoeffizienten (vgl. Kap. 4.1). In Abb. 4.8 ist die elastische Dehnung in Längsrichtung der Probe abgebildet. Mithilfe der überhöhten Darstellung der Verformung ist der Einfluss der Querkontraktion auf die Dehnung sichtbar. Aufgrund des Kontaktes zu den Ankern an den Stirnseiten der Schicht, kann die FGL nur in der Mitte der Schicht kontrahieren. Dadurch werden zusätzliche Spannungen (siehe

#### D: Calculation of the Autoclave process

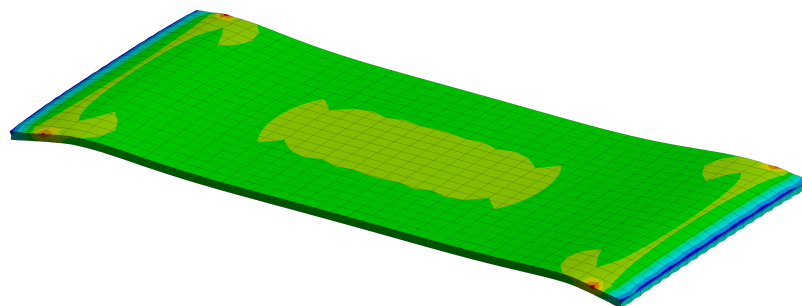
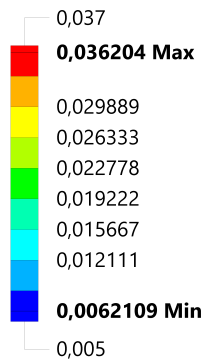
Normale elastische Dehnung 2

Typ: Normale elastische Dehnung(X-Achse)

Einheit: mm/mm

Lösungskoordinatensystem

Zeit: 1 s

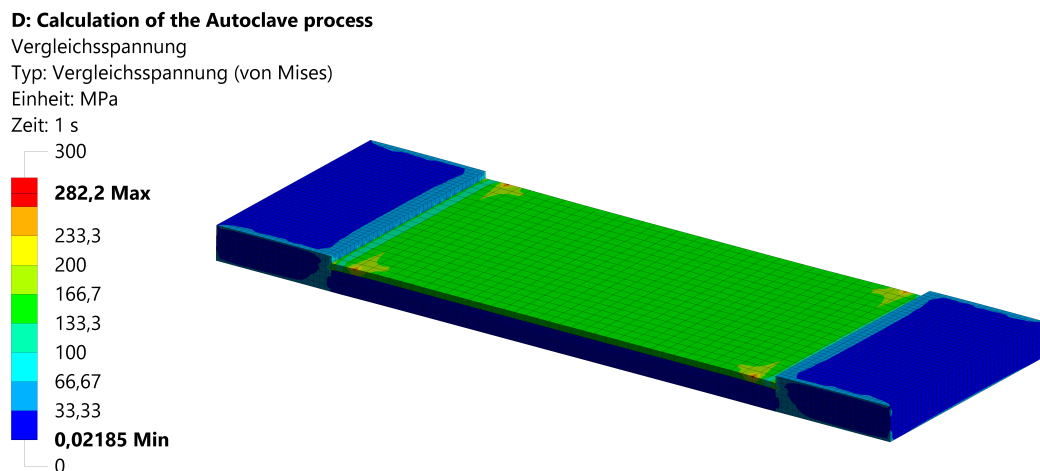


**Abb. 4.8:** normale, elastische Dehnung innerhalb der Formgedächtnislegierung-Schicht (dargestellt zur Zeit 1 s, Verformung 10-fach überhöht)

Abb. 4.9) und Dehnungen am Ort der größten Krümmung induziert. Der Ort der größten Krümmung ergibt sich an der Stelle, an der das Prisma endet und die Lagen des oberen Laminates auf die FGL-Schicht treffen. Das Prisma behindert durch seine steifen UD-Lagen eine Querkontraktion der FGL-Schicht.

Die Dehnung in der Mitte der FGL-Schicht ergibt sich zu ca. 0,0226 mm/mm. Aus der Differenz zwischen der thermischen Dehnung und der elastischen Dehnung ergibt sich eine resultierende Dehnung von 0,0023 mm/mm. Umgerechnet in eine Längenänderung innerhalb der FGL-Schicht ergibt sich bei einer Länge der Schicht von 39 mm die Änderung zu 0,0897 mm. Wird die Verschiebung in Längsrichtung innerhalb der FGL-Schicht betrachtet, kann dies bestätigt werden (siehe Abb. A.1). Die Verformung während des Autoklavprozesses ist damit minimal. Von der Dehnung des intrinsischen Zweiwegeffekts gehen mit  $\varepsilon = 0,0023$  mm/mm 7,6 % verloren.

Werden die Spannungen in den Körpern betrachtet, fällt auf, dass diese in allen Körpern zur Zeit 1 s maximal sind. Bei der Betrachtung des Aktuators in Abb. 4.9 zeigt sich, dass Spannungen vor allem in der FGL-Schicht auftreten. Die Maxima der Spannung in der FGL-Schicht treten dort auf, wo das obere Laminat auf die FGL-Schicht trifft. Da hier bereits die Dehnung maximal ist, ergibt sich auch hier die größte Spannung.

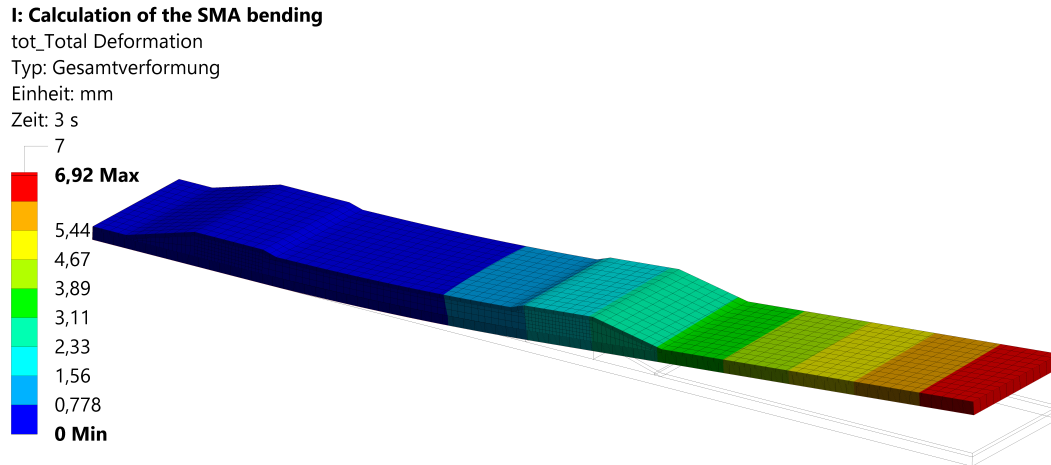


**Abb. 4.9:** von Mises Spannung innerhalb des Aktuators während des Autoklavprozess bei 4 bar (dargestellt zur Zeit 1 s, Verformung maßstabsgerecht dargestellt)

Im Bereich der Anbindung der FGL-Schicht an die Anker nimmt die Spannung der Anker bis auf ca. 100 MPa zu und übersteigt damit die Zugfestigkeit des Epoxidharzes (vgl. Tab. B.2). Dies stellt jedoch kein Problem dar, da dies nur ein Effekt aus der Vereinfachung in der Anbindung der FGL-Drähte an die Anker im Modell gegenüber der aus der Realität ist. Aufgrund ihrer sehr geringen Steifigkeit nimmt die EPDM-Schicht kaum Belastungen auf und wird deswegen wenig beansprucht.

## 4.4.2 Ergebnisse der Biegung

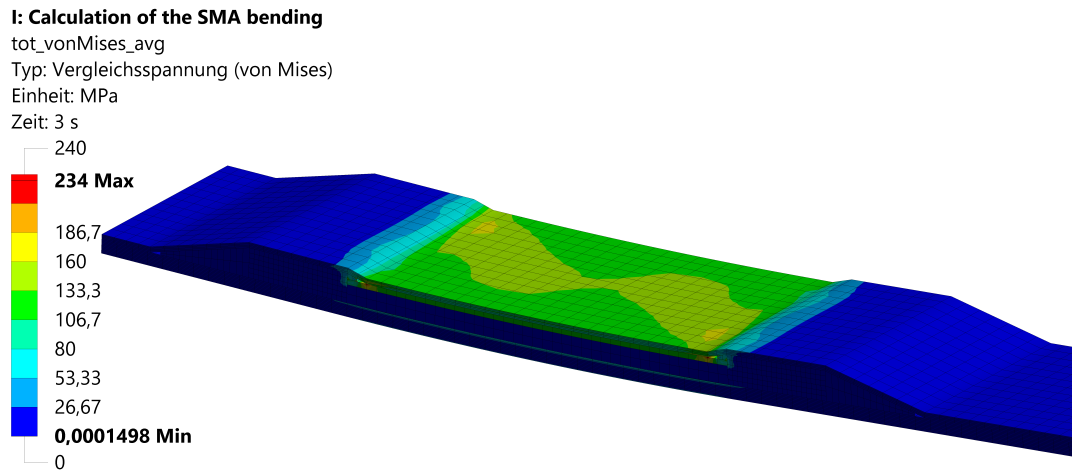
In Abb. 4.10 wird die Durchbiegung des Aktuators gezeigt. Mit Lagenaufbau Nr. 11 ist eine deutliche Durchbiegung von 6,92 mm erkennbar. Damit kann in realen Anwendungen eine effektive Formänderung ermöglicht werden.



**Abb. 4.10:** Deformation aufgrund der Aktivierung des Aktuators (Verformung maßstabsgerecht)

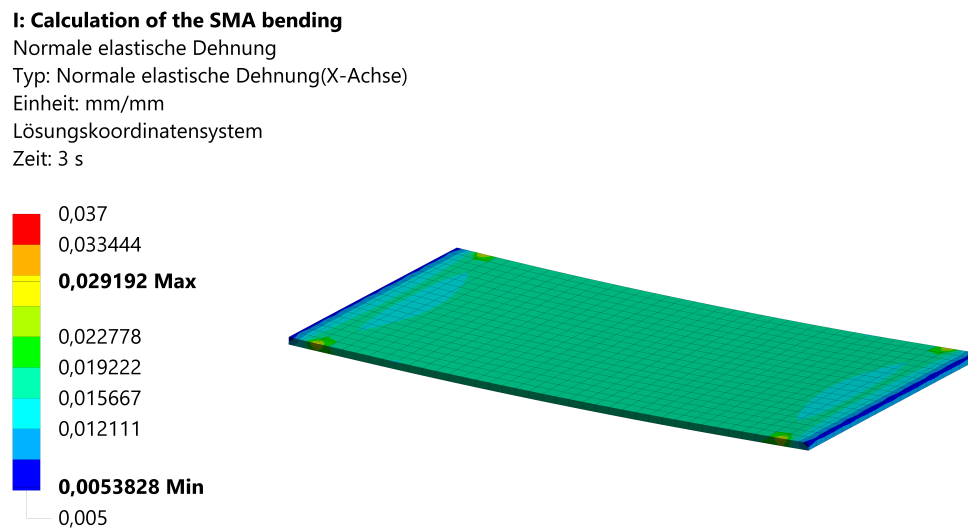
Spannungen treten nur im Bereich um den Aktuator auf, der Rest der Probe ist komplett spannungsfrei. Wird die Vergleichsspannung innerhalb der Probe in Abb. 4.11 betrachtet, zeigt sich eine Beanspruchung innerhalb der FGL-Schicht, im oberen Laminat sowie eine kleine Beanspruchung im unteren Laminat (erkennbar am türkisfarbenen Streifen in Abb. 4.11). Analog zur Beanspruchung während des Autoklavzykluses ist wieder eine Spannungsspitze in der FGL-Schicht zu erkennen. Das obere Laminat wird im Bereich der FGL-Schicht flächig beansprucht. Hier muss eine genaue Analyse des Versagensverhalten gemacht werden. Auffällig ist die punktsymmetrische Spannungsverteilung im oberen Laminat. Dies könnte auf eine Verdrehung der Probe um ihre Längsachse hindeuten. Durch Betrachtung der Deformation in Abb. 4.11 kann das jedoch ausgeschlossen werden, da diese über die Breite der Probe konstant ist. Auch durch eine Verfeinerung des Netzes (vgl. Kap. 4.5) wird dieser Effekt des punktsymmetrischen Spannungsverlaufs nicht vermindert. Dies lässt darauf schließen, dass die Spannungsverteilung ein Effekt aus der 45°-Ausrichtung der oberen Lage ist. Die Richtung der Spannungsverteilung stimmt mit der Lagenausrichtung überein.

Bezüglich der FGL-Schicht ist wiederum die Dehnung von Interesse. Es wird, wie bereits beim Autoklavprozess verwendet, die Dehnung in Längsrichtung der Schicht betrachtet. Dies liegt in den Drähten des realen Aktuators begründet. Die normale, elastische Dehnung ist in Abb. 4.12 dargestellt. Wieder ist eine Spannungskonzentration an dem Punkt zu erkennen, an dem das obere Laminat auf die FGL-Schicht trifft. An den Stirnseiten der FGL-Schicht wird die Dehnung aufgrund des Kontaktes zu den Ankern verhindert und geht auf nahe null zurück. In der Mitte der Schicht liegt die Dehnung bei ca.



**Abb. 4.11:** von Mises Spannung in der Probe bei erfolgter Biegung der Probe aufgrund der Aktivierung der Formgedächtnislegierung (Verformung maßstabsgerecht dargestellt)

0,0175 bis 0,0180 mm/mm. Wird nun die Gesamtdehnung betrachtet, ergibt sich diese in der Mitte der FGL-Schicht rechnerisch zu 0,0411 bis 0,0416 mm/mm. Eine Analyse in ANSYS bestätigt diesen Wert.



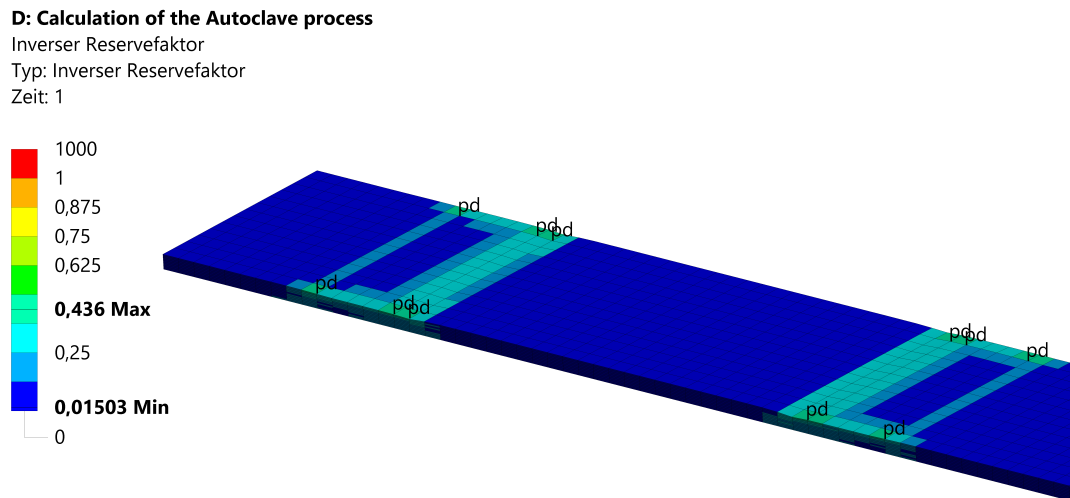
**Abb. 4.12:** Normale, elastische Dehnung innerhalb der FGL-Schicht (Verformung maßstabsgerecht dargestellt)

### 4.4.3 Analyse des Laminatversagen

Das Versagensverhalten der beiden Laminat in den beiden Lastfällen wird gemeinsam in *ACP Post* betrachtet. Durch Importieren beider Lastfälle wertet *ACP Post* das Versagen innerhalb jedes Netzelementes für beide Lastfälle aus und zeigt den kritischen Lastfall

sowie den Versagensmodus für jedes Netzelement an. Für die Beurteilung des Versagensverhalten wird das in ANSYS implementierte 3D-Puck-Kriterium angewendet. Mangels eigener Daten werden für die zusätzlich benötigten Puck-Parameter (siehe Kap. 2.2.2) die standardmäßig hinterlegten Parameter für ein Glasfaserlaminat verwendet. Diese unterscheiden sich kaum von den in [54] empfohlenen Parametern. Die Einstellungen sowie Parameter finden sich in Tab. A.1. Durch die Verwendung eines 3D-Kriteriums kann ein Versagen durch Delamination vorhergesagt werden. Dies wird aufgrund der Krümmung des oberen Laminats im Bereich des Aktuators erwartet.

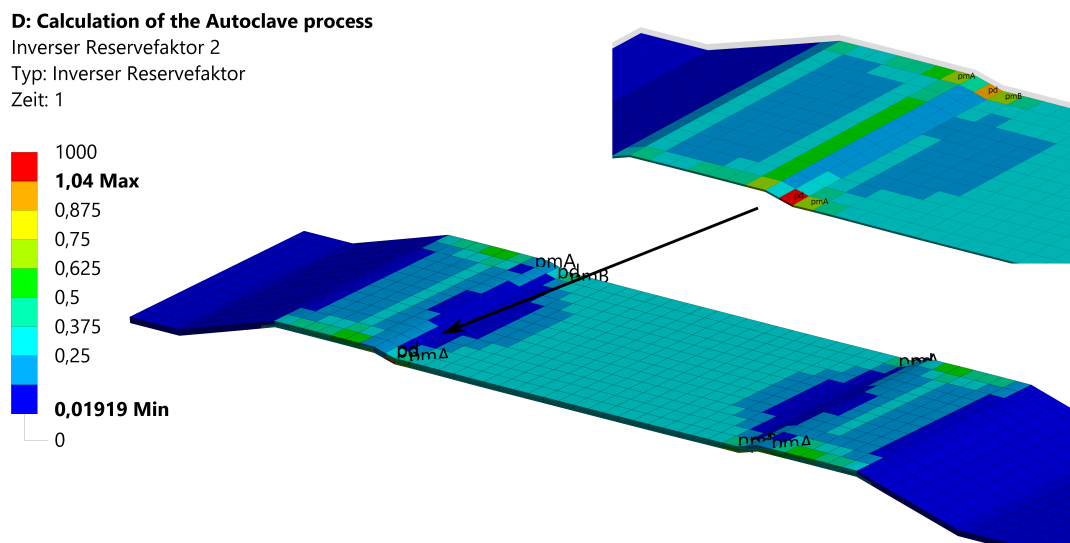
Für das untere Laminat ist der Lastfall des Autoklavzyklus dimensionierend. In Abb. 4.13 ist die Anstrengung des Gesamtlaminates gezeigt. Die Anstrengung ist dabei definiert als das Verhältnis zwischen der auftretenden Spannung und der maximal ertragbaren Spannung (Kehrwert des Sicherheitsfaktors). Das Gesamtlaminat wird unterhalb der Anker des Aktuators durch eine Spannung in Dickenrichtung des Laminates belastet. Dies führt zu einem Versagen durch Delamination. Die kritische Lage ist die oberste  $0^\circ$ -Lage. Die Beanspruchung ist das Resultat der Zugkraft, welche durch die FGL-Schicht auf die Anker aufgeprägt wird. Diese kippen infolge dessen nach innen und drücken dabei auf das Laminat. Dadurch entsteht eine Spannung in Dickenrichtung des Laminates. Mit einer maximalen Anstrengung von  $A = 0,436$  ist die Anstrengung geringer als die maximal erlaubte Anstrengung von  $A_{max} = 0,667$  (entspricht  $j = 1,5$ ). Die Anstrengung für alle Lagen findet sich in Abb. A.2.



**Abb. 4.13:** Anstrengung des unteren Laminates während des Autoklavprozesses (pd: Versagen durch Delamination)

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, erfährt das obere Laminat durch den Autoklavprozess eine Delamination. Diese ist in Abb. 4.14 dargestellt. An der Verteilung der Anstrengung ist das reine  $\pm 45^\circ$ -Laminat zu erkennen. In der unteren Lage ist an vier Stellen eine Delamination zu erkennen (siehe Detail in Abb. 4.14). Die Lage der Delamination korreliert mit der maximalen Spannung in der darunter liegenden FGL-Schicht (vgl.

Abb. 4.9). Gleichzeitig ist hier eine starke Krümmung des Laminates zu erkennen und zusätzlich Netzelemente, welche für die Abbildung dieses Details möglicherweise zu groß sind. Die Delamination wird deswegen auf die starke Krümmung und die durch die Querkontraktion der FGL-Schicht hervorgerufene Spannung zurückgeführt. Ein Einfluss der Netzgröße wird in Kap. 4.5 untersucht. Da die Spannung in der FGL-Schicht nicht in diesem Maße in der Realität auftritt, wird die Delamination als unkritisch bewertet. Der ZFB (pmA und pmB in Abb. 4.14) in den umliegenden Netzelementen wird ebenfalls auf diese Effekte zurückgeführt.

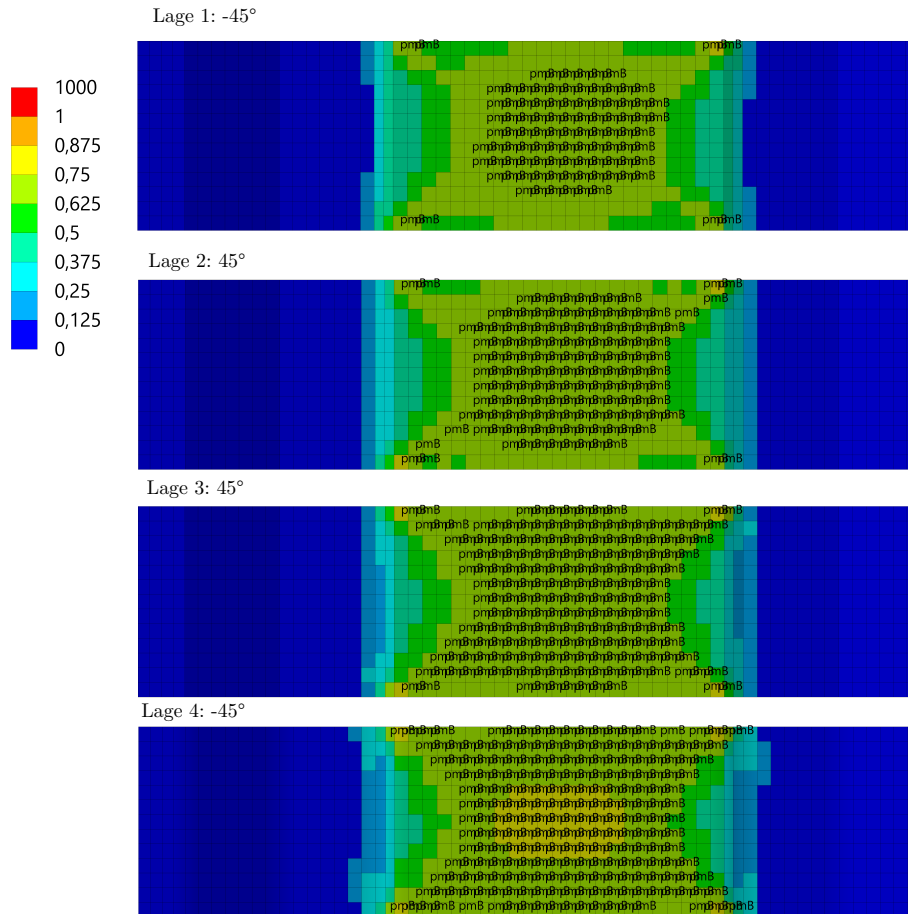


**Abb. 4.14:** Anstrengung des oberen Laminates während des Autoklavprozesses mit Detail der unteren  $-45^\circ$ -Lage (pd: Versagen durch Delamination, pmA = Zwischenfaserbruch (ZFB) Modus A, pmB = ZFB Modus B)

Der kritische Lastfall für das obere Laminat ist die Biegung durch den Aktuator aufgrund der Aktivierung dessen. In Abb. 4.15 ist für die vier Lagen des oberen Laminates die Anstrengung abgebildet. Eine signifikante Anstrengung tritt nur im Bereich der FGL-Schicht auf. Wieder ist das reine  $\pm 45^\circ$ -Laminat deutlich zu erkennen. Durch die Biegung des Aktuators wird das Laminat auf Druck belastet. Dadurch ergibt sich ein Versagen des Laminates durch ZFB, hervorgerufen aufgrund einer Druckbelastung innerhalb der Matrix. Die Delamination, wie sie während des Autoklavprozesses auftritt, wird in diesem Lastfall durch den Versagensmodus B überlagert. Die kritischste Lage ist oberste Lage. Hier treten aufgrund des dort kleinsten Krümmungsradius der Probe die größten Druckspannungen auf.

**I: Calculation of the SMA bending**

Inverser Reservefaktor 2  
 Typ: Inverser Reservefaktor  
 Zeit: 3

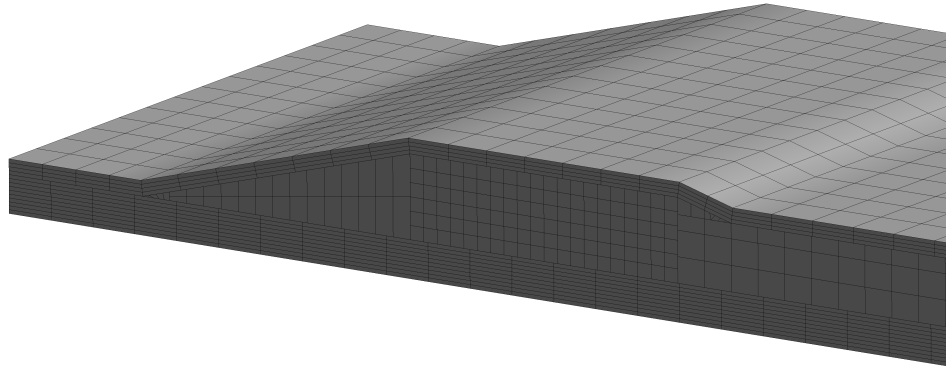


**Abb. 4.15:** Anstrengung des oberen Laminates während der Biegung aufgrund der Aktivierung des Aktuators (pmB = Zwischenfaserbruch Modus B)

## 4.5 Netzkonvergenzanalyse

Um die Auswirkung des verwendeten Rechnernetzes auf die Simulationsergebnisse zu untersuchen, wird die Größe der Netzelemente variiert. Dies wird wie bereits in Kap. 4.4 anhand der Probe mit dem Laminat Nr. 11 durchgeführt. Die Ergebnisse sind aufgrund des gleichen Netzes und Randbedingungen auch für die anderen berechneten Laminatete gültig. In der Simulation wird für alle Körper ein geordnetes Netz mit hexagonalen Netzelementen verwendet. Die Körper der beiden Laminatete bestehen zuerst aus einer Fläche. Diese Fläche wird zunächst vernetzt und dieser dann in *ACP Pre* ein Laminataufbau mit einer entsprechenden Dicke zugewiesen. Für jede Faserverbundlage werden dabei die Netzelemente um die Dicke der Lage extrudiert. Ein Ausschnitt des Netzes ist in Abb. 4.16 dargestellt. Durch die lagenweise Erstellung der Netzelemente sind diese stark komprimiert. Dadurch weicht das Seitenverhältnis dieser Netzelemente stark vom idealen Verhältnis von 1 ab. Eine Auswirkung auf die Ergebnisqualität kann jedoch nicht beob-





**Abb. 4.16:** Detailansicht des verwendeten adaptiven Netzes

achtet werden. In Abb. 4.16 fällt das deutlich feinere Netz der Anker auf. Dies liegt darin begründet, dass die Last, welche durch die FGL-Schicht in die Anker eingebracht wird, mit einem groben Netz nicht richtig abgebildet werden kann. Die Größe der Netzelemente wird durch die Funktion *Adaptive Elementgröße* definiert. Dabei wird die Netzelementgröße an den Körper bzw. lokale Geometrieeigenschaften angepasst. Dies ist aufgrund der wenigen Einstellmöglichkeiten meist nicht empfohlen [20], aufgrund der einfachen Geometrie bestehend aus überwiegend quaderförmigen Körpern hier aber möglich.

Für einen Vergleich der Netzelemente wird die Netzelementgröße immer weiter verfeinert. Dazu wird das Adaptive Netz in eines mit einer manuellen Netzelementgröße umgewandelt. In Tab. 4.2 ist die Größe der Netzelemente der einzelnen Körper für die untersuchten Verfeinerungsschritte dargestellt. Netz Nr. 1 entspricht näherungsweise dabei der Netzelementgröße, welche beim adaptiven Netz verwendet wird (Netz Nr. 0).

Als Vergleichswert für die verschiedenen untersuchten Netze wird für die Simulation der Auslenkung durch den aktivierten Aktuator die Deformation an der Spitze der Probe ver-

**Tab. 4.2:** Netzelementgröße der einzelnen Körper bei der Netzverfeinerung (Netz Nr. 1 entspricht näherungsweise der Netzelementgröße des adaptiven Netzes)

Netz Nr.	Laminate	Aktuator		Prismen	Stahlform
		Anker	EPDM, FGL		
1	1,50 mm	0,50 mm	1,00 mm	1,00 mm	2,50 mm
2	1,00 mm	0,25 mm	0,50 mm	0,50 mm	1,50 mm
3	0,50 mm	0,25 mm	0,25 mm	0,25 mm	1,00 mm
4	0,25 mm	0,25 mm	0,25 mm	0,25 mm	1,00 mm

wendet. Für beide durchgeführten Simulationen wird die von Mises-Spannung in den Laminaten sowie die Normalspannung in der FGL-Schicht verwendet. Hierbei zeigt sich, dass sowohl die maximale Normalspannung als auch die maximale von Mises-Spannung mit sinkender Netzelementgröße ansteigen und sich keinem Spannungswert annähern. Dies liegt an den Spannungskonzentrationen in der FGL-Schicht sowie im Laminat (vgl. Abb. 4.9, Abb. 4.14). Die Spannung, welche in einem Punkt konzentriert ist, wird durch das feinere Netz besser abgebildet und dadurch die maximale Spannung erhöht. Um eine Aussage über den Einfluss des Netzes für das gesamte Bauteil zu erhalten, werden deshalb drei Punkte ausgewählt, an denen die Spannung analysiert wird. Diese liegen in der obersten Schicht des oberen Laminats jeweils mittig über den Ankern des Aktuators (Punkt 1 und 3) und einer mittig über der FGL-Schicht (Punkt 2). Die Punkte liegen damit in Bereichen der Probe, welche weit weg von Spannungskonzentrationen sind, gleichzeitig aber je nach betrachtetem Lastfall stark beansprucht werden. In Tab. 4.3 sind die Ergebnisse aller untersuchten Werte für die verschiedenen Netze dargestellt. Als Vergleichswerte sind zum einen die Rechenzeit für das Lösen des Modells und zum anderen die Anzahl der Netzknoten (Nodes) aufgeführt. Zuerst soll die Deformation betrachtet werden. Diese ist über alle betrachteten Netzelementgrößen relativ konstant. Ein vergleichsweise großer Sprung ist zwischen Netz Nr. 2 und Nr. 3 zu erkennen. In der 0,5 mm dicken FGL-Schicht sind ab Nr. 3 erstmals zwei Netzelemente in Dickenrichtung angeordnet. Als Element, durch welches die Last in die Probe eingeleitet wird, wirkt sich dies auf die Ergebnisse und dabei insbesondere auf die Deformation aus.

Werden die Spannungen während des Autoklavprozesses betrachtet, zeigt sich, dass die Spannung in Punkt 2 näherungsweise konstant bleibt. Bei den Punkten 1 und 3 fällt die

**Tab. 4.3:** Ergebnisse der Netzkonvergenzanalyse für die fünf untersuchten Netze in drei ausgewählten Punkten sowie der maximalen Deformation bei der Biegung durch Aktivierung des Aktuators (Nodes = Netzelementknoten)

Netz Nr.	Nodes	von Mises-Spannung Laminats			Deformation	Rechenzeit
		Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3		
Autoklavprozess						
0	99629	140,1 MPa	51,9 MPa	140,4 MPa	/	0 h 2 min 34 s
1	105472	139,1 MPa	50,4 MPa	140,7 MPa	/	0 h 2 min 22 s
2	552186	133,0 MPa	51,9 MPa	132,0 MPa	/	0 h 23 min 32 s
3	1457317	135,1 MPa	50,1 MPa	134,1 MPa	/	1 h 2 min 27 s
4	1962527	135,4 MPa	50,1 MPa	134,4 MPa	/	1 h 34 min 37 s
Biegung						
0	94996	5,6 MPa	133,3 MPa	4,8 MPa	6,92 mm	0 h 2 min 1 s
1	86159	5,9 MPa	132,2 MPa	5,0 MPa	6,92 mm	0 h 1 min 44 s
2	465550	4,1 MPa	133,4 MPa	4,1 MPa	6,91 mm	0 h 15 min 45 s
3	1193216	4,2 MPa	134,4 MPa	4,2 MPa	7,04 mm	2 h 18 min 43 s
4	1698426	4,2 MPa	134,4 MPa	4,2 MPa	7,04 mm	4 h 6 min 36 s

Spannung insbesondere zwischen Netz Nr. 1 und Nr. 2 leicht ab. Dies ist wahrscheinlich auf die Verfeinerung des Netzes in den Ankern zurückzuführen, welche direkt unter den beiden Punkten liegen. Dieser leichte Abfall der Spannung lässt sich bei den beiden Punkten auch während der Belastung durch die Biegung erkennen. Die Spannung in Punkt 2 bleibt bei dieser Belastung ebenfalls näherungsweise konstant.

Die Anzahl der Nodes und damit die Rechenzeit steigen mit zunehmender Verfeinerung des Netzes. Insbesondere die Rechenzeit der Belastung durch Biegung steigt stark an. Gleichzeitig bleiben die Spannungen und die Deformation bis auf wenige, einstellige Prozentbeträge gleich. Damit kann das vergleichsweise grobe adaptive Netz (Netz Nr. 0) verwendet werden, um Aussagen über die Beanspruchung der Proben zu treffen. Eine weitere Vergrößerung der Netzelementgröße scheint nicht sinnvoll, da die Rechenzeit bereits sehr gering ist.

# Kapitel 5

## Experimentelle Untersuchungen

In diesem Kapitel sollen alle durchgeführten experimentellen Untersuchungen beschrieben werden. Vor Beginn der Simulationen für die Einbettung der Aktuatoren, muss das Ersatzmodell für den Aktuator validiert sowie Kennwerte für die FGL ermittelt werden. Dies wird in Kap. 5.1 durchgeführt. Im Anschluss an die Simulation werden die Proben hergestellt (siehe Kap. 5.2) und danach die Aktuatoren aktiviert. Dabei ist aufgefallen, dass die Aktuatoren, welche mithilfe des Prepreg-Laminates hergestellt wurden, nicht das gewünschte Verhalten gezeigt haben (siehe Kap. 5.2.3). Aufgrund dessen werden Proben unter Verwendung einer kaltaushärtenden Matrix gebaut und getestet. Hierfür wird die Temperaturverteilung innerhalb der Probe in Kap. 5.3.2 untersucht. Die weiteren Untersuchungen an Proben mit kaltaushärtender Matrix finden sich in Kap. 5.3.3.

### 5.1 Experimentelle Bestimmung von Materialkennwerten für die Formgedächtnislegierung

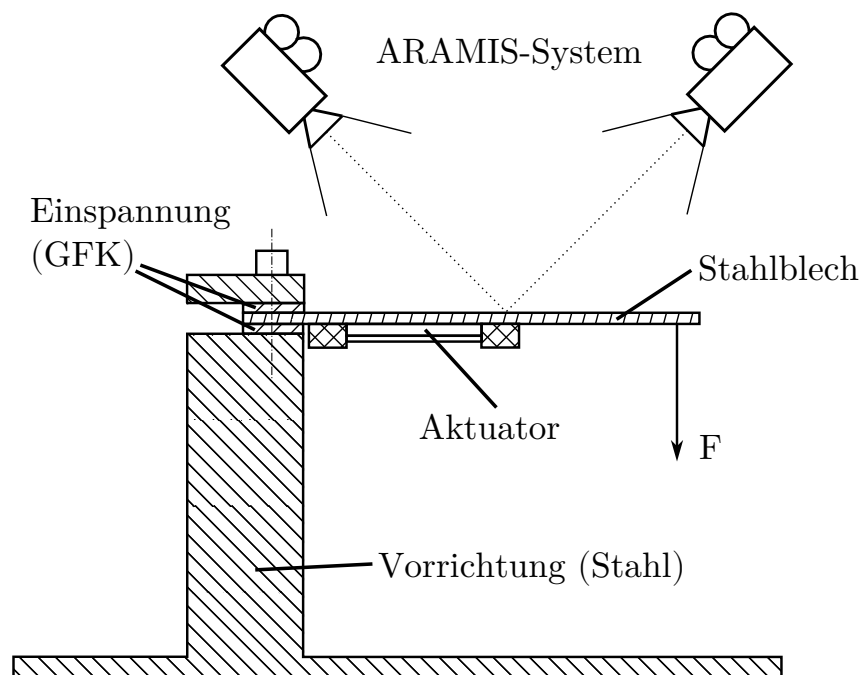
Das Ersatzmodell für den Aktuator, welches in Kap. 4.1 entwickelt wurde, soll verwendet werden, um Materialkennwerte für die FGL zu bestimmen. Dafür werden Experimente durchgeführt, welche parallel dazu unter Verwendung des Ersatzmodells in ANSYS simuliert werden. Dadurch werden bei den Materialkennwerten Vereinfachungen des Ersatzmodells berücksichtigt und fließen mit in die Kennwerte ein.

#### 5.1.1 Durchführung und Ergebnisse der Experimente

Für die Versuche stehen zwei Aktuatoren zur Verfügung, welche auf einem 0,45 mm dicken Stahlblech aufgebracht sind (vgl. Abb. 4.2 (links)). Die Verformung unter einer definierten Biegebelastung wird optisch mithilfe eines ARAMIS-Systems vermessen. Parallel dazu wird der Versuch in ANSYS unter Verwendung der Ersatzmodelle für die FGL und den Aktuator simuliert und durch die aus der optischen Messung bekannten Durchbiegung die E-Moduln der Kristallzustände und  $\alpha$  des Ersatzmodells im Übergangsbereich der FGL ermittelt.

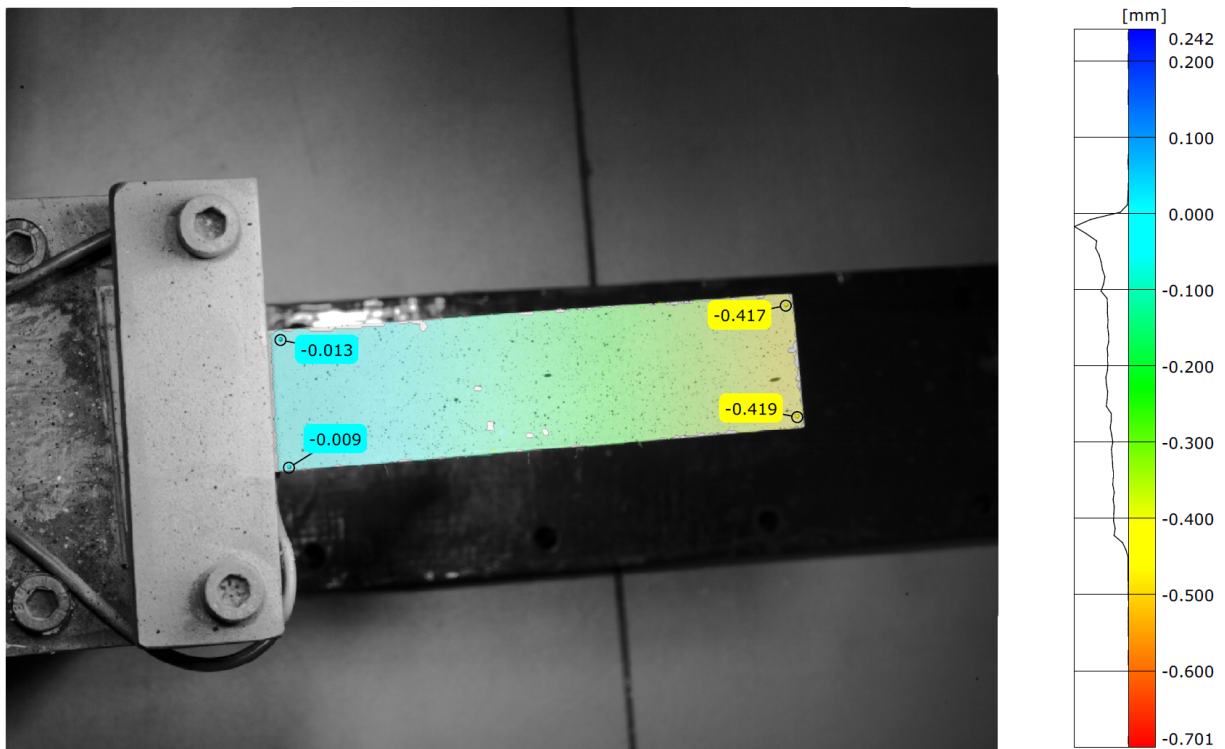
Das ARAMIS-System der GOM GmbH ist ein System zur optischen Messung von Deformationen von Bauteilen. Mithilfe von zwei Kameras werden nach dem Prinzip der Triangulation die Verschiebung von Markern erkannt und dadurch die Verformung bestimmt [24]. Grundlage dafür ist eine Grauwerterkennung in den Bildausschnitten der Kameras [24]. Hierfür wird ein stochastisches Muster auf die Probe aufgetragen.

Die Aktuatoren werden entsprechend Abb. 5.1 in eine Vorrichtung eingespannt. Damit das ARAMIS-System eine ebene Fläche misst, wird das Stahlblech so eingespannt, dass der Aktuator nach unten zeigt. Die Einspannung besteht aus Stahl mit Spannbacken aus GFK. Das Stahlblech wird dabei so platziert, dass zwischen Aktuator und der Einspannung ein kleiner Spalt verbleibt, sodass eine Durchbiegung des Stahlblechs nicht durch den Aktuator behindert wird. Am Ende des Stahlblechs wird eine Last in Form von Gewichten angebracht. Auf das Stahlblech wird ein stochastisches Muster für eine flächige Verschiebungserkennung aufgebracht (vgl. Abb. 5.2). Bei einigen Durchführungen werden zusätzlich Referenzpunkte aufgeklebt, die eine punktuelle Berechnung der Verschiebung ermöglichen (vgl. [24]).



**Abb. 5.1:** Versuchsaufbau für die Messung der Verschiebung mithilfe des ARAMIS-Systems

Für die Bestimmung der E-Moduln für Martensit und Austenit wird zuerst der E-Modul des Stahlblechs benötigt. Nach [14] liegt dieser bei 210 000 MPa. Das Stahlblech mit dem applizierten Aktuator wird zuerst unbelastet eingescannt. Im Anschluss wird es durch ein Gewicht von  $34,80 \text{ g} \pm 0,05 \text{ g}$  belastet und erneut die Verschiebung durch das ARAMIS-System vermessen. In Abb. 5.2 ist die flächige Verschiebung in die Bildebene hinein erkennbar.

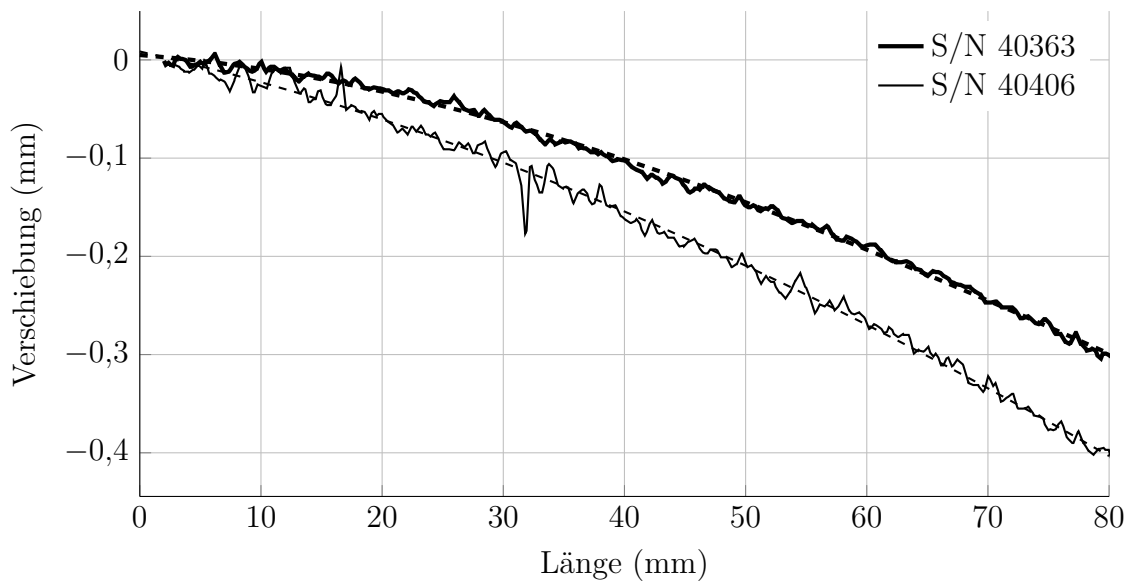


**Abb. 5.2:** Flächige Verschiebung des Stahlblechs mit darunter appliziertem Aktuator in die Bildebene unter Belastung im martensitischen Bereich (Messergebnisse ARAMIS)

Um nun die Absenkung des Balkens an der Spitze herauszufinden, wird ein Schnitt in der Mittelebene des Stahlblechs erstellt und die dort gemessene Verschiebung exportiert. Es ergibt sich ein Verlauf gemäß Abb. 5.3. Sichtbar ist hier der unstetige Verlauf der Kurve. Um an einem Punkt nun ein Ergebnis zu erhalten, wird die Kurve mit einem Polynom dritten Grades angenähert. Dies entspricht dem Grad der analytischen Lösung der Biegelinie eines Kragbalkens (vgl. [7]). Die Verformung an der Spitze des Stahlblechs ( $x = 76,65 \text{ mm}$ ) kann dadurch bestimmt werden. In ANSYS wird nun das vereinfachte Modell des Aktuators aus Kap. 4.1.2 mit dem Stahlblech kombiniert und damit der Versuch nachgebildet. Das Stahlblech wird an der einen Stirnseite mithilfe einer *Fixierten Lagerung* festgesetzt und an der anderen Stirnseite mit der Gewichtskraft des Gewichts belastet. Die Verschiebung in der Simulation kann nun durch Variation des martensitischen E-Moduls in ANSYS mit der Messung gleichgesetzt werden (siehe Tab. 5.1).

Für die Bestimmung des austenitischen E-Moduls wird der Aktuator zunächst aktiviert. Dafür wird der Aktuator gemäß dessen Produktdatenblatts [13] mit einem Strom von 3 A für maximal 15 s beaufschlagt und nachdem keine Änderung der Verformung beobachtet wird, mit dem Gewicht belastet. Dadurch lässt sich im ersten Schritt der Temperatureausdehnungskoeffizient der FGL bestimmen und im zweiten Schritt der E-Modul des austenitischen Gefüges.

Durch die Aktivierung der FGL ergeben sich für die beiden Aktuatoren Verschiebungen von 17,30 mm und 17,34 mm, welche vom ARAMIS-System gemessen werden. Diese Verschiebung muss nun wiederum in ANSYS erreicht werden, um den Temperatureausdeh-



**Abb. 5.3:** Mithilfe des ARAMIS-Systems gemessene Verschiebung der Proben im martensitischen Bereich und Annäherung durch Polynom 3. Grades (gestrichelte Linien)

nungskoeffizienten zu bestimmen, welcher im Übergangsbereich der FGL herrscht. Dafür wird in ANSYS die Temperatur der FGL Schicht auf 100 °C erhöht und  $\alpha$  so lange variiert, bis die Verschiebung den Ergebnissen der ARAMIS-Messung entspricht. Das Ergebnis ist in Tab. 5.1 dargestellt.

**Tab. 5.1:** Ergebnisse der optischen Verschiebungsmessung sowie der Simulation in ANSYS, wobei  $\alpha$  den thermischen Ausdehnungskoeffizienten der FGL während der Phasenumwandlung als Ersatzmodell für die Dehnung des Zweivegeffekts repräsentiert (E-Modul unter Verwendung des Ersatzmodells aus Kap. 4.1)

Gefüge	S/N	ARAMIS Verschiebung	ANSYS		
			Verschiebung	E-Modul	$\alpha$
Martensit	40406	0,2804 mm	0,2788 mm	228 MPa	-
	40363	0,3792 mm	0,3789 mm	132 MPa	-
Übergangsbereich	40406	17,3400 mm	17,0000 mm	-	-0,00059
	40363	17,3600 mm			
Austenit	40406	-	-	-	-
	40363	-	-	-	-

Eine Bestimmung des E-Moduls im austenitischen Bereich kann kein Ergebnis erzielen. Die zusätzliche Verformung, welche sich durch das Gewicht ergibt, ist größer als der Messbereich des ARAMIS-Systems in der benötigten Konfiguration. Eine Veränderung von Messvolumen, Kameraposition relativ zum Messobjekt sowie einer nur punktförmigen Messung der Verschiebung kann kein Ergebnis erzielen. Aufgrund dessen wird für das Modell ein Literaturwert für den austenitischen E-Modul angenommen (vgl. Tab. B.2).

Die Ergebnisse für die Verschiebung sowohl aus der ARAMIS-Messung als auch aus der ANSYS-Simulation sind sowohl für den Martensit als auch den Austenit in Tab 5.1 dargestellt. Auffällig ist eine große Differenz der Aktuatoren in der optisch gemessenen Verschiebung im martensitischen Bereich. Dies resultiert in einem Unterschied des zugehörigen E-Moduls in der ANSYS-Simulation von ca. 100 MPa.

### 5.1.2 Diskussion der Ergebnisse

Es zeigt sich, dass ein Biegeversuch nur schwer genaue Materialeigenschaften liefern kann. Wird die analytische Lösung für die Durchbiegung am Ende eines Balkens

$$w = \frac{Fl^3}{6EI} \quad (5.1)$$

betrachtet [7], so fällt auf, dass sowohl die Balkenlänge als auch die Balkendicke, welche durch das Flächenträgheitsmoment einfließt, kubisch in die Gleichung eingehen. Dadurch wirken sich Abweichungen durch die Messungenauigkeit in der Bestimmung der freien Länge und Dicke des Blechs stark auf die Messergebnisse aus. Ein weiterer Faktor ist die Messungenauigkeit in der optischen Verschiebungsmessung. Durch mehrfache Messung des unbelasteten Balkens, kann das Messrauschen erkennbar gemacht werden<sup>1</sup>. Dieses liegt in etwa bei  $\pm 0,015$  mm.

Des Weiteren hat die Art der Einspannung eine Auswirkung auf die Durchbiegung. Während in ANSYS eine ideal steife Einspannung angenommen wird, ist dies in der Realität nicht der Fall. Durch Messung punktueller Verschiebungen an der Einspannung hat sich gezeigt, dass diese in der Größenordnung von 0,01 mm liegen. Diese Verschiebungen ändern sich jedoch in Größe und Richtung je nach Experiment.

Der große Unterschied in der Verschiebung beim martensitischen Gefüge lässt sich zum großen Teil auf eine veränderte Einspannbedingung zwischen den beiden untersuchten Aktuatoren zurückführen. Wird der Verlauf der beiden Kurven in Abb. 5.3 betrachtet, so fällt auf, dass Aktuator S/N 40363 bereits nahe der Einspannung eine signifikant größere Verdrehung aufweist als Aktuator S/N 40406. Dies kann einerseits darauf zurückzuführen sein, dass die Schrauben der Einspannung zu wenig Kraft auf das Stahlblech ausgeübt haben, und andererseits darauf, dass das Stahlblech bei Aktuator S/N 40363 ein wenig aus der Einspannung gerutscht ist und durch die geringe Biegesteifigkeit dessen eine große Verschiebung hervorgerufen hat. Da die Durchbiegung des Aktuators S/N 40406 in einem E-Modul resultiert, welcher eine nur geringe Abweichung zu Literaturwerten aufweist, wird dieser E-Modul von 87 389 MPa (vgl. Tab. B.2) für weitere Simulationen genutzt. Eine erneute Messung und eine Vergrößerung des Stichprobenumfangs ist jedoch sinnvoll. Zusätzlich ist es sinnvoll den im Aktuator verbauten FGL-Draht in einem Zugversuch in einer temperierten Kammer zu vermessen. Die Einspannung eines Drahtes in eine Zugmaschine ist jedoch nicht trivial, weswegen dies im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden kann.

---

<sup>1</sup>Es ergibt sich teils größeres, teils kleineres Messrauschen zwischen den Messungen aufgrund von unterschiedlichen Kalibrierungen, aufgrund der Qualität des stochastischen Musters und aufgrund von Unterschieden in der Position des Messobjektes relativ zu den Kamerasensoren.

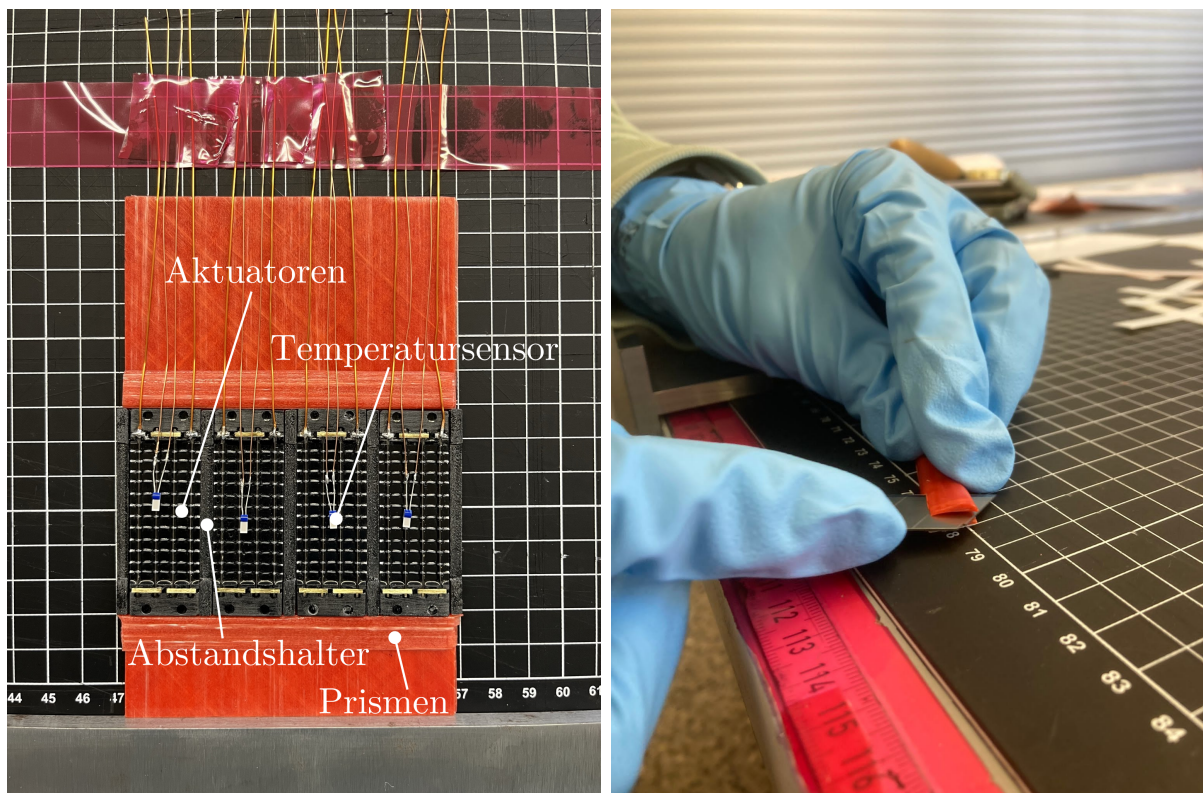


## 5.2 Herstellung von Proben mit eingebetteten Aktuatoren

Nachdem in ANSYS mithilfe des Ersatzmodells des Aktuators und der im vorherigen Kapitel ermittelten Materialkennwerte ein Lagenaufbau bestimmt werden konnte, werden die Proben gebaut. Zuerst werden die Proben aus Prepreg-Material hergestellt. Separat davon werden Proben unter Verwendung einer kaltaushärtenden Matrix gebaut.

### 5.2.1 Verwendung von Prepreg-Material

Wie in Kap. 4.3 beschrieben, sollen zwei Lagenaufbauten untersucht werden. Die Lagenaufbauten unterscheiden sich in einer zusätzlichen  $0^\circ$ -Lage in der neutralen Faser des oberen Laminates. Pro Lagenaufbau werden zwei Proben und damit zwei Aktuatoren verwendet. Alle Proben werden gemeinsam in einem Stück gebaut und nach dem Aushärten getrennt. Dafür werden Abstandshalter zwischen den Aktuatoren benötigt, welche die Dicke des später verwendeten Sägeblattes aufweisen. Diese bestehen aus dem seitlichen Profil der Aktuatoren, welches um die Sägeblattbreite von 2,5 mm extrudiert wird (vgl. Abb 5.4(a)). Die Körper werden aus dem Material Polyetheretherketon (PEEK) 3D-gedruckt, um eine ausreichende Temperaturbeständigkeit im Autoklav zu besitzen.



(a) Proben mit aufgelegten Aktuatoren und Temperatursensoren (b) Fertigung der Prismen aus HexPly 913

**Abb. 5.4:** Details des Laminierprozesses der Proben aus Prepreg-Material

Zuerst werden alle benötigten Lagen per Hand aus dem Halbzeug ausgeschnitten. Im Anschluss daran wird das untere Laminat aufgebaut. Dafür werden die ausgeschnittenen Lagen übereinandergelegt und nach jeder Lage mithilfe einer Rolle kompaktiert. Dies ist notwendig, um Lufteinschlüsse zu vermeiden. Im Anschluss werden die Aktuatoren, die Abstandshalter und auf den Aktuatoren die Temperatursensoren auf das Laminat gelegt. Kupferleiter wurden an die Aktuatoren und Temperatursensoren im Vorfeld gelötet. Die Leiter werden außerhalb des Laminates mit einem Tape-Streifen fixiert, um eine möglichst gerade Kabelführung zu ermöglichen (vgl. Abb. 5.4(a)). Im Anschluss daran werden die Prismen aus HexPly<sup>®</sup>913 gefertigt. Dafür werden viele Streifen des Prepreg-Materials in 90°-Orientierung aufeinandergelegt bis die Höhe der Aktuatoren erreicht wird. Die so entstandenen Quader werden dann diagonal mit einer scharfen Klinge geschnitten (vgl. Abb. 5.4(b)). Nachdem die Prismen auf das untere Laminat gelegt wurden, wird das obere Laminat lagenweise aufgelegt und zwischen jeder Lage kompaktiert.

Der verwendete Autoklav ist ein vom Institut gebauter, vergleichsweise kleiner Autoklav, welcher mittels einer Membran den Vakuumdruck um das Bauteil und auf der anderen Seite der Membran den Autoklavdruck hält. Ein maximaler Autoklavdruck von 3 bar ist möglich. Gemäß des Datenblattes von HexPly<sup>®</sup>913 wird die Temperatur zuerst auf 80 °C erhöht, dort eine halbe Stunde gehalten und dann auf 125 °C erhöht. Nachdem die Matrix auf dieser Temperatur für eine Stunde ausgehärtet ist, wird die Temperatur auf Raumtemperatur abgesenkt. Aufgrund eines nicht funktionierenden Temperaturreglers muss die Temperatur manuell gesteuert werden. Die Temperatur kann auf  $\pm 2$  °C genau gesteuert werden.

Nachdem die Proben ausgehärtet sind, werden die einzelnen Proben aus dem Laminat mithilfe eines diamantbesetzten Sägeblatts herausgetrennt. Die Seiten der Proben werden dann mit einem Schleifpapier mit einer minimalen Korngröße von 22  $\mu\text{m}$  rechtwinklig geschliffen. Zum Schluss werden die aus dem Laminat austretenden Kupferleiter umgebogen und auf einen Lötstützpunkt auf der Probe gelötet. Dadurch wird die Gefahr eines Bruches der Leiter am Austritt aus dem Laminat verringert. Die fertiggestellte Probe ist in Abb. 5.5 dargestellt.

## 5.2.2 Verwendung einer kaltaushärtenden Matrix

Eine kaltaushärtende Matrix wird verwendet, um eine Aktuierung der Aktuatoren während des Herstellungsprozesses zu verhindern. Während des Herstellungsprozesses folgt nach dem Laminieren und dem ersten Aushärten bei Raumtemperatur ein Aushärten bei erhöhter Temperatur. Dieser sog. Temperprozess schließt die Aushärtung des Epoxidharzes ab und erhöht  $T_g$  der Matrix. Da  $T_g$  mit steigender Aushärtetemperatur zunimmt, soll diese möglichst nahe an  $A_s$  liegen. Es wird das Harzsystem SR 1710/ SD 8824 ausgewählt. Dieses wird innerhalb des Institutes häufig für Infusionsprozesse verwendet. Bei einer Aushärtetemperatur von 50 °C liegt  $T_g$  bei 80 °C [65].

Als Fasermaterial wird das Glasfaser-Gewebe Interglas 90070 mit einem Flächengewicht von 80 g/m<sup>2</sup> verwendet. Dieses ist als Leinwand-Gewebe erhältlich und ermöglicht durch das geringe Flächengewicht die Herstellung eines dünnen Laminates. Wie für die Prepreg Proben auch, wird für dieses Laminat im Vorfeld der Herstellung eine Simulation in

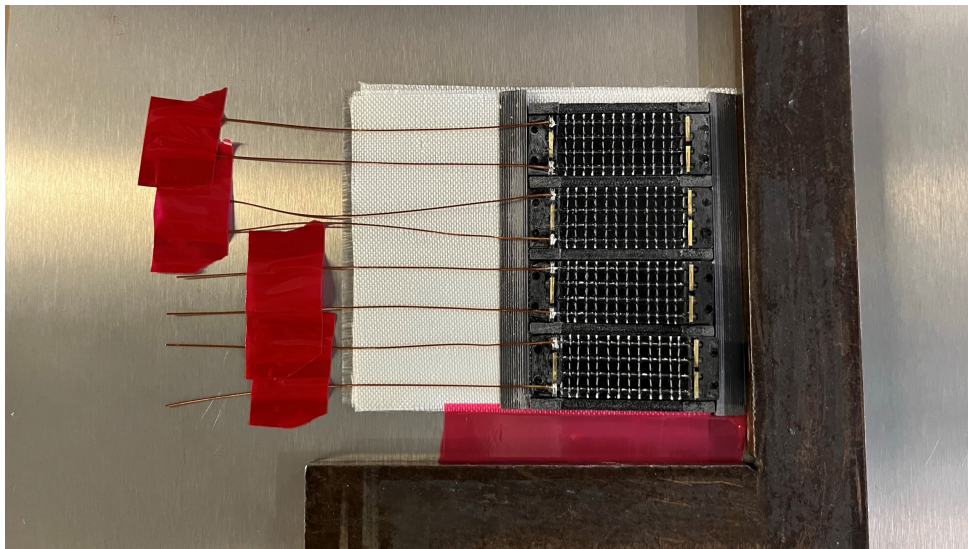


**Abb. 5.5:** Beispielhafte Probe #11\_40451 eines einlamierten CompActive-Aktuators in HexPly<sup>®</sup>913

ANSYS durchgeführt mit dem Ziel einen Laminataufbau zu finden, der die Durchbiegung bei Aktuierung der FGL maximiert und der auftretenden Belastung standhält. Die Ergebnisse für das Laminat finden sich in Kap. A. Wie in Abb. A.7 sichtbar, liegt die Sicherheit gegen den kritischen Versagensfall des Laminates unterhalb von 1. Dies wird in diesem Fall jedoch zugelassen, da die verwendeten Kennwerte für die Festigkeit (siehe Tab. B.2) sehr niedrig erscheinen. Es wird ein Laminataufbau von  $[0/90, \pm 45, 0/90, \pm 45, 0/90]_s$  für das untere Laminat und für das obere Laminat ein Aufbau von  $[\pm 45, 0/90, \pm 45]_s$  verwendet.

Der Aufbau der Proben ist analog zu dem der Prepreg-Proben. Die Herstellung der Prismen wird jedoch auf eine Verwendung von aus Polylactide (PLA) 3D-gedruckte Prismen abgeändert. Temperatursensoren werden nicht eingebaut. Die einzelnen Lagen werden per Hand ausgeschnitten und übereinandergelegt. Um ein Verrutschen zu verhindern, werden die Lagen mit Tape am Rand fixiert. Nachdem die Lagen des unteren Laminates platziert worden sind, werden die Aktuatoren, die Prismen sowie die von den Prepreg-Proben bekannten Abstandshalter platziert. Dieser Schritt ist in Abb. 5.6 zu sehen. Im Anschluss werden die oberen Lagen sowie ein Abreißgewebe aufgelegt.

Danach wird der Vakuumaufbau geschaffen. Es werden zwei Vakuumsäcke verwendet. Der zweite, obere Vakuumsack dient dabei dem Anpressen des Siegelkits des unteren Vakuumsacks. Es wird das Infusionsverfahren DP-RTM (*differential pressure-resin transfer molding*) verwendet. Dazu wird ein separater Schlauch, durch den das Harz zugeführt wird, eingebaut. Nachdem der Druck und die Leckage-Rate in beiden Vakuumsäcke ausreichend niedrig gewesen ist, wird die Matrix angerührt, entgast und dann dem Bauteil zugeführt. Nachdem das gesamte Laminat durchtränkt gewesen ist, wird das Harz abgeklemmt und das Bauteil für ca. 12 h bei Raumtemperatur ausgehärtet. Anschließend wird das Bauteil bei 50 °C für 24 h unter Beibehaltung des Vakuums getempert.



**Abb. 5.6:** Aktuatoren, Abstandshalter und Prismen auf dem unteren Laminat liegend

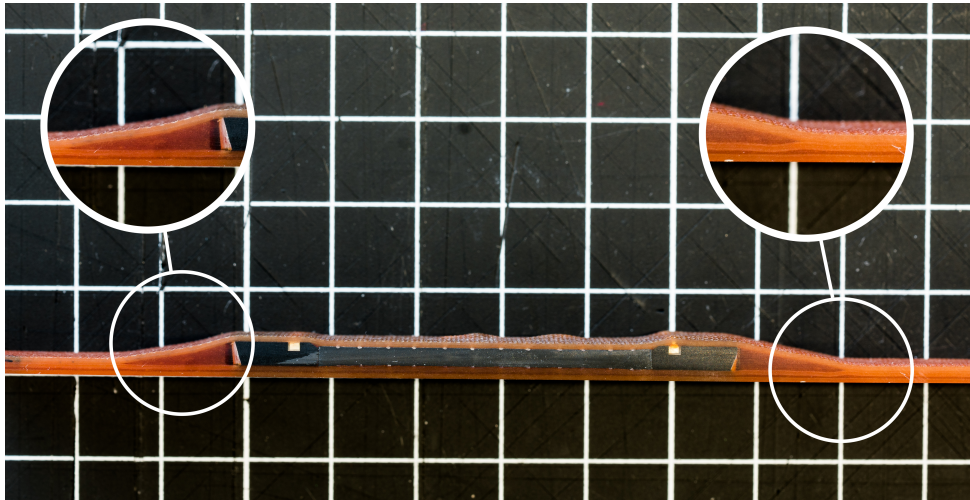
Nach dem Tempern werden die Proben, wie bereits zuvor bei den Prepreg Proben geschehen, mithilfe eines diamantbesetzten Sägeblatts herausgeschnitten und die Seiten anschließend glattgeschliffen. Während des Ausschneidens der Proben ist die Säge durch einen Aktuator gefahren und hat diesen zerstört. Aufgrund dessen stehen nur drei Proben zur Verfügung. Bei diesen Proben werden die herausragenden Kupferdrähte wiederum auf einen Lötstützpunkt fixiert.

### 5.2.3 Untersuchung herstellungsbedingter Effekte

Nach der Herstellung fallen Defekte innerhalb der Proben sowohl bei den Prepreg-Proben als auch bei den Proben mit einer kaltaushärtenden Matrix auf. Diese sollen kurz beschrieben werden.

#### Defekte und Fertigungsungenauigkeiten bei Prepreg Proben

In Abb. 5.7 sind in der Prepreg-Probe seitlich betrachtet drei Defekte bzw. Fertigungsungenauigkeiten erkennbar. Im linken Detail in Abb. 5.7 ist eine Welligkeit des oberen Laminates zu erkennen. Im selben Ausschnitt ist am Rand des Aktuators eine dunkle Verfärbung in der Grenzfläche zwischen Prisma (dunkles orange) und Aktuator (schwarz) zu erkennen. Die Welligkeit des Laminates ist darauf zurückzuführen, dass das darunter liegende Prisma keine gerade Kante bildet. Dies ist wahrscheinlich durch einen nicht perfekten Schnitt während der Herstellung begründet. Das Prisma auf der gegenüberliegenden Seite weist diesen Defekt nicht auf. Die Verfärbung im linken Detail deutet darauf hin, dass in diesem Bereich keine Fasern liegen und nur die Matrix vorhanden ist. Dies kann einerseits darauf zurückzuführen sein, dass das Prisma während der Herstellung unsauber auf das Laminat aufgelegt wurde und eine Lücke entstanden ist oder andererseits darauf, dass sich der Aktuator während des Herstellungsprozesses zusammengezogen hat. Für letztere Möglichkeit spricht, dass sich der Aktuator in Richtung der auf der Form



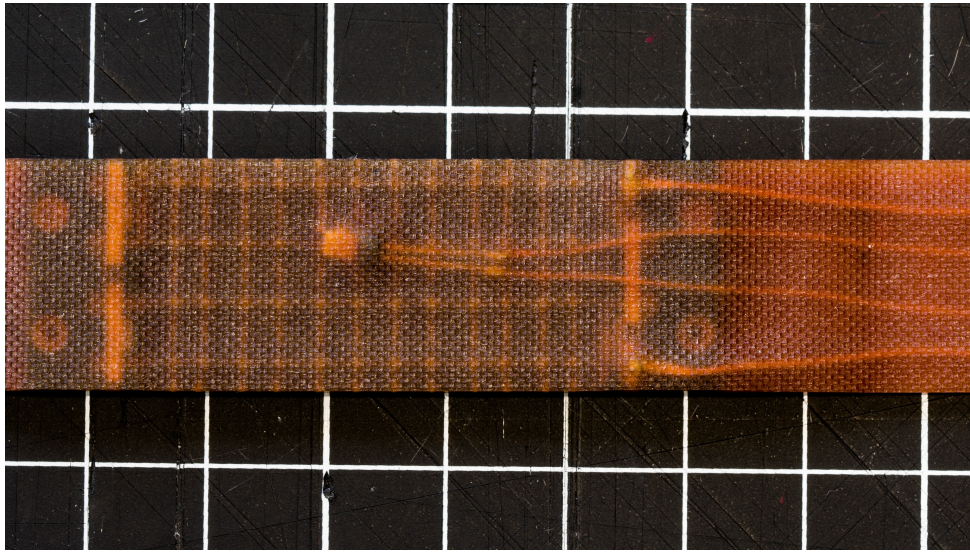
**Abb. 5.7:** Im linken Detail ist eine Welligkeit des oberen Laminates zu erkennen sowie eine Harzansammlung am Rand des Aktuators. Im rechten Detail ist eine Welligkeit im unteren Laminat zu erkennen (beispielhafte Probe #10\_40448).

fixierten Kupferkabel (in Abb. 5.7 rechts) zusammengezogen hat. Eine genauere Untersuchung erfolgt im folgenden Kapitel.

Im rechten Detail aus Abb. 5.7 ist zu erkennen, dass das untere Laminat am Ende des Prismas nach oben gedrückt wird. Dieser Effekt ist bereits in früheren Projekten aus [59] aufgetreten und lässt sich nach Erfahrung des Autors auch nicht durch eine zusätzliche Form auf der Oberseite minimieren. Der Effekt ist vermutlich ein Resultat unterschiedlicher Temperaturexpansionskoeffizienten und Steifigkeiten der beiden Laminare.

Von oben betrachtet, fallen zusätzlich zwei Defekte auf. In Abb. 5.8 ist ersichtlich, dass die Kupferleiter nicht exakt in Längsrichtung verlaufen und wellig im Laminat liegen. Durch eine Optimierung des Herstellprozesses, beispielsweise durch eine Verwendung eines Werkzeuges für die Verlegung der Leiter, kann dies in Zukunft verhindert werden. Gleichzeitig ist unklar, ob diese Welligkeit einen Einfluss auf das Verhalten der Probe hat. In Abb. 5.8 ist ebenfalls zu erkennen, dass der Temperatursensor auf einem FGL-Draht liegt und nicht wie vorgesehen mittig zwischen zwei Drähten. Durch ein Festkleben des Sensors auf dem EPDM ist dies vermeidbar. Da während der Herstellung jedoch unklar war, welcher Klebstoff mit dem EPDM und dem Temperatursensor bei der erhöhten Temperatur kompatibel ist, wurde dies nicht durchgeführt. Dieser Defekt tritt bei zwei der vier Proben auf.

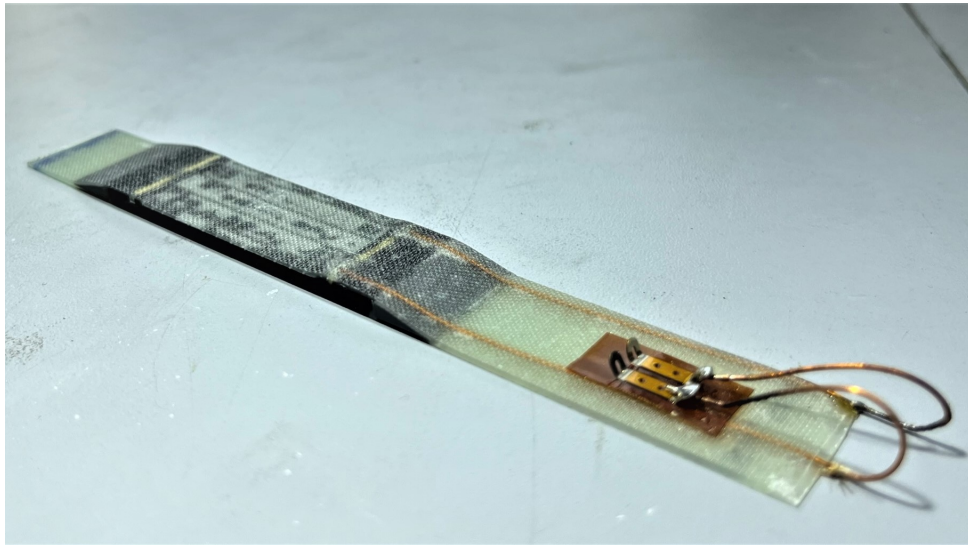
Nicht dargestellt ist eine leichte Biegung der Probe nach oben. Diese tritt nur bei den Proben mit Lagenaufbau Nr. 11 auf und beträgt an der Spitze der Proben ca. 0,5 mm. Dies wird auf den unsymmetrischen Lagenaufbau und der damit verbundenen Biegekopplung aufgrund der Temperaturänderung im Herstellprozess zurückgeführt.



**Abb. 5.8:** Welligkeit der Kupferdrähte und falsche Positionierung des Temperatursensors am Beispiel der Probe #10\_40446

### **Defekte und Fertigungsungenauigkeiten bei Proben mit kaltaushärtender Matrix**

Nach dem Aushärten bei Raumtemperatur ist aufgefallen, dass insbesondere oberhalb der Aktuatoren Lufteinschlüsse sind. Dies ist in Abb. 5.9 erkennbar. Die Lufteinschlüsse werden darauf zurückgeführt, dass der Druck innerhalb des Vakuumsacks während des Aushärtevorgangs von  $1,7 \cdot 10^{-1}$  bar auf  $1,1 \cdot 10^{-2}$  bar gesunken ist. Dadurch hat das Epoxidharz während des Aushärtens entgast und die so entstandenen Luftblasen sind durch das Aushärten eingeschlossen worden. Die Luft ist zur höchsten Stelle im Bauteil oberhalb des Aktuators gewandert. Warum der Druck im Vakuumsack gesunken ist kann nicht erklärt werden. Die Größe der von den Lufteinschlüssen betroffenen Stelle ist zwischen den Proben unterschiedlich. Des Weiteren sind die Aktuatoren innerhalb des Laminates verrutscht, sodass diese nicht mehr rechtwinklig in diesem liegen. Unklar ist, ob dies während der Infusion oder im Vorfeld während des Auflegens der oberen Lagen oder des Herstellens des Vakuums aufgetreten ist. Durch die Verwendung eines Spruhklebers, welcher die Bauteile auf dem unteren Laminat fixiert, kann dies verhindert werden. Bei der Verwendung muss jedoch darauf geachtet werden, dass die Bauteile das untere Laminat nicht verschieben und so Ondulationen im Laminat hervorrufen. Durch das Aussägen können dennoch rechtwinklige Proben hergestellt werden, jedoch stimmt die Ausrichtung der Aktuatoren nicht mehr mit der Faserorientierung überein. Die Abweichung wird mithilfe eines Winkelmessers auf  $2^\circ$  geschätzt.



**Abb. 5.9:** Luft einschüsse oberhalb des Aktuators bei Proben mit kaltaushärtender Matrix (erkennbar an hellen Flecken auf dem Aktuator)

### 5.3 Experimente an Proben mit eingebetteten Formgedächtnisaktuatoren

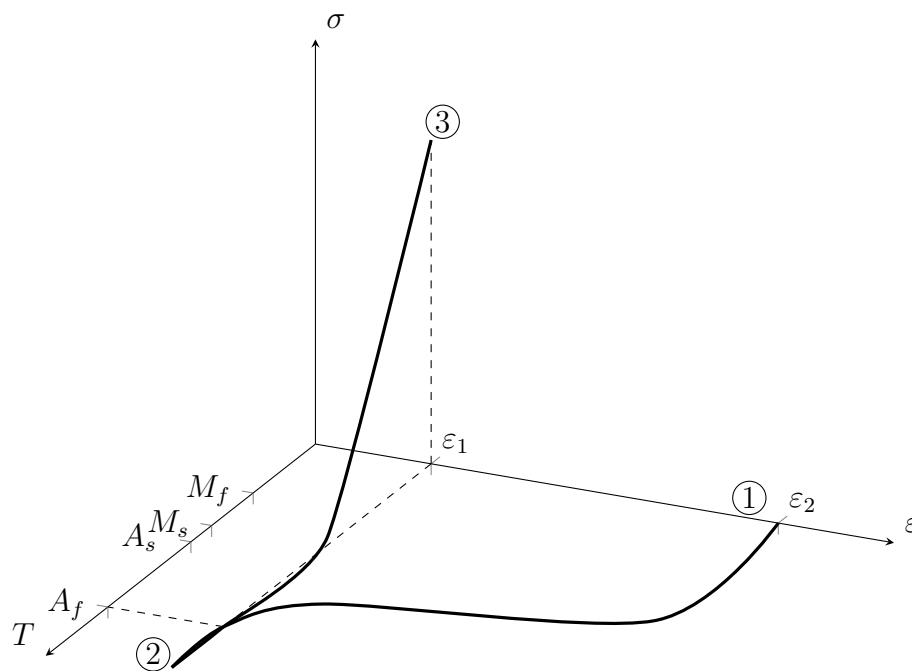
Im Folgenden werden Untersuchungen beschrieben, welche an Proben mit eingebetteten Formgedächtnisaktuatoren durchgeführt werden. Diese umfassen sowohl Proben aus Prepreg-Material als auch solche mit einer kaltaushärtenden Matrix.

#### 5.3.1 Beschreibung des Verlustes des Aktuationsvermögens und Erklärungsansätze

Nach der Fertigung der Proben sollen die Proben in einem Versuchsaufbau analog zu dem aus Abb. 5.1 getestet werden. Der Aktuator soll erhitzt werden und die daraus resultierende Verformung mit dem Ergebnis der ANSYS-Simulation verglichen werden. Bei der Aktivierung des Aktuators fällt jedoch auf, dass sich dieser nur leicht in die entgegengesetzte Richtung wie angenommen verbiegt. Dies schließt auf eine Ausdehnung der FGL-Drähte und nicht auf eine Kontraktion, wie sie durch den Zweiwegeeffekt der Drähte auftreten müsste. Dieses Verhalten tritt bei allen Proben auf. Ein Defekt in der elektrischen Kontaktierung kann ausgeschlossen werden, da ein geschlossener Stromkreis vorliegt.

Die Länge des Aktuators wird gemessen, um eine mögliche Kontraktion der FGL-Drähte zu bestimmen. Dies wird mithilfe eines Messschiebers gemacht, der seitlich an den Aktuator gehalten wird. Es ergibt sich in den vier gemessenen Proben eine Kontraktion von 1,28 bis 1,65 mm. Dies resultiert in einer Dehnung in den FGL-Drähten von  $\varepsilon = 0,0331$  bis  $0,0427$  mm/mm. Die FGL-Drähte kontrahieren sich also im Autoklavprozess und härten in diesem Zustand aus.

In Abb. 5.10 ist die Transformation der FGL während des Autoklavprozesses aufgezeigt. Beginnend an Punkt 1 herrscht ein martensitisches Gefüge bei Raumtemperatur vor. Wird das Harz beim Aufwärmen flüssig und steigt die Temperatur über  $A_s$ , beginnt eine Kontraktion der FGL. Diese wandelt sich um, bis sie an Punkt 2 bei 125 °C vollständig im Austenit vorliegt. Im Hinblick auf die oben errechneten Dehnungen in den FGL-Drähten liegt kein spannungsinduzierter Martensit vor, da hierfür die Dehnungen geringer ausfallen müssten. In diesem Zustand härtet nun die Matrix aus und hindert die FGL an einer Verformung. Am Ende des Autoklavprozesses sinkt die Temperatur auf Raumtemperatur ab. Mit Unterschreiten von  $M_s$  startet die Transformation vom austenitischen in den martensitischen Zustand. Dies geht mit einer deutlichen Volumenvergrößerung einher. Da die FGL jedoch an einer Verformung behindert wird, steigt die Spannung in Form einer Druckspannung wodurch sich ein entzwillingter Martensit bildet. Auch oberhalb von  $M_s$  ist eine Bildung des spannungsinduzierten Martensits aufgrund der Volumenabnahme möglich. Ob dies in der Probe auch auftritt kann nicht geklärt werden. An Punkt 3 angelangt, liegt nun ein Martensit vor, welcher sich bei einem erhöhten Spannungszustand bei Raumtemperatur befindet. Ob dieser Martensit verzwillingt oder entzwillingt vorliegt, kann nicht bestimmt werden.



**Abb. 5.10:** Vermuteter Verlauf von (Druck-)Spannung, Dehnung und Temperatur in der Formgedächtnislegierung im Autoklav unter Berücksichtigung des Aushärtprozesses der Matrix

Damit ist auch erklärt, weshalb der intrinsische Zweiwegeeffekt nicht mehr beobachtet werden kann. Dieser ist auf einen spannungsfreien Zustand beschränkt (vgl. Abb. 2.3 (links)). Eine weitere Bestimmung des Kristallzustandes innerhalb der FGL an Punkt 3 gestaltet sich schwierig. Da die Legierungsanteile in der FGL unbekannt sind, kann das Verhalten nicht mit Beobachtungen in der Literatur verglichen werden. Bereits Abweichungen



von 0,5 % in den Anteilen des binären Ni-Ti-Systems resultieren in großen Änderungen im beobachteten Materialverhalten [19]. Auch die Wärmebehandlung im Herstellungsprozess der FGL führt zu großen Veränderungen in den Kennwerten. Eine abschließende Klärung wäre nur in einem Zugversuch mit anschließender dynamischer Differenzkalorimetrie (engl. *differential scanning calorimetry* DSC) möglich. Im Zugversuch wird unter den gleichen Temperaturrandbedingungen der Draht dem Spannungs-Dehnungs-Verlauf aus Abb. 5.10 unterzogen. Mit dem anschließenden DSC-Verfahren wird mithilfe einer Messung der Wärmemenge bei Aufheizen/Abkühlen des Drahtes die Kristallphase bestimmt. Diese Bestimmung ist im zeitlichen Rahmen der Arbeit nicht möglich. So bleibt der genaue Kristallzustand unbekannt.

Deutlich wird, dass das ANSYS-Modell dieses Verhalten nicht vorhersagt. Dies wird auf fehlerhafte Definitionen der Kontakte zwischen den Körpern zurückgeführt. Im Speziellen sind die Aktuatoren über eine nicht abhebende Verbundverbindung mit dem Laminat umgeben. Diese Verbindung tritt so nicht in der Realität auf, da eine Relativbewegung zwischen Laminat, Prismen und Aktuator durch die geringe Viskosität des Epoxidharzes während des Aushärteprozesses möglich ist. Eine Modellierung mittels ACCS oder vereinfachend über einen reibungsbehafteten Kontakt scheint damit sinnvoll und sollte in zukünftigen Arbeiten untersucht werden.

### 5.3.2 Temperaturverlauf innerhalb der Proben

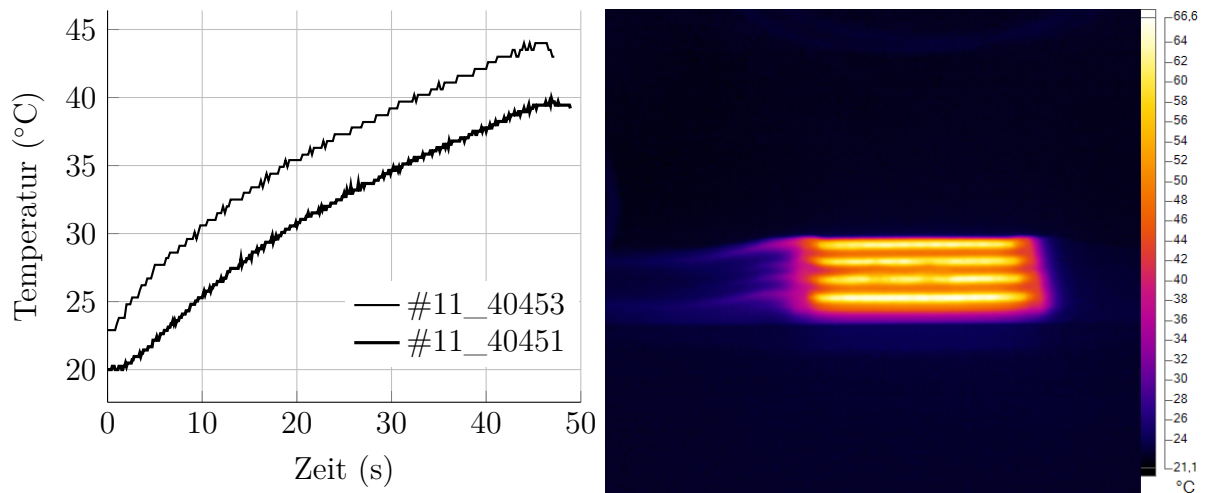
Die eingebetteten Temperatursensoren haben zum Ziel, Erkenntnisse der Temperaturverteilung innerhalb des Laminates bei Aktivierung der FGL zu erlangen. Wird beispielsweise die Glasübergangstemperatur einer kaltaushärtenden Matrix nur in unmittelbarer Nähe der Drähte überschritten, nicht aber entlang der Grenzfläche zwischen EPDM und dem oberen Laminat, so ist eine Verwendung einer kaltaushärtenden Matrix durchaus umsetzbar.

Für eine Messung der Temperatur muss das Signal der Temperatursensoren ausgelesen werden und in eine Temperatur umgerechnet werden. Dafür wird ein Arduino Nano verwendet, welcher das Signal des Sensors verstärkt, in eine Temperatur umrechnet und als analoges Spannungssignal im Bereich 0 bis 10 V ausgibt. Dieses Signal kann wiederum auf einem Oszilloskop angezeigt werden.

Anhand der Proben #11\_40451 und #11\_40453, bei denen der Temperatursensor mittig zwischen zwei FGL-Drähten liegt, wird das Temperaturverhalten innerhalb der Probe untersucht. Zusätzlich wird mithilfe einer Wärmebildkamera zusätzlich von außerhalb der Probe die Temperatur flächig aufgezeichnet. In Abb. 5.11(a) ist der Temperaturverlauf der beiden Temperatursensoren bei Aktivierung der Aktuatoren aufgezeigt. Dabei fällt auf, dass der Temperaturverlauf ähnlich ist, jedoch mit einem näherungsweise konstanten Versatz von 3 °C. Daraus lässt sich schließen, dass sich die Temperatur im Bereich des Temperatursensors bei normalen Umgebungstemperaturen um 20 °C erhöht. Die Absoluttemperatur ist mit ca. 44 °C in einem Bereich, der von den meisten kaltaushärtenden Epoxidharzen ertragen werden kann.

Das Wärmebild in Abb. 5.11(b) stammt aus einer Kamera vom Typ Fluke Ti401 Pro.

Diese Kamera bietet eine Auflösung von 640 px mal 480 px. Für eine akkurate Messung der Temperatur muss der Emissionsgrad  $\varepsilon$  des GFK bestimmt werden. Der Emissionsgrad ist dabei das Verhältnis zwischen der abgestrahlten Wärmestrahlung des Körpers zur Strahlung eines Schwarzen Strahlers, welcher die komplette ankommende Strahlung absorbiert. Der Emissionsgrad von GFK ist unbekannt, weswegen näherungsweise ein Emissionsgrad von  $\varepsilon = 0,98$  angenommen wird. Für eine qualitative Bestimmung der Temperaturverteilung ist dies ausreichend genau.



(a) Verlauf der Temperatur an den eingebetteten Temperatursensoren zweier Proben (b) Wärmebild der Probe #11\_40451 bei Aktivierung des Aktuators

**Abb. 5.11:** Temperaturverhalten innerhalb der Proben bei Aktivierung der Aktuatoren

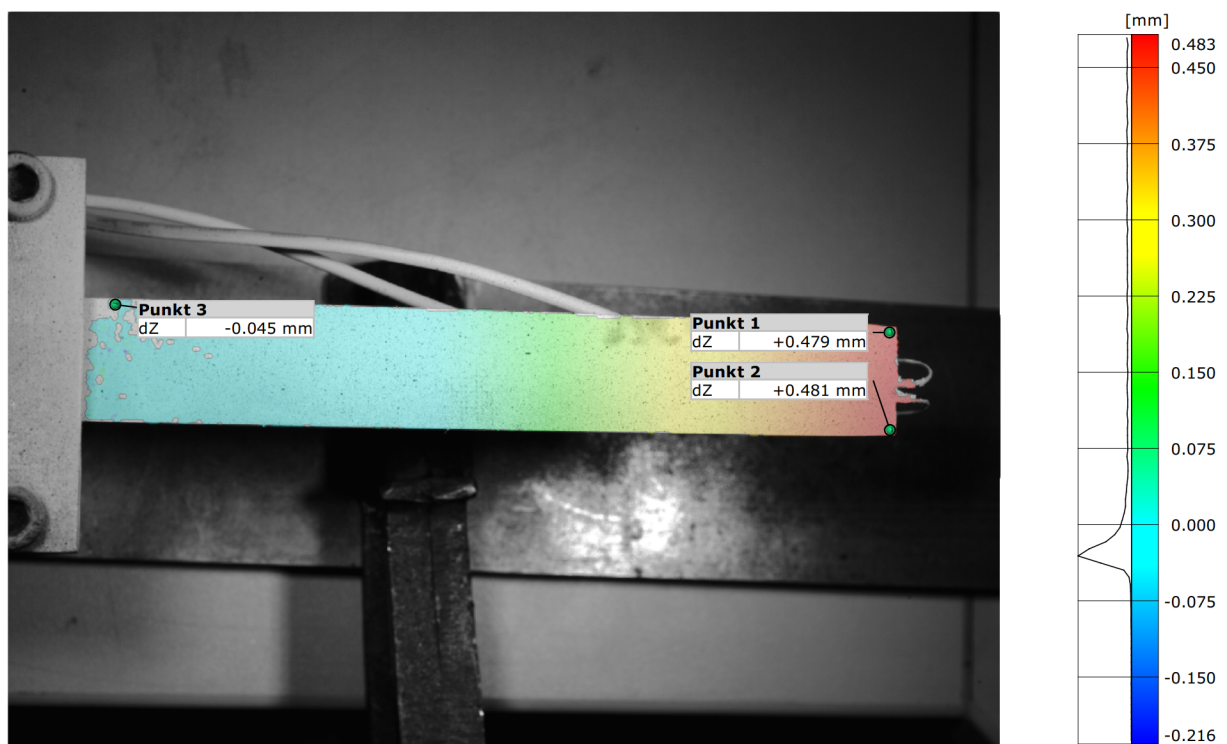
In Abb. 5.11(b) ist der Bereich des Aktuators von schräg oben zu erkennen. Deutlich sind die vier FGL-Drähte zu erkennen. Oberhalb der FGL-Drähte wird das Laminat an der Oberfläche auf  $67^{\circ}\text{C}$  erhitzt. Dies ist bereits oberhalb von  $A_s$ . Soll das Laminat diese Temperatur ohne Aufweichung der Matrix ertragen, wäre hier eine Aktuierung der FGL beim Aushärten die Folge. Zwischen den Drähten wird das Laminat auf ca.  $50^{\circ}\text{C}$  erhitzt. Dies ist auf der Oberfläche ca. 6 bis  $10^{\circ}\text{C}$  über der Temperatur, welche im Laminat vom Temperatursensor gemessen wird. Diese Differenz ist nicht rein auf eine fehlerhafte Einstellung des Emissionsgrades zurückzuführen, da dessen Auswirkung einen geringeren Effekt hervorrufen. Die Differenz ist nicht abschließend zu erklären. In jedem Fall zeigen die Aufnahmen jedoch, dass die Verwendung einer kaltaushärtenden Matrix möglich ist, wenn ein Aufweichen der Matrix im Bereich um die FGL-Drähte in Kauf genommen wird. Da die Kraftübertragung der FGL-Drähte an das Laminat hauptsächlich über die Anker erfolgt, ist diese Annahme valide (vgl. Kap. 4.2.2).

### 5.3.3 Aktuierung von Proben unter Verwendung einer kaltaushärtenden Matrix

Nach der Herstellung der Proben werden diese in einem Aufbau, welcher analog dem der Prepreg-Proben ist getestet.

### Versuchsaufbau und -durchführung

Die drei Proben werden nacheinander in eine Vorrichtung eingespannt. Mithilfe eines Winkels wird geprüft, dass die Proben rechtwinklig in der Einspannung klemmen. Entsprechend der Simulation liegt zwischen der Einspannung und dem Start des Aktuators eine Lücke von 15 mm. Von oben wird mithilfe eines ARAMIS Systems die Durchbiegung gemessen. Das Ergebnis ist am Beispiel der Probe #KM\_40445 in Abb. 5.12 dargestellt. Die Verschiebung in z-Richtung, welche hier abgebildet ist, liegt an der Spitze der Probe bei 0,480 mm. Bei allen Proben ergibt sich eine Verschiebung von 0,479 bis 0,505 mm. Diese Auslenkung ergibt sich jeweils nach der ersten Aktuierung nach Herstellung der Proben.



**Abb. 5.12:** Flächige Verschiebung in z-Richtung (in Bildebene hinein) am Beispiel der Probe #KM\_40445 (erste Aktuierung)

Zusätzlich soll untersucht werden, wie sich die Matrix unter dem Temperatureinfluss der FGL verhält. Dafür werden die Aktuatoren zyklisch aktiviert und anschließend wieder abgekühlt. Insgesamt wird dies für jede Probe fünf Mal durchgeführt. Dabei fällt auf, dass sich eine z-Verschiebung analog zum vorherigen Versuch von ca. 1,5 mm nach zwei bis drei Zyklen einstellt. Gleichzeitig bleibt eine Verformung im kalten Zustand von ca. 0,3 mm zurück.

**Tab. 5.2:** Verschiebung an der Spitze der Proben für statische (erste Aktivierung) und zyklische Versuche (nach fünf Aktivierungen)

	Statisch	Zyklisch		
		maximal	bleibend	Differenz
#KM_40445	0,480 mm	1,546 mm	0,058 mm	1,448 mm
#KM_40447	0,479 mm	1,931 mm	0,345 mm	1,586 mm
#KM_40450	0,505 mm	1,753 mm	0,123 mm	1,630 mm

### Diskussion der Ergebnisse und Rückschlüsse auf das verwendete Ersatzmodell des Aktuators

Die Auslenkung durch Aktivierung der Aktuatoren in den statischen Versuchen ist mit ca. 0,5 mm deutlich geringer als das Ergebnis aus der Simulation in ANSYS. Dort liegt die Auslenkung an derselben Stelle der Probe bei 10,5 mm. Für diese große Diskrepanz zwischen Simulation und Versuch können grundsätzlich diese Gründe in Frage kommen:

- Während des Herstellprozesses kontrahiert die FGL bzw. ihr wird in Analogie zum in Kap. 5.3.1 beschriebenen Effekt von außen ein Spannungszustand aufgeprägt, sodass das Arbeitsvermögen des intrinsischen Zweiwegeffekts der FGL-Drähte eingeschränkt wird.
- Annahmen im FE-Modell, welche für die Simulation und das Ersatzmodell des Aktuators gemacht werden, sind fehlerhaft und stellen nicht die realen Bedingungen nach. Dies kann sowohl Kontaktbedingungen als auch das Modell des FGE betreffen.
- Die in der Simulation verwendeten Materialparameter weichen stark von den realen Stoffeigenschaften ab.

Die Länge der Aktuatoren nach der Einbettung wird mithilfe eines Messschiebers gemessen und mit der Länge vor der Einbettung verglichen. Dabei kann keine Kontraktion der FGL festgestellt werden. Um zu klären, ob ein veränderter Spannungszustand in der Probe herrscht, wird untersucht, ob der Einwegeffekt bzw. extrinsische Zweiwegeffekt vorhanden ist. Dafür wird eine Probe in der Vorrichtung eingespannt. Durch ein Gewicht von 250 g wird die Probe so belastet, dass die FGL-Drähte des Aktuators mit einer Zugbeanspruchung belastet werden. Durch das Gewicht ergibt sich eine Auslenkung am Ende der Probe von 2,49 mm. Wird nun der Aktuator aktiviert, geht die Auslenkung auf 1,68 mm zurück. Dies bedeutet, dass eine Dehnung in den FGL-Drähten, welche durch das Gewicht aufgebracht wird, durch Aktivierung der FGL zumindest zu einem gewissen Anteil rückgängig gemacht werden kann. Die Differenz beider Auslenkungen liegt dabei im pseudoplastischen Bereich des Gefüges. Diese ist mit 0,81 mm fast doppelt so groß wie die Auslenkung im statischen Versuch (siehe Tab. 5.2). Daraus lässt sich schließen, dass das Arbeitsvermögen des intrinsischen Zweiwegeffekts im statischen Versuch nicht vollständig ausgenutzt werden kann, da die FGL von außen angreifenden Lasten daran gehindert wird.

Die Steifigkeit der Probe wird abgesehen von der FGL-Schicht maßgeblich von der Steifig-

keit des Laminates bestimmt. Die Materialparameter des GFK-Gewebes Interglas 90070 sind mithilfe von in [71] veröffentlichten Formeln aus den Kennwerten der Datenblätter für das Epoxidharz sowie die Faser berechnet (siehe Anhang B). Die daraus entstandenen Steifigkeitswerte des Gewebes insbesondere in faserparalleler Richtung ( $E_{||} = 10\,395$  MPa) scheinen niedriger zu sein als in der Literatur. So wird in [40] für ein ähnliches Laminat  $E_{||} = 16\,200$  MPa angegeben und in [16]  $E_{||} = 19\,000$  MPa. Wird nun der E-Modul für die Glasfaser betrachtet, so zeigt sich aber, dass der im Datenblatt [21] angegebene Wert mit  $E_{f,||} = 18\,000$  MPa ebenfalls niedriger ist als für ähnliche Gewebe mit derselben Faser ( $E_{f,||} = 20\,000$  bis  $24\,000$  MPa [22, 23]). Die niedrigeren Steifigkeitswerte für das Gewebe stammen damit aus den niedrigen Werten für die Faser und bilden damit die Realität gut ab. Zusätzlich wird untersucht, wie stark sich eine Variation der Materialparameter auf die Deformation auswirkt. Mit dem hohen E-Modul aus [16] ergibt sich dabei eine Reduktion der Deformation von 10,5 mm auf 9,3 mm, diese weicht jedoch weiterhin stark von den experimentellen Ergebnissen ab. Damit ist gezeigt, dass eine Anpassung der Materialparameter nicht zu einer besseren Vorhersage der Deformation führt und die Gründe für die große Abweichung zwischen Simulation und Versuch nicht allein in den Materialparametern zu finden sind.

Daraus lässt sich schließen, dass Annahmen innerhalb des FE-Modells nicht der Realität entsprechen. So wird der negative Temperatureausdehnungskoeffizient  $\alpha$  für das Ersatzmodell für den FGE nur durch einen Versuch mit einer festen Steifigkeit in Form des Stahlbleches bestimmt. Damit besitzt der Wert von  $\alpha$  Gültigkeit für diese Steifigkeit, wie diese Versuche zeigen jedoch nicht universell für alle anderen Steifigkeiten in Form eines Faserverbundes. Zusätzlich wird, wie in Kap. 4.1 beschrieben, die thermische Dehnung immer erreicht, unabhängig davon, wie groß die Steifigkeit des Bauteils ist, auf welches der Aktuator platziert ist. Die Annahme, dass sich die FGL-Drähte zusammenziehen, bis die Festigkeit überschritten ist, ist nach Auswertung der Versuchsergebnisse nicht richtig. Durch eine ausreichend große Steifigkeit können die FGL-Drähte blockiert werden, ohne deren Festigkeitsgrenze zu überschreiten. Diese Abhängigkeit des Verhaltens der FGL von der anliegenden Spannung wird in einem Modell in [67] berücksichtigt. Dieses Modell für eine in einen Faserverbund eingebettete FGL-Schicht verwendet ebenfalls eine Modellierung über einen temperaturabhängigen Temperatureausdehnungskoeffizienten, berücksichtigt dabei aber je nach Kristallzustand die anliegende thermische Dehnung bzw. die Spannung, welche sich durch die Kristallumwandlung ergibt. Diese muss in Versuchen ermittelt werden. In [68] wird dieses Modell in die kommerziellen FE-Codes MSC.Patran und MSC.Nastran implementiert. Ein Vergleich mit einem phänomenologischen Modell zeigt eine gute Übereinstimmung.

Die zyklischen Versuche zeigen, dass sich bereits nach zwei bis drei Zyklen eine Verdreifachung in der Auslenkung einstellt und gleichzeitig eine bleibende Verformung zurückbleibt (siehe Tab. 5.2). Optisch lässt sich kein Aufweichen der Matrix in der Umgebung der heißen FGL-Drähte erkennen, welche eine Vergrößerung der Auslenkung durch eine Verringerung der Steifigkeit erklären kann. Deswegen wird diese Steifigkeitsdegradation auf Prozesse zurückgeführt, welche innerhalb des Faserverbundes geschehen.

In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt nicht auf einer Betrachtung vom zyklischen Verhalten der Proben. Eine Charakterisierung dessen setzt ein umfangreiches Testprogramm

voraus, welches nicht Ziel dieser Arbeit ist. Dennoch soll hier kurz dargestellt werden, weshalb das beobachtete Verhalten der Probe auf die zyklische Beanspruchung des Faserverbundes zurückzuführen ist.

Wird ein Material einer zyklischen Beanspruchung unterworfen, ermüdet dieses mit zunehmender Zyklenzahl. Bei großen Beanspruchungen und geringer Zyklenzahl spricht man von *Low Cycle fatigue* (LCF). Untersuchungen in [59] an Proben aus HexPly<sup>®</sup>913 zeigen eine signifikante Steifigkeitsdegradation innerhalb weniger Zyklen bei sehr hohen Lastleveln bis 90 % der Bruchlast. Dabei kann in [59] optisch kein Defekt nachgewiesen werden. Diese Beobachtungen decken sich mit [64]. Diese Randbedingungen zeigen sich auch bei den hier getesteten Proben. Die Simulation in ANSYS legt ein Lastlevel nahe der Bruchlast nahe. Gleichzeitig wird eine Steifigkeitsdegradation während der ersten Zyklen betrachtet, die dann einen nahezu konstanten Wert annimmt. Auch dieses Verhalten kann in [59] beobachtet werden.

# Kapitel 6

## Zusammenfassung und Ausblick

### 6.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit erörtert die Möglichkeit kommerziell erhältliche Formgedächtnisaktuatoren in ein Faserverbundlaminat einzubetten. Hierfür werden verschiedene Konzepte erarbeitet, simulativ auf ihre Eignung überprüft und anschließend experimentell validiert. Nach einer Literaturrecherche, welche die verschiedenen Effekte einer Formgedächtnislegierung beschreibt und Herstellungsmethoden und Methoden zur Versagensvorhersage bei Faserverbundlaminaten zusammenfasst, wird damit begonnen, Methoden für eine Einbettung der Aktuatoren zu erarbeiten. Die verwendeten Aktuatoren werden von der CompActive GmbH hergestellt und bestehen aus vier zwischen zwei festen Ankern gespannten FGL-Drähten. Diesen ist bereits der Zweiwegeeffekt aufgeprägt. Die Drähte sind entlang ihrer freien Länge in einer EPDM-Schicht eingebettet.

Die wesentliche Herausforderung bei der Einbettung von FGL in einen FVW besteht in den konkurrierenden Temperaturrandbedingungen beider Werkstoffe, da sich die Aushärtetemperatur des Laminates und die Aktivierungstemperatur der FGL überschneiden. Dies ist nur dann möglich, wenn die Aushärtetemperatur der Matrix nahe  $T_g$  und damit oberhalb der Austenit-Starttemperatur  $A_s$  liegt. Eine Aktivierung des Aktuators während des Aushärteprozesses ist damit unvermeidbar. Vor diesem Hintergrund werden drei Möglichkeiten erarbeitet, die Aktuatoren in ein Laminat einzubetten. Jede dieser Möglichkeiten sieht dabei die Verwendung eines GFK-Prepregs vor. Es wird die Variante gewählt, welche im Bezug auf eine spätere Anwendbarkeit am vielversprechendsten ist, gleichzeitig jedoch die größten Herausforderungen beim Aushärteprozess mit sich bringt.

Zusätzlich werden Proben gebaut, welche ein kaltaushärtendes Epoxidharz verwenden. Durch eine Aushärtung unterhalb von  $A_s$  wird das Temperaturproblem umgangen. Die schlechtere Temperaturbeständigkeit des Harzes bei einer späteren Aktivierung der FGL-Drähte wird dabei in Kauf genommen. Die zusätzliche Einbettung eines Temperatursensors vom Typ PT1000 in die Prepreg-Proben liefert in der Grenzfläche zwischen EPDM und oberem Laminat Informationen über den Temperaturverlauf.

Für die Simulation mit dem FE-Code ANSYS wird ein Ersatzmodell entwickelt, welches den Formgedächtniseffekt auf einen negativen Temperatureausdehnungskoeffizienten

$\alpha$  zwischen  $A_s$  und  $A_f$  zurückführt. Zusätzlich werden die vier FGL-Drähte des Aktuators durch eine rechteckige Schicht modelliert. Diese besitzt dieselbe Dicke wie die Drähte und einen E-Modul gemäß dem Verhältnis der Querschnittflächen von Drähten und Schicht. Dieser Temperatúrausdehnungskoeffizient sowie der E-Modul des Martensit werden experimentell in einem Biegeversuch bestimmt. Durch die Verformung, welche optisch mithilfe eines ARAMIS-Systems vermessen wird, kann der E-Modul der FGL-Schicht bestimmt werden. Der E-Modul des austenitischen Kristallzustandes kann dabei aufgrund von Limitierungen im ARAMIS-System nicht bestimmt werden und wird durch einen Literaturwert angenommen.

Mithilfe dieses Ersatzmodells wird ein FE-Modell erstellt, welches die für in ein Laminat eingebettete Aktuatoren dimensionierenden Lastfälle des Aushärtvorgangs im Autoklav sowie der Aktivierung des Aktuators und subsequenter Verbiegung der Probe berechnet. In die Simulation des Aushärtvorgangs fließt sowohl der Druck- als auch der Temperaturverlauf mit ein. Der Aushärtvorgang des Epoxidharzes mit der damit verbundenen Viskositätsänderung wird nicht berücksichtigt. Die Simulation zeigt eine Dehnung der FGL-Schicht von 0,0023 mm/mm. Damit ist diese Kontraktion, welche durch das Aushärten der Matrix in der FGL verbleibt, klein genug um den Zweiwegeeffekt nach der Herstellung der Proben sinnvoll nutzen zu können, da nach Hersteller den Drähten eine Dehnung von 0,03 mm/mm aufgeprägt ist. Die Spannungen, welche sich in den Bauteilen ergeben, liegen unterhalb der jeweiligen Festigkeitsgrenze. Durch eine händische Optimierung des Lagenaufbaus des Laminates wird die Durchbiegung bei Aktivierung der Proben unter Verwendung eines realistischen Lagenaufbaus maximiert. Es ergibt sich am Ende der Probe eine maximale Auslenkung von 6,92 mm. Das Laminat wird mittels eines 3D-Puck-Kriteriums so ausgelegt, dass kein Versagen während der beiden Lastfälle auftritt. Diese Auswertung wird innerhalb des ANSYS-Moduls *ACP Post* durchgeführt. Das untere Laminat wird dabei kaum beansprucht, während das obere Laminat durch die Druckkräfte aufgrund der Biegung zu einem Zwischenfaserbruch neigt.

Eine anschließende Netzkonvergenzanalyse zeigt bei einer Verfeinerung des Netztes nur eine Veränderung im einstelligen Prozentbereich auf womit bewiesen ist, dass das Rechenetz valide Ergebnisse liefern kann.

Es werden vier Prepreg-Proben hergestellt. Diese werden gemeinsam auf einer Platte hergestellt und anschließend ausgeschnitten und die Seiten der Probe geschliffen. Dadurch können Fehlstellen innerhalb der Probe sichtbar gemacht werden. Es fällt auf, dass zwischen den Aktuatoren und den an der Stirnseite der Aktuatoren platzierten Prismen ein Spalt entstanden ist, der mit der Matrix aufgefüllt ist. Dies wird näher untersucht, da dies auf eine Kontraktion des Aktuators hindeutet. Es zeigt sich, dass alle Aktuatoren um 1,275 bis 1,65 mm kontrahiert sind, was in einer Dehnung von 0,0331 bis 0,0427 mm/mm resultiert. Damit ist der Zweiwegeeffekt nicht mehr nutzbar. Es wird davon ausgegangen, dass sich die FGL in einem martensitischen Zustand bei erhöhter (Druck-)Spannung befindet. Eine Aktivierung der Proben zeigt, dass sich diese leicht entgegen der vorhergesagten Richtung biegen, sich die Drähte folglich ausdehnen und nicht zusammenziehen. Dies wird auf eine Längenänderung aufgrund der Temperaturerhöhung zurückgeführt.

Durch Aktivierung der FGL kann eine Aussage des Temperaturverlaufs innerhalb der Prepreg-Proben geliefert werden. In der Grenzschicht zwischen EPDM und Laminat er-



hört sich die Temperatur während des Aufheizens der FGL-Drähte um 40 °C. Der Temperatursensor liegt dabei genau mittig zwischen zwei FGL-Drähten. Die Temperatur ist von kaltaushärtenden Epoxidharzen ertragbar. Damit wird ein Aufweichen der Matrix nur unmittelbar um die FGL-Drähte erwartet.

Da die Proben unter Verwendung eines Prepreg-Laminates nicht weiter untersucht werden können, werden Proben aus einer kaltaushärtenden Matrix hergestellt. Diese Proben werden in einem DP-RTM-Verfahren gefertigt und anschließend bei 50 °C und damit unterhalb von  $A_s$  (60 °C) ausgehärtet. Laut Datenblatt ergibt sich dadurch  $T_g = 80$  °C. Nach der Aushärtung werden die Proben analog zu einem Kragbalken in eine Vorrichtung eingespannt. Durch die Aktivierung des Aktuators ergibt sich eine Durchbiegung, welche zuvor in ANSYS zu 10,5 mm berechnet wurde. Die Verbiegung der Proben wird wieder mit einem ARAMIS-System optisch bestimmt. Es zeigt sich, dass die Durchbiegung der Proben mit ca. 0,5 mm deutlich geringer ist als vorhergesagt.

## 6.2 Ausblick

Das Ergebnis der Prepreg-Proben zeigt, dass die Randbedingungen, welche für die Simulation des Aushärteprozesses im Autoklav verwendet werden, nicht die realen Bedingungen wiedergeben. In der Simulation wird auch bei hohen Temperaturen kein Aufweichen bzw. verflüssigen der Matrix simuliert. Dadurch ist zwar die Spannung höher als in der Realität, da sich diese in der Simulation nicht abbauen können, die Kontraktion der FGL kann damit aber nicht verlässlich vorhergesagt werden. In diesem Sinne ist in zukünftigen Arbeiten eine Anpassung der Randbedingungen nötig, welche in die Simulation des Aushärteprozesses fließen. So ist es möglich, durch die Verwendung des ANSYS-Moduls *ANSYS Composite Cure Simulation* das Aushärten der Matrix mit einem Verflüssigen dieser, dem chemischen Prozess des Aushärtens und den damit verbundenen Volumenänderungen und den Viskositätsänderungen zu berechnen und damit die Randbedingungen anzupassen [37, 43]. Dafür werden im Vorfeld einige Materialdaten benötigt, welche, falls nicht vom Hersteller der Matrix erhältlich, experimentell bestimmt werden müssen. Auch eine Anpassung der Kontaktbedingungen ist notwendig. Eine Relativbewegung zwischen den Körpern während des Aushärteprozesses wird in der Simulation nicht berücksichtigt, tritt aber in der Realität auf. Dies muss entsprechend berücksichtigt werden. Mit diesen Modellen kann dann erneut untersucht werden, auf welche Art eine Einbettung von Formgedächtnisaktuatoren in ein Prepreg-Laminat möglich ist.

Die kaltaushärtenden Proben zeigen grundsätzlich den Zweiwegeeffekt auf, jedoch stimmt die simulative Vorhersage der Auslenkung nicht mit den Versuchsergebnissen überein. Dies wird auf fehlerhafte Annahmen im Ersatzmodell der ANSYS-Simulation für den FGE bzw. den Aktuator zurückgeführt. Im verwendeten Ersatzmodell wird keine Abhängigkeit der anliegenden Spannung berücksichtigt. Ein Blockieren der Drähte durch ausreichend große Kräfte kann damit nicht richtig vorhergesagt werden. Die Verwendung eines Modells, wie in [67] beschrieben, ermöglicht dies. Hier fließt die Spannung in Form einer Blockierspannung bzw. einer thermischen Dehnung in das Modell ein. Dieses Modell bietet den Vorteil einer einfachen Berechnung sowie wenige benötigte Materialparameter. Im Vergleich zu einem phänomenologischen Modell, wie es in ANSYS implementiert ist [3], benötigt es

zudem deutlich weniger Rechenzeit.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass diese Arbeit eine gute Ausgangsbasis liefert, die Einbettung von FGL-Aktautoren in FVW weiterzuverfolgen. Das verwendete Ersatzmodell in der FE-Simulation muss angepasst werden, hier liefert [67] einen guten Startpunkt. Zusammen mit einer Simulation des Aushärteprozesses in ACCS kann eine bessere Vorhersage des Aushärteprozesses gemacht werden. Im Verlauf der Arbeit hat sich an verschiedenen Stellen gezeigt, dass sowohl die mechanischen als auch thermischen Materialdaten der verwendeten FGL genauer bestimmt werden müssen. Hierfür scheint ein Zugversuch des reinen FGL-Drahtes kombiniert mit einer thermischen Analyse mittels DSC unerlässlich. Damit kann dann ein genaueres Modell des FGE erstellt werden.

# Literatur

- [1] Giada Abate und Johannes Riemenschneider. „Fluid-Structure Interaction Tool For Morphing Blades“. In: *The 8th European Congress of Computational Methods in Applied Sciences and Engineering ECCOMAS Congress 2022*. Juni 2022. URL: <https://elib.dlr.de/187385>.
- [2] *Araldite®LY 5052/ Aradur®5052 Cold Curing Epoxy Systems*. Huntsman Advanced Materials (Switzerland) GmbH. Basel, Nov. 2012.
- [3] Ferdinando Auricchio. „A robust integration-algorithm for a finite-strain shape-memory-alloy superelastic model“. In: *International Journal of Plasticity* 17.7 (2001), S. 971–990. DOI: 10.1016/S0749-6419(00)00050-4.
- [4] J. Antonio Balta-Neumann et al. „Adaptive composites with embedded NiTiCu wires“. In: *Smart Structures and Materials 2001: Active Materials: Behavior and Mechanics*. Hrsg. von Christopher S. Lynch. SPIE Proceedings. SPIE, 2001, S. 377. DOI: 10.1117/12.432777.
- [5] Hans-Jürgen Bargel und Günter Schulze, Hrsg. *Werkstoffkunde*. 10., bearb. Aufl. VDI. Berlin und Heidelberg: Springer, 2008. ISBN: 978-3-540-79297-0.
- [6] O. Benafan et al. „Recent Advancements in Rotary Shape Memory Alloy Actuators for Aeronautics“. In: *Shape Memory and Superelasticity* 5.4 (2019), S. 415–428. DOI: 10.1007/s40830-019-00260-3.
- [7] Alfred Böge und Wolfgang Böge. *Technische Mechanik: Statik - Reibung - Dynamik - Festigkeitslehre - Fluidmechanik*. 31., überarbeitete und erweiterte Auflage. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. ISBN: 978-3-658-09154-5.
- [8] Dietrich Braess. *Finite Elemente: Theorie, schnelle Löser und Anwendungen in der Elastizitätstheorie*. 5. überarbeitete Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer Spektrum, 2013. ISBN: 978-3-642-34797-9.
- [9] Amaël Cohades und Véronique Michaud. „Shape memory alloys in fibre-reinforced polymer composites“. In: *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* 1.1 (2018), S. 66–81. DOI: 10.1016/j.aiepr.2018.07.001.
- [10] *Compactive Produkte*. <https://compactive.de/produkte/>. Aufgerufen am 16.03.2023.
- [11] Federica Daghia et al. „Shape Memory Alloy Hybrid Composite Plates for Shape and Stiffness Control“. In: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 19.5 (2008), S. 609–619. DOI: 10.1177/1045389X07077901.
- [12] C. Dahnke et al. „Thermomechanical behavior of shape memory alloy metal matrix composite actuator manufactured by composite extrusion“. In: *Smart Materials and Structures* 28.5 (2019), S. 055022. DOI: 10.1088/1361-665X/ab0ef5.

- [13] *Datasheet Actuation Module: Curve® plugged 3920E20*. Aufgerufen am 16.03.2023. CompActive GmbH.
- [14] *Datasheet Actuation Module: Curve® plugged 3920M*. Aufgerufen am 16.03.2023. CompActive GmbH.
- [15] European Commission: Directorate-General for Research and Innovation, Directorate-General for Mobility and Transport. *Flightpath 2050 Europe's Vision for Aviation Maintaining Global Leadership & Serving Society's Needs: Report of the High Level Group on Aviation Research*. Luxemburg, 2011.
- [16] *Faserverbund-Werkstoffdaten*. <https://www.swiss-composite.ch/pdf/i-Werkstoffdaten.pdf>. Aufgerufen am 02.04.2023.
- [17] Karoline Fladung. „Aufbau eines Prozesses zur Charakterisierung von dünnen Platten aus einer Formgedächtnislegierung mit anschließender Finite-Elemente Simulation“. Masterarbeit. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Dez. 2022. URL: <https://elib.dlr.de/190906/>.
- [18] Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking. *Hydrogen-powered aviation : a fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050*. Publications Office of the European Union, Mai 2020. DOI: doi/10.2843/471510.
- [19] Hiroyasu Funakubo, Hrsg. *Shape Memory Alloys*. Bd. Vol. 1. Precision Machinery and Robotics. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1984. ISBN: 2-88124-136-0.
- [20] Christof Gebhardt, Hrsg. *Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2018. ISBN: 978-3-446-45001-1.
- [21] *Glasfilamentgewebe für die Kunststoffverstärkung - Produktspezifikation Interglas 90070*. Porcher Industries Germany GmbH. Erbach, Juli 2015.
- [22] *Glasfilamentgewebe für die Kunststoffverstärkung - Produktspezifikation Interglas 92105*. Porcher Industries Germany GmbH. Erbach, Feb. 1999.
- [23] *Glasfilamentgewebe für die Kunststoffverstärkung - Produktspezifikation Interglas 92115*. Porcher Industries Germany GmbH. Erbach, Juli 2013.
- [24] *Grundlagen der digitalen Bildkorrelation und Dehnungsberechnung, Technical White Paper*. GOM GmbH. Jan. 2018.
- [25] Manfred Hahn und Michael Reck. *Kompaktkurs Finite Elemente für Einsteiger: Theorie und Beispiele zur Approximation linearer Feldprobleme*. 1. Auflage. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Fachmedien, 2018. ISBN: 978-3-658-22775-3.
- [26] Karlo Hainsch et al. *European Green Deal: Using Ambitious Climate Targets and Renewable Energy to Climb out of the Economic Crisis*. 2020. DOI: 10.18723/diw\_dwr:2020-28-1.
- [27] *Handbuch Faserverbundkunststoffe: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen ; mit 46 Tabellen*. 3., vollständig überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2010. ISBN: 978-3-8348-9355-0. DOI: 10.1007/978-3-8348-9355-0.
- [28] Lin Hao et al. „Numerical analysis on shape memory alloy-based adaptive shock control bump“. In: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 29.15 (2018), S. 3055–3066. DOI: 10.1177/1045389X18783069.

- [29] D. J. Hartl und D. C. Lagoudas. „Aerospace applications of shape memory alloys“. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* 221.4 (2007), S. 535–552. DOI: 10.1243/09544100JAER0211.
- [30] Darren Hartl et al. „Thermomechanical Characterization and Modeling of Ni60Ti40 SMA for Actuated Chevrons“. In: *Aerospace*. ASMEDC, 2006, S. 281–290. ISBN: 0-7918-4765-9. DOI: 10.1115/IMECE2006-15029.
- [31] Z. Hashin. „Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites“. In: *Journal of Applied Mechanics* 47.2 (1980), S. 329–334. DOI: 10.1115/1.3153664.
- [32] M. Hübler et al. „Active vortex generator deployed on demand by size independent actuation of shape memory alloy wires integrated in fiber reinforced polymers“. In: *Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies 2016*. Hrsg. von Steven F. Griffin. SPIE Proceedings. SPIE, 2016, 98010G-1–98010G-7. DOI: 10.1117/12.2217659.
- [33] Moritz Hübler. „Methodik zur Auslegung und Herstellung von aktiven SMA-FKV-Hybridverbunden“. Dissertation. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern und Institut für Verbundwerkstoffe, 2015.
- [34] ANSYS Inc. *Large Deformations Governing Equations*. Präsentation. 2020. URL: [https://courses.ansys.com/wp-content/uploads/2020/10/Lesson3\\_LargeDeformationsGoverningEquations.pdf](https://courses.ansys.com/wp-content/uploads/2020/10/Lesson3_LargeDeformationsGoverningEquations.pdf).
- [35] ANSYS Inc. *Material Reference, ANSYS 2023R1*. Canonsburg, Pennsylvania, Jan. 2023.
- [36] Hartmut Janocha, Hrsg. *Adaptronics and smart structures: Basics, materials, design, and applications ; with 17 tables*. 2., rev. ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. ISBN: 978-3-540-71967-0. DOI: 10.1007/978-3-540-71967-0.
- [37] Marianne John et al. „Simulation of a prepreg press process using ANSYS Composite Cure Simulation (ACCS)“. In: *35. CADFEM ANSYS Simulation Conference* (Koblenz-Kongress, Koblenz). Nov. 2017.
- [38] Max Kaiser, Martin Gurka und Manuel Kunzler. „Development of an adaptive trailing edge based on active SMAHC principle: Design, Implementation and Experiment“. In: *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems XVI*. Hrsg. von Jae-Hung Han, Shima Shahab und Jinkyu Yang. SPIE, 2022, S. 70–82. DOI: 10.1117/12.2612572.
- [39] George B. Kauffman und Isaac Mayo. „The Story of Nitinol: The Serendipitous Discovery of the Memory Metal and Its Applications“. In: *The Chemical Educator* 2.2 (1997), S. 1–21. DOI: 10.1007/s00897970111a.
- [40] Rainer Kickert. *Dimensionierungsrichtwerte für den Segel- und Motorsegelflugzeugbau*. Idaflieg. März 1988.
- [41] E. L. Kirkby et al. „Tailored processing of epoxy with embedded shape memory alloy wires“. In: *Smart Materials and Structures* 18.9 (2009), S. 095043. DOI: 10.1088/0964-1726/18/9/095043.
- [42] Eva L. Kirkby et al. „Embedded Shape-Memory Alloy Wires for Improved Performance of Self-Healing Polymers“. In: *Advanced Functional Materials* 18.15 (2008), S. 2253–2260. DOI: 10.1002/adfm.200701208.
- [43] Niraj Kumbhare, Reza Moheimani und Hamid Dalir. „Analysis of Composite Structures in Curing Process for Shape Deformations and Shear Stress: Basis for Ad-

- vanced Optimization“. In: *Journal of Composites Science* 5.2 (2021), S. 63. DOI: 10.3390/jcs5020063.
- [44] Dimitris C. Lagoudas, Hrsg. *Shape memory alloys: Modeling and engineering applications*. New York, NY: Springer, 2008. ISBN: 978-0-387-47685-8.
- [45] Sven Langbein und Alexander Czechowicz. *Formgedächtnistechnik: Entwickeln, Testen und Anwenden*. 2. Aufl. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Vieweg, 2021. ISBN: 978-3-658-17904-5.
- [46] Sven Langbein und Alexander Czechowicz. *Konstruktionspraxis Formgedächtnistechnik: Potentiale - Auslegung - Beispiele ; mit zahlreichen Tabellen*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013. ISBN: 978-3-8348-1957-4.
- [47] Hauke Lengsfeld et al. *Faserverbundwerkstoffe: Prepregs und ihre Verarbeitung*. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Hanser eLibrary. München: Hanser, 2020. ISBN: 978-3-446-44882-7. DOI: 10.3139/9783446466036.
- [48] Erdogan Madenci und Ibrahim Guven. *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using Ansys*. Boston, MA: Springer Science+Business Media LLC, 2006. ISBN: 978-0-387-28290-9.
- [49] Mäder, Thomas. *Dehnungssensoren für stark elastische Materialien*. Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, 2017.
- [50] Pedro Manuel, Pedro Pacheco und Marcelo Savi. „Modeling and Simulation of a Shape Memory Release Device for Aerospace Applications“. In: (Jan. 2000).
- [51] George Marsh. „Automating aerospace composites production with fibre placement“. In: *Reinforced Plastics* 55.3 (2011), S. 32–37. ISSN: 00343617. DOI: 10.1016/S0034-3617(11)70075-3.
- [52] Zhuzhell Montano Rejas et al. „Aerodynamic validation for compressor blades’ structural morphing concepts“. In: *CEAS Aeronautical Journal* 14.1 (2023), S. 139–154. ISSN: 1869-5582. DOI: 10.1007/s13272-022-00624-z.
- [53] *Nitinol technical properties*. <https://matthey.com/en/products-and-markets/other-markets/medical-components/resource-library/nitinol-technical-properties>. Aufgerufen am 02.04.2023.
- [54] A. Puck, J. Kopp und M. Knops. „Guidelines for the determination of the parameters in Puck’s action plane strength criterion“. In: *Composites Science and Technology* 62.3 (2002), S. 371–378. DOI: 10.1016/S0266-3538(01)00202-0.
- [55] A. Puck und H. Schürmann. „Failure Analysis of FRP Laminates by Means of physically based phenomenological Models“. In: *Composites Science and Technology* 58.7 (1998), S. 1045–1067. DOI: 10.1016/S0266-3538(96)00140-6.
- [56] A. Puck und H. Schürmann. „Failure Analysis of FRP Laminates by Means of physically based phenomenological Models“. In: *Composites Science and Technology* 62.12-13 (2002), S. 1633–1662. DOI: 10.1016/S0266-3538(01)00208-1.
- [57] Alexander Razov und Alexander Cherniavsky. „Applications of shape memory alloys in space engineering: past and future“. In: (Sep. 1999).
- [58] Wilhelm Rust. *Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen mit ANSYS Workbench: Strukturmechanik: Kontakt, Material, große Verformungen*. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Vieweg, 2020. ISBN: 978-3-658-31421-7.
- [59] Dominic Sahyoun. „Experimentelle Untersuchung des Ermüdungsverhalten von integralen Faserverbund-T-Verbindungen (T-Joints) im Bereich des Low Cycle Fatigue

- unter kombinierter Biege-Zug Beanspruchung“. Studienarbeit. TU Braunschweig, Nov. 2022.
- [60] Jan Schrooten et al. „Progress on Composites with Embedded Shape Memory Alloy Wires“. In: *MATERIALS TRANSACTIONS* 43.5 (2002), S. 961–973. ISSN: 1345-9678. DOI: 10.2320/matertrans.43.961.
- [61] Helmut Schürmann. *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. 2., bearbeitete und erweiterte Auflage. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. ISBN: 978-3-540-72190-1. DOI: 10.1007/978-3-540-72190-1.
- [62] Mel Schwartz. *Smart Materials*. CRC Press, 2008. ISBN: 9780429138751. DOI: 10.1201/9781420043730.
- [63] Michael Sinapius. *Adaptronik: Prinzipie - Funktionswerkstoffe - Funktionselemente - Zielfelder mit Forschungsbeispielen*. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2018. ISBN: 978-3-662-55884-3.
- [64] Ramesh Talreja. „A mechanisms-based reliability model for fatigue of composite laminates“. In: *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik* 95.10 (2015), S. 1058–1066. DOI: 10.1002/zamm.201500047.
- [65] *Technisches Datenblatt - SR 1710 Injektion/Infusion*. Time Out Composite oHG. Bornheim-Sechtem, Jan. 2014.
- [66] Stephen W. Tsai und Edward M. Wu. „A General Theory of Strength for Anisotropic Materials“. In: *Journal of Composite Materials* 5.1 (1971), S. 58–80. DOI: 10.1177/002199837100500106.
- [67] Travis L. Turner. „A New Thermoelastic Model for Analysis of Shape Memory Alloy Hybrid Composites“. In: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 11.5 (2000), S. 382–394. DOI: 10.1106/DTFJ-UFL3-XVOU-WJNA.
- [68] Travis L. Turner und Hemant D. Patel. „Analysis of SMA hybrid composite structures using commercial codes“. In: *Smart Structures and Materials 2004: Modeling, Signal Processing, and Control*. Hrsg. von Ralph C. Smith. Bd. 5383. SPIE Proceedings 12. San Diego, CA: SPIE, März 2004. DOI: 10.1117/12.540002.
- [69] Travis L. Turner et al. „Design, fabrication, and testing of SMA-enabled adaptive chevrons for jet noise reduction“. In: *Smart Structures and Materials 2004: Smart Structures and Integrated Systems*. Hrsg. von Alison B. Flatau. SPIE Proceedings. SPIE, 2004, S. 297. DOI: 10.1117/12.540013.
- [70] J. Uchil et al. „Thermal expansion in various phases of Nitinol using TMA“. In: *Physica B: Condensed Matter* 270.3-4 (1999), S. 289–297. DOI: 10.1016/S0921-4526(99)00186-6.
- [71] Verein Deutscher Ingenieure e.V. *Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund: Berechnungen*. VDI2014 Blatt 3. Norm. Berlin: Beuth Verlag GmbH, Sep. 2006.
- [72] Antonio Vitiello, Giuseppe Giorleo und Renata Erica Morace. „Analysis of thermo-mechanical behaviour of Nitinol wires with high strain rates“. In: *Smart Materials and Structures* 14.1 (2005), S. 215–221. DOI: 10.1088/0964-1726/14/1/021.
- [73] Ming H. Wu und L. McD. Schetky. „Industrial Applications for Shape Memory Alloys“. In: *Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies*. International Conference on Shape Memory and Superelastic

- Technologies. Fremont, Kailifornien: SMST, The International Organization on Shape Memory und Superelastic Technology, 2000, S. 171–182.
- [74] Y. Xu. „A SMA/CFRP hybrid composite with damage suppression effect at ambient temperature“. In: *Scripta Materialia* 49.6 (2003), S. 587–593. DOI: 10.1016/S1359-6462(03)00327-0.



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau und Konzept der vorliegenden Arbeit . . . . .	3
2.1	Übergangstemperaturen von Formgedächtnislegierungen über Spannung aufgetragen . . . . .	5
2.2	Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer Formgedächtnislegierung im martensitischen Bereich (nach [63]) . . . . .	6
2.3	Intrinsischer und extrinsischer Zweiwegeeffekt von Formgedächtnislegierungen in einem Spannungs-Dehnungs-Temperatur-Diagramm [63] . . . . .	7
2.4	Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer Formgedächtnislegierung in der Hochtemperaturphase (nach [63]) . . . . .	8
2.5	Zyklierungsarten von Formgedächtnislegierungen [44] . . . . .	9
2.6	Aufbau des sog. Frangibolts als Ersatz für pyrotechnische Aktivierung [50] . . . . .	10
2.7	Detail der FGL-aktuierten Chevrons an einer Boeing 777 [30] . . . . .	11
2.8	ZFB-Kriterium nach Puck . . . . .	14
2.9	Schematischer Herstellungsprozess von Prepreg [61] . . . . .	16
2.10	Beispiele der automatisierter Legeprozesse <i>Automated-Fibre-Placement</i> (AFP) und <i>Automated-Tape-Laying</i> (ATL) in der Luftfahrt . . . . .	16
2.11	Schematischer Verlauf von Temperatur, Autoklavdruck und daraus resultierender Harzviskosität eines Autoklavprozesses (nach [47]) . . . . .	17
2.12	Der Aktuator 3920E20 (frühere Modellbezeichnung: 3920M) ist hier auf einem Edelstahlblech aufgebracht (© CompActive [10]) . . . . .	20
3.1	Drei Herstellungsmethoden für in ein Faserverbundlaminat eingebettete Formgedächtnisaktuatoren . . . . .	23
3.2	Detailansicht der Probe mit Formgedächtnislegierung (FGL) mit Leitern aus Kupfer (Cu) (Abbildung ohne oberes Laminat) . . . . .	27
4.1	Verläufe des Wärmeausdehnungskoeffizienten $\alpha$ und des E-Moduls, wie sie für die Simulationen verwendet werden . . . . .	30
4.2	Aktuator 3920M von CompActive (links) und Modell in ANSYS (rechts) . . . . .	30
4.3	Schema der Berechnung innerhalb ANSYS <i>Workbench</i> , welches durch das Skript erstellt wird . . . . .	31
4.4	Randbedingungen in ANSYS beim Autoklavprozess . . . . .	32
4.5	Randbedingungen des ANSYS-Modells für die Biegung . . . . .	34
4.6	Ergebnisse der Finite-Elemente-Simulation für die untersuchte Lagenaufbauten . . . . .	36
4.7	Deformation der gesamten Probe . . . . .	37
4.8	normale, elastische Dehnung innerhalb der Formgedächtnislegierung-Schicht . . . . .	38
4.9	von Mises-Spannung innerhalb des Aktuators . . . . .	39
4.10	Deformation aufgrund der Aktivierung des Aktuators . . . . .	40
4.11	von Mises-Spannung in der Probe . . . . .	41
4.12	normale, elastische Dehnung innerhalb der FGL-Schicht . . . . .	41

4.13	Anstrengung des unteren Laminates während des Autoklavprozesses . . . .	42
4.14	Anstrengung des oberen Laminates während des Autoklavprozesses mit Detail der unteren $-45^\circ$ -Lage . . . . .	43
4.15	Anstrengung des oberen Laminates während der Biegung . . . . .	44
4.16	Detailansicht des verwendeten adaptiven Netzes . . . . .	45
5.1	Versuchsaufbau für die Messung der Verschiebung mithilfe des ARAMIS- Systems . . . . .	49
5.2	Flächige Verschiebung des Stahlblechs mit darunter appliziertem Aktuator in die Bildebene unter Belastung im martensitischen Bereich (Messergeb- nisse ARAMIS) . . . . .	50
5.3	Mithilfe des ARAMIS-Systems gemessene Verschiebung der Proben im martensitischen Bereich und Annäherung durch Polynom 3. Grades (ge- strichelte Linien) . . . . .	51
5.4	Details des Laminierprozesses der Proben aus Prepreg-Material . . . . .	53
5.5	Beispielhafte Probe #11_40451 eines einlaminierten CompActive-Aktuators in HexPly <sup>®</sup> 913 . . . . .	55
5.6	Aktuatoren, Abstandshalter und Prismen auf dem unteren Laminat liegend	56
5.7	Detail herstellungsbedingter Defekte in Prepreg-Proben . . . . .	57
5.8	Welligkeit der Kupferdrähte und falsche Positionierung des Temperatur- sensors am Beispiel der Probe #10_40446 . . . . .	58
5.9	Lufteinschlüsse oberhalb des Aktuators bei Proben mit kaltaushärtender Matrix (erkennbar an hellen Flecken auf dem Aktuator) . . . . .	59
5.10	Vermuteter Verlauf von (Druck-)Spannung, Dehnung und Temperatur in der Formgedächtnislegierung im Autoklav unter Berücksichtigung des Aus- härtprozesses der Matrix . . . . .	60
5.11	Temperaturverhalten innerhalb der Proben bei Aktivierung der Aktuatoren	62
5.12	Flächige Verschiebung in z-Richtung (in Bildebene hinein) am Beispiel der Probe #KM_40445 (erste Aktuierung) . . . . .	63
A.1	Verschiebung der Formgedächtnislegierungs-Schicht in Längsrichtung . . .	XXI
A.2	Anstrengung des unteren Laminates während des Autoklavprozesses . . . .	XXI
A.3	Anstrengung des unteren Laminates während der Biegung . . . . .	XXII
A.4	Deformation der Probe mit kaltaushärtender Matrix durch Aktivierung des Aktuators (Verformung maßstabsgerecht) . . . . .	XXIII
A.5	von Mises Spannung in der Probe mit kaltaushärtender Matrix durch Ak- tivierung des Aktuators (Verformung maßstabsgerecht) . . . . .	XXIII
A.6	Dehnung in Längsrichtung in der FGL-Schicht der Probe mit kaltaushär- tender Matrix durch Aktivierung des Aktuators (Verformung maßstabsge- recht) . . . . .	XXIV
A.7	Lagenweise Anstrengung des oberen Laminates der Probe mit kaltaushär- tender Matrix . . . . .	XXIV

# Tabellenverzeichnis

2.1	Verhalten der verschiedenen Kontakttypen in ANSYS . . . . .	19
3.1	Überblick über relevante Temperaturen während des Herstellprozesses mit HexPly <sup>®</sup> 913 . . . . .	22
3.2	Bewertung der drei Möglichkeiten zur Einbettung hinsichtlich von Bewertungskriterien (++: gut, o: neutral, - -: schlecht) . . . . .	25
4.1	Simulierte Lagenaufbauten für die beiden Lamine . . . . .	35
4.2	Netzelementgröße der einzelnen Körper bei der Netzverfeinerung (Netz Nr. 1 entspricht näherungsweise der Netzelementgröße des adaptiven Netzes)	45
4.3	Ergebnisse der Netzkonvergenzanalyse für die fünf untersuchten Netze in drei ausgewählten Punkten sowie der maximalen Deformation bei der Biegung durch Aktivierung des Aktuators (Nodes = Netzelementknoten) . . .	46
5.1	Ergebnisse der optischen Verschiebungsmessung sowie der Simulation in ANSYS, wobei $\alpha$ den thermischen Ausdehnungskoeffizienten der FGL während der Phasenumwandlung als Ersatzmodell für die Dehnung des Zweiwegeffekts repräsentiert (E-Modul unter Verwendung des Ersatzmodells aus Kap. 4.1) . . . . .	51
5.2	Verschiebung an der Spitze der Proben für statische (erste Aktivierung) und zyklische Versuche (nach fünf Aktivierungen) . . . . .	64
A.1	Parameter für das Puck-Bruchkriterium . . . . .	XX
B.1	Verwendete Materialkennwerte für Interglas 90070 und für Epoxidharz SR 17170 . . . . .	XXV
B.2	Verwendete Materialkennwerte . . . . .	XXVII

# Anhang A

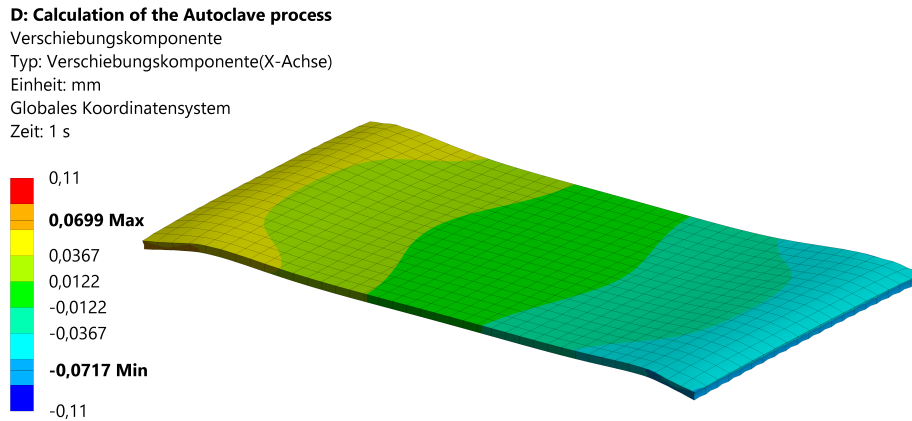
## Ergebnisse der ANSYS-Simulation

### Allgemeine Daten

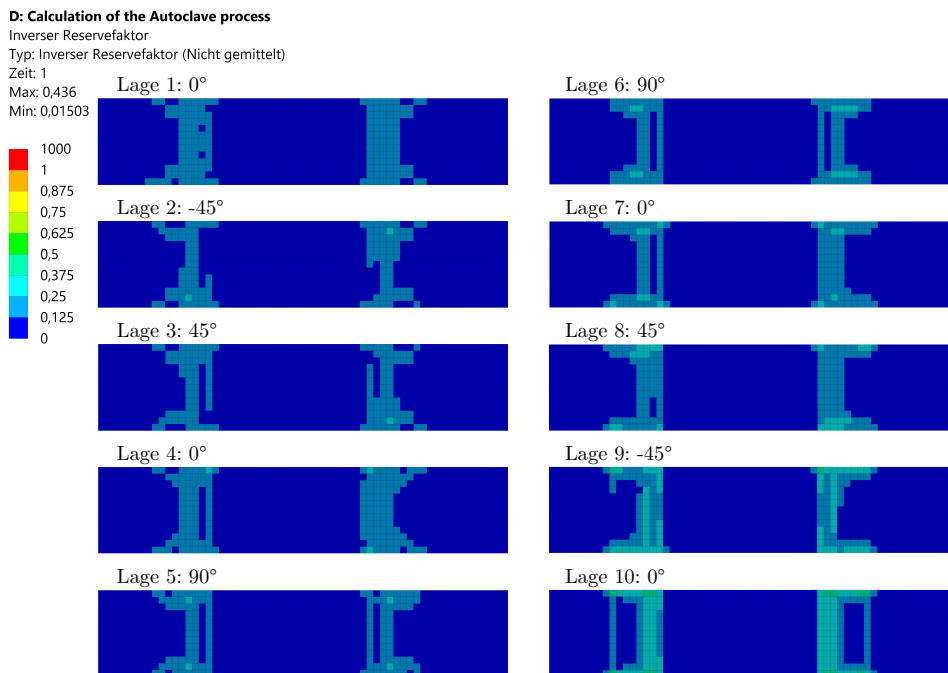
Tab. A.1: Parameter für das Puck-Bruchkriterium

Parameter	Status	Gewichtungsfaktor	Wert
Faserbruch (pf)	An	1	/
ZFB Modus A (pmA)	An	1	/
ZFB Modus B (pmB)	An	1	/
ZFB Modus C (pmC)	An	1	/
Delamination (pd)	An	1	/
$p_{21}^+$	/	/	0,325
$p_{22}^+$	/	/	0,225
$p_{21}^-$	/	/	0,275
$p_{22}^-$	/	/	0,225
Abbaufaktor s	/	/	0,5
Abbaufaktor M	/	/	0,5
Schwächungsfaktor der Grenzfläche	/	/	0,8

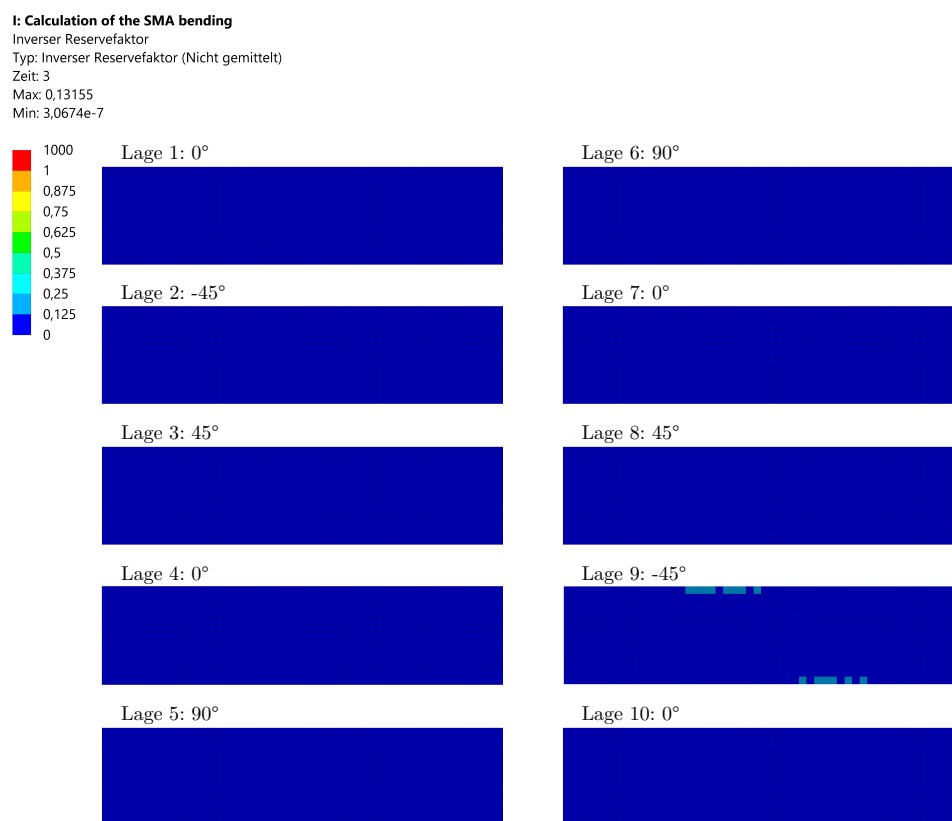
## Ergebnisse für Prepreg Laminat Nr. 11



**Abb. A.1:** Verschiebung der Formgedächtnislegierungs-Schicht in Längsrichtung während des Autoklavprozesses (dargestellt zur Zeit 1 s, Verformung 10-fach überhöht)

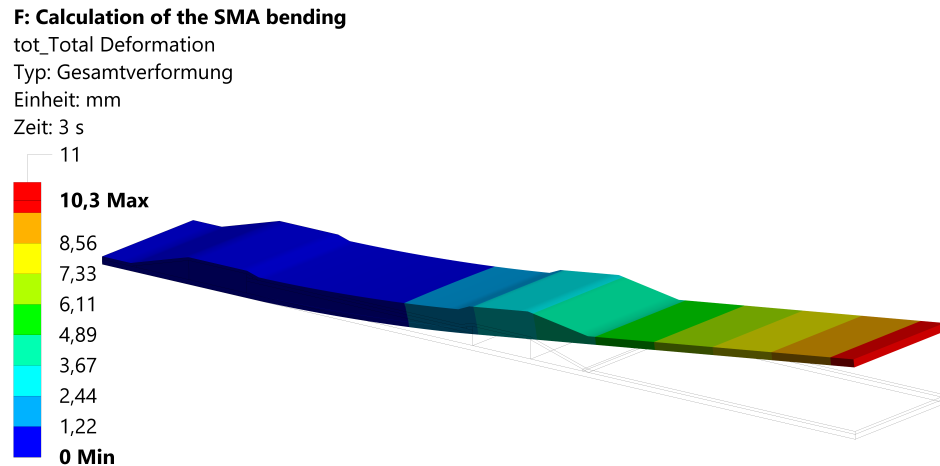


**Abb. A.2:** Anstrengung des unteren Laminates während des Autoklavprozesses

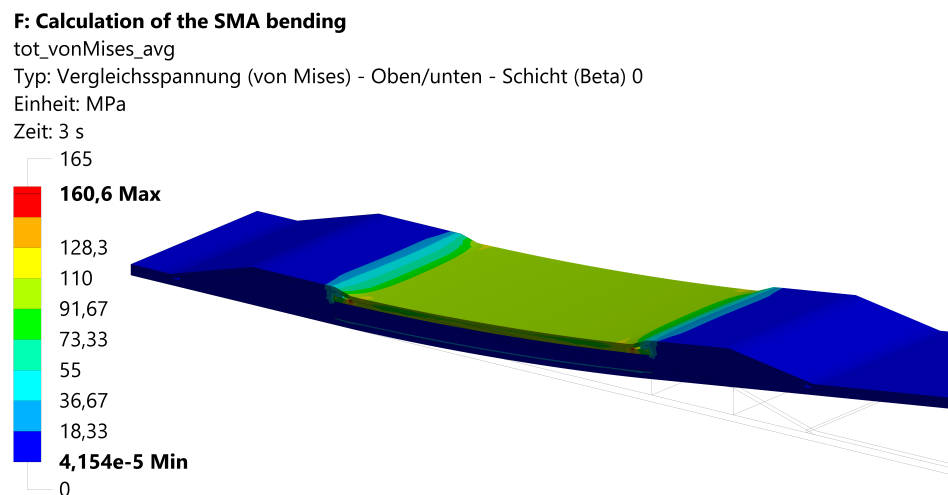


**Abb. A.3:** Anstrengung des unteren Laminates während der Biegung

## Ergebnisse bei Verwendung einer kaltaushärtenden Matrix



**Abb. A.4:** Deformation der Probe mit kaltaushärtender Matrix durch Aktivierung des Aktuators (Verformung maßstabsgerecht)



**Abb. A.5:** von Mises Spannung in der Probe mit kaltaushärtender Matrix durch Aktivierung des Aktuators (Verformung maßstabsgerecht)

**F: Calculation of the SMA bending**

Normale elastische Dehnung

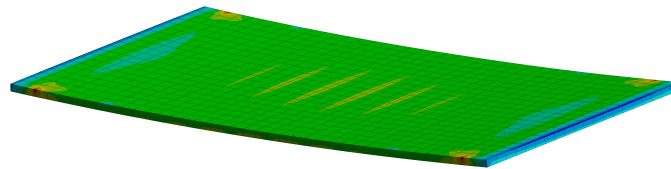
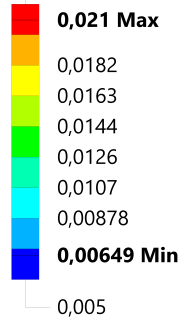
Typ: Normale elastische Dehnung(X-Achse) - Oben/unten - Schicht (Beta) 0

Einheit: mm/mm

Lösungskoordinatensystem

Zeit: 3 s

0,022



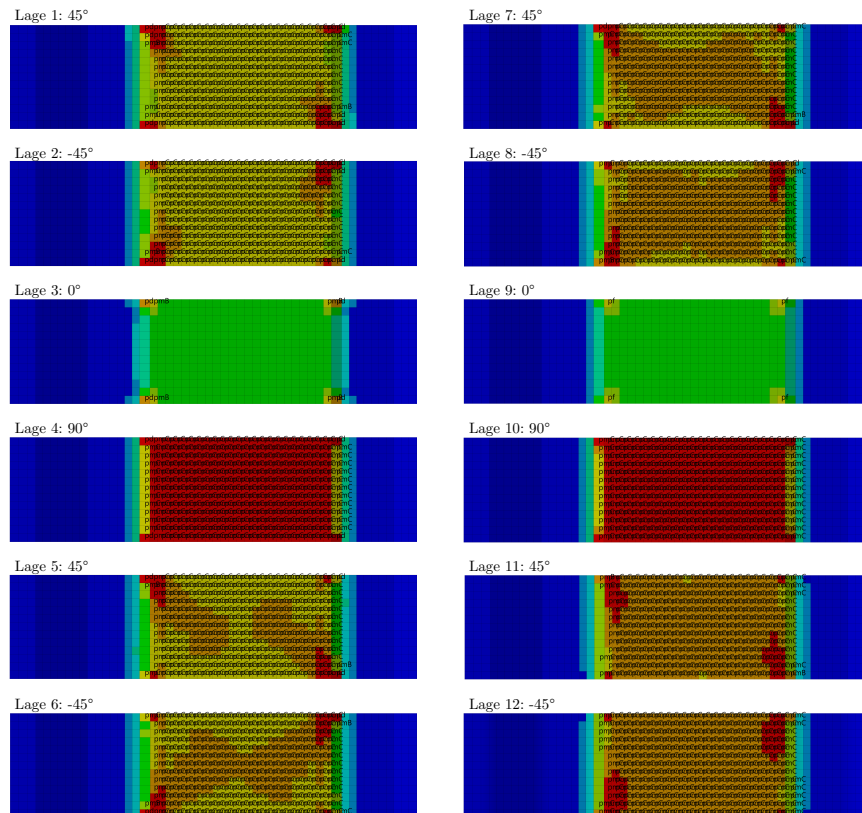
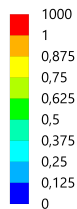
**Abb. A.6:** Dehnung in Längsrichtung in der FGL-Schicht der Probe mit kaltaushärtender Matrix durch Aktivierung des Aktuators (Verformung maßstabsgerecht)

**F: Calculation of the SMA bending**

Inverser Reservefaktor

Typ: Inverser Reservefaktor (Nicht gemittelt)

Zeit: 3



**Abb. A.7:** Lagenweise Anstrengung des oberen Laminates der Probe mit kaltaushärtender Matrix



# Anhang B

## Materialkennwerte

### Berechnung der Kennwerte für die UD-Lage Interglas 90070 mit Epoxidharz SR 1710

Mithilfe der in Tab. B.1 verwendeten Kennwerte für die beiden Komponenten Matrix und Faser können die benötigten Kennwerte für das Laminat bestimmt werden. Dafür werden die in [71] veröffentlichten Formeln für die Berechnung einer UD-Schicht verwendet. [h!]

**Tab. B.1:** Verwendete Materialkennwerte für Interglas 90070 und für Epoxidharz SR 17170

Kennwert		Interglas 90070		SR1710		Laminat	
		Wert	Quelle	Wert	Quelle	Wert	Quelle
E-Modul (MPa)	$E_{f,\parallel}$	18000	[21]	/	/	/	/
	$E_{f,\perp}$	18000	[21]	/	/	/	/
	$E_m$	/	/	3650	[65]	/	/
Poissonzahl (-)	$\nu_{f,\parallel\perp}$	0,3	<sup>1</sup>	/	/	/	/
	$\nu_m$	/	/	0,25	<sup>1</sup>	/	/
Festigkeit (MPa)	$R_{f,\parallel}$	320	[21]	/	/	/	/
	$R_{f,\perp}$	320	[21]	/	/	/	/
	$R_m$	/	/	70	[65]	/	/
	$R_{\parallel\perp}$	/	/	/	/	60	<sup>1</sup>
Faservolumengehalt (-)	$\Phi$	/	/	/	/	0,47	<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Schätzwert

$$E_{\parallel} = E_{f,\parallel} \cdot \Phi + E_m(1 - \Phi) = 10\,394,5 \text{ MPa} \quad (\text{B.1})$$

$$E_{\perp} = \frac{E_m}{1 - \nu_m^2} \frac{1 + 0,85\Phi^2}{(1 - \Phi)^{1,25} + \Phi \cdot \frac{E_m}{E_{f,\perp} \cdot (1 - \nu_m^2)}} = 8554,0 \text{ MPa} \quad (\text{B.2})$$

$$G_M = \frac{E_m}{2 + 2\nu_m} = 1403,8 \text{ MPa} \quad (\text{B.3})$$

$$G_{f,\parallel\perp} = \frac{E_{f,\parallel}}{2 + 2\nu_{f,\parallel\perp}} = 7200,0 \text{ MPa} \quad (\text{B.4})$$

$$G_{\parallel\perp} = G_m \frac{1 + 0,4\Phi^{0,5}}{(1 - \Phi)^{1,45} + \Phi \frac{G_m}{G_{f,\parallel\perp}}} = 3651,2 \text{ MPa} \quad (\text{B.5})$$

$$R_{\parallel} = R_{f,\parallel} \cdot \Phi + R_m(1 - \Phi) = 187,5 \text{ MPa} \quad (\text{B.6})$$

Unter der vereinfachenden Annahme, dass quer zur Faserrichtung die Festigkeit der Matrix dominiert, gilt:

$$R_{\perp} = R_m = 70 \text{ MPa} \quad (\text{B.7})$$

Tab. B.2: Verwendete Materialkennwerte

Kennwert	HexPly <sup>®</sup> 913 <sup>1</sup>	Interglas 90070 <sup>2</sup>	AA6CFZ (EPDM) <sup>3</sup>	Formgedächtnislegierung <sup>4</sup>		Araldite <sup>®</sup> LY5052/ Aradur <sup>®</sup> 5052 <sup>5</sup>	Edelstahl <sup>6</sup>
				Martensit	Übergang		
E-Modul	$E_{  ,t}$ 44017	10395	9,2	16815	/	3350	210000
(MPa)	$E_{\perp,t}$ 13040	8554					
Schubmodul	$G_{  \perp}$ 4596	3651	3,07	6322	/	1241	80769
(MPa)							
Poissonzahl	$\nu_{  \perp}$ 0,303	0,303	0,3	0,33	/	0,35	0,3
(-)	$\nu_{\perp  }$ 0,0942	0,0942					
	$R_{  ,t}$ 1171,8	187,5					
	$R_{\perp,t}$ 78,6	70					
Festigkeit	$R_{  ,c}$ 1138,3	187,5	117	350	/	49	250
(MPa)	$R_{\perp,c}$ 220,8	70					
	$R_{  \perp}$ 68,1	60					
$\alpha$	$\alpha_{  }$ $5,00 \cdot 10^{-6}$	$5,00 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-6}$	$-5,9 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$7,1 \cdot 10^{-5}$
(-)	$\alpha_{\perp}$ $4,00 \cdot 10^{-5}$	$4,00 \cdot 10^{-5}$					$1,2 \cdot 10^{-5}$

<sup>1</sup>Quelle für  $\alpha$ : [16], Rest: [59]<sup>2</sup>Quelle für  $\alpha$ : [16], Rest: siehe oben<sup>3</sup>Quelle: institutsinterne Datenbank<sup>4</sup>Die E-Moduln der Kristallzustände sind gemäß Gl. 4.2 umgeformt. Quelle für Poissonzahl und  $\alpha$  der Kristallzustände: [53]<sup>5</sup>Quelle: [2]<sup>6</sup>In ANSYS hinterlegte Werkstoffdaten

# Anhang C

## Life-Data-Sheets Probenherstellung

**Masterarbeit – Eingebettete FGL-Aktuatoren**

- Diese Akte ist am Bauteil mitzuführen -

## Life Data Sheet

Programm / Projekt:

**Eingebettete FGL-Aktuatoren  
Prepreg**

Kennzeichnung: <b>Eingebettete FGL-Aktuatoren</b>	Kostenträger: -
Abteilung: <b>SY - ADA</b>	Datum: <b>07.02.2023</b>
Projektleiter: <b>D. Sahyoun</b>	Material: <b>Prepreg: HexPly 913</b>  <i>Batch-/Roll-No.: -</i>

## Masterarbeit – Eingebettete FGL-Aktuatoren

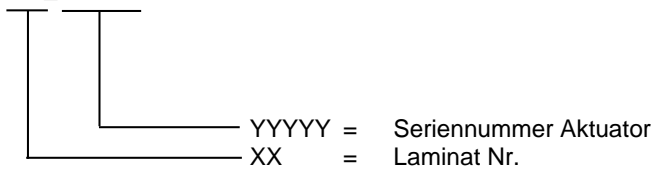
**0 Inhaltsverzeichnis**

<b>0</b>	<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>2</b>
<b>1</b>	<b>ALLGEMEINE INFORMATIONEN ZUM VERSUCH</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>WERKSTOFFDATEN - HERSTELLERANGABEN</b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>FERTIGUNG</b> .....	<b>4</b>
3.1	ZUSCHNITTABMESSUNGEN.....	5
3.2	ABLAGE PLATTE .....	7
<b>4</b>	<b>HERSTELLUNGSPROZESS</b> .....	<b>9</b>
<b>5</b>	<b>QUALITÄTSSICHERUNG DER LAMINATPLATTE</b> .....	<b>11</b>
5.1.1	Sichtprüfung.....	11

**1 Allgemeine Informationen zum Versuch**

Der Proben-Kennzeichnungen ist folgendes zu entnehmen:

#XX\_YYYYY



**Masterarbeit – Eingebettete FGL-Aktuatoren****2 Werkstoffdaten - Herstellerangaben****Prepreg-Material**

Bezeichnung:	913 UD Tape
Hersteller:	HexPly®
Fasertyp:	S2GL
Faserdichte:	1,23 g/cm <sup>3</sup>
Flächengewicht:	111 g/m <sup>2</sup>
Faservolumengehalt:	67 Gew. %
Dicke einer Lage:	0,175 mm
Breite der Rolle / Streifen:	300 mm

**Masterarbeit – Eingebettete FGL-Aktuatoren****3 Fertigung**

Fertigungsort.: DLR Braunschweig

Fertigungsart: Prepreg

Fertigungsanlagen: Autoklav „Balduklav, Säge

Fertigungsvorschriften:

MH-FA-35-PB01      Arbeits- u. Gesundheitsschutz

MH-FA-41-PB11      Herstellen von strukturellen FVK-Bauteilen

Spezielle Fertigungsinformationen sind im Folgenden zusammengestellt:

- Zuschnitte (siehe 3.1)
- Ablage (siehe 3.2)
- Autoklavprozess (siehe 4.)

**Fertigungshilfsmittel:**

- Autoklav „Balduklav“
- Diamantsäge „Maiko“

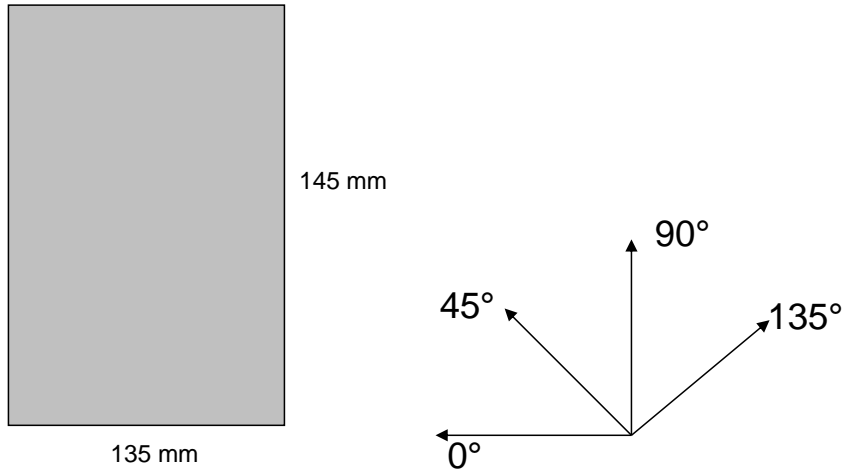
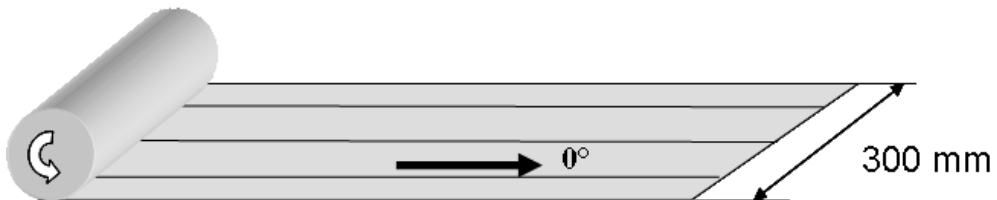


## Masterarbeit – Eingebettete FGL-Aktuatoren



## 3.1 Zuschnittabmessungen

SOLL

Gesamtaufbau (schematisch):Zuschnitte:

Bezeichnung	Geometrie	Anzahl
CAI-0	135 mm x 145 mm	4
CAI-90	135 mm x 145 mm	2
CAI-45	135 mm x 145 mm	4
CAI-135	135 mm x 145 mm	4
CAI-0-1	75 mm x 145 mm	1

**Masterarbeit – Eingebettete FGL-Aktuatoren**

---

CAI-90-1	135 mm x 10 mm	XX
----------	----------------	----

Anzahl der Zuschnitte = 15

**Prepreg zugeschnitten:**

Datum: 07.02.2023 Name: D. Sahyoun Unterschrift: -

**Masterarbeit – Eingebettete FGL-Aktuatoren**

=

**3.2 Ablage Platte**

Im ersten Schritt ist das Werkzeug (Platte des Autoklab) vorzubereiten. Erforderlich dabei sind:

- Reinigung / Entfetten des Werkzeugs mit Aceton
- Eintrennen mit Trennmittel Waterworks Departure (mindestens 3 mal)

Werkzeug gereinigt und getrennt	i. O. Unterschrift: -
---------------------------------	-----------------------

**Laminataufbau**

Lage	Orientierung	Zu- schnitt	IST
L1	0°	CAI-0	✓
L2	45°	CAI-45	✓
L3	135	CAI-135	✓
L4	0°	CAI-0	✓
L5	90°	CAI-90	✓
L6	90°	CAI-90	✓
L7	0°	CAI-0	✓
L8	135°	CAI-135	✓
L9	45°	CAI-45	✓
L10	0°	CAI-0	✓
L11	Aktuator	-	✓
L12	Prisma	CAI-90-1	✓
L13	Abstandshalter	-	✓
L14	PT1000	-	✓
L15	45°	CAI-45	✓
L16	135°	CAI-135	✓
L17	0	CAI-0-1	✓

Lage	Orientierung	Zuschnitt	IST
L18	135°	CAI-135	✓
L19	45°	CAI-45	✓

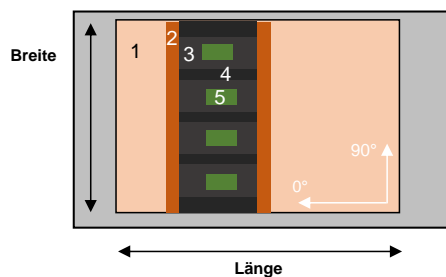
**Laminataufbau nach Vorgabe gelegt:**

Datum: 07.02.2023 Name: D. Sahyoun Unterschrift: -

**Masterarbeit – Eingebettete FGL-Aktuatoren**

Für die Prismen werden UD-Lagen so lange übereinandergelegt, bis die Dicke der Aktuatoren erreicht wird. Im Anschluss werden die so entstandenen Quader mit einer frischen Klinge diagonal durchgetrennt

Die vier Aktuatoren werden parallel aufgelegt und jeweils ein Abstandshalter dazwischen gelegt. Am Rand wird ebenfalls ein Abstandshalter neben den Aktuator gelegt. Mittig auf die Aktuatoren wird ein Temperatursensor Typ PT1000 gelegt.



- 1: GFK Gewebe
- 2: Prismen
- 3: Aktuator
- 4: Abstandshalter
- 5: Temperatursensor PT1000

## Masterarbeit – Eingebettete FGL-Aktuatoren



## 4 Herstellungsprozess

**Programm für die Aushärtung:** Bezeichnung:    
 Nummer: -

**Aushärtezyklus:**

Verfahrensschritt	Aufheizrate	Zieltemperatur	Haltezeit	Autoklavdruck
Vorheizen	2 K/min	80 °C	30 min	3 bar
Aushärten	2 K/min	125 °C	60 min	3 bar
Abkühlen	2 K/min	RT °C		

Nr.	Fertigungsablauf	SOLL	IST / ✓
1	Bauteil in Autoklav bringen	erledigt	✓
2	Evakuierungspumpe anschließen	i.O.	✓
3	Silikonmatte des Autoklav auflegen	erledigt	✓
4	Autoklavdeckel auflegen und Klemmen schließen	erledigt	✓
3	Autoklav evakuieren	< 0,8 mbar	
4	Nicht benötigte Anschlüsse dichten	erledigt	✓
5	Programm schreiben und laden	erledigt	✓
6	Aushärtedruck 3 bar	geprüft	✓
7	Aushärtetemperatur 125°C	geprüft	✓
8	Programm starten	erledigt	Manuelle Steuerung
9	Ggf. Bogen „Autoklavbetrieb ohne Aufsicht“ ausfüllen	erledigt	n.A.
10	Prozessablauf anhand Prozessprotokoll prüfen	erledigt	✓
11	Prozessprotokoll ausdrucken und in LDS einheften	erledigt	✓

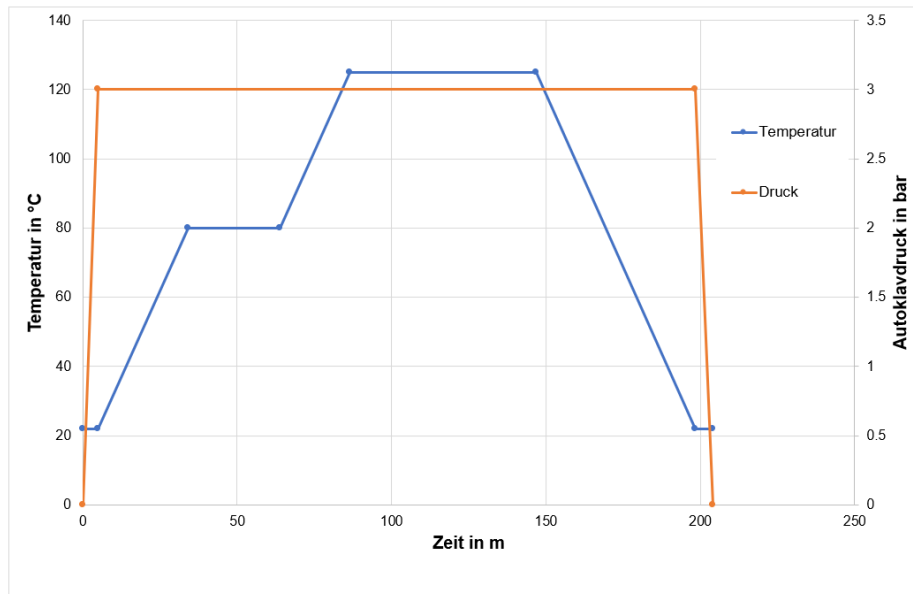
**Programm geprüft**

Datum: 07.02.2023 Name: D. Sahyoun Unterschrift: -

## Masterarbeit – Eingebettete FGL-Aktuatoren



## Ideales Druck-/ Temperaturprofil für den Zyklus



## Masterarbeit – Eingebettete FGL-Aktuatoren

**5 Qualitätssicherung der Laminatplatte**

Das Abreißgewebe auf der Unterseite der Lamine darf auf keinen Fall davon entfernt werden!

5.1.1 Sichtprüfung		SOLL/IST
Anmerkung	SOLL	IST
Trockene Stellen	i.O.	Kleine Stellen außerhalb kritischer Bereiche
Maßhaltigkeit	i.O.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Lücken zwischen Prismen und Aktuatoren mit Harz aufgefüllt</li><li>• PT1000 verrutscht</li></ul>

**Masterarbeit- Eingebettete FGL-Aktuatoren**

- Diese Akte ist am Bauteil mitzuführen -

## Life Data Sheet

Programm / Projekt:

**Eingebettete FGL-Aktuatoren  
DP-RTM**

Kennzeichnung: <b>Eingebettete FGL-Aktuatoren</b>	Kostenträger: -
Abteilung: SY - ADA	Datum: 30.03.2023
Projektleiter: D. Sahyoun	Material: <b>Gewebe: Interglas 90070</b>  <i>Batch-/Roll-No.: PS0874037026</i>  <b>Harz: Sicumin SR 1710</b> <b>+ SD8824 (schneller Härter)</b>



## Masterarbeit- Eingebettete FGL-Aktuatoren



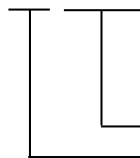
## 0 Inhaltsverzeichnis

<b>0</b>	<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>2</b>
<b>1</b>	<b>ALLGEMEINE INFORMATIONEN ZUM VERSUCH</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>WERKSTOFFDATEN - HERSTELLERANGABEN</b> .....	<b>3</b>
2.1	FASERHALBZEUG.....	3
2.2	MATRIX.....	3
<b>3</b>	<b>FERTIGUNG</b> .....	<b>4</b>
3.1	ZUSCHNITTABMESSUNGEN.....	5
3.2	FLÄCHENGEWICHT (FG) DES LAMINATES.....	5
3.3	ABLAGE DER LAGEN UND AUSRICHTUNG.....	6
3.4	INJEKTION DES HARZSYSTEMS.....	7
3.4.1	<i>Versuchsaufbau</i> .....	7
3.4.2	<i>Vorbereitung der Platte für die Injektion</i> .....	8
<b>4</b>	<b>QUALITÄTSSICHERUNG DER LAMINATPLATTE</b> .....	<b>9</b>
4.1	SICHTPRÜFUNG.....	9

## 1 Allgemeine Informationen zum Versuch

Der Proben-Kennzeichnungen ist folgendes zu entnehmen:

#XX\_YYYYY



YYYYY = Seriennummer Aktuator  
 XX = Laminatart (**KM** = kaltaushärtende Matrix)

## Masterarbeit- Eingebettete FGL-Aktuatoren



<b>2 Werkstoffdaten - Herstellerangaben</b>
---

<b>2.1 Faserhalbzeug</b>
--------------------------

SOLL				
Faser	Hersteller/Bezeichnung	spez. Gewicht	Flächengewicht	Batch-/Roll-No.
Interglas 90070	Interglas 90070, Aero, Leinwand	2,45 g/cm <sup>3</sup>	80 g/m <sup>2</sup>	-

<b>2.2 Matrix</b>
-------------------

Matrix	Bezeichnung/Hersteller	Spez. Dichte	Ansatz	Batch-Nr./Eimernr.
Sicumin	SR1710	1,15 g/cm <sup>3</sup> (ausgehärtet RT)	/	/
	SD8824			

**Masterarbeit- Eingebettete FGL-Aktuatoren****3 Fertigung**

Fertigungsort:: DLR Braunschweig

Fertigungsart:: DP-RTM

Fertigungsanlagen: Säge

Fertigungsvorschriften:

MH-FA-35-PB01      Arbeits- u. Gesundheitsschutz

MH-FA-41-PB11      Herstellen von strukturellen FVK-Bauteilen

Spezielle Fertigungsinformationen sind im Folgenden zusammengestellt:

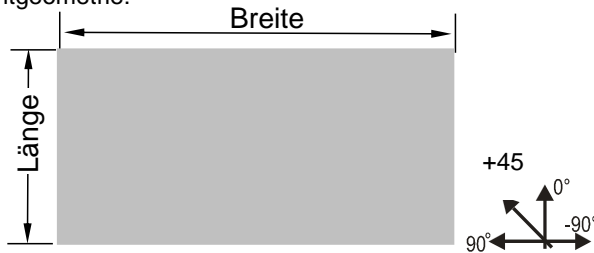
- Ablage (siehe **3.3**)
- Ausrichtung (siehe **3.3**)
- Injektion (siehe **3.4**)

**Masterarbeit- Eingebettete FGL-Aktuatoren**



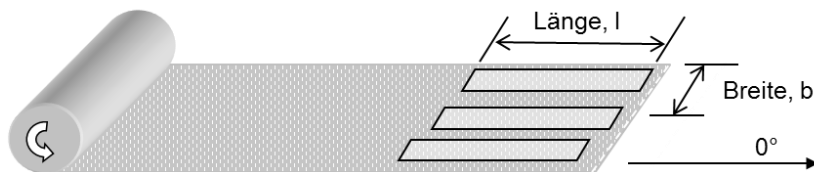
<b>3.1 Zuschnittabmessungen</b>	<b>SOLL</b>
---------------------------------	-------------

Gesamtgeometrie:



Bezeichnung	Ausrichtung	Länge, l	Breite, b	Lagenanzahl	Dicke
Interglas 90070	0/90	145 mm	135 mm	8	-
	+/-45	145 mm	135 mm	8	-

**Material: [0°/90°] 2 Lagen + 2 Lagen um 90° gewendet**



**Gelegelagen zugeschnitten:**

Datum: \_\_\_\_\_ Name: \_\_\_\_\_ Unterschrift: \_\_\_\_\_

<b>3.2 Flächengewicht (FG) des Laminates</b>	<b>SOLL/IST</b>
--	-----------------

**Flächengewichtsprüfung entfällt**

**Masterarbeit- Eingebettete FGL-Aktuatoren****3.3 Ablage der Lagen und Ausrichtung**

Stapelfolge der Gewebelagen:

Lage	Winkel	gelegt	Bemerkung
1	0/90°	✓	-
2	+/-45°	✓	-
3	0/90°	✓	-
4	+/-45°	✓	-
5	0/90°	✓	-
6	0/90°	✓	-
7	+/-45°	✓	-
8	0/90°	✓	-
9	+/-45°	✓	-
10	0/90°	✓	-
11	-	✓	Aktuatoren
12	-	✓	Abstandshalter
13	-	✓	Prismen
14	+/-45°	✓	-
15	0/90°	✓	-
16	+/-45°	✓	-
17	+/-45°	✓	-
18	0/90°	✓	-
19	+/-45°	✓	-

**Aufbau laut Plan durchgeführt:**

Datum: 30.03.2023 Name: Dominic Sahyoun Unterschrift: -

**Aufbau überprüft von [QS]:**

Datum: \_\_\_\_\_ Name: \_\_\_\_\_ Unterschrift: \_\_\_\_\_

Prüfung des Aufbaus nicht erforderlich

## Masterarbeit- Eingebettete FGL-Aktuatoren

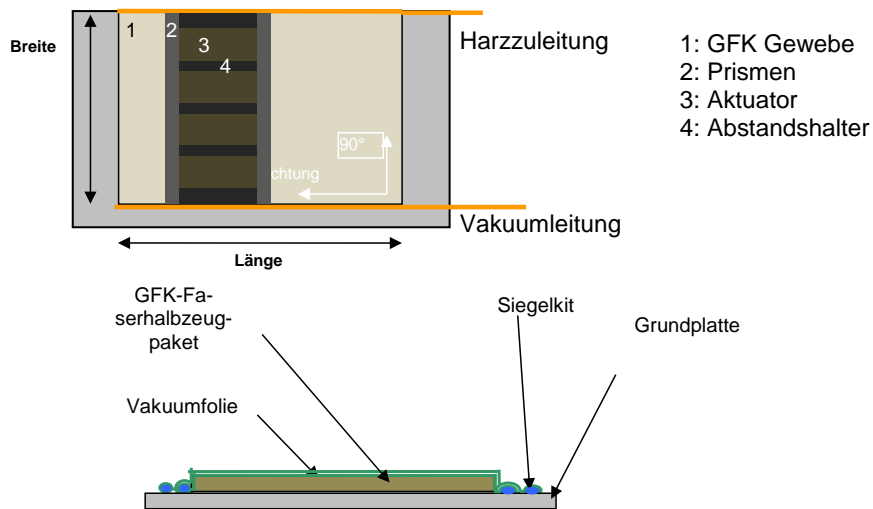


### 3.4 Injektion des Harzsystems

#### 3.4.1 Versuchsaufbau

SOLL

Die Proben sollen im DP-RTM (Differential Pressure) – Verfahren hergestellt werden.



Prinzipische Skizze des Aufbaus

Beschreibung:

- zurechtgeschnittenes Gewegekupaket bis zu den Aktuatoren auf Grundplatte legen
- Aktuatoren, Prismen und Abstandshalter auflegen
- Restliche Lagen auflegen
- Abreißgewebe auflegen
- Spiralschlauch als Harzleitung auf Grundplatte aufkleben und einseitig abkleben (etwas kürzer als Gewebe um Voreilen zu verhindern)
- 1. Vakuumsack aufbringen und mithilfe von Absaugstutzen durch Loch in Folie evakuieren
- 2. Vakuumsack aufbringen und diesen über den äußeren Anschluss evakuieren

## Masterarbeit- Eingebettete FGL-Aktuatoren



<b>3.4.2 Vorbereitung der Platte für die Injektion</b>		SOLL/IST
Werkzeug gereinigt und getrennt Trennmittel : Waterworks Departure	i. O. Unterschrift	
1 x Gewegepaket, 4 x Aktuator 145 mm x 135 mm	i. O. Unterschrift	
2 x Vakuumfolie Typ „PATS W 215“ vorbereitet und zugeschnitten 550 x 750 mm Dichtungsband: GS 213	i. O. Unterschrift	
2x Spiralschlauch, Kupferrohr, Schraubschlauchschellen, Schlauchklemmen	i. O. Unterschrift	
3. Vakuumpumpe über T-Stück an Harzleitung anschießen	i. O. Unterschrift	
220g Harz abgewogen = 30 g für Laminat + Lei- tungen + Sicherheit	Abgewogen: <u>220</u> g	
Harz entgasen	Druck: <u>2x10<sup>-2</sup></u> mBar	
Vakuumsack Druck vor Infusion	Vakuumsack 1: <u>1,7x10<sup>-1</sup></u> mBar Vakuumsack 2: <u>4x10<sup>-1</sup></u> mBar	

**Masterarbeit- Eingebettete FGL-Aktuatoren**

<b>4 Qualitätssicherung der Laminatplatte</b>	<b>SOLL/IST</b>
---	-----------------

<b>4.1 Sichtprüfung</b>	<b>SOLL/IST</b>
-------------------------	-----------------

Anmerkung	IST
Lufteinschlüsse	Einschlüsse oberhalb der Aktuatoren
Trockene Stellen	Trockene Stellen unterhalb der Aktuatoren
Geometrische Fehlstellen	Prismen sind von Aktuatoren verrutscht (Spalt ~1mm) Aktuatoren liegen nicht rechtwinklig auf Laminat