

IVW - Schriftenreihe Band 118

Institut für Verbundwerkstoffe GmbH - Kaiserslautern

Moritz Hübler

**Methodik zur Auslegung
und Herstellung von aktiven
SMA-FKV-Hybridverbunden**

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the Internet at <<http://dnb.ddb.de>>.

Herausgeber: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH
Prof. Dr.-Ing. Ulf Breuer
Erwin-Schrödinger-Straße
TU Kaiserslautern, Gebäude 58
67663 Kaiserslautern
<http://www.ivw.uni-kl.de>

Verlag: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH

Druck: Technische Universität Kaiserslautern
ZBT – Abteilung Foto-Repro-Druck

D 386

© Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern 2015

Alle Rechte vorbehalten, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Photographie, Mikroskopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.
ISSN 1615-021X
ISBN 978-3-944440-14-9

**Methodik zur Auslegung und Herstellung von
aktiven SMA-FKV-Hybridverbunden**

Vom Fachbereich für Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Moritz Hübler

aus Pirmasens

Tag der mündlichen Prüfung: 19.10.2015

Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Paul Ludwig Geiß

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Ulf Paul Breuer

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Seelecke

D386

Meinen Eltern

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Kompetenzfeld „Tailored and Smart Composites“ der Abteilung Werkstoffwissenschaften des Instituts für Verbundwerkstoffe zwischen 2011 und 2015.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulf Breuer für die ausgezeichnete Betreuung meiner Arbeit und Förderung meiner Person über die gesamte Zeit hinweg sowie für die initiale Etablierung des Themenfeldes „Smart Materials“ am Institut. Danken möchte ich auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Seelecke und Herrn Prof. Dr.-Ing. Paul Ludwig Geiß für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Zweitgutachtens bzw. des Prüfungsvorsitzes. Weiterhin gilt mein besonderer Dank Herrn Dr. Martin Gurka für die Unterstützung und das entgegengebrachte Vertrauen in seiner Funktion als Kompetenzfeldleiter. Der mir gegebene Freiraum und die eingebrachten Anregungen hatten einen nicht unwesentlichen Einfluss auf diese Arbeit sowie auf die Entwicklung meiner Person. Bei Herrn Dr. Sebastian Schmeer möchte ich mich dafür bedanken, dass er bei mir das tiefere Interesse an Verbundwerkstoffen sowie am Weg zur Promotion geweckt hat.

Über alle Abteilungen hinweg möchte ich mich bei den Mitarbeitern des IVWs bedanken, die mir die Anfertigung dieser Arbeit in einem hilfsbereiten und kollegialen Umfeld ermöglicht haben. Besonderer Dank gilt hier Jovana Dzalto, Matthias Bandler, Pia Eichert, Hermann Giertzsch, Florian Gortner, Irene Hassinger, Bernhard Helfrich, Markus Hentzel, Tim Krooß, Ariane McCauley, Andreas Noll, Sebastian Nissle, Ralf Schimmele, Uwe Schmitt, Stefan Schmitt, Ron Sebastian, Kerstin Steidle und Petra Volk. An dieser Stelle sei auch allen Studenten gedankt, die mich durch die Anfertigung studentischer Arbeiten unterstützt haben. Nennen möchte ich hier Philipp Breyll, Lisa Fritz, Lukas Heberger, Thomas Müller und Ralph Zimmermann.

Meinen Eltern möchte ich herzlich danken für die uneingeschränkte Unterstützung, das Vertrauen in meine Fähigkeiten und deren Förderung über mein gesamtes Leben hinweg sowie für die Freiheit, die ich bei der Gestaltung meines Berufsweges hatte. Meiner Frau Julia danke ich für das Verständnis und den liebevollen Rückhalt, den sie mir bietet. Meinem Sohn Felix für die Motivation, welche er für mich darstellt, und die überraschend ruhigen Nächte in der Endphase dieser Arbeit.

Kaiserslautern, im November 2015

Moritz Hübler

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Kurzfassung.....	v
Abstract.....	viii
Abkürzungsverzeichnis und Symbole.....	xi
1. Einleitung.....	1
2. Stand der Technik.....	3
2.1. Formgedächtnislegierungen	3
2.1.1. Aktorikeffekte	6
2.1.2. Modellierung.....	9
2.1.3. Anwendungen	11
2.2. Faserkunststoffverbunde	12
2.2.1. Faserverstärkung	13
2.2.2. Polymermatrices	14
2.2.3. Auslegung	17
2.3. SMA-FKV-Hybridverbunde	19
3. Ziel und Vorgehensweise	25
4. Materialien und Experimentelles	29
4.1. Materialien.....	29
4.1.1. Formgedächtnislegierungen	29

4.1.2. Harzsysteme	29
4.1.3. Faserverbundwerkstoffe.....	30
4.1.4. Elastomere	30
4.2. Experimentelles.....	31
4.2.1. Aktorikcharakterisierung.....	31
4.2.2. Aktuierung von SMA-FKV-Hybridverbunden bis zum Versagenspunkt	36
4.2.3. Aktuierung von SMA-FKV-Hybridverbunden für die Validierung	40
4.2.4. Produktionseinrichtungen.....	42
4.2.5. Analytik	42
5. Herstellung aktiver SMA-FKV-Hybridverbunde.....	44
5.1. Integrationsmethode.....	44
5.1.1. Analyse der Anforderungen.....	45
5.1.2. SMA-Gitter	47
5.1.2.1. Umsetzung SMA-Gitter-Integration.....	50
5.2. Herstellungsmethode	53
5.2.1. Analyse möglicher Herstellungsprozesse.....	53
5.2.2. Tempern.....	58
5.3. Vergleich unterschiedlicher Integrations- und Herstellungsmethoden.....	62

6. Simulative Abbildung der SMA-Aktorik	66
6.1. Modellierung.....	66
6.1.1. Herleitung des Zustandslinienmodells.....	66
6.2. Charakterisierung.....	74
6.2.1. Charakterisierungsversuche.....	75
6.2.2. Aktorikperformance	77
6.2.2.1. Ein-Weg-Effekt-Material.....	77
6.2.2.2. Zwei-Weg-Effekt-Material	81
6.2.3. Analytische Beschreibung der Zustandslinien.....	82
6.2.3.1. Zwei-Weg-Effekt-Material	82
6.2.3.2. Ein-Weg-Effekt-Material.....	85
6.3. Implementierung.....	91
6.3.1. Aktorik des SMA.....	91
6.3.1.1. Berechnung der Aktorik Kennwerte für ein Zwei-Weg-Effekt- Material.....	93
6.3.1.2. Berechnung der Aktorik Kennwerte für ein Ein-Weg-Effekt- Material.....	94
6.3.2. Abbildung des SMA-FKV-Verbundes	96
7. Validierung der Methodik an Technologie-Proben	100
7.1. Charakterisierung.....	100

7.1.1. Grundlamine	100
7.1.2. Anbindung	102
7.2. Simulation	105
7.2.1. Simulative Vorhersage	106
7.3. Experimentelle Validierung	109
7.3.1. Diskussion	110
7.3.2. Zusammenfassung Validierung	114
8. Anwendungskonzepte	116
8.1. Eigenschaften und Vorteile aktiver SMA-FKV-Hybridverbunde für die Anwendung	116
8.2. Neuartige Funktionen	119
8.3. Aerodynamisches Profil	122
9. Zusammenfassung	126
10. Literaturverzeichnis	129
11. Eigene Veröffentlichungen	140
12. Betreute Arbeiten	143
13. Lebenslauf	145

Kurzfassung

Der Anteil von Komponenten aus Faserkunststoffverbunden (FKV) ist in den vergangenen Jahren speziell in den leichtbaugetriebenen Branchen stetig gestiegen, da der Einsatz von FKV die Möglichkeit bietet, eine Gewichtsreduktion gegenüber Ausführungen mit klassischen Metallwerkstoffen zu erzielen. Eine optimale Ausnutzung der Vorteile von FKV kann jedoch nur durch faserkunststoffgerechte konstruktive Lösungen, für die bisherige Ausführungen in Frage gestellt werden müssen, erreicht werden. Nicht nur Materialien und Bauweisen für lasttragende Strukturen sind zu überdenken, auch bisherige Lösungsansätze zur Realisierung aktorischer Funktionen, die einen wesentlichen Teil vieler Produkte ausmachen, müssen hinterfragt werden. Klassische diskret angeschlossene Aktoren können in diesem Zuge durch neuartige Festkörperaktoren wie z.B. Formgedächtnislegierungen oder Piezokeramiken substituiert werden. Durch den differenziellen Aufbau der FKV ist die direkte Integration aktiver Formgedächtnislegierungen (engl. Shape Memory Alloys (SMA)) möglich und es ergibt sich ein neues FKV-gerechtes Aktorikprinzip, welches eine material- und flächenintegrierte Aktorik bietet. Wesentliche, bisher ungelöste Fragestellungen aktiver SMA-FKV-Hybridverbunde werden in der vorliegenden Arbeit detailliert beleuchtet und neue Lösungsansätze ausgearbeitet, um für einen zukünftigen industriellen Einsatz die grundlegenden Voraussetzungen zu schaffen.

Um ein ganzheitliches Vorgehen zu gewährleisten, müssen offene Fragestellungen im Bereich der Herstellung und simulativen Auslegung beantwortet werden. Die zentralen Fragen sind:

- **Herstellung:** Wie können zuverlässige aktive SMA-FKV-Hybridverbunde reproduzierbar hergestellt werden?
- **Simulation:** Wie können aktive Komponenten aus SMA-FKV-Hybridverbund auf Bauteilebene effizient ausgelegt werden?

Die Integrationsmethode des Herstellungsprozesses muss möglichst effizient die Aufgaben Kraftübertragung zwischen SMA und FKV, elektronische Kontaktierung

und Handling erfüllen. Dies wird mit einem innovativen Konzept, welches bei der Kraftübertragung auf mechanische Verankerungen zwischen SMA-Elementen und umgebendem FKV setzt, erreicht. Durch den Einsatz eines geschweißten SMA-Gitters und lokal faserverstärkter Bereiche können die erforderlichen Aktorspannungen übertragen werden. Weiterhin gewährleistet ein vorgefertigtes SMA-Gitter einen flexiblen Herstellungsprozess und ein reproduzierbares Herstellungsergebnis.

Zur Konzipierung einer optimalen Prozesstemperaturführung sind komplexe Randbedingungen und auf den ersten Blick widersprüchliche Anforderungen aus den etablierten Herstellungsprozessen von FKV-Materialien und dem thermisch sensiblen SMA-Materialverhalten zu berücksichtigen. Eine Kalthärtung im ersten Schritt der Hybridverbundherstellung aus duromerem FKV und SMA-Gitter erlaubt einen Verzicht auf aufwendige Vorrichtungen zur Unterdrückung einer vorzeitigen Verformung der SMA-Elemente. Eine weitere angepasste Temperung zur Erhöhung der Vernetzungsdichte des duromeren Polymers verbessert die Leistungsfähigkeit zusätzlich, wodurch die maximale Spitzenauslenkung (ohne äußere Last) bezogen auf die aktive Länge einer Hybridstruktur von anfänglich 17 % auf mehr als 60 % gesteigert werden kann.

Um eine simulative Abbildung dieser SMA-FKV-Hybridverbunde zur Auslegung aktiver Komponenten einsetzen zu können, muss die Modellierung die notwendige Genauigkeit liefern und effizient auf Bauteilskala einsetzbar sein. Das entwickelte Zustandslinien-Modell des SMA-Materials wird diesen Anforderungen durch die Fokussierung auf den Aktorikeffekt gerecht. Vorhergesagt werden kann damit der „aufgeheizte“ und „abgekühlte“ Zustand von Ein- und Zwei-Weg-Effekt-Materialien. Der Einfluss der Steifigkeit der zu verformenden FKV-Komponente wird durch eine anwendungsnahe Charakterisierung erfasst und fließt durch die analytische Beschreibung der Zusammenhänge in das Modell ein. Konkrete Kennwerte stehen für ein Zwei-Weg-Effekt-Material und zwei Ein-Weg-Effekt-Materialien mit unterschiedlicher Umwandlungstemperatur und individueller Vordehnung (1,8 bis 6,3 %) zur Verfügung. Durch die Beschreibung der gesamten Hybridverbunde mittels homogenisierter Schalen in der Finiten-Elemente-Methode (FEM) kann auf die Abbildung der realen

mikroskopischen Geometrie verzichtet werden und die Auslegung ganzer Komponenten aus aktivem SMA-FKV-Hybridverbund wird ermöglicht.

Im Zuge der Validierung wird das experimentell bestimmte Aktorikverhalten mit der simulativen Vorhersage abgeglichen. Da dieser Validierung die entwickelten Lösungen in den Bereichen Herstellung und Simulation zugrunde liegen, verifiziert die erfolgreiche Validierung die Anwendbarkeit der entwickelten Gesamtmethodik. Eine gute Übereinstimmung kann bei Coupontests für Vordehnungen von bis zu 3 % sowie für teilaktivierte Zustände der SMA-Elemente festgestellt werden.

Um zu verdeutlichen, wieso und unter welchen Randbedingungen der Einsatz aktiver SMA-FKV-Hybridverbunde technisch sinnvoll sein kann, werden verschiedene neuartige Anwendungskonzepte beschrieben. Die wesentlichen Vorteile eines aktiven Hybridverbundes gegenüber klassischer Aktorik-Struktur-Kombinationen werden durch die abschließende Entwicklung eines aerodynamischen Profils als Demonstrator hervorgehoben. Die wichtigsten Vorteile sind:

- Stark reduzierte Bauraumanforderungen
- Geringes Systemgewicht
- Große Designfreiheit
- Geschlossene kontinuierliche Oberfläche
- Geringer Montageaufwand

Der Demonstrator verdeutlicht außerdem, wie es mit den Ergebnissen dieser Arbeit möglich ist, aktive Bauteile aus SMA-FKV-Hybridverbund im Hinblick auf eine konkrete Anwendung systematisch und rechnergestützt auszulegen. Durch die entwickelte Herstellungsmethodik können diese Hybridverbunde mit hoher Leistungsfähigkeit bei minimalem Bauraum und geringer zusätzlicher Masse in reproduzierbarer Qualität gefertigt werden. Neue innovative Funktionen, die sich nicht im Rahmen klassischer Aktorikprinzipien realisieren lassen, werden umsetzbar und ermöglichen signifikante Wertsteigerungen diverser Produkte.

Abstract

The application of fiber reinforced polymers (FRP) offers the possibility to reduce weight compared to design solutions with common metal alloys. However, the full exploitation of the advantages of FRP requires an optimized design and the questioning of established design solutions. Not only the materials and the constructional methods of load carrying structures have to be questioned, but also the common solutions for actuation functions. Classical actuators with discrete connection points can be substituted by advanced solid state actuators as shape memory alloys (SMA) or piezoceramics. The differential structure of FRP allows for a direct integration of active SMA elements. An FRP appropriate actuator principle, which shows material and shell integrated actuation, is developed. Essential unsolved problems of SMA-FRP hybrid structures are analyzed and new approaches are developed within this work, defining the fundamental prerequisites conditions for an industrial application in future products.

To ensure a holistic approach, questions in the field of manufacturing and design have to be answered:

- **Manufacturing:** How to manufacture reliable active hybrid structures with a high reproducibility?
- **Design:** How can active structures be effectively designed on component scale?

The integration method must combine the following functions: force transition between SMA and FRP, electronic connection and handling. This is achieved by means of an innovative approach using material interlocking for force transition between SMA elements and surrounding FRP. A welded SMA grid supported by local fiber reinforcements is able to bear and introduce the required actuator stress. Furthermore, the semi-finished SMA grid ensures a flexible manufacturing process and a reproducible manufacturing result.

Determining optimal process temperatures requires the consideration of complex boundary conditions and, at first glance, the contradictory requirements of established FRP manufacturing processes and the thermal sensitive SMA behavior. As a first step, the thermoset polymer and the SMA grid are brought together in a “cold” (room temperature) curing process, avoiding extensive rigs to suppress the premature contraction of SMA elements. The curing state of the thermoset polymer is improved by an individual adjusted annealing step, finally enabling an increase of tip deflection of the cured hybrid structure in ratio to structure length from 17% to over 60%.

A simulation model of these SMA-FRP hybrid structures applicable for design process of active components the necessary accuracy as well as a high efficiency on component scale. The developed State-Line-Model of the SMA material meets these requirements by focusing on the actuation effect. This allows the prediction of the “heated” and “cooled” state of one- and two-way-effect materials. An application-related actuation characterization captures the influence on the stiffness of the deflected structure. These relations are incorporated in the model via analytic description. Precise values are provided for one two-way-effect material and two one-way-effect materials with different transition temperature and individual pre-strain from 1.8% to 6.3%. Describing the real microscopic geometry is not necessary when modelling the whole hybrid structure with a homogenization to shell elements in the finite element method. This enables to use the model as a design tool in the development of active components.

For validation purposes the actuation behavior in experimental test is compared to the simulative prediction. Since the developed approaches for manufacturing and design form the basis of the validation, the success verifies the applicability of the whole approach. A good conformity is determined with test specimen for actuation pre-strain values up to 3% as well as for partly activated states of SMA elements.

To clarify why and under which boundary conditions the application of active SMA-FRP hybrid structure is technically reasonable, various application concepts are be-

ing illustrated. The essential advantages of active hybrid structure compared to classical actuator-structure combinations are highlighted by the development, manufacturing and testing of an active airfoil. The major advantages are:

- Strongly reduced space requirements
- Low system weight
- High degree of design freedom
- Closed, continuous surface
- Low assembly effort

Furthermore, the active airfoil demonstrates how active components can be systematically and computer-based designed for a specific application. A high performance at minimum size and low additional weight in a reproducible quality is ensured applying the developed manufacturing method. New innovative functions, not possible with classical actuator principles, are now feasible and promise significant additional value for various products.

Abkürzungsverzeichnis und Symbole

Abkürzungen

A	Austenit
A _F	Austenitfinishtemperatur
A _S	Austenitstarttemperatur
CAE	Computer Aided Engineering
DMTA	Dynamisch-mechanische Thermoanalyse
DSC	Differentialscanningkalorimetrie
EL	Elastomer
E-Modul	Elastizitätsmodul
EP	Epoxid
faw	fiber areal weight / Faserflächengewicht
FE	Finite-Elemente
FE-GT	Freie Enden-Getempert
FE-KG	Freie Enden-Kaltgehärtet
FEM	Finite-Elemente-Methode
FKV	Faserkunststoffverbund
G-GT	Gitter-Getempert
G-KG	Gitter-Kaltgehärtet
HM	high modulus / hoch steif

HT	high tenacity / hoch fest
M ₋	Martensit "minus"-Variante
M ₊	Martensit "plus"-Variante
M _F	Martensitfinishtemperatur
M _S	Martensitstarttemperatur
MSMA	Magnetische SMA
NF	Naturfaser
NiTi	Nickel-Titan
∅	Durchmesser
Ra	mittlere Rauheit
RT	Raumtemperatur
RTM	Resin Tranfer Molding
SF	SmartFlex [®]
SMA	Shape Memory Alloy / Formgedächtnislegierung
SMP	Shape Memory Polymer / Formgedächtnispolymer
sym.	symmetrisch
T _G	Glasübergangstemperatur
TMA	Thermomechanische Analyse
UHM	ultra high modulus / ultra hoch steif
unsym.	unsymmetrisch

Lateinische Symbole

A	[mm ²]	Querschnitt bzw. Fläche
d	[mm]	Durchmesser
E	[MPa]	Elastizitätsmodul
E _A /E _{Austenit}	[MPa]	Elastizitätsmodul des Austenits
E _{Feder}	[MPa]	wirkende Steifigkeit durch die Feder
E _M /E _{Martensit}	[MPa]	Elastizitätsmodul des Martensits
E _{SMA}	[MPa]	Elastizitätsmodul der Aktorik-Zustandslinie
F	[N]	Kraft
F _{Index}	Abhängig vom Index	Fehler des Indices
G	[MPa]	Schubmodul
l	[mm]	Länge
O	[mm ²]	Oberfläche
P	[MPa]	Last
p	[MPa]	Druck
R	[N/mm]	Federrate
r	[mm]	Radius
T	[°C]	Temperatur
t	[mm]	Lagendicke
Δl	[mm]	Längenänderung

Griechische Symbole

α_T/α	[1/K]	Thermischer Ausdehnungskoeffizient
β_{SMA}/β	[1]	Ausdehnungskoeffizient der SMA-Aktorik
γ	[°]	Winkel
ε	[%]	Dehnung
ε_{SMA}	[%]	freie SMA-Aktorikdehnung
ε_T	[%]	Umwandlungsdehnung des SMA-Materials
ν	[1]	Querkontraktionszahl
ρ	[g/cm ³]	Dichte
σ	[MPa]	Spannung
σ_{A-M}	[MPa]	Umwandlungsspannung Austenit → Martensit
σ_{M-A}	[MPa]	Umwandlungsspannung Martensit → Austenit
τ	[MPa]	Schubspannung
φ	[vol.-%]	Faservolumenanteil
χ_{SMA}/χ	[1]	Laufvariable der SMA-Aktorik

1. Einleitung

In den leichtbaugetriebenen Transportmittelbranchen gibt es anhaltende Bemühungen, die klassischen Metallwerkstoffe durch zukunftsweisende Leichtbaumaterialien wie Faserkunststoffverbunde (FKV) zu substituieren. Diese Entwicklung hat in der Luftfahrt mit den Modellen Boeing 787 und Airbus A350 möglicherweise annähernd ihren Höhepunkt mit über 50 % FKV-Anteil an der Strukturmasse erreicht. [1]

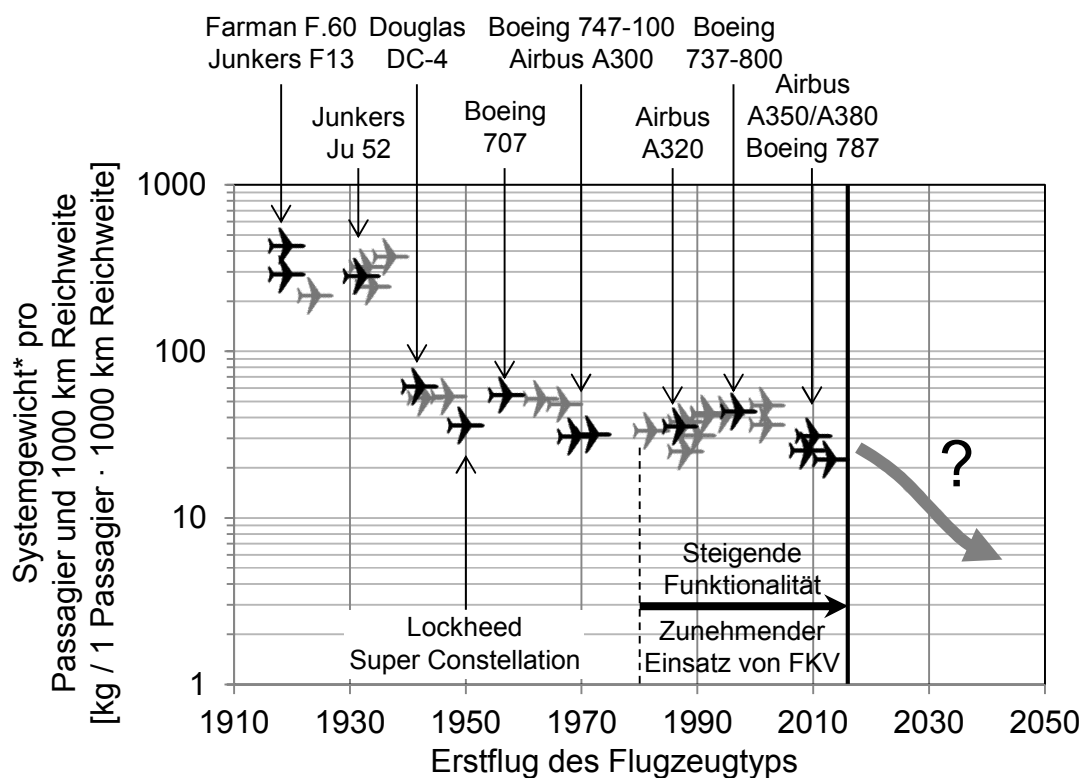


Abbildung 1: Entwicklung des Systemgewichts* pro Passagier und 1000 km Reichweite in Anlehnung an Breuer [2] (*Leergewicht abzüglich Masse der Antriebe)

Wie Abbildung 1 zeigt, erfuhr das Systemgewicht eines Gesamtflugzeuges, welches benötigt wird, um einen Passagier über 1000 km zu transportieren, seit der Einführung erster FKV-Komponenten in den 80er-Jahren keine wesentliche Reduktion. Die Gewichtsreduktion, welche durch die Materialsubstitution in der Luftfahrt erreicht werden konnte, wurde mitunter durch gestiegene Komfort- und Sicherheitsansprüche aufgezehrt. [2] Bei dem heutigen bereits anteilmäßig hohen Einsatz von FKV im

Flugzeugbau werden für eine weitere signifikante Gewichtsreduktion neue Maßnahmen erforderlich. Ohne neue faserverbundgerechte konstruktive Lösungen, für die bisherige Ausführungen in Frage gestellt werden müssen, sind essentielle Leistungssteigerungen kaum umsetzbar. Nicht nur Materialien und Bauweisen für lasttragende Strukturen sind zu überdenken, auch bisherige Lösungsansätze zur Realisierung aktiver Funktionen, die einen wesentlichen Teil vieler Transportsysteme ausmachen, müssen hinterfragt werden. So ist zum Beispiel die wesentliche aktive Funktion der Flugzeugstruktur eine anpassbare Aerodynamik zur Steuerung und Kontrolle des Flugzustandes. Diese Variabilität der Aerodynamik muss nicht zwangsläufig durch die etablierten Steuerflächen erreicht werden. Diese Steuerflächen sind vielmehr die Konsequenz aus den Anforderungen und der bislang zur Verfügung stehenden Aktorik-Technologie, bei der man auf ein kinematisches Zusammenspiel zwischen Aktor, mechanischen Verbindungen und Struktur gesetzt hat. Durch die Verwendung neuartiger Festkörperaktuatoren wie z.B. Formgedächtnislegierungen oder Piezokeramiken können klassische Aktoren substituiert werden. Um die erreichbaren Vorteile zu maximieren, ist es wie auch bei der Materialsubstitution durch FKV notwendig, bisherige Ausführungen und Aktorikprinzipien zu hinterfragen.

Mit der direkten Integration aktiver Formgedächtnislegierungen (engl. Shape Memory Alloys (SMA)) in FKV kann ein neues Prinzip umgesetzt werden, welches eine material- und flächenintegrierte Aktorik ermöglicht. Dieses neue Aktorikprinzip kann einerseits klassische Aktorikfunktionen auf effizientere Weise erfüllen und andererseits völlig neue Aktorikfunktionen ermöglichen. Die Leistungsfähigkeit des technischen Systems profitiert dabei besonders von neuen aktiven Funktionen, welche nur durch die besonderen Eigenschaften des neuartigen Aktorikprinzips ermöglicht werden. So lassen sich durch die Kombination von Aktor und Struktur Bauraum- und Gewichtsreduktionen sowie eine größere Designfreiheit erzielen, welche in der Realisierung neuartiger Funktionen und einer damit verbundenen Wertsteigerung des Produktes münden können. Es ist Ziel der vorliegenden Arbeit, bisher ungelöste Fragestellungen aktiver SMA-FKV-Hybridverbunde zu beantworten und somit die grundlegenden Voraussetzungen für einen zukünftigen industriellen Einsatz zu schaffen.

2. Stand der Technik

2.1. Formgedächtnislegierungen

Formgedächtnislegierungen, sogenannte Shape Memory Alloys (SMA), können den funktionalen oder multifunktionalen Materialien zugerechnet werden. Nach Janocha [3] können sie als Materialien beschrieben werden, welche als Reaktion auf externe Anregung ein vergleichsweise großes Antwortsignal erzeugen und dabei die Eingangsenergie in eine andere Energieform umwandeln. Sieht man von speziellen magnetischen Formgedächtnislegierungen (MSMA) ab, so konzentriert sich die Energieumwandlung bei Materialien mit Formgedächtniseffekt auf die Transformation zwischen thermischer und mechanischer Energie [4].

Steht die Nutzung des Antwortsignals im Vordergrund, können alle Materialien, die eine beliebige andere Energie in mechanische Energie umwandeln, als Festkörperaktuator bezeichnet bzw. eingesetzt werden. Festkörperaktuatoren sind dadurch gekennzeichnet, dass man sich die erzeugte Dehnung und Spannung zu Nutze machen kann, ohne dass es bewegte Teile im System gibt. [3]

Wie es Abbildung 2 zeigt, nehmen die Formgedächtnislegierungen innerhalb dieser als Festkörperaktuator nutzbaren Materialien eine exponierte Position ein. Hohe erzeugbare mechanische Spannungen im Bereich mehrerer hundert Megapascal und mittlere Dehnungen im einstelligen Prozentbereich ermöglichen ein sehr hohes volumenbezogenes Arbeitsvermögen. Daher haben sie trotz der vergleichsweise hohen Dichte von Metallen im Allgemeinen auch gewichtsbezogen das beste Arbeitsvermögen unter den Festkörperaktuatoren. Lediglich die maximal abrufbare Aktorikfrequenz kann ein limitierender Faktor für den Einsatz von Formgedächtnislegierungen sein. [4]

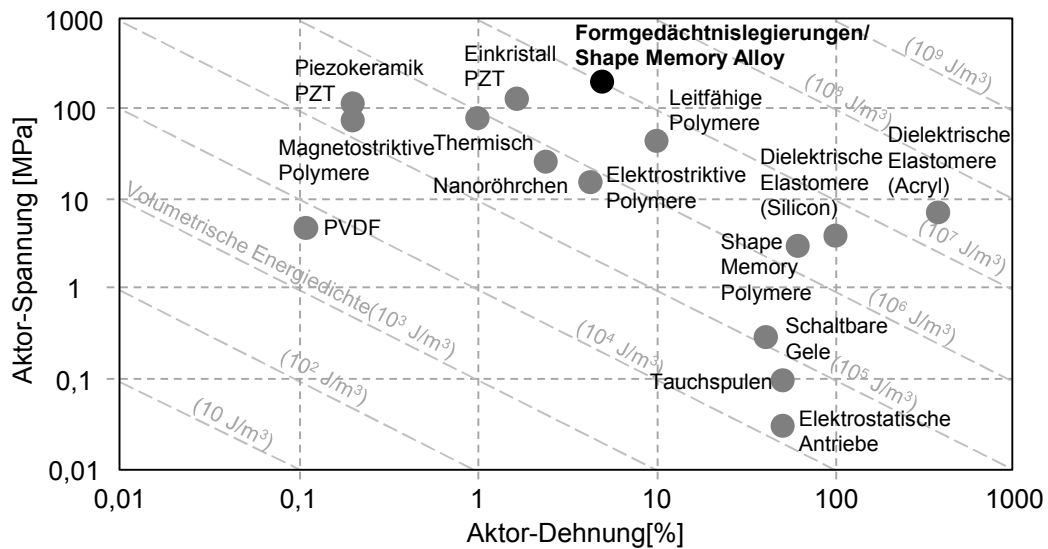


Abbildung 2: Abrufbare Spannungen und Dehnungen verschiedener Aktoren nach Wulz [5]

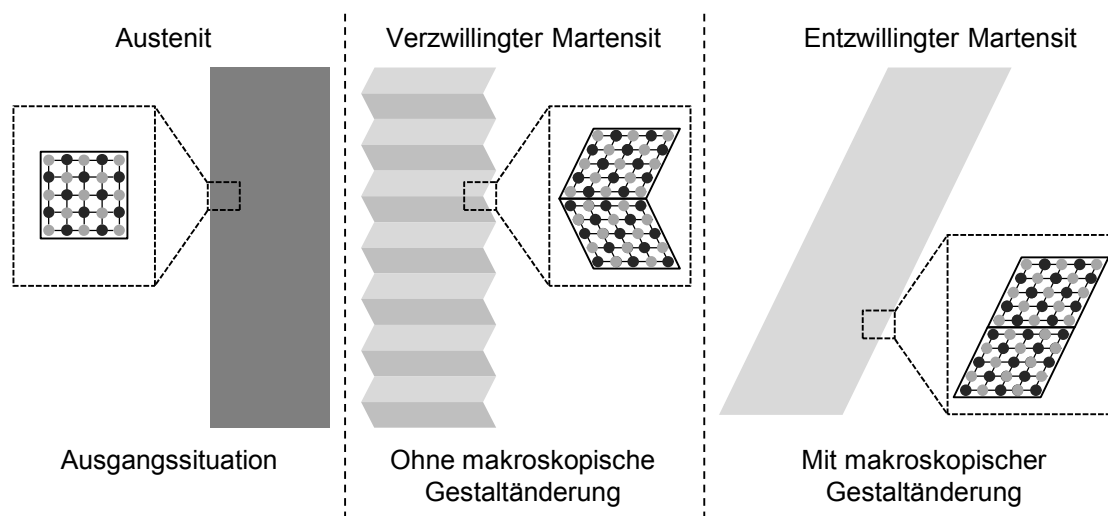


Abbildung 3: Zwillingsbildung bei der Austenit-Martensit-Umwandlung nach Otsuka [6]

Das Formgedächtnis beruht bei allen Legierungen auf der Phasenumwandlung zwischen der Hochtemperaturphase, dem Austenit, und der Niedrigtemperaturphase, dem Martensit. Bei diesem diffusionslosen Phasenübergang bleiben benachbarte Atome weiterhin benachbart, ohne dass es zu Platzwechseln kommt. Das ursprüngliche Gitter wird bei der Umwandlung deformiert und es kommt zu Vergrößerungen und Verkleinerungen bestimmter Gitterachsen. [6] Die Martensitbildung ist nicht wie bei klassischen Metalllegierungen durch eine Unterkühlung beim Abkühlprozess be-

dingt, sondern wird durch die Legierungszusammensetzung der Formgedächtnislegierung selbst initiiert. Die Martensitbildung wird durch Zwillingsbildung begleitet, da eine vollständig homogene Umwandlung eine Gestaltänderung zur Folge hätte (vgl. Abbildung 3). [7]

Dieses zwanglos entstandene Gefüge erlaubt eine plastische Formveränderung durch das Wachsen der einen Zwillingsrichtung auf Kosten der anderen. Unter der Annahme, dass die Phasenumwandlung vollständig reversibel ist und die Verformung allein durch wandernde Zwillingsgrenzen zustande kommt, erhält man bei der Rückumwandlung zum Austenit wieder die exakt gleiche Form und somit ein perfektes Formgedächtnis. [6]

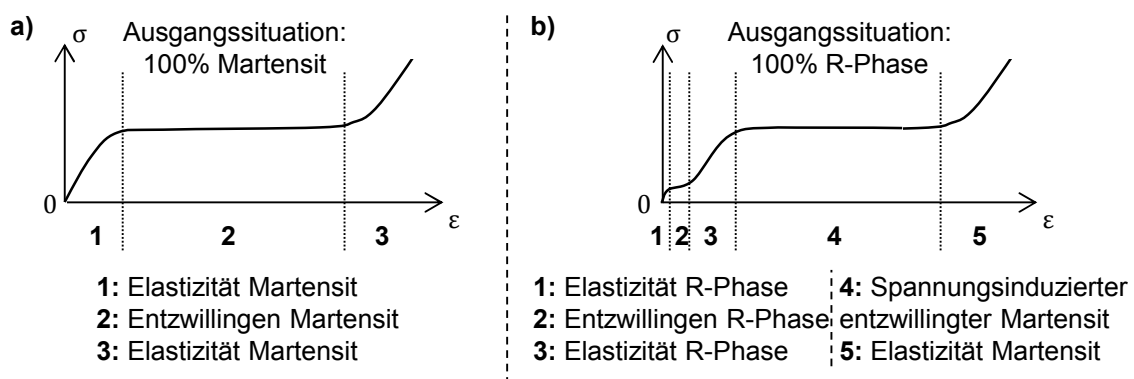


Abbildung 4: Entzwillingen der Martensitphase bzw. R-Phase nach Murasawa [8]

In Abbildung 4 a) ist gezeigt, wie sich Spannung und Dehnung während des Entzwillingens (engl. Detwinning) entwickeln. Deutlich setzt sich das Plateau vom restlichen elastischen Verhalten ab. Bei bestimmten Legierungen und Abkühlbedingungen kann es bei der Umwandlung vom Austenit zum Martensit zur Bildung einer Zwischenphase, der sogenannten R-Phase, kommen. Diese verfügt ähnlich wie der Martensit über eine verzwilligte Struktur. [6,8] In Abbildung 4 b) ist gezeigt, wie sich die R-Phase beim Entzwillingen anhand eines Zwischenplateaus bemerkbar macht. Während des ersten Plateaus wird zunächst die R-Phase selbst entzwillingt und im nächsten Plateau setzt die spannungsinduzierte Umwandlung der R-Phase direkt zu entzwillingtem Martensit ein. [8]

2.1.1. Aktorikeffekte

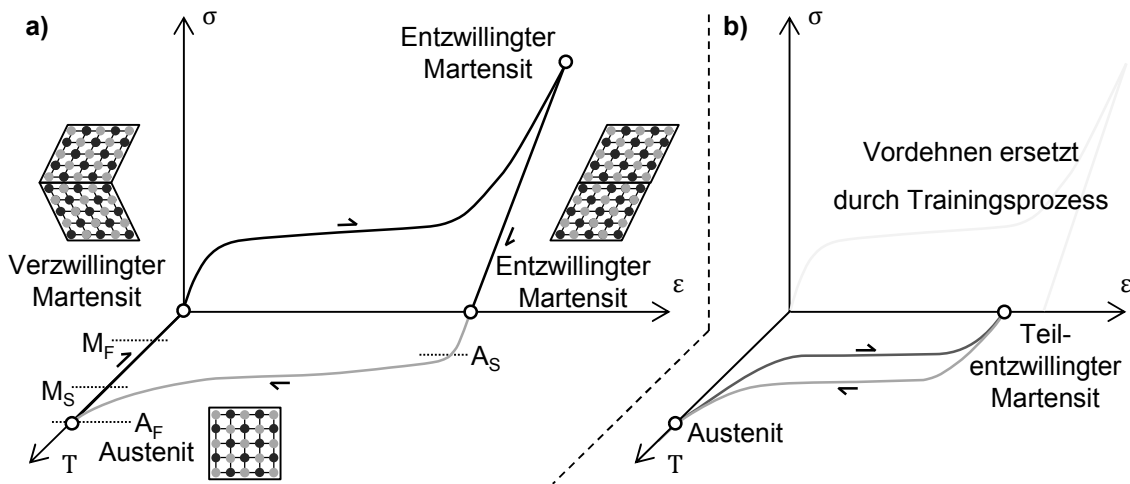


Abbildung 5: Ein-Weg-Effekt der SMA mit Umwandlungstemperaturen nach Lagoudas [4]

Das Entzwilligen mit einer darauffolgenden Rückverformung beim Aufheizen stellt den zugrundeliegenden Ein-Weg-Effekt der SMA dar und ist in Abbildung 5 a) skizziert. Das in der Martensitphase vorliegende Material wird zunächst plastisch verformt. Beim Aufheizen beginnt die Gefügeumwandlung zum Austenit bei der Austenitstarttemperatur A_S und endet bei Erreichen der Austenitfinishtemperatur A_F . Innerhalb dieser Temperaturspanne zwischen A_S und A_F wird die eingebrachte Verformung rückgängig gemacht, das Material „erinnert“ sich. Das Material „erinnert“ sich nur an den Zustand in der Austenitphase und während des Abkühlens bildet sich wiederum eine martensitische Struktur ohne jegliche makroskopische Verformung des Materials. Die Martensitbildung beginnt unterhalb A_F bei der Martensitstarttemperatur M_S und endet bei M_F , der Martensitfinishtemperatur. [4]

Neben dem beschriebenen Ein-Weg-Effekt ist es möglich, einen Zwei-Weg-Effekt abzurufen, der, wie Abbildung 5 b) zeigt, sich dadurch auszeichnet, dass während Umwandlung zum Martensit eine Verformung in umgekehrter Richtung stattfindet. [6] Man kann dabei zwischen einem materialeigenen und einem lastinduzierten Zwei-Weg-Effekt unterscheiden. Bei beiden Zwei-Weg-Effekten führen Spannungen dazu, dass sich bestimmte Martensitvarianten bevorzugt ausbilden und sich entsprechend

eine Formänderung einstellt. [6] Der materialeigene Zwei-Weg-Effekt wird von mikroskopischen Eigenspannungsfeldern eingebrachter Versetzungen oder Gitterfehler erzeugt. Diese lassen sich durch ein sogenanntes Training auf vielfältige Weise einbringen. Maßgeblich sind die Größe des erzielten Effektes und die Stabilität. Ein derart trainiertes Material zeigt Aktorik in beide Richtungen ohne eine äußere Last. Beim lastinduzierten Zwei-Weg-Effekt wird die Aufgabe, eine Vorzugsrichtung im sich bildenden Martensit zu erzeugen, von einer extern aufgetragenen Last übernommen. [6]

Tabelle 1: Wichtige Eigenschaften verschiedener Formgedächtnislegierungen [9,10]

Parameterbezeichnung	Einheit	NiTi	CuZnAl	CuAlNi
Dichte	g/cm ³	6.5	8	7.2
Zugfestigkeit	MPa	1000	700	800
Bruchdehnung	%	50	15	6
Maximale Dehnung Ein-Weg-Effekt	%	8	6	6
Maximale Dehnung Zwei-Weg-Effekt	%	6	1	1
Maximale Dehnung Pseudoelastizität	%	7	2	2
Maximale Anzahl Zyklen		>10 ⁵	>10 ⁴	>5*10 ³
Maximal zulässige Temperatur	°C	400	150	300
Maximale Umwandlungsspannung	MPa	900	700	600

Wichtige Kennwerte verschiedener Formgedächtnislegierungen sind in Tabelle 1 zusammen gefasst. Ohne eine spezielle Anwendung im Blick zu haben, zeigen die NiTi-Legierungen die beste Gesamtleistung [9]. Dieses Aktorikpotential lässt sich am effizientesten unter Zugbelastung abrufen [11]. Die abrufbare Zykluszahl hängt einerseits von der Legierung und andererseits von der abgerufenen Aktorikleistung pro Zyklus ab. Tendenziell sinkt die Dauerfestigkeit, je größer das Produkt aus abgerufenen Spannung und Dehnung ist. Bei entsprechender Auslegung und Limitierung diese Werte sind mehr als 100 000 Zyklen möglich [12].

Neben den realisierbaren Dehnungen bestimmen die Umwandlungstemperaturen maßgeblich das Verhalten und entscheiden oftmals über die Einsetzbarkeit des Materials für eine bestimmte Anwendung. Die Umwandlungstemperaturen können auf unterschiedliche Weise gemessen werden. Je nach genutzter Messmethode können

die Ergebnisse für A_S , A_F , M_S und M_F jedoch variieren. Erfassen lassen sich die Umwandlungspunkte mit der Differentialkalorimetrie, anhand des gemessenen elektrischen Widerstandes und anhand der erzeugten Dehnung. In der Differentialkalorimetrie werden die Umwandlungsvorgänge durch den exothermen bzw. endothermen Wärmestrom identifiziert. Der elektrische Widerstand lässt einen Rückschluss auf den Umwandlungsbereich zu, da der Widerstand des Austenits gegenüber dem des Martensits geringer ist. Nach Abel [13] hat auch die im Material herrschende Spannung einen Einfluss auf die Umwandlungstemperatur und entsprechend sollten die Umwandlungstemperaturen möglichst unter den relevanten Einsatzbedingungen gemessen werden. [13]

Wegen des genannten Zusammenhangs zwischen Belastung und Umwandlungstemperatur wird die SMA-Aktorik üblicherweise in aufwendigen Zyklusversuchen charakterisiert, wie sie in Abbildung 6 dargestellt sind.

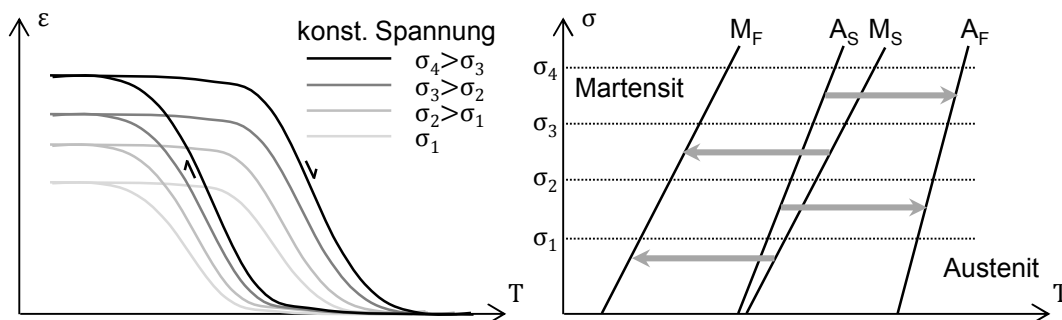


Abbildung 6: Hysteresekurven bei konstanter Last und die Lastabhängigkeit der Umwandlungstemperaturen nach Lagoudas [4]

Hierbei wird das Material unter konstanter äußerer Last aufgeheizt und abgekühlt, während die Dehnung aufgezeichnet wird. Aus dem jeweiligen Dehnungsbeginn/-ende kann auf den Umwandlungsbeginn bzw. auf das Umwandlungsende geschlossen werden. [12,14–17] Vervollständigt mit Zugversuchen können die in Tabelle 2 aufgeführten Kennwerte ermittelt werden, welche üblicherweise als Modellierungsgrundlage für das Aktorikverhalten verwendet werden. [4]

Tabelle 2: Übliche Materialkennwerte einer SMA-Charakterisierung am Beispiel einer NiTi-Legierung (Ni 60 Gew.-%, Ti 40 Gew.-%) nach Lagoudas [4]

Parameterbezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Steifigkeit Austenit	E_A	90	GPa
Steifigkeit Martensit	E_M	63	GPa
Martensitstarttemperatur	M_S	23	°C
Martensitfinishtemperatur	M_F	-14	°C
Austenitstarttemperatur	A_S	22	°C
Austenitfinishtemperatur	A_F	49	°C
Spannungsabhängigkeit Austenitumwandlung	C_A	16	MPa/°C
Spannungsabhängigkeit Martensitumwandlung	C_M	11,4	MPa/°C
Umwandlungsdehnung	$H^{cur}(\sigma)$	$=0,0135(1-\exp(-720\sigma/E_A))$	

2.1.2. Modellierung

Ansätze, mit denen versucht wird das Verhalten von SMA-Materialien abzubilden, sind zahlreich und vielfältig. Im Folgenden soll eine Übersicht dargestellt werden, die es ermöglicht, Modellierungsansätze einzuordnen, ohne detailliert auf spezifische Modelle einzugehen. Die Modellierungen unterscheiden sich in den folgenden Eckpunkten:

- Betrachtungsebene [18,19]: Mikroskopisch, mikro-makroskopisch (bzw. mesoskopisch), makroskopisch
- Mehrdimensionalität [18–21]: Eindimensional, dreidimensional
- Ansatztyp [4]: Rein phänomenologisch, Energiepotentialtopf, Helmholtz-Funktion, Gibbs-Funktion, Phasendiagramm
- Abdeckung der verschiedenen SMA-Effekte [4,20]: Entzwillingen, Druck-/Zugverhalten, Pseudoelastizität, Ein- und Zwei-Weg-Formgedächtnis-Effekt, komplexe Lastpfade, Ratenabhängigkeiten, plastische Effekte
- Abdeckung verschiedener physikalischer Effekte: Mechanisch [22], thermo-mechanisch [23–26], elektro-thermo-mechanisch [14,27]
- Berücksichtigung externe Einflüsse [27]: Aktor ohne Struktur, Aktorik-Struktur-Wechselwirkungen vereinfacht, Aktor-Struktur-Wechselwirkung vollständig
- Verwendung von Variablen [20]: Ohne interne Variable, mit einer oder mehreren internen Variablen

Die Grenzen der Betrachtungsebenen sind nicht eindeutig definiert. Panico et al. [19] und Bernardini et al. [20] rechnen Gitterzellenmechaniken, Grenzschichtwanderung, Keimbildung und Zwillingsbildung der mikroskopischen Ebene zu. Bernardini et al. [20] definiert die Grenze zwischen makro- und mikroskopisch dadurch, dass in der makroskopischen Sicht die Struktur der kleinsten Region durch die jeweiligen Phasenanteile beschrieben wird, hingegen bei der mikroskopischen Sicht die kleinste Region eindeutig einer einzelnen Phase zugeordnet werden kann. Paiva et al. [18] sieht neben der Mikroskala, welche molekulare Effekte umfasst, und der Makroskala, die messbare, phänomenologische Effekte erkennen lässt, noch die Mesoskala, bei der die Gitterstruktur im Vordergrund steht.

Setzt man sich zum Ziel, eine Modellierung für SMA-Aktoren in einem mechanischen System zu entwickeln, so ist eine Betrachtung der **makroskopischen Ebene** sinnvoll. Gleichzeitig werden meist sehr hohe Anforderungen an die Übertragbarkeit und Flexibilität gestellt: Es wird angestrebt, mit einem **numerisch effizienten** Modell **verschiedene SMA-Effekte** und die **thermisch-elektrischen Wechselwirkungen** abzubilden. Außerdem sollen **möglichst wenige Materialkennwerte** nötig sein und die benötigten **Kennwerte leicht messtechnisch erfasst** werden können. [27]

Makroskopische Modelle machen es erforderlich, thermodynamische Effekte auf phänomenologische Weise einzubinden [19]. Modelle, die in der Lage sind, viele SMA-Effekte abzubilden, bedürfen meist vieler interner Variablen und entsprechend sind sehr hohe Rechenzeiten notwendig, was die Anwendung in der Produktentwicklung nicht praktikabel macht [19]. Physikalisch basierte Modelle helfen, grundlegende Zusammenhänge zu erkennen. Sie weisen jedoch durch die starke Abstraktion und idealisierte Annahmen, welche zur exakten Beschreibung notwendig sind, große quantitative Abweichungen zu den phänomenologisch messbaren Effekten auf. Phänomenologische Modelle sind entsprechend umsetzungsnäher, auch wenn sich mit diesen Ansätzen nur begrenzt eine Erklärung für bestimmte Zusammenhänge ableiten lässt. [28]

Das Fehlen umfangreicher experimenteller Validierungen für den Großteil der Modellierungsansätze kann als Konsequenz dieses Widerspruches angesehen werden. Ohne eine Validierung kann aber keine gültige Aussage über die Vorhersagekraft einer Modellierung gemacht werden. [27]

2.1.3. Anwendungen

Formgedächtnislegierungen sind vielfach im industriellen Einsatz und in Großserienprodukte vorgedrungen. So werden sie z.B. in Luftdruckventilen [29] und Lüftungsklappenöffnungen [30] im Automobilbau eingesetzt oder als Autofocus-Stellelement in Handykameras verwendet [31]. Eine Übersicht über Anwendungen und neue Einsatzkonzepte bieten die Arbeiten von Mohd et al. [32], Barbarino et al. [33], Lagoudas [4] und Janocha [3]. Der größte Teil dieser Anwendungen nutzt jedoch diskret angeschlossene SMA-Elemente in einem klassischen mechanischen System.

2.2. Faserkunststoffverbunde

Innerhalb der großen Bandbreite an Materialverbunden stellen die Faserkunststoffverbunde eine der wirtschaftlich bedeutendsten Gruppe dar. Durch die große Vielfalt an verfügbaren Polymermatrixen und Verstärkungsfasern bzw. deren Textilhalbzeuge sind die Möglichkeiten zur anwendungsgerechten Bauteilauslegung nahezu unbegrenzt. Für Hochleistungsanwendungen in gewichtsensiblen Branchen wie der Luft- und Raumfahrt, dem Automobilbau oder dem Sport- und Freizeitsektor sind besonders die sehr guten massebezogenen Eigenschaften von Interesse. Diese Eigenschaften ergeben sich aus einer vorteilhaften Kombination der Stärken von Verstärkungsfasern und Matrix. Die Fasern bringen dabei eine hohe Steifigkeit und Festigkeit mit. Durch den Fasereffekt sind die Eigenschaften der Fasern denen makroskopischer Volumenkörper überlegen, da sich mit geringerem Durchmesser die Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein von Störungen verringert. Vorhandene Störungen schwächen so nur einzelne Fasern und nicht das gesamte Volumen. [34]

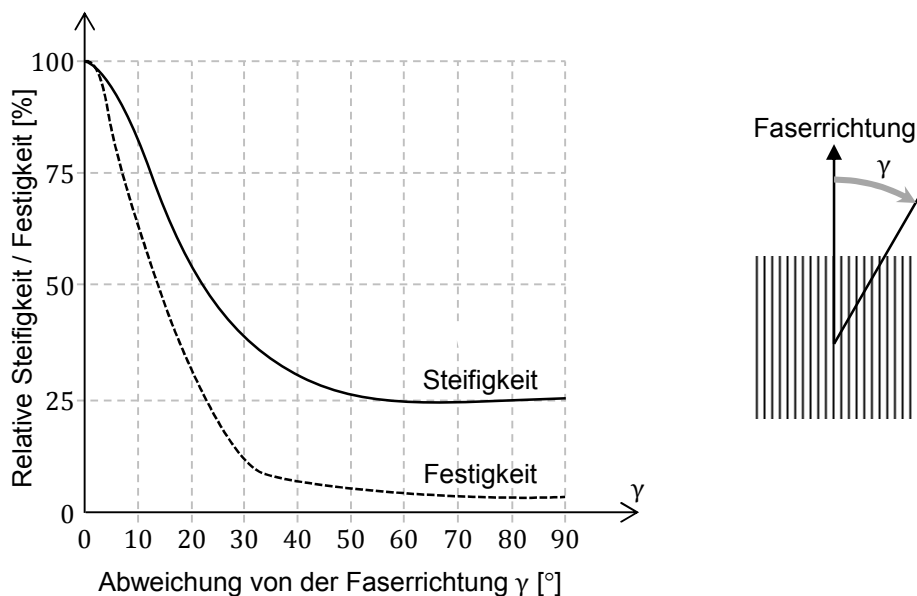


Abbildung 7: Einfluss einer Abweichung von der Faserrichtung auf die Steifigkeit und Festigkeit eines unidirektional verstärkten Faserkunststoffverbundes [35]

Um die Leistungsfähigkeit der Verstärkungsfasern konstruktiv nutzbar zu machen, erfolgt die Einbettung in eine Polymermatrix, mit der eine Lasteinleitung in die Faser

ermöglicht wird, Druckbelastungen durch die fixierte Ausrichtung übertragen werden können und die sensiblen Fasern vor Umwelteinflüssen geschützt sind. [34] Entsprechend dieser Aufgabenteilung ergibt sich eine starke Richtungsabhängigkeit der Materialeigenschaften, wie sie in Abbildung 7 dargestellt ist. Bei einer unidirektionalen Faserverstärkung in Lastrichtung kann so eine optimale Materialausnutzung und Gewichtsreduzierung erreicht werden, gleichzeitig zeigt sich aber auch die Sensibilität einer derartigen Konstruktion, da sich leichte Abweichungen von der Faserausrichtung stark auf die Eigenschaften auswirken. [35]

2.2.1. Faserverstärkung

Die Ausprägung des Verstärkungseffektes durch die Faserkomponente ist maßgeblich von zwei Faktoren bestimmt. Die Wahl des Verstärkungsfasertyps definiert den maximal möglichen Verstärkungseffekt, wobei Faservolumengehalt, Faserlänge und Ausrichtung einen erheblichen Einfluss auf die sich einstellenden Eigenschaften des Verbundes haben. Endlosfasern ohne Ondulation liefern den besten Verstärkungseffekt, während besonders kurze Faserlängen unter 1 mm oder Halbzeuge mit hoher Welligkeit (z.B. Vliese) in der Regel zu wesentlich geringeren Steifigkeiten und Festigkeiten führen. Die Verbundeigenschaften lassen sich mit der linearen Mischungsregel berechnen, bei der der Faservolumengehalt eine wesentliche Rolle spielt. In der Praxis lässt sich dieser zwischen ca. 60 Vol.-% bei unidirektionalen Hochleistungsverbunden und wenigen Volumenprozent bei eindispersierten Schnittmengen variieren. [35] Die wichtigsten Eigenschaften verschiedener Fasern können Tabelle 3 entnommen werden.

Die Fasern unterscheiden sich außerdem in weiteren Aspekten wie Durchmesser, Wasseraufnahme, elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Eigenschaftsstreuung, optische Eigenschaften und Preis, die den Einsatz eines Fasertyps für bestimmte Anwendungen prädestinieren oder verhindern. So können z.B. Kohlestofffasern im Gegensatz zu Glasfasern einen Faserkunststoffverbund elektrisch leitfähig machen. [35]

Tabelle 3: Eigenschaften verschiedener Verstärkungsfasern [1]

Fasertyp		Dichte	E-Modul	Zugfestigkeit
		[g/cm ³]	[GPa]	[GPa]
Kohlestofffaser	HT	1,78	240	3,75
	HM	1,85	400	2,45
	UHM	2	540	1,85
Glasfaser	S-Typ	2,46	90	4,5
	E-Typ	2,54	80	3,5
Aramidfaser	Kevlar 49	1,45	135	3,5
	Kevlar 149	1,47	185	3,4
Naturfaser	Flachs	1,48	30	0,75
	Hanf	1,45	70	0,6
	Jute	1,4	55	0,55
	Sisal	1,45	20	0,6

2.2.2. Polymermatrices

Polymere sind hochmolekulare Werkstoffe, die aus Kohlenwasserstoffketten gebildet werden. Diese Makromoleküle werden aus niedermolekularen Monomeren gebildet und dadurch zum Polymer. Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere sind die wichtigsten technisch nutzbare Polymergruppen. Sie verfügen über sehr große Kettenlängen, deren Zusammenhalt untereinander sich je nach Untergruppe unterscheidet [36]:

- Thermoplaste: Die Molekülketten sind ineinander verwoben, aber ohne chemische Verbindung untereinander, was ihre Aufschmelzbarkeit erklärt. [36]
- Duroplaste: Bei der Formgebung erfolgt eine engmaschige räumliche Vernetzung der Molekülketten untereinander mit Hauptvalenzbindungen. Diese Vernetzung lässt sich ohne Zerstörung der Molekülketten nicht wieder rückgängig machen. [36]
- Elastomere: Ähnlich wie bei den Duroplasten bildet sich eine dauerhafte Vernetzung, jedoch sind die chemischen Vernetzungspunkte wesentlich weitmaschiger, was den großen elastischen Verformungsbereich begründet. [36]

Durch diese grundlegenden Unterschiede sind auch die Herstellungsprozesse, die schließlich zum konsolidierten Faserkunststoffverbund führen, stark verschieden. Die

üblicherweise als Feststoff dem Herstellungsprozess zugeführten Thermoplaste werden zunächst aufgeschmolzen. Die Imprägnierung der Fasern mit der Schmelze und die Formgebung können in einem Schritt oder sukzessive erfolgen. [1]

Im Falle der Duroplaste findet die eigentliche Bildung des engvernetzten Polymers erst bei der Bauteilherstellung statt, nachdem die Faserimprägnierung durchgeführt wurde. Die Vernetzungsreaktion beruht auf funktionellen reaktionsfähigen Gruppen, die entweder bereits in dem niedermolekularen Ausgangsprodukt vorhanden sind und thermisch aktiviert werden oder als sogenannte Härter hinzugefügt werden. Durch die richtige Wahl des Härters lassen sich auch Vernetzungsreaktionen bei Raumtemperatur einleiten, sogenannte Kalthärtungen. [36]

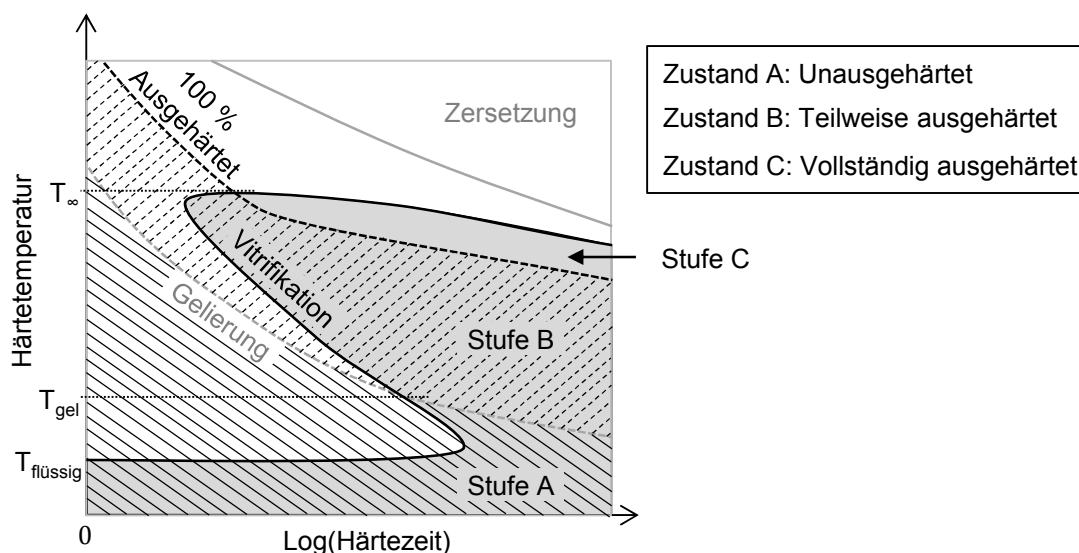


Abbildung 8: Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagramm der Aushärtung duromerer Harze [37]

Das schematische Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagramm zeigt, wie die Vernetzung eines reaktionsfähigen Harzes abläuft. Starke Änderungen im visko-elastischen Verhalten setzen bei der Gelierung und der Vitrifikation ein. Die Gelierung geht mit einer starken Behinderung makroskopischer Flüsse einher. Die Vitrifikation bedeutet eine starke Reduktion der chemischen Umwandlungsprozesse. Die wichtigsten Temperaturpunkte sind $T_{\text{flüssig}}$, oberhalb welcher das unvernetzte Harz flüssig ist, T_{gel} , bei der Gelierung und Vitrifikation zum gleichen Zeitpunkt einsetzen, und T_{∞} , bei der

das Ausgangsharz bei Einsetzen der Vitrifikation den maximal möglichen Aushärtegrad erreicht. [37] Daraus ergeben sich verschiedene Umsetzungsstufen eines Harzes. Stufe A beschreibt ein nicht reagiertes Harz, Stufe B ein nur teilweise ausgehärtetes Harz, welches in seiner weiteren Aushärtung durch Gelierung und Vitrifikation behindert wird, und Stufe C ein vollständig vernetztes Harz. [38] Die Aushärtung bis zur Stufe B kann in einem breiten Temperaturfenster ablaufen, jedoch sind die Eigenschaften des Endproduktes stark von der Prozesstemperatur und Dauer abhängig. [39] Bei einem kalthärtenden Harzsystem liegt die Raumtemperatur zwischen T_{∞} und T_{gel} , bei der sich nach ausreichender Zeit ein vernetztes Harz ergibt.

Eine wichtige Kenngröße eines jeden duromeren Kunststoffes stellt die Glasübergangstemperatur T_G dar, die vom Harzsystem und vom Aushärtegrad abhängig ist. Beim Überschreiten dieser Temperatur steht den amorph angeordneten Molekülketten durch die temperaturbedingte Erhöhung des freien Volumens ein weiterer Bewegungsfreiheitsgrad zur Verfügung. [40,41] Die Steifigkeit des Materials ist dadurch oberhalb T_G geringer. Wie stark diese Reduktion ausfällt, ist auch vom Vernetzungsgrad abhängig. Aus diesen Gründen wird angestrebt, dass der T_G eingesetzter Duroplaste meist oberhalb der Einsatztemperatur liegt und so die höhere Steifigkeit genutzt werden kann. [39] Duroplaste weisen im Allgemeinen unterhalb T_G ein eher sprödes Verhalten auf mit Dehnungen im unteren einstelligen Prozentbereich und Steifigkeiten um etwa 3000 MPa. [42] Die Glasübergangstemperatur kann auf verschiedene Arten messtechnisch erfasst werden, da sich eine Vielzahl von Materialeigenschaften ändern. So ändern sich z.B. die Wärmekapazität, der Wärmeausdehnungskoeffizient und die bereits erwähnte Steifigkeit. Entsprechend können Analysemethoden wie DSC, TMA oder DMTA eingesetzt werden. [41]

Die verwendbaren Herstellverfahren sind vielfältig. Mit Herstellungsprozessen wie dem Handlaminieren inklusive händischem Imprägnieren der Halbzeuge oder hochautomatisierten Pressverfahren mit Zykluszeiten im Bereich weniger Minuten können Duroplaste für die Großserie als auch für die Prototypenfertigung eingesetzt werden. [1]

2.2.3. Auslegung

Zur analytischen Berechnung und Auslegung eines multiaxial belasteten Laminates kann die „Klassische Laminattheorie“ verwendet werden. Über den Umweg eines Elastizitätsgesetzes für den gesamten flächigen Mehrschichtverbund lassen sich unter Annahme eines ebenen Spannungszustandes die Spannungen und Dehnungen des Verbundes und der Einzelschichten berechnen. [34] Zur Auslegung komplexerer Systeme und für Betrachtungen, die über das linear-elastische Verhalten hinausgehen, hat sich die Finite-Element-Methode (FEM) etabliert. Im ersten Schritt, dem Pre-Processing, wird das reale Bauteil zunächst idealisiert, zerlegt (diskretisiert) und mit Randbedingungen versehen. Der eigentliche Rechenschritt geschieht im sogenannten Solver, der die Steifigkeitsmatrix ermittelt, das Gleichungssystem aufstellt und die Reaktionsgrößen berechnet. Beim Post-Processing werden die sich ergebenden Spannungen, Dehnungen und Auflagerreaktionen vom Anwender ausgewertet. [43] Der größte Zeitaufwand für den Anwender steckt im Modellaufbau während des Pre-Processing. Eine vorgelagerte methodengerechte Aufbereitung des Problems und eine kritische Plausibilitätsprüfung danach erhöhen die Aussagequalität und Sicherheit. [44]

Für die Diskretisierung des Modells steht eine Vielzahl von Elementtypen zur Verfügung. Schalenelemente (engl. shell elements) sind besonders für dünnwandige Bauteile mit mehrachsiger Belastung geeignet. Sie stellen eine Überlagerung von Platten und Scheibenelementen dar und können somit Kräfte in der Schalenebene und senkrecht dazu aufnehmen. [44] Außerdem wird bei Schalenelementen ein ebener Spannungszustand angenommen und damit Spannungen in Dickenrichtung vernachlässigt. [45] Während der Elementtyp die Anzahl und Art der Freiheitsgrade festlegt, stellt das bereitgestellte Materialmodell den Zusammenhang zwischen Spannungen und Dehnungen dar. Für den Bereich der linearen Elastizität stellt ein anisotropes Materialverhalten den komplexesten Fall dar. Dabei ist der über die Hauptdiagonale symmetrische 6x6 Tensor mit 21 unabhängigen Materialparametern besetzt.

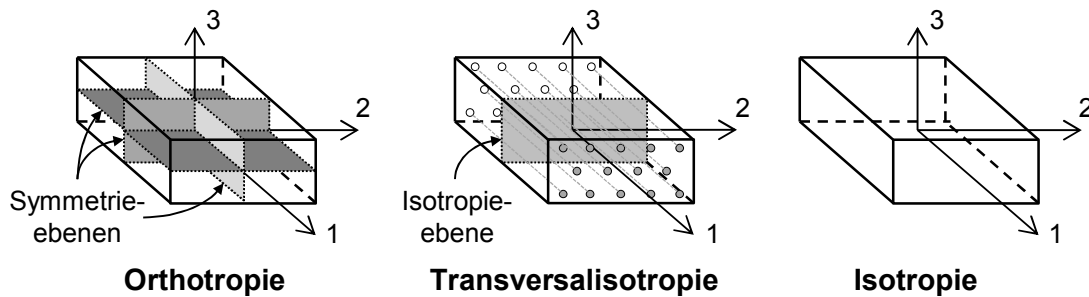


Abbildung 9: Orthotropie, Transversalisotropie und Isotropie mit Symmetrie- und Isotropie-Ebenen

Ein orthotropes Materialverhalten zeichnet sich, wie in Abbildung 9 dargestellt, durch drei senkrecht zueinander stehende Symmetrieebenen aus, die zu einer Entkopplung der Dehnungen und Scherungen führen. Die vorhandene Kopplung der Dehnungen kann durch die Querkontraktionszahlen hergestellt werden und führt so zu insgesamt neun unabhängigen Parametern. Die Annahme eines ebenen Spannungszustandes führt weiter zu einer Reduktion auf sechs Parameter. Ohne die Annahme eines ebenen Spannungszustandes stellt ein transversalisotropes Materialmodell eine weitere zulässige Vereinfachung für unidirektional faserverstärkte Materialien dar. Da diese über eine Isotropieebene normal zur Faserrichtung verfügen, verbleiben fünf unabhängige Parameter. Die Kombination von Transversalisotropie und ebenem Spannungszustand benötigt nur noch vier Materialkennwerte für die vollständige Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Dehnungen und Spannungen. [34,45]

Benötigte Materialkennwerte eines transversalisotropen Materials in einem ebenen Spannungszustand sind:

- E_1 : Steifigkeit in Faserrichtung
- E_2 : Steifigkeit quer zur Faserrichtung
- ν_{12} oder ν_{21} : Querkontraktionszahl
- G_{12} : Schubmodul

2.3. SMA-FKV-Hybridverbunde

Wie in Kapitel 2.1.3 verdeutlicht, bieten SMA hervorragende Möglichkeiten für Aktorikanwendungen. Entsprechend liegt ihre Kombination mit Verbundwerkstoffen sehr nah. Dies wurde 1997 von Van Humbeck [46] thematisiert, welcher mit dem Fazit schloss, dass die Forschung im Wesentlichen erst mit Rogers et al. [47] 1988 begann und zum damaligen Zeitpunkt noch viele Aspekte weiterer Forschung bedurften, um SMA-FKV-Hybridverbunden den industriellen Einsatz zu ermöglichen. Diese Aspekte wurden von Wei et al. [48,49] konkretisiert und können wie folgt zusammengefasst werden:

- Lastübertragung: „Das Einbetten von NiTi Drähten direkt in einen Polymermatrix-Verbundwerkstoff erwies sich durch Herstellungsschwierigkeiten und Probleme mit der Grenzflächenverbindung als weitestgehend erfolglos.“ „Eine maximale Grenzflächenhaftung zwischen SMA-Draht und der Polymermatrix ist wünschenswert, da die meisten Anwendungen größtmöglichen Lasttransfer erfordern.“ (aus dem Englischen [49] Seite 3768)
- Prozesstemperaturen: „Hohe Prozesstemperaturen können im Bezug auf das Einbetten von SMA-Elementen problematisch sein“, die geringeren Prozesstemperaturen der Duromere gegenüber den Thermoplasten „beeinflussen nur leicht die Umwandlungseigenschaften der SMA-Fasern“. „Es muss sehr vorsichtig vorgegangen werden, um die Rückverformung von vorgedehnten SMA-Drähten während des Härtezyklus zu vermeiden.“ (aus dem Englischen [49] Seite 3768)

Die beschriebenen Herausforderungen können durch Ansätze ohne direkte Integration in die Polymermatrix umgangen werden. So sind Konzepte mit diskreten Anbindungspunkten zwischen SMA-Elementen und Verbundwerkstoffbauteilen entwickelt [50–52], SMA-Drähte durch eingebettete Röhrchen im Verbund geführt [53,54] oder SMA-Elemente mit Elastomerschläuchen als Ausgleichselemente ummantelt worden [55].

Arbeiten, die eine direkte Integration von SMA-Elementen in FKV untersuchen, sind mit den oben genannten Herausforderungen konfrontiert, eine systematische und ganzheitliche Lösungssuche wird jedoch nicht betrieben. Tabelle 4 gibt einen Überblick über Arbeiten in diesem Bereich, bei denen aber meist auf eine kritische Diskussion der limitierenden Faktoren verzichtet wird. Entsprechend liefern die Arbeiten einen guten Überblick über verschiedene Herangehensweisen, erlauben es aber nicht, die von Wei et al. [49] formulierten Herausforderungen weiter zu konkretisieren oder gar Lösungsansätze abzuleiten.

Von den in Tabelle 4 aufgeführten Arbeiten greifen die meisten, wie bereits von Wei et al. [49] beschrieben, auf duomere Systeme zurück. Die Epoxidharze machen dabei einen wesentlichen Anteil aus. Den Konflikt zwischen erhöhter Härtetemperatur und Umwandlungsinitiierung versuchte man durch eine feste Einspannung der SMA-Elemente zu lösen und die Umwandlung zu unterdrücken. Derartige Vorrichtungen lassen sich auch im Autoklavverfahren einsetzen. Alternativ versuchte man, mit raumtemperaturhärtenden Harzen unfixierte SMA-Elemente in Faserkunststoffverbunde einzubringen. Als Verstärkungsfaser wurden hauptsächlich nichtleitende Glas- oder Aramidfaser eingesetzt, da elektr. leitende Kohlenstofffasern eine Isolation zu den mit Strom beaufschlagten SMA-Elementen erfordern [56].

Grundsätzlich lassen sich die Verformungsmoden der SMA-FKV-Hybridverbunde, „Zug/ Druck“ und „Biegung“, unterscheiden. Ist der Hybridverbund symmetrisch (sym.) aufgebaut, so kommt es normalerweise nicht zu Auslenkungen aus der Ebene und der Verbund steht über den ganzen Querschnitt unter Druck oder Zug. Nur durch Auflagerbedingungen kann z.B. ein Beulen aus der Ebene heraus erzeugt werden [57]. Meist stehen im Fokus dieser Untersuchungen die Spannungsinduzierung, die Steifigkeitsvariation und/oder die damit zusammenhängende Eigenfrequenzveränderung. Nur in wenigen Fällen wurde dabei auch die Aktorik in Form einer Kontraktion analysiert [58,59]. Die Kontraktionswerte, die an den SMA-FKV-Hybridverbunden gemessen wurden, liegen im Bereich von 0,1 %. Vergleicht man diese mit den eingebrachten Vordehnungen der SMA-Elemente von 1,2 bzw. 3 %, ist zu erkennen, dass das Aktorikpotential nicht ausgeschöpft werden konnte.

Tabelle 4: Arbeiten im Bereich der SMA-FKV-Hybridverbunde [56–68]

Modus	Quelle	SMA-Aktorik	Aufbau	Verbundwerkstoffe	Herstellung	Härte-temperatur	SMA-Fixierung	Fokus	Dehnung	
Zug/ Druck	Balta (2000)	Ein-Weg	sym.	Epoxid/ Aramid	Autoklav	70°C	ja	Umwandlungs- spannung/ Eigenfrequenz		
	Balta (2002)									
	Turner (2001)	Ein-Weg	sym.	Epoxid/ Glas	Autoklav	-	ja	Umwandlungs- spannung		
	Parthenios (2001)	Ein-Weg	sym.	Epoxid/ Aramid	Autoklav	70°C	ja	Umwandlungs- spannung/ Faserspannung		
	Psarras (2002)									
	Balta (2005)	Ein-Weg	sym.	Epoxid/ Aramid	Autoklav	70°C	ja	freie Kontraktion		0.12%
	Davis (2007)	Ein-Weg	sym.	Epoxid/ Glas	Autoklav	-	ja	Umwandlungs- spannung		
	Kirkby (2009)	Zwei-Weg	sym.	Epoxid	frei/ Tempern	RT	frei	freie Kontraktion		0.06%
	Spitzenauslenkung/Länge →								Aus- lenkung	
Biegung	Daghia (2007)	Ein-Weg	unsym.	Epoxid/ FKV	Kleben	RT	nein	Verformung	10.1%	
	Daghia (2008)	Ein-Weg	unsym.	Epoxid/ Glas	Vakuum/ Presse	128°C	ja	Verformung	3.2%	
	Tobushi (2009)	Zwei-Weg	sym.	SMA/ SMP	Gießen	-	nein	Verformung	43%	
	Zhou (2009)	Ein-Weg	unsym.	Epoxid/ Glas/Kohle	Autoklav	60°C	ja	Verformung	16.8%	
	Faiella (2011)	Ein-Weg	unsym.	Polyester/ Glas	RTM	50°C	nein	Verformung	11%	

Im Verformungsmodus „Biegung“ ist eine Seite der Struktur Zugspannungen und die andere Seite Druckspannungen ausgesetzt, entsprechend bildet sich eine Krümmung aus. Meist wird dies dadurch erreicht, dass die aktiven SMA-Elemente nicht in die Mitte der Struktur eingebracht werden und sich durch einen unsymmetrischen (unsym.) Aufbau ein Biegebalken ergibt. Die Arbeit von Tobushi et al. [67] stellt hierbei eine Ausnahme dar, da sie sich eines symmetrischen Aufbaus und einer eintrainierten Biegeverformung des SMA-Elementes bedient. Die hohe Spitzenauslenkung von 43 % bezogen auf die Strukturlänge lässt sich dabei eher auf die sehr weiche Polymermatrix, die ebenfalls ein Formgedächtnis aufweist, zurückführen, als auf die Leistungsfähigkeit der SMA-Aktorik. Die anderen Arbeiten setzten unterschiedlichste Verarbeitungsverfahren ein, sehen nur teilweise eine Fixierung der SMA-Elemente

vor und verwenden Aushärtetemperaturen von Raumtemperatur bis zu 128 °C. Bei allen Arbeiten liegt die Auslenkung unterhalb von 17 % der Strukturlänge und teilweise wird die limitierte Auslenkung auf Probleme mit der SMA-FKV-Grenzschicht [68] und auf Versagen dieser ausgehend vom Rand [56] zurückgeführt. Zu erwähnen bleibt, dass alle Arbeiten mit unsymmetrischem Aufbau einzelne SMA-Elemente mit frei aus der FKV-Struktur herausragendem Enden verwenden, wie es in Abbildung 10 gezeigt ist.

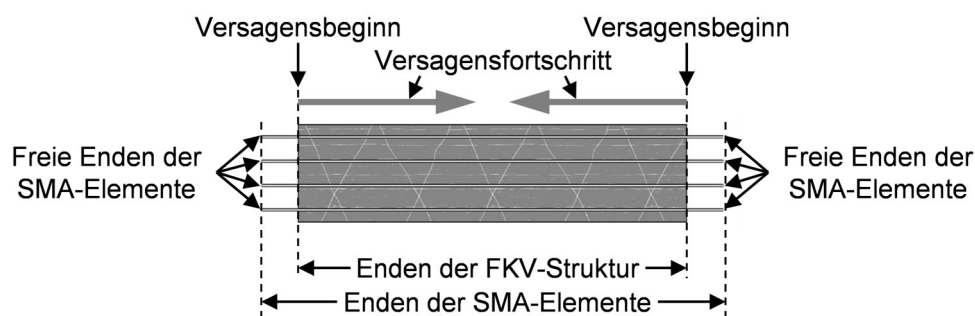


Abbildung 10: SMA-FKV-Struktur mit freien Enden der SMA-Elemente

Um der die Aktorikfunktion limitierenden Grenzschichtproblematik zu begegnen, wurden von Rossi et al. [69], Paine et al. [70] und Jonnalagadda et al. [71] die Auswirkungen verschiedener Oberflächenbehandlungen wie Schleifen, Ätzen, Sandstrahlen und Beschichten auf die Scherfestigkeit des Matrix-SMA-Interfaces untersucht. Die dabei gemessenen Scherfestigkeiten liegen im Bereich zwischen 8 und 18 MPa. Paine et al. [70] thematisieren die Problematik der Randspannungsspitzen beim Auszugstest.

Ähnlich verhält sich die Situation bei der Aktivierung der integrierten Aktorik. Wie die Arbeiten von Jarali et al. [72] und Wang et al. [73] zeigen, bilden sich bei der Kontraktion von eingebetteten SMA-Elementen lokal Spannungsspitzen an deren Enden. Die genaue Größe der Maximalspannung hängt von einer Vielzahl von Parametern wie Durchmesser, lokaler Materialsteifigkeit und externer Last ab. [72] Kleinere Durchmesser der SMA-Filamente, die wesentlich zu geringen Spannungen beitragen, sind jedoch fertigungs- und handhabungstechnisch eine Herausforderung. Wang et al. [73] zeigt außerdem das Wandern der Spannungsspitzen bei beginn-

dem Versagen am Ende der Hybridverbunde, welches mit den Beobachtungen einer wachsenden Delamination in [56] und [59] übereinstimmt.

Trotz dieser Bemühungen kann bis heute von keiner erfolgreichen Umsetzung eines SMA-FKV-Hybridverbundes berichtet werden. Kommerzielle Anwendungen sind bislang nicht bekannt. In Übersichten zu Arbeiten im Bereich der multifunktionalen Verbunde von 2010 [74], 2012 [75] und 2015 [76] finden sich im Bereich der SMA-FKV-Hybridverbunde ebenfalls keine wesentlichen Fortschritte oder Anwendungen.

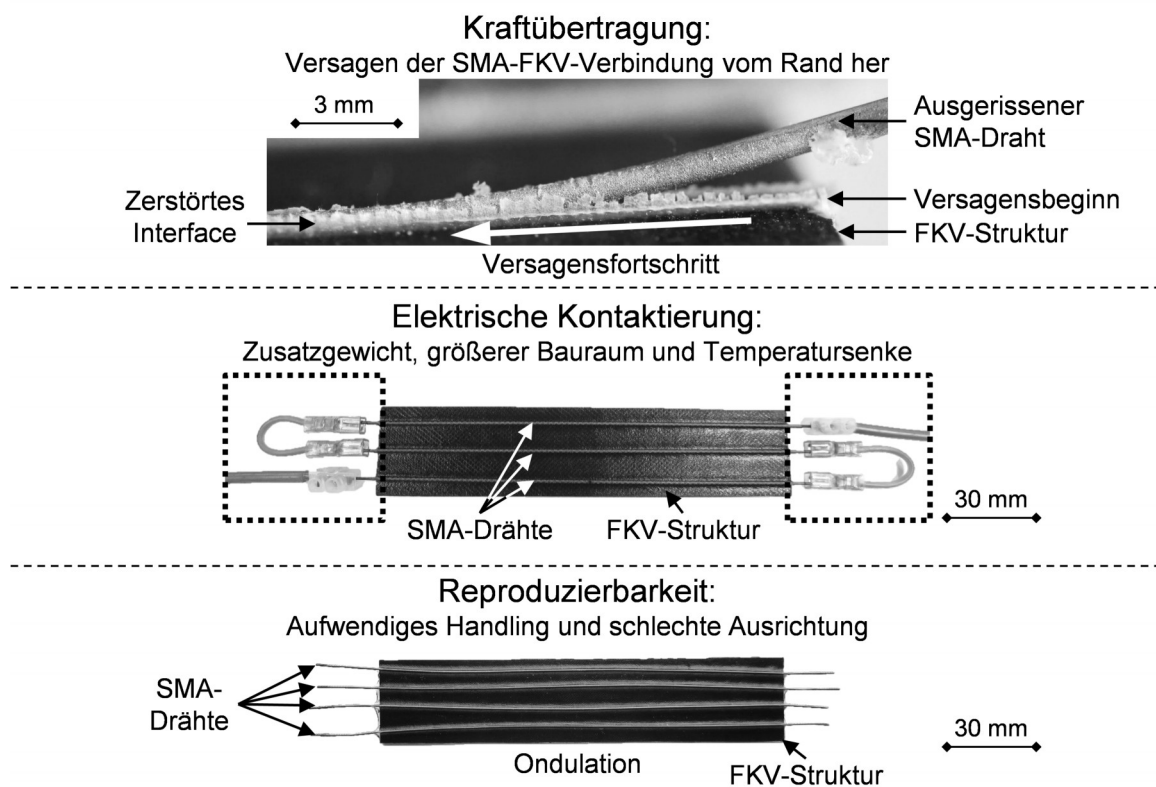


Abbildung 11: Herausforderungen bei der direkten Integration von SMA-Elementen in FKV

Neben dem bereits beschriebenen Problem der Kraftübertragung stellen zwei weitere Aspekte herstellungstechnische Hürden für den industriellen Einsatz dar. Idealisiert sind diese in Abbildung 11 dargestellt.

Werden SMA-Elemente in erhöhter Anzahl und reduziertem Durchmesser integriert und sollen diese später per Jouleschen Erwärmung aktiviert werden, muss ein elektrisches Netzwerk generiert werden. Dies gestaltet sich mit steigender Anzahl von Elementen zunehmend schwieriger und verlangt nach einer Vielzahl von Verbindungselementen, die zusätzliches Gewicht mit sich bringen, den erforderlichen Bauraum erhöhen und als Temperatursenke die Temperaturverteilung negativ beeinflussen. Genauso steigt mit der Anzahl ohne automatisierbare Prozesse auch der Aufwand, die einzelnen dünnen Elemente zu positionieren und auszurichten.

3. Ziel und Vorgehensweise

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Methodik aufzuzeigen, wie mit **aktiven Hybridverbunden aus SMA und FKV** Bauteile mit neuen Funktionen effizient entwickelt und realisiert werden können. Hierzu werden Schlüsselfragen im Bereich der Auslegung und der Herstellung beantwortet und die gefundenen Lösungsansätze experimentell validiert. Durch die Entwicklung eines ganzheitlichen und anwendungsorientierten Vorgehens sollen wichtige Voraussetzungen für die industrielle Einsetzbarkeit der aktiven Hybridverbunde geschaffen werden.

Die heute bekannten Arbeiten im Bereich der SMA-Aktorikmodellierung konzentrieren sich nahezu ausschließlich auf die inhärent komplexen Vorgänge im Material selbst. Sie erlauben es jedoch nicht, den Gegenstand der Betrachtung auf ein aktives Hybridbauteil aus SMA und FKV zu erweitern, bei dem eine direkte Integration den Komplexitätsgrad weiter erhöht. Erste Ansätze zur direkten Integration waren bisher wenig erfolgreich, obwohl gerade die direkte Integration den Nutzen maximieren kann. Um diese Lücke zu schließen, wird in dieser Arbeit systematisch die **Herstellung** neu konzipiert sowie ein **Simulationswerkzeug** für die Auslegung entwickelt. Mit der experimentellen **Validierung** dieser Methoden und der Diskussion verschiedener **Anwendungskonzepte** wird dargestellt, wie dieses Vorgehen die potentiellen Vorteile der aktiven SMA-FKV-Hybridverbunde für innovative Produkte nutzbar machen kann. Schließlich wird mit der Entwicklung eines aktiven aerodynamischen Profils demonstriert, wie auf Basis der SMA-FKV-Hybridverbunde eine Lösung für einen konkreten Anwendungsfall realisiert werden kann.

Zunächst sind folgende Fragen zu beantworten:

- **Herstellung:** Wie können zuverlässige aktive SMA-FKV-Hybridverbunde reproduzierbar hergestellt werden?
- **Simulation:** Wie können aktive Komponenten aus SMA-FKV-Hybridverbund auf Bauteilebene effizient ausgelegt werden?

Abbildung 12 zeigt, wie sich diese Bereiche weiter unterteilen lassen und wie die einzelnen Arbeitspakete ineinander greifen, um die genannten Methoden systematisch entwickeln zu können.

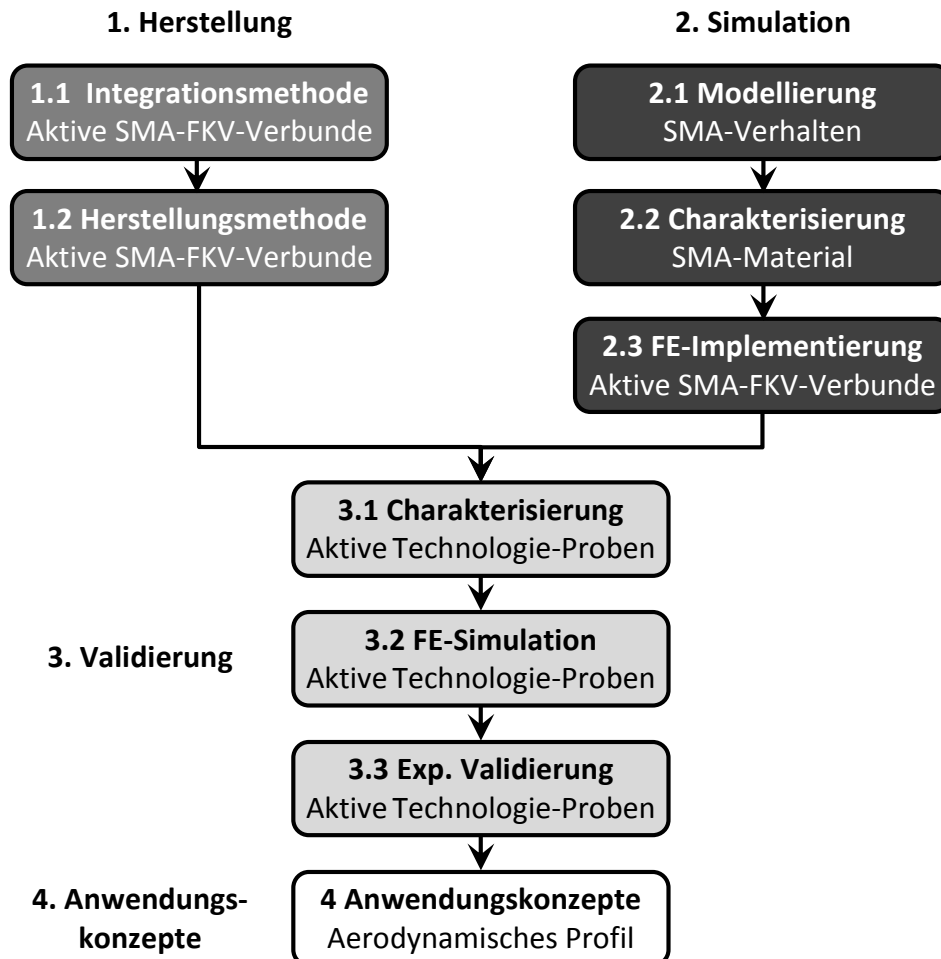


Abbildung 12: Struktur der Arbeit

Im Bereich der Herstellung muss zunächst zwischen der Integrationsmethode und der Herstellungsmethode unterschieden werden. Während es bei der Integrationsmethode darum geht, die SMA-Elemente in Hinblick auf ihre spätere aktive Funktion so effizient wie möglich mit der FKV-Struktur zu kombinieren, konzentriert sich die Entwicklung der Herstellungsmethode darauf, einen geeigneten prozesstechnischen Ablauf zu finden. Bezüglich der **Integrationsmethode** wird eine Lösung entwickelt, die es erlaubt, die Aufgaben Lasteinleitung, elektronische Kontaktierung und Handling auf innovative Weise zu vereinen und im Vergleich zu anderen wissenschaftli-

chen Ansätzen signifikante Verbesserungen in den Bereichen Zuverlässigkeit, Packaging und Reproduzierbarkeit zu erzielen. Zur Konzipierung einer optimalen **Herstellungsmethode** sind komplexe Randbedingungen und auf den ersten Blick widersprüchliche Anforderungen zu berücksichtigen. Diese Anforderungen entspringen einerseits den etablierten Herstellungsprozessen von FKV-Materialien, andererseits stellen die speziellen Erfordernisse des thermisch sensiblen SMA-Materialverhaltens eine Herausforderung für die Prozessführung dar. Denkbare Prozesse mit speziellen Herstellungsschritten und angepasster thermischer Prozessführung werden entwickelt und nach ihrem Eignungsgrad bewertet.

Um die angestrebte Auslegung aktiver SMA-FKV-Hybridverbunde auf Bauteilebene durchzuführen, wird eine **Modellierung** benötigt, die das Aktorikverhalten effizient abbildet. Ausgehend von den grundlegenden physikalischen Wirkprinzipien wird eine Modellierung für die Aktorik entworfen, welche sich allein auf die Aktorikfunktion konzentriert. Es schließt sich eine umfangreiche experimentelle **Charakterisierung** der Aktorik verschiedener SMA-Materialien an. Durch die Charakterisierung dreier unterschiedlicher Materialien ist es möglich, für die individuelle Anwendung eine optimale Aktorikauswahl zu treffen. Die Charakterisierungsversuche werden unter dem anwendungsnahen „Steifigkeitslastfall“ durchgeführt, bei dem die jeweilige SMA-Aktorik gegen verschiedene Federsteifigkeiten arbeiten muss. Eine analytische Beschreibung komprimiert die Ergebnisse und macht sie für die Auslegung mittels der FEM nutzbar. Nur durch eine analytische Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Vordehnung der Ein-Weg-Effekt-Materialien und Modellparametern sind die diskreten Vordehnungen vom Charakterisierungsversuch auf einen frei wählbaren Designparameter übertragbar. Bei der abschließenden **Implementierung** wird das entwickelte Modell numerisch in die Simulationssoftware integriert. Außerdem werden sinnvolle Vereinfachungen und Annahmen getroffen, die eine effiziente und zielorientierte Auslegung auf Bauteilebene gewährleisten. Dabei werden die Geometrieinformationen aus der entwickelten Integrationsmethode berücksichtigt.

Zur Validierung und Konsolidierung der einzelnen Entwicklungsstränge wird das neuartige Gesamtverfahren auf Technologie-Proben übertragen. Es wird demonstriert, wie mit diesen Erkenntnissen und Werkzeugen die gezielte Realisierung eines

aktiven Elements aus FKV und SMA möglich ist. Unter Anwendung der entwickelten Integrations- und Herstellungsmethode mit den zugehörigen Prozessparametern werden Technologie-Proben hergestellt. Mit den genauen Abmessungen und den tatsächlichen mechanischen Kennwerten aus der **Charakterisierung** dieser Technologie-Proben kann eine belastbare **FE-Simulation** unter Einsatz des neuen Modellierungsansatzes aufgebaut werden. Die damit gemachten Vorhersagen der zu erwartenden Verformung verschiedener Technologie-Proben aus FKV und aktiven SMA-Elementen werden im Rahmen der **experimentellen Validierung** mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen der Aktorik abgeglichen, wodurch die Zuverlässigkeit des Vorgehens bewertet und gewährleistet werden kann.

Im Kapitel **Anwendungskonzepte** werden die Vorteile, die sich durch aktive SMA-FKV-Hybridverbunde erreichen lassen, zusammengefasst und erläutert, wie mit den geänderten Randbedingungen neuartige Funktion umgesetzt werden können. Die Tauglichkeit des Gesamtvorgehens wird anhand der Entwicklung eines aerodynamischen Profils verifiziert, welches konzeptionell entworfen, mit der FEM ausgelegt und schließlich hergestellt wird. Der so entstandene Demonstrator macht anwendungsnah das Potential der „aktiven SMA-FKV-Hybridverbunde“ und der hier entwickelten Vorgehensweise deutlich.

4. Materialien und Experimentelles

4.1. Materialien

4.1.1. Formgedächtnislegierungen

Als Formgedächtnislegierung kommen drei Materialien in Drahtform zum Einsatz. Die beiden Legierungen Alloy M und Alloy H (neue Herstellerbezeichnungen Alloy B und Alloy BH) vom Hersteller Memry Corporation zeigen hierbei den sogenannten Ein-Weg-Effekt und müssen mechanisch vorgedehnt werden, da sie keine intrinsische Aktorik zeigen. Das Material SmartFlex[®] von SAES Getters S.p.A. hingegen ist trainiert und zeigt einen Zwei-Weg-Effekt, welcher nach Herstellerdatenblatt bis zu 5,5 % Dehnung betragen kann. Die Umwandlungstemperaturen für 150 MPa statische Last betragen laut Datenblatt: A_S 78°C, A_F 87°C, M_S 67°C, M_F 60°C. Die Spannungsabhängigkeit der Umwandlungstemperaturen wird mit 8,2 MPa/°C angegeben.

Die Materialien können prinzipiell in verschiedenen Durchmessern beschafft werden. Alloy M und Alloy H stehen für diese Arbeit nur in Durchmessern von 0,5, 0,7 und 1 mm zur Verfügung. In unvorgedehnter Form können Alloy H und Alloy M als aktiv-passive Elemente eingesetzt werden. Die beiden Materialien Alloy H und Alloy M unterscheiden sich maßgeblich in ihrer nominellen Umwandlungstemperatur. Die nominelle Austenitstarttemperatur, welche vom Hersteller angegeben wird, liegt für Alloy M bei 55 °C und für Alloy H um 40 °C höher bei 95 °C. Die Oberfläche weist bei allen Ein-Weg-Effekt-Materialien eine Oxidschicht auf.

Auch das Material SmartFlex[®] besitzt eine Oxidoberfläche, kommt jedoch nur in einem Durchmesser von 0,5 mm zum Einsatz. Die Austenitstarttemperatur liegt unter einer geringen Last von 50 MPa nach Herstellerangaben bei ca. 80 °C und ist damit zwischen Alloy H und Alloy M anzusiedeln.

4.1.2. Harzsysteme

Zur Einbettung der aktiven SMA-Elemente wird ein kalthärtendes Harzsystem von Huntsman International LLC eingesetzt. Die epoxid-basierte Harz-Härter-

Kombination Araldite® LY 5052/Aradur® 5052 zeichnet sich durch eine geringe Viskosität von 1000 bis 1500 mPas und eine lange Verarbeitungszeit von 110 bis 160 min bei 25 °C aus. Von besonderer Wichtigkeit ist die bei Raumtemperatur ablaufende Vernetzungsreaktion und die Möglichkeit, den sich einstellenden T_G durch eine Temperung maßgeblich zu erhöhen.

Zur Grundlaminatherstellung wird die Flachsfasermatte FIBRIMAT F300 von Eco-Technilin SAS. mit einem epoxidbasiertem Harzsystem imprägniert. Bei dem Harzsystem von Momentive Performance Materials Inc. EPOKOTE™ Resin MGS® RIMR135/EPIKURE™ Curing Agent MGS® RIMH 134 handelt es sich um ein Infusionsharz, welches bei 70 °C über eine Dauer von 8 Stunden ausgehärtet wird. Die hohe Bruchdehnung von 8-12 % macht es für den Einsatz im Grundlaminat interessant.

4.1.3. Faserverbundwerkstoffe

Als ausgehärtetes Halbzeug wird eine naturfaserverstärkte Platte mit einer Epoxidharzmatrix verwendet. Die Platte mit der Bezeichnung FlexiForm in einer nominellen Stärke von 1,5 mm wird von der Boshoku Automotive Europe GmbH hergestellt und üblicher Weise für Formpressteile im Automobilbau eingesetzt.

4.1.4. Elastomere

Zur Generierung der Elastomerschichten im Grundlaminat werden teilausgehärtete Elastomermatten des Typs KRAIBON® AA6CFZ von der Gummiwerk KRAIBURG GmbH & Co. KG in einer Stärke von 0,5 mm verarbeitet. Die Vervollständigung der Vernetzung erfolgt im Autoklav bei 110 °C und 1,4 bar für 5,5 Stunden.

4.2. Experimentelles

Im Folgenden werden die drei zentralen Versuchsaufbauten und mit ihrer jeweiligen Versuchsdurchführung erläutert:

- Aktorikcharakterisierung
- Aktuierung von SMA-FKV-Hybridverbunden bis zum Versagenspunkt
- Aktuierung von SMA-FKV-Hybridverbunden für die Validierung

Außerdem werden die verwendeten Geräte und Produktionseinrichtungen vorgestellt.

4.2.1. Aktorikcharakterisierung

Ziel der hier beschriebenen Versuchsreihe ist es, möglichst umfassende Informationen über das Aktorikverhalten der SMA-Materialien zu gewinnen. Die Anwendungsnähe zu den angestrebten aktiven SMA-FKV-Verbunden wird dadurch sichergestellt, dass die Ein- und Zwei-Weg-Effekt-Materialien gegen eine Steifigkeit arbeiten müssen, wie es auch im Verbund der Fall ist, wenn die FKV-Struktur verformt werden soll. Die Auslegung der Struktur beeinflusst die Steifigkeit direkt und dadurch wiederum die Aktorik, weshalb das Aktorikverhalten bei unterschiedlichen Steifigkeiten von großem Interesse ist.

Abbildung 13 zeigt den Versuchsaufbau, bei dem die Steifigkeit durch Druckfedern realisiert wird. Um ein breites Steifigkeitsspektrum abzubilden, werden verschiedene Federn mit Federraten im Bereich von 9,57 N/mm bis 336,27 N/mm zur Charakterisierung für jedes der drei Materialien verwendet. Die Druckfedern werden über ein Gehäuse und entsprechende Vorrichtungen in Reihe mit dem SMA-Draht geschaltet und mit isolierenden Elementen in der Universal Prüfmaschine 1474 (Fa. Zwick GmbH & Co. KG) montiert.

Neben der Steifigkeit bestimmen das SMA-Material selbst und die eingebrachte Vordehnung bei Verwendung eines Ein-Weg-Effekt-Materials maßgeblich den Aktorikeffekt, da sie die Größe der Umwandlungsdehnung festlegen.

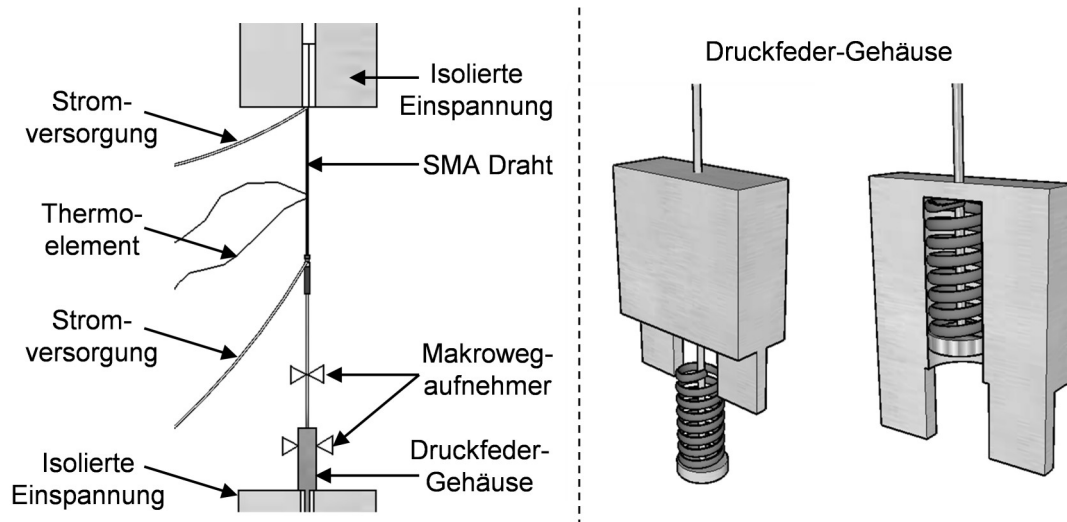


Abbildung 13: Versuchsaufbau zur Aktorikcharakterisierung

Um umfassende Daten über das Aktorikverhalten zu gewinnen, wird die Aktorik vollständig abgerufen und die Steifigkeit sowie die Vordehnung beim Ein-Weg-Effekt-Material variiert. Alle Probekörper werden vor dem Versuch zugeschnitten und durch ein Erwärmen auf 100 °C mit kochendem Wasser von möglichen Verformungen durch die Lagerung befreit. Dadurch wird die Neubildung der Martensitstruktur beim Abkühlen auf Raumtemperatur initiiert. Abhängig von der eingesetzten Temperaturmessmethode wird ein Thermoelement Typ K (\varnothing 75 μ m) mit Wärmeleitklebstoff Arctic Silver (Fa. innovatek OS GmbH) appliziert oder der Draht für IR-Thermographie mit einem matt-schwarzen Ofenrohrlack (Fa. J. W. Ostendorf GmbH & Co. KG) dünn eingefärbt. Die Ein-Weg-Effekt-Materialien werden vor dem eigentlichen Aktorikversuch mit der Universal Prüfmaschine 1474 (Fa. Zwick GmbH & Co. KG) mit einer Dehnrage von 250 %/min vorgedehnt. Die Dehnrage ist von essentieller Wichtigkeit, um sicherzustellen, dass die Dehnung auch tatsächlich homogen über die freie Drahtlänge verteilt eingebracht wird. Wird die Dehnrage zu gering gewählt, kann es aufgrund zeitabhängiger thermischer Effekte zu lokalen Dehnungskonzentrationen kommen. [77]

Zu Beginn des Aktorikversuchs wird über die Traverse eine geringe Vorkraft (5 N) zur Ausrichtung aufgebracht, danach verbleibt die Traverse für den Rest des Versuchs in fixierter Position. Gemessen wird die Gesamtdehnung des Drahtes über die Makrowegaufnehmer markroXtens (Fa. Zwick GmbH & Co. KG) der Zugprüfmaschine, welche am Druckfedergehäuse und an der Stange mit der unteren Drahtaufnahme ansetzen. Die Kraftmessdose erfasst die erzeugte Kraft. Kraft- und Weg-Signal werden über einen analogen Ausgang der Zugprüfmaschine an das Messdatenerfassungssystem QuantumX MX840A (Fa. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH) übertragen und im PC in einer NI LabVIEW-Umgebung (Fa. National Instruments Germany GmbH) erfasst. Die Temperatur wird beim Zwei-Weg-Effekt-Material auf Grund des geringen Durchmessers von 0,5 mm über ein Thermoelement gemessen und beim Ein-Weg-Effekt-Material mit einem Durchmesser von 1 mm kann hingegen die Temperatur mit einer IR-Thermokamera thermoIMAGER TIM 160 (Fa. MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GmbH & Co. KG) erfasst werden.

Die Aktorik wird über Joulesche Erwärmung initiiert. Der hierfür benötigte Strom wird von dem Labornetzteil HMP4030 (Fa. HAMEG Instruments GmbH) bereitgestellt und über eine Relaisschaltung und die Steuereinheit CompactDAQ cDAQ-9188 (Fa. National Instruments Germany GmbH) geschaltet. Auch in der Abkühlphase wird ein geringer Strom angelegt, um weiterhin den Widerstand messen zu können. In beiden Fällen arbeitet das Netzteil stromgeregelt. Der tatsächlich fließende Strom wird über zwei entsprechend dimensionierte Shunts (Shunt des Aufheizstroms 10A/75mV, Shunt des Abkühlstroms 1A/75mV) in eine Spannung transferiert und genauso wie die am Draht anliegende Spannung vom Messdatenerfassungssystem aufgenommen und an den PC übertragen. Während eines Versuchs werden insgesamt drei Heizzyklen gemessen, wobei eine maximale und eine minimale Temperatur als Umschaltpunkte definiert sind.

Tabelle 5 fasst die gesamten Versuchsparameter für das Zwei-Weg-Effekt-Material SmartFlex[®] zusammen. Tabelle 6 und Tabelle 7 zeigen die Versuchsparameter für die Ein-Weg-Effekt-Materialien Alloy M und Alloy H inklusive der Vordehnungsparameter. Durch größere Probenlängen kann auch bei geringer Vordehnung der maximal zulässige Verformungsweg der Feder ausgenutzt werden. Die Probenlänge

muss angepasst werden, um den Einfluss der Nichtlinearität im Versuch möglichst gering zu halten, da die Kraft-Weg-Kennlinie realer Druckfedern einen nichtlinearen Einlaufbereich aufweisen. Die nominell gegen die Aktorik wirkende Steifigkeit E_{Feder} lässt sich nach Gleichung 4-1 aus Länge l , Durchmesser d des Drahtes und der nominellen Federrate R berechnen.

$$E_{Feder} = \frac{l \cdot R}{\left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \pi} \quad 4-1$$

Tabelle 5: Versuchsparemeter zur Aktorikcharakterisierung von SmartFlex®

Material		Druckfedern		Vordehnung	Probe	
Legierung	Durchmesser	Bezeichnung	Federate	keine	Länge	
Zwei-Weg	[mm]		[N/mm]		[mm]	
SF	0,5	VD-339V-04	336,27		60	
		D-339S	222,71			
		D-339B	181,92			
		D-288U	127,34			
		D-313A-02	81,19			
		VD-288O-10	46,98			
		D-234B-02	35,19	Temperatursteuerung	Schaltschwelle	
		D-207E	24,86		untere	obere
		VD-180D-03	9,57	Messmethode	[°C]	[°C]
				Thermoelement	23	190

Strom	
Aufheizen	Abkühlen
[A]	[A]
3	0,15

Tabelle 6: Versuchsparemeter zur Aktorikcharakterisierung von Alloy M

Material		Druckfedern		Vorgedehnte Proben		
Legierung	Durchmesser	Bezeichnung	Federate	Dehnung	Länge	Dehngeschwindigkeit
Ein-Weg	[mm]		[N/mm]	[%]	[mm]	[mm/min]
Alloy M	1	VD-339V-04	336,27	1,8	160	400
		D-339S	222,71	3	140	350
		D-339B	181,92	4,5	80	200
		D-288U	127,34	6,3	60	150
		VD-313AA	99,75			
		D-313A-02	81,19			
		VD-288O-10	46,98	Temperatursteuerung	Schaltschwelle	
		D-207E	24,86		untere	obere
		VD-180D-03	9,57	Messmethode	[°C]	[°C]
				Thermographie	25	120

Strom	
Aufheizen	Abkühlen
[A]	[A]
8	0,3

Tabelle 7: Versuchsp Parameter zur Aktorikcharakterisierung von Alloy H

Material		Druckfedern		Vorgedehnte Proben		
Legierung	Durchmesser	Bezeichnung	Federate	Dehnung	Länge	Dehngeschwindigkeit
Ein-Weg	[mm]		[N/mm]	[%]	[mm]	[mm/min]
Alloy H	1	VD-339V-04	336,27	1,8	160	400
		D-339S	222,71	3	140	350
		D-339B	181,92	4,5	80	200
		D-288U	127,34	6,3	60	150
		VD-313AA	99,75			
		D-313A-02	81,19			
		VD-288O-10	46,98			
		D-234B-02	35,19			
		D-207E	24,86			
		D-180D-02	17,22			
		VD-180D-03	9,57			

Strom		Temperatursteuerung		Schaltschwelle	
Aufheizen	Abkühlen			untere	obere
[A]	[A]			[°C]	[°C]
8	0,3			25	160

Eine Fehlerbetrachtung soll die Eignung der gewählten Messmittel und des Prüfaufbaus unterstreichen. Eine Näherung der Fehlerfortpflanzung per Reihenentwicklung bis zum linearen Glied wird dabei für die beiden Hauptergebnisgrößen, Spannung [MPa] und Dehnung [%], durchgeführt. Die Ergebnisgrößen lassen sich aus den Messwerten entsprechend Gleichung 4-2 und 4-3 berechnen.

$$\varepsilon(\Delta l, l) = \frac{\Delta l + l}{l} \cdot 100 \quad 4-2$$

$$\sigma(F, d) = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d^2} \quad 4-3$$

In die Berechnung der Dehnung fließen die Messgrößen Ausgangslänge und die gemessene Kontraktion ein. Die Ausgangslänge wurde auf den Drahtproben mit einem Handmaßstab markiert und die Startposition nach Augenmaß eingestellt, weshalb mit bis zu 1 mm absolutem Fehler gerechnet werden muss. Die Abweichung der Makrowegaufnehmer für die Kontraktionsmessung liegt im hier relevanten Bereich unterhalb von 6 mm bei maximal 10,2 µm. Für die Messung am SmartFlex®-Material mit einer Nennlänge von 60 mm und einer Kontraktion von 2,1 mm (3,5 %) ergibt

sich nach Gleichung 4-5 ein möglicher absoluter Fehler bei der Dehnungsmessung F_ε von 0,04 % durch Messfehler.

$$F_\varepsilon = \frac{\partial \varepsilon(\Delta l, l)}{\partial \Delta l} F_{\Delta l} + \frac{\partial \varepsilon(\Delta l, l)}{\partial l} F_l = \frac{100}{l} F_{\Delta l} - \frac{100 \cdot \Delta l}{l^2} F_l \quad 4-5$$

$$F_\sigma = \frac{\partial \sigma(F, d)}{\partial F} F_F + \frac{\partial \sigma(F, d)}{\partial d} F_d = \frac{4}{\pi \cdot d^2} F_F - \frac{8 \cdot F}{\pi \cdot d^3} F_d \quad 4-6$$

Der mögliche Fehler bei der Spannungsberechnung F_σ lässt sich nach Gleichung 4-6 ermitteln. Aufgrund der Kraftabhängigkeit der Genauigkeit der 5 kN-Kraftmessdose ist es sinnvoll, den Bereich hoher und geringer Spannungen getrennt zu betrachten. Hierzu wurden die Kraftniveaus von 10 N (ca. 50 MPa bei 0,5 mm Durchmesser) und 150 N (ca. 764 MPa) ausgewählt. Der relative Messfehler bei 10 N von 0,26 % und bei 150 N von 0,12 % führt in Kombination mit einer absoluten Durchmesserabweichung von 0,01 mm zu einem absoluten Fehler in der Spannungsmessung von 0,98 MPa bei ca. 50 MPa und 37,64 MPa bei ca. 760 MPa.

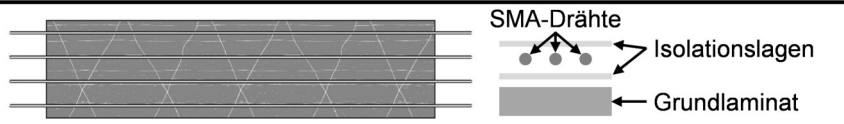
Der Messfehler bei der Temperaturmessung lässt sich quantitativ schwer abschätzen, da dieser stark von zeitabhängigen Prozessen beeinflusst wird. Bei der Messung mit Thermoelement kann von einer erhöhten Trägheit ausgegangen werden, allerdings sind die Auswirkungen durch Temperaturmessfehler begrenzt, da ohnehin eine vollständige Aufheizung angestrebt wird und der abgekühlte Zustand durch die Annäherung an die Raumtemperatur erreicht wird.

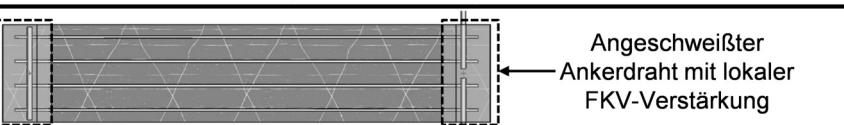
4.2.2. Aktuierung von SMA-FKV-Hybridverbunden bis zum Versagenspunkt

Mit der Aktuierung bis zum Versagenspunkt soll die Leistungsfähigkeit der Integrations- und Herstellungsmethode für SMA-FKV-Hybridverbunde untersucht und beurteilt werden, wobei die maximal erreichte Auslenkung als Vergleichsindikator herangezogen wird. Es werden Probenvarianten mit freiem Ende oder mit Verankerung sowie mit und ohne Temperung untersucht. Die Konzipierung und Herstellung der Proben ist in Tabelle 8 beschrieben.

Tabelle 8: Probenvarianten für die Aktuierung bis zum Versagenspunkt

Konfiguration:

FE (Freie Enden):			
	Aufbau	Material	Lieferant
Grundlaminat	Naturfaser EP-Laminat	Boshoku	FlexiForm Dicke 1,5 mm
Isolationslagen	Glasfasergewebe	R&G	25 g/m ²
SMA-Drähte	2-Wege-Effekt SMA	SAES Getters	SmartFlex® ø 0,5 mm
Harz	kalthärtendes Epoxydharz	Huntsman	Araldite LY 5052 / Aradur 5052

G (Gitter):			
	Aufbau	Material	Lieferant
Grundlaminat	Naturfaser EP-Laminat	Boshoku	FlexiForm Dicke 1,5 mm
Isolationslagen	Glasfasergewebe	R&G	25 g/m ²
Lokale Verstärkung	Glasfaserschnitzel	R&G	3 mm
	Glasfasergewebe	R&G	255 g/m ² (85% in 1-Richtung)
SMA-Gitter Aktor	2-Wege-Effekt SMA	SAES Getters	SmartFlex® ø 0,5 mm
SMA-Gitter Anker	1-Weg-Effekt SMA	Memry	Alloy M ø 0,7 mm
Harz	kalthärtendes Epoxydharz	Huntsman	Araldite LY 5052 / Aradur 5052

Herstellung:

KG (Kaltgehärtet):	
Handlaminieren	
Vakuumsack	
Drucktopf	24 h 6 bar RT
Temperung	-

GT (getempert):	
Handlaminieren	
Vakuumsack	
Drucktopf	24 h 6 bar RT
Temperung	Ofen 24 h 80 °C

Prinzipiell wird der aktive Probekörper während des Versuchs aufgeheizt und die Verformung gemessen. Die Verformung wird soweit erhöht, bis Versagen eintritt und die Verformung nicht weiter zunimmt. Die Verformung wird durch die thermische Aktivierung der integrierten SMA-Drähte erzeugt. Für eine zügige Verformung bis zum Versagen wird ein aktiver SMA-Draht mit 0,5 mm Durchmesser mit konstanten 5 A beaufschlagt und über die Joulesche Erwärmung erhitzt. Die Verformung und der elektrische Widerstand werden aufgezeichnet.

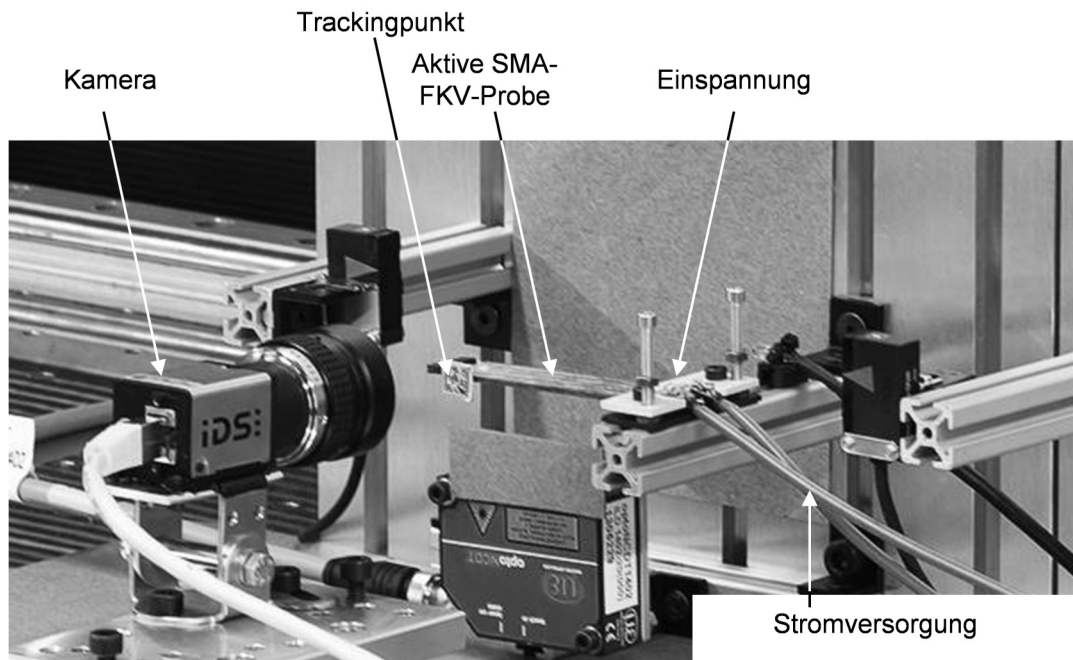


Abbildung 14: Versuchsaufbau zur Aktuierung von SMA-FKV-Verbunden

Der Versuch wird mittels der Videokamera UI-5240CP (Fa. IDS Imaging Development Systems GmbH) aufgezeichnet und eine anschließende Auswertung der Bewegungskurven applizierter Trackingmuster unter Verwendung der Software Motion Studio (Fa. Integrated Design Tools, Inc.) ermöglicht das Ableiten von Verformungswegen. Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen den Versuchsaufbau und die Positionierung des Trackingpunktes.

Zur Steuerung und Erfassung kommt wie auch für den Versuchsaufbau in Kapitel 4.2.1 eine NI LabVIEW-Umgebung (Fa. National Instruments Germany GmbH) zum Einsatz, die über die Steuereinheit CompactDAQ cDAQ-9188 (Fa. National Instruments Germany GmbH), eine entsprechende Relaisschaltung und das Labornetzteil HMP4030 (Fa. HAMEG Instruments GmbH) den Versuch kontrolliert und Daten akquiriert.

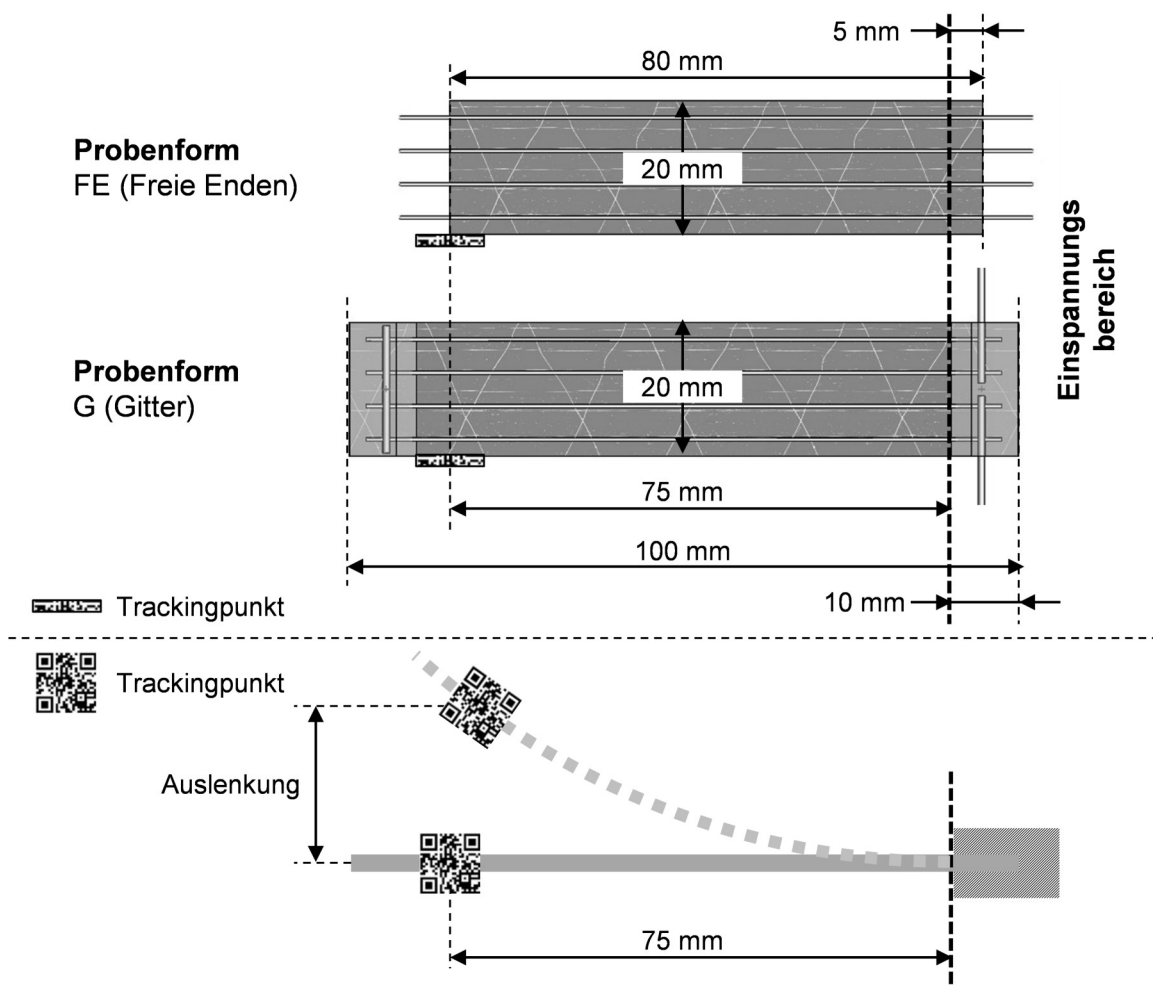


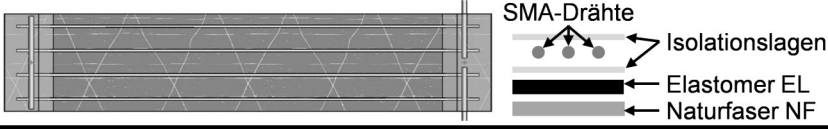
Abbildung 15: Einspannung und Positionierung des Trackingpunktes bei den Aktuierungsversuchen

Die größten Fehler des vorgestellten Versuchsaufbaus können bei der Verformungsmessung entstehen und sind durch die Positionierung der Probe bedingt, nicht durch die Messmittel selbst. Eine perfekt horizontale Ausrichtung der Probe kann nicht immer gewährleistet werden und kann somit zu einer leichten Startpunktverschiebung führen. Die abgeleitete vertikale Auslegung berücksichtigt jedoch diese Nullpunktverschiebung und lediglich bei sehr großen Krümmungen entsteht ein vernachlässigbarer Fehler.

4.2.3. Aktuierung von SMA-FKV-Hybridverbunden für die Validierung

Tabelle 9: Probenvarianten für die Aktuierung zur Validierung

Konfiguration:

Aufbau	Material	Lieferant	Daten
G (Gitter):			
Grundlaminat EL	Elastomerplatte	Kraiburg	Kraibon AA6CFZ Dicke 0,5 mm
Grundlaminat NF0,5	EP-Harz	MOMENTIVE	EPIKOTE 135 / EPIKURE 134
	Flachfasermatte	Eco-Technilin	FIBRIMAT F300 300 g/m ²
Grundlaminat NF1,5	Naturfaser EP-Laminat	Boshoku	FlexiForm Dicke 1,5 mm
Isolationslagen	Glasfasergewebe	R&G	25 g/m ²
Lokale Verstärkung	Glasfaserschnitzel	R&G	3 mm
	Glasfasergewebe	R&G	255 g/m ² (85% in 1-Richtung)
SMA-Gitter Anker	1-Weg-Effekt SMA	Memry	Alloy H ø 1 mm
SMA-Gitter Aktor 1	2-Wege-Effekt SMA	SAES Getters	SmartFlex® ø 0,5 mm
SMA-Gitter Aktor 2	1-Weg-Effekt SMA	Memry	Alloy H ø 0,5 mm 4,5 %
SMA-Gitter Aktor 3	1-Weg-Effekt SMA	Memry	Alloy H ø 0,5 mm 3,0 %
SMA-Gitter Aktor 4	1-Weg-Effekt SMA	Memry	Alloy H ø 0,5 mm 1,8 %
Harz	kalthärtendes EP-Harz	Huntsman	Araldite LY 5052 / Aradur 5052

Herstellung:

KG (Kaltgehärtet):	
Handlaminieren	
Vakuumsack	
Drucktopf	24 h 6 bar RT
Temperung	-

Ziel der Experimente ist es, die Aktorik definierter Technologie-Proben mit verschiedenen Steifigkeiten und Aktormaterialien zu erfassen, um sie mit simulativen Prognosen abgleichen zu können. Es kommt SmartFlex[®] als Zwei-Weg-Effekt-Material und Alloy H mit drei verschiedenen Vordehnungen als Ein-Weg-Effekt-Material zum Einsatz. Dabei wird die maximale Auslenkung bei vollständiger Aktivierung sowie die Rückstellung während der Abkühlung für mehrere Zyklen ermittelt. Die Probenaufführung ist im Wesentlichen identisch mit den kaltgehärteten Proben mit Gitter (G-KG) aus Kapitel 4.2.2, lediglich der Grundlaminataufbau und die aktiven SMA Drähte werden variiert. Der bereits vorgestellte Versuchsaufbau wird für die Versuchsdurchführung verwendet, jedoch wird die Aufheizdauer limitiert, da das Erreichen einer bestimmten Temperatur angestrebt wird und nicht die Identifikation des Versagens-

punktes. Die einzelnen Komponenten der Proben und die Herstellungsparameter können Tabelle 9 entnommen werden.

Tabelle 10: Stromstärken und Zeiten der Aktivierungszyklen für die Validierung

Material	Zyklus	Zieltemperatur	Aufheizstrom	Aufheizzeit	Abkühlstrom	Abkühlzeit
		[°C]	[A]	[s]	[A]	[s]
SmartFlex®	1	150	10 (2 Drähte parallel)	5,3 + 0,3	0,6 (2 Drähte parallel)	300
	2			5,2 + 0,3		
	3			5,2 + 0,3		
	4			5,2 + 0,3		
Alloy H	1	160	10 (2 Drähte parallel)	7,1 + 0,3	0,6 (2 Drähte parallel)	300
	2			6,8 + 0,3		
	3			6,8 + 0,3		
	4			6,8 + 0,3		

Um ein Überhitzen zu vermeiden und um gleichzeitig sicherzustellen, dass die gewünschte Temperatur zum vollständigen Abruf der Aktorik erreicht wird, wurde in Vorversuchen mit angeklebten und eingebettetem Thermoelementen am Einzeldraht die nötige Aufheizdauer für einen Aufheizstrom von 5 A ermittelt und um eine Sicherheit von 0,3 s ergänzt, wodurch sich die Temperatur um maximal 5 °C weiter erhöht. Damit ergeben sich die in Tabelle 10 dargestellten Aufheiz- und Abkühlzeiten für die Technologie-Proben. 300 s Abkühlzeit stellen sicher, dass die Ausgangstemperatur von 26 °C auch während einer Beaufschlagung mit 0,3 A zur Widerstandsmessung erreicht wird. Der erste Zyklus bedarf für beide Materialien einer leicht erhöhten Aufheizdauer, um die gewünschte Temperatur zu erreichen. Dies deutet darauf hin, dass während des ersten Zykluses mehr Energie in mechanische Arbeit umgesetzt wird als in den Folgezyklen. Beim Ein-Weg-Effekt-Material ist dieser Effekt klar nachzuvollziehen und entsprechend stark ausgeprägt.

Wie bereits erwähnt, wird der gleiche Aufbau wie zuvor verwendet, um die Verformung zu initiieren und zu erfassen, ergänzt um eine Zeitsteuerung, welche pro Probe vier Aktorikzyklen abruf. Die Zeitsteuerung ersetzt hierbei die Temperaturmessung per Thermoelement, da die Herstellung der Technologie-Proben durch dieses zusätzliche Element wesentlich erschwert und die Reproduzierbarkeit des Herstellungsergebnisses beeinträchtigt wird. Die Zuleitungen zum Thermoelement müssen

aus dem mit Harz getränkten Bereich heraus geführt werden und können zu Porenbildung führen. Auch wenn die Temperatur nicht direkt gemessen wird, fällt der zu erwartende Fehler gering aus. Die Aktivität in diesem Temperaturbereich ist bereits vollständig abgerufen und zusammen mit der ergänzten Sicherheit von 0,3 s wird sichergestellt, dass mindestens die gewünschte Temperatur erreicht wird.

4.2.4. Produktionseinrichtungen

Autoklav

Ein Autoklav vom Hersteller Maschinenbau Scholz GmbH wurde zur Vernetzung der Elastomermatten eingesetzt.

Drucktopf/Vakuumpumpe

Für die porenfreie Einbettung der SMA-Elemente mit dem kalthärtenden Harzsystem von Huntsman wurde der Vakuumsackaufbau zunächst mit einer Vakuumpumpe des Typs TRIVAC D8B von OC Oerlikon Corporation AG evakuiert und anschließend in einem Drucktopf der Firma OTEG GmbH (11,8 l nutzbares Volumen) mit einem Druck von 6 bar beaufschlagt. Der angestrebte Restdruck im Vakuumaufbau lag im Bereich zwischen 10^{-1} und 10^{-2} mbar

Schweißvorrichtung und Schweißgerät

Zur Herstellung der SMA-Gitter werden die Drähte zunächst auf einer Kupferplatte fixiert. Die Kreuzungspunkte werden schrittweise mittels eines an einem Kniehebelspanner montierten Kupferstempels geklemmt und verschweißt. Die Punktschweißung entsteht durch eine Widerstandsschweißung, welche durch die Kondensatorladung eines Thermoelement-Schweißgeräts vom Typ TL-WELD der Firma OMEGA Engineering inc. initiiert wird.

4.2.5. Analytik

DSC

Zur Bestimmung der Glasübergangspunkte und einer eventuellen Nachhärtereaktion der eingesetzten Polymere wird die Dynamische Differenzkalorimetrie (engl. Differential Scanning Calorimetry DSC) eingesetzt. Hierzu wird in einem Differential Scanning Calorimeter DSC 1 vom Hersteller Mettler-Toledo International Inc. der Wärmestrom bestimmt, welcher benötigt wird, um eine konstante Heizrate von 20 °C/min sicherzustellen. Der Glasübergang kann durch die Änderung der spezifischen Wärmekapazität erfasst werden und eine eventuelle Nachhärtung kann durch die exotherme Reaktionswärme identifiziert werden.

Mikroskopie

Schliffbilder wurden mithilfe eines Mikroskops DM6000 der Firma Leica Microsystems GmbH erstellt, nachdem sie automatisiert auf einer Poliermaschine Saphir 550/Rubin 520 der Firma ATM GmbH präpariert wurden. Verwendet wurden verschiedene Vergrößerungen und die Multistep-Funktion, welche einen größeren Probenbereich scannt und die mehrere Aufnahmen zu einem großen Bild zusammenfügt.

5. Herstellung aktiver SMA-FKV-Hybridverbunde

Eine optimal einsetzbare aktive Hybridstruktur liefert eine reproduzierbare und zuverlässige Aktorik bei gleichzeitig geringem Gewicht sowie Bauraum und ist einfach elektrisch anzuschließen. Im folgenden Kapitel wird aufgezeigt, wie eine gut gewählte Integrationsmethode und eine wohlüberlegte Prozessführung essentiell zum Erreichen dieses Ziels beitragen.

5.1. Integrationsmethode

Im Zentrum dieses Kapitel steht die Frage, auf welche Weise sich SMA-Elemente und Verbundwerkstoffe bestmöglich kombinieren lassen. Dazu kann in bestimmten Grenzen die Materialauswahl, die geometrische Gestaltung und die Elementanzahl angepasst werden. Um bei der Aktorik eine genauso hohe Gestaltungsfreiheit zu ermöglichen, wie es bei FKV-Bauteilen der Fall ist, ist es sinnvoll, aktive SMA-Elemente in Form von eindimensionalen Elementen wie Drähten oder Filamenten einzusetzen. Eine optimale Materialausnutzung und ein individuelles Maßschneidern der Aktorik sind auf diese Weise möglich.

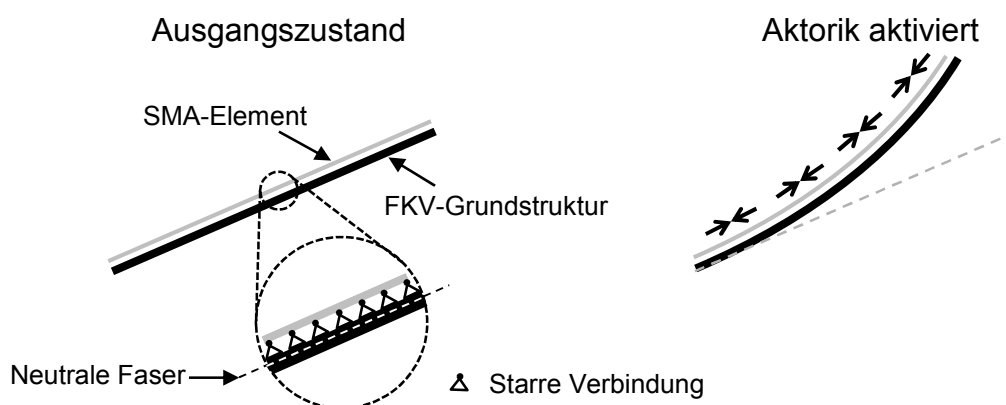


Abbildung 16: Mechanisches System aus FKV und aktivem SMA

Um große Auslegungen mit SMA-Elementen und flächig aufgebauten FKV erreichen zu können, ist eine Ausführung sinnvoll, bei der die aktive Komponente möglichst außerhalb der neutralen Faser eines angenommenen Biegebalkens liegt, wie es in Abbildung 16 verdeutlicht wird. Durch den entstehenden Hebel können die Verfor-

mungswege der SMA-Elemente im SMA-FKV-Hybridverbund verstärkt werden und sind aktuatorisch nutzbar. Integration bedeutet außerdem, in jedem Punkt des Verbundes eine Verbindung zwischen SMA und FKV zu erzeugen und entsprechend einer verbundwerkstoffgerechten Bauweise auf diskrete Verbindungspunkte zu verzichten.

5.1.1. Analyse der Anforderungen

Die Anforderungen, die sich an die Integrationsmethode ergeben, sind vielfältig und, wie anhand bislang bekannter Lösungsansätze in Kapitel 2.3 zu sehen ist, noch nicht hinreichend erfüllt. Im Folgenden werden die wichtigsten Anforderungen genannt, die sich aus dem Streben nach maximal möglicher Aktorikperformance und der industriellen Einsetzbarkeit ergeben:

- Ausreichende und dauerhafte Kraftübertragung zwischen SMA und FKV
- Geringe Zusatzsteifigkeit für den Biegebalken
- Geringer Bauraum
- Geringes Gewicht
- Gute Reproduzierbarkeit bei geringem Herstellungsaufwand
- Einfache elektronische Kontaktierung
- Ausreichende elektrische Isolierung zur Umgebung
- Geringe zusätzliche, thermisch träge Masse
- Definierte thermische Kopplung

Anforderungen wie geringes Gewicht und geringer Bauraum sind selbsterklärend. Eine elektrische Kontaktierung ist notwendig, um die Aktorik über Joulesche Erwärmung abrufen zu können. Allerdings muss gleichzeitig darauf geachtet werden, dass diese nicht durch zusätzliche, thermisch träge Masse eine Temperatursenke darstellt und die Aktorik lokal verzögert oder gar verhindert. Analog muss bei der Sicherstellung der Kraftübertragung darauf geachtet werden, dass zusätzlich eingebrachte Steifigkeit im Biegebalken das Verformungspotential nicht schmälert. Reproduzierbarkeit bei geringem Aufwand ist vor allem relevant, um zuverlässige Vorhersagen treffen zu können und durch ein einfaches Handling eine wirtschaftliche Herstellbar-

keit zu gewährleisten. Dabei ist der Ausrichtung der aktiven Elemente besondere Aufmerksamkeit zu schenken, da hier wenige Grad Abweichung einen starken Einfluss auf die Aktorik haben, ähnlich wie bei der Ausrichtung von Verstärkungsfasern (siehe Kapitel 2.2). Welche signifikanten Defizite im Bereich der elektrischen Kontaktierung, der Reproduzierbarkeit und der Kraftübertragung bestehen, wurde bereits in Kapitel 2.3 mit Abbildung 11 deutlich gemacht.

Eine essentielle Anforderung ist die Gewährleistung der Kraftübertragung, weshalb die Kraftübertragung hier detaillierter betrachtet wird. Nimmt man ein zunächst endloses, eindimensionales SMA-Element an, kann jegliche Kraftübertragung zur homogenen Belastung des runden Querschnitts nur durch Scherkräfte an der Oberfläche stattfinden.

$$\frac{O}{A} = \frac{2\pi r \cdot l}{\pi r^2} = \frac{2 \cdot l}{r} \quad 5-1$$

Das Verhältnis zwischen der Oberfläche O eines Teilstücks mit der Länge l und dem Querschnitt A wird mit sinkendem Radius r besser, um den Querschnitt mit einer gegebenen maximalen Scherkraft höher belasten zu können. Dies spricht für die Verwendung von möglichst dünnen Filamenten, wie es auch bei Verstärkungsfasern üblich ist. Allerdings ist die prozesstechnisch saubere Ausrichtung und Kontaktierung einer hohen Anzahl an sehr dünnen SMA-Filamenten schwierig zu realisieren und zum aktuellen Zeitpunkt durch hohe SMA-Materialkosten sehr teuer, weshalb sinnvollerweise Drähte im Bereich mehrerer hundert Mikrometer eingesetzt werden.

Auf der einen Seite ist dadurch das Verhältnis zwischen Oberfläche und Querschnitt limitiert und auf der anderen Seite begrenzt die Scherfestigkeit des Interfaces die Kraffteinleitung. Wie die Untersuchungen von Rossi et al. [69] gezeigt haben, können maximal Scherfestigkeiten von ca. 18 N/mm² realisiert werden. Theoretisch lässt sich berechnen, wieviel Normalkraft über eine bestimmte Länge bei homogener Scherspannungsverteilung in einen Draht eingeleitet werden kann. Die Scherspannungsverteilung bei dem anzunehmenden SMA-FKV-Hybridverbund mit endlicher Länge ist

allerdings keineswegs homogen. Wie Wang et al. [73] und Jarali et al. [72] gezeigt haben, wird die Normalkraft im SMA-Element in den Randbereichen durch stark lokalisierte Scherspannungsspitzen aufgebaut. Wie Abbildung 17 zeigt, fällt die Scherspannung dann im mittleren Bereich bei homogener Verformung und konstanter Normalkraft auf null ab. Überträgt man dies auf einen Biegebalken aus SMA und FKV, findet die Krafteinleitung in die SMA-Elemente am Rand statt. Dort belasten Scherspannungskräfte die Grenzfläche, da die Krümmung von null auf einen bestimmten Wert steigt.

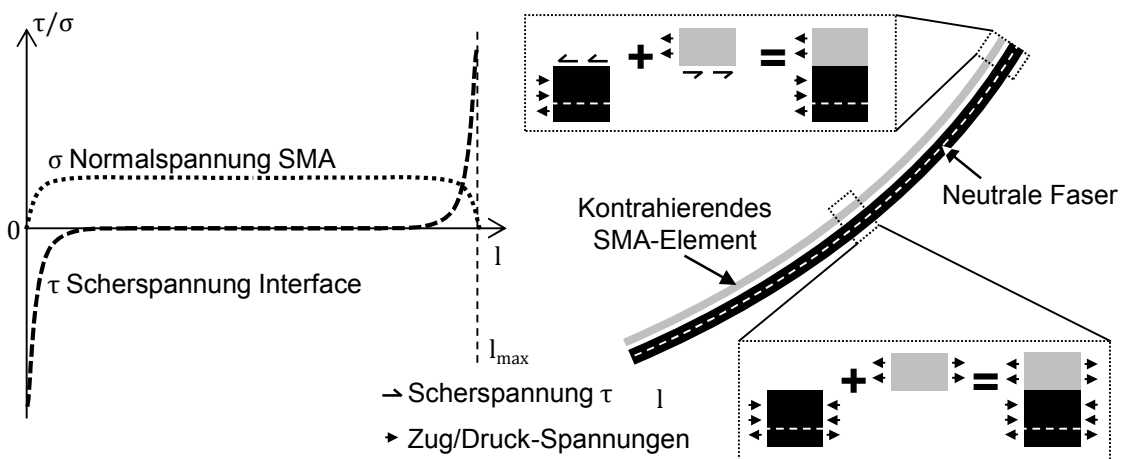


Abbildung 17: Idealisierte Scherspannungsverteilung über der Länge eines sich kontrahierenden SMA-Drahtes auf einem Grundlaminat

Der Vergleich zwischen den Peak-Scherspannungen von Wang et al. [73] mit Werten über 80 MPa und den erreichbaren Grenzflächenfestigkeiten von Rossi et al. [69] mit 18 MPa verdeutlicht die Problematik. In der Praxis zeigt sich dann ein unerwünschtes Schubversagen an beiden Enden. Anzumerken ist, dass Wang et al. [73] eine vergleichsweise hohe Normalspannung von 600 MPa einleiten, allerdings bei einem relativ kleinen Durchmesser von 0,25 mm.

5.1.2. SMA-Gitter

Wie die vorherige Ausführung deutlich macht, kann es nicht ausreichen, lediglich die Scherspannungsübertragung zwischen SMA und FKV zu nutzen, um das volle Aktorikpotential abrufen zu können. Entsprechend basiert die im Folgenden vorgestellte

Integrationsmethode zusätzlich auf einer mechanischen Verbindung. Die Materialeigenschaft von NiTi-Legierungen mit sich selbst vergleichbar gut schweißbar zu sein [78,79], motiviert den Ansatz, Anker Elemente aus NiTi in 90°-Ausrichtung an die eigentlich aktiven SMA-Elemente anzuschweißen. Der erzeugte Stoffschluss ist sehr leistungsfähig und erreicht im optimalen Fall die Festigkeit des Ausgangsmaterials.

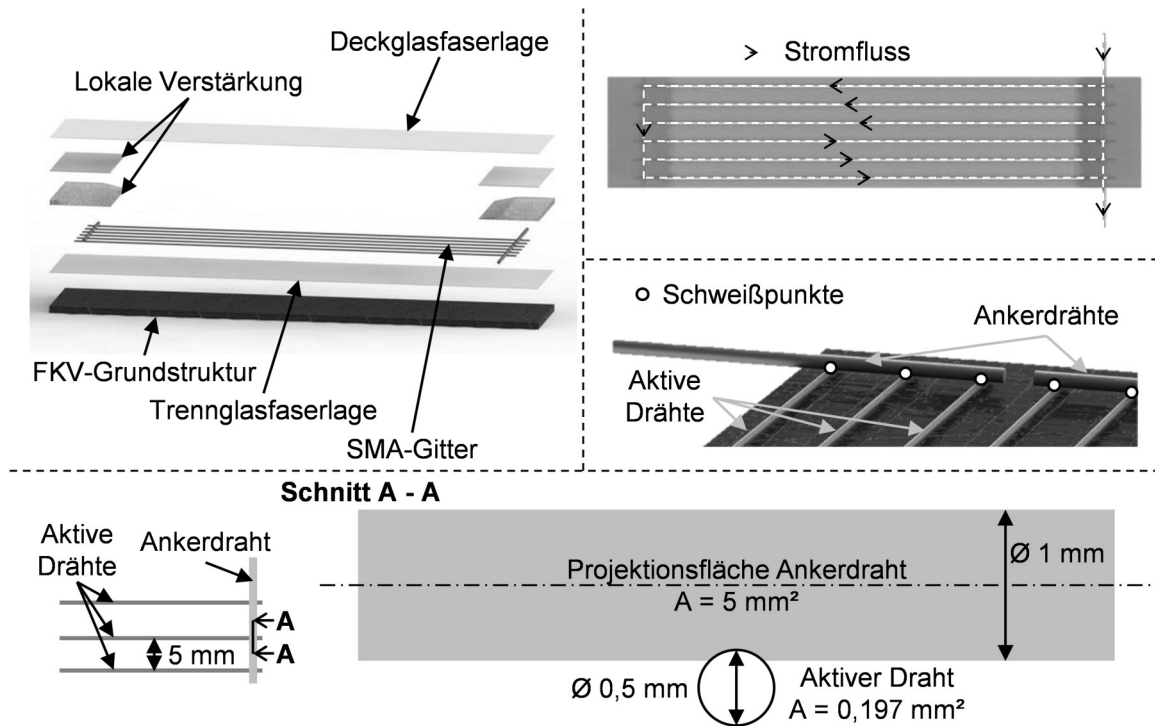


Abbildung 18: Integrationskonzept mit SMA-Gitter

Es verdeutlicht Abbildung 18, wie die Kraftübertragung durch eine mechanische Verankerung am Anfang und am Ende gezielt dort, wo die größten Belastungen auf die SMA-FKV-Schnittstelle wirken, unterstützt werden kann. Durch die Übertragung der Spannungen aus dem aktiven Draht auf eine signifikant größere Ankerfläche kann eine deutliche Reduktion des Spannungsniveaus an der SMA-FKV-Schnittstelle erreicht werden. Im oben dargestellten Fall werden die Zugspannungen aus dem Querschnitt des aktiven Drahtes $A = 0,197 \text{ mm}^2$ bei idealisiert angenommener homogener Verteilung über die projizierte Ankerdrahtfläche $A = 5 \text{ mm}^2$ um Faktor 25 reduziert und über Flächenpressung am Ankerdraht auf den FKV übertragen. Um lokal die mechanischen Eigenschaften des FKV an die Belastung anzupassen, ist eine lokale Verstärkung mit kurzen Glasfasern (3 mm) und zusätzlichem Gewebe

vorgesehen, wodurch die Festigkeit gegenüber der reinen Matrix signifikant gesteigert werden kann. Sofern der Ankerdraht nicht in der darunterliegenden FKV-Struktur versenkt werden kann, erhöht sich durch den Ankerdraht und die lokalen Verstärkungen die Bauteildicke in den Ankerbereichen, was jedoch durch eine Vielzahl von Vorteilen aufgewogen wird. So lässt sich bei der Ausgestaltung als Gitter durch die elektrische Leitfähigkeit der stoffschlüssigen Schweißverbindung gleichzeitig ein elektrisches Netzwerk aufbauen und die erforderlichen elektrischen Anschlusspunkte im Optimum auf zwei reduzieren. Die Auswahl des NiTi-Ankerdrahtes richtet sich nach zwei Anforderungen: Zum Einen sollte der Ankerdraht selbst keine Aktorik zeigen und zum Anderen ist zu vermeiden, dass er als Temperatursenke agiert. Ein unvorgedehntes Ein-Weg-Effekt-Material eignet sich als aktorisch passives SMA-Element. Ist außerdem der Durchmesser des Ankerdrahtes so gewählt, dass der Querschnitt dem der parallel zueinander angeschlossen aktiven Drähte entspricht, stellt sich im Ankerdraht eine ähnliche Erwärmung wie in den aktorisch aktiven SMA-Drähten ein.

Durch ein getrennt vorgefertigtes SMA-Gitter kann die Reproduzierbarkeit erhöht und der Herstellungsaufwand reduziert werden. Bei diesem Ansatz ist es nicht notwendig, beim Herstellen des Hybridverbundes einzelne SMA-Elemente zu positionieren und auszurichten, stattdessen wird ähnlich üblicher FKV-Halbzeuge (Gewebe/Gelege) ein SMA-Gitter als Halbzeug eingelegt. Die Ausrichtung ist durch die zweiseitige Fixierung mehrerer Drähte sichergestellt und könnte bei großer Länge mit zusätzlichen dünnen Querdrähten innerhalb einer Parallelschaltung verbessert werden.

Als äußere Schicht ist ein Glasgewebe als Deck- und Trennlage zum FKV-Grundlaminat vorzusehen. Diese Glasgewebelagen sorgen für eine elektrische Isolierung zur Umwelt und zum evtl. aus Kohlefasern gebildeten und somit elektrisch leitfähigen FKV-Grundlaminat. Außerdem sorgt die Decklage für eine gute mechanische Anbindung zum Grundlaminat und eine vollständige Einbettung der SMA-Drähte in Harz. Dies ist notwendig, um bei auftretender Krümmung ein unerwünschtes Abheben der aktiven SMA-Drähte vom Grundlaminat durch Spannungen senkrecht zur Laminebene zu verhindern. Neben der Isolationsfunktion verhindert die Trennlage bei der Herstellung trockene Stellen ohne Harz zwischen dem FKV-

Grundlaminat und dem SMA-Gitter. Für beide Glasfaserlagen gilt, dass die mechanischen Eigenschaften in der Laminebene von sekundärer Wichtigkeit sind. Ihre intrinsische Steifigkeit ist eher nachteilig für das Verformungspotential, weshalb geringe Flächengewichte geschlossenmaschiger Gewebe zu bevorzugen sind.

5.1.2.1. Umsetzung SMA-Gitter-Integration

Im Folgenden wird dargestellt, wie die experimentelle Umsetzung des Integrationskonzeptes aussieht. Der Herstellungsprozess der eigentlichen SMA-FKV-Hybridstruktur wird im folgenden Kapitel genauer beschrieben.

Für das vorliegende Konzept ist ein SMA-Gitter mit insgesamt 6 aktiven SMA-Drähten von 0,5 mm Durchmesser vorgesehen. Jeweils drei der aktiven Drähte werden durch die Verbindung mit dem Ankerdraht parallel zueinander geschlossen. Die stoffschlüssige Schweißverbindung wird durch ein Punktschweißen mit einem Thermoelementschweißgerät realisiert, wobei eine Durchdringung der beiden Drahtquerschnitte erzielt werden soll. Der Querschnitt von 0,76 mm² des Ankerdrahtes mit einem Durchmesser von 1 mm ist um 33 % größer als der Querschnitt der drei aktiven Drähte, wodurch die Erwärmung des Ankerdrahtes etwas geringer als die der aktiven Drähte ausfallen wird. Mit einem Abstand von 5 mm zwischen den aktiven Drähten steht eine projizierte Ankerdrahtfläche von 5 mm² zur Verfügung, um die Kraftübertragung zwischen einem aktiven SMA-Draht und dem FKV zu übernehmen.

Als FKV-Grundstruktur kommt ein ca. 1,5 mm dickes, epoxidharzbasiertes Naturfaserlaminat zum Einsatz, welches durch die Flexibilität ein vergleichsweise hohes Maß an Verformung zulässt. Für beide Glasfaserlagen, die Deck- und die Trennlage, wurde ein Gewebe mit einem Flächengewicht von 25 g/m² ausgewählt. Zur lokalen Verstärkung im Ankerbereich sind zusätzlich 3 mm lange Glasfaserschnitzel und ein Glasfasergewebe mit einem Flächengewicht von ca. 255 g/m² vorgesehen. Da die Belastung hauptsächlich in Richtung der aktiven SMA-Drähte stattfinden wird, ist ein Großteil der Glasfasern (ca. 85 %) in der lokalen Gewebeverstärkung in dieser Richtung ausgerichtet.

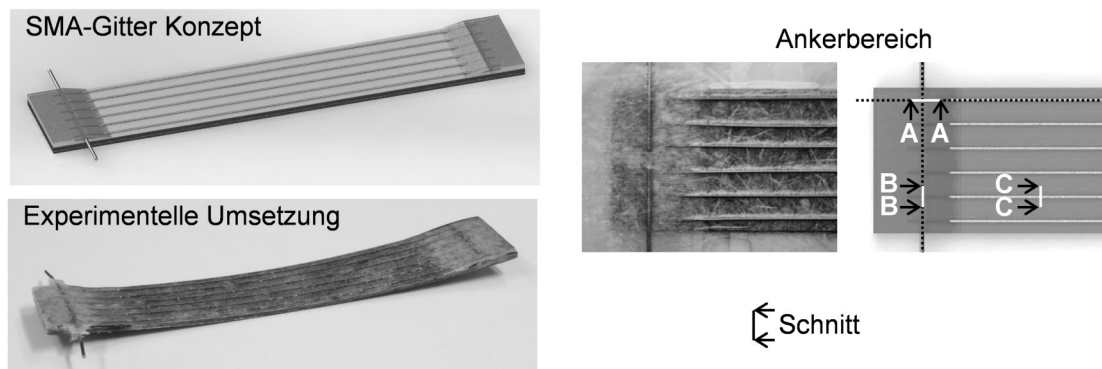


Abbildung 19: Vergleich zwischen Integrationskonzept und experimenteller Umsetzung

Das Integrationskonzept wird in Abbildung 19 und Abbildung 20 der Umsetzung gegenüber gestellt und es wird verdeutlicht, dass die Integrationsmethode in einem realen Herstellungsprozess, wie er in Kapitel 5.2 erläutert wird, sehr gut realisierbar ist. Mit dem einfachen Handling eines Gitters lässt sich eine sehr gute Ausrichtung sicherstellen und der erforderliche Bauraum ist durch das integrierte elektrische Netzwerk mit nur zwei Anschlüssen signifikant reduziert.

Wie leistungsfähig die Kraftübertragung durch die Verankerung ist, wird in Kombination mit der Herstellungsmethode durch Aktoriktests in Kapitel 5.3 bewertet. Abbildung 20 mit Schliffbildern der Schnitte aus Abbildung 19 liefert einen ersten Eindruck der Verankerung. In Schnitt A-A in Abbildung 20a) ist sehr deutlich zu erkennen, dass die Glasfaserschnitzel, wie gewünscht, den Bereich um den Ankerdraht verstärken. Außerdem wirkt die endlose Verstärkung des lokalen Glasfasergewebes als Abdeckung oberhalb des Ankerdrahtes. Die durch die Schweißung erzeugte Durchdringung der SMA-Elemente ist eingezeichnet und erreicht eine maximale Tiefe von ungefähr 110 μm . Schnitt B-B in Abbildung 20b) zeigt einen Schliff entlang der Ankerdrahtachse. Idealerweise verteilt sich die Kraft aus dem aktiven SMA-Draht auf die im Schnitt sichtbare Fläche von ca. 5 mm^2 , wie sie in Abbildung 18 gezeigt ist. Nimmt man eine eingeleitete Spannung von 600 MPa an, ergibt sich eine Flächenpressung von 24 MPa. Gegenüber der möglichen Flächenpressung von 120 MPa [80] bei glasfaserverstärktem FKV ist dieser Wert vergleichsweise gering. In Schnitt C-C in Abbildung 20c) ist im Detail zu sehen, wie die Deckglasfaserlage durch

Presskräfte im Vakuumaufbau dafür sorgt, dass der SMA-Draht im mittleren Bereich von Matrix umschlossen ist.

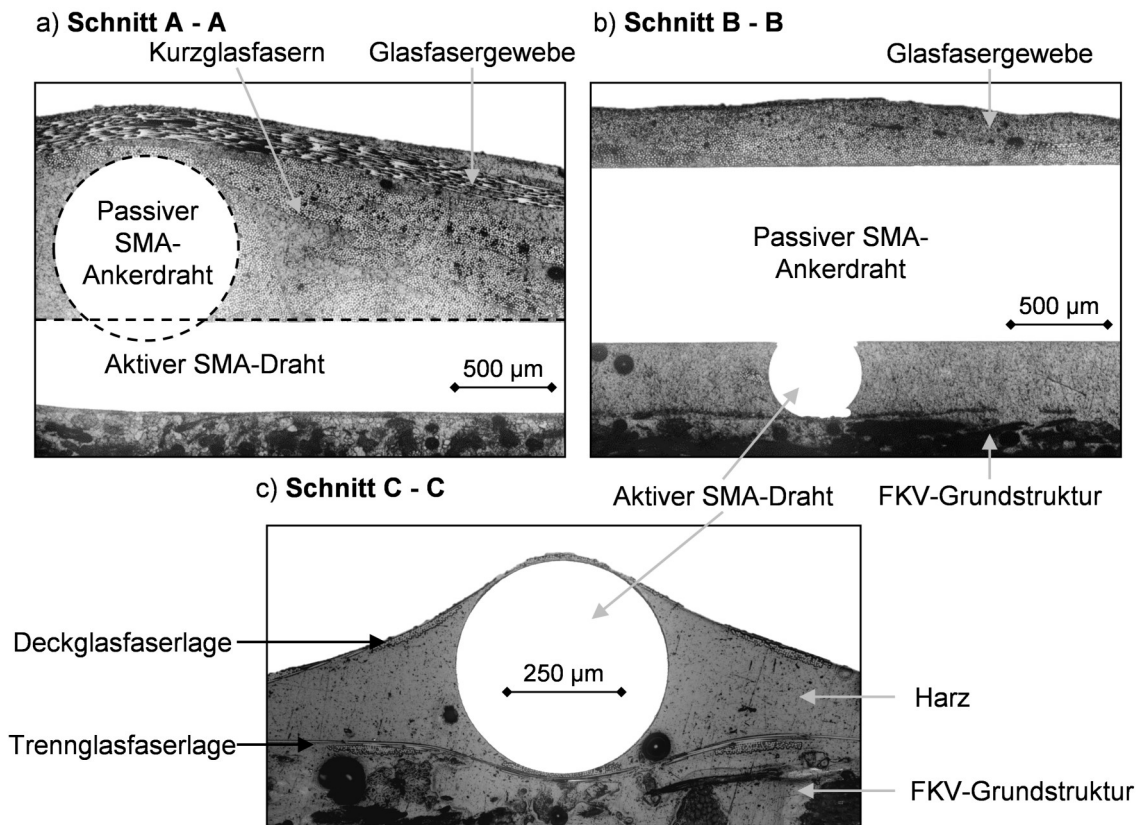


Abbildung 20: Schliffbilder des Ankerbereichs der Schnitte in Abbildung 19

5.2. Herstellungsmethode

5.2.1. Analyse möglicher Herstellungsprozesse

Widersprüchliche Anforderungen aus der FKV-Fertigung und dem thermisch sensiblen Verhalten des SMA schränken die Prozessgestaltung stark ein. Gleichzeitig sind Aspekte wie Reproduzierbarkeit und Flexibilität auch für das Herstellungsfahren von SMA-FKV-Hybridverbunden wichtig.

Das Ziel, eine aktive Hybridstruktur mit zuverlässiger Aktorik zu erzeugen, erfordert ausreichende mechanische Eigenschaften des FKV bei der maximal auftretenden Betriebstemperatur. Diese maximale Temperatur wird im Falle der SMA-Aktorik durch die aktive oder passive Aufheizung des SMA-Materials bis auf Temperaturen oberhalb von A_F definiert. Gleichzeitig kann davon ausgegangen werden, dass bei dieser maximalen Temperatur auch die erzeugten Spannungen maximal sind und das SMA-FKV-Interface belasten. Prinzipiell ist anzustreben, dass die notwendigen mechanischen Eigenschaften des Matrixwerkstoffs bis oberhalb von A_F gewährleistet werden können. Für amorphe Thermoplaste wäre ein Material zu wählen, bei dem der Glasübergang oder der Schmelzbereich oberhalb von A_F liegt. Für Duromere sollte der Glasübergang oberhalb von A_F liegen. Der Glasübergangsbereich wird bei Duromeren jedoch maßgeblich durch die Härtetemperatur bestimmt und nicht nur durch die Harzauswahl. [37] Grundsätzlich könnte deswegen angestrebt werden, mit einer ausreichend hohen Härtetemperatur den Glasübergang auf Temperaturen oberhalb von A_F einzustellen. Eine erhöhte Prozesstemperatur bleibt jedoch nicht ohne Einfluss auf die SMA-Elemente, die eingebettet werden sollen, wie es in Abbildung 21 idealisiert dargestellt ist. Ihre thermisch aktivierte Phasenumwandlung und damit die Aktorik wird während des Aufheizvorgangs bei der Hybridverbundherstellung auf Temperaturen oberhalb von A_F aktiviert und verändert das Herstellungsergebnis. Für vorgedehnte SMA-Elemente mit Ein-Weg-Effekt ist davon auszugehen, dass die Kontraktion vollständig während des Aufheizvorgangs stattfindet und nach der Herstellung ein Bauteil ohne Aktorikfunktion vorliegt. Bei SMA-Elementen mit Zwei-Weg-Effekt wird die Kontraktion während des Aufheizvorgangs abgerufen. Während des Abkühlvorgangs dehnt sich das SMA-Element wieder aus und verformt

das Bauteil gegen die Steifigkeit der konsolidierten Struktur unter Druck. In beiden Fällen entspricht das Herstellungsergebnis nicht dem Soll-Zustand der zuvor definierten aktiven SMA-FKV-Hybridstruktur.

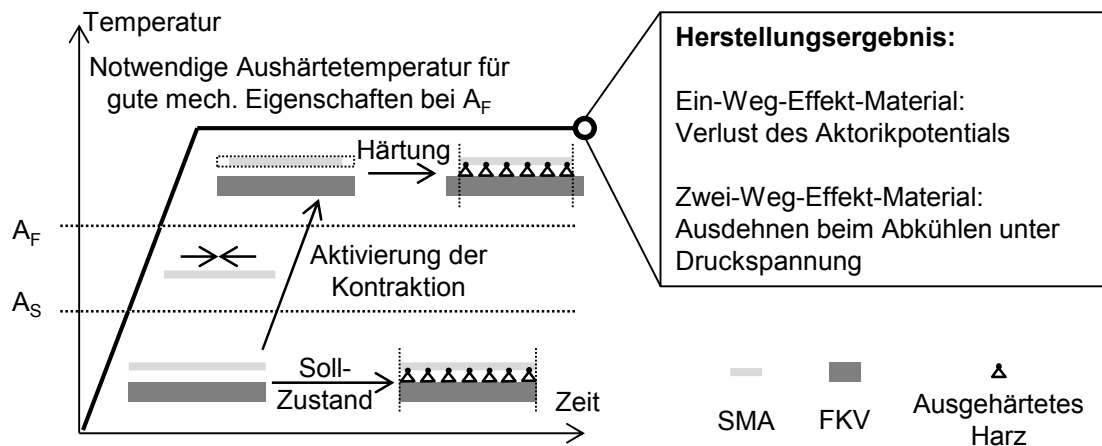


Abbildung 21: Widerspruch zwischen Aushärtetemperatur und Aktivierungstemperatur

Verschiedene wissenschaftliche Publikationen, wie sie bereits in Tabelle 4 aufgeführt wurden, haben in der Vergangenheit auf unterschiedliche Weise versucht, dennoch einen umsetzbaren Herstellungsprozess zu finden. Im Folgenden sollen einige Ansätze näher beleuchtet und anschließend bewertet werden.

Kalthärten: Die zugrundeliegende Annahme dieses Ansatzes ist es, dass die mechanischen Betriebseigenschaften einer duromeren Matrix oberhalb des T_G ausreichend sind, um der Belastung standhalten zu können. Entsprechend kann die Hybridstruktur bei Prozesstemperaturen unterhalb von A_S hergestellt werden.

Dieser Ansatz wurde von Daghia et al. [65] verfolgt. Dort kam ein kalthärtender Epoxidharzklebstoff zum Einsatz, um Drähte ohne weitere Unterstützung von Druck oder Vakuum auf eine FKV-Struktur aufzubringen. Die dokumentierte Auslenkung des aktiven Hybridverbundes von 10 % Auslenkung bezogen auf die Biegebalkenlänge zeigt allerdings weiteres Optimierungspotential.

Tempern: Die Hybridstruktur wird kalthärtend hergestellt und ein Tempersschritt angeschlossen, durch den die duromere Matrix bei erhöhter Temperatur nachvernetzt wird. Beim Tempersschritt mit Temperaturen oberhalb von A_S ist die Hybridstruktur bereits konsolidiert und die SMA-Elemente soweit fest eingebunden, dass dadurch die Kontraktion behindert oder reduziert werden kann. Ziel ist es, bei möglichst geringer Aktorik-Aktivierung einen möglichst hohen T_G zu generieren. Idealerweise liegt der T_G oberhalb von A_F .

Verschiedene Temperabläufe wurden bereits von Kirkby et al. [59] für eine symmetrisch aufgebaute SMA-FKV-Hybridstruktur untersucht und ein positiver Effekt auf die Scherfestigkeit des SMA-FKV-Interfaces konnte nachgewiesen werden.

Blockieren: Hierbei wird der eigentliche FKV-Herstellungsprozess nicht angepasst und der Prozess findet bei den üblichen Temperaturen oberhalb von A_F statt. Man versucht die Aktorik des SMA direkt am aktiven Element durch eine mechanische Blockierung zu unterdrücken.

Die Methode, SMA-Elemente während der Herstellung zu blockieren, wurde bereits vielfach eingesetzt, um SMA-FKV-Hybridverbunde herzustellen. Die hohen zu erwarteten Verformungen beim Biegeaufbau der fertigen Komponenten konnten jedoch nicht beobachtet werden [56,66].

Ein Grund hierfür können lokale Ausgleichseffekte beim blockierten Aufheizen sein. Das beidseitig eingespannte SMA-Element wird gemeinsam mit dem unvernetzten Harz erwärmt. Leichte Temperaturunterschiede über der noch freien Länge vor Aushärtung des Harzes können dazu führen, dass die Kontraktion des SMA-Materials in Bereichen mit höherer Temperatur initiiert wird. Durch diese lokale Kontraktion wird das Material in den kälteren Bereichen gezwungen, sich übermäßig zu dehnen. Mit dieser Dehnungsumverteilung geht Aktorikpotential verloren und die Aktorik ist nicht mehr vorhersagbar. [77]

Herstellen des verformten Zustandes: Dieser Prozess ist nur für SMA-Elemente mit Zwei-Weg-Effekt denkbar, da der verformte Zustand, die Bauteilkontur mit aktivierten SMA-Elementen, hergestellt wird und erst durch den Abkühlprozess die Hybridstruktur den Ausgangszustand einnimmt.

Die SMA-Elemente stehen bei einer derart hergestellten Struktur unter Druck, da sie sich gegen die ausgehärtete Struktur ausdehnen. Eine Einbettung kann ein Beulen von dünnen Elementen verhindern, allerdings wird die Aktorik sich unter Druck anders verhalten als unter Zug, da SMA-Materialien bei äußerer Belastung ein stark asymmetrisches Zug-Druck-Verhalten zeigen [81].

Im direkten Vergleich unterscheiden sich die Herstellungsverfahren stark. Ziel ist es, das zum aktuellen Zeitpunkt erfolversprechendste Verfahren zur Herstellung aktiver Hybridverbunde auszuwählen. In Tabelle 11 werden die verschiedenen Herstellungsverfahren anhand wichtiger Kriterien bewertet. Im Vordergrund stehen dabei die technologischen Kriterien wie die Abschätzung der industriellen Umsetzbarkeit, die Kontrollmöglichkeit des Herstellungsprozesses und die erreichbaren Materialkennwerte bezüglich des skizzierten Temperaturwiderspruchs. Die technologischen Kriterien fließen stärker in die Bewertung ein als Wirtschaftlichkeitsaspekte, wie Herstellungsaufwand und Flexibilität des Prozesses, da die erstmalige Herstellung eines leistungsstarken Hybridverbundes das angestrebte Ziel darstellt. Die verwendeten Kriterien werden im Folgenden kurz erläutert:

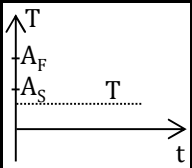
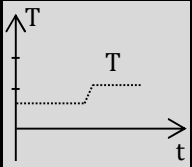
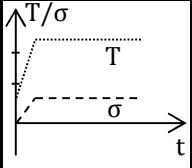
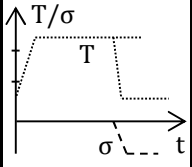
- **Industrielle Umsetzbarkeit:** Bewertet die zu erwartenden technologischen Hürden bzw. die Komplexität der Zusammenhänge, die bis zur erfolgreichen Etablierung des Herstellungsprozesses überwunden bzw. verstanden werden müssen.
- **Mechanische Kennwerte bei Temperaturen oberhalb Austenitstart:** Bewertet die Möglichkeit des Verfahrens eine Harzmatrix zu erzeugen, die bei Temperaturen oberhalb A_S geringe Verluste der mechanischen Eigenschaften aufweist und eine ausreichende Steifigkeit und Festigkeit bereitstellt.
- **Kontrollmöglichkeit des Herstellungsprozesses:** Bewertet die Unsicherheiten im Herstellungsverfahren, die zum aktuellen Zeitpunkt bestehen und zu

schwierig vorhersagbaren und/oder nicht reproduzierbaren Herstellungsergebnissen führen können.

- **Aufwand:** Bewertet mit dem Arbeitsaufwand und dem Umfang der notwendigen Produktionseinrichtungen und Vorrichtungen indirekt die Produktionskosten.
- **Flexibilität:** Bewertet den Aufwand, der nötig ist, um die Produktionseinrichtungen und Vorrichtungen an eine neue Bauteilgeometrie anzupassen.

Durch die Warmhärtung beim „Blockieren“ bzw. beim „Herstellen des verformten Zustandes“ können die besten mechanischen Kennwerte der Matrix bei erhöhter Temperatur erreicht werden. Für beide Verfahren werden jedoch aufwendige Vorrichtungen und Werkzeuge gebraucht, die den Aufwand stark erhöhen und die Flexibilität mindern. Hinzu kommt beim „Blockieren“ die Unsicherheit über eventuelle Ausgleichsvorgänge in der freien Länge der SMA-Elemente, welche die Aktorik des hergestellten Bauteils stark negativ beeinflussen können und die Vorhersagbarkeit und Reproduzierbarkeit verringern [77]. Die Prognostizierbarkeit ist bei der „Herstellung des verformten Zustandes“ kritisch, da die SMA-Elemente beim Abkühlen Druckkräften ausgesetzt sind. Wie sich die dauerhaft im abgekühlten Zustand vorherrschenden Spannungen z.B. durch Kriechvorgänge und die wechselnde Zug-Druck-Belastungen bei Aktivierung auf die Festigkeit bzw. das Verhalten auswirken, ist schwer analysierbar. Die hohe Flexibilität und die Vorhersagbarkeit des Herstellungsergebnisses von „Kalthärten“ und „Tempern“ machen diese Verfahren interessant. Ein angeschlossener Tempersschritt erhöht den Aufwand, bietet aber die Chance, die mechanischen Eigenschaften des Polymers bei erhöhter Temperatur zu verbessern. Diese Aspekte werden in Tabelle 11 dazu genutzt, die verschiedenen Herstellungsmethoden miteinander zu vergleichen. Das „Tempern“ wird nach dieser Analyse am erfolgsversprechendsten bewertet und wird im Folgenden weiter untersucht.

Tabelle 11: Vergleich verschiedener Herstellungsmethoden

Prozess	Prozess parameter verlauf	Kriterium	technologisch			wirtschaftlich		Σ
			einfache Umsetzbarkeit	gute mech. Kennwerte @ $T > A_S$	gute Kontroll-möglichkeit	geringer Aufwand	hohe Flexibilität	
		Gewichtung [9 hoch, 1 gering]	9	8	7	3	2	
Kalthärten		Erfüllungs-grad [9 hoch, 1 gering]	9	1	9	9	9	197
Tempern		Erfüllungs-grad [9 hoch, 1 gering]	8	5	8	7	9	207
Blockieren		Erfüllungs-grad [9 hoch, 1 gering]	1	9	1	3	4	105
Verformter Zustand		Erfüllungs-grad [9 hoch, 1 gering]	3	9	3	1	1	125

5.2.2. Tempern

Bevor mit dem Temperschritt selbst begonnen werden kann, muss die Hybridstruktur in einem kalthärtenden Prozess konsolidiert werden. Zur Sicherstellung einer reproduzierbaren und guten Konsolidierung müssen die SMA-Elemente unter Druckbeaufschlagung flächig auf den FKV aufgebracht und während der Aushärtung mit ihm verbunden werden. Die in dieser Arbeit individuell konfigurierten SMA-Gitter führen zu lokal stark variierenden Bauteildicken und verhindern den Einsatz einer geschlossenen Kavität für die Herstellung im Labor. Ein Pressprozess mit Ausgleichselementen wie Zellulosepresspads oder Silikonstempel wäre denkbar, solange die Bauteile eben sind. Für eine größtmögliche Flexibilität ist die Beaufschlagung mit einem Gasdruck prädestiniert, weshalb in dieser Arbeit ein abgewandelter Autoklavprozess zum

Einsatz kommt. Nachdem der Vakuumsack evakuiert ist, wird zur Beaufschlagung mit Druck ein einfacher Drucktopf verwendet, da keine erhöhte Temperatur für die Kaltaushärtung benötigt wird. Die Temperung kann anschließend im Ofen stattfinden.

Maßgeblichen Einfluss auf das Herstellungsergebnis haben die Harzauswahl und der Aushärtezyklus. Für den zweistufigen Herstellungsprozess Tempern, bei dem erst nach der Aushärtung die Probe im anschließenden Tempersschritt mit erhöhter Temperatur beaufschlagt wird, wird ein Harz benötigt, welches ohne hoch exotherme Reaktion bei Raumtemperatur aushärtet. Die Auswahl an Harz-Härter-Systemen ist beschränkt, da nur wenige Harz-Härter-Systeme bei Raumtemperatur in einer vertretbaren Zeit aushärten. Außerdem hängt es vom Harz-Härter-System ab, wie stark der positive Effekt einer nachgelagerten Temperung ausfallen kann. Das ausgewählte Epoxidharz-System aus Araldite LY 5052 und Aradur 5052 von Huntsman ermöglicht eine Aushärtung bei Raumtemperatur. Laut Datenblatt lässt sich durch einen Tempersschritt bei 100 °C der T_G von ca. 60 °C auf bis zu 134 °C erhöhen. Experimentell wurden die Glasübergangstemperaturen mittels DSC ermittelt. Ein typischer DSC-Scan mit Nachhärtepeak aufgrund der zuvor unvollständigen Vernetzung ist in Abbildung 22 dargestellt. Tabelle 12 vergleicht die experimentell ermittelten Glasübergangstemperaturen mit Werten des Datenblattes. Die Glasübergangstemperaturen, die mit der DSC nach einem zeitlich ausgedehnteren Tempersschritt von 24 h gemessen wurden, liegen 15 °C oder mehr unterhalb der Werte, die im Datenblatt angegeben sind. So stellt sich nach einer Temperung bei 80 °C und 24 h Dauer ein T_G von 94 °C ein, der 14 °C oberhalb der Tempertemperatur liegt, aber 20 °C unterhalb des Datenblattwertes. Der DSC-Scan weist auch nach dem Tempersschritt noch einen signifikanten Nachhärtepeak auf, wodurch prinzipiell eine weitere Nachhärtung bei der späteren Aktivierung der SMA und Temperaturen von bis zu 160°C denkbar ist.

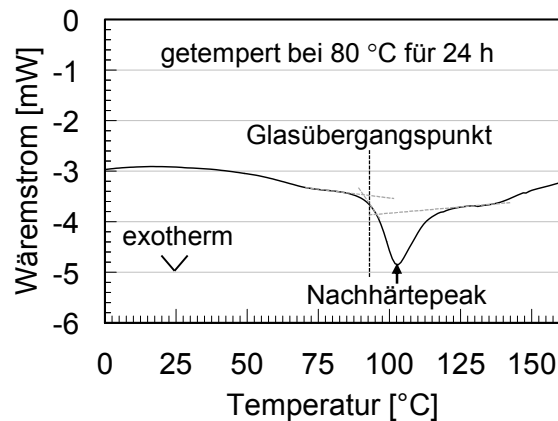


Abbildung 22: DSC-Scan des Hart-Härter-Systems Araldite LY 5052/Aradur 5052

Tabelle 12: Experimentell erreichbare Glasübergangstemperaturen bei unterschiedlichen Tempertemperaturen im Vergleich mit Werten aus dem Datenblatt

		Temper- temperatur	[°C]	60	70	80	85	90
Experiment	Dauer	[h]		24	24	24	24	24
	Glasübergangs- temperatur	[°C]		85,49	89,52	93,57	96,32	102,76
Datenblatt	Dauer	[h]		15	-	8	-	4
	Glasübergangs- temperatur	[°C]		96	-	114	-	116

Ein weiterer limitierender Faktor bei der Tempertemperatur ist die während des Aufheizens einsetzende Aktorik. Wie Abbildung 23 zeigt, weisen die hier untersuchten Proben mit integrierten SMA-Drähten aus SmartFlex® ab spätestens 50 °C erste Verformung auf, obwohl die nominelle Austenitstarttemperatur nach den Herstellerangaben bei ca. 80 °C liegt. Beim Tempern findet durch diese Kontraktion eine Nachvernetzung im leicht verformten Zustand statt. Die durch die Nachhärtung „eingefrorenen“ Anteile sind möglichst gering zu halten, so dass die zurückbleibende Verformung nach dem Abkühlen minimal ausfällt. Deutlich ist in Abbildung 23 zu erkennen, dass die Verformung oberhalb von 80 °C Tempertemperatur signifikant zunimmt und

daraus eine bleibende Verformung von mehreren Millimetern nach dem Tempervorgang resultiert. Eine Tempertemperatur von 80 °C stellt für die vorliegende Konfiguration der Hybridstruktur das beste Gleichgewicht zwischen Erhöhung der Glasübergangstemperatur und dauerhaft eingprägter Verformung dar.

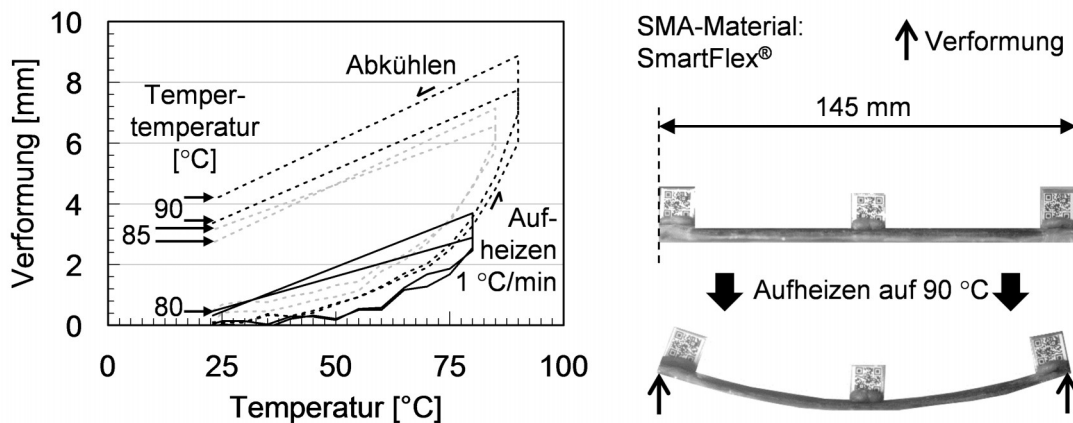


Abbildung 23: Weg des rechten und linken Endes einer aktiven Hybridstruktur beim Tempern mit verschiedenen Temperaturen

Festzuhalten bleibt, dass die Tempertemperatur individuell für jede Hybridstruktur bestimmt werden muss, da der Einfluss der Nachvernetzungen auf die Verformung direkt von den Steifigkeitsverhältnissen abhängt.

5.3. Vergleich unterschiedlicher Integrations- und Herstellungsmethoden

In diesem Kapitel werden die unterschiedlichen Herstellungs- und Integrationsmethoden gegenübergestellt, um die Verbesserung im Bereich der Belastbarkeit quantifizieren zu können. Durch eine dünne, weiche Grundstruktur ist der mögliche Verformungsgrad hoch und Unterschiede in der Leistungsfähigkeit der Proben sind gut messbar. Durch späteres Versagen des SMA-FKV-Interfaces bei größerer Verformung kann direkt auf eine höhere Belastbarkeit geschlossen werden.

Die verschiedenen Probenkonfigurationen sind in Abbildung 24 gezeigt. Als Referenz dient eine kaltgehärtete Struktur mit frei herausragenden Enden der SMA-Drähte. Der Einfluss eines nachgelagerten Temperschritts wird durch den Vergleich mit Proben untersucht, die zusätzlich bei 80 °C für 24 Stunden getempert wurden. Die Verbesserung der Leistungsfähigkeit durch die Integration mittels eines SMA-Gitters wird mit Gitter-Proben in Kombination mit und ohne Temperung bei 80 °C untersucht.

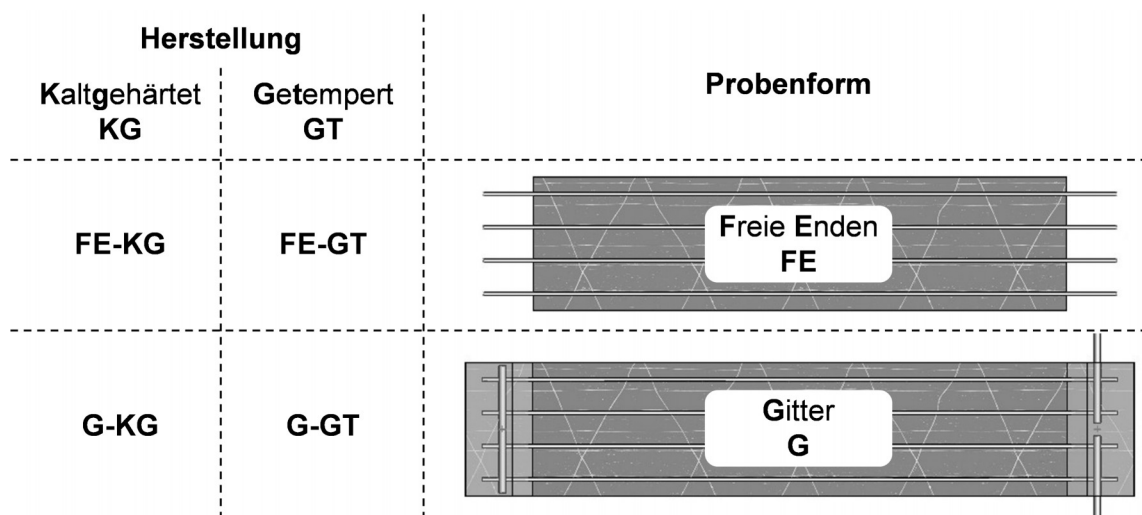


Abbildung 24: Probenkonfiguration für den Vergleich der Herstellungs- und Integrationsmethoden

Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden die Proben mit der Gitterintegration länger gestaltet. Der Ankerbereich kann als inaktiv angesehen werden, da die aktiven SMA-Drähte durch die lokale Verstärkung an die neutrale Faser heran rücken

und gegen die hohe lokale Steifigkeit keine Biegung mehr erzeugen können. Die Aktoriktests wurden, wie in Kapitel 4.2.2 beschrieben, durchgeführt. Die maximal erreichte Verformung der Probekörpervarianten ist in Abbildung 25 zu sehen. Der direkte Vergleich zwischen den Proben FE-KG und G-KG zeigt eine verbesserte Lastübertragung durch die Verankerung. Der die Verformung limitierende Faktor der Proben mit Gitter (G-KG und G-GT) ist nicht die Lastübertragung zwischen Gitter und FKV, sondern die Festigkeit der Schweißpunkte im Gitter. Das Versagen der Proben mit Gitter ist in allen Fällen auf das Versagen eines Schweißpunktes im Gitter zurückzuführen. Ein erstes Versagen des schwächsten Schweißpunktes führt nachfolgend zu einer verstärkten Erhitzung des parallel geschalteten Drahtes und zum Versagen eines dieser Schweißpunkte durch die übermäßige Belastung. Die messtechnisch erfasste Unterbrechung des Stromflusses bestätigt diese Analyse.

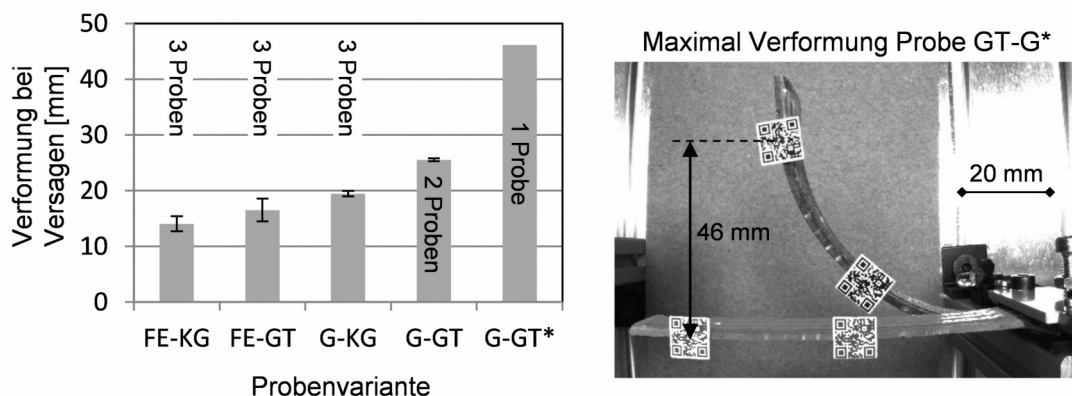


Abbildung 25: Maximale Verformung bei Versagen im Aktorikversuch zum Vergleich der Herstellungs- /Integrationsmethode; *G-GT: kein Schweißpunktversagen

Obwohl das Versagen der Schweißpunkttragfähigkeit geschuldet ist, zeigen die verbesserten Eigenschaften einer getemperten Matrix einen positiven Einfluss auf die maximal mögliche Verformung und ermöglichen eine um 32 % gesteigerte Verformung gegenüber den ungetemperten Proben mit Gitter. Auch bei den Proben mit freiem Ende lässt sich die maximale Verformung durch eine Temperung um 17 % erhöhen. Die limitierte Reproduzierbarkeit des Widerstandsschweißprozesses im Labor in Kombination mit dem Umstand, dass die schwächste Schweißung der acht Schweißpunkte im Gitter die Verformung der gesamten Probe limitiert, führt im

Versuch zu einer durchschnittlich nur mäßig verbesserten Leistung des Gitterkonzeptes. Die mögliche Lasttragfähigkeit wird dennoch eindrucksvoll von einer der Proben G-GT ohne Schweißpunktversagen (in Abbildung 25 mit G-GT* bezeichnet) demonstriert: Diese Probe erreicht mit einer Verformung von 46 mm eine Steigerung von 180 % gegenüber den getemperten Proben mit freiem Ende. Die Proben mit freiem Ende versagten stets im Randbereich, in dem es zur Ablösung der SMA-Drähte vom FKV kam.

Erst die limitierte Schweißpunktfestigkeit ermöglicht es, den Einfluss der Matrixeigenschaften auf die Lastübertragung besser zu verstehen. Die Versuchsergebnisse zeigen deutlich, dass bei identisch geschweißten Gitterpunkten mit einer getemperten Matrix eine höhere Verformung erreicht werden kann. Dies lässt sich mit einer Entlastung des Schweißpunktes durch eine höhere Tragfähigkeit des SMA-FKV-Interfaces erklären.

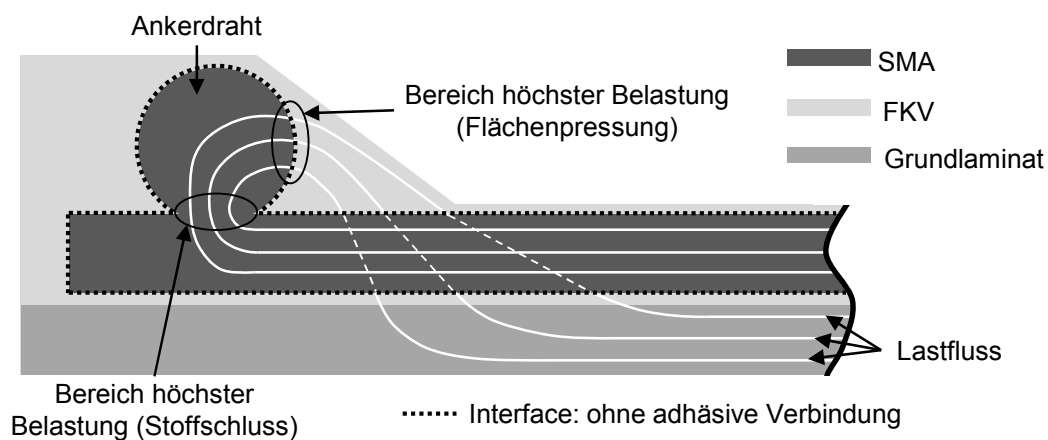


Abbildung 26: Lastfluss im Ankerbereich vom SMA-Draht zum Grundlaminat des Biegebalkens ohne Berücksichtigung einer Spannungsübertragung über das SMA-FKV-Interface

Der Lastfluss in Abbildung 26 skizziert die Situation, bei der das SMA-FKV-Interface keine Scherspannungen überträgt. Maximal belastet sind die stoffschlüssige Schweißverbindung zwischen den Drähten und der FKV-Keil durch die Flächenpressung in Folge des Formschlusses. Jede Lastübertragung über das Interface würde im Umkehrschluss zu einer Entlastung dieser Bereiche führen. Ohne eine detaillierte mikromechanische Betrachtung dieses Bereichs lassen sich jedoch keine weiteren

Erkenntnisse über vorhandene Synergieeffekte identifizieren. Der gezeigte Lastfluss verdeutlicht weiterhin, dass durch den kontinuierlichen Übergang vom Anker zum Grundlaminat und der damit einhergehenden Lastverteilung das Interface zum Grundlaminat hin nicht übermäßig belastet wird. Ein Versagen an der Grenzschicht zwischen Grundlaminat und FKV-Anbindung konnte auch in den Versuchen nicht beobachtet werden.

6. Simulative Abbildung der SMA-Aktorik

Ohne eine adäquate simulative Abbildung ist die Einführung neuer Technologien nur schwer zu erreichen. Die rechnergestützte Entwicklung ist heutzutage essentieller Bestandteil jeder Neuentwicklung. In diesem Kapitel wird ein Auslegungswerkzeug für das CAE (Computer Aided Engineering) vorgestellt. Dabei stehen für die Umsetzung wichtige Aspekte wie beispielsweise Aussagequalität und einfache Anwendung für Bauteile im Vordergrund.

6.1. Modellierung

Der in diesem Kapitel vorgestellte Modellierungsansatz soll die Aktorikeffekte von Ein- und Zwei-Weg-Effekt-Materialien abbilden. Eine Modellierung, die effizient auf Bauteilebene eingesetzt werden kann und die für den Auslegungsprozess notwendige hohe Genauigkeit liefert, wird durch die Fokussierung auf den Aktorikeffekt des SMA-Materials erreicht. Eine Beschreibung des SMA-Materials, die es ermöglicht den „aufgeheizten“ und „abgekühlten“ Zustand vorherzusagen, kann als zentrales Auslegungswerkzeug im Entwicklungsprozess genutzt werden.

6.1.1. Herleitung des Zustandslinienmodells

Der für die Aktorik verantwortliche Phasenübergang erster Ordnung zwischen monoklinem Martensit und kubischem Austenit kann mit der Landau-Theorie der Phasenübergänge beschrieben werden. Die Abhängigkeiten zwischen der freien Energie und der Temperatur bzw. der Dehnung werden mit einer Polynomfunktion angenähert. Ohne äußere Einflüsse befindet sich das System im Gleichgewicht und die Phasen sind stabil, wenn die freie Energie den niedrigsten Wert aufweist. Für ein unbelastetes System mit einer Phase und zwei energetisch identischen Zwillingsvarianten, welche symmetrisch zum Nullpunkt angeordnet sind, ergeben sich für unterschiedliche Temperaturen Kurven, wie sind in Abbildung 27 dargestellt sind. Die Verschiebung der Mimima von der Zwillingsphase, den Martensitvarianten, zur Phase 2, dem Austenit, begründet die Rückverformung beim Aufheizen in Abbildung 5. Der Abkühlvorgang von T_5 zu T_1 kann als makroskopisch verformungslose Umwandlung

eines Einkristalls aus dem Austenit zu anteilmäßig gleichermaßen ausgebildeten Martensitzwillingsphasen interpretiert werden. [82]

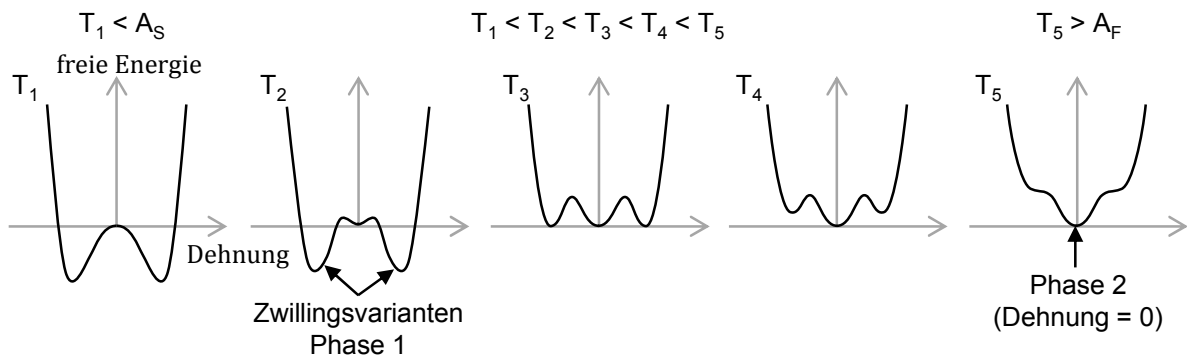


Abbildung 27: Freie Energie-Dehnungs-Kurven für einen Phasenübergang erster Ordnung nach Müller [82]

Bei der betrachteten Austenit-Martensit-Umwandlung führt eine äußere Last dazu, dass die Symmetrie zwischen den Zwillingsphasen nicht mehr gegeben ist und sich bevorzugt eine der beiden Varianten ausbildet. Dies geht mit einer starken Dehnungsänderung einher. [82] Stellt man die potentielle Energie des Systems dar, lässt sich eine externe Last durch die Addition einer linearen Potentialfunktion miteinbeziehen. Diese Addition führt zu einer Schrägstellung der Potentialmulden und beeinflusst, wie in Abbildung 28 a) zu sehen, die stabile Phase des Systems. [83,84]

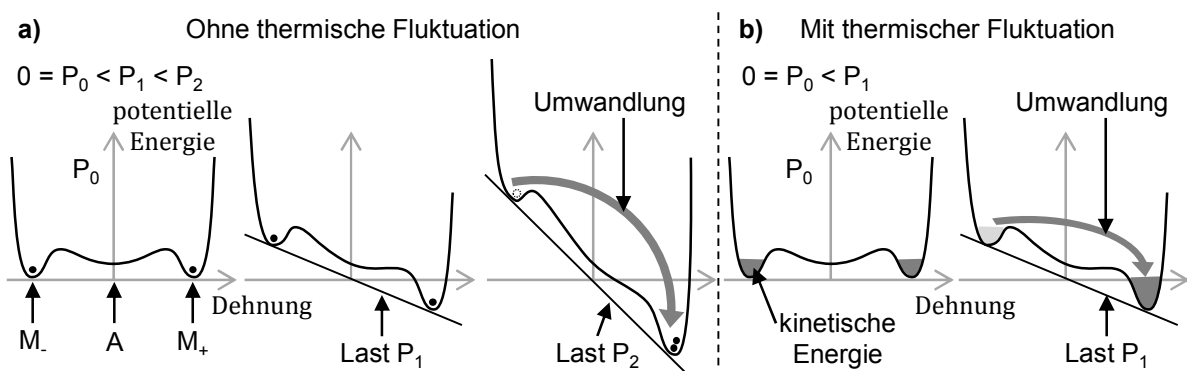


Abbildung 28: Potentielle Energie unter Last mit und ohne thermische Fluktuation nach Achenbach [83]

Bei steigender Temperatur werden die Barrieren zwischen den Minima der freien Energie kleiner (siehe Abbildung 27), sodass ein Wechsel der stabilen Phase bei

geringerer Last stattfindet kann. Bei Betrachtung der potentiellen Energie kann der Temperatureinfluss durch die thermische Fluktuation und der damit einhergehenden kinetischen Energie dargestellt werden. Abbildung 28 b) verdeutlicht, wie diese kinetische Energie zu einer Auslenkung um das lokale Minimum führt und eine Phasenumwandlung bei geringerer Last (P_1) auslöst. [83,84]

Überträgt man dieses Verhalten in den für die Aktorik interessanten Spannungs-Dehnungs-Raum, kann das Verhalten durch isotherme Belastungs-Entlastungs-Vorgänge auf entsprechende Hysteresen projiziert werden. Für einen idealen Einkristall ergeben sich dabei Kurven, wie sie in Abbildung 29 dargestellt sind.

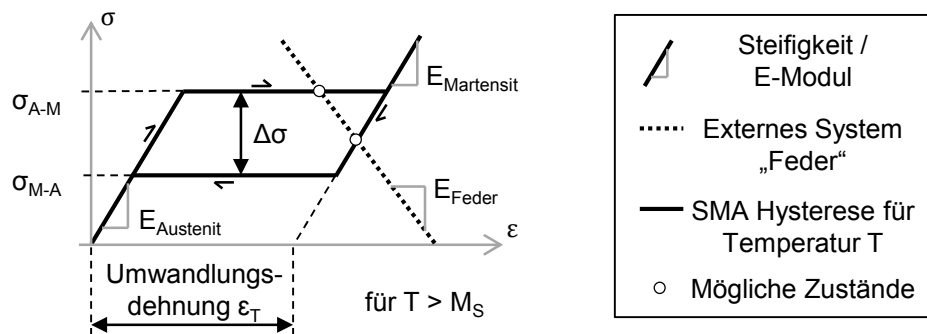


Abbildung 29: SMA-Hysterese und externes System „Feder“ im Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit den Hystereseparametern nach Furst et al. [14]

Das Modell von Furst et al. [14] beschreibt die dem SMA eigene Hysterese mit den in Abbildung 29 skizzierten Parametern. Dabei sind die Parameter Steifigkeit des Martensits E_M , Steifigkeit des Austenits E_A , die Umwandlungsdehnung ϵ_T und die Spannungsdifferenz zwischen den Umwandlungsspannungen $\Delta\sigma$ feste Werte. Durch die Ergänzung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens um ein externes System, z.B. einer Feder, kann der sich unter Belastung einstellende Zustand abgelesen werden. Die externe Last wird als Feder bzw. Steifigkeit angenommen, da auch beim Verformen eines FKV ein linear-elastisches Materialverhalten gegen die Aktorik arbeitet. Außerdem können Ein-Weg-Effekt-Materialien bei diesem Lastfall vielfältiger eingesetzt werden, wie es in Kapitel 6.2 erläutert wird.

Der Temperatureinfluss wird in der oben gezeigten Beschreibung von Furst et al. [14] durch die Verschiebung der Umwandlungsspannungen integriert. Die Umwandlungsspannung vom Austenit zum Martensit σ_{A-M} steigt linear mit der Temperatur T (vgl. Gleichung 6-1). Die ursprüngliche Umwandlungsspannung $\sigma_{A-M,0}$ steigt von einer Ausgangstemperatur T_0 mit dem Koeffizienten $d\sigma/dT$ linear an. Entsprechend dieser Änderung ergibt sich σ_{M-A} nach Gleichung 6-2 durch den Spannungs-Offset $\Delta\sigma$, welcher die Hysterese aufspannt.

$$[14] \quad \sigma_{A-M}(T) = \sigma_{A-M,0} + \frac{d\sigma}{dT} [T - T_0] \quad 6-1$$

$$[14] \quad \sigma_{M-A} = \sigma_{A-M}(T) - \Delta\sigma \quad 6-2$$

Für einen idealen Einkristall kann die Änderung der Phasenanteile bei Erreichen der temperaturabhängigen Umwandlungsspannung σ_{M-A} und σ_{A-M} als schlagartig angesehen werden, wie es die gezeigten Hysteresen in Abbildung 29 verdeutlichen. Um den modellhaften Übergang dem diskontinuierlichen Übergangs eines realen polykristallinen Materials anzunähern, können wie bei Furst et al. [14] stochastische Methoden, die an das spezifische Material und dessen Gefüge angepasst sind, zum Einsatz kommen.

Wie schon in Abbildung 29 gezeigt, kann der sich einstellende Zustand eines Systems aus SMA-Element und Feder am Schnittpunkt zwischen der Federsteifigkeitsgeraden und der SMA-Hysterese abgelesen werden. Die Darstellung im Spannungs-Dehnungs-Raum kann entsprechend verwendet werden, um den theoretischen Verlauf der aktivierten und abgekühlten Zustände beim Arbeiten gegen eine Steifigkeit zu bestimmen. Um eine Aufheizung darzustellen, wird die dem Material eigene Hysterese entsprechend Gleichung 6-1 zu höheren Spannungen und bei Abkühlung zu niedrigen Spannungen verschoben.

In Abbildung 30 ist der Weg eines Zwei-Weg-Effekt-Materials skizziert, welches gegen eine Federsteifigkeit arbeitet. Die eintrainierte Umwandlungsdehnung des Zwei-

Weg-Effekt-Materials spiegelt sich in der Breite der Hysterese wider. Diese Hysterese wird während der Temperaturschritte T_1 bis T_5 entsprechend einer Aufheizung nach oben verschoben und während der Temperaturschritte T_5 bis T_{10} einhergehend mit einer Abkühlung wieder nach unten verschoben.

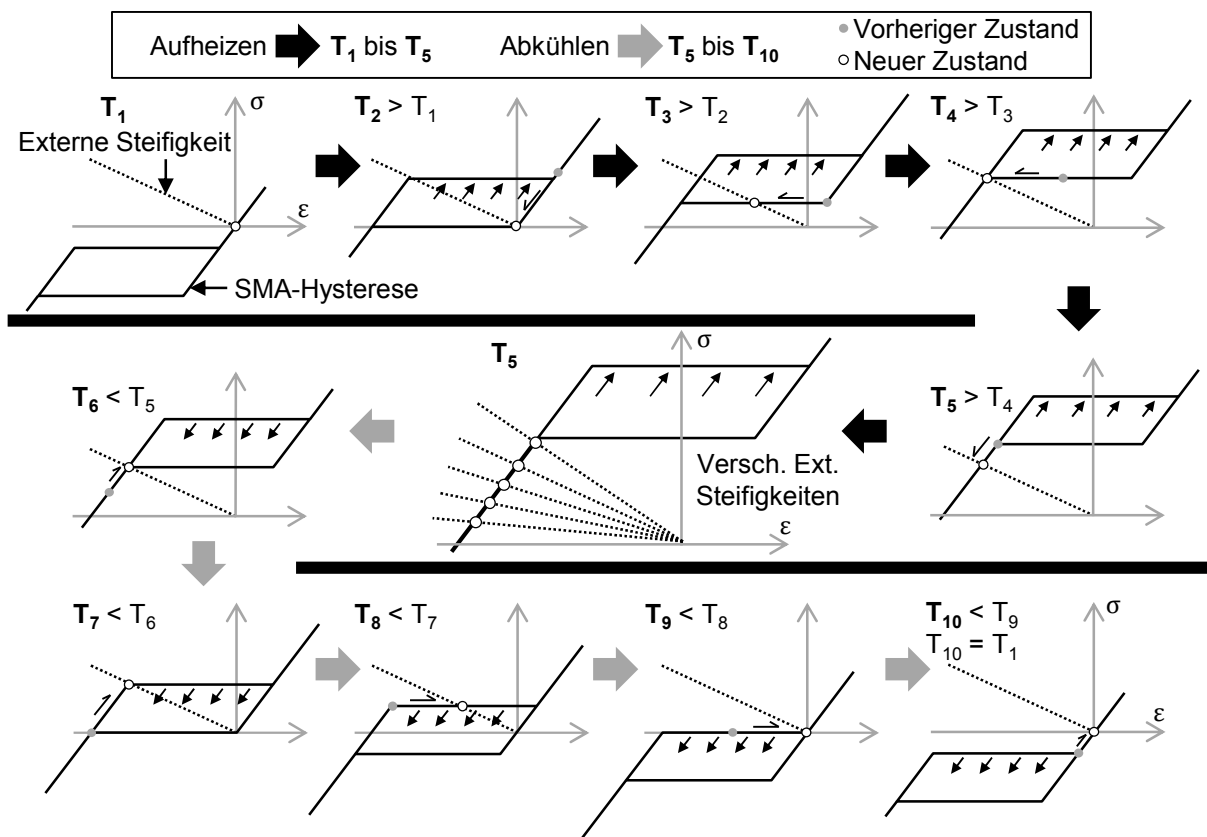


Abbildung 30: Hystereseverschiebung eines Zwei-Weg-Effekt-Materials beim Aufheizen und Abkühlen

Bei der Temperatur T_5 ist zu sehen, dass das Material für höhere externe Steifigkeiten einer höheren Temperatur für eine vollständige Umwandlung bedarf. Ist die vollständige Umwandlung sichergestellt, ist zu erwarten, dass die Endpunkte der Aktorik theoretisch auf einer Geraden liegen. Diese Gerade kann mit der Umwandlungsdehnung als x-Achsenabschnitt und der Steifigkeit des Austenits eindeutig beschrieben werden. Bei der vollständigen Abkühlung T_{10} und Umwandlung zu Martensit wird unabhängig von der Belastung der Ausgangspunkt wieder erreicht.

Für das Verständnis ist es sinnvoll, bei einem Ein-Weg-Effekt-Material den Vordehnungsvorgang, bei dem das Material entzwillingt wird, mit in die Betrachtung einzubeziehen. In Abbildung 31 wird das sich in der Martensitphase befindliche Material belastet und erreicht dann das Spannungsniveau für den Entzwillingungsvorgang. Beim Entzwillingen ϵ_2 bis ϵ_4 wird die bisher nicht vorhandene Hysterese sukzessive aufgespannt und das Aktorikpotential erhöht. Die nach dem Entlasten verbleibende Dehnung kann als Umwandlungsdehnung betrachtet werden. Mit einer Verschiebung des Nullpunktes auf das aktuell eingebrachte Dehnungsniveau sieht die Ausgangssituation ähnlich aus wie die des Zwei-Wege-Effekt-Materials.

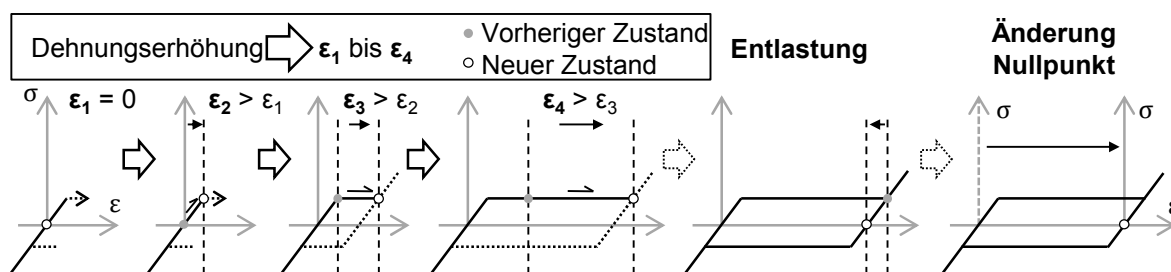


Abbildung 31: Aufspannen der Hysterese beim Vordehnen eines Ein-Weg-Effekt-Materials

Auch wenn die aufgespannte Hysterese in der Realität mit einem Ein-Weg-Effekt-Material nicht durchlaufen werden kann, gibt sie in Abbildung 32 Aufschluss über das Verhalten gegenüber einer Steifigkeit. Während der Temperaturschritte T_1 bis T_5 wird das Material aufgeheizt und die Hysterese verschiebt sich zu höheren Spannungen. Bei T_5 stellen sich zum Zwei-Weg-Effekt-Material identische Zustände ein, die auf einer Geraden liegen. Beim Abkühlen von T_5 bis Temperatur T_8 , der Ausgangstemperatur, verschiebt sich die Hysterese wieder zurück zur ursprünglichen Position. Bei der Temperatur T_8 befindet sich die Hysterese allerdings noch nicht vollständig in negativen Spannungsbereich und die Rückumwandlung zum Martensit findet für niedrige Steifigkeiten überhaupt nicht statt. Für hohe Steifigkeiten erfolgt die Umwandlung nur teilweise, da die Zustände auf dem oberen Hystereseplateau verbleiben.

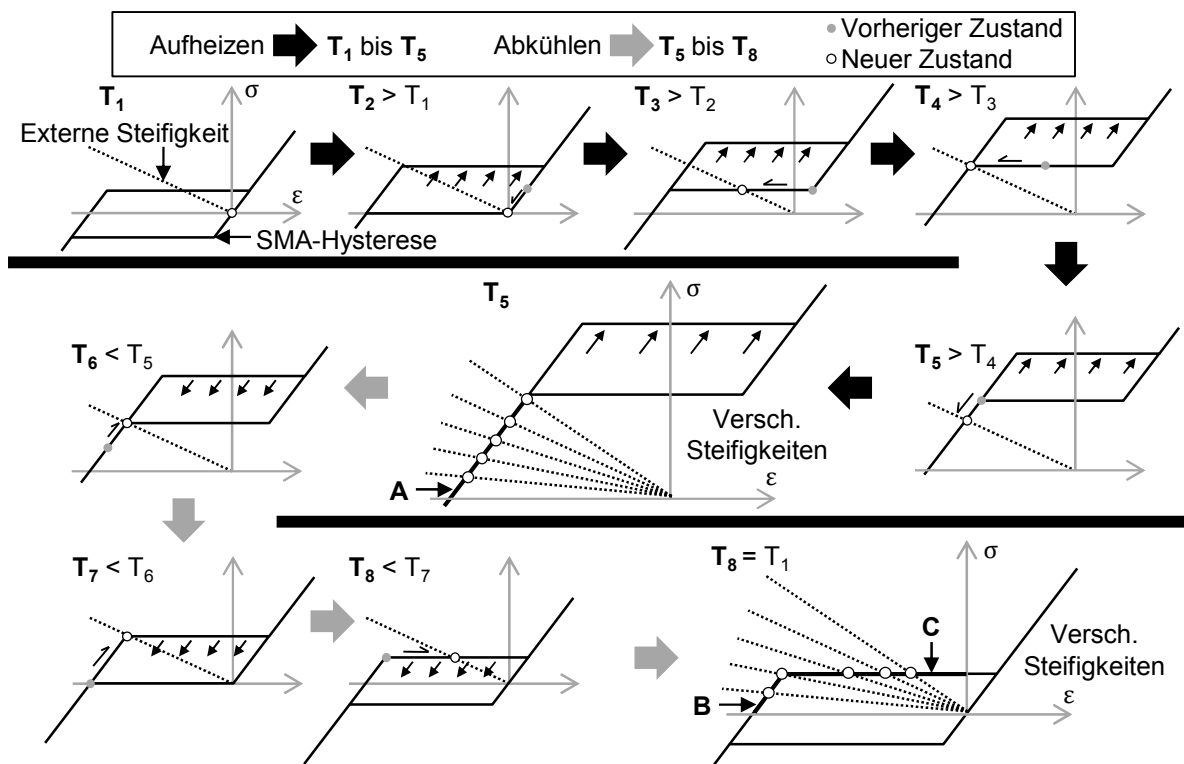


Abbildung 32: Hystereseverziehung eines Ein-Weg-Effekt-Materials beim Aufheizen und Abkühlen

Wie bei einem Zwei-Weg-Effekt-Material stellt sich bei vollständiger Umwandlung (T_5) unabhängig von der Federsteifigkeit eine Gerade (A) ein. Beim Abkühlvorgang bis zur Ausgangstemperatur (T_8) verbleiben die Endzustände innerhalb der Hysterese und erreichen erwartungsgemäß nicht die Ausgangsposition. Die Endpunkte sind auf die zwei Geraden B und C verteilt, die Gerade B folgt der Steifigkeit des Austenits und die Gerade C liegt horizontal auf einem konstanten Spannungsniveau.

Zusammenfassend für die beiden Materialtypen sind in Abbildung 33 die Zustandslinien bei der Arbeit gegen eine Steifigkeit gezeigt. Wie zuvor diskutiert, sind für ein reales polykristallines Material kontinuierliche Übergänge anzunehmen. Diese Übergänge können dazu führen, dass die Aktorik für eine bestimmte Maximaltemperatur bei hohen Steifigkeiten von einer idealen Gerade abweicht, weil die Hysterese noch nicht ausreichend weit nach oben geschoben wurde. Im abgekühlten Zustand für das Ein-Weg-Effekt-Material kann es außerdem zu einem Verwischen des Übergangs zwischen der E-Modul-Geraden und des horizontalen Spannungsplateaus kommen.

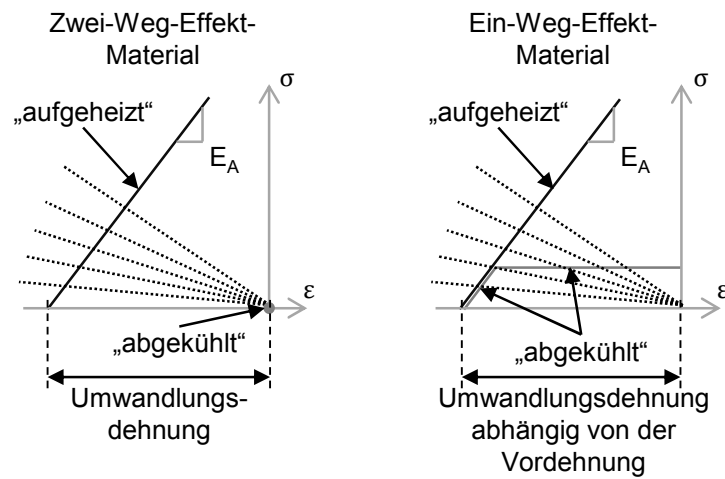


Abbildung 33: Zustandslinien für den aufgeheizten und abgekühlten Zustand bei der Arbeit gegen eine Steifigkeit für Ein- und Zwei-Weg-Effekt-Material

6.2. Charakterisierung

Grundlage jeder aussagkräftigen Simulation sind belastbare Materialkennwerte für die beteiligten Materialien. Je komplexer der Zusammenhang zwischen Materialkennwert und abgebildeten makroskopischem Effekt ist, desto größer ist auch die zu erwartende Abweichung zwischen Simulationsergebnis und realem Verhalten. Wenn eine hohe Genauigkeit der Vorhersage im Vordergrund steht, ist es sinnvoll, Kennwerte so präzise und so realitätsnah wie möglich zu ermitteln. Im Fall der SMA kann prinzipiell das gesamte Verhalten inklusive Aktorik, Superelastizität und mechanischer Reaktion über wenige essentielle Materialkennwerte wie Module, Dehnungs- und Temperaturhysteresen vollständig beschrieben werden. Die kausalen Zusammenhänge und die wechselnden Umgebungsbedingungen, die im Anwendungsfall zur tatsächlichen Aktorik führen, sind in der Realität sehr komplex und es ergeben sich starke Abweichungen zum theoretisch vorhergesagten Verhalten. Durch die Konzentration auf den relevanten Aktorikeffekt und die Bestimmung der unmittelbaren Materialreaktion unter anwendungsnahen Randbedingungen lässt sich die Aussagekraft signifikant verbessern.

Vor dem Hintergrund der vorangegangenen Modellierung bedeutet dies, dass der Fokus auf der Aktorik-Komponente des Materialverhaltens liegt und dass die Belastungsart anwendungsnah als Steifigkeit simuliert wird. Im Gegensatz zu den aus der Literatur bekannten SMA-Charakterisierungen findet die Charakterisierung nicht bei konstanter Last statt, sondern die SMA-Aktorik muss gegen eine Steifigkeit arbeiten. Dieser Lastfall entspricht dem Belastungstyp beim Verformen einer FKV-Struktur im elastischen Bereich. Zusätzlich bietet dieser Belastungstyp die Möglichkeit, nur teilweise vorgedehnte Ein-Weg-Effekt-Elemente bis auf Lastniveaus oberhalb der Entzwilligungs-Spannung zu charakterisieren, wie es in Abbildung 34 verdeutlicht ist. Für einen statischen Lastfall muss das gesamte Dehnungspotential durchschritten werden, um überhaupt eine Spannung oberhalb der Plateauspannung aufbringen zu können. Im Falle des Steifigkeitslastfalls ist es auch mit einem nur teilweise vorgedehnten Material in Kombination mit einer ausreichend hohen Federsteifigkeit mög-

lich, Maximalspannungen über der Plateauspannung zu erreichen. Auf diesem Wege kann der erfasste Aktorikraum wesentlich erweitert werden.

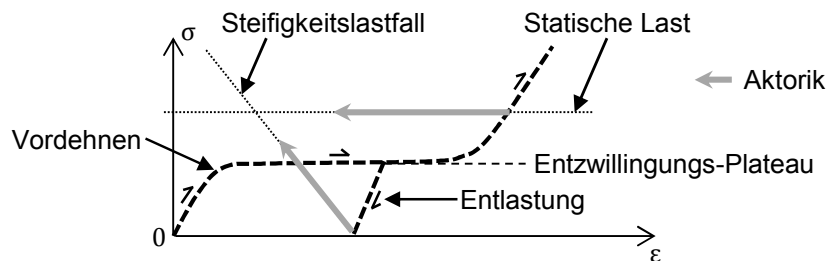


Abbildung 34: Vergleich zwischen statischer Last und Steifigkeitslastfall

Dem Modellierungsansatz in Kapitel 6.1 folgend können für das jeweilige Material die relevanten Zustandslinien durch Aktorikversuche gegen verschiedene Steifigkeiten ermittelt werden, weshalb diese Versuche den Kern der experimentellen Aktorikcharakterisierung bilden.

6.2.1. Charakterisierungsversuche

Für die Charakterisierung kommt die in Kapitel 4.2.1 beschriebene Mess- und Steuerungseinheit mit dem Aufbau für den Steifigkeitslastfall zum Einsatz. Es wird für jeden Aktorikversuch derselbe Versuchsablauf eingehalten.

Es wird das Aktorikverhalten von zwei Ein-Weg-Effekt-Materialien, Alloy M und Alloy H, sowie einem Zwei-Weg-Effekt-Material, SmartFlex[®], charakterisiert, indem der SMA-Draht gegen die Steifigkeit einer Druckfeder arbeiten muss. Neben der Variation der Steifigkeit wird die Vordehnung der Ein-Weg-Effekt-Materialien variiert, um auch den Einfluss dieser Variablen abschätzen zu können und ihn für die Auslegung nutzbar zu machen. Wie sich die Vordehnungsniveaus über das Entzwilligungsplateau verteilen, zeigt Abbildung 35.

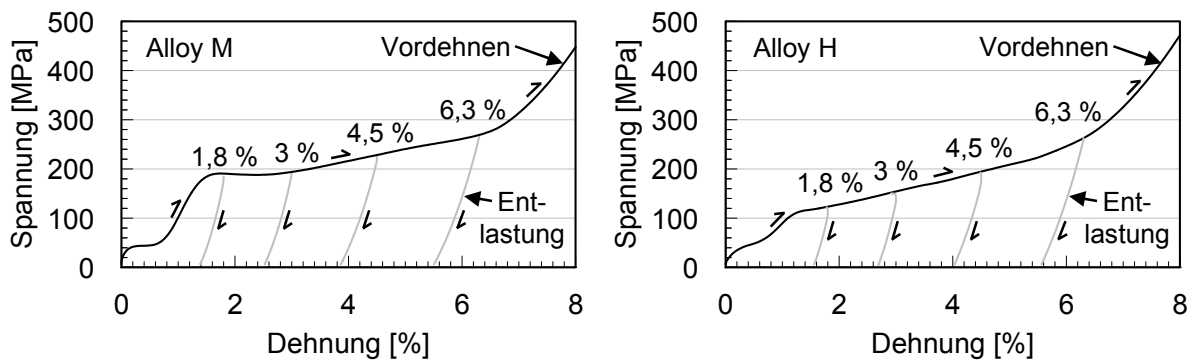


Abbildung 35: Verteilung der Vordehnungsniveaus bei Alloy M und Alloy H

Es verringert sich die nominelle Vordehnung, die unter Last angefahren wird, wieder um einen gewissen Anteil bei der Entlastung. Die zurückbleibende Vordehnung ist die im Material verbleibende Dehnung nach dem Entlasten. Tabelle 13 liefert einen Überblick über das im Folgenden untersuchte Aktorikspektrum aller drei SMA-Materialien. Die absolute Differenz zwischen nomineller und zurückbleibender Dehnung wächst erwartungsgemäß mit größerer Vordehnung, da auch das erreichte Spannungsniveau ansteigt (vgl. Abbildung 35). Die nominelle Steifigkeit ist die theoretisch gegen die SMA-Aktorik wirkende Steifigkeit, welche sich aus Drahtlänge, Querschnitt und Federkonstante errechnen lässt. Die Steifigkeitswerte sind für höhere Vordehnungen geringer, da mit der kürzeren Drahtlänge die prozentuale Belastung durch die gleiche Feder sinkt.

Tabelle 13: Vordehnungen und Steifigkeiten der Aktorikcharakterisierungsversuche

Material		Alloy M				Alloy H				SF
nominelle Vordehnung	[%]	1,8	3	4,5	6,3	1,8	3	4,5	6,3	/
zurückbleibende Vordehnung	[%]	1,39	2,52	3,86	5,51	1,56	2,70	4,09	5,65	/
Anzahl Federn		9	9	9	9	11	11	11	11	9
max. nominelle Steifigkeit	[MPa/%]	685	599	343	257	685	599	343	257	1028
min. nominelle Steifigkeit	[MPa/%]	19	17	9,7	7,3	19	17	9,7	7,3	29

6.2.2. Aktorikperformance

6.2.2.1. Ein-Weg-Effekt-Material

Das Resultat eines einzelnen Aktorikversuchs ist exemplarisch in Abbildung 36 gezeigt. In Abbildung 36 a) ist zu sehen, wie sich der wärmer werdende Draht von dem entsprechenden Vordehnungsniveau (Punkt 1) aus zusammenzieht und entsprechend der angelegten Steifigkeit mit einer steigenden Spannung belastet wird (Punkt 2).

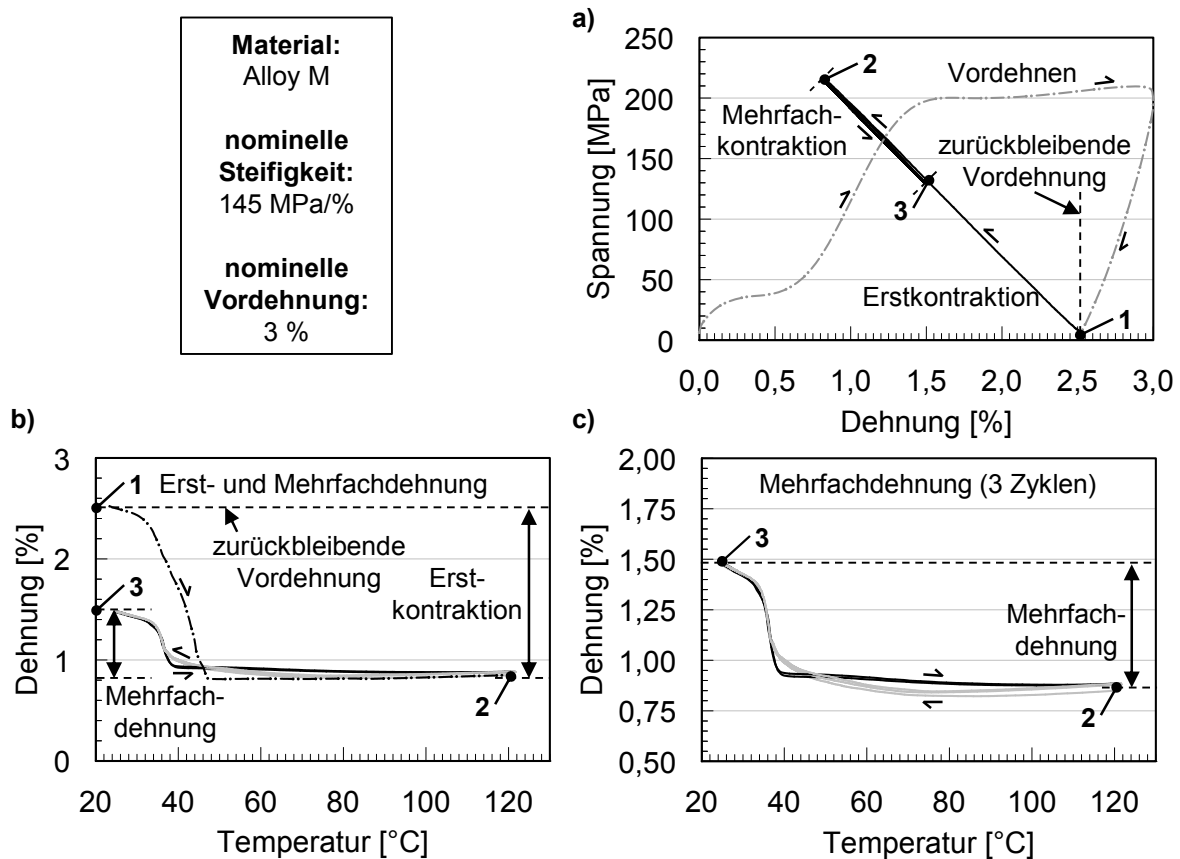


Abbildung 36: Spannungs-Dehnungs-Diagramm und Dehnungs-Temperatur-Diagramm eines Aktorikversuchs am Ein-Weg-Effekt-Material Alloy M

Entsprechend Abbildung 36 b) beginnt die Kontraktion langsam, findet im Bereich der Umwandlungstemperatur beschleunigt statt und verlangsamt sich anschließend wieder. Eine weitere Erwärmung kann nach der vollständigen Umwandlung zu einer

Ausdehnung entsprechend des thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Austenits führen. In allen Versuchen wurde sichergestellt, dass die Kontraktion bei der Maximaltemperatur bis in den stark verlangsamten Bereich abgerufen wurde. Während des Abkühlens verlängert sich der unter Spannung stehende Ein-Weg-Effekt-Draht wieder (Punkt 3). Auch wenn es sich um ein Ein-Weg-Effekt-Material handelt, kann ein lastinduzierter Zwei-Weg-Effekt genutzt werden, um eine Mehrfachdehnung abzurufen, wie sie in Abbildung 36 c) dargestellt ist. Beim Abkühlen unter Last bilden sich Bereiche entzwilligten Martensits, die bei erneutem Aufheizen wieder in den Austenit übergehen und sich erneut kontrahieren.

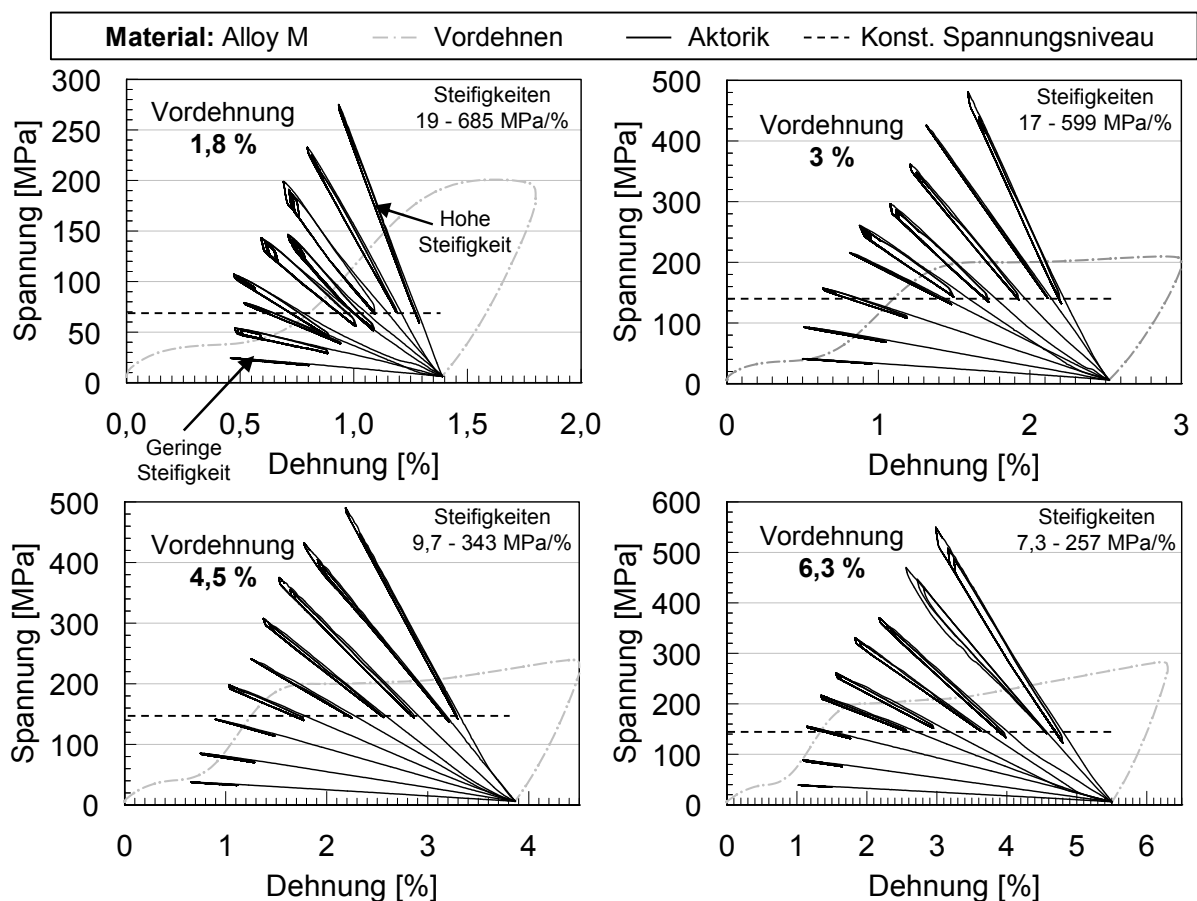


Abbildung 37: Aktorikversuche Alloy M bei verschiedenen Vordehnungen und gegen verschiedene Steifigkeiten je drei Zyklen

Von Interesse für die Aktorikfunktionen sind der Zusammenhang zwischen erzielbarer Dehnung und der wirkenden Steifigkeit sowie der Einfluss der Vordehnung auf die Aktorik. Abbildung 37 zeigt das komplette aktuatorisch relevante Verhalten des Ein-

Weg-Effekt-Materials Alloy M. Deutlich ist ein zweigeteilter, systematischer Einfluss der Steifigkeit zu erkennen. Während sich bei geringen Steifigkeiten die Dehnungen der Erstkontraktion und der Mehrfachkontraktion nur geringfügig ändern, ändern sich die Dehnungen bei höheren Steifigkeiten signifikant und es bildet sich ein konstantes Spannungsniveau bei ca. 150 MPa im abgekühlten Zustand aus. Die Vordehnung 1,8 % bildet eine Ausnahme mit geringerem Spannungsniveau. Unter Beachtung der sich ändernden Achsenskalierung in Abbildung 37 ist zu erkennen, dass die Vordehnung direkt im Zusammenhang mit den erreichbaren Aktorikdehnungen steht. Die Mehrfachdehnung bei geringen Steifigkeiten hingegen wird nur geringfügig von der Vordehnung beeinflusst. Im Falle der Erstkontraktion von Alloy M lässt sich über eine zurückbleibende Vordehnung von 5,5 % eine Kontraktion von bis zu 4,5 % erzielen oder bei hoher Steifigkeit eine Kontraktion von 2,5 % bei gleichzeitig 500 MPa Spannung. Die Mehrfachdehnung bei Steifigkeiten, welche weniger als 150 MPa Spannung erzeugen, bewegt sich unabhängig von der Vordehnung im Bereich von ca. 0,5 % Dehnung.

Für Alloy H zeigt sich im Spannungs-Dehnungs-Bereich eine sehr ähnliche Situation, wie Abbildung 38 verdeutlicht. Größere Unterschiede lassen sich erwartungsgemäß in der benötigten Temperatur zur Abrufung des Effektes feststellen: Die höhere Umwandlungstemperatur führt dazu, dass zum Abruf des vollen Aktorikpotentials bei hohen Steifigkeiten teils 160 °C benötigt werden, 40 °C mehr als bei Alloy M. Außerdem liegt das Spannungsniveau, auf welches das Material nach dem Abkühlen gegen hohe Steifigkeiten zurückkehrt, unterhalb von 100 MPa. Wieder bildet die Vordehnung von 1,8 % eine Ausnahme mit geringerem Spannungsniveau. Es ist zu vermuten, dass bei geringer Vordehnung der Anteil des entzwilligten Martensits, der sich aus der Zwischenphase bildet, vergleichsweise groß ist.

Das gemessene Aktorikverhalten zeigt die hohe Leistungsfähigkeit der SMA-Materialien und verdeutlicht, wie der Aktor über die Vordehnung und die angelegte Steifigkeit für die individuelle Anwendung angepasst werden kann.

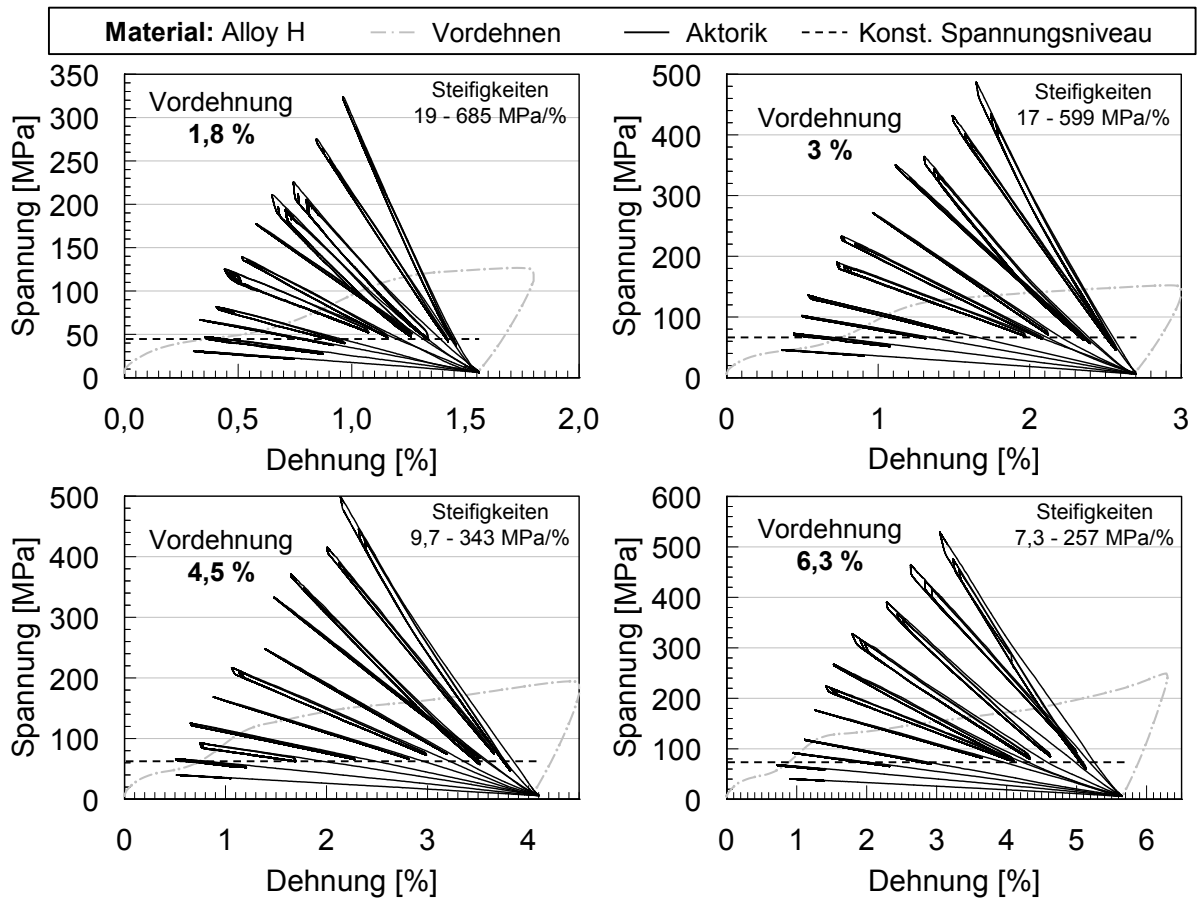


Abbildung 38: Aktorikversuche Alloy H bei verschiedenen Vordehnungen und gegen verschiedene Steifigkeiten je drei Zyklen

6.2.2.2. Zwei-Weg-Effekt-Material

Das prinzipielle Verhalten des Zwei-Weg-Effekt-Materials unterscheidet sich zu dem vorgestellten Ein-Weg-Effekt-Material hauptsächlich darin, dass es auch ohne äußere Last beim Abkühlen bestrebt ist, die Ausgangslänge wieder anzunehmen.

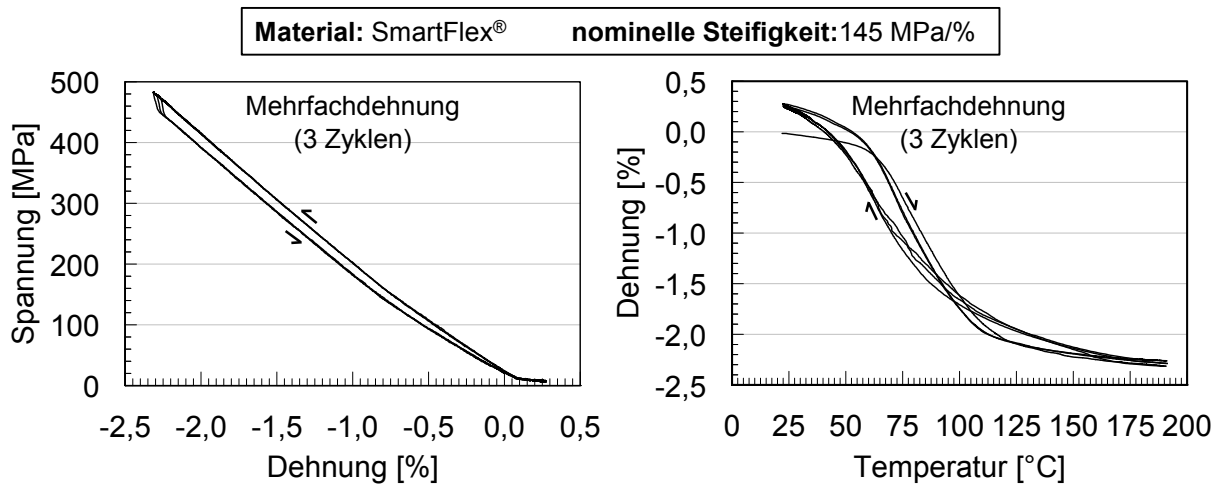


Abbildung 39: Spannungs-Dehnungs-Diagramm und Dehnungs-Temperatur-Diagramm eines Aktorikversuchs am Zwei-Weg-Effekt-Material

Wie in Abbildung 39 gezeigt, kehrt das Material bei der Abkühlung ohne eine bleibende Kontraktion wieder zur ursprünglichen Länge zurück. Da die Vordehnung als Einflussparameter wegfällt, bleibt nur der Einfluss der Steifigkeit zu untersuchen. Das Aktorikverhalten für ein breites Spektrum an Steifigkeiten zeigt Abbildung 40.

Für die maximale Kontraktion bei 180 °C ist ein linearer Zusammenhang zwischen Dehnung und Spannung zu erkennen. Im abgekühlten Zustand (siehe * in Abbildung 40) erreicht das SmartFlex®-Material die Ausgangslänge oder überschreitet diese sogar. Wenn der Draht am Versuchsstart bei Raumtemperatur nicht vollständig als Martensit vorliegt, kann es zu diesem Verhalten kommen. Beim Versuch, während des Abkühlprozesses und des größten Teils der Umwandlung vom Austenit zu Martensit ist die Umwandlungstemperatur durch die vorherrschende Spannung nach oben verschoben und unterstützt eine vollständige Umwandlung zum Martensit im Gegensatz zur spannungsfreien Umwandlung bei der Vorbereitung der Drahtproben.

Außerdem wird die Verlängerung dadurch begünstigt bzw. ermöglicht, dass der Versuchsaufbau der Verlängerung keine Kraft entgegensetzt. In der Anwendung würden hier Druckspannungen die Verlängerung reduzieren bzw. verhindern.

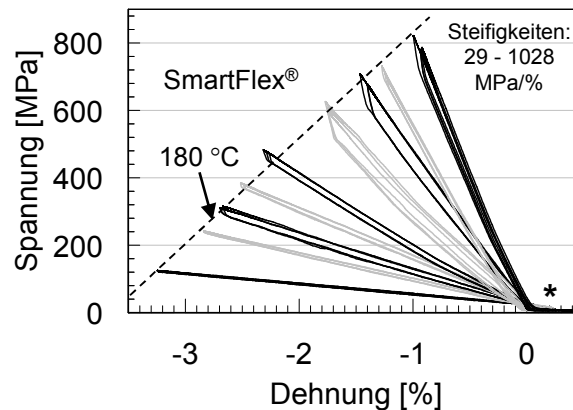


Abbildung 40: Aktorikversuche SmartFlex® gegen verschiedene Steifigkeiten je drei Zyklen

Die mögliche Aktorikleistung wird mit den beiden Extremfällen, hoher und geringer Steifigkeit, demonstriert. Es ergeben sich bei einer hohen Steifigkeit von 1028 MPa/% eine Spannung von 800 MPa bei ca. 1 % Kontraktion und bei geringer Steifigkeit von 29 MPa/% mehr als 3 % Kontraktion.

6.2.3. Analytische Beschreibung der Zustandslinien

Die Modellierung aus Kapitel 6.1 wird hier mit den Messdaten aus den Charakterisierungsversuchen zusammengeführt. Mit einer kompakten analytischen Beschreibung in Anlehnung an das entwickelte Modell werden die gemessenen Kurven in übertragbare Kennwerte überführt. Außerdem werden Abweichungen zwischen theoretischen Betrachtungen und realen Messungen diskutiert. Aufgrund des einfacheren Verhaltens wird zunächst das Zwei-Weg-Effekt-Material betrachtet.

6.2.3.1. Zwei-Weg-Effekt-Material

Entsprechend der in Kapitel 6.1 vorgenommenen theoretischen Betrachtung kann davon ausgegangen werden, dass bei der Arbeit gegen verschiedene Steifigkeiten

und vollständiger Umwandlung zum Austenit die erreichten Endpunkte im Spannungs-Dehnungs-Diagramm auf einer Geraden liegen. Die beiden Isothermen für 150 °C und 180 °C in Abbildung 41 a) bestätigen diese Annahme und zeigen, dass in dem untersuchten Steifigkeitsbereich 150 °C ausreichend sind, um annähernd vollständig das Aktorikpotential abzurufen. Für geringe Steifigkeiten reichen 100 °C aus, um einen Großteil der Aktorik abzurufen, da die Hysterese bereits ausreichend weit zur höheren Spannungen hin verschoben wurde. Für hohe Steifigkeiten ist die Umwandlung zum Austenit noch nicht abgeschlossen und es stellt sich ein einigermaßen konstantes Spannungsniveau ein, da sich die Zustandspunkte noch auf dem unteren horizontalen Teil der Hysterese befinden. Um dieses Wissen für den Einsatz nutzen zu können, wird die Temperaturstufe 100 °C im Folgenden mit betrachtet. Die Verformungszustände bei 100 °C unterteilen sich in einen Bereich unterhalb von 335 MPa und 2,2 % erreichter Dehnung und in einen Bereich oberhalb. In beiden Bereichen können die Zustände mit einer Geraden beschrieben werden. Die Gerade für höhere Steifigkeiten ist wesentlich flacher, liegt aber nicht vollständig horizontal, wie es der untere Teil der Hysterese in der Einkristall-Betrachtungen nahelegt (vgl. Abbildung 30, Temperatur T_4).

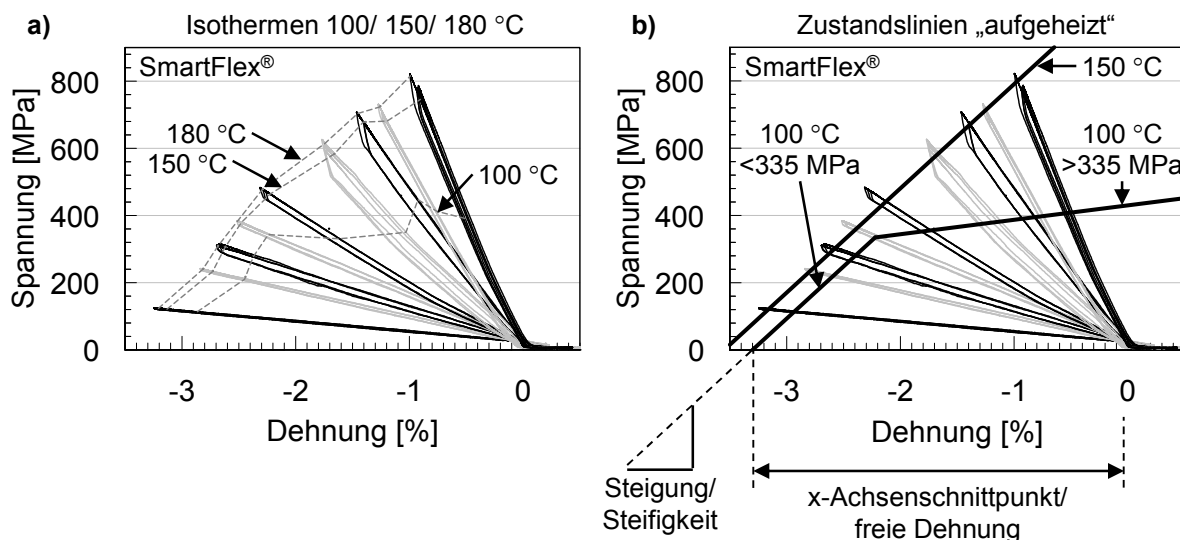


Abbildung 41: Isothermen und Zustandslinien der Aktorik von SmartFlex®

Im Vergleich zum statischen Lastfall mit bis zu 5 % Dehnung [12] zeigt das Material im hier untersuchten Steifigkeitslastfall eine geringere Dehnung von ca. 3,5 %. Für

das reduzierte Dehnungspotential gegenüber anderen Messungen kann eine unvollständige Rückumwandlung bei 25 °C verantwortlich sein, wofür auch das Überschreiten der Ausgangslage ein Indiz ist. Weiterhin zeigt es sich, dass die Steifigkeit mit 31 GPa wesentlich geringer ist als die der Theorie nach zu erwartende Steifigkeit des Austenits von ca. 75 GPa [14]. Ursächlich hierfür kann die Addition mehrerer in der theoretischen Betrachtung nicht berücksichtigter Effekte sein. So wurde die klassische Temperatúrausdehnung des Austenits, die Temperaturabhängigkeit der Steifigkeit des Austenits und der durch die Polykristallinität erzeugte Übergang vernachlässigt. Dennoch spiegeln die Charakterisierungsversuche das für die Anwendung relevante Verhalten wider, welches vereinfacht über die in Abbildung 41 b) skizzierten Zustandslinien modelliert werden kann. Die charakterisierenden Daten der Zustandslinien sind in Tabelle 14 einzusehen. Der x-Achsenabschnitt der Geraden kann als freie Dehnung interpretiert werden und die Steigung als Steifigkeit des SMA-Materials für die jeweilige Temperatur bzw. den jeweiligen Spannungsbereich.

Tabelle 14: Kennwerte der Zustandslinien „aufgeheizt“ von SmartFlex® für 100 °C und 150 °C

SmartFlex®			x-Achsenabschnitt	Steigung
Temperatur	Spannungsbereich	Umwandlung	freie Dehnung	Steifigkeit
[°C]	[MPa]		[%]	[GPa]
150	$\sigma < 800$	vollständig	-3,55	31
100	$\sigma < 335$	vollständig	-3,2	31
100	$335 < \sigma < 800$	unvollständig	-10	4,3

6.2.3.2. Ein-Weg-Effekt-Material

Identisch zum Zwei-Weg-Effekt-Material sollte die Zustandslinie „aufgeheizt“ des vollständig aktivierten Materials eine Gerade bilden. Die Zustandslinie für den abgekühlten Zustand sollte aus einer gleichermaßen ansteigenden Geraden und ab einer bestimmten Spannung aus einer Horizontalen zusammengesetzt sein.

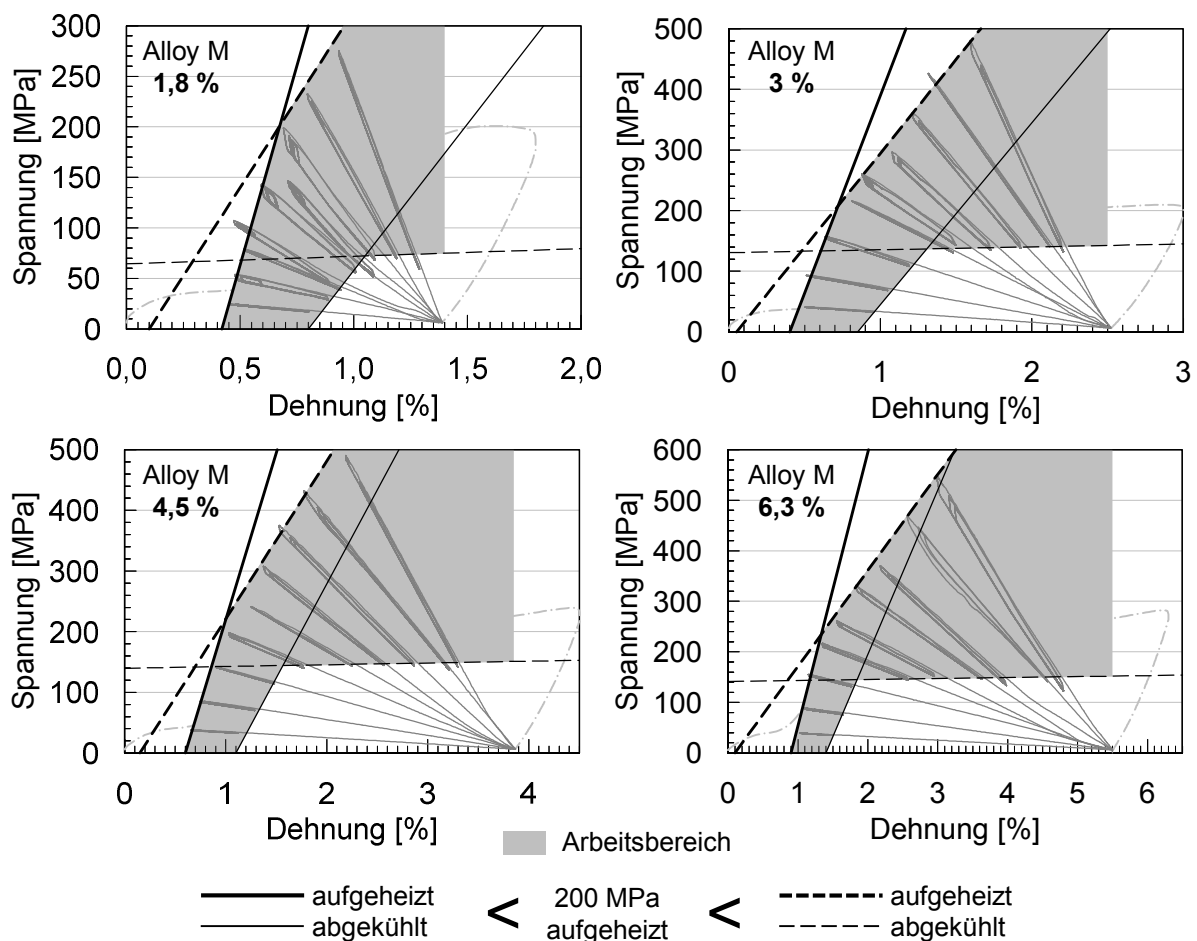


Abbildung 42: Arbeitsbereich des lastinduzierten Zwei-Weg-Effektes und Zustandslinien der Aktorik von Alloy M mit verschiedenen Vordehnungen

Abbildung 42 zeigt, dass es für Alloy M bei allen Vordehnungen notwendig ist, die Zustandslinie „aufgeheizt“ in zwei Bereiche zu teilen, damit die Abweichungen zwischen modellierter Zustandslinie und der Realität in einem für die Auslegung akzeptablen Rahmen bleiben. Die Grenze des zweigeteilten Verhaltens kann über die er-

reichte Spannung im aufgeheizten Zustand beschrieben werden. Für Alloy M liegt diese Grenze bei 200 MPa.

Diese Grenze lässt sich ohne große Abweichungen auch für die erwartete Teilung des abgekühlten Zustandes verwenden, so dass die gesamte Modellierung für Alloy M in einen Bereich oberhalb und unterhalb dieser Grenze aufgeteilt werden kann. Die prinzipielle Gestalt der Zustandslinie „abgekühlt“ entspricht der erwarteten Form: Es ergibt sich ein sehr flacher Bereich bei Steifigkeiten, die im aufgeheizten Zustand mehr als 200 MPa erzeugen. Die Zustandslinie für geringe Steifigkeiten ist nicht, wie es die Einkristallbetrachtungen nahelegen (vgl. Abbildung 33), identisch zum aufgeheizten Zustand. Zum Einen zeigt sich eine Verschiebung in Form einer mehrfach abrufbaren Aktorik und zum Anderen ist die Steifigkeit geringer als die des aufgeheizten Zustandes bzw. des Austenits. Der eigentlich kontinuierliche Übergang eines realen polykristallinen Materials von der Austenitsteifigkeit in die oberen Horizontale der Hysterese kann verantwortlich für diese Abweichungen sein. Die Diagramme in Abbildung 43 zeigen für Alloy H ein ähnliches Verhalten.

Auch hier ist es notwendig, den „aufgeheizten“ Zustand über zwei Geraden zu beschreiben, um die Abweichungen auf ein akzeptables Maß zu senken. Die Spannung im „aufgeheizten“ Zustand, bei der eine Zweiteilung sinnvoll ist, liegt bei Alloy H bei 130 MPa.

In Abbildung 44 und Abbildung 45 sind für jede Legierung die Zustandslinien der einzelnen Vordehnungen zusammengefasst, indem ihr Ursprung auf den Ausgangspunkt der Aktorik geschoben wurde. An den Zustandslinien „aufgeheizt“ ist deutlich das mit zunehmender Vordehnung anwachsende Aktorikpotential zu erkennen. Bei beiden Legierungen stellt die Zustandslinie „abgekühlt“ für die geringste Vordehnung von 1,8 % eine Ausnahme dar. Das Spannungsniveau des horizontalen Anteils liegt wesentlich tiefer als bei den höheren Vordehnungen. Dass dieser Bereich der geringen Vordehnung ein leicht anderes Aktorikverhalten zeigt, kann dadurch begründet werden, dass bei sehr geringen Vordehnungen hauptsächlich die Umwandlung von und zur Zwischenphase für die Aktorik verantwortlich ist.

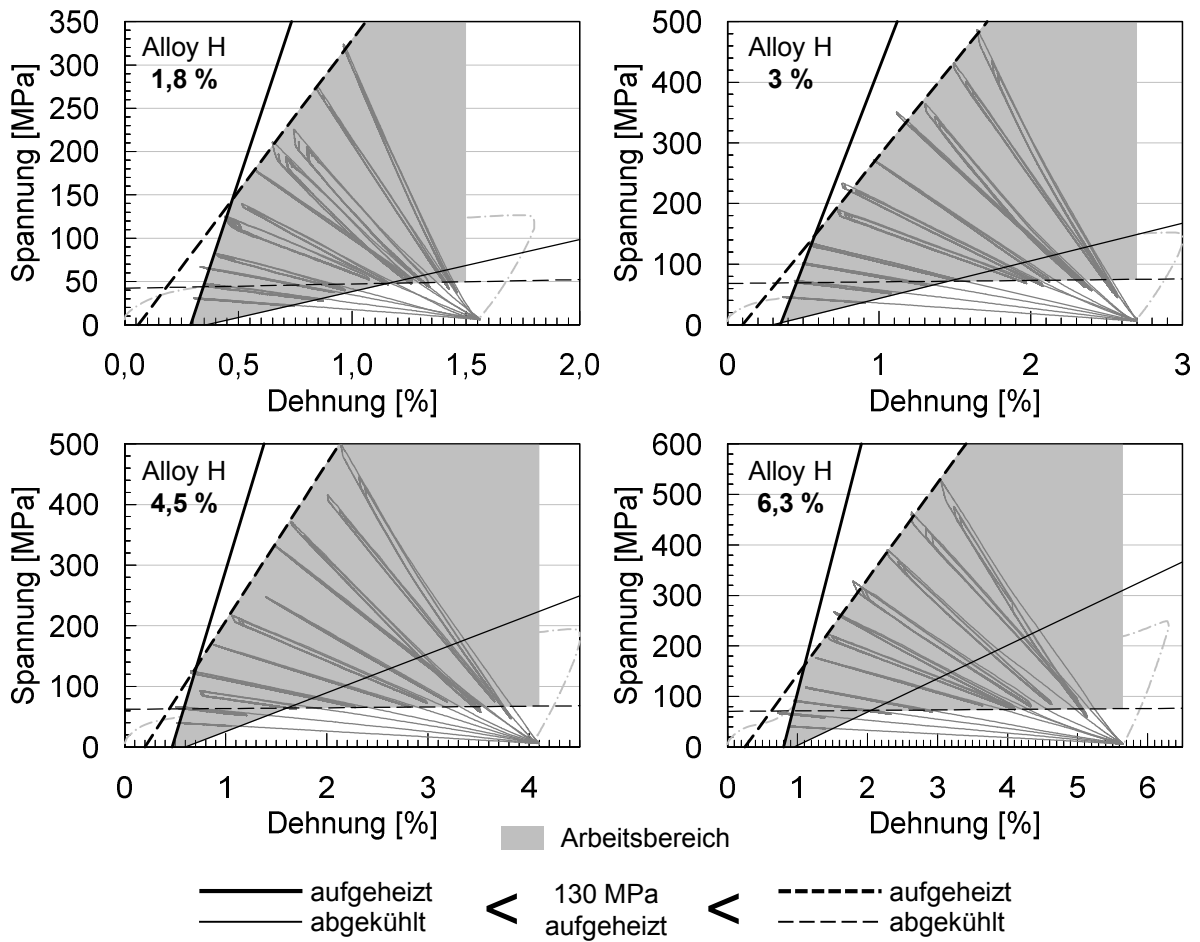


Abbildung 43: Arbeitsbereich des lastinduzierten Zwei-Weg-Effektes und Zustandslinien der Aktorik von Alloy H mit verschiedenen Vordehnungen

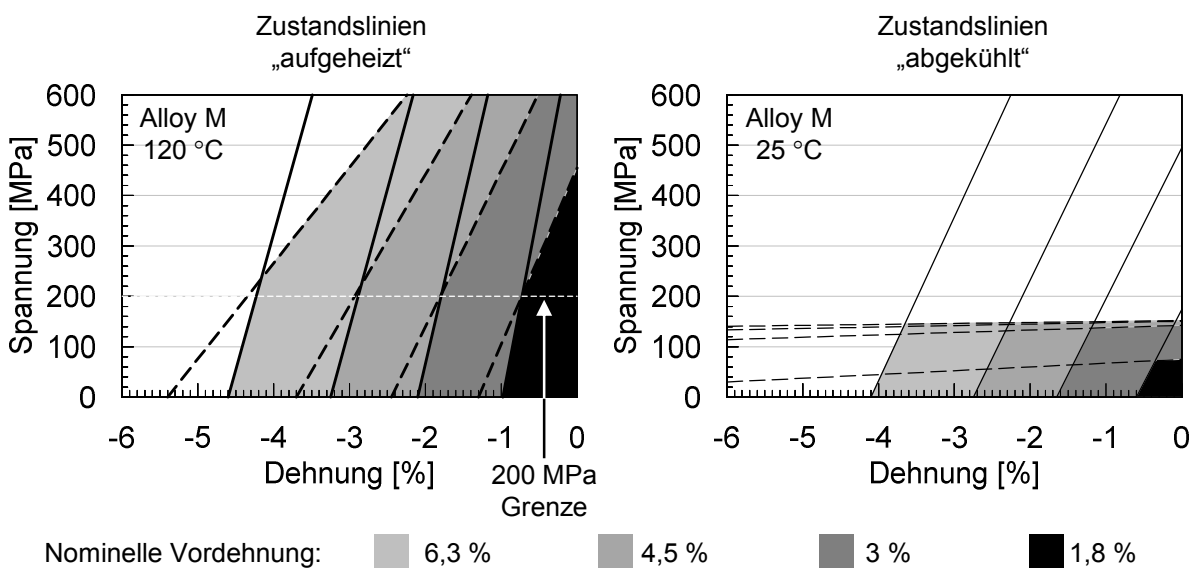


Abbildung 44: Zustandslinien „aufgeheizt“ und „abgekühlt“ der Aktorik von Alloy M bei verschiedenen Vordehnungen

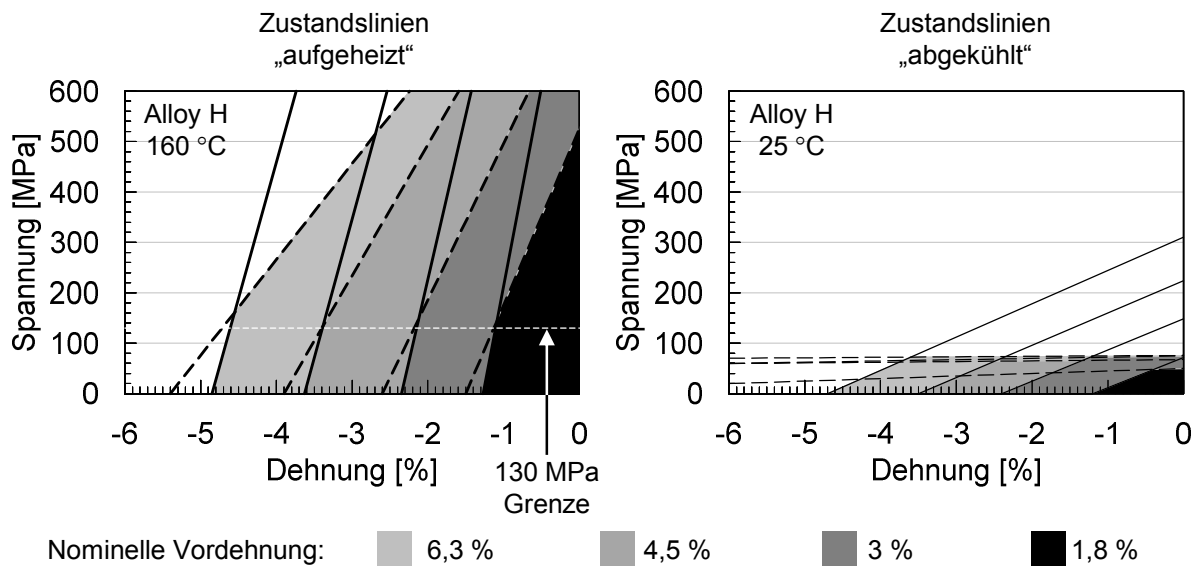


Abbildung 45: Zustandslinien „aufgeheizt“ und „abgekühlt“ der Aktorik von Alloy H bei verschiedenen Vordehnungen

Der in der theoretischen Betrachtung als schlagartig angesehene Übergang zwischen der Steifigkeit des Austenits und dem horizontalen Bereich ist bei den hier untersuchten realen polykristallinen Materialien nicht ausgebildet. Sowohl die Zweiteilung der Zustandslinie „aufgeheizt“, als auch die geringe Steifigkeit im unteren Spannungsbereich der Zustandslinie „abgekühlt“, speziell bei Alloy H, lassen sich auf einen in der Realität kontinuierlicheren Übergang im polykristallinen Material zurückführen.

Abbildung 46 stellt die Beschreibung der Zustandslinien für verschiedene Vordehnungen von Alloy M gemeinsam dar. Um die Vordehnung von den konkreten Werten der Charakterisierungsversuche zu einem frei wählbaren Parameter für die Auslegung zu transferieren, wird eine analytische Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Vordehnung und den entsprechenden Zustandslinien benötigt. Aus Vergleichbarkeitsgründen zwischen Alloy H und Alloy M ist es vorteilhaft, wenn die zurückbleibende Vordehnung anstatt der nominellen Vordehnung zur Beschreibung genutzt wird.

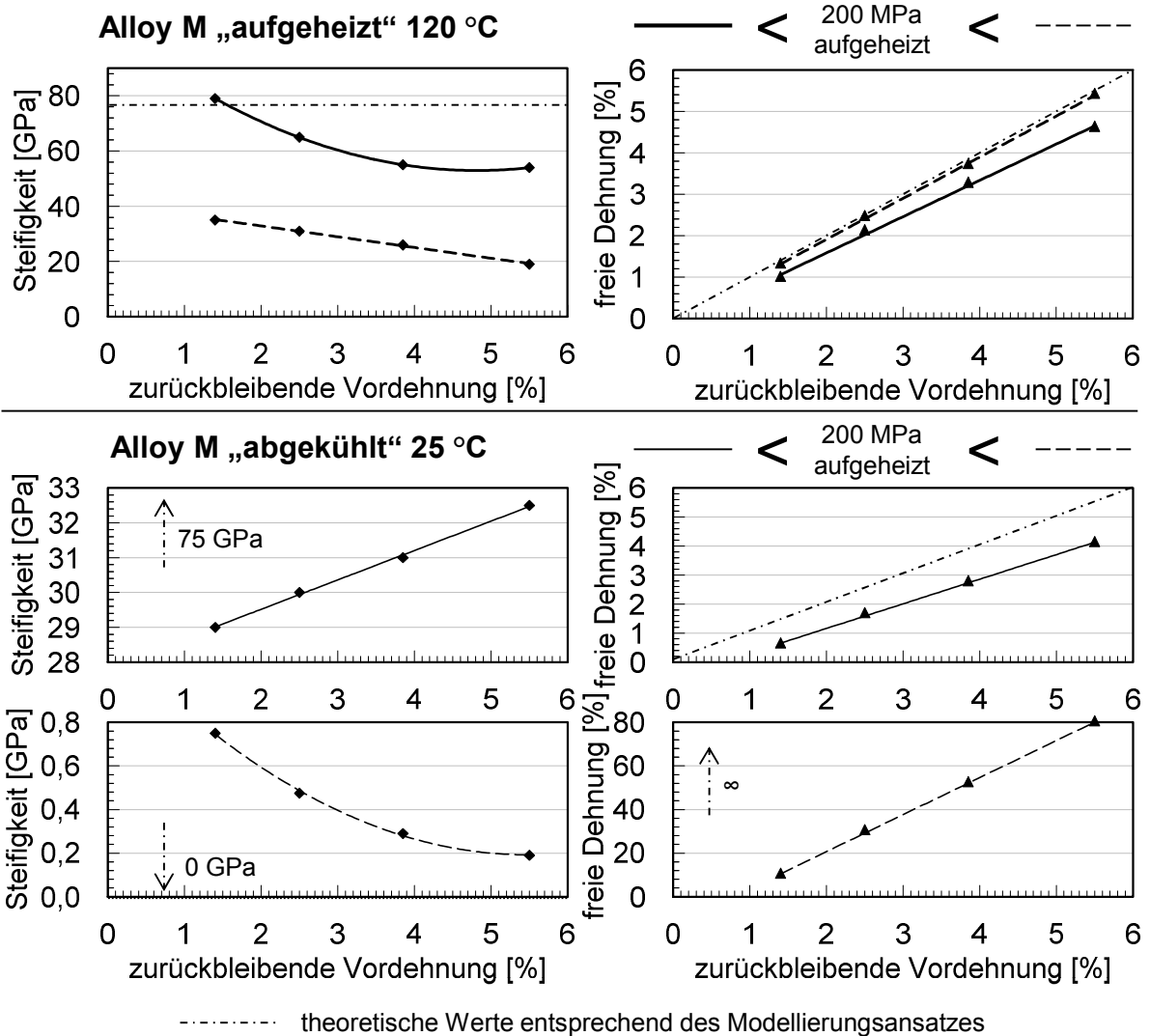


Abbildung 46: Freie Dehnung und Steifigkeit der Zustandslinien von Alloy M über der zurückbleibenden Vordehnung

Die in Abbildung 46 gefundenen Zusammenhänge sind in den meisten Fällen linear, nur bei der Steifigkeit ist in zwei Fällen ein quadratischer Ansatz nötig, um bei allen Approximationen ein Bestimmtheitsmaß von über 0,99 zu erreichen. Die Zusammenhänge bei Alloy H lassen sich über dieselben Gleichungsansätze beschreiben wie bei Alloy M. Tabelle 15 zeigt die gefundenen Zusammenhänge für Alloy M und Alloy H und stellt die Komprimierung des komplexen Aktorikverhaltens dar, welche mit geringem Aufwand in eine FE-Simulation einfließen kann.

Der Vergleich mit den Steifigkeiten, welche vom Modellierungsansatz des Zustandslinienmodells her zu erwarten wären, zeigt signifikante Abweichungen über alle Vor-

dehnungen hinweg. Der theoretische Wert von 75 GPa wird lediglich für eine geringe Vordehnung und geringe Federsteifigkeiten erreicht. Die freie Dehnung zeigt erwartungsgemäß einen linearen Zusammenhang zur zurückbleibenden Vordehnung. Lediglich die freie Dehnung für geringe Federsteifigkeiten im abgekühlten Zustand liegt aufgrund des auch dort gemessenen lastinduzierten Zwei-Weg-Effektes auf einem leicht reduzierten Niveau. Da für den abgekühlten Zustand und hohe Federsteifigkeiten sich in der Realität keine ideale Gerade ergibt, weichen die Werte der Steifigkeit und der freien Dehnung von den theoretischen Werten für eine Horizontale ab.

Tabelle 15: Zusammenhang zwischen zurückbleibender Dehnung und den Kennwerten der Zustandslinien „aufgeheizt“ und „abgekühlt“ von Alloy M und Alloy H

Legierung	Zustandslinie	Kennwert y	Einheit	Bereich	Zusammenhang mit der zurückbleibenden Vordehnung x [%]	
					Typ	Gleichung
Alloy M	aufgeheizt	Steifigkeit	[GPa]	$\sigma > 200$	linear	$y = -3,8957 x + 40,654$
				$\sigma < 200$	quadratisch	$y = 2,2307 x^2 - 21,498 x + 104,75$
		freie Dehnung	[%]	$\sigma > 200$	linear	$y = 0,9928 x - 0,0762$
				$\sigma < 200$	linear	$y = 0,8762 x - 0,1698$
	abgekühlt	Steifigkeit	[GPa]	$\sigma > 200$	quadratisch	$y = 0,03333 x^2 - 0,36476 x + 1,1905$
				$\sigma < 200$	linear	$y = 0,84315 x + 27,832$
		freie Dehnung	[%]	$\sigma > 200$	linear	$y = 16,977 x - 13,238$
				$\sigma < 200$	linear	$y = 0,8474 x - 0,532$
Alloy H	aufgeheizt	Steifigkeit	[GPa]	$\sigma > 130$	linear	$y = -3,8917 x + 41,381$
				$\sigma < 130$	quadratisch	$y = 2,1293 x^2 - 21,482 x + 107,37$
		freie Dehnung	[%]	$\sigma > 130$	linear	$y = 0,951 x + 0,019$
				$\sigma < 130$	linear	$y = 0,877 x - 0,0466$
	abgekühlt	Steifigkeit	[GPa]	$\sigma > 130$	quadratisch	$y = 0,03411 x^2 - 0,34207 x + 0,94329$
				$\sigma < 130$	linear	$y = 0,14564 x + 5,7899$
		freie Dehnung	[%]	$\sigma > 130$	linear	$y = 16,979 x - 16,47$
				$\sigma < 130$	linear	$y = 0,8446 x - 0,0082$

6.3. Implementierung

Durch die fokussierte Modellierung und Charakterisierung des Aktorikverhaltens konnte das komplexe Materialverhalten auf eine komprimierte Beschreibung reduziert werden. Mit dieser Komplexitätsreduzierung ist es möglich, auf effiziente Art und Weise das Aktorikverhalten mit der Finiten-Elemente-Methode abzubilden. In diesem Kapitel wird dargestellt, wie dies unter Verwendung von standardmäßig implementierten Funktionen realisiert werden kann. Außerdem werden die getroffenen Annahmen und deren Zulässigkeit erläutert, welche es ermöglichen, ein vollständiges Simulationsmodell auf Bauteilebene aufzubauen, mit dem die Aktorik des gesamten Hybridverbundes prognostiziert werden kann. Die Abbildung der Aktorik muss eine gezielte Auslegung der Hybridstruktur erlauben. Dies bedeutet, dass folgende Anforderungen erfüllt sein müssen:

- Prognose des aktivierten Zustandes für eine definierte Zieltemperatur
- Prognose des abgekühlten Zustandes für eine definierte Ausgangstemperatur
- Berücksichtigung der auf die SMA-Komponente wirkenden Steifigkeit
 - Einfluss der SMA-Anteile
 - Einfluss der mechanischen und geometrischen Eigenschaften des FKV
- Auswertbarkeit der Spannungen und Dehnungen im FKV und SMA

6.3.1. Aktorik des SMA

Die Aktorikabbildung hat zum Ziel, die vorgenannten Anforderungen zu erfüllen und unterscheidet sich damit in wichtigen Punkten zu bekannten SMA-Modellierungen. Folgende Aspekte sind **nicht** abgedeckt:

- Eindeutige Zuordnung der Zwischenzustände während des Aufheizens und der Abkühlung zu einer Temperatur
- Phasenanteile
- Widerstandsverhalten
- Dynamik des Systems
- Multiphysikalische Berechnungen
 - Thermische Effekte (Latente Wärme)
 - Elektrische Effekte (Ohm'sche Wärme)

Entsprechend dieser Eingrenzung ist es erforderlich, die Kontraktion bzw. Ausdehnung des SMA und deren Lastabhängigkeit zu implementieren. Insofern andere Materialmodelle des FKV nicht nach einer expliziten Berechnung verlangen, kann die Berechnung des Verformungszustandes von einem impliziten Solver übernommen werden und theoretisch in einem Schritt der eindeutig definierte finale Verformungszustand berechnet werden. Im Allgemeinen kann eine Ausdehnung bzw. Kontraktion durch die Addition eines zusätzlichen Terms in der Spannungs-Dehnungs-Beziehung beschrieben werden, wie es auch bei der Temperatureausdehnung üblich ist:

$$[85] \quad \varepsilon = \frac{1}{E} \sigma + \alpha_T \Delta T \quad 6-9$$

Die Steifigkeit stellt dabei eine Lastabhängigkeit der Dehnung dar, wie es auch für die Aktorik notwendig ist. Entsprechend bietet es sich an, ein linearelastisches Materialmodell mit einer „imaginären“ Temperatureausdehnung zur Implementierung der Aktorik zu verwenden. Die ursprüngliche Temperatur T kann als frei definierbare Variable χ_{SMA} genutzt werden. Die Steifigkeit der abzubildenden Zustandslinie aus der Aktorikmodellierung geht hier als die „imaginäre“ Steifigkeit E_{SMA} ein und die freie Dehnung, der x-Achsenabschnitt, stellt die über den Zusatzterm addierte Aktorikdehnung ε_{SMA} dar (vgl. Gleichung 6-10). Die Aktorikdehnung ergibt sich nach Gleichung 6-11 aus der Multiplikation des „imaginären“ Ausdehnungskoeffizienten β_{SMA} , zuvor α_T , und der Laufvariable χ_{SMA} , ehemals ΔT .

$$\varepsilon = \frac{1}{E_{SMA}} \sigma + \varepsilon_{SMA} \quad 6-10$$

$$\varepsilon_{SMA} = \beta_{SMA} \cdot \chi_{SMA} \quad 6-11$$

Da die Laufvariable χ_{SMA} nicht von der eigentlichen Aktorik abhängen soll, ist es sinnvoll, diese standardmäßig für bestimmte Zustände zu definieren. So wird im Folgenden $\chi_{SMA} = 0$ für den Ausgangszustand, $\chi_{SMA} = 100$ für den aktivierten Zustand und

optional $\chi_{SMA} = 200$ für den abgekühlten Zustand festgelegt. Zur Abbildung der Kontraktion wird diese Variable χ_{SMA} in der Simulation von 0 auf 100 erhöht. Zustände, welche sich dazwischen einstellen, können tatsächliche Zwischenzustände darstellen. Wie später in Kapitel 6.3.1.2 dargestellt, ist dies nicht notwendigerweise so. Die eindeutige Zuordnung der Zwischenzustände zu einer Temperatur oder Zeit ist mit dem aktuellen Modellierungsansatz nicht möglich.

6.3.1.1. Berechnung der Aktorikennwerte für ein Zwei-Weg-Effekt-Material

Für ein Zwei-Weg-Effekt-Material gestaltet sich die Simulation kürzer als für ein Ein-Weg-Effekt-Material, da es nur zwei Zustände kennt: Den Ursprungszustand ($\chi_{SMA} = 0$), der gleichzeitig identisch mit dem abgekühlten Zustand ist, und den aktivierten Zustand ($\chi_{SMA} = 100$). Die Multiplikation von $\chi_{SMA} = 100$ mit β_{SMA} muss somit dem Wert der freien Dehnung aus der Modellierung in Kapitel 6.2.3 entsprechen.

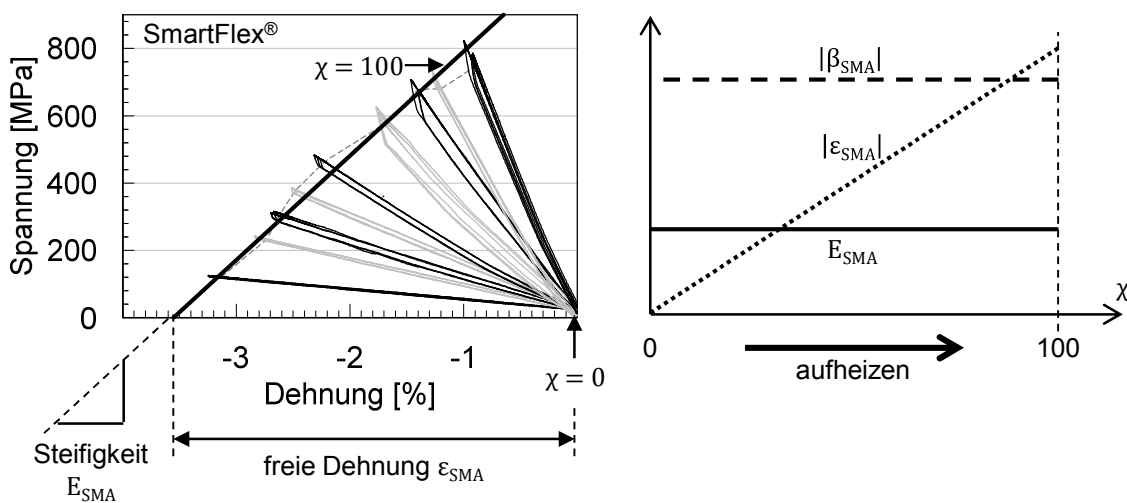


Abbildung 47: Verlauf der Simulationsparameter bei der Simulation des Aufheizvorgangs

Wie in Abbildung 47 gezeigt, bleibt β_{SMA} konstant, während χ_{SMA} linear von 0 auf 100 erhöht wird. Die Steifigkeit E_{SMA} entspricht der im Kapitel 6.2.3 ermittelten. Um ein zweigeteiltes Verhalten wie bei 100 °C Aktivierungstemperatur des SmartFlex® zu berücksichtigen, ist es notwendig, die Simulation zunächst mit einer der beiden Akto-

rikgeraden durchzuführen und anschließend zu prüfen, ob die finalen Spannungen tatsächlich in dem für die Aktorikgerade gültigen Bereich liegen.

6.3.1.2. Berechnung der Aktorikennwerte für ein Ein-Weg-Effekt-Material

Bei einem Ein-Weg-Effekt-Material gestaltet sich die Simulation aufwendiger, da zusätzlich ein zweiter verformter Zustand ($\chi_{SMA} = 200$), der abgekühlte Zustand nach der Aktivierung, berechnet werden muss. Die Ausdehnung während des Abkühlens, stellt eine Verringerung der vorangegangenen Kontraktion dar. Um diese Ausdehnung zu erreichen, muss β_{SMA} überproportional fallen, während χ_{SMA} von 100 auf 200 steigt. Da β_{SMA} in Multiplikation mit χ_{SMA} die Dehnung ergibt und gleichzeitig β_{SMA} in Abhängigkeit von χ_{SMA} geändert wird, ist die Dehnung in zweifacher Weise von χ_{SMA} abhängig. Um zu verhindern, dass die Zwischenzustände durch einen quadratischen Zusammenhang unrealistische Werte annehmen, muss die Variation von β_{SMA} antiproportional zu χ_{SMA} gewählt werden. Andernfalls ist, wie in Abbildung 48 mit den hellgrauen Linien zeigt, nicht ausgeschlossen, dass sich Zwischenzustände einstellen, die in der Realität nicht auftreten. Die Gleichung 6-12 beschreibt den antiproportionalen Zusammenhang von β_{SMA} zu χ_{SMA} , welcher eine lineare Änderung der freien Dehnung zwischen $\chi_{SMA} = 100$ und $\chi_{SMA} = 200$ sicherstellt.

$$\beta_{SMA}(\chi_{SMA}) = \beta_{100} + 2(\beta_{200} - \beta_{100}) - \frac{200(\beta_{200} - \beta_{100})}{\chi_{SMA}}$$

6-12

$$\mathbb{D}_f = \{\chi_{SMA} \in \mathbb{R} \mid 100 \leq \chi_{SMA} \leq 200\}$$

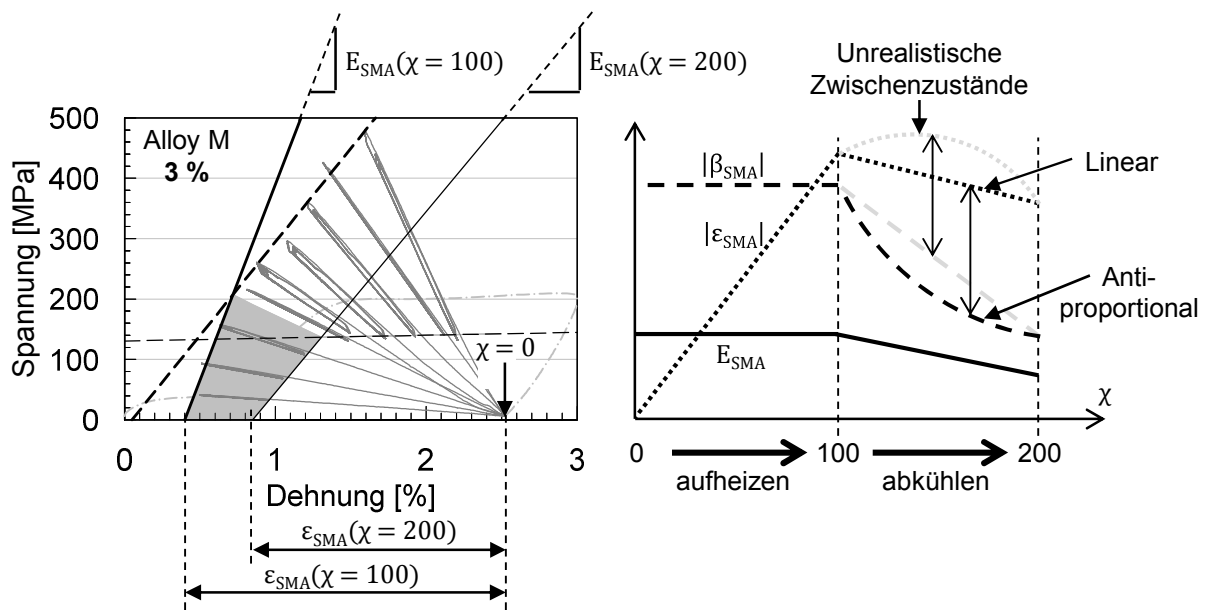


Abbildung 48: Verlauf der Simulationsparameter bei der Simulation des Aufheiz- und Abkühlvorgangs für ein Ein-Weg-Effekt-Material

Die beschriebenen Vorkehrungen stellen eine lineare Änderung der freien Dehnung ε_{SMA} sicher, allerdings wird die resultierende Dehnung ε auch durch die sich ändernde Steifigkeit E_{SMA} beeinflusst. Für leichte Änderungen der Steifigkeit E_{SMA} und eine geringe Reduktion der freien Dehnung ε_{SMA} , wie es für den unteren Spannungsbereich der Fall ist, werden Zwischenzustände, die eine Verformung oberhalb des aufgeheizten Zustandes zeigen, vermieden. Bei einer starken Erhöhung der freien Dehnung ε_{SMA} und gleichzeitig einer starken Reduktion der Steifigkeit E_{SMA} lässt es sich nicht vermeiden, dass sich ein stark nichtlineares Verhalten mit unrealistischen Zwischenzuständen ergibt. Die aus Gleichung 6-13 entwickelte Gleichung 6-14 macht deutlich, dass die Änderung der Steifigkeit E_{SMA} so gewählt werden müsste, dass sich ein linearer Zusammenhang zwischen der resultierenden Dehnung ε und der Laufvariablen χ_{SMA} ergibt. Eine derartige Funktion wäre zusätzlich abhängig von der Systemsteifigkeit E_{Sys} , welche gegen die SMA-Aktorik wirkt, und wäre somit nicht allgemeingültig.

$$\sigma = E_{SMA}(\chi_{SMA}) \cdot (\varepsilon + \varepsilon_{SMA}(\chi_{SMA})) \quad \sigma = -E_{Sys} \cdot \varepsilon \quad 6-13$$

$$\varepsilon = \frac{E_{SMA}(\chi_{SMA}) \cdot \varepsilon_{SMA}(\chi_{SMA})}{E_{Sys} - E_{SMA}(\chi_{SMA})} = \frac{E_{SMA}(\chi_{SMA}) \cdot (m \cdot \chi_{SMA} + n)}{E_{Sys} - E_{SMA}(\chi_{SMA})} \quad 6-14$$

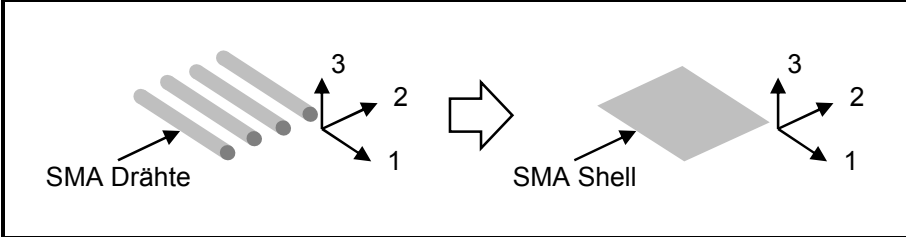
Da die Parameter jeweils nur für einen Spannungsbereich gültig sind, ist es notwendig nach der Simulation zu prüfen, ob das sich einstellende Spannungsniveau im aufgeheizten Zustand auch in den Gültigkeitsbereich der verwendeten Parameter fällt. Wird die Grenzspannung über- bzw. unterschritten, ist eine erneute Berechnung mit den entsprechenden Parametern notwendig. Da die Grenze selbst Element beider Parametersätze ist, ist eine eindeutige Zuordnung nach der ersten Simulation möglich.

Dadurch, dass sich die Modellierungsmethode nur linearelastischer Materialmodelle bedient, ist eine effiziente Berechnung der Endzustände über einen impliziten Solver prinzipiell möglich. Andere Elemente der Simulation, die einen nichtlinearen Ansatz verlangen, können den Einsatz eines impliziten Solver verhindern und den Rechenaufwand erhöhen. Außerdem muss darauf geachtet werden, dass überhöhte Zwischenzustände bei der Simulation des Abkühlprozesses sich nicht negativ auf die Aussagekraft auswirken.

6.3.2. Abbildung des SMA-FKV-Verbundes

Neben der Implementierung der SMA-Aktorik hat die Art und Weise, wie ein SMA-FKV-Verbund in einer FE-Software abgebildet wird, einen großen Einfluss auf die Rechenzeit und Validität des Simulationsergebnisses. Wie in Kapitel 2.2.3 erläutert, ist die Modellierung eines flächigen FKV-Bauteils unter mehrachsiger Belastung in Form von Schalenelementen gängige Praxis. Dementsprechend ist es erstrebenswert, die integrierten aktiven SMA-Elemente auf die gleiche Art abzubilden. Einzelne SMA-Drähte mit makroskopischen Abständen zueinander vereinen jedoch nicht alle mechanischen Eigenschaften auf sich, die ihnen durch die Schalenelemente zugeschrieben werden. Um das Verhalten möglichst realitätsgetreu abzubilden, müssen bestimmte Materialparameter auf null gesetzt werden. Da bei bestimmten Kennwerten der Wert null zu numerischen Problemen führt, wird stattdessen ein Wert nahe null eingesetzt.

Tabelle 16: Materialkennwerte der Simulation für eine SmartFlex® Aktorik-Schalenelement



Materialkennwert	Einheit	Modellwert	eingesetzter Wert
E-Modul E_1	[MPa]	E_{SMA}	31000
E-Modul E_2	[MPa]	0	1,00E-20
Schub-Modul G_{12}	[MPa]	0	1,00E-20
Querkontraktionszahl ν_{12}	[-]	0	0
Ausdehnungskoeffizient α_{11}	[1/K]	β_{SMA}	-0,000355
Ausdehnungskoeffizient α_{xx}	[1/K]	0	0
Randbedingung	Einheit	Modellwert	eingesetzter Wert
Temperatur T	[K]	χ_{SMA}	0 - 100

Entsprechend Tabelle 16 setzen einzelne SMA-Elemente einer Kraft in 2-Richtung keine Kraft entgegen, so kann die Steifigkeit in 2-Richtung null bzw. nahe null gewählt werden. Die Querkontraktion wird auf null gesetzt, da sich die einzelnen Elemente in Folge einer Kraft in 1-Richtung nicht zueinander verschieben werden. Schubkräfte in 1-2-Richtung können durch ein unbehindertes Verschieben der Elemente zueinander abgefangen werden, wodurch der Schubmodul null beträgt. Die Steifigkeit in 1-Richtung entspricht der Steifigkeit aus der Aktorikmodellierung, da sie die Abhängigkeit der Aktorik zur auftretenden Last darstellt. Der Ausdehnungskoeffizient in 1-Richtung erzeugt die eigentliche Aktorikdehnung und wird mit β_{SMA} belegt. Alle anderen Ausdehnungskoeffizienten sind null, da die Änderungen im Vergleich zur Aktorik vernachlässigbar gering sind oder durch die getrennt vorliegenden SMA-Elemente nicht auftreten.

Unter Berücksichtigung des mechanischen Verhaltens lassen sich die SMA-Drähte auf diese Art als Schale abbilden. Bei der Definition der Schale muss Aspekten wie dem Flächenschwerpunkt und der Querschnittsfläche Rechnung getragen werden. Die umgebende Harzmatrix und die Glasgewebelagen zur Anbindung erhöhen die

gegen die Aktorik arbeitende Steifigkeit und müssen abgebildet werden, damit die zu erwartenden Abweichungen minimiert werden. Abbildung 49 verdeutlicht, wie sich die Position in 3-Richtung und der Querschnitt aus exemplarischen Schliiffbildern ableiten lassen. Über die Analyse der Flächenanteile und Flächenschwerpunkte von Harz und SMA innerhalb des vom Draht beeinflussten Bereiches kann zunächst im Drahtbereich eine Homogenisierung durchgeführt werden. Bleiben wichtige Parameter wie Drahtdurchmesser und Herstellungsmethode gleich, lässt sich die Homogenisierung auf alle Hybridverbunde übertragen, solange geringe Draht-Draht-Abstände nicht zu einem Überlappen führen. Auf dieser Basis ergibt sich die Homogenisierung über die gesamte Bauteilbreite aus der Drahtbereichshomogenisierung und der Drahtanzahl.

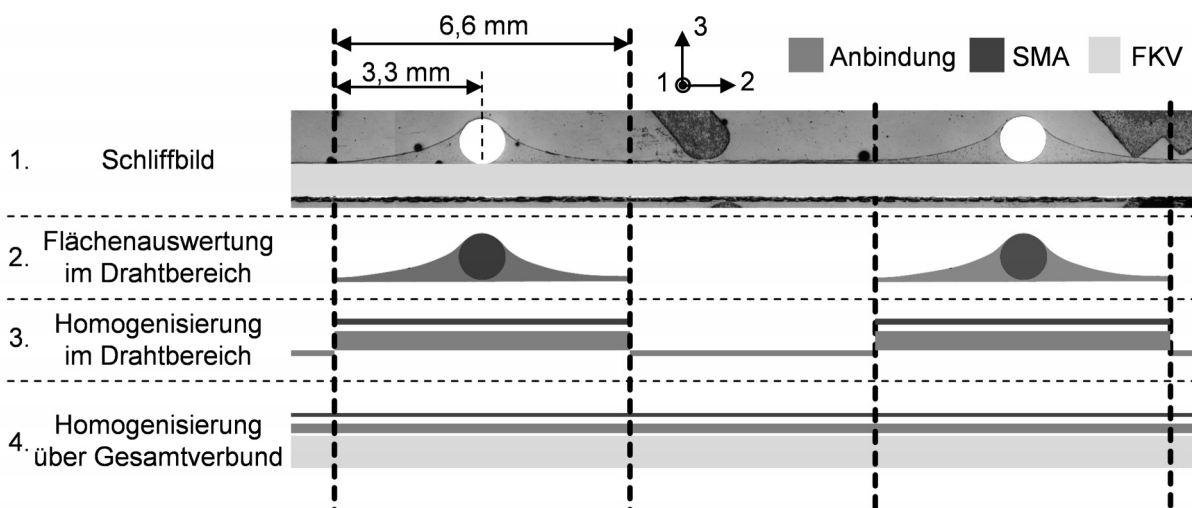


Abbildung 49: Entwicklung einer homogenen Schalenmodellierung aus Schliiffbildern des SMA-FKV-Hybridverbundes

Durch die Berücksichtigung des Flächenschwerpunktes liegen im Modell wie bei Schritt 4 in Abbildung 49 Leerräume zwischen den Schalen von FKV, Anbindung und SMA. Die Ebenen werden über eine feste Verbindung, einen Tie-Constraint, miteinander verbunden, welches unter Beibehaltung des Abstandes alle Freiheitsgrade zwischen zwei benachbarten Knoten der beiden Teile sperrt.

Zur Beschreibung der Anbindung und des FKV können die üblichen Modellierungsmethoden eingesetzt werden. Die Anbindung kann in erster Näherung als isotropes

Material abgebildet werden. Die Beschreibung des FKV-Grundlaminats muss dem tatsächlichen Aufbau individuell angepasst werden. Wird die Laufvariable χ_{SMA} als globale Temperatur auf das Modell aufgebracht, muss der Einsatz anderer temperaturabhängiger Materialmodelle vermieden werden.

7. Validierung der Methodik an Technologie-Proben

In den Kapiteln 5 und 6 wurden neue Ansätze zur Herstellung und Auslegung aktiver Hybridverbunde aus FKV und SMA entwickelt. In diesem Kapitel wird deren Eignung verifiziert. Als Technologie-Proben werden Probekörper mit SMA-Gittern verwendet, die sich nur im verwendeten SMA Material und den Grundlaminaten unterscheiden. Eine detaillierte mechanische und geometrische Analyse der Probekörper erlaubt eine simulative Vorhersage der zu erwartenden Aktorik. Der Vergleich mit Ergebnissen aus Aktoriktests ermöglicht eine Bewertung der Aussagekraft und die Identifikation von Gültigkeitsgrenzen.

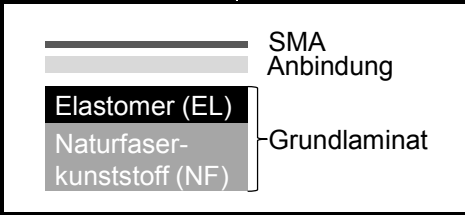
7.1. Charakterisierung

7.1.1. Grundlamine

Übergeordnetes Ziel ist die Validierung des Gesamtvorgehens. Für die Validierung wird SmartFlex[®] als Zwei-Weg-Effekt-Material und Alloy H stellvertretend für die Ein-Weg-Effekt-Materialien herangezogen. Optimalerweise wird die Gültigkeit jeder Zustandskennlinie durch zwei Stützpunkte überprüft. Die Steifigkeit, gegen welche die aktiven SMA-Elemente arbeiten müssen, ist jedoch nicht frei wählbar, sondern Ergebnis der geometrischen und materialspezifischen Eigenschaften der Technologie-Proben. Die Technologie-Proben bestehen aus den SMA-Elementen, deren Anbindung zum Grundlaminat und dem Grundlaminat. Die Steifigkeit kann nur durch die Wahl des Grundlaminates beeinflusst werden. Bei der Vorauslegung dieser Grundlamine war es das Ziel, die maximalen Spannungen im SMA auf ca. 450 MPa zu limitieren, wodurch eine Dauerfestigkeit der SMA-eigenen Aktorik gewährleistet und die Festigkeit der Ankerschweißpunkte nicht überschritten wird. Es hat sich gezeigt, dass Naturfaser-Kunststoffverbunde in Kombination mit einer Elastomerschicht die benötigten Steifigkeiten aufweisen, die auf einfache Weise mit FKV zu erreichen sind. Die ausgewählte Materialkombination für die jeweilige Formgedächtnislegierung kann Tabelle 17 entnommen werden. Vorweggenommen werden kann an dieser Stelle, dass mit keiner Materialkombination aus FKV der untere Spannungsbereich (unter 130 MPa) von Alloy H erreicht werden kann. Es hat sich bei der Vorauslegung

gezeigt, dass die maximale Vordehnung von 6,3 % relativ große Grundlaminatdicken erfordert, welche sich herstellungstechnisch nicht einfach realisieren lassen. Deshalb wird das Vordehnungsniveau von 6,3 % bei Alloy H nicht weiter betrachtet.

Tabelle 17: Eingesetzte Grundlaminat zur Validierung an Technologie-Proben



Aktormaterial	Grundlaminat: Materialtyp Dicke [mm]	
+ Vordehnungsniveau	niedrige Steifigkeit	hohe Steifigkeit
SmartFlex®	NF 0,5 + EL 1,0	NF 1,5 + EL 1,0
Alloy H 1,8 %	NF 0,5 + EL 1,0	NF 1,5 + EL 1,0
Alloy H 3,0 %	NF 0,5 + EL 1,0	NF 1,5
Alloy H 4,5 %	NF 0,5 + EL 1,0	NF 1,5
Alloy H 6,3 %	-	-

Die Analyse von Schlibfbildern parallel hergestellter Kontrollproben erlaubt die Ableitung der sich real einstellenden Schichtdicken. Zugversuche an Rechteckproben Typ 2 im Maßstab 1:2 nach DIN EN ISO 527-1 der einzelnen Grundlaminatkomponenten vervollständigen die Charakterisierung der Grundlaminat. Die Kennwerte sind in Tabelle 18 zusammengefasst.

Tabelle 18: Kennwerte der Grundlaminatkomponenten

Material	Dicke	E-Modul
	[mm]	[MPa]
NF 0,5	0,65	5704
NF 1,5	1,6	4087
EL 1,0	1,27	7,45

7.1.2. Anbindung

Oberhalb des Grundlaminates befinden sich die aktiven SMA-Drähte und das Harz sowie die dünnen Glasfasergewebelagen zur Anbindung (vgl. Abbildung 18). Der Anbindung muss besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden, da sie durch ihre direkte Nähe zu den aktiven Elementen einen hohen Beitrag zu der der Aktorik entgegenwirkenden Steifigkeit hat. Bei der nachfolgenden simulativen Abbildung werden entsprechend Kapitel 6.3.2 die Anbindung, bestehend aus Harz und Glasfasergewebelagen, und die SMA-Drähte jeweils als eine homogene Schicht abgebildet. Entsprechend muss der Flächenschwerpunkt und Gesamtquerschnitt aus den Schliffbildern abgeleitet werden. Wie in Abbildung 50 zu sehen, konnte trotz sorgfältiger Herstellung und einer Beaufschlagung des Vakuumsackaufbaus mit 6 bar nicht verhindert werden, dass die Harzmenge und die Lage der SMA-Drähte in den dargestellten Grenzen variiert. Um den Einfluss dieser Variationen abbilden zu können, wurden die Kennwerte für drei Grenzfälle ermittelt. Die berücksichtigten Fälle sind in Tabelle 19 zusammengefasst. Die Schliffbildanalyse hat gezeigt, dass die Harzmenge im Schnittbild von 2,79 mm² (Harz-) auf 7,55 mm² (Harz+) steigen kann. Weiterhin hat sich gezeigt, dass es bei Proben mit weniger Harz (Harz-) zum Einsinken der SMA-Drähte in die Elastomerlage kommen kann. Der Abstand vom resultierenden Flächenschwerpunkt zur Grundlaminatoberfläche, im Folgenden als Offset bezeichnet, wird durch diese Abweichungen beeinflusst. Beim Einsinken wird der Offset der SMA-Elemente von ungefähr dem halben Drahtdurchmesser (Offset+) um mehr als die Hälfte reduziert (Offset-) wird. Die Konfiguration Harz-/Offset+ kann als wünschenswert angesehen werden, da nicht übermäßig viel Harz die Steifigkeit erhöht und die SMA-Drähte sich in einer klar definierten Position befinden. Die seitliche Verschiebung aktiver Drähte wird nicht weiter berücksichtigt, da in der zusehenden Ausprägung keinen maßgeblichen Einfluss auf die Aktorik des Hybridverbunds zu erwarten ist.

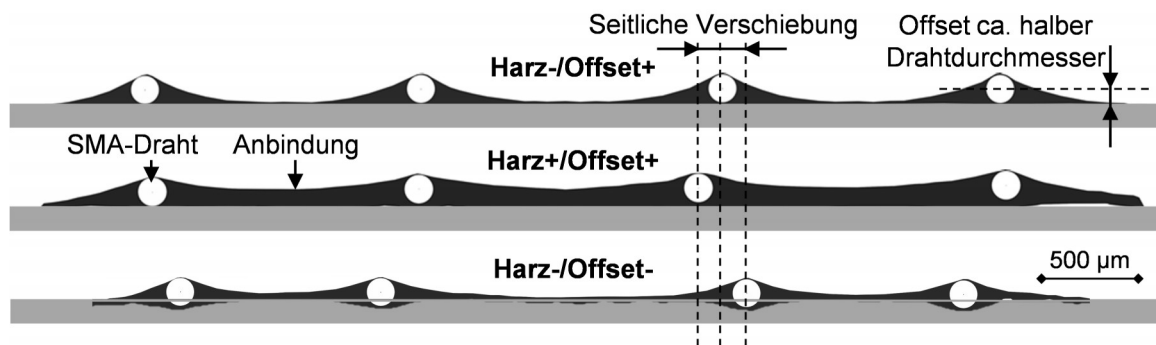


Abbildung 50: Variation der Harzmenge und der SMA-Drahtposition

Tabelle 19: Kennwerte der Harzmenge- und Drahtpositionsvariation

	homogenisierte Schalen		
	Offset SMA [mm]	Offset Anbindung [mm]	Fläche Anbindung [mm ²]
Harz-/Offset+	0,27	0,14	2,79
Harz+/Offset+	0,35	0,22	7,55
Harz-/Offset-	0,12	0,04	3,33

Die Anbindung, bestehend aus Harz und Glasfasergewebelagen, soll später bei der simulativen Abbildung als eine einzelne Schellebene abgebildet werden, entsprechend wird die Steifigkeit der Harz-Glasfasergewebe-Kombination benötigt. Die messtechnische Erfassung der Steifigkeit des Reinharzes und einer 0,025 mm dicken, ideal imprägnierten Glasfasergewebelage in $\pm 45^\circ$ -Ausrichtung ist schwer umsetzbar, weshalb eine Berechnung auf Basis von Literatur bzw. Datenblattkennwerten erfolgt. Die Gesamtsteifigkeit wurde nach der linearen Mischungsregel (Gleichung 7-1) aus den einzelnen Steifigkeiten und den jeweiligen Anteilen berechnet. Während für das Reinharz ein Datenblattwert von 3200 MPa Verwendung findet, ist für die ausgehärtete Glasgewebelage eine rechnerische Abschätzung notwendig. Über die aus Schliffbildern gewonnene imprägnierte Lagendicke von 0,025 mm, das Halbzeug-Flächengewicht von 25 g/m² und die Dichte von Glas (2,6 g/cm³) konnte mit Gleichung 7-2 auf einen Faservolumengehalt von ca. 38,5 % rückgeschlossen

werden. Über ein Laminatberechnungstool, welchem die klassische Laminattheorie zugrunde liegt, wird die $\pm 45^\circ$ -Ausrichtung und ein Penaltyfaktor von 0,85 für die Ondulation einer Leinwandbindung berücksichtigt, womit sich eine Steifigkeit von 8310 MPa für die Glasgewebelagen ergibt. Die angenommenen E-Moduln sind in Tabelle 20 zu sehen. Neben der Harzmengenvariation findet auf diesem Weg auch die zusätzlich benötigte Glasfasergewebelage für die Anbindung zum Elastomer Berücksichtigung.

$$\varphi = \frac{V_{Faser}}{V_{Laminat}} = \frac{f_{aw} \cdot A \cdot 1 / \rho_{Faser}}{A \cdot t} = \frac{f_{aw}}{t \cdot \rho_{Faser}} \quad 7-1$$

$$E_{Gesamt} = E_{Harz} \cdot \frac{A_{Harz}}{A_{Gesamt}} + E_{Glasgewebe} \cdot \frac{A_{Glasgewebe}}{A_{Gesamt}} \quad 7-2$$

Tabelle 20: Steifigkeit der Anbindung bei den jeweiligen Varianten

	Grundlaminat	Harz-/Offset+	Harz+/Offset+	Harz-/Offset-
		[MPa]	[MPa]	[MPa]
E-Modul Anbindung	NF 0,5 + EL 1,0 / NF 1,5 + EL 1,0	5530 (+1 Glaslage)	4215 (+1 Glaslage)	5502 (+1 Glaslage)
	NF 1,5	5032	3925	-

7.2. Simulation

Für die simulative Verformungsvorhersage wurden die Technologie-Proben in der FEM-Software ABAQUS abgebildet und unter Verwendung des impliziten Solver ABAQUS/Implicit gelöst. Die Geometrie, die verwendeten Elementtypen und die auf-gebrachten Randbedingungen können Abbildung 51 entnommen werden.

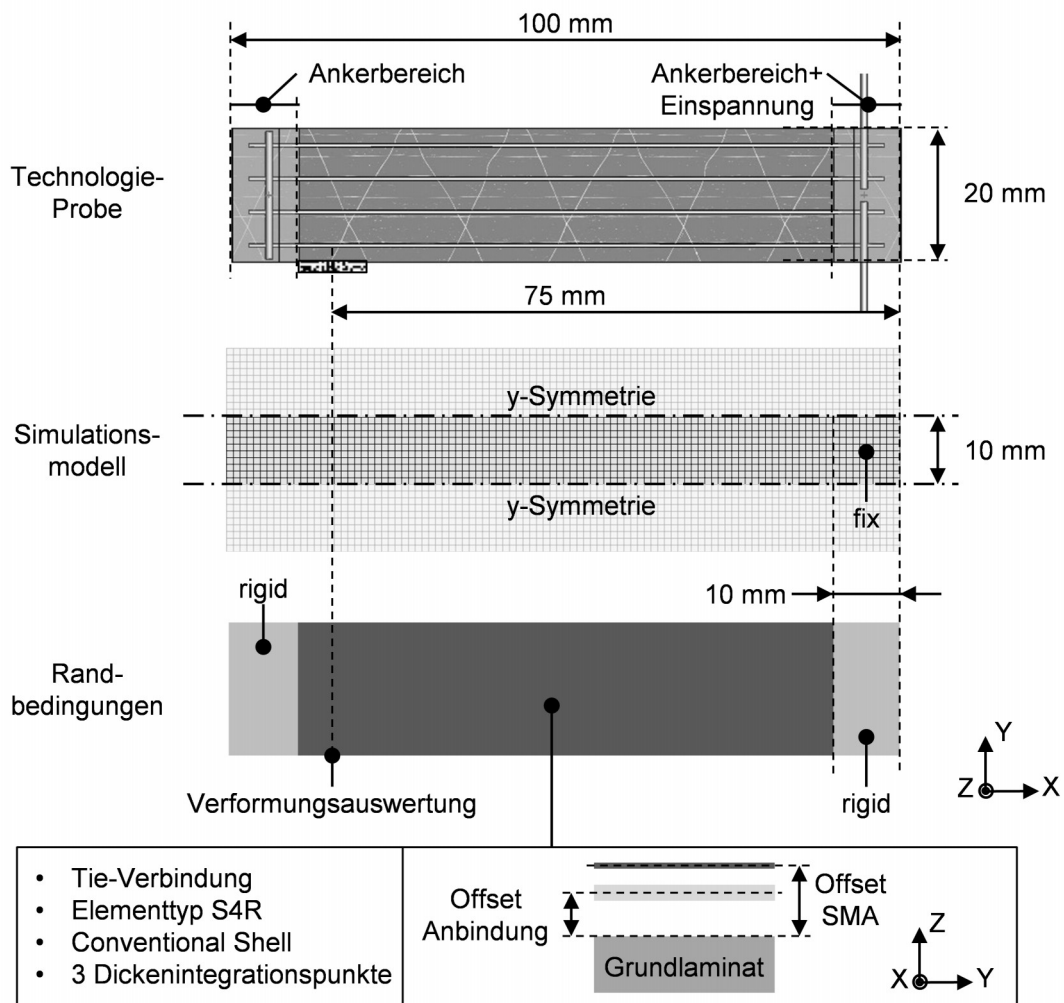


Abbildung 51: Aufbau des Simulationsmodells der Technologie-Proben

Eine beidseitige y-Symmetrie unterstellt eine endlose Ausbreitung in y-Richtung und unterdrückt Randeﬀekte, die bei der gewählten Schalenmodellierung nicht die reale Situation abbilden würden. Sensitivitätsanalysen zeigen, dass die Breite der Ankerbereiche, die als ideal steif angenommen werden, einen limitierten Einfluss auf die Auslegung hat und eine Abweichung um ± 2 mm die Verformung um weniger als

± 4 % verändert. Entsprechend wurde eine nominelle Breite von 10 mm angenommen. Mit den in Kapitel 7.1 ermittelten Kennwerten zu tatsächlichen Querschnittsflächen sowie Flächenschwerpunkten und den E-Moduln lässt sich das Simulationsmodell vervollständigen.

7.2.1. Simulative Vorhersage

Mit dem beschriebenen Simulationsmodell kann in Kombination mit der Aktorikmodellierung nach Kapitel 6 eine Vorhersage für die Verformung getroffen werden. Die drei identifizierten Ausbildungsvarianten der Anbindung lassen sich auf zwei relevante Konfigurationen reduzieren, die eine maximale und eine minimale Verformung erzeugen. Dabei stellt die Variante „Harz+/Offset+“ die untere Grenze mit der geringsten Verformung dar und die Variante „Harz-/Offset+“ den oberen Grenzfall mit maximaler Verformung (vgl. Abbildung 50). Die sich aus Grundlaminat und Anbindung ergebende Steifigkeit, welche der SMA-Aktorik entgegenwirkt, kann Tabelle 21 entnommen werden.

Tabelle 21: Gegen die Aktorik arbeitende Steifigkeit der simulativ abgebildeten Technologie-Proben

Aktoriklegierung		Alloy H						SF	
nominelle Vordehnung	[%]	1,8		3		4,5		-	
Grundlaminat		NF 0,5 EL 1,0	NF 1,5	NF 0,5 EL 1,0	NF 1,5	NF 0,5 EL 1,0	NF 1,5 EL 1,0	NF 0,5 EL 1,0	NF 1,5 EL 1,0
max. Steifigkeit Harz+/Offset+	[MPa/%]	610	975	610	975	610	729	610	729
min. Steifigkeit Harz-/Offset+	[MPa/%]	316	670	316	670	316	430	316	430
Steifigkeit Mittelwert	[MPa/%]	463	822	463	822	463	579	463	579

Wie zu erkennen ist, beeinflusst die Harzmenge die sich ergebende Steifigkeit stark. Gerade beim biegeweichsten Grundlaminat NF 0,5/ EL 1,0 kann eine erhöhte Harzmenge nahezu zu einer Verdopplung der resultierenden Steifigkeit führen und beeinflusst entsprechend stark das Vorhersageergebnis. Im Allgemeinen liegen die umsetzungstechnisch erreichten Steifigkeiten im Hybridverbund über dem eigentlich

angestrebten und zuvor messtechnisch erfassten Bereich. Es werden bei vollem Abruf der Aktorik sehr hohe Spannungsniveaus erreicht, die teilweise erheblich oberhalb des bei der Charakterisierung adressierten Bereichs liegen (vgl. Tabelle 13 Seite 76).

Die Verformungsvorhersagen für die einzelnen Materialkombinationen sind mit unterem und oberem Grenzwert in Abbildung 52 gezeigt. Es werden Verformungen zwischen 8 und 24 mm erwartet, was bezogen auf die aktive Länge von 75 mm einem Bereich von 12 bis 36 % entspricht.

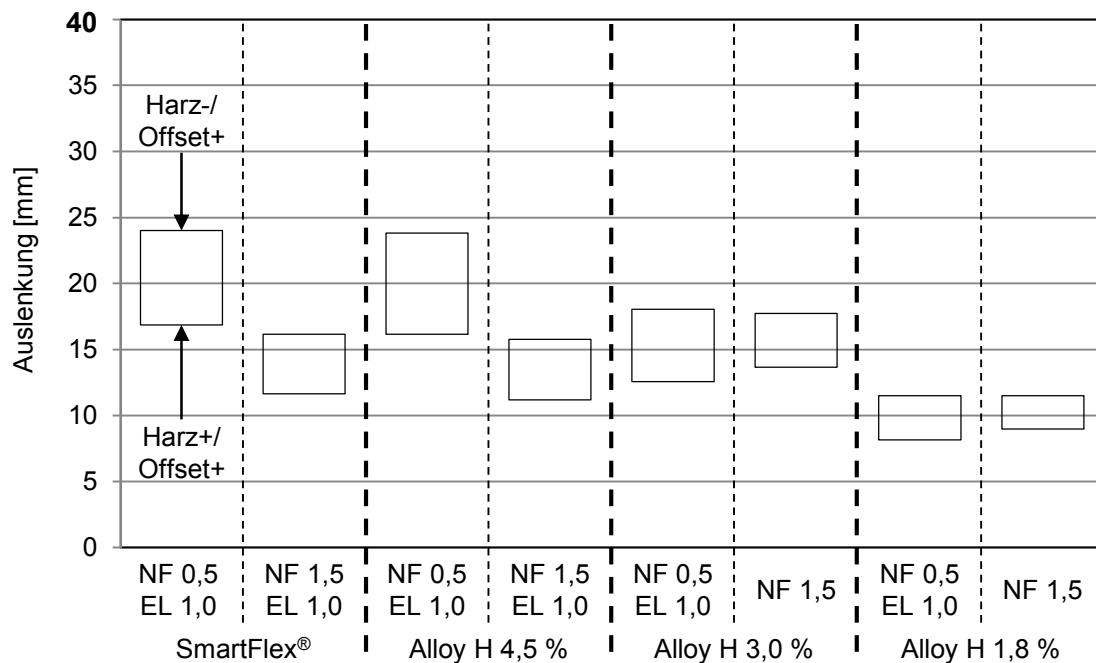


Abbildung 52: Vorhersage der Auslenkung der Technologie-Proben für den vollständig aktivierten Zustand

Auch die verbleibende Rückverformung kann prognostiziert werden. Für das Zwei-Weg-Effekt-Material SmartFlex® kann von einer vollständigen Rückverformung ausgegangen werden. Für das Ein-Weg-Effekt-Material Alloy H ergibt die Simulation der verbleibenden Auslenkungen nach der Abkühlung Werte unter 3 mm, wie in Abbildung 53 dargestellt.

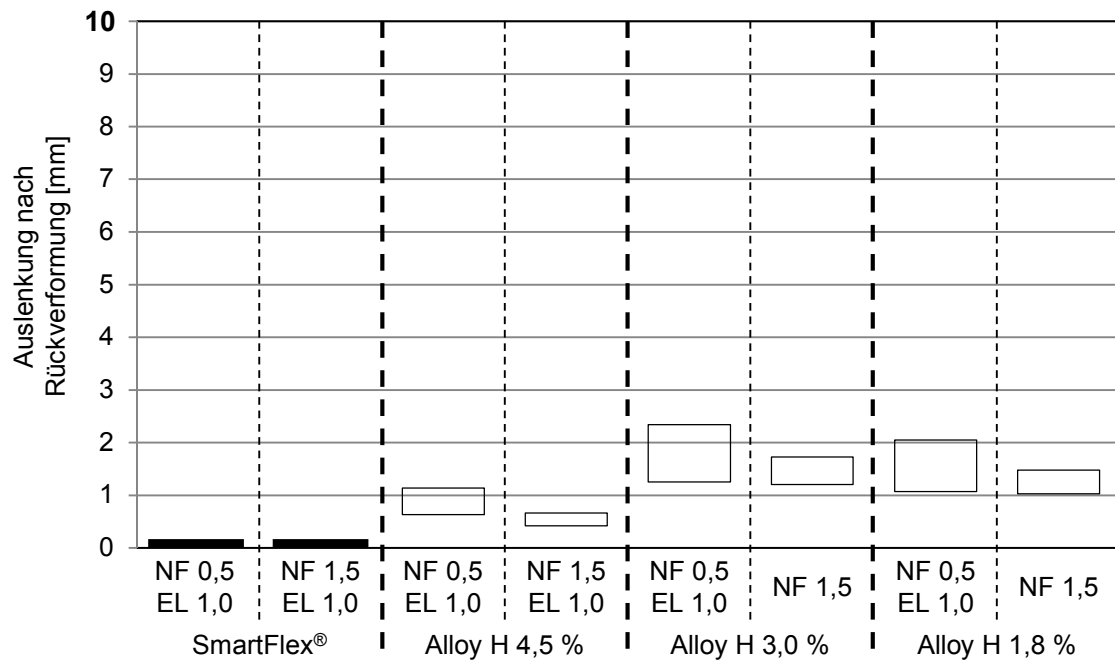


Abbildung 53: Vorhersage der Auslenkung nach der Rückverformung der Technologie-Proben für den vollständig abgekühlten Zustand

7.3. Experimentelle Validierung

Die Aktorik der zuvor hergestellten und charakterisierten Technologie-Proben wird nach dem in Kapitel 4.2.3 beschriebenen Vorgehen aktiviert und erfasst. Die Verformungswerte, welche sich im Mittel aus den ersten drei Aktivierungen je dreier Proben ergeben, sind in Abbildung 54 den Prognosebereichen der Simulation überlagert. Änderungen der Verformungswerte durch eventuelle Einlaufeffekte sind bei der maximalen Auslenkung über die untersuchten ersten drei Zyklen nicht zu beobachten.

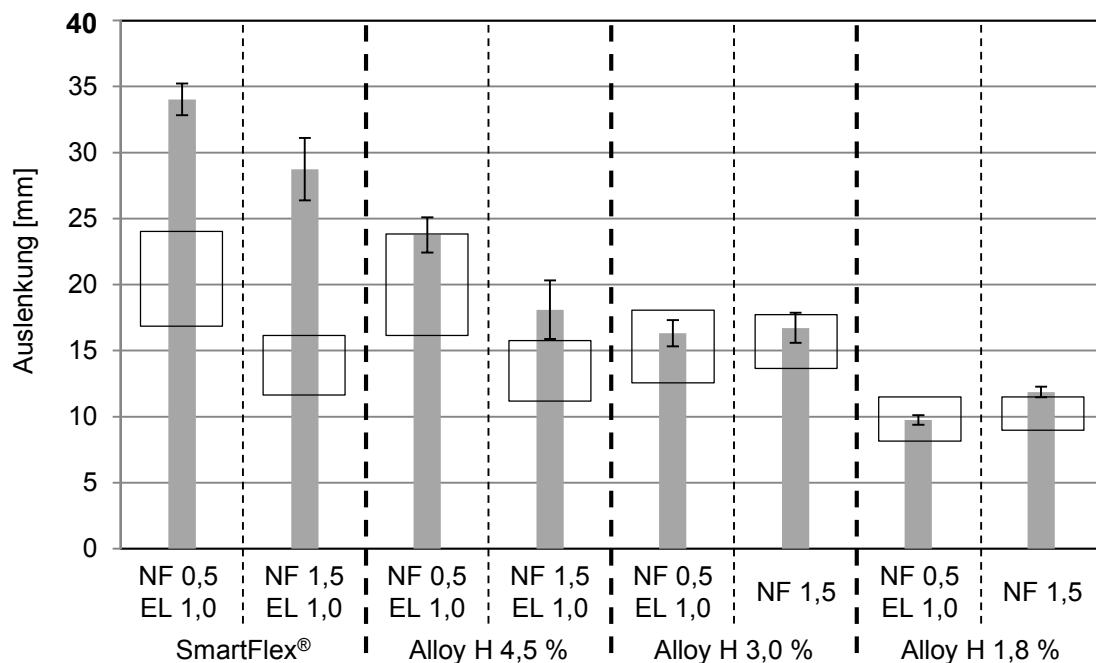


Abbildung 54: Vorhersage und experimentelles Ergebnis der Auslenkung der Technologie-Proben für den vollständig aktivierten Zustand

Besonders bei geringen Vordehnungen von 1,8 % und 3,0 % ist eine gute Übereinstimmung zwischen Vorhersage und Experiment zu beobachten. Die Streuung fällt vergleichsweise gering aus. Für die Materialien SmartFlex® und Alloy H 4,5 %, die ein wesentlich größeres Kontraktionspotential aufweisen, liegen die beobachteten Verformungen teils erheblich über den prognostizierten Werten. Für diese Technologie-Proben zeigen sich auch erhebliche Abweichungen zur simulativ berechneten Rückverformung. Die verbleibende Auslenkung nach Rückverformung als Mittelwert des jeweils ersten Zyklus dreier Proben ist in Abbildung 55 zu sehen. Es wurde nur

der erste Zyklus jeder Probe herangezogen, da im Gegensatz zur Auslenkung im aktivierten Zustand die Auslenkung nach der Rückverformung einen Anstieg in nachfolgenden Zyklen aufwies. Wie schon bei der Verformung im aktivierten Zustand ist eine bessere bis sehr gute Übereinstimmung für die Proben Alloy H mit geringer Vordehnung zu beobachten.

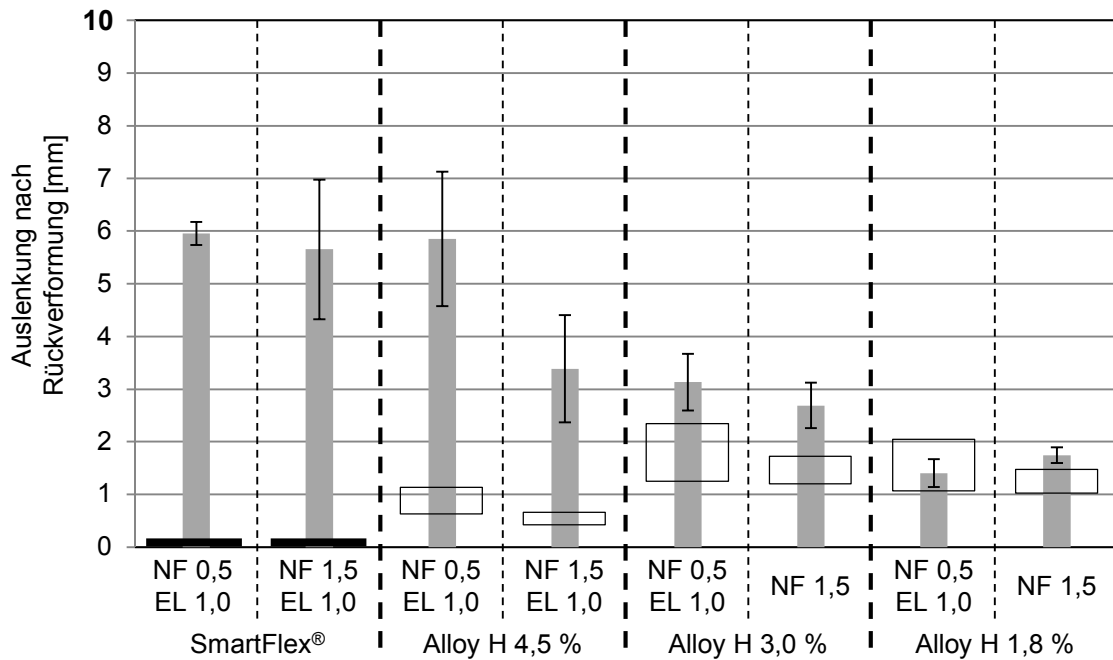


Abbildung 55: Vorhersage und experimentelles Ergebnis der Auslenkung nach der Rückverformung der Technologie-Proben für den vollständig abgekühlten Zustand

7.3.1. Diskussion

Die zuvor gezeigten Vergleiche zwischen experimentellem Ergebnis und Simulation zeigen teils gute Übereinstimmungen und teils starke Abweichungen, weshalb die Versuche differenziert betrachtet werden müssen. Zunächst kann festgestellt werden, dass es bei keiner der Proben zu einem Aktorikausfall kam und die Schweißpunkte im Gegensatz zu den Versuchen in Kapitel 5.3 bei keiner Probe versagten. Dies kann auf eine Belastungsreduktion zurückgeführt werden, da die zuvor verwendete Probenkonfiguration mit einer hier nicht eingesetzten, noch steiferen Variante „NF 1,5/ SmartFlex®“ vergleichbar wäre.

Dennoch bleiben die Proben bei dem hier durchgeführten vollständigen Aktorikabruf nicht ohne Schaden. Charakteristische Schadensbilder für den jeweiligen Technologie-Probentyp sind in Abbildung 56 gezeigt.

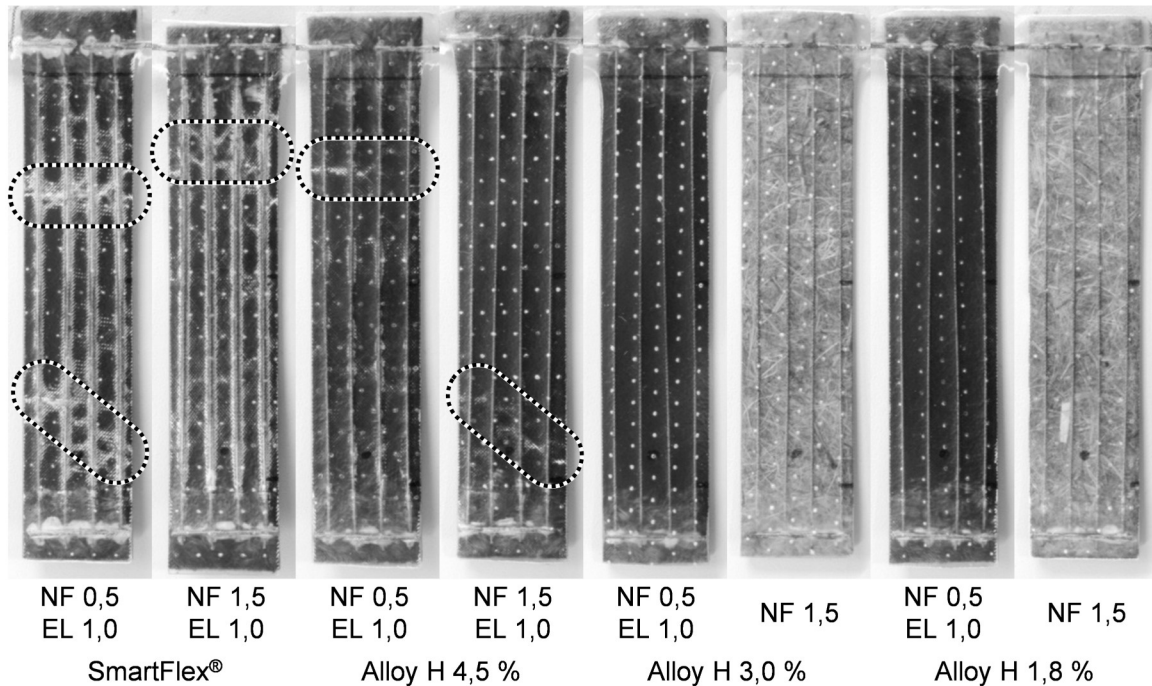


Abbildung 56: Schadensbilder der Technologie-Proben

Bei beiden SmartFlex®-Varianten sind drei verschiedene Schadensbilder wahrzunehmen. Über die gesamte Probenlänge ist zu sehen, dass das Interface und die unmittelbar den aktiven Draht umgebende Anbindung stark geschädigt wurden. Dies ist die Konsequenz aus einer kombinierten thermischen und mechanischen, Überlastung. Weiterhin zeigen sich in den Glasfasergewebelagen quer über die Probenbreite laufende Druckbrüche. Im Ankerbereich sind außerdem helle Bereiche zu sehen, die auf eine lokale Überlastung des FKV's hinweisen. Verstärkt sind diese auf der mit Flächenpressungen belasteten Druckseite der Ankerdrähte erkennbar, was den in Abbildung 26 (Seite 64) angenommenen Lastfluss bestätigt.

Die gleichen Schadensbilder können an den Proben mit Alloy H und einer Vordehnung von 4,5 % beobachtet werden, jedoch in stark abgeschwächter Form. Bei den Probekörpern mit 3,0 % und 1,8 % Vordehnung beschränken sich Schädigungen auf

stark lokalisierte Weißbrücke im Ankerbereich und sind oftmals auf den schweißpunktnahen Bereich beschränkt.

Die beobachteten starken Schädigungen über der Probenlänge bei SmartFlex[®] und bei Alloy H 4,5 % reduzieren die Steifigkeit des Biegebalkens maßgeblich. Damit reduziert sich auch die Steifigkeit, die der Aktorik entgegenwirkt. Folglich steigt die Verformung, welche von der Formgedächtnislegierung erzeugt werden kann und die Struktur wird weiter geschädigt. Durch diesen Effekt wird der Einfluss von auftretendem Materialversagen verstärkt und die gemessene Verformung übersteigt die simulative Vorhersage stark, welche ein ungeschädigtes, linearelastisches Materialverhalten annimmt.

Die unterschiedliche Schadensausprägung von SmartFlex[®] und Alloy H 4,5 % kann nicht auf ein unterschiedliches Aktorikverhalten zurückgeführt werden. Wie es auch die Verformungsvorhersage beider Materialien zeigt, ist das Verformungspotential beider Varianten sehr ähnlich. Unterschiedliche Oberflächenrauigkeiten oder Unterschiede im chemischen Aufbau der Oxidschicht können verantwortlich für die abweichenden Schadensausprägungen sein. Die verwendeten Alloy H-Drähte besitzen eine Rauigkeit von $R_a = 0,376 \mu\text{m}$ und die SmartFlex[®]-Drähte eine Rauigkeit von $R_a = 0,162 \mu\text{m}$. In jedem Fall übersteigt die abgerufene Verformung das Verformungsvermögen der Anbindung, weshalb derartig hohe Verformungsgrade in der derzeitigen Konfiguration vermieden werden sollten.

Im Gegensatz zu Druckbrüchen und Anbindungsversagen beeinflusst eine lokale Überbelastung des FKV's im Ankerbereich die Biegebalkensteifigkeit im für die Aktorik relevanten Bereich nicht. Entsprechend wird die Übereinstimmung zwischen Simulation und Versuch bei Alloy H 1,8 % und 3,0 % nicht beeinträchtigt.

Betrachtet man die Auslenkung nach der Rückverformung im abkühlten Zustand, so können die beobachteten Schädigungen nicht allein ursächlich für die abweichende verringerte Rückverformung sein. Auch wenn durch die eingebrachten Schäden der spannungsärmste Zustand vom Ausgangszustand abweicht, muss ein weiterer Einfluss vorhanden sein, der das Rückverformungsvermögen reduziert. So zeigen auch

die Proben Alloy H 3,0 % ohne erkennbare Schädigungen eine verringerte Rückverformung gegenüber der Simulation. Außerdem sinkt tendenziell die Rückverformung über mehrere Zyklen. Diese Zeitabhängigkeit weist auf den Einfluss einer fortschreitenden Vernetzung des kaltgehärteten Anbindungsharzes im aktivierten Zustand hin. Bei erhöhter Temperatur und erzwungener Verformung führt die Nachvernetzung dazu, dass die spannungsärmste Kontur des Biegebalkens aus der Ausgangslage heraus zu einer leichten Krümmung verschoben wird. Beim Vergleich mit der Simulation erkennt man, dass größere Schädigungen und ein höherer Verformungsgrad im aktivierten Zustand zu größeren Abweichungen führen. Dass der Einfluss der Nachvernetzung schon beim ersten Zyklus derart deutlich zu erkennen ist, wird dadurch verstärkt, dass die Proben keinem Temperungsprozess unterzogen wurden, wie er in Kapitel 5.2.2 vorgeschlagen wurde. Auf den Temperungsprozess wurde verzichtet, da zunächst für jede Probenvariante eine individuelle Temperaturniveau identifiziert werden müsste und diese verschiedenen Temperaturen die Vergleichbarkeit der Proben beeinträchtigen würden. Eine Temperung hätte bei den hier betrachteten Versuchen positive als auch negative Effekte: Die Steifigkeit der Strukturen könnte durch einen erhöhten E-Modul des Harzes in unerwünschter Weise weiter steigen. Der Widerstand gegen hohe Flächenpressungen könnte verbessert werden und so die Situation im Ankerbereich verbessern. Ein von Beginn an höherer Vernetzungsgrad könnte den Einfluss einer weiter fortschreitenden Vernetzung bei der Aktivierung reduzieren und die Abweichungen zur Simulation verringern.

Neben diesen Detailbetrachtungen müssen die Ergebnisse vor dem Hintergrund der angestrebten Validierung der Gesamtmethodik zur Herstellung und Auslegung aktiver SMA-FKV-Hybridverbunde bewertet werden. Hierzu wird der vollständig aufgeheizte Zustand mit der simulativen Vorhersage abgeglichen. Festgehalten werden kann, dass sich bei einer vollständig abgerufenen Aktordehnung oberhalb von 3,0 % selbst unter Einsatz einer Elastomer-Zwischenschicht sehr hohe Verformungsgrade und Spannungen einstellen, welche potentiell die Struktur schädigen können. Bleiben diese Schäden aus, zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment. Die Vorhersagegenauigkeit der Auslenkung wird lediglich durch die herstellungstechnische Schwankung der Harzmenge beeinträchtigt. Bei der Rückver-

formung führt die Nachvernetzung während der Aktivierung zu Abweichungen, welche durch einen angepassten Temperprozess potenziell gemindert werden können. Mit dem bereits in Kapitel 5.2.2 erläuterten Tempervorgang, lässt sich z.B. durch den Einsatz mittlerer Tempertemperaturen (größer R_T und kleiner A_F) der T_G und entsprechend die Vernetzung gegenüber dem kaltausgehärtetem Harz erhöhen, ohne dass ein signifikanter Einfluss auf den abgekühlten Verformungszustand zu erkennen ist. Bei der eigentlichen Aktorikaktivierung liegen somit weniger unvernetzte Anteile vor, die durch ihre Vernetzung im aufgeheizten Zustand dazu beitragen die Verformung im abgekühlten Zustand zu erhöhen.

Der unerwünschten Nachvernetzung im verformten Zustand kann auch durch die Reduktion der Maximaltemperatur bei Aktivierung begegnet werden. Um eine Funktion zu realisieren, ist der in den Validierungsversuchen angestrebte vollständige Aktorikabruf nicht zwangsläufig notwendig. Wie bereits in Kapitel 6.2.3 gezeigt wurde, können Aktorikennwerte auch für Zwischenzustände mittlerer Temperatur aus den Charakterisierungsversuchen gewonnen werden.

7.3.2. Zusammenfassung Validierung

Wie es Abbildung 57 zeigt, liegen der Validierung in diesem Kapitel die zuvor entwickelten Lösungen in den Bereichen Herstellung und Simulation zugrunde. Die gezeigte Aktorikperformance und die Reproduzierbarkeit der Aktorik werden erst durch eine verbesserte Herstellung mit geschweißten SMA-Gittern und angepasster Prozessführung möglich. Die simulative Vorhersage der Aktorik aktiver SMA-FKV-Hybridbauteile basiert auf dem komplexitätsreduzierten Zustandslinien-Modell, anwendungsorientierter Aktorikcharakterisierung der SMA-Materialien gegen eine Steifigkeit und einer effizienten Implementierung in das FE-Modell mittels homogenisierter Schalen.

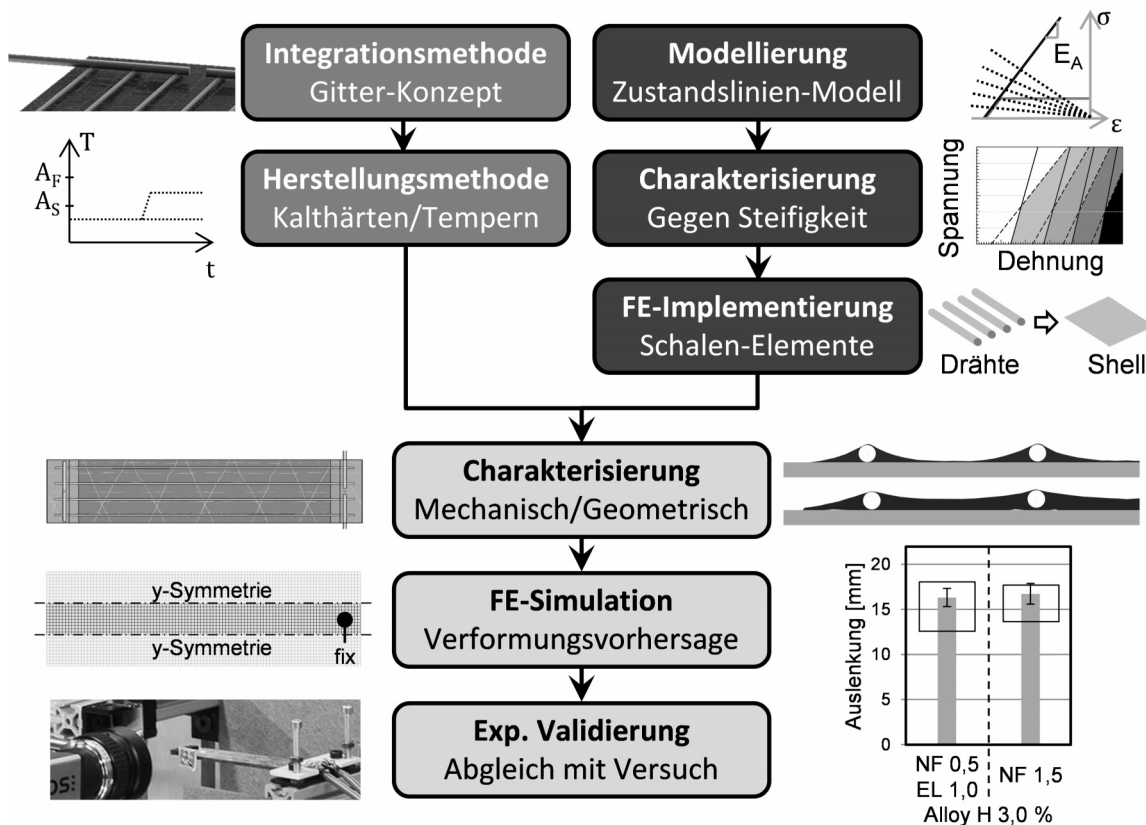


Abbildung 57: Validierung der Gesamtmethodik

Durch eine sorgfältige Charakterisierung der aktiven Technologie-Proben werden mögliche Fehlereinflüsse auf die Verformungsvorhersage minimiert und die Aussagekraft des experimentellen Abgleichs maximiert. Die gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Vorhersage validiert die verwendeten Materialparameter der spezifischen Technologie-Proben. In erster Linie wird aber die Anwendbarkeit der entwickelten Gesamtmethodik zur Herstellung und Auslegung von SMA-FKV-Hybridverbunden mit diesen Ergebnissen verifiziert.

8. Anwendungskonzepte

8.1. Eigenschaften und Vorteile aktiver SMA-FKV-Hybridverbunde für die Anwendung

Ein direkter Vergleich der konventionellen Aktorikprinzipien zu dem der SMA-FKV-Hybridverbunde anhand einer exemplarischen Anwendung ist zum jetzigen Zeitpunkt wenig aussagekräftig, da Lösungen unter Verwendung neuartiger aktiver Hybridverbunde kurz- bis mittelfristig ein signifikant erhöhtes Entwicklungsrisiko aufweisen und dadurch eventuelle Leistungssteigerungen gegenüber etablierten Aktor-Struktur-Kombinationen unattraktiv machen. Der Einsatz aktiver Hybridverbunde und der erhöhte Entwicklungsaufwand können jedoch auch kurzfristig gerechtfertigt sein, wenn das flächenintegrierte Aktorprinzip die Umsetzung einer bestimmten Funktion und der damit verbundenen Produkt-Wertsteigerung überhaupt erst ermöglicht und damit alternativlos ist. Um derartige Funktionen identifizieren zu können, müssen einerseits die prinzipiellen Vorteile und Möglichkeiten bekannt sein und andererseits die Produktentwicklung von der Denkweise in klassischen Lösungsansätzen befreit werden.

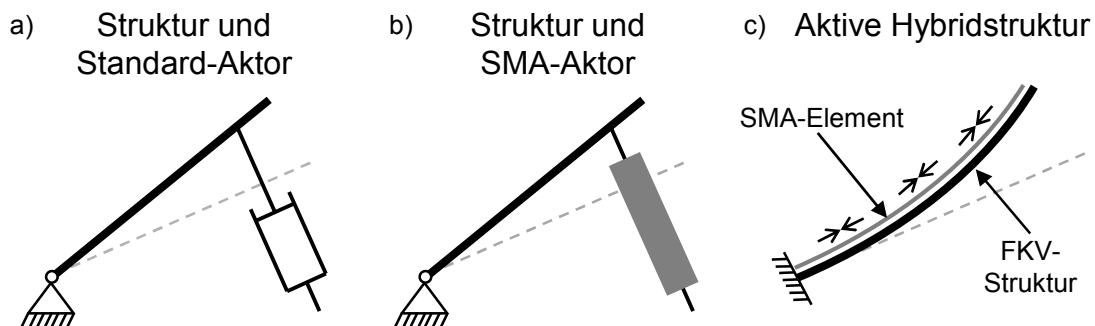


Abbildung 58: Aktorikprinzipien

In Abbildung 58 sind drei verschiedene Aktorikprinzipien skizziert, die sich im Wesentlichen im Aktortyp – etablierter Industriestandard oder SMA-Aktor – und in der Strukturanbindung – diskret angeschlossen oder flächenintegriert – unterscheiden. Das angestrebte Aktorikprinzip c) besitzt gegenüber den übrigen Aktorikprinzipien andere Aktorikfunktionen, geänderte Randbedingungen und potentielle Vorteile.

Aktorikfunktionen, die sich mit einem SMA-Aktor umsetzen lassen, sind z.B.:

- Passive Aktivierung der Aktorik (Umgebungstemperatur)
- Aktive Aktivierung der Aktorik (Joulesche Erwärmung)
- Stufenlose formvariable Verstellung
- Hochdynamische Aktivierung und träge Rückverformung
- Wechselseitige Aktorik (durch Protagonist-Antagonist-Anordnung siehe Abbildung 59)

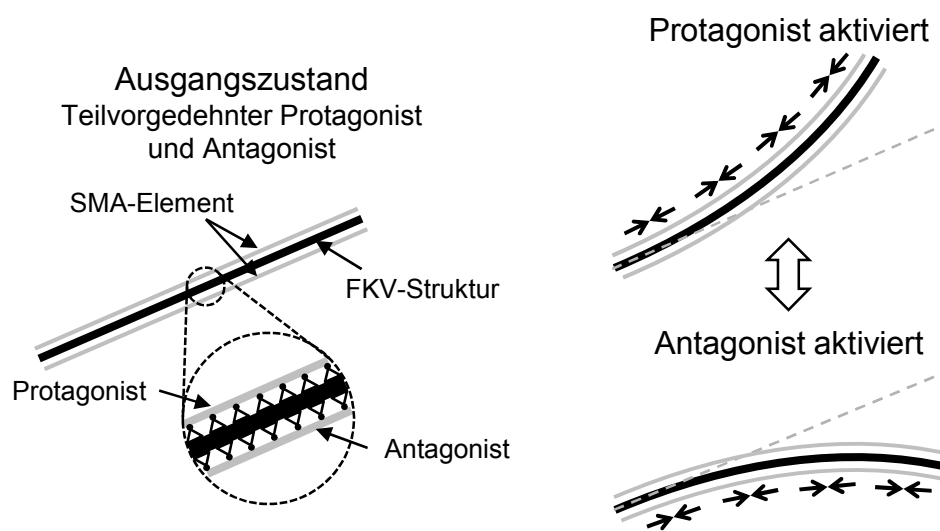


Abbildung 59: Protagonist-Antagonist-Anordnung einer flächenintegrierten SMA-Aktorik

Diese Aktorikfunktionen müssen das Anforderungsprofil einer potentiellen Funktion im Produkt abdecken, um erfolgreich sein zu können. Sie sprechen aber nicht allein für den Einsatz eines SMA-FKV-Hybridverbundes. Während sich die nutzbaren Aktorikfunktionen noch stark von der Wirkweise des SMA ableiten und für die Aktorikprinzipien b) und c) gelten, sind die essentiellen Vorteile der aktiven Hybridverbunde c) dem Integrationsprinzip geschuldet. Aus den geänderten Randbedingungen durch die Aktorikintegration lassen sich Vorteile ableiten, die die Umsetzung bestimmter Funktionen überhaupt erst ermöglichen können.

Die geänderten Randbedingungen sind im Wesentlichen:

- Keine Notwendigkeit von gewichts- und bauraumintensiven mechanischen Kupplungen und Verbindungen
- Flächig verteilter Eintrag der Aktordehnung in die Struktur
- Reduktion der minimalen Anzahl der Systemkomponenten auf eins
- Möglichkeit der individuellen Auslegung des Aktor-Struktur-Systems

Besonders der Verzicht auf jegliche Art von mechanischen Verbindungselementen zur Bewegungsermöglichung und kinematischen Bestimmung des Systems führt zu zwei der interessantesten Vorteile für viele Anwendungsbereiche: Stark reduzierter Bauraumbedarf und geringeres Systemgewicht. Der verteilte Eintrag von Aktordehnung in die Struktur eröffnet weiterhin hohe Designfreiheitsgrade, da sich die lokale Krümmung einstellen lässt. Mit der einteiligen Ausführung ist weiterhin eine geschlossene Oberfläche möglich, die genauso wie eine kontinuierliche Verformungsfigur optisch ansprechend sein kann und gleichzeitig für aerodynamische Anwendungen strömungstechnische Vorteile bietet. Die potentiellen Vorteile eines aktiven Hybridverbundes lassen mit den folgenden Punkten zusammenfassen:

- Stark reduzierte Bauraumanforderungen
- Geringes Systemgewicht
- Große Designfreiheit
- Geschlossene, kontinuierliche Oberfläche
- Geringer Montageaufwand

8.2. Neuartige Funktionen

Um zu verdeutlichen, wie die genannten Vorteile zur Umsetzung neuartiger Funktionen beitragen, werden hier einige Anwendungskonzepte beispielhaft diskutiert.

Adaptive aerodynamische Komponenten

Komponenten wie das Winglet, die Flügelendkante oder auch der Heckspoiler am Automobil bestimmen wesentlich die Wechselwirkung zwischen Produkt und Luftströmung. Eine situationsabhängige Anpassung der oben genannten Elemente kann direkt zu einer Leistungssteigerung des Produktes Flugzeug bzw. Automobil führen. In allen Fällen ist jedoch der Bauraum stark begrenzt und zusätzliches Gewicht unerwünscht. Während im Automobilbereich aktive Spoiler mit klassischen Aktoren ihren Weg in Produkte gefunden haben, ist dies bei adaptiven Winglets und Flügelendkantenaktorik nicht der Fall, da bei Luftfahrtanwendungen die Limitierungen in Bezug auf Gewicht und Bauraum um ein Vielfaches stärker als im Automobilbereich sind. Zudem kommt erschwerend hinzu, dass Flügelendkante und Winglet in besonders gewichts- und bauraumsensiblen peripheren Bereichen des Systems liegen. Dass der mögliche Nutzen neuartiger aerodynamische Stellflächen für das Gesamtsystem Flugzeug durchaus eine relevante Größe hätte, wird dadurch unterstrichen, dass die Hersteller große Anstrengungen in diesen Bereichen unternehmen. Dabei wird auch auf SMA-Aktoren zurückgegriffen, jedoch als Aktor in einem klassischen kinematischen System (vgl. Abbildung 58 b)) [50,51,86,87]. Für Anwendungen dieser Art können die aktiven SMA-FKV-Hybridverbunde der Schlüssel zum Erfolg sein. In Abbildung 60 a) sind eine neuartige Ausführung des adaptiven Winglets als Multiwinglet und eine Flügelendkantenaktorik skizziert. Eine für die Start- und Landephase optimierte Aerodynamik mittels aufgefächerten Multiwinglets und nach unten gefahrener Flügelendkante würde dazu beitragen, die Lärmemission und den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren.

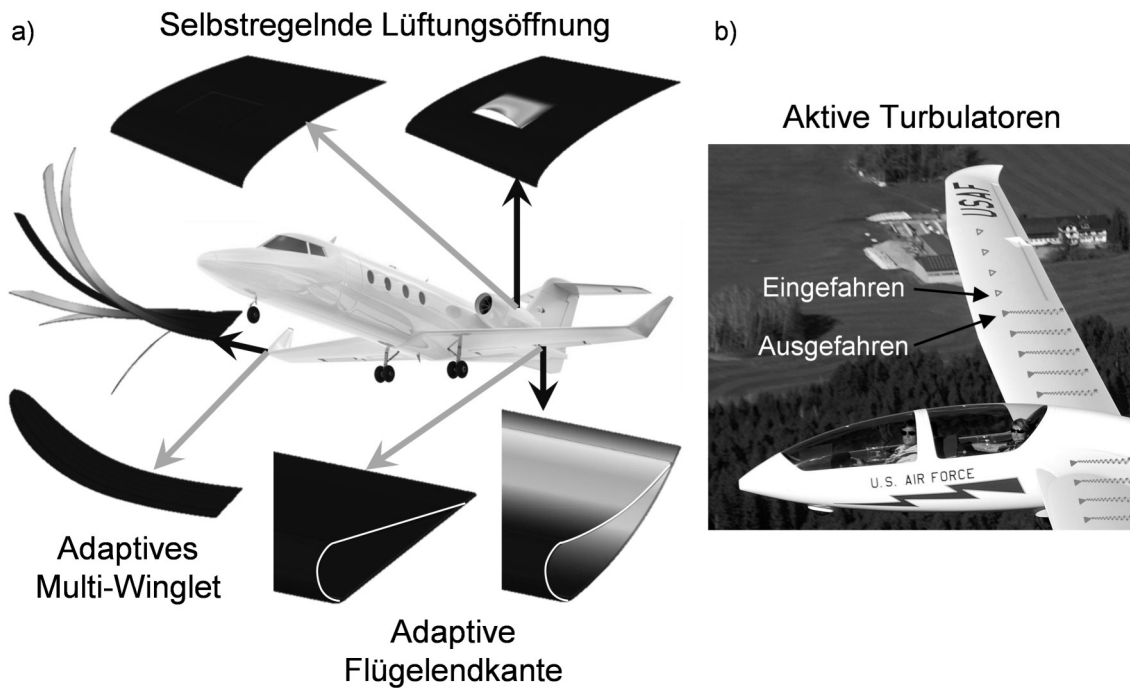


Abbildung 60: Anwendungskonzepte für aktive Hybridverbunde

Aktive Turbulatoren

Turbulatoren, welche ebenfalls der Kategorie der aerodynamischen Komponenten zugerechnet werden können, werden in ihrer klassischen statischen Ausführung lediglich in der allgemeinen Luftfahrt selektiv eingesetzt. Sie sind in großer Anzahl auf der Flügeloberfläche montiert (siehe Abbildung 60 b)) und als kleine, in die Strömung ragende Bleche ausgeführt. Sie verbessern das Flugverhalten speziell bei geringen Geschwindigkeiten für z.B. Start und Landung, verschlechtern aufgrund ihres Widerstandes jedoch die Effizienz im Reiseflug. Bei Bedarf ausklappbare Turbulatoren wären in der Lage, die Strömungsverhältnisse für den jeweiligen Flugzustand zu optimieren. Erschwerend zu den bereits genannten Gewichts- und Bauraumlimitierungen kommt hier die Herausforderung hinzu, eine große Anzahl verteilter, kleiner Elementen mit einer Aktorikfunktion auszustatten. Ausführungen mit SMA-Aktoren im mechanischen System (vgl. Abbildung 58 b)) wurden bisher nur im Labormaßstab untersucht [88,89]. Eine flächenintegrierte Aktorik mit ihrem größenunabhängigen Wirkprinzip kann auch hier den entscheidenden Vorteil mit sich bringen. Das Aktorikprinzip der SMA-FKV-Hybridverbunde erlaubt es, eine dezentrale Aktorik effizient in eine Vielzahl kleiner, aerodynamisch günstiger Flächenelemente zu integrieren.

Selbstregelnde Kühlöffnungen

Die selbstregelnde Kühlöffnung, dargestellt in Abbildung 60 a), nutzt im Gegensatz zu den bereits genannten Anwendungskonzepten die passive Aktivierbarkeit der SMA-Aktorik durch die Temperatur der direkten Umgebung, wodurch sich eine bedarfsgerechte Kühlung bei geringster Systemkomplexität realisieren lässt. Die Temperatur wird in einem geschlossenen System ohne Kühlung unter Anwesenheit einer Wärmequelle ständig erhöht, was zu Schäden oder Funktionsbeeinträchtigungen führen kann, weshalb im Falle eines Motors oder einer Bremsanlage eine Kühlung vorgesehen wird. Lüftungsöffnungen, die Frischluft zuführen, sind dabei eine einfache und vielfach eingesetzte Kühlungsmethode. Sind diese permanent geöffnet, muss auch in Situationen ohne Bedarf an Kühlung mit erhöhtem Luftwiderstand und einer eventuell nachteiligen Optik gerechnet werden. Eine Regelung der Lüftungs-klappe ist andererseits mit stark erhöhtem Aufwand verbunden. Ein aktives Eingreifen ist besonders erschwert, wenn es sich um rotierende Elemente, wie eine Autofelge, handelt. In diesem Fall und auch im nicht rotierenden Fall, z.B. Motor- oder Innenraum, könnte eine temperaturaktivierte Lüftungsöffnung in der Außenhaut mittels aktiver Hybridverbunde eine elegante Lösung darstellen, die selbsttätig auf Änderungen reagiert.

Die dargestellten Konzepte sollen nur einen kleinen Ausschnitt der Möglichkeiten aufzeigen und verdeutlichen, welche Randbedingungen in bestimmten Anwendungen dazu führen können, dass der Einsatz aktiver SMA-FKV-Hybridverbunde sinnvoll sein kann und wie die Vorteile neuartige Funktionen ermöglichen.

8.3. Aerodynamisches Profil

In diesem Kapitel wird anhand eines generischen aerodynamischen Profils aufgezeigt, wie unter Verwendung der entwickelten Methoden ein Demonstrator aufgebaut werden kann. Das aerodynamische Profil kann als aktiver Heckspoiler oder auch als Flügelendkante betrachtet werden. Die geometrischen Abmessungen und die angestrebte Aktorikperformance als Auslegungsziel sind in Abbildung 61 zu sehen. Die vertikale Last, welche im ausgelenkten Zustand der Verformung entgegenwirkt, kann bei Ausführung in Autobreite von 1,7 m als ca. 10 kg zusätzlicher Abtrieb interpretiert werden oder anwendungsneutral unter Annahme eines linearen Druckanstiegs in einen Druck von 0,87 kPa an der Endkante umgerechnet werden.

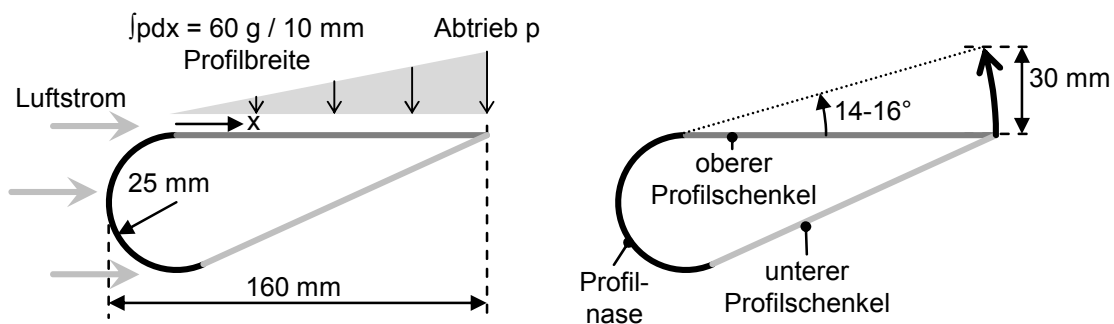


Abbildung 61: Geometrische Abmessungen und Aktorikziel des aerodynamischen Profils

Im Sinne der aktiven Hybridverbunde sind in Abbildung 62 verschiedene Varianten zur Aktuierung des Profils mittels flächenintegrierter Aktorik ausgeführt. Die Profilnase wird dazu als ideal steif angenommen. So reduziert sich der Auslegungsbereich auf die Profilart (offen, geschlossen, voll) und die Ausführung des oberen und unteren Profilschenkels. Von den gezeigten Varianten bietet sich Variante 3 besonders an, da sie hinsichtlich des strukturellen Verformungswiderstands an der Endkante, einer einfach zu erzielenden aerodynamisch glatten Oberfläche und der Demonstratorfertigung Vorteile bietet.

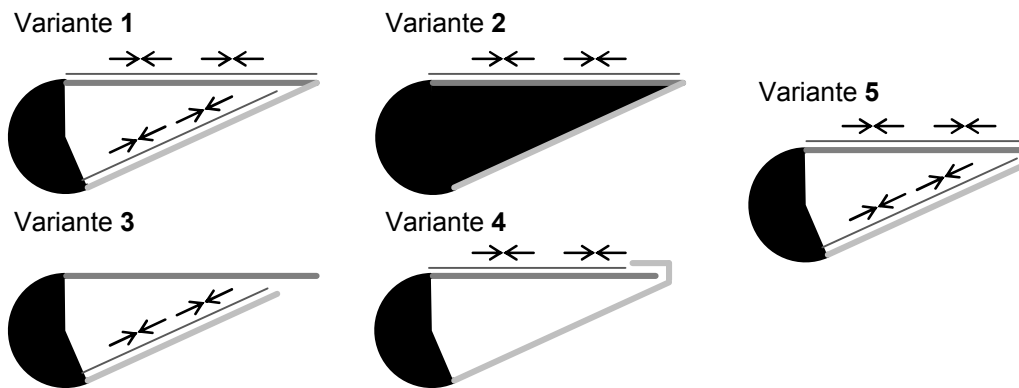


Abbildung 62: Varianten zur Aktuierung des aerodynamischen Profils

Um alle beteiligten Komponenten so auslegen zu können, dass das Aktorikziel erreicht wird, wird ein FE-Modell mit den Randbedingungen aus Abbildung 63 aufgebaut. Für den aktiven Hybridverbund, der den unteren Profilschenkel bildet, wird der SMA-Aktoranteil auf zwei Drähte SmartFlex[®] mit 0,5 mm Durchmesser pro 10 mm Profilbreite festgelegt. Unter Verwendung der Zustandskennlinie für 100 °C kann der Laminataufbau für den oberen und unteren Profilschenkel ausgelegt werden.

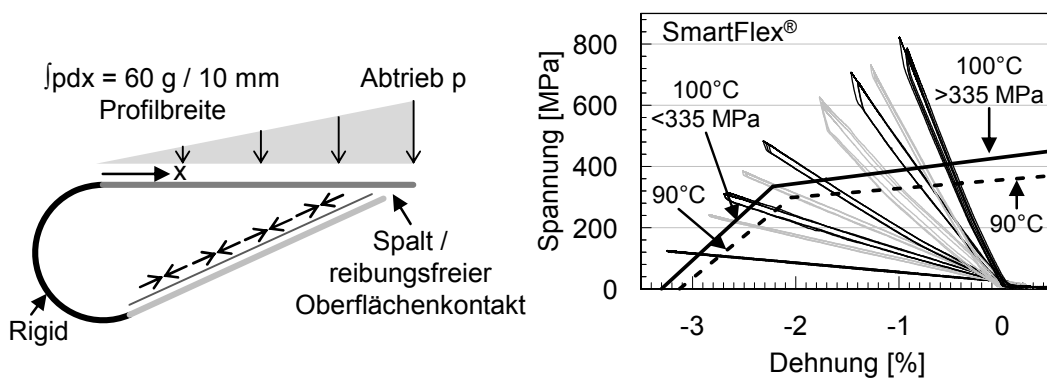


Abbildung 63: Randbedingungen des FE-Modells und die verwendeten Zustandskennlinien

Für den oberen Profilschenkel kommt ein 2 mm starkes Naturfaserlaminat zum Einsatz. Das Grundlaminat des unteren aktiven Profilschenkels wird aus einem 2 mm starken Naturfaserlaminat und einer 1,5 mm starken Elastomerschicht gebildet. Die Simulation des unteren Profilschenkels sieht eine Verformung von 34,6 mm (100 °C) vor. Berücksichtigt man die Gegenkraft durch den oberen Profilschenkel und die äu-

ßere Last, reduziert sich die Verformung um ca. 15-20 % und erreicht so das Auslegungsziel von 30 mm.

Um erstmalig eine Validierung für einen nur teilweise aufgeheizten Zustand durchführen zu können, wurde ein einzelner aktiver unterer Profilschenkel gefertigt und auf 91 °C aufgeheizt. Die reduzierte Temperatur wurde verwendet, um die Verformung nicht über die Verformung im Auslegungslastfall mit oberem Profilschenkel und äußerer Last steigen zu lassen. Wie Abbildung 64 zeigt, stimmt die gemessene Verformung von 28,5 mm gut mit der Vorhersage des Simulationsmodells von 29,6 mm überein.

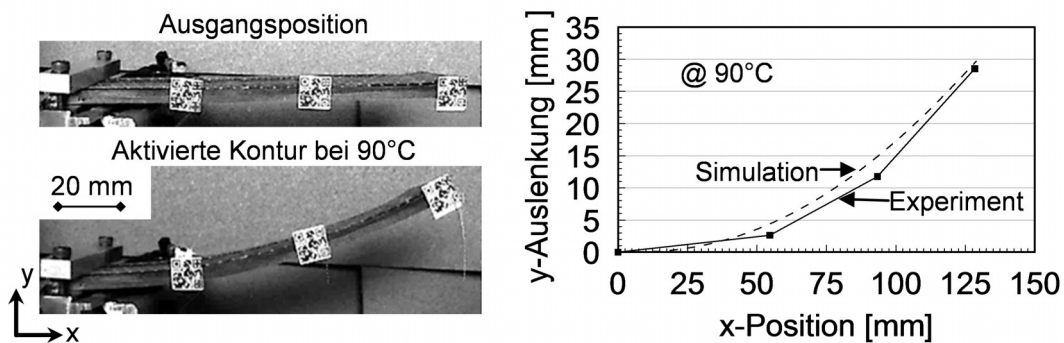


Abbildung 64: Aktuierung des unteren Profilschenkels und der Abgleich mit der Simulation

Zu Demonstrationszwecken wurde ein 30 mm breites aktives aerodynamisches Profil aus aktivem Hybridverbund, Profilmase und oberem Profilschenkel mit einer flexiblen Lackierung versehen und um eine Halterung für ein Gewicht von 120 g ergänzt. Mit einer Energieversorgung aus zwei Lithium-Polymer-Akkumulatoren (7,4 V/ 3800 mAh) und einer Regelung der Verformung kann auf Abruf eine Auslenkung an der Endkante von ca. 15 mm abgerufen werden, wie es Abbildung 65 zeigt. Die Akkukapazität erlaubt dabei mehr als 150 Zyklen. Auch wenn bereits mehr als 550 Zyklen ohne jegliches Anzeichen von Versagen abgerufen wurden, ist eine gesonderte Untersuchung der Dauerfestigkeit sinnvoll.

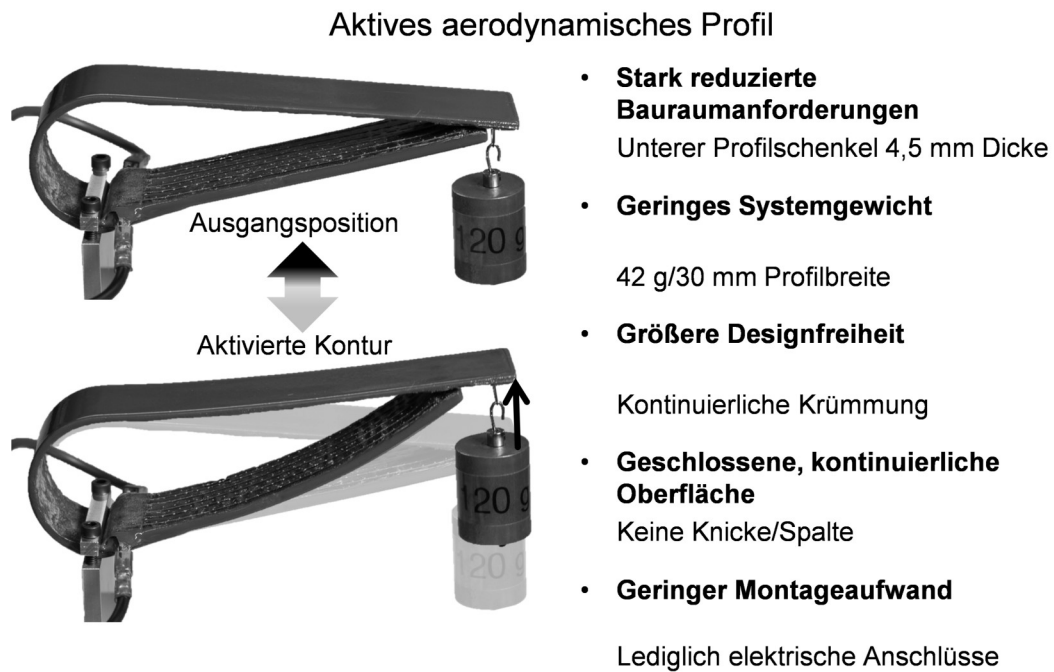


Abbildung 65: Verformung des Demonstrators

Die wesentlichsten Vorteile aktiver Hybridverbunde sind in Abbildung 65 dargestellt und können mit dem Demonstrator verifiziert und quantifiziert werden.

9. Zusammenfassung

Aktive SMA-FKV-Hybridverbunde ermöglichen es, eine material- und flächenintegrierte Aktorik zu realisieren. Mit einem ganzheitlichen und anwendungsorientierten Ansatz verfolgt diese Arbeit das Ziel, die Voraussetzungen für den industriellen Einsatz aktiver Hybridverbunde zu schaffen. Um dies zu erreichen, wurden herstellungstechnische Aspekte systematisch analysiert und neue Ansätze entwickelt.

Die bisher unzureichend gelöste Kraftübertragung zwischen SMA und FKV kann durch neue herstellungstechnische Ansätze realisiert werden. Ein neues Integrationskonzept, welches auf mechanischen Verankerungen zwischen FKV und SMA-Elemente basiert, verbessert die Kraftübertragung durch den Einsatz eines SMA-Gitters und lokal faserverstärkter Bereiche und erlaubt damit die Übertragung der erforderlichen Aktorspannungen. Der Einsatz des vorgefertigten SMA-Gitters gewährleistet einen flexiblen Herstellungsprozess und ein reproduzierbares Herstellungsergebnis. Zu einer erhöhten Leistungsfähigkeit trägt auch ein angepasster Herstellungsprozess bei. Eine Kaltärtung im ersten Schritt der Hybridverbundherstellung aus duromerem FKV und SMA-Gitter erlaubt einen Verzicht auf aufwendige Vorrichtungen zur Unterdrückung einer vorzeitigen Verformung der SMA-Elemente. Erweitert um eine individuell an die Hybridstruktur angepasste Temperatur zur Erhöhung der Vernetzungssichte des duromeren Polymers lässt sich die Leistungsfähigkeit weiter erhöhen und optimieren. Die maximale Spitzenauslenkung ohne äußere Last bezogen auf die aktive Länge einer Hybridstruktur konnte durch diese Anpassungen von 17 % auf mehr als 60 % gesteigert werden.

Um eine Auslegung aktiver Hybridverbunde für reale Bauteile zu ermöglichen, wurden Lösungen zur effizienten Abbildung der SMA-Aktorik und der gesamten Hybridverbundstruktur entwickelt. Ein komplexitätsreduziertes „Zustandslinien“-Modell, welches fokussiert die Aktorik von Ein-Weg-Effekt- und Zwei-Weg-Effekt-Materialien beschreibt, gewährleistet in Kombination mit einer anwendungsgerechten Aktorik-Charakterisierung eine hohe Aussagekraft in der Konstruktionsphase. Die Variation

des SMA-Materials (ein Zwei-Weg-Effekt-Material/ zwei Einweg-Effekt-Materialien), der gegen die Aktorik arbeitenden Steifigkeit und der Vordehnung der Ein-Weg-Effekt-Materialien von 1,8 % bis 6,3 % dokumentieren das breite Arbeitsspektrum mit Aktorspannungen von bis zu 800 MPa bei 1 % Kontraktion oder 4,5 % Kontraktion bei 100 MPa Aktorspannung. Durch die Beschreibung der gesamten Hybridverbunde mittels homogenisierter Schalen mit der Finiten-Elemente-Methode kann auf die Abbildung der realen mikroskopischen Geometrie verzichtet werden. Das erlaubt erstmals eine Vorhersage der Verformung ganzer Komponenten aus aktiven SMA-FKV-Hybridverbunden.

Zur Validierung des Modellierungsansatzes sowie des Gesamtvorgehens wurde ein Abgleich zwischen Simulation und Experiment durchgeführt und exemplarisch ein aerodynamisches Profil als Demonstrator entwickelt, gefertigt und getestet. Die Validierung konnte anhand spezieller Coupons erfolgreich für Vordehnungen bis zu 3 % sowie für teilaktivierte Zustände der SMA-Elemente durchgeführt werden. Extrem hohe Verformungsgrade mit einer Kontraktion von mehr als 3 % können zu einer Schädigung der FKV-Struktur führen und sind durch eine entsprechende Auslegung zu vermeiden. Zur Auslegung und zum Aufbau des aerodynamischen Profils wurden die entwickelten Simulations- und Herstellungsmethoden eingesetzt, um die Anwendbarkeit des Gesamtvorgehens unter Beweis zu stellen. Der Demonstrator validiert außerdem die erzielbaren Vorteile der aktiven Hybridverbunde gegenüber klassischer Aktor-Struktur-Mechaniken. Das aktive aerodynamische Profil wurde ausgelegt, um gegen einen Druck von 0,87 kPa eine Auslenkung der Endkanten von 22 % bezogen auf die Profiltiefe zu erzeugen. Der lediglich aus der Außenhaut gebildete Profilabschnitt wiegt 42 g bei einer Breite von 30 mm und ist in der Lage, an der Endkante 180 g über 30 mm anzuheben.

Mit den Ergebnissen dieser Arbeit ist es möglich, aktive Bauteile aus SMA-FKV-Hybridverbund in Hinblick auf eine konkrete Anwendung systematisch, rechnergestützt auszulegen und so effizient zu einem anwendungsgerechten Design zu gelangen. Für die Fertigung zuverlässiger aktiver Bauteile können die entwickelten Methoden eingesetzt werden. Hierdurch wird eine hohe Leistungsfähigkeit der Hybridverbunde bei minimalem Bauraum und geringer zusätzlicher Masse sichergestellt. Mit

diesen essentiellen auslegungs- und herstellungstechnischen Weiterentwicklungen sind wichtige Voraussetzungen für die industrielle Einsetzbarkeit der aktiven SMA-FKV-Hybridverbunde erfüllt. Neue innovative Funktionen, die sich nicht im Rahmen klassischer Aktorikprinzipien realisieren lassen, können zukünftig auf Basis der aktiven SMA-FKV-Hybridverbunde umgesetzt werden.

10. Literaturverzeichnis

- [1] Neitzel, M; Mitschang, P; Breuer, U.: Handbuch Verbundwerkstoffe. 2., aktualis. u. erw. Aufl ed., München: Hanser, 2014
- [2] Breuer, U.: Vorlesungssript: Flugzeugbau mit Verbundwerkstoffen. Wintersemester 2014/15, Kaiserslautern: Technische Universität, 2014
- [3] Janocha, H.: Adaptronics and Smart Structures. New York: Springer, 2007
- [4] Lagoudas, D.: Shape Memory Alloys. Boston: Springer, 2008
- [5] Wulz, H.G; Petricevic, R; Gurka, M.: New High Performance Sensor and Actuator Composites. In: European Space Agency (Ed.): Structural Materials Handbook Vol. 2: New Advanced Materials. Noordwijk, 2006
- [6] Otsuka, K.: Shape memory materials. 1. paperback ed. (with corr.) ed., Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1999
- [7] Bargel, H.-J; Schulze, G.: Werkstoffkunde. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012
- [8] Murasawa, G; Kitamura, K; Yoneyama, S; Miyazaki, S; Miyata, K; Nishioka, A; Koda, T.: Macroscopic stress–strain curve, local strain band behavior and the texture of NiTi thin sheets. Smart Mater. Struct Vol. 18, Heft 5 (2009), S. 55003
- [9] Huang, W.: On the selection of shape memory alloys for actuators. Materials & Design Vol. 23, Heft 1 (2002), S. 11–19
- [10] Just, E.: Entwicklung eines Formgedächtnis-Mikrogreifers. Karlsruhe, 2000
- [11] Reynaerts, D.: Control Methods and Actuation Technology for Whole-Hand Dexterous Manipulation. Leuven, 1995

- [12] Fumagalli, L; Butera, F; Coda, A.: SmartFlex® NiTi Wires for Shape Memory Actuators. *J. of Materi Eng and Perform* Vol. 18, Heft 5-6 (2009), S. 691–695
- [13] Abel, E; Luo, H; Pridham, M; Slade, A.: Issues concerning the measurement of transformation temperatures of NiTi alloys. *Smart Mater. Struct* Vol. 13, Heft 5 (2004), S. 1110–1117
- [14] Furst, S.J; Seelecke, S.: Modeling and experimental characterization of the stress, strain, and resistance of shape memory alloy actuator wires with controlled power input. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* Vol. 23, Heft 11 (2012), S. 1233–1247
- [15] Sahli, M.L; Necib, B.: Characterisation and modelling of behaviour of a shape memory alloys. *Int J Adv Manuf Technol* Vol. 70, Heft 9-12 (2014), S. 1847–1857
- [16] Benafan, O; Garg, A; Noebe, R.D; Bigelow, G.S; Padula, S.A; Gaydos, D.J; Schell, N; Mabe, J.H; Vaidyanathan, R.: Mechanical and functional behavior of a Ni-rich Ni_{50.3}Ti_{29.7}Hf₂₀ high temperature shape memory alloy. *Intermetallics* Vol. 50 (2014), S. 94–107
- [17] Lexcellent, C; Leclercq, S; Gabry, B; Bourbon, G.: The two way shape memory effect of shape memory alloys: an experimental study and a phenomenological model. *International Journal of Plasticity* Vol. 16, Heft 10-11 (2000), S. 1155–1168
- [18] Paiva, A; Savi, M.A.: An overview of constitutive models for shape memory alloys. *Mathematical Problems in Engineering* Vol. 2006, Heft 43 (2006), S. 1–30
- [19] Panico, M; Brinson, L.C.: A three-dimensional phenomenological model for martensite reorientation in shape memory alloys. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* Vol. 55, Heft 11 (2007), S. 2491–2511

- [20] Bernardini, D; Pence, T.J.: Shape-Memory Materials, Modeling. In: Schwartz, M. (Ed.): Encyclopedia of Smart Materials. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2002, S. 964–980
- [21] Zaki, W; Moumni, Z.: A three-dimensional model of the thermomechanical behavior of shape memory alloys. Journal of the Mechanics and Physics of Solids Vol. 55, Heft 11 (2007), S. 2455–2490
- [22] Ortín, J.: Preisach modeling of hysteresis for a pseudoelastic Cu-Zn-Al single crystal. J. Appl. Phys. Vol. 71, Heft 3 (1992), S. 1454
- [23] Turner, T.L.: A New Thermoelastic Model for Analysis of Shape Memory Alloy Hybrid Composites. Journal of Intelligent Material Systems and Structures Vol. 11, Heft 5 (2000), S. 382–394
- [24] Boyd, J.G; Lagoudas, D.C.: Thermomechanical Response of Shape Memory Composites. Journal of Intelligent Material Systems and Structures Vol. 5, Heft 3 (1994), S. 333–346
- [25] Brinson, L.: One-Dimensional Constitutive Behavior of Shape Memory Alloys: Thermomechanical Derivation with Non-Constant Material Functions and Redefined Martensite Internal Variable. Journal of Intelligent Material Systems and Structures Vol. 4, Heft 2 (1993), S. 229–242
- [26] Tanaka, K; Nagaki, S.: A thermomechanical description of materials with internal variables in the process of phase transitions. Ing. arch Vol. 51, Heft 5 (1982), S. 287–299
- [27] Terriault, P; Brailovski, V.: Modeling of Shape Memory Alloy Actuators Using Likhachev's Formulation. Journal of Intelligent Material Systems and Structures Vol. 22, Heft 4 (2011), S. 353–368

- [28] Liang, C; Rogers, C.A.: One-Dimensional Thermomechanical Constitutive Relations for Shape Memory Materials. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* Vol. 1, Heft 2 (1990), S. 207–234
- [29] Pfahler, J.: Aktuator mit mindestens zwei Stellelementen und Ventil mit einem Aktuator, Alfmeier Präzision AG Baugruppen und Systemlösungen, 2009
- [30] Browne, A.L; Johnson, N.L; Brown, J.: SMA actuated vertical blade louver system: Part 1 Performance requirements and design. In: *Proceedings of the ASME 2013 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*. USA, Utah, Snowbird, 2013
- [31] Hooley, T.: Sub-Miniature SMA Autofocus Actuator and Controller for Mobile-Phone Cameras. In: *Proceedings of the 11th International Conference on New Actuators, ACTUATOR*. Bremen, 2008
- [32] Mohd Jani, J; Leary, M; Subic, A; Gibson, M.A.: A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials & Design* Vol. 56 (2014), S. 1078–1113
- [33] Barbarino, S; Saavedra Flores, E I; Ajaj, R.M; Dayyani, I; Friswell, M.I.: A review on shape memory alloys with applications to morphing aircraft. *Smart Mater. Struct.* Vol. 23, Heft 6 (2014), S. 63001
- [34] Schürmann, H.: *Konstruieren mit Faserverbundwerkstoffen*. 1st ed., Berlin: Springer, 2004
- [35] AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V.: *Handbuch Faserverbundkunststoffe*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014
- [36] Hellerich, W; Harsch, G; Haenle, S.: *Werkstoff-Führer Kunststoffe*. 9., völlig überarb. Aufl ed., München, Wien: Hanser, 2004

- [37] Gillham, J.K.: Formation and properties of thermosetting and highTg polymeric materials. Polym. Eng. Sci. Vol. 26, Heft 20 (1986), S. 1429–1433
- [38] Turi, E.A.: Thermal characterization of polymeric materials. New York: Academic Press, 1981
- [39] Saechtling, H; Oberbach, K.: Kunststoff Taschenbuch. 28. Ausgabe ed., München: Hanser, 2001
- [40] Strobl, G.R.: The physics of polymers. 3., rev. and exp ed., Berlin, Heidelberg: Springer, 2007
- [41] Seidel, A; Pidgeon, S; Bailey, J.: Characterization analysis of polymers. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2008
- [42] Hexel Corporation: RTM 6 Data Sheet, Global Version. http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/RTM-Data-Sheets/RTM6_global.pdf. Zuletzt geprüft am 31.03.2015
- [43] Steinke, P.: Finite-Elemente-Methode. 2.th ed., Berlin: Springer, 2007
- [44] Klein, B.: FEM. 8., verb. und erw ed., Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010
- [45] Nasdala, L.: FEM-Formelsammlung Statik und Dynamik. 1. Aufl ed., Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010
- [46] van Humbeeck, J.: Shape Memory Materials. J. Phys. IV France Vol. 7, Heft C5 (1997), S. 3–12
- [47] Rogers, C.A; Barker, D.K; Bennett, K.D; Wynn, Jr.,R. H; Udd, E.: Demonstration Of A Smart Material With Embedded Actuators And Sensors For Active Control. In Proceedings of SPIE 0986 Conference on Fiber Optic Smart Structures and Skins. USA, MA, Boston, 1989, S. 90–105

- [48] Wei, Z.G; Sandström, R; Miyazaki, S.: Review Shape-memory materials and hybrid composites for smart systems. *Journal of Materials Science* Vol. 33, Heft 15 (1998), S. 3763–3783
- [49] Wei, Z.G; Sandström, R; Miyazaki, S.: Review Shape memory materials and hybrid composites for smart systems. *Journal of Materials Science* Vol. 33, Heft 15 (1998), S. 3743–3762
- [50] Hartl, D.J; Lagoudas, D.C; Calkins, F.T; Mabe, J.H.: Use of a Ni60Ti shape memory alloy for active jet engine chevron application: I. Thermomechanical characterization. *Smart Mater. Struct.* Vol. 19, Heft 1 (2010), S. 15020
- [51] Hartl, D.J; Mooney, J.T; Lagoudas, D.C; Calkins, F.T; Mabe, J.H.: Use of a Ni60Ti shape memory alloy for active jet engine chevron application: II. Experimentally validated numerical analysis. *Smart Mater. Struct.* Vol. 19, Heft 1 (2010), S. 15021
- [52] Yang, S.-M.: Experimental Studies on Active Shape Control of Composite Structures using SMA Actuators. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* Vol. 17, Heft 8-9 (2006), S. 767–777
- [53] Simoneau, C; Terriault, P; Lacasse, S; Brailovski, V.: Adaptive Composite Panel with Embedded SMA Actuators: Modeling and Validation. *Mechanics Based Design of Structures and Machines* Vol. 42, Heft 2 (2014), S. 174–192
- [54] Lacasse, S; Terriault, P; Simoneau, C; Brailovski, V.: Design, manufacturing, and testing of an adaptive composite panel with embedded shape memory alloy actuators. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* (2014), S. 1–18
- [55] Baz, A; Ro, J.: Thermo-dynamic characteristics of nitinol-reinforced composite beams. *Composites Engineering* Vol. 2, Heft 5-7 (1992), S. 527–542

- [56] Zhou, G; Lloyd, P.: Design, manufacture and evaluation of bending behaviour of composite beams embedded with SMA wires. *Composites Science and Technology* Vol. 69, Heft 13 (2009), S. 2034–2041
- [57] Davis, B; Turner, T.L; Seelecke, S.: Measurement and Prediction of the Thermomechanical Response of Shape Memory Alloy Hybrid Composite Beams. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* Vol. 19, Heft 2 (2007), S. 129–143
- [58] Balta, J.A; Bosia, F; Michaud, V; Dunkel, G; Botsis, J; Månson, J.-A.: Smart composites with embedded shape memory alloy actuators and fibre Bragg grating sensors: activation and control. *Smart Mater. Struct* Vol. 14, Heft 4 (2005), S. 457–465
- [59] Kirkby, E.L; O’Keane, J; Oliveira, R. de; Michaud, V.J; Månson, J.-A.E.: Tailored processing of epoxy with embedded shape memory alloy wires. *Smart Mater. Struct* Vol. 18, Heft 9 (2009), S. 95043
- [60] Balta, J.A; Parlinska, M; Michaud, V; Gotthardt, R; Månson, J.-A.E.: Adaptive Composites with Embedded Shape Memory Alloy Wires. *Material Research Society Symposium Proceedings*, Heft 604 (2000), S. 141–146
- [61] Balta, J.A; Michaud, V; Månson, J.-A.: Adaptive Composite Materials Processing. In: *Proceedings of 10th European Conference on Composite Materials, ECCM*. Belgien, Brügge, 2002
- [62] Turner, T.L; Lach, C.L; Cano, R.J.: Fabrication and characterization of SMA hybrid composites. In: *Proceedings of 8th SPIE Symposium on Smart Structures and Materials*. USA, CA, Newport Beach, 2001
- [63] Parthenios, J; Psarras, G; Galiotis, C.: Adaptive composites incorporating shape memory alloy wires. Part 2: development of internal recovery stresses as a

- function of activation temperature. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Vol. 32, Heft 12 (2001), S. 1735–1747
- [64] Psarras, G; Parthenios, J; Bolas, D; Galiotis, C.: Internal Stress Generation in Composites Incorporating Prestrained Shape Memory Alloy Wires. In: *Proceedings of 10th European Conference on Composite Materials, ECCM*. Belgien, Brügge, 2002
- [65] Daghia, F; Inman, D.J; Ubertini, F; Viola, E.: Shape Memory Alloy Hybrid Composite Plates for Shape and Stiffness Control. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* Vol. 19, Heft 5 (2007), S. 609–619
- [66] Daghia, F; Faiella, G; Antonucci, V; Giordano, M.: Thermomechanical Modelling and Experimental Testing of a Shape Memory Alloy Hybrid Composite Plate. *Advances in Science and Technology*, Heft 59 (2008), S. 41–46
- [67] Tobushi, H; Hayashi, S; Sugimoto, Y; Date, K.: Two-Way Bending Properties of Shape Memory Composite with SMA and SMP. *Materials* Vol. 2, Heft 3 (2009), S. 1180–1192
- [68] Faiella, G; Antonucci, V; Daghia, F; Fascia, S; Giordano, M.: Fabrication and Thermo-Mechanical Characterization of a Shape Memory Alloy Hybrid Composite. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* Vol. 22, Heft 3 (2011), S. 245–252
- [69] Rossi, S; Deflorian, F; Pegoretti, A; D'Orazio, D; Gialanella, S.: Chemical and mechanical treatments to improve the surface properties of shape memory NiTi wires. *Surface and Coatings Technology* Vol. 202, Heft 10 (2008), S. 2214–2222
- [70] Paine, J.S.N; Jones, W.M; Rogers, C.A.: Nitinol actuator to host composite interfacial adhesion in adaptive hybrid composites. In: *Proceedings of 33rd Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. USA, TX, Dallas, 1992

- [71] Jonnalagadda, K; Kline, G.E; Sottos, N.R.: Local displacements and load transfer in shape memory alloy composites. *Experimental Mechanics* Vol. 37, Heft 1 (1997), S. 78-86
- [72] Jarali, C.S; Mahapatra, D.R.: Modeling the interface effect of shape memory alloy composite materials. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures* Vol. 6, Heft 2 (2010), S. 257–283
- [73] Wang, Y; Zhou, L; Wang, Z; Huang, H; Ye, L.: Stress distributions in single shape memory alloy fiber composites. *Materials & Design* Vol. 32, Heft 7 (2011), S. 3783–3789
- [74] Gibson, R.F.: A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures. *Composite Structures* Vol. 92, Heft 12 (2010), S. 2793–2810
- [75] Gururaja, M.N; Hari Rao, A.N.: A Review on Recent Applications and Future Prospectus of Hybrid Composites. *International Journal of Soft Computing and Engineering* Vol. 1, Heft 6 (2012), S. 352–355
- [76] Meo, M.: Multifunctional SMA-based composites for aerospace applications. In: Friedrich, K; Breuer, U. (Eds.): *Multifunctionality of polymer composites*. Oxford, Waltham: Elsevier, 2015, S. 709–724
- [77] Hübler, M; Gurka, M; Breuer, U.P.: From attached shape memory alloy wires to integrated active elements, a small step? Impact of local effects on direct integration in fiber reinforced plastics. *Journal of Composite Materials* Vol. 15, Heft 49 (2015), S. 1895–1905
- [78] Mirshekari, G.R; Saatchi, A; Kermanpur, A; Sadrnezhad, S.K.: Laser welding of NiTi shape memory alloy: Comparison of the similar and dissimilar joints to AISI 304 stainless steel. *Optics & Laser Technology* Vol. 54 (2013), S. 151–158

- [79] Zuckschwerdt, K.: Schweißen von NiTi-Formgedächtnislegierungen mit hochlegierten Stählen. Stuttgart, 2001
- [80] Künne, B.: Einführung in die Maschinenelemente. 2., überarb. Aufl ed., Stuttgart: Teubner, 2001
- [81] Liu, Y; Xie, Z; van Humbeeck, J; Delaey, L.: Asymmetry of stress–strain curves under tension and compression for NiTi shape memory alloys. *Acta Materialia* Vol. 46, Heft 12 (1998), S. 4325–4338
- [82] Müller, I.: Grundzüge der Thermodynamik. 3.th ed., Berlin: Springer, 2001
- [83] Achenbach, M.: A Model for an Alloy with Shape Memory. *International Journal of Plasticity*, Heft 5 (1989), S. 371–395
- [84] Seelecke, S; Mueller, I.: Shape memory alloy actuators in smart structures: Modeling and simulation. *Appl. Mech. Rev* Vol. 57, Heft 1 (2004), S. 23–46
- [85] Gross, D; Hauger, W; Wall, W.A.: Technische Mechanik 2. 10., neu bearb ed., Berlin, Heidelberg: Springer, 2010
- [86] Mabe, J.H; Brown, J.K; Calkins, F.T.: Flight Test of a Shape Memory Alloy Actuated Adaptive Trailing Edge Flap: Part 1. In: *Proceedings of SMST 2014 International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies*. USA, CA, Pacific Grove, 2014
- [87] Sankritho, M.M.K.V; Frommer, J.B.: Controllable Winglets, The Boeing Company, 2008
- [88] Ikeda, T; Masuda, S; Miyasaka, T; Ueda, T.: Smart Vortex Generator Using Shape Memory Alloy. In: *Proceedings of 25th International Congress Of The Aeronautical Sciences*. Hamburg, 2006

-
- [89] Quackenbush, T.R; McKillip, R.M; Whitehouse, G.R.: Development and Testing of Deployable Vortex Generators Using SMA Actuation. In: Proceedings of 28th AIAA Applied Aerodynamics Conference. USA, IL, Chicago, 2010

11. Eigene Veröffentlichungen

Poster

1. Hübler, M.; Gurka, M.; Breuer, U.: Load-Initiated Two-Way Effect of Shape Memory Alloys. IVW Kolloquium, Kaiserslautern, November, 2012
2. Nissle, S.; Hübler, M.; Gurka, M.: Smartes Crash-Management durch schaltbares Deformations-Verhalten von Energieabsorbern aus faserverstärkten Kunststoffen (FKV) mit Shape Memory Alloy (SMA) Drähten. VDI Mechatroniktagung, Dortmund, März, 2015
3. Hübler, M.; Nissle, S.; Gurka, M.: SMA as Actuating Elements in FRP Structures. IVW Kolloquium, Kaiserslautern, Juni, 2015
4. Nissle, S.; Hübler, M.; Gurka, M.: Integration of shape memory alloy wires in fiber reinforced polymers for endless crash absorber structures. IVW Kolloquium, Kaiserslautern, Juni, 2015

Konferenzbeiträge

1. Gurka, M.; Hübler, M.; Schmeer, S.; Breuer, U.: Shape Memory Alloys as Actuating Elements in Fiber Reinforced Structures – from Smart Materials to Components. ACTUATOR, Bremen, Juni, 2012
2. Gurka, M.; Hübler, M.; Schmeer, S.; Breuer, U.: Switchable fiber reinforced structures – from smart materials to components. ECCM15, 15th European Conference on Composite Materials, Italien, Venedig, Juni, 2012
3. Gurka, M.; Hübler, M.; Schmeer, S.; Breuer, U.: Load-initiated two-way effect of shape memory alloys in composite structures and a phenomenological modeling approach. SMASIS2012, Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, USA, Georgia, Stone Mountain, September, 2012
4. Hübler, M.; Gurka, M.; Breuer, U.: From attached SMA wires to integrated active elements – A small step?. ICCM19, 19th International Conference on Composite Materials, Kanada, Montreal, Juli, 2013
5. Hübler, M.; Nissle, S.; Gurka, M.; Schmeer, S.; Breuer, U.: Smart crash management by switching the crash behavior of fiber-reinforced plastic (FRP) energy absorbers with shape memory alloy (SMA) wires. SMASIS2013, Conference

- on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, USA, Utah, Snowbird, September, 2013
6. Hübler, M.; Nissle, S.; Gurka, M.; Breuer, U.: Actuation of Shape Memory Alloy (SMA) Wires with Two-Way-Effect and the Challenges of Manufacturing Active SMA-FRP-Composites. Euro Intelligent Materials, 1st European Symposium on Intelligent Materials, Kiel, Juni, 2013
 7. Hübler, M.; Nissle, S.; Gurka, M.; Breuer, U.: An active hybrid structure – fiber reinforced polymers and shape memory alloys. EuroHybrid, Euro Hybrid Materials and Structures, Stade, April, 2014
 8. Hübler, M.; Nissle, S.; Gurka, M.; Breuer, U.: Load-Conforming Design and Manufacturing of Active Hybrid Fiber Reinforced Polymer Structure with Integrated Shape Memory Alloy Wires for Actuation Purposes. ACTUATOR, Bremen, Juni, 2014
 9. Hübler, M.; Gurka, M.: Entwicklung und Fertigung von aktiven Faserkunststoffstrukturen mit integrierten Formgedächtnislegierungen. Carbon Composites e.V. Thementag „Funktionsintegration in der Praxis“, Leipzig, Oktober, 2014
 10. Nissle, S.; Hübler, M.; Gurka, M.: Challenges of Manufacturing Active SMA-FRP-Composites and Self-Sensing as an Opportunity. MSE, Material Science Engineering, Darmstadt, September, 2014
 11. Nissle, S.; Gurka, M.; Hübler, M.; Schmeer, S.; Voll, N.: Integration of Shape Memory Alloy Wires in Fiber Reinforced Polymers for Endless Crash Absorber Structures. SMASIS2014, Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, USA, Rhode Island, Newport, September, 2014
 12. Kelkel, B.; Sebastian, R.; Hübler, M.; Gurka, M.: New Approaches for the Manufacturing and Characterization of Smart Structures made of Fiber Reinforced Plastics. SMART2015, 7th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials, Portugal, Ponta Delgada, Juni, 2015

Zeitschriftenbeiträge

1. Hübler, M.; Gurka, M.; Schmeer, S.; Breuer, U.: Performance range of SMA actuator wires and SMA–FRP structure in terms of manufacturing, modeling and actuation. *Journal of Smart Materials and Structures*, 22 (2013), 094002, doi:10.1088/0964-1726/22/9/094002
2. Hübler, M.; Gurka, M.; Breuer, U.: From attached shape memory alloy wires to integrated active elements, a small step? Impact of local effects on direct integration in fiber reinforced plastics. *Journal of Composite Materials*, 49 (2015), 1895-1905, doi:10.1177/0021998314550494

Patente

1. Beeh, E.; Gurka, G.; Hübler, M.; Schmeer, S.: Deformation element for absorption of kinetic harming energy in e.g. front carriage of motor car, has longitudinal section cooperating with baffle plate, where predeformation is applied on element by activation of actuator. DE102012012060A1
2. Beeh, E.; Brückmann, S.; Gurka, G.; Hübler, M.; Kriescher, M.; Schmeer, S.; Zimmermann, M.: Vehicle has coupling element that is detached by coupling device during impending or performance-end collision of vehicle with colliding object, such that coupling element is movable relative to passenger compartment. DE102012105298A1
3. Fritz, L.; Gurka, M.; Hübler, M.; Nissle, S.: Biegeaktuator mit Formgedächtniselement. Angemeldet am 30.4.2015

12. Betreute Arbeiten

1. Wekesser, V.: Simulative Beschreibung eines aktiven Shape-Memory-Alloy-CFK-Verbundes mit Hilfe von Ausdehnungskoeffizienten, IVW-Bericht 11-042, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern, Studienarbeit, 2011
2. Engel, C.: Experimentelle Untersuchung des Aktorikverhaltens von Shape-Memory-Alloy-Drähten mit Einwegeffekt, IVW-Bericht 11-043, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern, Studienarbeit, 2011
3. Nissle, S.: Experimentelle Untersuchung von Einwegeffekt-SMA-Drähten mit Betrachtung des elektrischen Widerstands, IVW-Bericht 12-045, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern, Studienarbeit, 2012
4. Nissle, S.: Zwei-Wege-Formgedächtnislegierung als Aktor in Faser-Kunststoff-Verbunden, IVW-Bericht 12-078, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern, Diplomarbeit, 2012
5. Schneiders, M.: Experimentelle Charakterisierung der Aktorikperformance von vorgedehnten Formgedächtnisdrähten Typ Alloy M gegen verschiedene Federsteifigkeiten, IVW-Bericht 13-021, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern, Studienarbeit, 2013
6. Heberger, L.: Experimentelle Untersuchung des lokal aufgelösten Dehnungsverhaltens von Formgedächtnislegierungen, IVW-Bericht 13-047, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern, Diplomarbeit, 2013
7. Müller, T.: Lastgerechte Integration von aktiven Formgedächtnislegierungselementen in Faserkunststoffverbunde, IVW-Bericht 07-070, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern, Diplomarbeit, 2013
8. Zimmermann, R.: Aktorikcharakterisierung einer Formgedächtnislegierung mit Ein-Weg-Effekt und erhöhter Umwandlungstemperatur, IVW-Bericht 14-032, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern, Studienprojekt, 2014
9. Fritz, L.: Simulationsgestützte Auslegung eines aktiven Heckflügels aus Formgedächtnislegierungen und einem Faser-Kunststoffverbund, IVW-Bericht 14-084, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern, Studienarbeit, 2014
10. Fritz, L.: Herstellung und Inbetriebnahme eines aktiven Heckspoilers aus FVK und Formgedächtnislegierungen, IVW-Bericht 14-106, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern, Diplomarbeit, 2014

11. Breyll, P.: Experimentelle Validierung einer Modellierungsmethode für aktive SMA-FKV-Hybridverbunde, IVW-Bericht 15-017, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern, Diplomarbeit, 2015
12. Sterz, M.: Umfassende Analyse der industriellen Einsatzpotenziale thermischer Formgedächtnislegierungen in ausgewählten Branchen, IVW-Bericht 15-020, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern, Projektseminar, 2015
13. Geißler, P.: Vergleich unterschiedlicher Ausführungen des TTS und deren Anwendbarkeit auf den teilkristallinen Thermoplasten PEEK, IVW-Bericht 15-036, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern, Studienarbeit, 2015