



Institut für Konstruktionstechnik
und Technisches Design
Universität Stuttgart

Forschungs- und Lehrgebiet
Technisches Design

Prof. Dr.-Ing. T. Maier

Andrea Hein

Auslegung und Entwurf adaptiver Strukturen und Systeme mit Formgedächtnislegierungen

Bericht Nr. 705

Auslegung und Entwurf adaptiver Strukturen und Systeme mit Formgedächtnislegierungen

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der
Universität Stuttgart

zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Andrea Hein

geboren in Herrenberg

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Maier

Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Gundelsweiler

Tag der mündlichen Prüfung: 03.08.2021

Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design

Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design

Universität Stuttgart

D 93

ISBN-13: 978-3-946924-16-6

Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design
Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Maier

Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 9

D-70569 Stuttgart

Telefon +49 (0)711 685-66055

Telefax: +49 (0)711 685-66219

E-Mail: mail@iktd.uni-stuttgart.de

Vorwort

*„Science is not only a disciple of reason
but, also, one of romance and passion.“*

(Stephen Hawking, 2010)

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademische Mitarbeiterin am Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD), Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design, der Universität Stuttgart.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Maier danke ich für die Betreuung der Arbeit und das in mich gesetzte Vertrauen. Die fachlichen Diskussionen während der Zeit am Institut und die Freiheiten bei der Wahl und Bearbeitung meines Forschungsthemas haben erheblich dazu beigetragen, dass diese Dissertation entstanden ist.

Ebenfalls danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Gundelsweiler für das Interesse an meinem Thema und die Übernahme des Mitberichts. Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Wagner danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Allen meinen ehemaligen Kollegen gilt mein Dank für das immer freundliche Umfeld am Institut und den Zusammenhalt im Team. Besonders danken möchte ich Dr.-Ing. Daniel Holder für die fachlichen Gespräche und die persönliche Unterstützung über all die Jahre sowie Felix, Philipp, Paula, Tobi, Marcus und allen Kollegen für den fachlichen und privaten Austausch, die gegenseitige Unterstützung, die Zeit am Institut, die Spaziergänge und alle gemeinsamen Unternehmungen. Ich kann mir nicht vorstellen, wie meine Doktorarbeit ohne eure Hinweise, Diskussionen und Ratschläge aussehen würde.

Der größte Dank geht an meine Familie, die mich auf meinem ganzen bisherigen Weg immer unterstützt und bestärkt hat und besonders auch in der Promotionszeit alle Hürden mit mir genommen hat. Durch Eure Unterstützung und Förderung wurde der Grundstein für das Gelingen dieser Arbeit gelegt.

Stuttgart, im Oktober 2021

Andrea Hein

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Inhaltsverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	VII
Abstract	XI
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit.....	3
1.3 Struktur der Arbeit.....	4
2 Stand der Technik und Forschung	7
2.1 Ergonomie	7
2.1.1 Anthropometrie.....	7
2.1.2 Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS).....	9
2.2 Produktgestalt.....	12
2.2.1 Aufbaugestalt	12
2.2.1.1 Tragwerksgestalt	13
2.2.1.2 Bewegliche Tragwerke und Gelenke	14
2.2.2 Formgestalt	17
2.3 Grundlagen der Regelungstechnik - das Regelungssystem	17
2.3.1 Regler.....	19
2.3.2 Regelkreis adaptiver Strukturen und Systeme mit FGL.....	20
2.3.3 Aktoren und Sensoren.....	21
2.4 Smarte Materialien (SM).....	21
2.4.1 Einteilung und Übersicht smarterer Materialien.....	22
2.4.2 Formveränderbare smarte Materialien	22
2.4.2.1 Formgedächtnislegierungen (FGL).....	23
2.4.2.2 Formgedächtnis Polymere (FGP)	24
2.4.2.3 Dielektrische Elastomere (DE).....	25
2.4.2.4 Elektrostriktive Materialien (EM)	26
2.4.2.5 Piezoelektrische Materialien (PZM)	27
2.4.2.6 Magnetostriktive Materialien (MM).....	27
2.4.3 Zusammenfassung, Vergleich und Auswahl smarterer Materialien.....	28
2.5 Formgedächtnistechnik bei FGL.....	30
2.5.1 Phasenumwandlung.....	30
2.5.2 Formgedächtniseffekte (FGE).....	32

2.5.2.1	Einwegeffekt	32
2.5.2.2	Zweiwegeffekt	33
2.5.2.3	Pseudoelastizität	33
2.5.3	Integration der Formgedächtnistechnik in ein System	33
2.6	Anpassungsfähigkeit - Adaption - Adaptivität	34
2.6.1	Passive und adaptive Strukturen und Systeme	36
2.6.2	Definition adaptiver Strukturen und Systeme	37
2.6.3	Beispiele und Anwendungsmöglichkeiten	40
3	Adaptive Strukturen und Systeme (ASS) im Kontext des TD	43
3.1	Definition und Entwurf zur Gliederung von ASS	43
3.2	Einsatz von ASS im Kontext des TD	44
3.2.1	Identifikation der Anwendungsgebiete von Strukturen mit SM ...	47
3.2.2	Potenzielle Anwendungsbereiche von ASS mit FGL	52
3.2.3	Konkrete Anwendungsbeispiele von ASS im TD	56
3.2.3.1	Bauwesen	56
3.2.3.2	Feinwerktechnik	57
3.2.3.3	Luftfahrt	57
3.2.3.4	Elektrische Geräte	58
3.2.3.5	Automobil	59
3.2.3.6	Zusammenfassung	60
3.3	Herausforderungen und Potenziale beim Entwurf und Einsatz von ASS .	61
4	Generierung des Aufbaus adaptiver Strukturen und Systeme	66
4.1	Grundlegender Gestaltaufbau von ASS	66
4.1.1	Passive Struktur (Tragwerks- und Interfacegestalt)	67
4.1.1.1	Einordnung beweglicher Tragwerksstrukturen	68
4.1.1.2	Anforderungen an die passive Struktur	69
4.1.1.3	Umsetzung und Generierung der passiven Struktur	70
4.1.1.4	Aufbau der Matrix passiver Strukturen	74
4.1.2	Aktive Struktur (Funktionsgestalt)	77
4.1.3	Anwendung	79
4.2	Bewegungsablauf von ASS	80
4.2.1	Beanspruchung, Steifigkeit und Flächenträgheitsmoment	80
4.2.2	Gestaltungsmöglichkeiten zur Realisierung der Bewegung	81
4.2.3	Bewegungsrichtungen	81
4.2.4	Bewegungsarten	83
4.2.5	Einfluss der aktiven und passiven Struktur auf die Bewegung ...	83

4.3	Parameter zur Entwicklung von ASS	84
4.3.1	Primäre Parameter aus der Zielsetzung.....	85
4.3.1.1	Anforderungen an ASS.....	85
4.3.1.2	Ableitung der primären Parameter.....	86
4.3.1.3	Vergleich und Bewertung der primären Parameter.....	89
4.3.1.4	Ergebnisse der vergleichenden Parameteranalyse	90
4.3.1.5	Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse	92
4.3.2	Bewertung der Anwendungsgruppen	93
4.3.3	Sekundäre Parameter aus der prototypischen Anwendung	97
4.3.4	Randbedingungen zur Erfüllung der Funktionsweise	98
5	Simulation, Aufbau und Versuch der Struktur-Prototypen	99
5.1	Regelung der Prototypen / Ansteuerung des FG-Drahts	99
5.2	Umsetzung und Fertigung: Additive Fertigung mittels FDM.....	100
5.2.1	Hardwareauswahl	101
5.2.2	Materialauswahl	101
5.2.3	Verbindung von passiver und aktiver Struktur mittels FDM.....	104
5.2.3.1	Kombination von FDM und FGL	105
5.2.3.2	Einflussparameter auf FDM-Bauteile	109
5.2.3.3	Parameter bei der Verbindung von FGL und FDM	110
5.3	Aufbau der Simulation für ASS in ANSYS	113
5.3.1	Preprocessing (Idealisierung und Diskretisierung).....	115
5.3.1.1	Modellerstellung.....	116
5.3.1.2	Vernetzung	117
5.3.1.3	Konvergenz	118
5.3.1.4	Materialmodelle	118
5.3.1.5	Lineare und nichtlineare Analysen.....	120
5.3.1.6	Randbedingungen	121
5.3.2	Ermittlung der Materialdaten	121
5.3.2.1	Festlegung auf das zu prüfende Material.....	123
5.3.2.2	Probengeometrie	123
5.3.2.3	Zugversuche an der Materialprüfmaschine.....	125
5.3.2.4	Ergebnisse des Zugversuchs	126
5.3.2.5	Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse	129
5.3.2.6	Überführung der Daten in ein Materialmodell	132
5.4	Aufbau der Prototypen im CAD.....	136
5.4.1	Aufbau der aktiven und passiven Struktur.....	136

5.4.2	Aufbau der Prototypen für den Druck	138
5.4.3	Aufbau der Prototypen für die Simulation	139
5.4.4	Auswahl der Prototypen für die Versuche	140
5.5	Realer Aufbau und Versuch der Prototypen.....	142
5.5.1	Erstellung der Prototypen	142
5.5.2	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung.....	145
5.5.3	Vorbereitung des FG-Drahts	146
5.6	Vergleich von Simulation und Prototypen-Versuchen	147
5.6.1	Simulation und Ergebnisse der Simulation	148
5.6.2	Ergebnisse der Kraftmessung	151
5.6.3	Diskussion der Ergebnisse der Kraftmessung	153
5.6.4	Ergebnisse der Messung der FG-Proben	156
5.6.5	Diskussion der Ergebnisse der Messung der FG-Proben.....	158
5.6.6	Gesamtheitliche Ergebnisbetrachtung.....	159
5.7	Sekundäre Parameter aus den Versuchen	160
6	Richtlinien zum Entwurf adaptiver Strukturen und Systeme	163
6.1	Eingliederung von ASS in den Gesamtsystemkontext	163
6.2	Funktionsstruktur	166
6.3	Richtlinien	167
6.3.1	Anforderungen und Empfehlungen aus der Anwendung.....	171
6.3.2	Verbindungstechnik	173
6.3.3	Regelungsstrategien für ASS	174
6.3.4	Rückstellung.....	174
6.4	Anwendungsbezogener Prototyp - Türgriff	176
7	Vorgehen zur Entwicklung adaptiver Strukturen und Systeme	182
7.1	Analyse	183
7.2	Theoretische Konzeption: Funktions- und Bauweise	183
7.3	Grobauslegung	185
7.4	Feinauslegung	186
8	Zusammenfassung.....	187
9	Ausblick	191
	Literaturverzeichnis.....	193
	Anhang	207
	Lebenslauf.....	211

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

A	Aufbau
a	Angepasstes Modell
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere
AF	Additive Fertigung
AM	Additive Manufacturing
aS	Aktive Struktur
ASS	Adaptive Strukturen und Systeme
BB	Betätigung und Benutzung
DE	Dielektrische Elastomere
DMS	Dehnungsmessstreifen
EAP	Elektroaktive Polymere
el., elektr.	Elektrisch
EM	Elektrostriktive Materialien
Fa	Farbe
FDM	Fused Deposition Modelling
FG	Formgedächtnis
FGE	Formgedächtniseffekt
FGL	Formgedächtnislegierungen
FGP	Formgedächtnis Polymere
FKG	Festkörpergelenk
Fo	Form
Fu	Funktionsgestalt
G	Produktgestalt
GF	Grundform
Gr	Grafik
If	Interfacegestalt
K	Kraft
M bzw. MW	Mittelwert

ME	Materialentfernung
MFGL	Magnetische Formgedächtnislegierungen
MG	Mehrteiliges Gelenk
MM	Magnetostriktive Materialien
MMS	Mensch-Maschine-Schnittstelle
P0	Probe CAD Modell
P1 bis P3	gedruckte Probe 1 bis Probe 3
P _M	Mittelwert Probe 1 bis Probe 3
PC	Polycarbonate
PLA	Poly lactide
pS	Passive Struktur
PZM	Piezoelektrische Materialien
S	Simulation
SE	Sichtbarkeit und Erkennbarkeit
SM	Smartes Material / Smarte Materialien
SMA	Shape Memory Alloys (engl. für Formgedächtnislegierungen)
TD	Technisches Design
TPE	Thermoplastische Elastomere
Tw	Tragwerksgestalt
V	Versuch
Vx	Verschiebung (horizontal)

Formelzeichen

Symbol	Einheit	Erläuterung
A _f	°C	Austenit-Finish-Temperatur
A _s	°C	Austenit-Start-Temperatur
d	mm	Schichtdicke
F _K	N	Knickkraft
HDT	°C	Wärmeformbeständigkeitstemperatur
I	A	Elektrischer Strom
m	g	Masse

M_d	°C	Obere Grenztemperatur spannungsinduzierte Martensitbildung
M_f	°C	Martensit-Finish-Temperatur
M_s	°C	Martensit-Start-Temperatur
R	Ω	Elektrischer Widerstand
T	°C	Temperatur
T_D	°C	Drucktemperatur
T_g	°C	Glasübergangstemperatur
T_H	°C	Temperatur Heizbett
T_M	MPa	Torsionsmoment
T_s	°C	Schmelztemperatur
U	V	Elektrische Spannung
v	mm/min	Geschwindigkeit
VST	°C	Vicat-Erweichungstemperatur
W_t	MPa	Widerstandsmoment gegen Torsion
$e(t)$		Regeldifferenz
$m(t)$		Regelausgangsgröße
$r(t)$		Rückführgröße
$w(t)$		Sollwert
$x(t)$		Regelgröße bzw. Eingangsgröße
$y(t)$		Stellgröße
$z(t)$		Störgröße
ε	mm/mm bzw. %	Dehnung
σ	MPa	Spannung
σ_B	MPa	Zugfestigkeit
$\sigma_{empf.}$	MPa	sichere Spannung für mögliche Anwendungen
$\sigma_{fließ}$	MPa	Fließspannung
σ_R	MPa	Bruchspannung
σ_S	MPa	Streckspannung
$\sigma_{zul., max}$	MPa	maximal zulässige Spannung für zyklische Bewegungen
$\sigma_{zykl.}$	MPa	empfohlene Spannung für zyklische Beanspruchung

τ	MPa	Torsionsspannung
ν		Querkontraktionszahl

Abstract

Many factors determine future concepts of new products. Examples include increasing individualization, new technologies and demands for lightweight design, system reliability, and the reduction of resources. With their adaptability and controllable properties, adaptive structures and systems (ASS) support the development of light, powerful, energy-efficient, innovative, and intelligent concepts. Potential uses are broad and cross-sectoral. They range from aerospace and vehicle technology to construction, electrical devices (such as household appliances and consumer electronics), precision engineering, medical technology, and even art. Applications within the field of industrial design are particularly suitable since those products (through the combination of technology, ergonomics and design) encompass the main advantages of shape memory alloys (SMA), such as small space requirements (installation space), low weight (lightweight construction), small number of required components (complexity), and silent operation (comfort). SMA are the multifunctional elements of ASS. They are able to convert into a previously imprinted shape through thermal or electrical activation. This effect relies on the phase transformation from low temperature martensite to high temperature austenite (fig. 1). This transformation is possible even under high applied loads. Characteristic temperatures are the martensite start (M_s), martensite finish (M_f), austenite start (A_s), and austenite finish temperature (A_f). SMA are embedded in the structural component, forming what is called ASS.

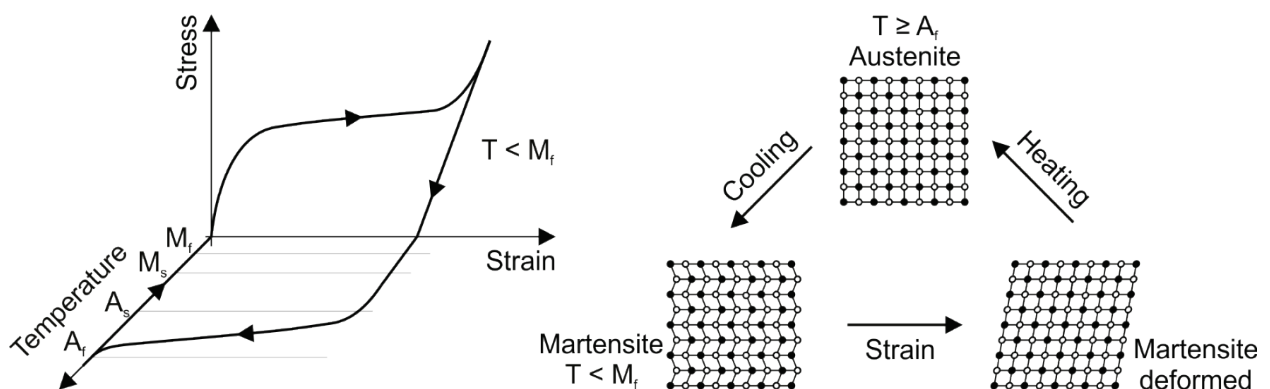


Figure 1: Stress-strain diagram of SMA and representation of the SM-effect based on [WAYMAN & DUERIG 1990, p. 11, 19]

Chapter 2 addresses the relevant basics to develop a procedure for using ASS in industrial design. Therefore, the main influencing fields are examined: ergonomics, through anthropometry and human-machine interface, styling in relation to product design and technology, regarding body structure, control, smart materials and SMA. The merging leads to the definition of adaptability and ASS in current research as well as a variety of possible applications.

Based on this, chapter 3 defines the design of ASS. Furthermore, their use within industrial design is examined. A review of current research identifies existing applications whereby it is possible to derive new applications and to benefit from the experience of existing ones. The results comprise a matrix with experience from current application, another that combines experiences and advantages and an overview representing potential fields of application of ASS with SMA. The author confirms that applications and their fields are suitable which, through the interaction of ergonomics, styling and technology, use the main advantages of SMA and thereby represent typical interface-applications mainly used within industrial design (fig. 2). The identified fields include construction, precision engineering, aviation, electrical equipment, and automotive which are all analyzed by examples. The chapter concludes with an examination of the challenges and potential in the design and use of ASS. It demonstrates that these challenges can be met with guidelines and standardization.

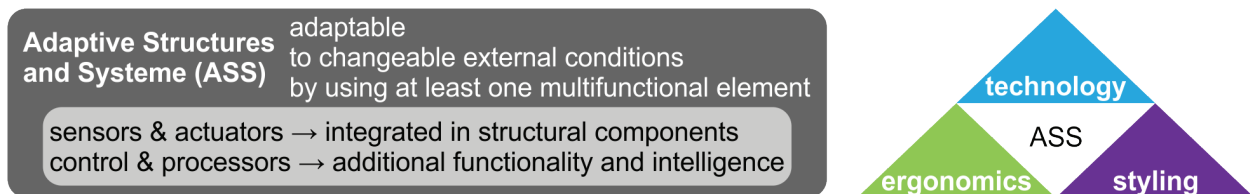


Figure 2: Definition of adaptive structures and systems and influencing fields

Using these findings, chapter 4 examines the structural shape (fig. 3) of ASS and develops a procedure for its generation. Therefore, the structural shape of ASS is derived from the general structural shape of products [SEEGER 2005, p. 49]. The multifunctional element (SMA) depicts the functional form and represents the active structure (aS) that serves as the drive for the movement. The interface design is determined by the respective application. The supporting structure, called passive structure (pS), is used to position and/or protect the function and interface while it also carries out the movement. Based on this, the aS, pS, and the application are defined and requirements are derived. Regarding the pS, the focus is on the structural components. To implement the movement initiated by the aS, movable and flexible structures for ASS are classified and described. For the systematic implementation and design of the pS, a morphological box is developed and the possibility of movement via solid-state joints (flexure hinges) is examined. The flexibility is created by adapting geometry and structure, elasticity, or a combination of both. The result is a matrix for the systematic generation of the pS. Regarding the aS, the material, its physical properties, and requirements are determined. The requirements for the applications are derived and summarized from the previous chapters. Subsequently, the movement and thus the adaptation as a main function of ASS are examined.

Design options for realizing the movement are shown and directions and types are derived, resulting in the influence of the aS and pS on the movement. Summarizing the previous investigations, the author defines parameters for the development and design of ASS combining the theoretical considerations, analyses, and investigations. It shows that the higher-level characteristics for aS, pS, and application match, while the description and the further specified parameters vary. To develop an overall system combining the described parts, a comparison and an evaluation of the parameters is carried out. Therefore, influences are demonstrated and critical parameters are determined. In addition, the areas of application are evaluated according to their suitability and the difficulties encountered during implementation based on the critical parameters of the application.

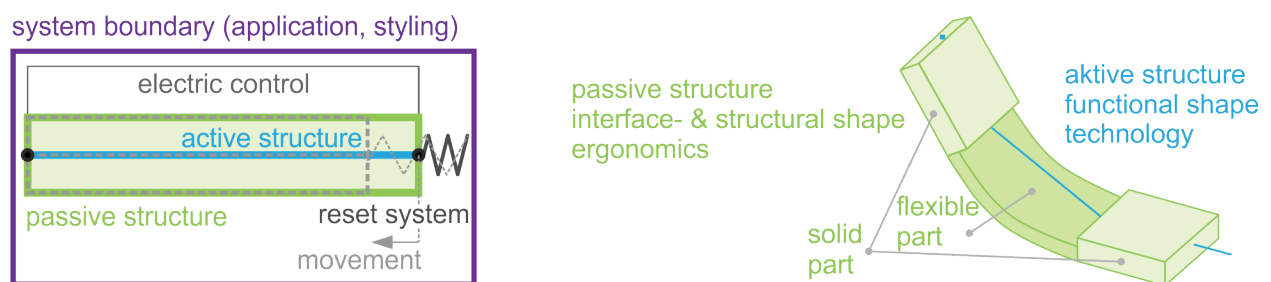


Figure 3: Structural shape of adaptive structures and systems

The design and testing of structural prototypes are addressed in chapter 5. The knowledge gained in the theoretical investigations is implemented in simulations and prototypes to complete and evaluate the defined parameters. First, the area of control is considered, especially regarding the prototypes, and a stationary system (laboratory power supply) is selected. The implementation results by choosing a manufacturing process that is suitable for the design of a variety of prototypes and complex shapes. Additive manufacturing processes and especially FDM meet the requirements. ABS and TPE are selected as printable materials for the pS. The connection of pS and aS using FDM is then investigated since the material is strongly influenced relative to the heating of SMAs. The possibilities for integration include 4D printing, feeding, assembly, and casting. After preliminary tests, the assembly process proves suitable. Considering the process-dependent influences in addition to the general parameters of aS and pS, the specific parameters and properties of SMA, and the material-dependent properties of the pS, the results are critical parameters regarding the connection of SMA and FDM. These must be considered when designing and manufacturing the prototype. Due to the high influence of design parameters on ASS, the simulation is a way to depict and predict them. When used in the early phases of development, relevant prototypes can be developed through targeted predictions thereby saving both effort and costs. To correctly represent

the printed structure, a material model is established using a tensile test to determine the material data. The result is then transferred to ANSYS. The simulation is followed by the design of the prototypes in CAD for printing and simulation. One-sided bending is defined as the load case. Using the matrix for generating the pS, structural prototypes are developed and (through the knowledge and results from chapter 4.1 to build the basic shape, 4.2 regarding the movement and 4.3 concerning the influencing parameters and preliminary tests) suitable prototypes are selected. Next, the prototypes are tested regarding force and deflection (fig. 4). This shows that the dimensions of the printed prototypes differ from the CAD model and thus from the model used in the simulation. Fine structures and geometries in particular show high differences. Therefore, the prototypes are re-measured to enable a simulation with adjustments to ensure the comparability. A comparison of the results of the simulation and prototype tests shows that the higher the number of fine structures and geometries are in a model, the greater the deviations between the results are. By feeding the actual dimensions back into the simulation model, positive accordance of the results for force and deflection is achieved, confirming the results of the simulation. Overall, the simulation allows to draw conclusions about motion parameters and acting forces to provide a suitable aS and pS. The results are summarized as secondary parameters, which serve as a practical addition to the theoretically examined primary parameters of chapter 4.3.

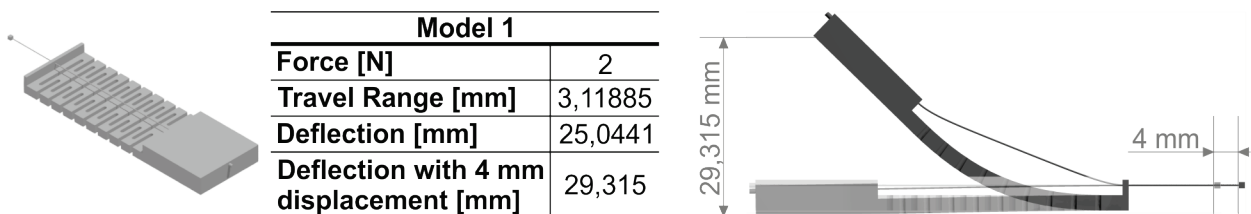


Figure 4: Extract of the results shown as an example on model 1

Based on the theoretical findings of the state of the art and research, the generation of the structural shape of ASS as well as the results from simulation and prototype tests, chapter 6 establishes guidelines for the development and design of ASS with SMA. The integration into the overall system context reveals the influences on and within ASS (fig. 5). The functional structure indicates the state changes occurring within ASS. The guidelines serve to design ASS. The basis is formed by the parameters, derived in chapter 4.3, which were completed and confirmed with the results of the prototypes and the simulation in chapter 5.7. The guidelines differentiate into aS and pS and provide recommendations for their specific design. The recommendations regarding the application are considered separately since they are application-specific and therefore strongly depend on the respective appli-

cation. Furthermore, control strategies, connection, and reset systems are examined. In addition to the structural prototypes, an application-related prototype is analyzed to address the implementation of ASS using the guidelines. The author shows that the guidelines enable efficient and complete observance of important requirements. The developer is supported to identify critical parameters regarding aS and pS within the defined application, to use recommended solutions, and to methodically derive further ones.

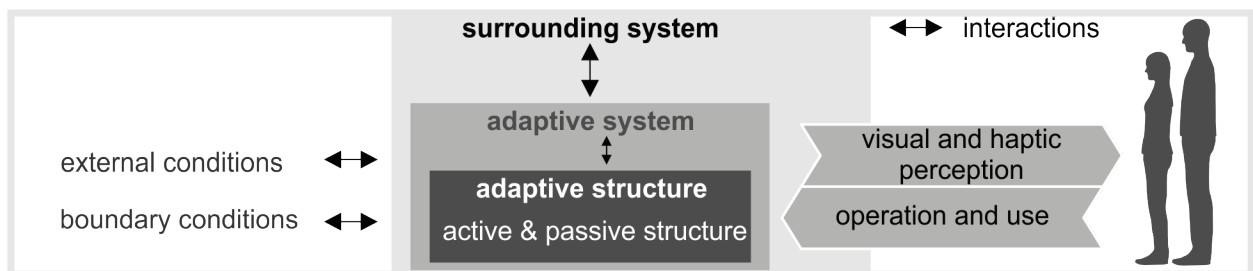


Figure 5: Integration into the overall system context

Chapter 7 summarizes the entire results of this work and establishes a procedure for the development of ASS using SMA (fig. 6). It contains four main parts: analysis, theoretical conception, rough design, and fine design. Within the analysis, the parameters of the active and passive structure as well as the application are determined. In the theoretical conception, functionality and design (through the defined parameters) are conceptually transferred to ASS. The rough design serves to pre-dimension the pS and aS based on the specified parameters. In the fine design, the simulation takes place with adaptation of the parameters of aS and pS and provides a final check on agreement with the requirements.

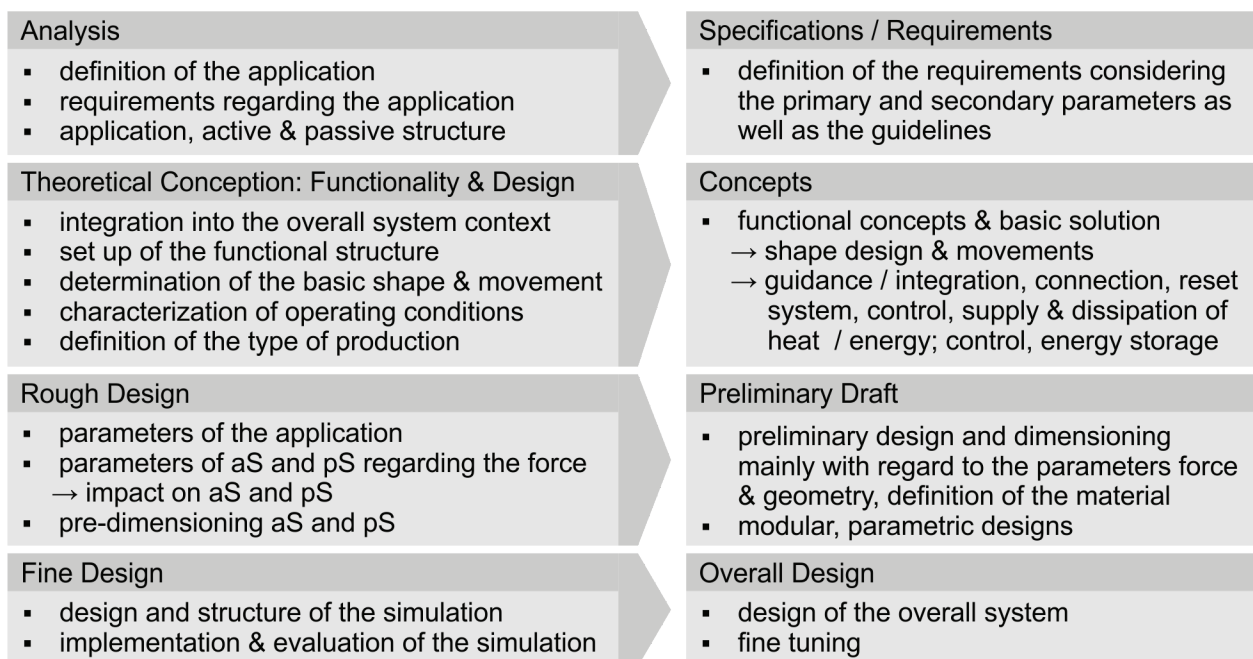


Figure 6: Approach for the development of adaptive structures and systems

1 Einleitung

Hightech-Werkstoffe und neue Verfahren ermöglichen innovative Konzepte im Bereich der Produktentwicklung. Smarte Materialien (SM) können durch steuerbare Eigenschaften neuartige und effiziente Produkte generieren. Zu den SM die zunehmend erforscht werden, zählen beispielsweise thermische Formgedächtnislegierungen (FGL), die durch ihre spezielle Eigenschaft, sich nach einer Verformung an ihre ursprüngliche Form zu erinnern, zur Entwicklung leichter, leistungsfähiger, energieeffizienter und innovativer Lösungen führen. Die entstehenden adaptiven Strukturen und Systeme (ASS) und deren Einsatz bei zukünftigen Konzepten ermöglichen eine optimale Anpassung an die jeweiligen Betriebszustände sowie an unterschiedliche Nutzer und Aufgaben. Dazu bedarf es beweglicher Tragwerksstrukturen, die eine Anpassung unterstützen und umsetzen.

Anwendung findet die Technik beispielsweise bereits im Bereich der Luft- und Raumfahrt für Leichtbaustrukturen und zur Gestaltkontrolle sowie im Bauwesen zur Geräusch-, Vibrations- und Schwingungsreduzierung. In der Luftfahrt können sich so die Flügelvorderkanten an die unterschiedlichen Anforderungen bei Start und Landung anpassen. Die Reduktion von Ressourcen, wie z. B. Energieverbrauch und die damit verbundene aerodynamische Optimierung sowie die ergonomische Anpassung an den Nutzer stellen weitere Anwendungsgebiete dar. Forschungspotenzial bieten ASS im Automobilbereich: Die Reduktion von Verbrauch durch Leichtbaustrukturen, formvariable Strukturen und die damit verbundene aerodynamische Optimierung sowie anpassbare Strukturen im Interfacebereich an Nutzer und Aufgabe sind mögliche Anwendungen.

Die Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) im Allgemeinen bietet durch den Einsatz für unterschiedliche Aufgaben mit mehreren Nutzern großes Potenzial für ASS. Im Folgenden werden ASS daher speziell im Bereich des Technischen Designs (TD) untersucht. Im Fokus stehen die Einsatz- und Anwendungsmöglichkeiten, der gesamtheitliche Aufbau, die Abbildung der Anpassung und Bewegung, Einflussparameter sowie die effektive und effiziente Implementierung im TD. Dafür wird zunächst die Problemstellung (Kapitel 1.1) erläutert, woraus Ziele abgeleitet werden und eine Abgrenzung des Themas getroffen wird (Kapitel 1.2). Die Vorgehensweise der Arbeit wird in Kapitel 1.3 dargestellt.

1.1 Problemstellung

Steigende Individualisierung, neue Technologien und die Forderungen nach Leichtbau, Systemzuverlässigkeit und der Reduktion eingesetzter Ressourcen bestimmen die zukünftigen Konzepte neuer Produkte. Dabei kommen konventionelle passive Systeme und

mechatronische Systeme an ihre Grenzen [BEIN ET AL. 2008, S. 63]. Um sich den unterschiedlichen Randbedingungen optimal anzupassen, werden intelligente Strukturen und adaptive Elemente immer wichtiger. Zur Erreichung der Ziele wird daher zunehmend Materialforschung betrieben, integrierte Funktionen gewinnen an Bedeutung und moderne Strukturen (smart und adaptiv) rücken in den Fokus der Entwicklungen.

Komplexe technische Systeme, wie beispielsweise Fahrzeuge, die sich aus der Interdisziplinarität des Produktsystems ergeben, weisen hohes Potenzial für den Einsatz adaptiver Strukturen und Systeme auf. So hat sich beispielsweise das Strukturgewicht eines Fahrzeugs in den letzten Jahrzehnten zunehmend verringert, während die Gesamtmasse aufgrund von neuen Systemen im Bereich Sicherheit, Komfort und Funktionalität zugenommen hat [BEIN ET AL. 2008, S. 63]. Diesem Trend kann mithilfe von ASS entgegen gewirkt werden. Zusätzlich haben Automobilhersteller in den vergangenen Jahren zunehmend das Ziel verfolgt, das Fahrzeug an die Bedürfnisse der Nutzer anzupassen [BUBB ET AL. 2015, S. 2, 16]. Dadurch werden anthropometrische Maße bei der Gestaltung des Fahrzeug-Interiors, z. B. bei Sitzen oder Bedienelementen, einbezogen. Allerdings werden keine ASS eingesetzt.

Eine Hauptanforderung in der ergonomischen Gestaltung der MMS im Allgemeinen ist die Anpassung des Systems an die Bedürfnisse des Menschen. Das Hauptproblem besteht darin, ein entwickeltes Interface bestmöglich an jeden Nutzer anzupassen und dabei die anthropometrischen Maße zu berücksichtigen. Der Fokus liegt auf den individuellen Fähigkeiten, Fertigkeiten und anthropometrischen Abmessungen. Das bedeutet, dass bei der Entwicklung von Produkten sowohl die Anforderungen der Arbeitsaufgabe als auch die Grenzen des Menschen berücksichtigt werden müssen. Diese komplexe Problemstellung kann durch ASS gelöst werden.

Die Umsetzung dieser Strukturen erfolgt durch den Einsatz smarterer Materialien, wie beispielsweise Formgedächtnislegierungen. Gemessen am Einsatz bei Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt, dem Bauwesen, der Medizintechnik oder der Aktorik wächst das Interesse der Industrie speziell an FGL stetig. Dies liegt auch darin begründet, dass elektromechanische Kleinantriebe für die Integration in kleinen, bewegten Strukturen keine geeignete Lösung bieten [KEHL 1999, S. 16]. Eine Alternative stellen Aktoren auf FG-Basis dar, vor allem aufgrund der hohen Leistungsdichte des Materials. Ein FG-Draht mit einem Durchmesser von 0,5 mm und einer Länge von 1 m kann ein Gewicht von etwa 3,5 kg um 50 mm anheben [DYNALLOY 2020], wobei der FG-Draht eine Masse von nur 1,3 g aufweist. Ein konventioneller Linearaktor mit vergleichbaren Leistungsdaten liegt

bei einem Gewicht von etwa 35 bis 40 g [ROBOTSHOP 2020], [RSCOMPONENTS 2020] und hat damit eine um das 26- bis 30-fache schlechtere Leistungsdichte.

Dass sich FGL trotz ihrer Vorteile, wie hohe Arbeitsleistung pro Volumen, Funktionsintegration oder geräuschlose Bewegung nicht durchgesetzt haben, liegt an den Herausforderungen, die zu meistern sind. Werkstoffexperten müssen den Temperaturbereich, in dem die Materialien arbeiten können und die Schaltzeiten (Breite der Hysterese = $A_f - M_s$ bzw. $A_s - M_f$) verbessern, Regelungstechniker die Ansteuerung und Zuverlässigkeit der notwendigen Stellbewegungen untersuchen, Konstruktionstechniker die optimale Ausnutzung der FG-Eigenschaften sowie die Auslegung beweglicher Strukturen analysieren und Produktgestalter eine ideale Formgebung entwerfen. Des Weiteren gibt es keine Ansätze, Konzepte bereits im Einsatz befindlicher FG-Systeme auf andere Anwendungen zu übertragen. Forschungsbedarf besteht auch im Bereich der Anbindung und Integration dieser Legierungen. Neben der Einbettung in Harze bietet die additive Fertigung (AF) neue Möglichkeiten. Die Gestaltbeeinflussung und der Einsatz innovativer Fertigungstechnologien kann Potenziale hinsichtlich des Produktaufbaus eröffnen.

Mit der VDI 2248 [2019A], [2019B], [2019C], [2019D] und [2019E] existiert seit Dezember 2019 eine erste Richtlinie zur Produktentwicklung mit FGL. Allerdings fehlt die gesamtgesellschaftliche Betrachtung des Systems in Bezug auf die sich beeinflussenden Parameter sowie umfassende Anwendungsmöglichkeiten. Der Fokus liegt auf der Auswahl, Simulation und Auslegung der FGL. Das Zusammenwirken von Struktur und FG-Element, sowie Besonderheiten bei der Auslegung der Struktur, das Hauptziel der Bewegungsumsetzung und die Anforderungen der Anwendung werden nicht oder nur am Rande betrachtet.

1.2 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit

Das Hauptziel der Arbeit ist daher die Erarbeitung einer Vorgehensweise zur Entwicklung adaptiver Strukturen und Systeme im Kontext des Technischen Designs. Teilziele sind:

- die Untersuchung des Zusammenwirkens der Elemente des Gesamtsystems mit Fokus auf sich beeinflussende Parameter bei der Entwicklung von ASS,
- die Ausarbeitung einer effizienten Möglichkeit den Bewegungsablauf abzubilden sowie daraus eine Vordimensionierung von ASS abzuleiten und
- das Aufstellen von Richtlinien sowie einer Vorgehensweise zum Entwurf von ASS mit FGL. Dabei steht das Zusammenwirken des gesamten Systems, bestehend aus passiver und aktiver Struktur sowie der Anwendung im Vordergrund.

Der Einsatz von ASS im Bereich des TD und speziell der MMS soll die Interaktion zwischen Mensch und Maschine bezüglich Nutzungseigenschaften und Aufgabenbewältigung anhand von optimal anpassbaren Strukturen verbessern und gleichzeitig die Forderung nach Reduktion von Ressourcen erfüllen. Die einzigartigen Eigenschaften von FGL werden neue Möglichkeiten im Bereich der Ergonomie eröffnen und zur Verbesserung und Weiterentwicklung funktionaler Gestaltelemente beitragen. Die Erkenntnisse dieser Ausarbeitung sollen helfen, die methodische Entwicklung und den Aufbau von ASS unter Verwendung von FG-Elementen zu ermöglichen, zu vereinfachen und damit für ein breiteres Einsatzspektrum zugänglich zu machen.

Aufgrund der erwähnten Interdisziplinarität bei der Entwicklung von ASS ist eine Abgrenzung notwendig. SM eignen sich als funktionale Elemente in ASS. Diese Arbeit legt den Fokus auf FGL (Kapitel 2.4.3). Dabei findet keine materialwissenschaftliche Auslegung oder Simulation der FG-Elemente statt, sondern es wird auf Legierungen zurückgegriffen, die sich bereits in Anwendungen bewährt haben und erhältlich sind. An dieser Stelle wird auf die VDI 2248 [2019A], [2019B], [2019C], [2019D] und [2019E] verwiesen.

Im Mittelpunkt steht das Zusammenwirken der Elemente von ASS, deren Verbindung und die Auslegung des Gesamtsystems. Dazu wird die Möglichkeit aufgezeigt, über eine Simulation den Bewegungsablauf abzubilden und eine Vorauslegung durchzuführen. Dabei ist das Ziel nicht die exakte Abbildung der Realität, sondern unter Beachtung der Fertigung sowie eines Materialmodells, einen effizienten Weg aufzuzeigen, den Einsatz von ASS mit schnell einsetzbaren, einfachen Hilfsmitteln zu fördern.

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine Grundlagenuntersuchung an deren Ende kein serienreifes Produkt steht. Die Ansätze, Richtlinien, Empfehlungen und Vorgehensweise dienen der Übertragung auf Produktentwicklungen mit ASS. Sie werden zunächst theoretisch analysiert, anhand einer Simulation abgebildet, mittels Struktur-Prototypen untersucht und durch einen anwendungsbezogenen Prototyp verifiziert. Die Zukunft liegt in innovativen, intelligenten und adaptiven Konzepten, die sich den unterschiedlichen Randbedingungen und Anforderungen anpassen können - wie Lebewesen und Pflanzen es in der Natur bereits tun.

1.3 Struktur der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in neun Kapitel. Das Zusammenwirken der einzelnen Kapitel sowie die grundlegenden Inhalte sind in Abbildung 1.1 dargestellt.

Kapitel 1 beinhaltet die Problemstellung, Zielsetzung und Abgrenzung sowie Struktur der Arbeit. Ausgehend von den formulierten Zielen, wird in Kapitel 2 der zur Erfüllung notwendige Stand der Technik und Forschung aufgezeigt. Es werden wichtige Mensch-Maschine-Schnittstellen identifiziert, die Produktgestalt aufgezeigt, eine Einführung in den Bereich der Regelungstechnik gegeben, smarte Materialien und speziell Formgedächtnislegierungen untersucht und der Begriff Adaptivität eingeordnet. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse wird in Kapitel 3 der Begriff adaptive Strukturen und Systeme für ein einheitliches Verständnis definiert. Im Folgenden werden aktuelle Anwendungsbereiche aufgezeigt und potenzielle erschlossen. Durch die Übertragung von Wissen aus bestehenden Anforderungen wird die Implementierung einer neuen Technologie in neuen Anwendungsbereichen unterstützt. Um den Einsatz von ASS zu fördern, werden die Herausforderungen den Potenzialen gegenübergestellt und Lösungsansätze aufgezeigt. Dies leitet über zu Kapitel 4, dem Vorgehen zur Generierung des Aufbaus von ASS. Zunächst findet die Untersuchung des grundlegenden Gestaltaufbaus von ASS statt. Dieser untergliedert sich in die passive Struktur (Tragwerksgestalt), die aktive Struktur (Funktionsgestalt) und die Anwendung. Der Schwerpunkt liegt auf der Gestaltung der passiven Struktur und beinhaltet Anforderungen, Einordnung, Umsetzung und systematische Generierung beweglicher Strukturen. Darauf aufbauend wird der Bewegungsablauf (Richtung, Arten und Zustände) von ASS sowie die Gestaltungsmöglichkeiten zur Realisierung einer Bewegung beschrieben. Aus dem Stand der Technik und Forschung sowie den Untersuchungen bezüglich ASS werden Parameter zur Entwicklung abgeleitet. Ein weiterer Schritt zur systematischen Entwicklung stellen die Simulationen und Prototypen in Kapitel 5 dar. Zunächst werden Voruntersuchungen zur Regelung und Umsetzung getroffen. Die Ansteuerung der Prototypen findet über ein Labornetzteil statt, die Fertigung der Prototypen erfolgt mittels FDM-Verfahren. In diesem Kontext wird die Verbindung von aktiver und passiver Struktur analysiert. Der Simulation gehen die Idealisierung und Diskretisierung sowie die Ermittlung der Materialdaten mittels Zugversuchs voraus. Es folgt ein Vergleich der Ergebnisse der Simulation mit den Ergebnissen der Prototypen. Aus dem Stand der Technik und Forschung, den Untersuchungen sowie den Versuchsergebnissen werden in Kapitel 6 Richtlinien abgeleitet, die Anforderungen, Randbedingungen, wichtige Parameter und Empfehlungen zum Entwurf von ASS beinhalten. Ein erster Einsatz der Richtlinien findet bei der Untersuchung eines anwendungsspezifischen Prototyps statt. Die Ergebnisse der Arbeit werden in Kapitel 7, Vorgehen zur Generierung und

Umsetzung adaptiver Strukturen und Systeme beschrieben und als Vorgehensweise zusammengefasst. Den Abschluss bilden eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf zukünftige Themen.

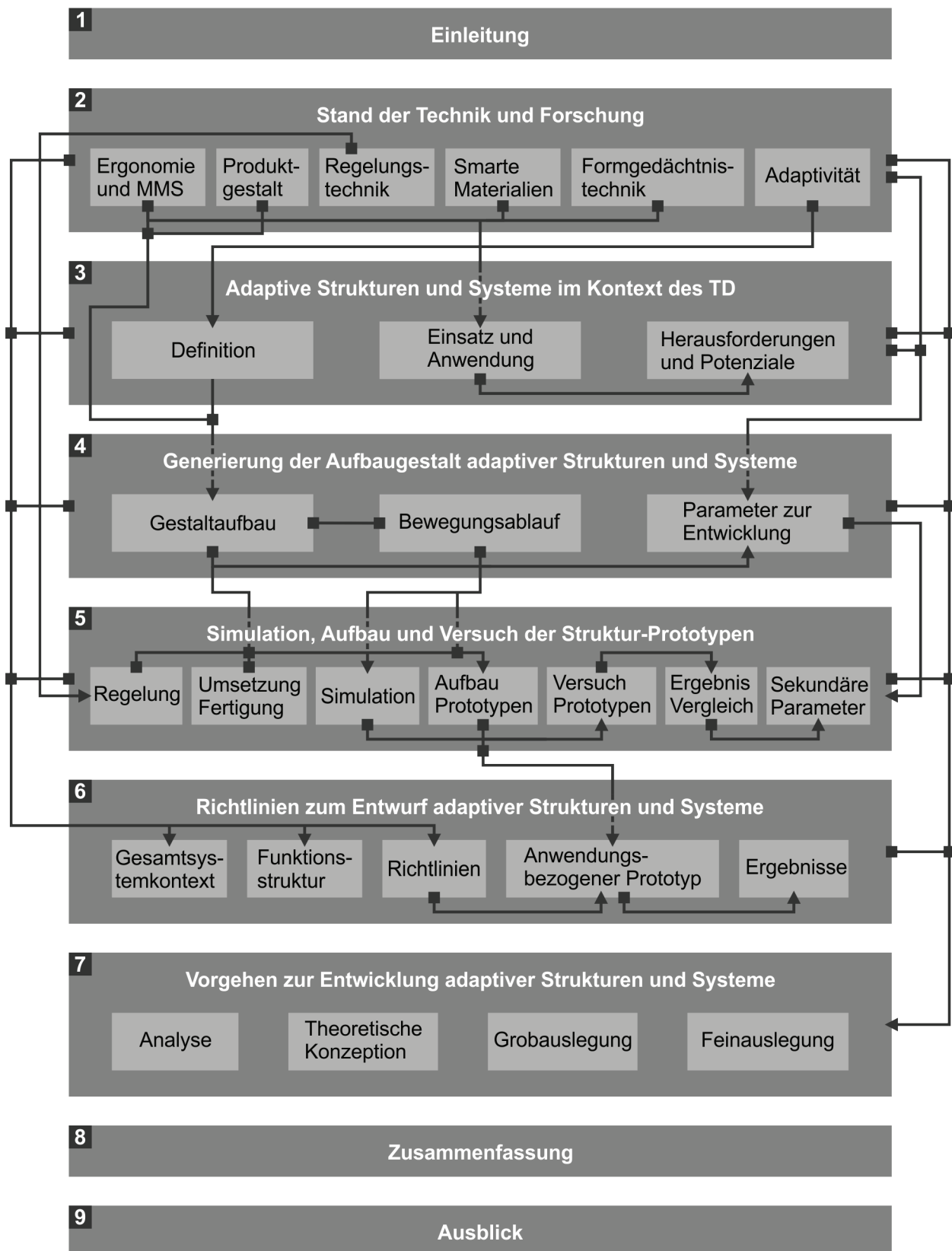


Abbildung 1.1: Struktur der Arbeit

2 Stand der Technik und Forschung

Im Stand der Technik und Forschung werden wichtige Grundlagen bezüglich Aufbau, Auslegung und Entwicklung adaptiver Strukturen und Systeme diskutiert. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Einsatz von ASS im Bereich des Technischen (Fahrzeug-) Designs zur Verbesserung der Interaktion zwischen Mensch und Maschine. Es erfolgt daher zunächst eine Eingliederung der Mensch-Maschine-Schnittstelle in den Bereich der Ergonomie sowie speziell der Fahrzeugergonomie. Zur Definition der Gestalt von ASS wird in Kapitel 2.2 die grundlegende Produktgestalt betrachtet. ASS beinhalten multifunktionale Materialien, die sowohl aktorische als auch sensorische Eigenschaften besitzen. Aktoren und Sensoren agieren als Schnittstelle zwischen der Informationsverarbeitung und den Energie- und Stoffflüssen im technischen System. Sie verbinden die mechanische Struktur mit der Regelung und der Umwelt. Um ASS anzupassen werden Regelsysteme eingesetzt. Die Grundlagen dazu vermittelt Kapitel 2.3. Die Einordnung und Beschreibung der multifunktionalen Materialien erfolgen in Kapitel 2.4. Als geeignete Materialien in ASS erweisen sich dabei Formgedächtnislegierungen, die in Kapitel 2.5 untersucht werden. Den Abschluss bilden die Einordnung des Begriffs Adaptivität, eine Definition und Abgrenzung der in dieser Arbeit betrachteten ASS sowie Beispiele und Anwendungsmöglichkeiten.

2.1 Ergonomie

Der Ursprung der Ergonomie ist auf den Arbeitskontext, bzw. die Arbeitswissenschaften zurückzuführen. Heute werden die Begriffe häufig synonym verwendet [DIN EN ISO 26800 2011, S. 5]. Ergonomie ist die „Wissenschaft von der Anpassung der Technik an den Menschen zur Erleichterung der Arbeit“ [BULLINGER 1994, S. 4]. Sie befasst sich mit den Wechselwirkungen zwischen dem Mensch und technischen Systemen mit dem Ziel, durch reduzierte Belastung auf den Menschen das Gesamtsystem zu optimieren [DIN EN ISO 26800 2011, S. 5].

Bei der Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle werden Fähigkeiten und Grenzen des Menschen berücksichtigt. Das Ziel einer ergonomischen Auslegung besteht demnach in der Verbesserung der Interaktion zwischen Mensch, Maschine und Umgebung. Dabei stellt die Ergonomie Regeln auf, die zu einem nutzerfreundlichen Design führen.

2.1.1 Anthropometrie

Als Basis die MMS optimal, komfortabel und sicher zu gestalten dienen die Bedürfnisse des menschlichen Körpers, vor allem die Abmessungen [DIN SPEC 33402-6 2015].

Die Anthropometrie beschreibt die Anwendung menschlicher Abmessungen, dient der ergonomischen und nutzerorientierten Auslegung und bestimmt wichtige Sicherheitsmaße [BUBB ET AL. 2015, S. 179]. In der anthropometrischen Ergonomie werden bei der Gestaltung von Produkten die Körpermaße des Menschen in die Entwicklung hinsichtlich des Platzbedarfs sowie der Erreichbarkeit und Sichtbarkeit von Anzeigen und Stellteilen miteinbezogen. Wird beispielsweise das Perzentil der Körperhöhe aus Tabelle 2.1 betrachtet, ist der Unterschied zwischen kleinen und großen Personen direkt ersichtlich. Damit geht einher, dass die von ihnen genutzten Systeme auf die individuellen Größen ausgelegt werden müssen. Im Gestaltungsprozess werden somit nicht die mittleren Maße, sondern die Randmaße (5. und 95. Perzentil) berücksichtigt [LUCZAK 1998, S. 589].

	Weiblich			Männlich		
Körperhöhe	1535 mm	1625 mm	1720 mm	1650 mm	1750 mm	1855 mm
Perzentil	5. Perzentil	50. Perzentil	95. Perzentil	5. Perzentil	50. Perzentil	95. Perzentil

Tabelle 2.1: Perzentile der Körperhöhen [DIN SPEC 33402-2 2005]

Speziell im Automobilbereich ist es von Bedeutung die Abmessungen des menschlichen Körpers bei der Auslegung während des gesamten Entwicklungsprozesses miteinzubeziehen. Bedingt durch die hohe Komplexität und die Dauer des Fahrzeugentwicklungsprozesses, von der Idee bis zur Markteinführung vergehen etwa fünf Jahre [KLAMSER 2013, S. 5], ist die Ergonomie bereits in den frühen Phasen der Fahrzeugentwicklung zu beachten. Die Komplexität wird durch viele parallele Prozesse und steigende Anforderungen an ein Fahrzeug bezüglich Sicherheit, Verbrauch und Design erhöht. Der Fahrer, das Fahrzeug und die Umgebung sind eng miteinander verbunden. Es ist daher nicht zielführend, diese Systeme allein aus technischer Sicht zu gestalten, sondern Fähigkeiten und Bedürfnisse des Fahrers miteinzubeziehen [WINNER ET AL. 2015, S. 622].

Die anthropometrische Fahrzeuggestaltung beinhaltet Fahrzeugpackaging, Sitzen, Sicht, Bedien- und Anzeigekomponenten, Raumbedarf, Ein- und Ausstieg und Beladen unter Berücksichtigung verschiedener Nutzergruppen [BUBB ET AL. 2015, S. 345f]. Wichtige Parameter bezüglich des Fahrzeugentwicklungsprozesses sind beispielsweise die Körperhöhe, die Korpulenz und die Stammlänge, da sie Einfluss auf die Gestaltung des Sitzes, der Bereiche zur Anordnung von Bedienelementen, des Türbereichs und des Kofferraums haben. Dies konnte in einer Studie [HEIN ET AL. 2017] bestätigt werden. Zur Erzielung einer optimalen Auslegung der ergonomischen Parameter ist es daher notwendig, die Anthropometrie zu berücksichtigen. So ist beispielsweise das Wachstum der Bevölkerung im Hinblick auf physische Dimensionen abhängig von unterschiedlichen Regionen

zu berücksichtigen. Während einer Dekade beträgt die durchschnittliche Akzeleration 10 mm [BUBB ET AL. 2015, S. 188]. Da keine sichere und belegbare Aussage über ein kontinuierliches Fortschreiten getroffen werden kann [SCHLICK ET AL. 2010, S. 1032], ist ein zukünftiges Fahrzeug so auszulegen, dass eine Anpassbarkeit gewährleistet wird, um ergonomische Eigenschaften beizubehalten. Daher müssen ergonomische Parameter ein fester Bestandteil der Fahrzeugentwicklung sein.

2.1.2 Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS)

Für ein erfolgreiches Entwickeln von Produkten sind nicht nur Faktoren wie Preis, Zuverlässigkeit und Sicherheit, sondern auch Design, Handhabbarkeit und Bedienerfreundlichkeit wichtig. Die beiden letzten sind typisch für Produkte im Bereich der MMS. Treten Mensch und Maschine in Interaktion, wird diese Kontaktstelle als MMS bezeichnet. Gebräuchlich sind auch Begriffe wie Mensch-Maschine-Interface oder Mensch-Maschine-Interaktion [SCHMID & MAIER 2017, S. 36]. Sinnvoll umgesetzt ist die MMS, wenn sie auf die Bedürfnisse und Fähigkeiten des Menschen angepasst ist und ergonomische Grundsätze bei der Gestaltung beachtet werden. Generell ist an der Schnittstelle sowohl Bedienen als auch Beobachten möglich.

BULLINGER [1994, S. 335] versteht unter einer MMS alle Bestandteile eines „Arbeitssystems zur funktionellen Interaktion zwischen dem Menschen und einem technischen System“. Dabei stellt das System dem Menschen Informationen z. B. über Anzeigen zur Verfügung. Diese werden vom Menschen verarbeitet und durch eine Handlung über ein Stellteil an das technische System zurückgegeben.

Nach DIN EN 894-1 [2009, S. 6] kann ein Mensch-Maschine-System als geschlossenes Regelsystem verstanden werden. Durch eine Anzeige werden dem Menschen Informationen zur Verfügung gestellt. Über ein Stellteil kann der Mensch die Maschine steuern, die daraufhin wieder Informationen an den Menschen zurückführt. Die zur Maschine gehörenden Elemente wie Anzeigen und Stellteile müssen für den Menschen und die zu erledigende Aufgabe gestaltet und geeignet sein. Im Kontext der MMS ist die Vermeidung von Fehlbedienung ein Hauptpunkt.

Der Begriff des Technischen Interface Designs nach SCHMID & MAIER [2017] und SCHMID & MAIER [2019] beschreibt die Gestaltung der MMS, welche die Art und Anzahl der Stellteile und Anzeiger, die Anordnung auf einem Tragwerk und alle Kontaktflächen zwischen Mensch und Maschine umfasst [SCHMID & MAIER 2017, S. 32]. Mensch und Maschine sind über Aktoren und Sensoren, Wirkteil sowie Anzeiger und Stellteil miteinander

verbunden [SCHMID & MAIER 2019]. Die Maschine erkennt über Sensoren die Eingaben des Menschen, der diese über Stellteile an die Maschine weitergibt. Über einen Aktor steuert die Maschine das Wirkteil, das die vom Menschen eingegebene und der Maschine weitergeleitete Bedienung ausführt. Eine Anzeige stellt dem Menschen die benötigten Informationen über das Wirkteil oder die Bedienmöglichkeiten bereit.

Anzeigen dienen der Bereitstellung und Übermittlung von Informationen vom technischen System zum Menschen. Sie stellen sich mit der Aufgabe ändernde sichtbare, hörbare oder taktil wahrnehmbare Informationen dar [DIN EN 894-1 2009, S. 5], die dem Menschen Hinweise über den Zustand des technischen Systems geben. Stellteile oder Bedienelemente werden als Teile eines Systems bezeichnet, über die Informationen vom Menschen auf die Maschine übertragen werden. Die Betätigung findet dabei mechanisch, mit den Fingern, Händen oder Beinen statt [BUBB ET AL. 2015, S. 273] und wird durch den Nutzer, z. B. durch Druck ausgeführt [DIN EN 894-1 2009, S. 5]. Als direkte Schnittstelle zum Menschen fällt ihnen aufgrund ihrer vielfältigen Einsatzbereiche und Ausprägungen eine besondere Beachtung bei der Gestaltung zu. Wichtige Einflussgrößen sind Handhaltung, Griffform, Griffart, Bewegungsumfang und Abmessungen [BULLINGER 1994, S. 306].

Produkte, die eine MMS aufweisen, können in die Bereiche Konsum- und Investitionsgüter [SCHMID & MAIER 2017, S. 28] aufgeteilt werden, wodurch sich die in Tabelle 2.2 zusammengefassten Anforderungen und Unterschiede ergeben. Der Fokus dieser Arbeit liegt dabei auf den Konsumgütern.

	Konsumgüter	Investitionsgüter
Kunde / Benutzer	mittlere Bedürfnisbefriedigung niedrige Benutzerqualifikation	unmittelbare Bedürfnisbefriedigung hohe Benutzerqualifikation
Kaufentscheidung	emotional und schnell	rational und langsam
Produktlebenszyklus	häufig < 1 Jahr	mehrere Jahrzehnte
Anforderungsart	hoher Anteil formaler Anforderungen	hoher Anteil funktionaler Anforderungen
Beispiele	PKW, Smartphone, Computer	Maschinen (Herstellung Konsumgüter)

Tabelle 2.2: Konsum- und Investitionsgüter nach SCHMID & MAIER [2017, S. 28]

Im Bereich der Konsumgüter nimmt das Fahrzeug eine zentrale Stellung ein und wird daher näher betrachtet. Das Fahrzeug-Exterior umfasst die geschlossene Karosserie, Karosserieöffnungen und Fensterflächen sowie Anbauteile. Experimentelle Untersuchungen zu wichtigen MMS des Fahrzeug-Exteriors [HEIN ET AL. 2017] zeigen, dass es vier Bereiche gibt: (1) die geschlossene Karosserieform die den Fahrzeugnutzer, technische Aspekte und Funktionsbaugruppen beinhaltet, (2) Karosserieöffnungen die Bewegungsszenarien dienen, (3) Fensterflächen zur Gewährleistung der Sichtverhältnisse und (4) diverse Anbauteile wie Türgriffe. Im Hinblick auf das Interior ist es wichtig, die Bedienele-

mente für jeden Nutzer erreichbar und bedienbar zu gestalten. Vor allem in Gefahrensituationen müssen die Bedienelemente sicher und fehlerfrei bedient werden können und die Anzeigen jederzeit sichtbar sein. Es darf durch die Lage der Anzeigen und Stellteile keine Fehlbedienung oder Gefahr entstehen. In der ergonomischen Gestaltung des Fahrerarbeitsplatzes wird der Greifraum und die Anordnung berücksichtigt [BULLINGER 1994, S. 204 - 206]. Der Greifraum gibt den Bereich an, in dem Objekte mit der Hand bedient werden können [ebd., S. 204]. BUBB [2001, S. 155f] ordnet die Fahraufgabe nach primären, sekundären und tertiären Aufgaben, wodurch nach MAIER ET AL. [2019] der Fahrerarbeitsplatz unter Berücksichtigung der MMS und der Greifraumdefinition nach Schmidtke [2013, C-4.2.3., S. 4] in drei Greifraumbereiche aufgeteilt werden kann: (1) der primäre Greifbereich, der Lenkrad und Kombiinstrument umfasst, (2) der sekundäre Greifbereich mit Armaturenbrett, vorderem Türbereich und oberem Bereich der Mittelkonsole sowie (3) der tertiäre Greifbereich, der mittleren und hinteren Türbereich, Sitzseiten, Getriebetunnelkonsole, unteren Bereich der Mittelkonsole und Fußraum umschließt. Abbildung 2.1 zeigt die Bereiche der MMS im Fahrzeug-Exterior und -Interior.

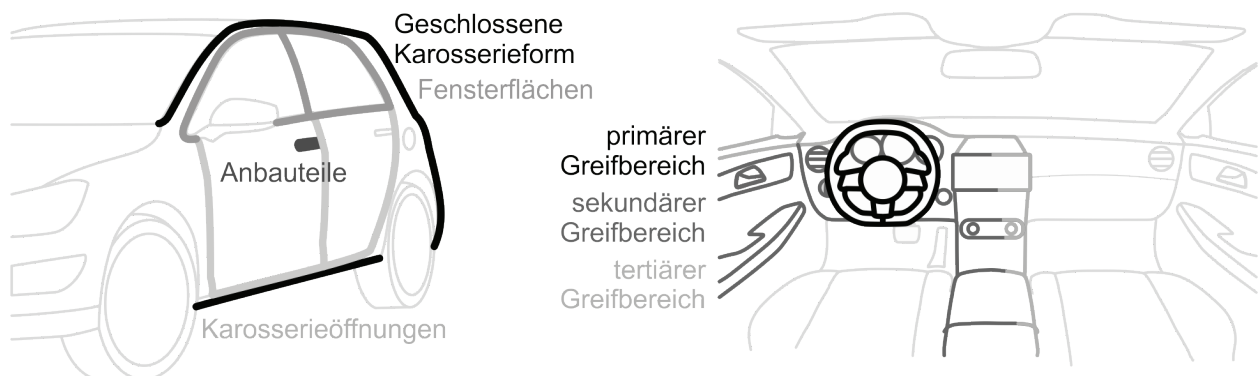


Abbildung 2.1: Bereiche der Mensch-Maschine-Schnittstelle im Fahrzeug

Beim Fahrzeugaufbau fließt u. a. der Ein- und Ausstieg sowie die Möglichkeit zur Beladung des Fahrzeugs in die Definition der Abmessungen ein [MÜLLER 2010, S. 100]. Der Einstiegsvorgang ist die erste Schnittstelle zwischen Fahrer und Fahrzeug und wirkt sich auf den ersten Eindruck aus. Der Türgriff dient dem Öffnen und wird vor dem Einstieg betätigt. Er sollte für jeden Nutzer ergonomisch bedienbar sein. Während der Fahrt hat der Türgriff im Exterior keine weitere Aufgabe, kann sich aber negativ auf die Aerodynamik aufgrund der Umströmung auswirken. Allgemein trägt er auch zur Gestaltung und dem Design des Gesamtfahrzeugs bei. Im Fahrzeug-Interior tritt der Nutzer in Kontakt mit dem Lenkrad. An Lenkrad sowie -säule sind heutzutage viele Bedienelemente angeordnet. Weitere Anzeige- und Bedienelemente im Interior befinden sich im Bereich der Mittelkonsole, beispielsweise zur Erfüllung von Navigations- oder Komfortaufgaben.

2.2 Produktgestalt

Zur Beschreibung des Aufbaus von ASS wird als Basis die allgemeine Produktgestalt betrachtet. Nach FELDHUSEN & GROTE [2013, S. 463] gehört zur Gestaltung eines Produkts die „werkstofftechnische und geometrische Festlegung seiner Baugruppen und Komponenten bis zum Einzelteil von der Makrogestalt bis hin zu den Oberflächen“. Das Produkt besteht aus mehreren Baugruppen, die sich wiederum aus einzelnen Bauteilen zusammensetzen. Für MATTHIESEN [2002, S. 54, 62, 85] besteht ein System aus den Grundelementen Wirkflächenpaar und Leitstützstruktur. Ebenso setzt sich ein Bauteil aus Flächenelementen (Wirkfläche und Begrenzungsfläche) und Körperelementen (Tragstruktur und Reststruktur) zusammen [ebd., S. 52]. SEEGER 2005 [S. 47, 49] definiert die Produktgestalt (G) über die Teilgestalten Aufbau (A), Form (Fo), Farbe (Fa) und Grafik (Gr). Dabei bestimmt A die Anordnung der Aufbauelemente, Fo beinhaltet die Gesamtheit der unfarbigen Formen, Fa umfasst die mit Farben versehenen Formen der aufgebauten und unbeschrifteten Gestalt und Gr beschreibt die grafischen Zeichen auf der farbigen, geformten und aufgebauten Gestalt.

Beim Einsatz von ASS findet ein Ablösen oder Ersetzen von konventionellen Strukturen oder Systemen in Produkten statt. Dies kann bei allen Teilgestalten angewendet werden. Im Bereich des Aufbaus ist es möglich, bewegliche Tragwerke einzusetzen. In der Form können Gestaltadaptionen der formgebenden Strukturen stattfinden. Im Bereich der Farbe und Grafik sind adaptive Logos möglich. Im Technischen Design können damit beispielsweise Elemente ersetzt werden, durch die die Mensch-Maschine-Schnittstelle optimiert werden kann. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Aufbaugestalt und in reduziertem Umfang auf der Formgestalt, dabei vor allem auf der durch die Aufbaugestalt beeinflussten Formgebung, z. B. bei der Gestaltung von flexiblen, sichtbaren Elementen.

2.2.1 Aufbaugestalt

Die invariable Aufbaugestalt (Tabelle 2.3) ergibt sich aus technischen, physikalischen, funktionalen, fertigungstechnischen und wirtschaftlichen Anforderungen [SEEGER 2005, S. 103]. Aufbauelemente sind Funktionsgestalt, Interfacegestalt und Tragwerksgestalt [ebd., S. 49]. Die Funktionsgestalt beinhaltet die technische Funktionsfähigkeit und den Antrieb. Die Interfacegestalt ermöglicht ein Betätigen und Benutzen der technischen Funktionen, z. B. Anzeigen und Stellteile eines Produkts und die Tragwerksgestalt dient der Positionierung oder dem Schutz von Funktion und Interface.

Funktionsgestalt (Fu)	Interfacegestalt (If)	Tragwerksgestalt (Tw)
Baugruppen / Module des Funktionssystems; Antriebstechnik, z. B. Motor, Getriebe	Bedienungs- / Betätigungselemente; Benutzeroberfläche z. B. Schalter, Hebel	Tragwerk- / Gehäuseelemente z. B. Rahmen, Gehäuse
Grundfkt. aus Grundoperationen (leiten, wandeln, speichern) an Grundgrößen (Stoff, Energie, Info)	ergibt sich durch den Automatisierungsgrad: Vollautomat oder manuellen Steuerung	Gewährleistung Position der Funktions-Baugruppen und -Gestalt unter Last sowie Kraftleitung
techn.-phys. Anf. bestimmen Größe, Gewicht, Komplexität	Stellteile und Anzeigen als primäre Bestandteile	bei Belastung Steifheit gewährleisten; kostenbestimmend

Tabelle 2.3: Teilgestalt Aufbau und -elemente nach SEEGER 2005 [S. 49, 103, 107]

Übertragen auf ASS (vgl. Kapitel 4.1) umfasst die Funktionsgestalt den Antrieb für die Bewegung bzw. Anpassung. Im Regelungssystem wird vom Stellantrieb oder Aktor gesprochen (vgl. Kapitel 2.3). Die Interfacegestalt beinhaltet Stellteile und Anzeigen, auf die in Kapitel 2.1.2 näher eingegangen wurde. Die Tragwerksgestalt bildet die Basis von ASS und setzt die vom Aktor veranlasste Bewegung um. Sie beinhaltet außerdem die Positionierung von Fu und If. Mithilfe des Tragwerks werden später Anforderungen des Nutzers bezüglich Betätigung und Benutzung sowie Sichtbarkeit und Erkennbarkeit umgesetzt. Im Folgenden wird daher näher auf das Tragwerk eingegangen.

2.2.1.1 Tragwerksgestalt

Nach DIN EN 1990 [2010, S. 12] ist ein Tragwerk aus einzelnen Bauteilen aufgebaut, die miteinander verbunden werden und Tragfähigkeit und Steifigkeit gewährleisten. In der Literatur sind zwei grundlegende Einteilungsmöglichkeiten für Tragwerke vertreten: nach ihrer geometrischen Form und Belastung in Stab- und Flächentragwerke [MAIER 2019], [BÜTTNER & HAMPE 1984], [FRANZ ET AL. 1969] sowie nach ihrer Lage in der Ebene bzw. im Raum in ebene und räumliche Tragwerke [RICHARD & SANDER 2016]. Letztere wird häufig im Bereich der technischen Mechanik zur Berechnung verwendet. Diese Arbeit orientiert sich daher an der Einteilung in Stab- und Flächentragwerke (Abbildung 2.2).

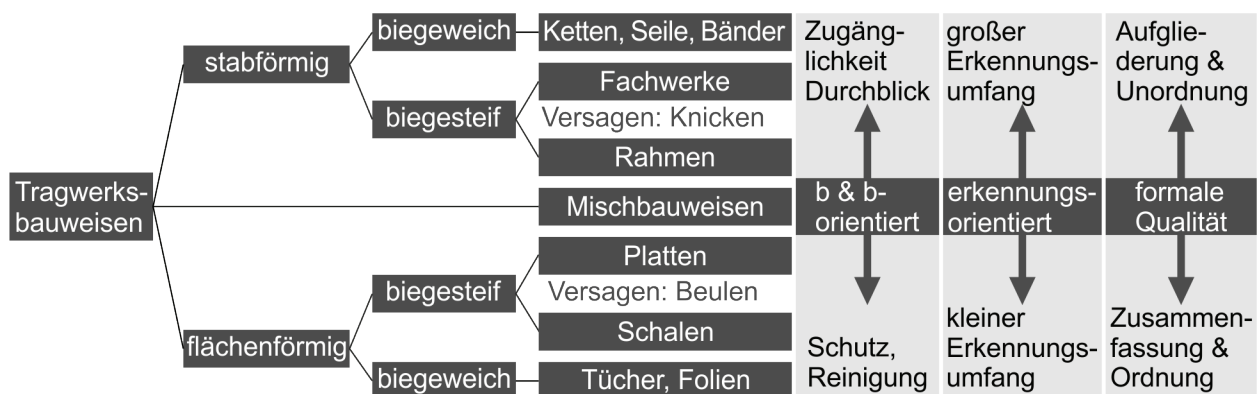


Abbildung 2.2: Einteilung der Tragwerksbauweisen im Kontext des Technischen Designs nach [MAIER 2019], [SEEGER 2005, S. 162]

Stabförmige Tragwerke zeichnen sich dadurch aus, dass ihre Länge viel größer als die übrigen Abmessungen ist [KOSSIRA 1996, S. 98], [FRANZ ET AL. 1969, S. 1]. Sie werden vorwiegend durch Längsspannungen beansprucht [FRANZ ET AL. 1969, S. 1]. Zu den stabförmigen Tragwerken gehören Stäbe, Balken, Bogen, Rahmen, Fachwerke und Seile bzw. Ketten [ebd., S. 1, 9]. Stäbe werden in Richtung ihrer Achse belastet, Balken in Querrichtung zur Achse [ebd., S. 9]. Fachwerke sind aus Stäben zusammengesetzte Tragwerke, die über Knoten miteinander verbunden sind [HIRSCHFELD 1959, S. 1].

Für flächenförmige Tragwerke gilt, dass die Abmessungen stark zweidimensional sind, d. h., dass die Dicke klein gegenüber den anderen Abmessungen ist [KOSSIRA 1996, S. 99], [FRANZ ET AL. 1969, S. 1], [GRAVINA 1961, S. 33]. Die Längsspannungen sind dadurch in beide Richtungen gleich groß, die Normalspannungen sind dazu klein und vernachlässigbar [FRANZ ET AL. 1969, S. 1], [GRAVINA 1961, S. 33]. Zu den flächenförmigen Tragwerken gehören Scheiben, Platten, Schalen, Falwerke und Membrane [FRANZ ET AL. 1969, S. 2] [GRAVINA 1961, S. 51 - 68]. Scheiben werden in ihrer Ebene belastet (Längskräfte), Platten normal zu ihrer Ebene (Biegung) [FRANZ ET AL. 1969, S. 2], [GRAVINA 1961, S. 51, 53]. Schalen stellen Tragwerke mit gekrümmter Mittelfläche dar [GRAVINA 1961, S. 57]. Ein Sonderfall von Schalen (gekrümmte Scheiben) sind Membrane, die durch die Umlenkung der Längskräfte zu ihrer Mitte rechtwinklige Lasten aushalten [FRANZ ET AL. 1969, S. 2]. Falwerke sind abgeknickte Scheiben oder Platten, die starr miteinander verbunden sind und einen gemischten Spannungszustand vorweisen [ebd., S. 2].

Bei der Konzeption der Tragwerksgestalt kann zwischen der formalen und funktionalen Konzeption unterschieden werden [SEEGER 2005, S. 157]. Bei der formalen Konzeption werden die Krafteinleitungs- und Kraftableitungsstellen über Grundgestalten verbunden. Die funktionale Konzeption umfasst den Kraftfluss, der ideal kurz, direkt und mit gleicher Spannungsverteilung verläuft. Daraus ergibt sich die Belastung der Gestaltelemente durch Zug- oder Druckkräfte (einfunktional), Druck- und Biegekräfte (zweifunktional) oder Druck-, Biege- und Querkräfte (dreifunktional) [ebd., S. 163].

In Bezug auf ASS bilden bewegliche Tragwerke und Gelenke die Grundlage, die Anpassung an die äußeren Randbedingungen durchzuführen. Daher werden im Folgenden Möglichkeiten aufgezeigt, Tragwerke beweglich zu gestalten.

2.2.1.2 Bewegliche Tragwerke und Gelenke

Bewegliche Tragwerke finden in der Architektur und im Bauwesen Einsatz, z. B. beim Bau von Brücken [TEUFFEL 2004] und Schalenträgwerken [SOBEK ET AL. 2012] oder bei

neuartigen Fahrzeugkonzepten [BMW 2020]. Adaptive Tragwerke können besser auf dynamische Belastungen reagieren und dadurch in hohem Maß Material und Gewicht einsparen [SOBEK ET AL. 2012]. Konventionelle Gelenke sind Standardlösungen, um bewegliche Mechanismen zu realisieren - im Gelenk findet die Bewegung statt. In der Bionik kommen Pflanzen ohne diskrete Gelenke aus und nutzen elastische Verformungen [KNIPPERS 2012]. Dadurch ergeben sich Konstruktionen, die in der Lage sind, aufgrund der reversiblen Elastizität ihrer Komponenten auf verschleißanfällige Elemente, wie Gelenke, zu verzichten und trotzdem eine Bewegung durchzuführen [ebd.]. Im Folgenden werden konventionelle Gelenke kurz vorgestellt und Festkörpergelenke näher betrachtet.

Nach ROTH [1996, S. 84] ist das Gelenk eine bewegliche Verbindung (Rotations-, Translations-, Schraubgelenk), welche sich durch Berührung und relative Beweglichkeit auszeichnet. Lager und Führungen zählen ebenfalls zu den beweglichen Verbindungen, umfassen aber zusätzlich Stützung und Energieleitung [ROTH 1996, S. 85]. Die Einteilung mehrteiliger Gelenke kann nach Freiheitsgraden und Grundelementen (z. B. Quader, Zylinder, Kugel) stattfinden [ebd., S. 86].

Festkörpergelenke, auch als Funktionsintegration (Abbildung 2.3) [ROTH 1996, S. 90], stoffschlüssiges Gelenk [CAMPANILE & JÄHNE 2013] oder nachgiebige Mechanismen bezeichnet, ermöglichen eine Bewegung durch elastische Verformung [LOBONTIU 2003, S. 1]. Sie können als Alternative zu konventionellen Gelenken zum Einsatz kommen. Die Bewegung wird dabei durch elastische Verformung des Materials erreicht. Kennzeichnend für Festkörpergelenke ist ein Strukturbereich mit reduzierter Biegesteifigkeit, die zumeist über eine Querschnittsverringering mit unterschiedlichen geometrischen Formen bewirkt wird. Die angrenzenden Elemente werden als Starrkörper betrachtet.

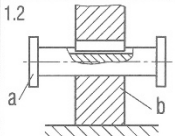
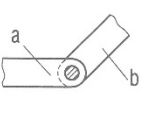
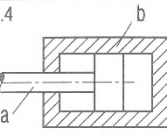
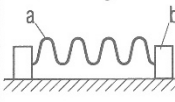
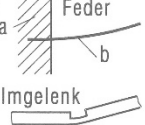

Funktions-Integration	Translation	Rotation	Translation und Rotation
1.1 Nicht integriert	1.2 	1.3 	1.4 
2.1 Integriert	2.2 Balg 	2.3 Feder Filmgelenk 	2.4 Flexibles Band 

Abbildung 2.3: Funktionsintegration bei Gelenken [ROTH 1996, S. 90]

Die einteilige, montagefreie Konstruktion bietet viele Vorteile: Es findet keine Relativbewegung zwischen den kontaktierenden Flächen statt, wodurch Festkörpergelenke spiel-, reibungs-, wartungs- und geräuschfrei sind. Damit entsteht kein Abrieb und es wird keine

Schmierung benötigt, was zu einem saubereren Betrieb beiträgt. Durch den Verzicht auf mehrere Bauteile wird das Leichtbaupotenzial gesteigert, Bauraum eingespart und die Komplexität verringert. Allerdings spielt das Material eine große Rolle. Je nach Materialauswahl, wird der Bewegungsradius, die Lebensdauer und die Belastbarkeit beeinflusst. Nachteilig ist die Begrenztheit der Bewegung, Materialermüdung und komplizierte Kinematik und Kinetik. Das Bewegungsverhalten hängt von der Geometrie des Gelenks ab. Häufig verwendete Geometrien elastischer Festkörpergelenke sind: kreisförmig, parabelförmig, rechteckig, quartisch (Abbildung 2.4) [RÖSNER 2015, S. 52].

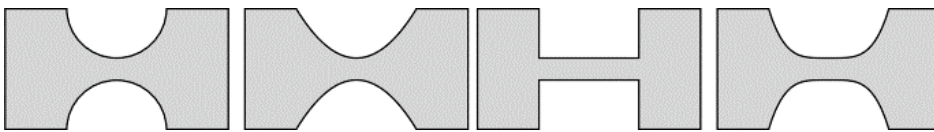


Abbildung 2.4: Geometrien elastischer Festkörpergelenke [RÖSNER 2015, S. 52]

Bei großen Auslenkungen ist zu beachten, dass an der Gelenkstelle hohe Spannungen auftreten können, die von der Geometrie und der Größe der Auslenkungen abhängen. Um keine bleibenden Verformungen zu erzeugen und reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen, darf das Material nur im elastischen Bereich verformt werden. Abhängig von der gewählten Geometrie und dem Material wird hierbei die Grenze vorgegeben, in der die Auslenkung stattfinden kann. Große Auslenkungen können beispielsweise mit flexiblen Kunststoffen wie thermoplastischen Elastomeren (TPE) umgesetzt werden.

Festkörpergelenke werden bereits in vielen Anwendungsgebieten eingesetzt, beispielsweise in der Medizintechnik [KOTA ET AL. 2005], der Robotik, [MUTLU ET AL. 2015], der Luft- und Raumfahrt [HENEIN ET AL. 2003] oder bei Positioniersystemen [LINß 2015]. Eine Einteilung kann nach der Ursache der Bewegungsfähigkeit, der Verteilung der Nachgiebigkeit, des Gelenkaufbaus, der Körpergeometrie, der Gelenkkomplexität, der Anzahl der Freiheitsgrade, der Form der Bewegung, der Raumlage der Gelenkachsen, der Beanspruchungsart, der Lage der Drehachsen, der funktionellen Integration und der Veränderlichkeit der Nachgiebigkeit erfolgen [LINß 2015, S. 11 - 13]. Linß [2015] gibt in seiner Arbeit dazu einen Überblick mit Beispielen aus der aktuellen Forschung.

Die Unterscheidung anhand von Freiheitsgraden wurde bereits 1965 von PAROS & WEISBORD [1965] eingeführt. Sie untersuchten Konstruktionsgleichungen für kreisförmige und rechteckige Festkörpergelenke mit einem und zwei Freiheitsgraden. Aktuell finden Festkörpergelenke mit einem Freiheitsgrad [FRIEDRICH 2016, S. 31] oder mehreren Freiheitsgraden [LOBONTIU 2003], [LOBONTIU & PAINE 2002] Anwendung. Es werden sowohl symmetrische [LOBONTIU ET AL. 2011] als auch asymmetrische [LIN ET AL. 2013] Festkörpergelenke

untersucht. Die Bewegung der Festkörpergelenke wird in Abhängigkeit des Werkstoffs [GOUKER ET AL. 2006] oder in Abhängigkeit der Geometrie (unterschiedliche Festkörpergelenke für eine Rotationsbewegung) [LINß ET AL. 2019, S. 5] analysiert. Insgesamt werden die unterschiedlichsten Körpergeometrien und Aussparungsgeometrien [LINß & ZENTNER 2013, S. 362] untersucht. Als Tool zur Analyse und Simulation wird häufig die nichtlineare Finite Elemente Methode verwendet [RÖSNER 2015, S. 7], [LINß ET AL. 2019, S. 7f].

Zum jetzigen Zeitpunkt werden hauptsächlich stabförmige Festkörpergelenke untersucht und eingesetzt, die sich in ihrer Körper- und Aussparungsgeometrie an den Randbereichen unterscheiden, es werden jedoch keine flächigen Festkörpergelenke mit variablen Grundformen und Strukturierungen innerhalb des flexiblen Elements berücksichtigt.

2.2.2 Formgestalt

Die Formgestalt basiert auf der Aufbaugestalt und konkretisiert diese [HOLDER 2016, S. 9]. Sie definiert die äußere Erscheinung und besteht aus einem funktionellen, werkstofflichen und entwurfstechnischen Anteil [RODENACKER 1970, S. 130]. Die Formgebung legt Flächen, Radien, Kanten, Fugen und Linien eines Aufbauelements fest [SEEGER 2005, S. 203] und konkretisiert damit die Aufbaugestalt. Wie der Aufbau besteht die Form nach Seeger aus der Funktions-, der Interface-, und der Tragwerksgestalt [ebd., S. 86, 203]. Das Tragwerk der Form kann den Aufbau beispielsweise minimal umhüllen, indem es identisch mit dem des Aufbaus wird, oder eine neue Formgebung festlegen.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Aufbaugestalt. In Bezug auf die Formgestalt ist durch die Fokussierung auf das Technische Design und die MMS vor allem die in Kapitel 2.1.1 beschriebene anthropomorphe Formgebung interessant.

2.3 Grundlagen der Regelungstechnik - das Regelungssystem

Die Regelungstechnik befasst sich mit der Steuerung dynamischer Systeme. Ein sich zeitlich ändernder Prozess wird so beeinflusst, dass dieser in der geforderten Weise abläuft [LUNZE 2010, S. 1, 2]. Ohne Rückführung handelt es sich um eine Steuerung. Eine Regelung enthält demnach eine Rückführung, die den Regelkreis zum Ausgleich der Toleranzen und Störgrößen schließt. Das Regelziel kann daher auch erreicht werden, wenn die Regelstrecke durch Störgrößen beeinflusst wird, die Eigenschaften der Regelstrecke nicht genau bekannt sind oder die Regelstrecke Toleranzen aufweist. Die Regelung kann somit auf unvorhergesehene Änderungen reagieren. Wichtige Elemente eines Regelungssystems stellen Regler, Sensoren und Aktoren dar (Tabelle 2.4).

Sensor	Regler	Aktor
qualitative bzw. quantitative Erfassung einer physikalischen Größe	Element, um tatsächlichen Zustand eines Systems in den gewünschten zu überführen	Umwandlung der physikalischen Eingangsgröße in ein mechanisches Signal
<ul style="list-style-type: none"> • akustisch • induktiv • kapazitiv • magnetisch • mechanisch • optisch • piezoelektrisch • resistiv • thermoelektrisch 	<ul style="list-style-type: none"> • analoge Regler (stetig und unstetig) • digitale Regler (Mikrorechner, Mikrocontroller, PC, IPC, SPS, Soft-SPS, PLS) 	<ul style="list-style-type: none"> • elektroaktiv (elektrostriktiv, piezoelektrisch) • elektrochemisch • elektromechanisch • Formgedächtnis • hydraulisch • magnetostraktiv • pneumatisch • rheologisch

Tabelle 2.4: Sensoren, Aktoren und Regler nach [HEYWANG 1993], [CLARK ET AL. 1998], [HEINRICH & SCHNEIDER 2019], [JANOCHA 2010], [JANOCHA 1992]

DIN IEC 60050-351 [2014, S. 136] definiert eine Regelung als „Vorgang, bei dem fortlaufend eine variable Größe, die Regelgröße, erfasst (gemessen), mit einer anderen variablen Größe, der Führungsgröße verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird“. „Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungsablauf, bei dem die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst“ [ebd., S. 136]. Abbildung 2.5 zeigt die Struktur eines Regelungssystems, mit den folgenden Elementen [ebd., S. 174 - 247], [HEINRICH & SCHNEIDER 2019, S. 8ff]:

- Regler: besteht aus Vergleichsglied und Regelglied
- Regelglied: bildet aus der Regeldifferenz die Regelausgangsgröße $m(t)$
- Steller: bildet aus $m(t)$ die erforderliche Stellgröße $y(t)$ zur Betätigung des Stellglieds (z. B. Motor, der je nach Spannung die Stellung des Stellglieds beeinflusst)
- Stellglied: gehört zur Regelstrecke und ist am Eingang angeordnet, wird durch die Stellgröße beeinflusst und wirkt sich auf Massenstrom oder Energiefluss aus (z. B. Ventil, Schieber, elektrische Schalter)
- Regelstrecke: System, in dem sich die zu regelnde Größe befindet, wird ausgehend von der Regelungsaufgabe beeinflusst
- Messglied: bildet aus der Eingangsgröße $x(t)$ die Rückführgröße $r(t)$

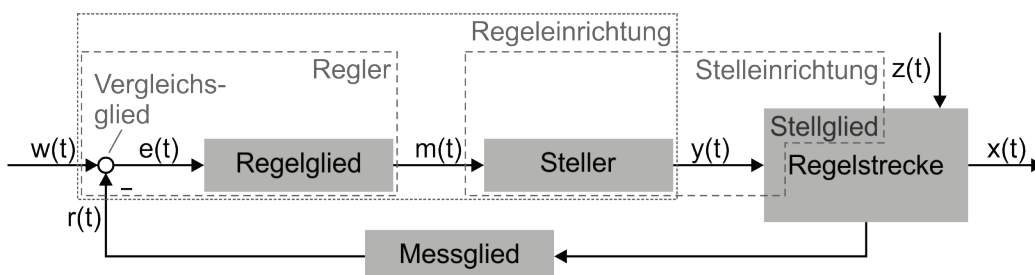


Abbildung 2.5: Struktur Regelungssystem nach DIN IEC 60050-351 [2014 S. 174]

Der Sollwert $w(t)$ stellt das Ziel dar, auf das hin geregelt werden soll. In einem Regelungssystem wird die Regelgröße $x(t)$ durch ein Messglied gemessen und als Rückführgröße $r(t)$ zum Vergleichsglied zurückgeführt. Die Regeldifferenz $e(t) = w(t) - r(t)$ bildet die Eingangsgröße für das Regelglied. Die Ausgangsgröße des Reglers wird als $m(t)$ bezeichnet und ist gleichzeitig die Eingangsgröße des Stellers. Die Stellgröße $y(t)$ wird von der Regeleinrichtung (Regelglied und Steller) an die Regelstrecke überführt. Auf die Regelstrecke wirken häufig Störgrößen $z(t)$ ein, z. B. Umwelteinflüsse.

2.3.1 Regler

Der Regler besteht aus Regelglied und Vergleichsglied [DIN IEC 60050-351 2014, S. 174]. Seine Aufgabe ist die Regelung der Strecke aus Abbildung 2.5. Regler können nach ihrem Stellverhalten in drei Gruppen unterteilt werden [HEINRICH 2017, S. 1644]:

- Stetige Regler, z. B. mit P-, I-, PI- oder PID-Verhalten
- Unstetige Regler, z. B. Zweipunkt- oder Dreipunktregler
- Quasistetige Regler, z. B. mit diskreten Bauteilen, SPS, Mikroprozessoren

Bei analogen Reglern (stetige und unstetige) wird aus der als analoger Wert vorliegenden Regeldifferenz $e(t)$ die Stellgröße $y(t)$ abgeleitet. Bei stetigen Reglern (kontinuierlicher Stellbereich) kann die Stellgröße jeden beliebigen Wert innerhalb eines Stellbereiches annehmen [ZACHER & REUTER 2014, S. 100]. Zu den gebräuchlichsten stetigen Reglern zählen Regler mit P-, PI-, PD- und PID-Verhalten. Das Übertragungsverhalten weist proportionales (P-), integrierendes (I-) oder differenzierendes (D-) Verhalten auf oder setzt sich aus den einzelnen Regelgliedern zusammen [HEINRICH 2017, S. 1645 - 1650]:

- P-Regler: Stellgröße $y(t)$ ist proportional zur Regeldifferenz $e(t)$
- I-Regler: Stellgröße $y(t)$ ist proportional zum Integral der Regeldifferenz $e(t)$
- D-Regler: Stellgröße $y(t)$ ist proportional zur Ableitung der Regeldifferenz $e(t)$
- PID-Regler: kombinierter Regler, mit den Vorteilen des P-Reglers (Genauigkeit), I-Reglers (keine bleibende Regelabweichung) und D-Reglers (Schnelligkeit)

Bei unstetigen Reglern wird die Stellgröße $y(t)$ sprunghaft verändert, sie schaltet zwischen diskreten Werten [ZACHER & REUTER 2014, S. 100]. Je nachdem, wie viele verschiedene Zustände $y(t)$ einnimmt, wird zwischen Zwei-, Drei- oder Mehrpunktreglern unterschieden. Unstetige Regler können mit sehr einfachen, schaltenden Stelleinrichtungen arbeiten und sind robust und kostengünstig.

Digitale Regler werden häufig als quasistetige Regler bezeichnet [HEINRICH 2017, S. 1651]. Genau betrachtet weist die Stellgröße sprungförmige Änderungen auf, die je-

doch durch die Schnelligkeit und feine Abstufung nahezu stetig sind [HEINRICH ET AL. 2020, S. 203]. Die Umsetzung erfolgt häufig mit Mikrocontrollern. Durch die digitale Auswertung der Regeldifferenz ist der Zusammenhang zwischen Regeldifferenz und Reglerausgangsgröße sehr flexibel, da die Definition des Regelgesetzes über einen Algorithmus erfolgt. Weitere Vorteile sind leichte Austauschbarkeit und Reproduzierbarkeit sowie die Möglichkeit, komplexe Reglerstrukturen und Regelungsverfahren einzusetzen und Zusatzfunktionen wie Überwachung und Diagnose einzubinden. Zur digitalen Verarbeitung der Größen werden Sollwert und Rückführgröße in einem Analog-Digital-Wandler in digitale Größen überführt, um von einem digitalen Vergleichsglied voneinander subtrahiert (Regeldifferenz $e(t)$), und als Eingangsgröße an das digitale Regelglied übergeben zu werden [LUNZE 2014, S. 416]. Die Reglerausgangsgröße wird in einem Digital-Analog-Wandler wieder in eine analoge Größe umgewandelt und an die Stelleinrichtung übergeben.

2.3.2 Regelkreis adaptiver Strukturen und Systeme mit FGL

Nach den allgemeinen Grundlagen zu Regelsystemen und Reglern wird im Folgenden ein Überblick über Regelkreise von ASS gegeben (Tabelle 2.5).

	Beschreibung	Quelle
Lage- / Positionsregelung: Regelung nach Kraft bzw. Dehnung	Positionsregelung FG-Antriebe auf Basis einer zurückgeführten Positionsmessung über PI-Regler → wegen geringer Dynamik kann auf D-Anteil verzichtet werden	[SCHIEDECK 2009, S. 20]
	Position über Sensor als Messgröße, PI-Regler, Realisierung des Reglers auf Digitalrechner	[SCHIEDECK 2009, S. 69]
	PI-Regler, adaptiver PI-Regler mit hinterlegten optimalen Übertragungsfunktionen, Zweipunktregler	[LANGBEIN & CZECHOWICZ 2013, S. 121, 122]
	Lageregelung von Einzelaktorsystemen mittels PI-Regler und adaptivem Regler	[KEHL 1999, S. 70-76]
	PI-Regelung (versch. Ansätze, z. B. mit Vorsteuerung) über externe (sensorbasierte) Positionsmessung	[PONS ET AL. 1997]
	PID-Regelung über Positionskontrolle	[HISSEINE 2006, S. 1060]
	PI Regelung anhand Dehnung über el. Spannung DMS	[MUSOLFF 2005, S. 66]
	PID-Regelung mit Positionskontrolle	[PRITSCHOW ET AL. 2000, S. 779]
Lage- / Positionsregelung: widerstandsbasierte Regelung	elektrischer Widerstand als Messgröße, PI-Regler, Realisierung des Reglers auf einem Digitalrechner	[SCHIEDECK 2009, S. 69]
	PID-Regler über elektrischen Widerstand	[MEIER ET AL. 2009, S. 5]
	zwei antagonistisch arbeitenden FGL (Widerstand)	[IKUTA ET AL. 1988, S. 427]
	widerstandsbasierte PI-Regelung	[IKUTA 1990, S. 2159]
	PI-Regelung (versch. Ansätze, z. B. mit Vorsteuerung) über interne Widerstandsmessung	[PONS ET AL. 1997]
Kombiniert	PID-Regler über el. Widerstand & Positionsfeedback	[IKUTA 1990, S. 2159]

Tabelle 2.5: Regelungen adaptiver Strukturen und Systeme mit FGL

Grundlegend wird zwischen zwei Ansätzen unterschieden: die Regelung über interne und externe Variablen [IKUTA 1990, S. 2157f]. Zu den internen Variablen zählen der Wider-

stand und die Aktor-Temperatur, externe Variablen geben den Output des Aktors wie die erzeugte Kraft, Dehnung oder Position wieder. Die Temperatur ist bei Drähten mit kleinem Durchmesser aufgrund der schlechten Anbringungsmöglichkeiten, der Lage des Drahts innerhalb der Struktur und der starken Bewegung des Drahts schwierig zu messen. Für die Regelung von ASS mit FGL werden in den meisten Fällen PI-Regler eingesetzt, da der P-Anteil für einen schnellen Anstieg des Sollwerts und der I-Anteil für eine stationär genaue Regelung sorgt [LANGBEIN & CZECHOWICZ 2013, S. 122].

2.3.3 Aktoren und Sensoren

Aktoren und Sensoren verbinden die mechanische Struktur mit der Regelung und der Umwelt. Sensoren wandeln eingehende physikalische Größen zur Weiterverarbeitung für den Regler in Messsignale um. Aktoren verbinden den Regler mit der mechanischen Struktur und führen anhand der eingehenden Größen Stellbewegungen aus.

Sensoren nehmen die zu messende Größe (Eingangsgröße) auf und setzen sie in ein Messsignal um. Zur Auswahl der Sensoren werden Parameter wie die statische und dynamische Messgenauigkeit, die Auflösung, der Messbereich, Umgebungsbedingungen, Wartung und Kosten eingesetzt [MANN ET AL. 2018, S. 320].

Aktoren sind Verbindungsglieder zwischen dem Regler und der Regelstrecke und wandeln ein elektrisches, thermisches oder optisches Signal in eine mechanische oder physikalische Größe um. Sie veranlassen eine Formänderung von Bauteilen und sind für die Verrichtung von mechanischer Arbeit geeignet [JANOCHA 2010, S. 1].

Für ASS sind Sensoren und Aktoren interessant, die sich in die Struktur integrieren lassen. Dazu zählen Sensoren zur Erfassung der Dehnung (z. B. DMS) oder zur Kraftmessung (Piezoelemente) und Aktoren zur Erzeugung einer Bewegung wie Formgedächtnislegierungen oder elektroaktive Polymere. Diese Arten von Aktoren und Sensoren sowie die zugrundeliegenden smarten Materialien werden im Folgenden genauer betrachtet.

2.4 Smarte Materialien (SM)

AHMAD [1988, S. 4] definierte 1988 in einem Workshop der US Army über smarte Strukturen [ROGERS & AHMAD 1988] smarte Materialien als *“[a] system or a material which has built-in or intrinsic sensor/s, actuator/s and control mechanism/s whereby it is capable of sensing a stimulus, responding to it in a predetermined manner and extent, in a short / appropriate time and reverting to its original state as soon as the stimulus is removed”*. smarte Materialien (SM), häufig auch als intelligente oder adaptive Materialien bezeich-

net, sind Werkstoffe, deren Eigenschaften durch eine gezielte Ansteuerung, z. B. das Anlegen einer elektrischen Spannung, die Änderung der Temperatur oder des Drucks, beeinflusst werden können. Dabei zeigen sich bestimmte materialtypische Eigenschaften wie die Form-, Phasen- oder Farbänderung. Mithilfe von SM können sowohl sensorische als auch aktorische Funktionen realisiert werden. Durch die aktive Reaktion auf veränderte Bedingungen findet damit eine Verbindung von Aufbau, Form und Funktion statt. Dies wirkt als Treiber für neue Produkte, ermöglicht innovative Gestaltungsmöglichkeiten, spart Gewicht und kann für intuitiv erlernbare Bedienkonzepte genutzt werden.

2.4.1 Einteilung und Übersicht smarter Materialien

In der Literatur sind unterschiedliche Einteilungsmöglichkeiten von SM zu finden: nach ihrer Aktivierung [KUNZE ET AL. 2010, S. 4], nach ihrem Spannungs- und Dehnungsverhalten [PAGEL 2014], [LAGOUDAS 2008], nach ihrer Materialart [GANDHI & THOMPSON 1992, S. 2], nach ihren Eigenschaftsänderungen [KÖHNLEIN 2000, S. 431], [RITTER 2007] oder ihres physikalischen Effekts. CLARK ET AL. [1998, S. 9] geben Empfehlungen, welche SM für welchen Anwendungszweck eingesetzt werden können. Als Aktor eignen sich elektrostriktive, ferroelektrische und magnetostruktive Materialien, als Sensoren optische Fasern. Piezoelektrische Materialien sowie Formgedächtnislegierungen finden Anwendung als Aktor und Sensor. Durch das Ziel dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Gestaltanpassung und Bewegungsumsetzung. Es wird daher auf die Einteilung nach Art der Eigenschaftsänderung zurückgegriffen und die formveränderbaren Materialien betrachtet.

2.4.2 Formveränderbare smarte Materialien

Die formveränderbaren SM schließen alle Materialien ein, die durch äußere Einflüsse ihre Form verändern (Tabelle 2.6). Sie können ihre Gestalt bzw. ihre Dimensionen abhängig vom eingesetzten Stimulus variieren. Im Folgenden werden häufig eingesetzte Materialien betrachtet und ein Überblick über die Haupteigenschaften gegeben.

	Gruppe	Beispiele
Formveränderbare Materialien	Thermostruktive Materialien	Formgedächtnislegierungen, -polymere und -keramiken sowie Thermobimetalle
	Piezoelektrische Materialien	Keramiken, Polymere
	Elektroaktive Materialien	Elektroaktive Polymere, Elektrostriktive Keramiken, Dielektrische Elastomere
	Magnetostruktive Materialien	Keramiken
	Chemostruktive Materialien	Polymere, Biopolymere, Polymergele

Tabelle 2.6: Klassifizierung formveränderbarer SM nach [KÖHNLEIN 2000, S. 431], [RITTER 2007], [JANOCHA 2007]

2.4.2.1 Formgedächtnislegierungen (FGL)

Formgedächtnislegierungen zeichnen sich durch superelastisches Verhalten, reversible Dehnungen, hohe aufzubringende Kräfte und hohe Energiedichte aus. Sie können ihre Form durch thermische oder elektrische Aktivierung ändern und nach einer Verformung wieder in ihren ursprünglichen Zustand zurückkehren. Diesem Effekt liegen Phasentransformationen von einer Niedertemperaturphase (Martensit) zu einer Hochtemperaturphase (Austenit) zugrunde. Die Transformation ist auch beim Anlegen einer äußeren Kraft möglich. In Abhängigkeit der Umwandlungstemperatur bzw. einer mechanischen Beanspruchung nehmen FGL zwei unterschiedliche Kristallstrukturen ein, die für die Formänderung verantwortlich sind. FGL werden in Drahtform, als Feder oder dünne Platte eingesetzt. Tabelle 2.7 gibt die Eigenschaften der gebräuchlichen Legierungen wieder.

Parameter	Beschreibung	Quellen
Dehnung [%]	je nach Legierung hohe reversible Dehnungen 4 .. 8	[HESELBACH 2007, S. 151] [VAN HUMBEECK 2001, S. 841] [TAUTZENBERGER 1988, S. 75]
Spannungen / Kräfte [MPa]	je nach Legierung Dauerfestigkeit bei 270 .. 350	[VAN HUMBEECK 2001, S. 841]
	zulässige Spannung zyklische Beanspr. 75 .. 150	[HESELBACH 2007, S. 151]
	zulässige Spannung je nach Legierung 75 .. 250	[TAUTZENBERGER 1988, S. 83]
Frequenz [Hz]	0 .. 20	[BUCHT 2015]
Umwandlungstemperatur [°C]	je nach Legierungszusammensetzung -200 .. 200	[HESELBACH 2007, S. 151] [VAN HUMBEECK 2001, S. 841]
Zyklenanzahl	je nach Legierung bis zu 100.000	[HESELBACH 2007, S. 151] [TAUTZENBERGER 1988, S. 82]
Energiedichte [kJ/m ³]	je nach Legierung 1000 .. 4000	[VAN HUMBEECK 2001, S. 841]
	je nach Legierung 1000 .. 5000	[TAUTZENBERGER 1988, S. 82]
Legierungsarten	NiTi, NiTiCu, CuZnAl, CuAlNi, (FeNiCoTi)	[HESELBACH 2007, S. 151]
Hysteresebreite	15 .. 30 °C	[HESELBACH 2007, S. 151]
Dichte [g/cm ³]	je nach Legierung 6,45 .. 7,15	[HESELBACH 2007, S. 151]
	je nach Legierung 6,4 .. 8	[TAUTZENBERGER 1988, S. 75]
Bruchdehnung [%]	je nach Legierung 10 .. 50	[VAN HUMBEECK 2001, S. 841]
	je nach Legierung 5 .. 50	[TAUTZENBERGER 1988, S. 75]
Zugfestigkeit [MPa]	je nach Legierung 400 .. 1000	[HESELBACH 2007, S. 151] [TAUTZENBERGER 1988, S. 75]
	je nach Legierung 700 .. 1100	[VAN HUMBEECK 2001, S. 841]
Elastizitätsmodul [GPa]	Martensit: 27, Austenit: 80	[VAN HUMBEECK 2001, S. 841]
	je nach Legierung 50 .. 100	[HESELBACH 2007, S. 151]
Elektrischer Widerstand [μΩm]	abh. von Phasentransformation, Temperatur und mechanischer Spannung [PRITSCHOW ET AL. 2000, S. 779]; Austenit: 1, Martensit: 0,8 (NiTi)	[VAN HUMBEECK 2001, S. 841] [HESELBACH 2007, S. 151]
Aktivierungsenergie	1050 mA für 1 s Kontraktion bei ø 0,25 mm und 18,5 Ω/m → ~19,4 V/m	[DYNALLOY 2020]

Tabelle 2.7: Eigenschaften von Formgedächtnislegierungen

Magnetische Formgedächtnislegierung (MFGL) (Tabelle 2.8) weisen eine reversible Änderung der Mikrostruktur beim Anlegen eines Magnetfeldes auf. Die Formänderung

entsteht aufgrund der Verschiebung der Zwillingsgrenzen im Atomgitter in der martensitischen Phase. Im Gegensatz zu FGL weisen MFGL höhere Dehnungen und schnelle Reaktionszeiten auf, allerdings können nur geringe mechanische Spannungen erreicht werden. Die hohen Frequenzen werden über ein Magnetfeld möglich und liegen im kHz Bereich [BUCHT 2015]. Typische Legierungen bestehen aus Nickel, Mangan und Gallium.

Parameter	Beschreibung	Quellen
Dehnung [%]	hohe reversible Dehnungen von 6 .. 10	[JANOCHA 2010, S. 179] [BUCHT 2015] [KUNZE ET AL. 2010]
Spannungen / Kräfte [MPa]	5	[BUCHT 2015]
	2 .. 3	[JANOCHA 2010, S. 185]
Frequenz [Hz]	300	[JIN 2002, S. 92]
	0 .. kHz	[JANOCHA 2010, S. 180]
Temperatur [°C]	Curie: 95 .. 105, Betrieb: bis 65	[JANOCHA 2010, S. 181]
	75	[HENRY ET AL. 2001, S. 154]
Zyklusanzahl	200*10 ⁶	[TELLINEN ET AL. 2002, S. 4]
Energiedichte [kJ/m ³]	90	[JANOCHA 2010, S. 181]
	100	[HENRY ET AL. 2001, S. 151]
Legierungsarten	NiMnGa	[JANOCHA 2010, S. 179]
Dichte [g/cm ³]	8,3	[HENRY ET AL. 2001, S. 154]
Zugfestigkeit [GPa]	Druckfestigkeit: 0,1 .. 0,3	[JANOCHA 2010, S. 181]
Elastizitätsmodul [MPa]	7700 (Martensit)	[JANOCHA 2010, S. 181]
Magnetisches Feld [kA/m]	400	[HENRY ET AL. 2001, S. 160]
	300 .. 500	[JANOCHA 2010, S. 182]

Tabelle 2.8: Eigenschaften von magnetischen Formgedächtnislegierungen

2.4.2.2 Formgedächtnis Polymere (FGP)

Formgedächtnispolymere (Tabelle 2.9) sind Kunststoffe, die ähnlich wie FGL ihre Form in einer vordefinierten Art verändern, wenn sie einem entsprechenden Stimulus (z. B. Temperatur, Magnetfeld oder Licht) ausgesetzt sind. Im Gegensatz zu FGL ist ihre Flexibilität deutlich höher, sie erreichen Dehnungen bis zu 800 %, wobei ein Großteil der Polymere etwa 200 % erreicht. Die Formveränderung beansprucht allerdings mehrere Minuten. Der Formgedächtniseffekt (FGE) von FGP ist von ihrem molekularen Aufbau abhängig und kann durch Variation der inneren Struktur an gewünschte Eigenschaften angepasst werden. Er ist bei FGP kein intrinsischer Effekt [BEHL & LENDLEIN 2007, S. 21], das heißt, dass die Polymere vorher konditioniert werden müssen. Dies findet durch eine Kombination aus Polymer-Morphologie und Polymerverarbeitung statt, was auch als Polymer Funktionalisierung bezeichnet wird [ebd., S. 21]. Die Ursprungsform bzw. permanente Form wird mit konventionellen Verarbeitungsmethoden hergestellt, die temporäre Form durch Deformation und Programmierung [ebd., S. 21]. Nachdem das Material durch

einen externen Stimulus in seine Ursprungsform umgewandelt wurde, kann es nicht wieder in die temporäre Form zurückkehren (Einwegeffekt) [LENDLEIN & GOULD 2019, S. 2]. Aktuell werden Zweiweg FGP untersucht, die einen Wechsel zwischen zwei Formen möglich machen. Reversible FGP sind mehrphasige Materialien, bei denen eine Phase die Form und die andere Phase die Bewegung bestimmt [ebd., S. 2], wodurch beide Formen immer wieder eingenommen werden können. Anwendung finden FGP aktuell vor allem bei Wärmeschrumpffolien, selbstheilenden Materialien und im Bereich der Medizin.

Parameter	Beschreibung	Quellen
Dehnung [%]	250 .. 800, (200 .. 400 S. 208)	[IRIE 1998, S. 204]
	bis zu 800	[LIU ET AL. 2007, S. 1545]
	bis zu 400	[TAKASHIMA ET AL. 2010, S. 118]
Spannungen / Kräfte [MPa]	1 .. 3 MPa (benötigt für Umformung und freigesetzt während Rückformung)	[IRIE 1998, S. 204] [LIU ET AL. 2007, S. 1545]
Frequenz [min]	< 1 .. mehrere min	[LIU ET AL. 2007, S. 1545]
	30	[BEHL ET AL. 2010, S. 3390]
Umwandlungs-temperatur [°C]	25 .. 90	[IRIE 1998, S. 204]
	-40 .. 120 (MP4510)	[TAKASHIMA ET AL. 2010, S. 118]
Zyklusanzahl	500	[TAKASHIMA ET AL. 2010, S. 117]
Arten	Polynorborene, Polyisoprene, Styrene-butadiene copolymer, MP4510	[IRIE 1998, S. 208] [TAKASHIMA ET AL. 2010, S. 118]
Hysteresebreite	10 .. 50 °C	[LIU ET AL. 2007, S. 1545]
Dichte [g/cm ³]	0,9 .. 1,1	[IRIE 1998, S. 204]
Zugfestigkeit [MPa]	10 .. 35	[IRIE 1998, S. 208]
	30	[TAKASHIMA ET AL. 2010, S. 118]
Elastizitätsmodul [GPa]	0,01 .. 3 (unterhalb Transformationstemp.)	[LIU ET AL. 2007, S. 1545]
	0,0001 .. 0,01 (oberhalb Transformationstemp.)	
	1350 MPa (unterhalb Transformationstemp.)	[TAKASHIMA ET AL. 2010, S. 118]

Tabelle 2.9: Eigenschaften von Formgedächtnispolymeren

2.4.2.3 Dielektrische Elastomere (DE)

Elektroaktive Polymere (EAP) bezeichnen Materialien, die ihre Form nach einem elektrischen Stimulus verändern. Zu den EAPs zählen dielektrische Elastomere, piezoelektrische Polymere und elektrostriktive Polymere [JANOCHA 2007, S. 205]. Die größte Bedeutung im Bereich der Aktoren haben dabei die dielektrischen Elastomere [PELRINE ET AL. 2001, S. 148]. DE dehnen sich aus, wenn eine elektrische Spannung angelegt wird. Sie bestehen aus einem stark flexiblen Elastomerfilm (Silicon, Acryl, Polyurethane, Naturkautschuk) mit einem dehnfähigen Elektrodenfilm auf beiden Seiten. Die Deformation ergibt sich aus der elektrostatischen Anziehung, die einen mechanischen Druck bewirkt. Dadurch wird der Elastomerfilm von den beiden Elektroden in seiner Dicke komprimiert und seitlich expandiert. Im Gegensatz zu piezoelektrischen und elektrostriktiven Polymeren können große Deformationen bei geringen Kräften erzeugt werden. Anwendungen

sind im Bereich der Linearaktorik, der Robotik, des Energy Harvesting und der Akustik zu finden [KORNBLUH ET AL. 2002, S. 260]. Tabelle 2.10 stellt die Eigenschaften der DE dar.

Parameter	Beschreibung	Quellen
Dehnung [%]	Acryl (A): 380; Silikone (S): 120	[KORNBLUH & PELRINE 2008, S. 36]
	40 .. 215	[PELRINE ET AL. 2000, S. 838]
Spannungen / Kräfte [MPa]	maximale Druckkraft: 8,2 (A); 3,0 (S)	[KORNBLUH & PELRINE 2008, S. 36]
	Druckkraft: 0,13 .. 3,8	[KORNBLUH ET AL. 1999, S. 153]
	Druckkraft: 0,13 .. 3,0	[PELRINE ET AL. 2000, S. 838]
Frequenz [Hz]	$> 50 \cdot 10^3$	[KORNBLUH & PELRINE 2008, S. 36]
Temperatur [°C]	Betriebstemp.: -10 .. 90 (A); -100 .. 260 (S)	[KORNBLUH & PELRINE 2008, S. 36]
Zyklen [10^6]	Dauerschwingfestigkeit: 1 bei 100 % Dehnung	[BRUNNER 2015, S. 10]
	> 10	[KORNBLUH & PELRINE 2008, S. 36]
Energiedichte [kJ/m ³]	10 .. 200	[KORNBLUH ET AL. 1999, S. 153]
	22 .. 3400	[PELRINE ET AL. 2000, S. 838]
Materialien	Acryl, Silikone	[KORNBLUH & PELRINE 2008, S. 36]
Hysteresebreite	7 %	[BRUNNER 2015, S. 10]
Elastizitätsmodul [MPa]	0,125 .. 2,5	[KORNBLUH ET AL. 1999, S. 153]
	0,1 .. 0,3 (A); 0,1 .. 2,0 (S)	[KORNBLUH & PELRINE 2008, S. 36]
Aktivierungsenergie [MV/m]	440 (A); 350 (S)	[KORNBLUH & PELRINE 2008, S. 36]
	32 .. 235	[KORNBLUH ET AL. 1999, S. 153]
	55 .. 412	[PELRINE ET AL. 2000, S. 838]

Tabelle 2.10: Eigenschaften von dielektrischen Elastomeren

2.4.2.4 Elektrostriktive Materialien (EM)

Bei elektrostriktiven Materialien wird die Ausdehnung des Materials durch das Anlegen eines elektrischen Feldes hervorgerufen. Dabei findet eine Interaktion von elektrischen Feldern und Dipolen (im Gegensatz zu Monopolen in piezoelektrischen Materialien) statt [ELSPASS & FLEMMING 1998, S. 58]. EM weisen eine geringere Hysterese, eine höhere Energiedichte, aber auch eine höhere Temperaturabhängigkeit als PZM auf [ebd., S. 58]. Tabelle 2.11 fasst die Eigenschaften der EM zusammen.

Parameter	Beschreibung	Quellen
Dehnung [%]	0,1	[KÖHNLEIN 2000, S. 432]
	gestapelter Aktor bei 0,1 kV: 15 μ m	[ELSPASS & FLEMMING 1998, S. 61]
	gestapelter Aktor (7mm) bei 1 kV: 8,5 μ m	[NAKAJIMA ET AL. 1985, S. 235]
Spannungen / Kräfte	$1,7 \cdot 10^4$ N	[NAKAJIMA ET AL. 1985, S. 235]
Frequenz [Hz]	Bis $50 \cdot 10^3$	[KÖHNLEIN 2000, S. 432]
Temperatur [°C]	Curie: 0	[ELSPASS & FLEMMING 1998, S. 61]
Arten	Pb(Mg,Nb)O	[ELSPASS & FLEMMING 1998, S. 61]
Hysterese	< 1 %	[ELSPASS & FLEMMING 1998, S. 61]
Dichte [g/cm ³]	7,3	[ELSPASS & FLEMMING 1998, S. 61]
Elastizitätsmodul [GPa]	80	[KÖHNLEIN 2000, S. 432]
	120	[ELSPASS & FLEMMING 1998, S. 61]
Aktivierungsenergie	0 .. 300 V	[ELSPASS & FLEMMING 1998, S. 61]

Tabelle 2.11: Eigenschaften von elektrostriktiven Materialien

2.4.2.5 Piezoelektrische Materialien (PZM)

Bei Materialien, die einen piezoelektrischen Effekt aufweisen, führt das Anlegen einer elektrischen Spannung zu einer Kontraktion oder Expansion, je nach Richtung der elektrischen Feldstärke [KÖHNLEIN 2000, S. 432]. Die Wirkungsweise beruht auf der elektromechanischen Wechselwirkung eines ferroelektrischen Kristalls [ELSPASS & FLEMMING 1998, S. 14]. PZM können aufgrund des piezoelektrischen und inversen piezoelektrischen Effekts als Aktor und als Sensor eingesetzt werden. Sie sind in der Lage, elektrische Energie in mechanische umzuwandeln und umgekehrt. So erzeugen PZM bei mechanischer Beanspruchung eine elektrische Feldstärke (Sensoreffekt) bzw. verformen sich infolge eines angelegten elektrischen Feldes (Aktoreffekt). Es werden überwiegend keramische Piezowerkstoffe eingesetzt, die die in Tabelle 2.12 angegebenen Vergleichswerte liefern.

Parameter	Beschreibung	Quellen
Dehnung [%]	0,15	[JANOCHA 2010, S. 94]
	0,2	[BUCHT 2015, S. 4]
	0,1	[KÖHNLEIN 2000, S. 432]
	gestapelter Aktor bei 100 V: 10 μm gest. Aktor (100 mm) bei 100 V: 0,1 mm	[ELSPASS & FLEMMING 1998, S. 61] [KÖHNLEIN 2000, S. 432]
Spannungen [MPa]	bis 40	[BUCHT 2015, S. 4]
Frequenz	gestapelter Aktor: 10 μs	[KÖHNLEIN 2000, S. 432]
	0,1 Hz .. MHz	[BUCHT 2015, S. 4]
Temperatur [°C]	Arbeitstemperatur bis 400	[KÖHNLEIN 2000, S. 432]
Zyklen [10^6]	100	[BRUNNER 2015]
Energiedichte [kJ/m^3]	30	[JANOCHA 2010, S. 23]
Arten	überwiegend keramische Piezowerkstoffe	
Hysterese	10 %	[ELSPASS & FLEMMING 1998, S. 61]
Dichte [g/cm^3]	7,8 .. 7,9	[JANOCHA 2010, S. 23]
Zugfestigkeit [MPa]	Druckfestigkeit: > 600, Zugfestigkeit: > 80	[JANOCHA 2010, S. 23]
Elastizitätsmodul [GPa]	60 .. 110	[JANOCHA 2010, S. 94]
	48	[ELSPASS & FLEMMING 1998, S. 61]
Aktivierungsenergie [MV/m]	0 .. 1000 V	[ELSPASS & FLEMMING 1998, S. 61]
	> 3 MV/m	[JANOCHA 2010, S. 23]
	1 MV/m (bei 1 mm Dicke 1 kV, $\epsilon = 1 \mu\text{m}$)	[KÖHNLEIN 2000, S. 432]

Tabelle 2.12: Eigenschaften von piezoelektrischen Keramiken

2.4.2.6 Magnetostruktive Materialien (MM)

Magnetostruktive Materialien (Tabelle 2.13) verformen sich, wenn sie einem magnetischen Feld ausgesetzt werden. Die magnetischen Dipole werden durch Anlegen des Felds ausgerichtet und eine Dehnung wird durch das Eindrehen der Weiss'schen Bezirke in die Magnetisierungsrichtung erzeugt [JANOCHA 2010, S. 69]. Um gleichzeitig positive und negative Dehnungen hervorzurufen, wird das Material vormagnetisiert [ELSPASS & FLEMMING 1998, S. 63]. MM können bei kleinen Feldstärken gegen große Lasten arbeiten

[JANOCHA 2010, S. 185] und finden z. B. Einsatz im Bereich Noise and Vibration.

Parameter	Beschreibung	Quellen
Dehnung	0,2 %	[KÖHNLEIN 2000, S. 432]
	20 .. 200 µm	[JANOCHA 2007, S. 126]
	500 .. 1000 µm/m; bis 0,15 %	[JANOCHA 2010, S. 72, S. 185]
Spannungen / Kräfte	500 .. 5000 N	[JANOCHA 2007, S. 126]
Frequenz	> 10 kHz	[JANOCHA 2010, S. 72]
	µs-Bereich	[JANOCHA 2010, S. 81]
Temperatur [°C]	Curie: 380 (Terfenol-D)	[LACHEISSERIE ET AL. 2005, S. 219] [JANOCHA 2010, S. 72]
	breiter Temperatureinsatzbereich	[JANOCHA 2010, S. 81]
Zyklenanzahl	> 10 ⁸	[YAMAMOTO ET AL. 2000, S. 3639]
Energiedichte [kJ/m ³]	14 .. 25	[LACHEISSERIE ET AL. 2005, S. 219]
	10 .. 12 (Terfenol-D)	[JANOCHA 2007, S. 137]
	10 .. 25 (Terfenol-D)	[JANOCHA 2010, S. 72, 94]
Legierungsarten	Terfenol, Terfenol-D	
Hysteresebreite	2 %	[OLABI & GRUNWALD 2008]
Dichte [g/cm ³]	7,3 .. 9,25	[LACHEISSERIE ET AL. 2005, S. 219] [JANOCHA 2010, S. 72]
Bruchdehnung	hart, spröde, bruchempfl. (Terfenol-D)	[ELSPASS & FLEMMING 1998]
Zugfestigkeit [MPa]	Zugfestigkeit: 28 .. 120, Druckfestigkeit: 250 .. 700	[LACHEISSERIE ET AL. 2005, S. 219] [JANOCHA 2010, S. 72]
Elastizitätsmodul [GPa]	25 .. 55	[LACHEISSERIE ET AL. 2005, S. 219] [JANOCHA 2010, S. 72]
	100	[KÖHNLEIN 2000, S. 432]
Elektrischer Widerstand [µΩm]	0,6 .. 10 ⁴	[LACHEISSERIE ET AL. 2005, S. 219]
Aktivierungsenergie	40 kA/m	[YAMAMOTO ET AL. 2000, S. 3638]

Tabelle 2.13: Eigenschaften von magnetostriktiven Materialien

2.4.3 Zusammenfassung, Vergleich und Auswahl smarter Materialien

Im Folgenden werden die in Kapitel 2.4.2 analysierten smarten Materialien zusammengefasst (Tabelle 2.14) und ihr Einsatzpotenzial im Bereich der MMS aufgezeigt (rot: ungeeignet, gelb: bedingt geeignet, grün: geeignet). Da jede Materialklasse verschiedene Materialzusammensetzungen beinhaltet, weichen die angegebenen Werte in der Literatur teilweise voneinander ab. Dies ist auch damit zu begründen, dass im Bereich SM viel geforscht wird und die Materialien laufend verbessert werden. In der Tabelle wird daher ein Durchschnittswert bzw. ein Wertebereich angegeben. Es wird festgestellt, dass FGL nicht in allen Kategorien besser abschneiden als die anderen Materialien, aber sie weisen gleichzeitig nicht so hohe Nachteile auf. DE, PZM und EM benötigen zur Aktivierung hohe elektrische Spannungen, während FGP thermisch aktiviert werden müssen. Aufgrund der Notwendigkeit eines magnetischen Felds benötigen MM und MFGL ein hohes Zusatzgewicht und es muss beachtet werden, dass es durch das magnetische Feld zu Störungen

umliegender Funktionen kommen kann. PZM, MM und EM weisen sehr kleine Dehnungen und Stellwege auf. MFGL, FGP und DE können nur geringe Kräfte ertragen. Für den Einsatz bei MMS eignen sich daher vor allem FGL, die in Kapitel 2.5 näher betrachtet werden. Die ausschlaggebenden Parameter werden im Folgenden näher erläutert.

	FGL	MFGL	FGP	DE (A / S)	PZM	EM	MM
Temperatur [°C]	-200 .. 200	< 65	-40 .. 120	-10 .. 90 -100 .. 260	165 .. 300	> 10 .. 80	Curie: 380
Dehnung [%]	< 8	< 10	< 800 typ.: 200	< 380 < 120	0,2	0,1	0,2
Spannung [MPa]	75 .. 250	5	1 .. 3	8,2 3,0			500 .. 5000 N
Zug- & Druckfestigkeit [MPa]	< 1100	100 .. 300	< 35	k. A.	80 600	wie PZM	28 .. 120 250 .. 700
Frequenz [Hz]	0 .. 20	0 .. x*103	< 1 s .. mehrere min	< 50*103	0,1 .. 106	> 50*103	> 10*103
Lebensdauer [10 ⁶]	< 0,1	< 200	<< 1	> 10	> 103	k. A.	> 100
typ. Stellweg [mm]	5 .. 30	0,2 .. 0,4	6 .. 8	0,01 .. 22	0,1	~ 0,15	0,05 .. 0,2
Aktivierungsenergie	19,4 V/m	300 .. 500 kA/m	thermische Aktivierung	440 MV/m 350 MV/m	1 kV/mm 0 .. 1000 V	0 .. 300 V	40 kA/m

Tabelle 2.14: Vergleich der betrachteten Materialien

Der typische Stellweg von Stellteilen im Bereich der MMS reicht bei Druckbetätigung mit der Hand von 2 mm bis 40 mm. Im Bereich von Schieben, Ziehen und Schwenken, kann der Stellweg in Einzelfällen auch bis zu 400 mm betragen. Für die meisten Stellteilarten ist aber ein Stellweg von bis zu 40 mm ausreichend. [LANGE ET AL. 2005, S. 56]

Im Bereich der Anzeigen wird im Normalfall keine Kraft durch den Anwender auf das Anzeigeelement aufgebracht. Bei handbetätigten Stellteilen müssen Stellkräfte bis 120 N bzw. Stellmomente bis 50 Nm beachtet werden [DIN EN 894-3 2010, S. 12]. Für die Bedienung mit den Fingern oder mit einer Hand werden Kräfte von 10 N bis 55 N bzw. 0,5 Nm bis 20 Nm empfohlen [ebd., S. 33]. Werden die Mindestmaße für handbetätigte Stellteile [ebd., S. 33] berücksichtigt, ergeben sich Spannungen von bis zu 3,8 MPa.

Die Betätigungsfrequenz von Tasten liegt bei etwa 10 Hz [VINARICKY 2013, S. 545]. Nach DIN EN 1005-5 [2007, S. 16] wird zur Bestimmung der Referenz-Häufigkeit der Teiltätigkeiten von 30 Tätigkeiten/min ausgegangen. Das entspricht einer Frequenz von 0,5 Hz.

Bei der Temperatur muss vor allem die Umgebungstemperatur, aber auch die ertragbare Temperatur durch den Nutzer berücksichtigt werden. Im Fahrzeug kann es beispielsweise bei einer Umgebungstemperatur von etwa 30 °C zu einer Erhitzung des Innenraums auf ca. 68 °C kommen [GRUNDSTEIN ET AL. 2009]. Der Behaglichkeitsbereich der

Temperatur liegt bei leichter Arbeit bei 19 - 23 °C und bei 14 - 16 °C bei schwerer Arbeit. Zumutbar sind höchstens 35 °C [LANGE ET AL. 2005, S.104]. Bei kurzzeitigen Berührungen (Kontaktdauer zw. 0,5 und 10 s) [DIN EN ISO 13732-1 2008, S. 10] liegt die Verbrennungsschwelle bei Metall bei 73 - 59 °C [ebd., S. 11], bei beschichteten Metallen erhöhen sich die Werte je nach Berührungsdauer und Beschichtungsart um bis zu 35 °C [ebd., S. 12f]. Bei keramischen, glas- und steinartigen Materialien liegt die Verbrennungsschwelle bei 90 - 70 °C [ebd., S. 14] und bei Kunststoffen bei 100 - 76 °C [ebd., S. 15]. Bei höherer Kontaktdauer (1 min über 10 min bis 8 h) sinkt der Wert auf 60 bis 43 °C [ebd., S. 17].

Elektrische Spannung ab 50 V Wechselspannung oder 120 V Gleichspannungen sind für den Menschen lebensgefährlich [STIEPER & FÖRST 2012, S. 14].

2.5 Formgedächtnistechnik bei FGL

Das erste Auftreten des Formgedächtniseffekts (FGE) beschrieben CHANG & READ [1951] 1951 an Au-Cd-Legierung. 1963 wurde der Effekt von BUEHLER ET AL. [1963] an TiNi analysiert. Inzwischen ist der FGE an einer Vielzahl von Legierungssystemen bekannt, wobei Nickel-Titan- und einige Kupfer-Legierungen technisch am bedeutsamsten sind. Damit ist der FGE aktuell seit knapp 70 Jahren in Forschung und Anwendung vertreten. NiTi-Legierungen werden am häufigsten eingesetzt, da sie den größten Stellweg der FGL aufweisen, unempfindlich gegen hohe Temperaturen sowie mechanische Spannungen und biokompatibel sind. Die temperaturabhängige Gestaltänderung sowie die erheblichen Kräfte machen den Effekt für viele technische Anwendungen nutzbar. Der FGE beschreibt die Fähigkeit eines Materials, sich nach starker Deformation durch Erwärmung oder Rücknahme der Belastung an seine ursprüngliche Gestalt zu erinnern. Dieser Formänderung liegen bei FG-Elementen Phasentransformationen zugrunde: Abhängig von der Temperatur bzw. der mechanischen Spannung befindet sich das FG-Element in der martensitischen Phase, der austenitischen Phase oder in einem Phasengemisch.

2.5.1 Phasenumwandlung

In der Hochtemperaturphase (Austenit) liegt die Struktur kubisch-raumzentriert vor [STÖCKEL 1988, S. 32] und wird beim Abkühlen durch koordinierte Atombewegungen ohne Gitterverformungen in eine verzwilligte Martensitstruktur umgewandelt [WAYMAN & DUE-RIG 1990, S. 5]. Diese Struktur zeichnet sich durch geringe benötigte Energie zur Verformung und hohe Beweglichkeit aus [ebd., S. 6]. Dadurch ist das Material in der martensitischen Phase leicht verformbar. Die Verformung findet durch die Verschiebung der Zwillingsgrenzen statt. Diese Gestaltänderung bleibt erhalten, bis das Material erwärmt wird.

Beim Überschreiten der Umwandlungstemperatur wird die Kristallstruktur der Hochtemperaturphase wieder eingenommen und die ursprüngliche Gestalt wiederhergestellt.

Bei der folgenden Abkühlung findet die Umwandlung zwischen der Hochtemperaturphase (Austenit) und Niedertemperaturphase (Martensit) statt. Diese Umwandlung erfolgt diffusionslos durch Scherbewegung [STÖCKEL 1988, S. 32], d. h. frei von Drift und Wanderung der Atome (Atome bleiben auf ihren Plätzen). Aufgrund dessen und durch das damit verbundene Verzwillingen der Gitterstruktur (Klappvorgänge) findet keine Änderung der Gestalt statt. Solange durch die Verformung in der martensitischen Phase keine Versetzungen im Gefüge verursacht werden, kann die Legierung bei Erwärmung die ursprüngliche Gestalt wieder einnehmen. Bei NiTi-Legierungen liegt diese Grenze bei 8 % Dehnung (vgl. Kapitel 2.4.2.1). Darüber hinaus hat eine Verformung durch die entstehenden Versetzungen im Gefüge eine irreversible Änderung der NiTi-Legierung zur Folge.

Abbildung 2.6 zeigt die beschriebene Gitterstruktur während der Temperatur- bzw. Spannungszunahme. Deutlich erkennbar ist das Martensitplateau. Das Verfestigungsverhalten des Martensits macht die Gestaltänderung erst möglich: Das Martensitplateau kennzeichnet einen Bereich, in dem das Verschieben der Zwillingsgrenzen ermöglicht wird, da die zur Verschiebung notwendige Spannung deutlich geringer ist als die für die plastischen Verformungen [STÖCKEL 1988, S. 35], [WAYMAN & DUERIG 1990, S. 9 - 11]. Durch die höhere Festigkeit der FGL in der Hochtemperaturphase besteht nur beim Erwärmen die Möglichkeit, gegen eine äußere Kraft zu arbeiten.

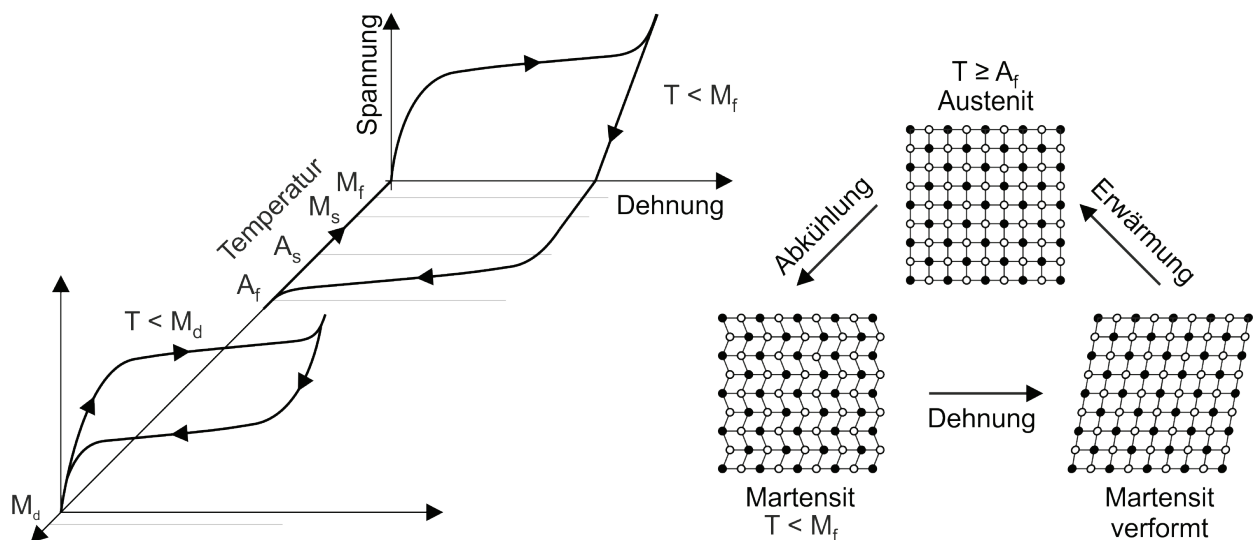


Abbildung 2.6: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von FGL und Darstellung des FG-Effekts angelehnt an [WAYMAN & DUERIG 1990, S. 11, 19]

Die Phasentransformation findet in richtungsabhängigen Intervallen statt, wodurch sie ein ausgeprägtes Hystereseverhalten aufweist [WAYMAN & DUERIG 1990, S. 4, 9]. Das bedeu-

tet, die Umwandlung Austenit zu Martensit und die Rückumwandlung Martensit zu Austenit finden bei unterschiedlichen Temperaturen statt, woraus sich die dargestellte Hysterese ergibt. Der Beginn der austenitischen Umwandlung wird als Austenit-Start-Temperatur A_s bezeichnet. Die vollständige Umwandlung findet bei der Austenit-Finish-Temperatur A_f statt. Die Rücktransformation beginnt bei der Martensit-Start-Temperatur M_s . Die vollständige Rücktransformation ist bei der Martensit-Finish-Temperatur M_f erreicht.

2.5.2 Formgedächtniseffekte (FGE)

Der Formgedächtniseffekt beschreibt die Änderung der Steifigkeit und Form in Abhängigkeit von der Temperatur oder der mechanischen Spannung. Das Auftreten dieses Effekts ist in verschiedenen Arten möglich: als Einwegeffekt, Zweiwegeffekt oder Pseudoelastizität. Im Folgenden werden die Effekte beschrieben. Für eine ausführliche Untersuchung wird auf [STÖCKEL ET AL. 1988], [SABURI 1998], [LANGBEIN & CZECHOWICZ 2013] verwiesen.

2.5.2.1 Einwegeffekt

Im kalten Zustand befindet sich das Material zunächst unverformt und unbelastet im martensitischen Gefüge. Wird ein FG-Element im martensitischen Zustand verformt (unterhalb des Dehnungsbereichs des Martensitplateaus), dann ergibt sich eine reversible Martensitumformung durch Verschieben der Zwillingsgrenzen [WAYMAN & DUERIG 1990, S. 5] (\triangleq Entzwillingen = Gleichrichtung der Orientierung der Zwillinge). So sind plastische reversible Verformungen bis zu 8 % möglich (vgl. Kapitel 2.4.2.1). Bei der anschließenden Erwärmung findet die Umwandlung in der Hochtemperaturphase, d. h. in den austenitischen Zustand, statt: Die ursprüngliche Form des FG-Elements stellt sich wieder ein. Durch die Transformation kann bei angelegter Kraft Arbeit verrichtet werden [JUST 2001, S. 13]. Kühlt das Material im Folgenden wieder unter die Umwandlungstemperatur ab, ohne dass eine Kraftereinwirkung stattfindet, dann ergibt sich keine weitere Formänderung (Rücktransformation in den martensitischen Zustand durch Zwillingsbildung). Dieser Vorgang wird als Einwegeffekt bezeichnet [STÖCKEL 1988, S. 38].

Der Einwegeffekt kann wiederholt werden, indem das FG-Element im erkalteten Zustand (Martensitphase) erneut verformt wird. Dies kann durch das Aufbringen einer äußeren Kraft (konstante Last oder Rückstellfeder) auch zyklisch erfolgen. Die Kraft muss so ausgelegt werden, dass die FGL im martensitischen Zustand gedehnt wird, aber im austenitischen Zustand keine Längung erfolgt. Der zyklische Einwegeffekt wird häufig im Bereich der Stellelemente eingesetzt [LANGBEIN & CZECHOWICZ 2013, S. 6] und hat daher für den Einsatz in der Mensch-Maschine-Schnittstelle eine große Bedeutung.

2.5.2.2 Zweiwegeeffekt

Die Begrifflichkeit des Zweiwegeeffekts ist in der Literatur nicht einheitlich geregelt. Teilweise wird der zyklische Einwegeffekt als Zweiwegeeffekt bezeichnet. Der wahre Zweiwegeeffekt [STÖCKEL 1988, S. 41] wird häufig als Zweiwegverhalten [ebd., S. 61], äußerer Zweiwegeeffekt [STORK 1997, S. 14] oder intrinsischer Zweiwegeeffekt [ebd., S. 14] benannt. Beim wahren Zweiwegeeffekt [STÖCKEL 1988, S. 41] erinnert sich das FG-Element an zwei Formen: eine aus der Hoch- und eine aus der Niedertemperaturphase. Die Form der Niedertemperaturphase muss dem Werkstoff eintrainiert werden. Dies findet mittels thermomechanischer Behandlung statt, um eine Vorzugsrichtung bei der Zwillingsbildung zu erzeugen. Auf diese Weise bilden sich Mikrospannungen im Austenit [VAN HUMBEECK ET AL. 1991, S. 151], die zu bestimmten Martensitvarianten (Vorzugsformen) führen. Es ist daher keine Rückstellkraft nötig, um den Effekt zyklisch zu wiederholen, aber die Änderung ist kleiner [TAUTZENBERGER 1988, S. 70] als beim Einwegeffekt. Zusätzlich kann bei der Umwandlung keine nennenswerte mechanische Arbeit geleistet werden [LANGBEIN & CZECHOWICZ 2013, S. 6], wodurch der Effekt technisch kaum Einsatz findet.

2.5.2.3 Pseudoelastizität

Pseudoelastizität oder Superelastizität beschreibt das Verhalten von FGL, wenn die Gefügeumwandlung nicht durch Temperatur, sondern durch mechanische Spannung erzeugt wird. Die Phasentransformation von Austenit zu Martensit findet demnach durch mechanische Spannung oberhalb der Temperatur A_f , aber unterhalb der Temperatur M_d statt (vgl. Abbildung 2.6). Die anliegende Spannung führt zu einem Umklappen der Gitterstruktur in eine entzwillingte martensitische Struktur [MELTON 1990, S. 24], auch spannungsinduzierter Martensit [WAYMAN & DUERIG 1990, S. 14] genannt. Die so entstehenden Martensitvarianten führen beispielsweise bei einer Beanspruchung durch Zug zu einer Verlängerung des FG-Elements [STÖCKEL 1988, S. 38]. Nimmt die mechanische Spannung wieder ab, wandelt sich das FG-Element zurück in die austenitische Struktur.

2.5.3 Integration der Formgedächtnistechnik in ein System

Beim Einsatz der FG-Technik in einem System entstehen ASS. Bei der Anwendung der FGE im System muss beachtet werden, dass äußere Kräfte auf das FG-Element einwirken. Dies kann durch die umgebende Systemstruktur erfolgen, oder durch eine zusätzliche äußere Kraft. Diese erfolgt bei der MMS z. B. durch das Heben einer Last oder eine Betätigung durch einen Nutzer. Die zusätzliche Beaufschlagung mit einer Spannung führt zu einer Erhöhung der A_s -Temperatur um etwa 10 bis 20 K pro 100 N/mm² [TAUTZENBER-

GER 1988, S. 76]. Bei einem für Stellelemente relevanten Spannungsbereich bis 300 N/mm^2 (vgl. Kapitel 2.4.3) ergibt sich damit eine Erhöhung um bis zu 60 K. Werden FGL in ein System integriert, so sind zusätzlich zu den beschriebenen Effekten und der Legierungsauswahl weitere Eigenschaften, wie:

- Aktivierung und Deaktivierung des FG-Elements (Umgebungstemperatur, Heizen über Heizdraht, elektrische Spannung, umgebendes Medium, Kühlelemente),
- Rückstellung bei der Nutzung des Einwegeffekts mit zyklischer Beanspruchung (zusätzliche Last, Federelement, über die Struktur des umgebenden Elements),
- Einbindung und Integration sowie Anbindung des FG-Elements in bzw. an ein umgebendes Element (Auswahl des passenden Materials, Lage des FG-Elements im umgebenden Element, Führung, Anbindung an Umgebung),
- Belastung des Systems (Zug, Druck, Biegung, Torsion, Kraft durch umgebendes Element, Kraft durch Bedienung),
- Bewegung des Systems (translatorisch, rotatorisch, stufenförmig, kontinuierlich) und
- Positionskontrolle (Regelung, mechanisches Halten, Zwischenzustände)

zu beachten. Diese werden in den folgenden Kapiteln untersucht. Dazu ist zunächst ein einheitliches Verständnis des Begriffs Adaptivität notwendig, um ASS zu definieren.

2.6 Anpassungsfähigkeit - Adaption - Adaptivität

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den Stand der Forschung im Bereich der ASS. Dazu wird der Begriff adaptiv erläutert und eine Abgrenzung zu passiven Strukturen getroffen. Im Folgenden werden Definitionen und Beschreibungen, die sich auf ASS beziehen, untersucht. Aufgrund der hohen Komplexität und der stark variierenden Bezeichnungen wird eine Literaturrecherche durchgeführt, um eine eindeutige Definition abzuleiten. Darauf aufbauend werden Anwendungsmöglichkeiten von ASS aufgezeigt.

In einer Zeit, in der Ressourcenschonung und Nachhaltigkeit aus dem Alltag nicht mehr wegzudenken sind, gewinnen Wissenschaften an Bedeutung, die diese Entwicklungen fördern und unterstützen können. Dazu zählen beispielsweise Leichtbau, Bionik oder smarte bzw. intelligente Technologien. In der Automobil- und Luft- & Raumfahrtbranche ist Leichtbau längst Standard, aber auch im Maschinen- und Anlagenbau nimmt die Einsparung von Gewicht und damit Energie und Material an Bedeutung zu [BEXTEN 2017].

Einen fortwährenden Trend stellen smarte Technologien dar, d. h. technische Systeme die zunehmend mit Anpassungsfähigkeit und Intelligenz ausgestattet sind. Für den Begriff der Anpassungsfähigkeit wird häufig synonym von Adaption oder Adaptivität gesprochen. All-

gemein bedeutet adaptiv auf Adaptation beruhend, sich anpassend, anpassungsfähig, wobei Adaption mit Anpassung gleichgesetzt und vor allem in der Biologie oder Soziologie eingesetzt wird [DUDEN 2020]. In der Biologie wird darunter die Anpassung des Organismus an die Umweltbedingungen verstanden, in der Soziologie die Anpassung des Menschen an die soziale Umwelt [ebd.]. Durch das Anpassen ist es möglich, die Form oder Eigenschaft aktiv an den jeweiligen Anforderungen auszurichten. In der Natur ist diese Adaption an Umgebungsbedingungen automatisch: Natürliche Systeme wehren Angriffe ab, können sich selbst heilen oder reagieren auf unterschiedliche Gegebenheiten. Dieses Wissen um die Anpassung aus der Natur wird im Bereich der Bionik erforscht. Der Begriff setzt sich aus Biologie und Technik zusammen und beschreibt die Wissenschaft, technische Probleme nach dem Vorbild biologischer Funktionen zu lösen [DUDEN 2020] und von der Natur zu lernen, um die Technik zu verbessern [ROSSMANN & TROPEA 2005, S. vii]. Die Erkenntnisse werden in neue Konstruktionsprinzipien umgesetzt. Diese Möglichkeit, bionische Systeme umzusetzen, kann durch die Adaptronik - Kunstwort aus adaptiv und Elektronik [FRIEDRICH ET AL. 2008, S. 339] - gegeben werden. Sie stellt eine interdisziplinäre Schlüsseltechnologie zur Umsetzung adaptiver Struktursysteme dar [MONNER 2020] und beschreibt den „Prozess zur Generierung intelligenter Strukturen auf der Basis multifunktionaler Elemente“ [NEUMANN 1995, S. 11]. Der Begriff soll damit alle aktiven, adaptiven, intelligenten und smarten Strukturen und Systeme in sich vereinigen. Im Gegensatz zur Mechatronik, bei der sich Aktoren und Sensoren außerhalb der passiven Struktur befinden, werden bei der Adaptronik Aktoren und Sensoren in die passive Struktur integriert (Abbildung 2.7) [BEIN ET AL. 2005, S. 19].

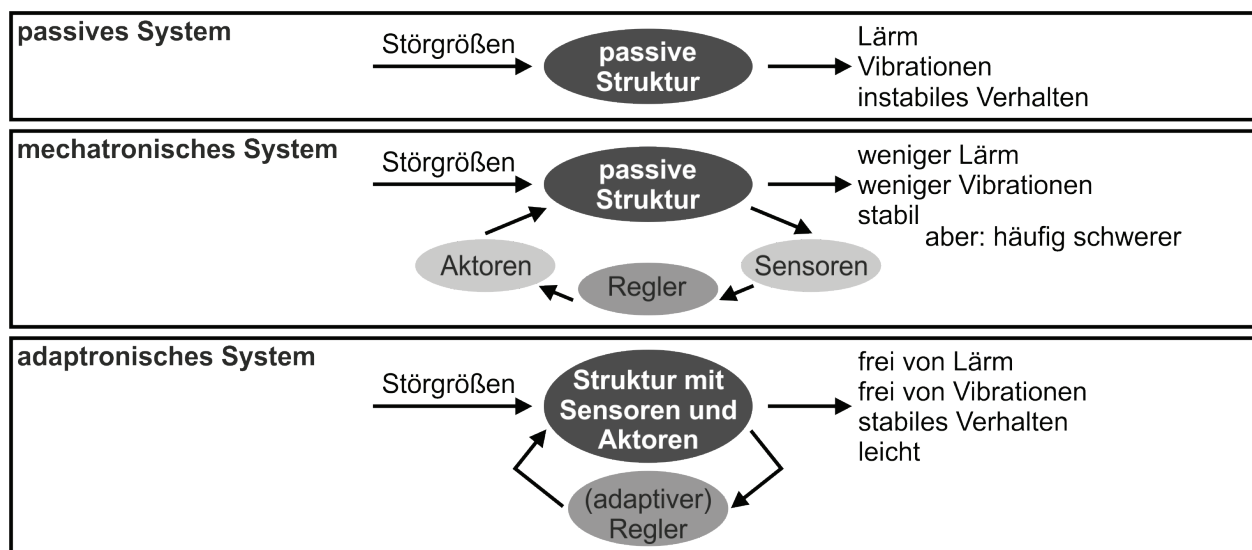


Abbildung 2.7: Abgrenzung passive, mechatronische und adaptronische Systeme nach [BEIN ET AL. 2005, S. 19]

2.6.1 Passive und adaptive Strukturen und Systeme

Viele Produkte in der Umwelt des Menschen sind passiv. Sie benötigen keine Energiezufuhr und reagieren im Gegensatz zur Natur nicht auf umweltbedingte Veränderungen. Allerdings ist es naheliegend Produkte zu konzipieren, die sich an äußere Randbedingungen oder auch an den Nutzer aktiv anpassen. Die Verstellung kann durch Aktoren erfolgen und wird durch einen Steuerungs-Regelungsprozess aktiviert, der seine Eingangssignale aus Sensoren bekommt. Im Fall von adaptiven Strukturen können ein oder mehrere der beschriebenen Vorgänge von nur einem Bauteil (z. B. smartes Material) übernommen werden. Die Gestalt von passiven Strukturen wird durch bekannte Einflüsse bestimmt, wohingegen adaptive Strukturen die Möglichkeit besitzen, ihre Form auch an bei der Auslegung unbekannte Einflüsse anzupassen [PRITSCHOW 1998, S. 375]. Beim Auftreten von schwer vorhersehbaren Umwelteinflüssen ist der Aufwand eine passive Struktur umzusetzen unverhältnismäßig hoch [ELSPASS & FLEMMING 1998, S. 1]. Ein weiterer Nachteil von passiven Strukturen ist, dass ihre Leistungsfähigkeit beschränkt ist [ebd., S. 2]. Aber auch passive Strukturen können sich verformen, beispielsweise unter Eigengewicht oder äußeren Lasten. Dies ist im Allgemeinen unerwünscht, lässt sich aber in den meisten Fällen nur durch hohen Aufwand verhindern. Es ist zusätzlich möglich, dass sich Materialparameter während der Einsatzzeit verändern oder Deformationen durch Krieeffekte im Werkstoff auftreten [ELSPASS & FLEMMING 1998, S. 2]. Adaptive Strukturen können durch Regelkonzepte im Laufe ihres Einsatzes angepasst werden, bei passiven Strukturen ist dies nicht möglich [ebd., S. 2].

Innerhalb des Konstruktionsprozesses bildet die Analyse, Auslegung, Berechnung und Optimierung passiver, mechanischer Strukturen eine wichtige Grundlage. Die Mechanik ist die „Wissenschaft von der Bewegung der Körper unter dem Einfluss äußerer Kräfte oder Wechselwirkungen“ [DUDEN 2020]. Sie wird unterteilt in die Kinematik (Bewegung von Körpern ohne Berücksichtigung der Kräfte als Ursache oder Wirkung) und die Dynamik (Erweiterung der Kinematik um Kräfte), wobei sich die Dynamik weiter in die Statik (Kräfte im Gleichgewicht) und die Kinetik (Bewegung unter Krafteinwirkung) aufgliedert [GROSS ET AL. 2019, S. XIV]. Die Elastostatik ist ein Teilgebiet der Statik und beschreibt das Verhalten von Festkörpern unter Belastung [MAHNKEN 2015, S. 1], also die Statik elastisch deformierbarer Körper [GROSS ET AL. 2017, S. XII]. Für adaptive Strukturen sind oftmals große Verformungen zu berechnen. Dadurch wird die Theorie der 3. Ordnung der Elastostatik interessant. Bei der Theorie 3. Ordnung (Theorie großer Verformungen oder geometrisch nichtlineare Theorie) werden die Gleichgewichtsbedingungen am verform-

ten System aufgestellt [MAHNKEN 2015, S. 97]. Bei großen Verformungen werden alle Gleichungen nichtlinear und sind nur in Sonderfällen analytisch lösbar [GROSS ET AL. 2018, S. 285]. Wichtige Methoden und Berechnungsverfahren werden in [LÄPPLE 2006], [SCHUMACHER 2013] und den genannten Quellen im Bereich der Mechanik gegeben.

2.6.2 Definition adaptiver Strukturen und Systeme

Die Verbreitung multifunktionaler Materialsysteme mit integrierten sensorischen und aktorischen Funktionen sowie neuen Regelungskonzepten [PRITSCHOW ET AL. 2000, S. 775] und das Zusammenführen von mechanischer Struktur, Regelung und aktiven Elementen hat dazu geführt, ASS zu ermöglichen, die ihre Eigenschaften aufgrund externer Einflüsse anpassen können. Sie unterscheiden sich von traditionellen mechanischen Elementen durch ihre Ausstattung mit aktiven und sensorischen Komponenten und einer intelligenten Datenverarbeitungseinheit [KASPER 1998, S. 145]. Sie antworten selbstständig auf externe Einflüsse, überwachen Parameter und wechseln zu unterschiedlichen Regelungsstrategien. ASS reagieren auf äußere Einflüsse (z. B. Wind, Temperatur) und sind durch eine integrierte Struktur geprägt, in der Aktoren und Sensoren Teil der Tragwerksstruktur sind [WEBER 1998, S. 189]. Die Basis bilden dabei smarte Materialien. Durch die hohe Integration ist es möglich, neue Funktionen zu realisieren.

Das Zusammenwirken der unterschiedlichen Elemente und Technologien erfordert eine interdisziplinäre Entwicklung und ein erweitertes Know-how. Damit ergeben sich neue Anforderungen an den Entwicklungsprozess dieser interdisziplinären Systeme. Um eine akzeptable Entwicklungszeit zu gewährleisten, gewinnt die Simulation von ASS an Bedeutung. Diese führt zu einer reduzierten Entwicklungszeit und erlaubt es, virtuell Experimente durchzuführen, die sonst zu teuer, schwierig oder unsicher wären. Das statische und dynamische Verhalten kann bereits in einer frühen Entwicklungsphase untersucht werden und die Konzeptphase beeinflussen. Des Weiteren können Optimierungen des Gesamtsystems effizienter durchgeführt werden [KASPER 1998, S. 144].

Eine umfangreiche Literaturrecherche im Bereich von ASS hat ergeben, dass die eingesetzten Bezeichnungen nicht eindeutig bestimmt und abgegrenzt sind. Es wird daher zunächst ein Überblick über verschiedene Definitionen bezüglich zusammengehöriger bzw. synonym verwendeter Begriffe gegeben, die im Allgemeinen eine Struktur oder ein System beschreiben, das sich an äußere Bedingungen anpasst und multifunktionale Elemente innerhalb der Struktur aufweist. Seit der ersten Hälfte der 80er Jahre haben Forscher Struktursysteme, auch smarte, intelligente oder adaptive Systeme genannt, unter-

sucht [BREITBACH ET AL. 2000]. Im Herbst 1991 wurde in Deutschland der Begriff Adaptronik von Dr. Dieter Neumann definiert und später durch das VDI-Technologiezentrum in Düsseldorf innerhalb eines Workshops mit 14 Experten beschrieben und bestätigt [NEUMANN 2017]. Die Recherche zeigt, dass die identifizierten Begriffe eine Struktur bzw. ein System beschreiben, das an veränderliche äußere Bedingungen anpassbar ist, indem multifunktionale Elemente verwendet werden. Trotzdem verwenden einige Autoren unterschiedliche Begriffe synonym, um dieselbe Struktur bzw. dasselbe System zu beschreiben, wohingegen andere eine klare Abgrenzung zwischen den einzelnen Begriffen ziehen.

Eine der ersten, die diese Begriffe voneinander abgrenzen sind WADA ET AL. [1990] (Abbildung 2.8). Sie schlagen einen Entwurf mit adaptiven Strukturen (A), die Aktoren als Basis beinhalten und sensorischen Strukturen (B), die nur Sensoren besitzen, vor. Diese Bereiche bilden die Grundlage für weitere Strukturen. Der Schnittbereich sind geregelte Strukturen (C), die Sensoren und Aktoren umfassen. Innerhalb befinden sich die aktiven Strukturen (D), deren Sensoren und Aktoren in die Struktur integriert sind und eine funktionale Aufgabe erfüllen. Die Mitte bilden die intelligenten Strukturen (E), die zusätzlich eine integrierte Regelung und Elektronik und damit ein kognitives Element enthalten.

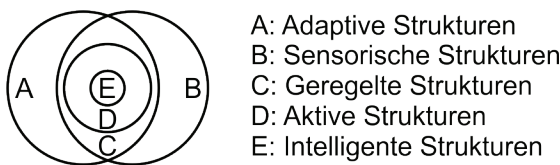


Abbildung 2.8: Vorgeschlagener Entwurf nach WADA ET AL. [1990]

BOLLER [2000] folgt WADA ET AL. [1990] mit seiner Klassifikation smarter Werkstoffe und Strukturen. Das unterste Level bilden passive Werkstoffe und Strukturen, gefolgt von sensorischen, aktiven, adaptiven und intelligenten. Die Unterscheidung wird ebenfalls durch den Einsatz von Sensoren, Aktoren, Regelung und Prozessor getroffen (Tabelle 2.15).

	Sensor	Aktor	Regelung	Prozessor
Intelligente Werkstoffe und Strukturen	x	x	x	x
Adaptive Werkstoffe und Strukturen	x	x	x	
Aktive Werkstoffe und Strukturen	x	x		
Sensorische Werkstoffe und Strukturen	x			
Passive Werkstoffe und Strukturen				

} smart bzw. Adaptronik

Tabelle 2.15: Zuordnung smarte Werkstoffe & Strukturen nach [BOLLER 2000, S. 556]

FRIEDRICH ET AL. [2008] beschreiben passive, aktive, intelligente sowie symbiotische Systeme. Aktive Systeme besitzen die Fähigkeit, über Sensoren, Aktoren und Regelsystemen auf äußere Einflüsse zu reagieren. Intelligente Systeme erweitern die aktiven, indem die sensorischen, aktorischen und / oder regelungstechnischen Fähigkeiten im Werkstoff

enthalten sind. Symbiotische Systeme enthalten zusätzlich die Eigenschaft der Selbstheilung oder Regeneration. [FRIEDRICH ET AL. 2008, S. 344]

NEUMANN [1995] definiert Adaptronik als einen Prozess zur Generierung intelligenter Strukturen, die auf multifunktionalen Elementen basieren. Eine intelligente Struktur ist dann intelligent, wenn alle Elemente eines Regelkreises enthalten sind und wenigstens ein Element multifunktional verwendet wird. Dieses Element ist dadurch gekennzeichnet, dass es aus mindestens zwei funktionalen Modulen (Sensoren, Aktoren, Reglern oder interessante Materialien bzw. Materialeigenschaften) besteht. [NEUMANN 1995, S. 11]

BEIN ET AL. [2005, S. 19] beschreiben mit dem Begriff Adaptronik alle aktiven, adaptiven, intelligenten und smarten Strukturen und Systeme. Dabei werden Aktoren und Sensoren in die passive Struktur integriert.

CRAWLEY [1994] verwendet den Begriff intelligente Strukturen, um Strukturen zu beschreiben, die Aktoren und Sensoren beinhalten, die stark in die Struktur integriert sind und strukturelle Funktionen aufweisen sowie hochintegrierte Regelungssysteme, Signalverarbeitung und Leistungsverstärkungselektronik. Diese Elemente sind in die Struktur integriert, um den Zustand oder die Charakteristik zu beeinflussen.

MIURA & FURUYA [1988] definieren eine adaptive Struktur als eine Struktur, die ihre Geometrie sowie ihre physikalischen Eigenschaften gezielt verändern kann. Um eine adaptive Struktur zu realisieren, muss diese mit einem Mechanismus ausgestattet sein, der es ermöglicht, den Aufbau anzupassen. [MIURA & FURUYA 1988, S. 995], [MIURA 1992, S. 60]

SOBEK ET AL. [2000, S. 544] beschreiben adaptive Systeme als Systeme, die eine Veränderung mittels selbstgesteuerter oder selbstorganisierter Vorgänge aktiv hervorrufen. Ein wichtiger Bestandteil adaptiver Systeme ist eine Struktur, die mit ihrer Umgebung in Wechselwirkung steht. Die Anpassung erfolgt über Aktoren, Sensoren und Steuerungsregelungsprozesse. Im Idealfall verschmelzen die Elemente mit der Struktur.

JANOCHA [2007, S. V] beschreibt Adaptronik als das Feld, das auch unter smarte Materialien, smarte Strukturen oder intelligente Strukturen bekannt ist. Giurgiutiu [JANOCHA 2007, S. 9] setzt adaptronische Strukturen mit smarten Materialien oder intelligenten Strukturen gleich. Zum einen dienen adaptronische Strukturen der Integration von Aktoren, Sensoren und Regelsystemen mittels einer strukturellen Komponente, zum anderen stellen sie ein Materialsystem dar, das Intelligenz besitzt und lebensechte Eigenschaften in eine Mikromaterialstruktur integriert, um die Gesamtmasse und den Energieverbrauch zu reduzieren und adaptive Funktionalität zu gewährleisten.

Adaptive Systeme sind nach SCHLICK ET AL. [2010, S. 1027] Systeme „die sich den zeitlich variablen Eigenschaften unterschiedlicher Benutzer anpassen“ und dadurch eine geringere mentale Beanspruchung und ein zusammenhängendes Systemverhalten erzielen.

In einer Studie [HEIN ET AL. 2017] durch die Verfasserin der Arbeit wurde ein Zusammenhang zwischen den verwendeten Begriffen untersucht und gezeigt, wie die Begrifflichkeiten in der Literatur verwendet werden und welche gleichbedeutend eingesetzt werden. Es zeigt sich, dass Adaptronik, adaptive Systeme und smarte Strukturen untereinander und mit ASS gleichgesetzt werden.

2.6.3 Beispiele und Anwendungsmöglichkeiten

Es existiert bereits eine Vielzahl an speziellen Anwendungen von adaptiven Strukturen und Systemen. Klassische Beispiele sind adaptive Tragflächen von Flugzeugen mit anpassbaren Vorder- und Hinterkanten, adaptive Manipulatoren und Mikrogreifer sowie adaptive Tragwerkelemente zur Schwingungsreduktion.

In der Luft- und Raumfahrt werden adaptive Strukturen zur Gestaltkontrolle [VOS 2009] eingesetzt. Es gibt Untersuchungen zum Einsatz von FGP [LIU ET AL. 2014], Smart Wing und adaptive Flugzeugtragflächen [HÜBLER 2015], adaptiver Tragflügel und adaptives Winglet [MUSOLFF 2005] (Abbildung 2.9), adaptive Störklappen [BEIN ET AL. 1998] und adaptive Chevrons [MABE ET AL. 2006]. Abgeleitet von adaptiven Flügelkonzepten beschäftigen sich [REDINIOTIS ET AL. 1997] mit der Gestaltkontrolle der Tragflächen von Unterwasserfahrzeugen.

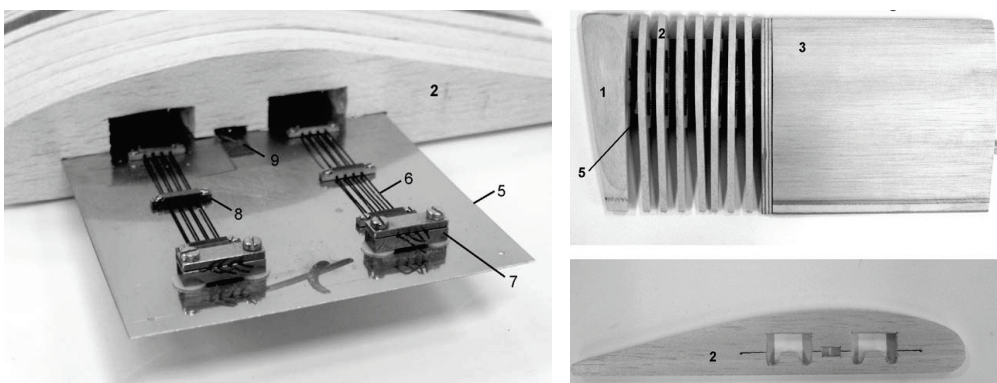


Abbildung 2.9: Adaptives Winglet mit FGL [MUSOLFF 2005, S. 93f]

Im Bauwesen werden adaptive Strukturen vor allem zur Geräusch-, Vibrations- und Schwingungsreduzierung [KAAL 2014], [BAZ & CHEN 1995], [SRINIVASAN ET AL. 1991] sowie zum Entwurf adaptiver Tragstrukturen [TEUFFEL 2004] oder wandelbarer, adaptiver Tragwerke [SOBEK ET AL. 2000] eingesetzt. WEILANDT [2007] gibt einen Überblick über Anwendungen und Entwicklungen adaptiver Strukturen im Bauwesen: Health-Monitoring, Schwin-

gungsreduzierung, aktive Tragwerkselemente, Verformungskontrolle von Schrägseilbrücken oder abgespannten Fachwerkmasten mittels Aktivierung der Seile. Weitere Beispiele sind adaptive multistabile Verbundwerkstoffe [HUFENBACH ET AL. 2002] und adaptive Gelenke [WANG ET AL. 2020] (Abbildung 2.10). Einen Überblick über Formgestaltung und Analyse von adaptiven Strukturen in der Architektur gibt beispielsweise KORMANÍKOVÁ [2017].

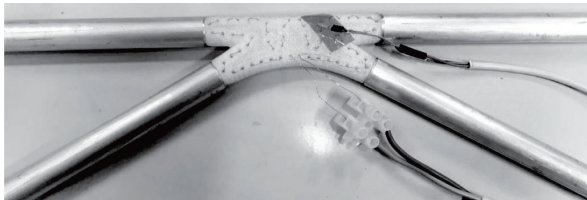


Abbildung 2.10: Gelenk aus SMP [WANG ET AL. 2020, S. 2]

Im Bereich der Mikro- und Aktortechnik und im Automobilbau werden adaptive Strukturen als Aktorsysteme [KEHL 1999], Mikrogreifer [JUST 2001] (Abbildung 2.11), Formgedächtnisantriebe zum Einsatz in sicherheitstechnischen Systemen in Kraftfahrzeugen [ZIMMERMAN ET AL. 2009], [GHEORGHITA ET AL. 2014] und [STRITTMATTER & GÜMPEL 2011], haptische Informationssysteme [CZECHOWICZ 2012] oder haptische Interfaces [CZECHOWICZ 2019], [CZECHOWICZ ET AL. 2016], [CARPI ET AL. 2008] sowie adaptronische Systeme für automobiler Anwendungen [MELZ ET AL. 2006] eingesetzt. Weitere Beispiele für adaptive Strukturen im Fahrzeug finden sich bei CZECHOWICZ [2012, S. 32 - 37, 105] und PAGEL [2012]. MELCHER ET AL. [1998] geben einen Überblick über Adaptronik im Automobilbau.

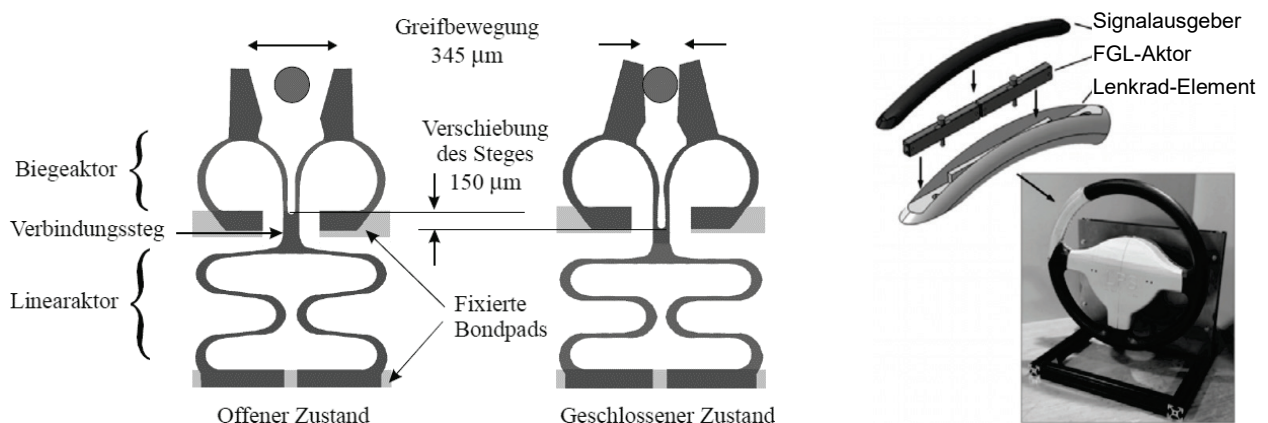


Abbildung 2.11: links: FGL-Mikrogreifer [JUST 2001, S. 55], rechts: FGL-Aktor im Lenkrad [CZECHOWICZ 2019]

Einen allgemeinen Überblick über den Einsatz von adaptiven Strukturen im Ingenieurwesen geben WAGG ET AL. [2007], z. B. im Bereich Structural Health Monitoring, Vibrationskontrolle, adaptive Tragflächen, adaptive aeroelastische Strukturen und adaptive Strukturen aus dem Bereich der Luft- und Raumfahrt sowie PILATE ET AL. [2016] beim Einsatz von formveränderbaren Polymeren, SRINIVASAN & MCFARLAND [2001] im Bereich smarte

Strukturen - Analyse und Design, FLEMMING & ROTH [2003, S. 439] bei aktiven Funktionsbauweisen oder HANSELKA [1997] im Bereich Leichtbaustrukturen. In der Medizintechnik werden ebenfalls adaptive Strukturen eingesetzt, vgl. [DUERIG 2002] und [UNDISZ 2009].

Anhand der Anwendungen kann abgeleitet werden, dass, bezogen auf das Gesamtprodukt, ASS das Ziel haben, die Eigenschaften des Gesamtsystems durch die Anpassungsfähigkeit zu verbessern. Der Einsatz multifunktionaler Materialien mit besonderen Charakteristika, trägt zum Erreichen eines im hohen Maße funktionsintegrierten Systems bei. Dadurch ist es möglich, das Gesamtsystem in vielen Bereichen zu optimieren. Beispiele dafür sind: die Erhöhung des Leichtbaupotenzials, die Steigerung der Sicherheit, die Optimierung der Lebensdauer, die Erzielung einer höheren Präzision, die Erhöhung von Ergonomie und Komfort, die Wartungsreduktion, die Funktionserweiterung, das Schaffen neuer Designmöglichkeiten und die Nutzerzentrierung. Speziell im Bereich des Technischen Designs, der Mensch-Maschine-Schnittstelle und damit der Mensch-Technik-Optimierung ergibt sich durch die Ausstattung der Produkte mit Adaptivität und dadurch mit technischer Intelligenz die Möglichkeit,

- technische (Mechanik, Sicherheit, Realisierbarkeit, Wartung, Qualität, Präzision),
- ergonomische (Bedienung, Wahrnehmung, Sichtbar- und Erkennbarkeit, Komfort),
- designtechnische (Ästhetik, Ordnung, Anmutung),
- ökonomische (Lebensdauer, Kosten) und
- ökologische (Nachhaltigkeit, Ressourcenschonung)

Vorteile zu erzielen. Die aufgeführten Beispiele und Anwendungsmöglichkeiten zeigen, dass das Technische Design und die MMS bisher nicht im Fokus der Untersuchungen standen. Erste Einsatzmöglichkeiten (vgl. z. B. [CZECHOWICZ 2019]) deuten aber auf das hohe Potenzial hin. Speziell die Mensch-Technik-Schnittstelle kann durch ASS optimiert werden, da durch die Anpassbarkeit das Nutzerkollektiv optimal und situationsgerecht unterstützt wird und Stellteile und Anzeigen für unterschiedliche Aufgaben optimiert werden können. Voraussetzungen für ASS sind dabei mechanisch optimierte Struktursysteme, integrierbare Sensoren und Aktoren sowie (adaptive) Regelungssysteme.

Innerhalb der ASS sind viele Kompetenzen und Disziplinen involviert, eng miteinander verbunden und werden benötigt: Materialwissenschaften, Strukturmechanik, Elektrotechnik, Regelungstechnik, Angewandte Mechanik, Komponententechnologie u. a. Dies zeigt das nötige Wissen und den Aufwand, den es bedarf, um ASS zu entwickeln und umzusetzen. Daher ist es wichtig, alle aufgeführten Teilbereiche und Technologien einzubeziehen, beginnend mit der Planungsphase über die Konzeption bis hin zum Entwurf.

3 Adaptive Strukturen und Systeme (ASS) im Kontext des TD

Eine intelligente Mensch-Maschine-Schnittstelle muss sich an variierende Situationen, Aufgaben und Benutzer sowie Benutzerzustände anpassen, um den Nutzer in jeder Situation optimal zu unterstützen. Dafür ist es notwendig, die Zustände von Nutzer, System und Umwelt zu erfassen und notwendige Anpassungen umzusetzen. Dieses Kapitel befasst sich zunächst mit der Definition zur Gliederung adaptiver Strukturen und Systeme im Kontext des Technischen Designs (TD) und der MMS. Darauf aufbauend werden Einsatz- und Anwendungsgebiete von ASS im Kontext des TD untersucht. Dazu werden Einsatz und Anwendung smarter Materialien untersucht, woraus sich potenzielle Anwendungsbereiche ergeben. Aus den vorhergehenden Untersuchungen können Anwendungsgebiete und Anwendungen speziell im TD abgeleitet werden. Abschließend werden Herausforderungen und Potenziale beim Entwurf und Einsatz von ASS aufgezeigt.

3.1 Definition und Entwurf zur Gliederung von ASS

Bezüglich der Literaturrecherche und der dort ermittelten Definitionen wird abgeleitet, dass sich die identifizierten Bezeichnungen aus Kapitel 2.6.2 auf Strukturen und / oder Systeme beziehen, die anpassbar an veränderliche äußere Bedingungen sind und mindestens ein multifunktionales Element beinhalten. Allen gemeinsam ist die Integration von Sensoren und / oder Aktoren in Strukturkomponenten. Des Weiteren werden Regelungssysteme und Prozessoren eingesetzt, um die Funktionalität oder Intelligenz zu erweitern. Eine zusätzliche Gemeinsamkeit ist die Zielsetzung, eine Struktur oder ein System mit erweiterten Funktionen und Leistungen zu generieren, aber dabei eine Zunahme von Masse zu vermeiden. Abbildung 3.1 fasst die wichtigen Aspekte zusammen.

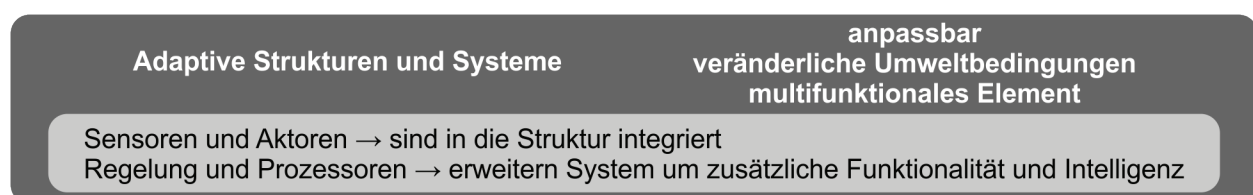


Abbildung 3.1: Entwurf zur Beschreibung adaptiver Strukturen und Systeme

Die in der Literatur verwendeten Bezeichnungen variieren hinsichtlich ihrer Definition je nach Autor (vgl. Kapitel 2.6.2). Im Folgenden wird der Bereich der ASS für die weiteren Untersuchungen definiert und abgegrenzt (Abbildung 3.2). Die Basis bilden die Hauptkategorien passive und adaptive Strukturen und Systeme (vgl. Kapitel 2.6.1). Passive Strukturen und Systeme sind starre Systeme, die sich nicht an veränderte Bedingungen anpassen können. Adaptive Strukturen und Systeme beinhalten unterschiedliche Intelli-

genz- und Integrationsstufen. Eine Struktur bzw. ein System ist genau dann adaptiv, wenn es mindestens einen in die Struktur integrierten Aktor und / oder Sensor hat. Dies bedeutet, dass multifunktionale Elemente (SM) eingesetzt werden. Die Struktur übernimmt damit nicht nur Funktionen, die die Festigkeit und Steifigkeit betreffen, sondern kann auch als Aktor und / oder Sensor agieren.

Die Schnittmenge bilden anpassbare, passive Strukturen und Systeme. Diese sind durch eine passive Struktur gekennzeichnet, können sich aber mittels mechanischer oder elektronischer Hilfsmittel anpassen (z. B. eine Höhenverstellung). Dies geschieht jedoch nicht selbstständig und wird durch den Nutzer oder die Anwendung veranlasst. Anpassbare passive Strukturen und Systeme zeichnen sich somit durch eine Struktur aus, die sich nicht selbstständig an veränderliche Umweltbedingungen anpassen kann.

Eine Betrachtung der adaptiven Strukturen und Systeme zeigt, dass aktive Strukturen und Systeme eine Erweiterung der adaptiven um eine Regelung darstellen. Die Mitte bildet die Adaptronik, die smarte bzw. intelligente Systeme beinhaltet, wobei ein Prozessor die Struktur um Funktionalität und Intelligenz erweitert. Die Begriffe „smart“ und „intelligent“ werden hier synonym verwendet. Zukünftige Entwicklungen im Bereich künstlicher Intelligenz können dazu führen, dass weitere Untergliederungen notwendig werden.

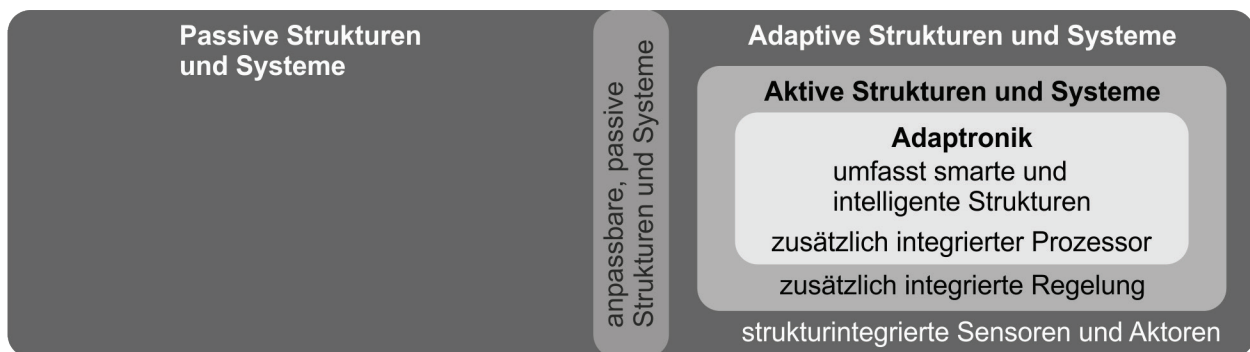


Abbildung 3.2: Einteilung passiver und adaptiver Strukturen und Systeme

Für diese Arbeit wird im Folgenden allgemein von ASS gesprochen und keine weitere Unterscheidung vorgenommen. Die ASS umfassen dabei wie in Abbildung 3.2 dargestellt auch die aktiven und adaptronischen Strukturen und Systeme.

3.2 Einsatz von ASS im Kontext des TD

Aus den Anwendungsmöglichkeiten in Kapitel 2.6.3 und den Zusammenfassungen in Bezug auf das TD lässt sich ableiten, dass sich ASS zum Einsatz in den Bereichen und zur Optimierung der Bereiche Technik, Ergonomie und Design eignen (Abbildung 3.3). Im Bereich Technik sind ASS durch die Möglichkeit der Funktionsintegration als Sensor und

Aktor z. B. bei Regelungsaufgaben einsetzbar. Durch die Bauraum- und Bauteilreduktion sowie die Gewichtsreduktion sind Anwendungen in der Aerodynamik und als Leichtbaustrukturen interessant. Die geräuschlose Bewegung sowie die Funktionsintegration und Anpassung kann im Bereich der Ergonomie optimal zur Erhöhung der Bedienbarkeit, des Komforts und des Gebrauchs genutzt werden. Die durch die Bauraum- und Bauteilreduktion sowie die Anpassung einhergehende Gestaltänderung lässt im Design Änderungen der Formgebung sowie Individualisierungen zu.

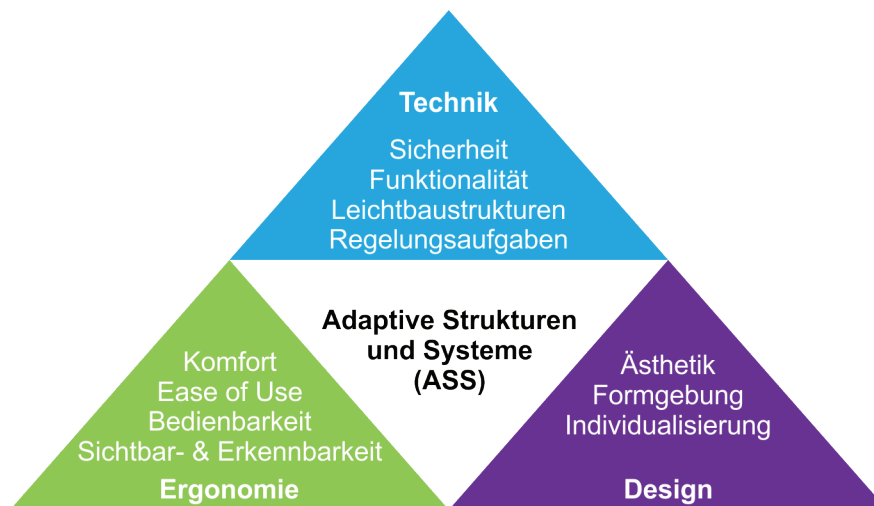


Abbildung 3.3: Adaptive Strukturen und Systeme im Kontext des TD

Im Bereich der Technik existieren bereits Einsatzmöglichkeiten und Anwendungen für ASS oder finden sich aktuell in Forschungsthemen wieder (vgl. Kapitel 2.6.3). Speziell im Gebiet der Aktorik sind vor allem technische Parameter wichtig: das Einsparen von Bauraum, die Reduktion der Komplexität durch geringe Bauteilanzahl oder der verschleißfreie Betrieb sind Vorteile, die ASS mit sich bringen.

Im Bereich des Designs finden ASS bisher kaum Einsatz. Es gibt wenige Anwendungen im Bereich der Mode oder des Möbeldesigns, beispielsweise um Kleidung beim Tragen zu verändern, oder Möbel anzupassen [RITTER 2007]. Allerdings besitzen die Bereiche Ästhetik, Formgebung und Individualisierung, vor allem im Bereich der Produktgestaltung, großes Potenzial: Die Struktur kann sich individuell anpassen und so neue Dimensionen im Bereich der Formgestaltung und Formanpassung eröffnen.

Im Bereich der Ergonomie kann durch ASS der Komfort, die Bedienbarkeit oder der „Ease of Use“ gesteigert und optimiert werden. Auch aktuelle Forschungen beschäftigen sich mit MMS, vgl. CZECHOWICZ [2019]. Allgemein besteht im Bereich der Ergonomie die Hauptschwierigkeit darin, ein Interface bestmöglich an jeden Nutzer, bezüglich seiner individuellen, anthropometrischen Maße, anzupassen. ASS können eingesetzt werden, um

ein Interface zu entwickeln, das auf jeden Nutzer anwendbar und anpassbar ist sowie um (passive) Strukturelemente zu verformen, die dadurch einen höheren ergonomischen Nutzen aufweisen. Dass hier großes Potenzial besteht, zeigt ein Blick in Richtung automobiler Anwendungen: Aufgrund der erhöhten Nachfrage nach ergonomischen Eigenschaften [BUBB 2015], ist eine Verbesserung dieser Systeme wünschenswert. In diesem Zusammenhang bieten ASS die Möglichkeit, Lösungsansätze zu liefern, ohne dabei die hohen Anforderungen an Leichtbau, Bauraum und Ressourcen negativ zu beeinflussen. Dass Interesse im Hinblick auf Innovationen im Fahrzeug besteht, zeigt ein Blick in die heutigen Cockpits. Wo früher große mechanische Stellteile waren, werden heute Eingaben über kleine Drucktasten oder über vollständig softwarebasierte Benutzungsschnittstellen getätigt [SCHLICK ET AL. 2010, S. 1007]. Auch die Zahl der Elektromotoren hat zugenommen. In aktuellen Fahrzeugen befinden sich häufig über 40 Elektromotoren [KINNAIRD & KIRCHBECK 2018]. Die zunehmende Anzahl elektrischer Schnittstellen benötigt zusätzliches Gewicht. Das bestätigt eine Betrachtung der Gewichtszunahme eines Fahrzeugs über die Zeit. Trotz großen Fortschritten im Bereich des Leichtbaus steigt die Gesamtmasse zunehmend [BEIN ET AL. 2008, S. 63]. Dazu tragen nicht nur Elektromotoren, sondern generell die Zunahme von Systemen im Bereich Sicherheit, Komfort und Funktionalität bei. Wird die Verringerung des Gewichts eines Aktors aus FGL um bis zu 80 % [CZECZOWICZ 2012, S. 32] gegenüber einem konventionellen Aktor in die Betrachtung miteinbezogen, dann werden ASS einen hohen Stellenwert bei der Entwicklung zukünftiger ergonomischer Konzepte im Bereich des Fahrzeugs haben. Auch das Fahrzeug-Exterior wird bisher im Bereich der Ergonomie noch unzureichend untersucht. Die in einer Studie durch den Verfasser [HEIN ET AL. 2017] durchgeführten Analysen zeigen, dass zwischen den Nutzern eines Fahrzeugs ein großer Unterschied bezüglich ihrer anthropometrischen Daten besteht, die Körpergröße ist dabei nur ein Maß, das stark variiert (vgl. Kapitel 2.1.1). Durch die Identifikation von Komponenten, deren Eigenschaften abhängig von äußeren Parametern, wie z. B. Geschwindigkeit, Beschleunigung, Straßenbahnverhältnissen, Vibrationen, Last, unterschiedlichen Nutzern, unterschiedlichen Gegebenheiten und Fahrkonditionen (Stadt, Land, Autobahn) angepasst werden bzw. verbessert werden können, ergeben sich potenzielle Anwendungsmöglichkeiten im Fahrzeug: aerodynamische Komponenten wie Heck- und Frontspoiler, ergonomische Komponenten wie adaptive Türgriffe und Einstiege oder Design-Komponenten wie adaptive Linienführungen. Abbildung 3.4 zeigt die Übertragung der Haupteinsatz- und Hauptoptimierungsbereiche aus Abbildung 3.3 auf den Einsatz im Fahrzeug-Interior und -Exterior anhand von Beispielen.

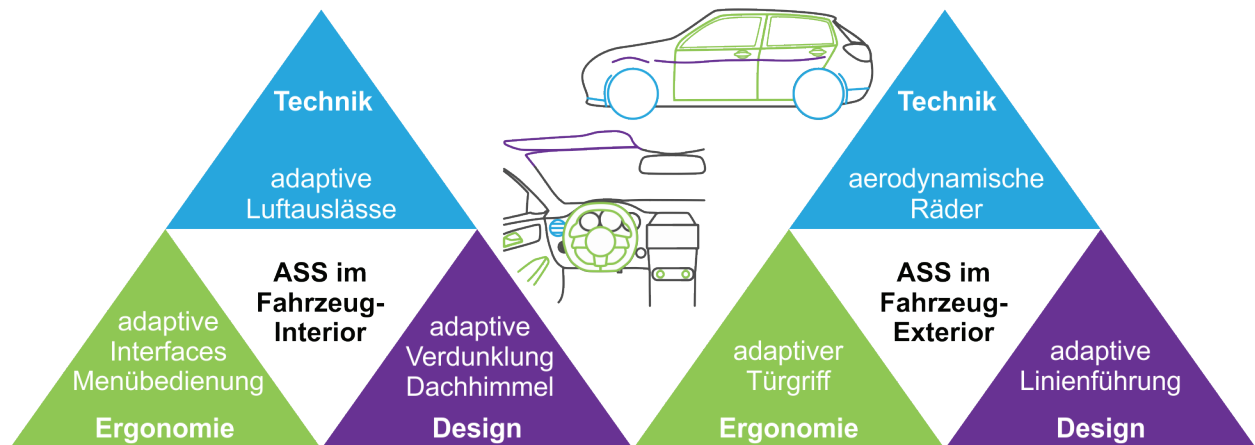


Abbildung 3.4: Technik, Ergonomie und Design bei Anwendungen im Fahrzeug

3.2.1 Identifikation der Anwendungsgebiete von Strukturen mit SM

Es gibt bereits zahlreiche Untersuchungen zu den Eigenschaften, der Regelung oder der Optimierung von SM sowie potenziellen Anwendungsgebieten im Bereich der Technik (vgl. Kapitel 2.6.3). Zu einem weitreichenden Einsatz fehlt es aber an konkreten Anwendungsgebieten in den Bereichen Ergonomie und Design sowie in den Schnittstellenbereichen. Dass gerade diese eine große Rolle spielen, v. a. in Bezug auf die Nutzung des vollständigen Potenzials das ASS bieten, soll im Folgenden näher untersucht werden.

Es werden zunächst bestehende Anwendungen in einer umfangreichen Literaturrecherche mit etwa 450 Anwendungen aus 150 Quellen gesammelt, analysiert und in Kategorien eingeteilt. Das Ergebnis wurde in einer Studie in [HEIN ET AL. 2018] veröffentlicht. Dadurch ist es möglich, neue Anwendungsbereiche und Anwendungen abzuleiten und von den Erfahrungen bereits existierender Anwendungen zu profitieren. Abbildung 3.5 zeigt das Vorgehen zur Analyse und Untersuchung bestehender Anwendungen mit SM.

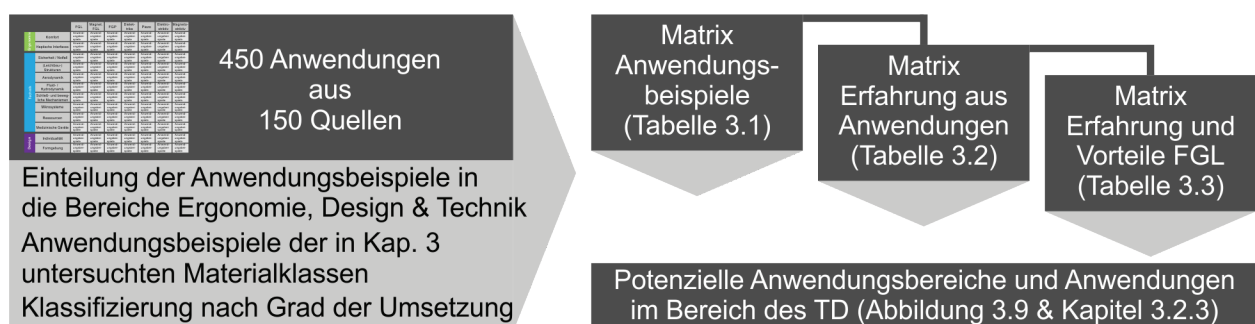


Abbildung 3.5: Literaturrecherche zu Anwendungen von Strukturen mit SM

Da nach der Definition von ASS (vgl. Kapitel 2.6.2 und 3.1) multifunktionale Werkstoffe und damit SM ein fester Bestandteil dieser Strukturen sind, werden zunächst Anwendungen, die diese Werkstoffe einsetzen, untersucht. Daraus wird eine Matrix mit Anwendungsbeispielen erstellt (Tabelle 3.1) und eine Matrix mit Erfahrungen aus der Anwen-

dung abgeleitet (Tabelle 3.2). Damit ergibt sich eine Matrix (Tabelle 3.3), die Erfahrungen sowie die Hauptvorteile von FGL verknüpft. Das Ergebnis stellen neue potenzielle Anwendungsbereiche und Anwendungen im TD dar (Abbildung 3.9 und Kapitel 3.2.3).

Im Folgenden werden die Bereiche Ergonomie, Technik und Design aufgegriffen und existierende Anwendungen in diese Hauptkategorien eingeteilt. Dabei wird die Anwendung zunächst einem Bereich zugeordnet der, aufgrund des größten Einflusses, die Hauptkategorie bildet. Die Kreise unter den Anwendungsgruppen geben zusätzlich den Einfluss der anderen Bereiche auf die jeweilige Anwendungsgruppe wieder. Sie setzen sich aus den zusätzlichen Einflüssen der Bereiche auf die Beispielanwendungen zusammen (Kreise hinter den Beispielanwendungen). Kriterien sind dabei die im Vordergrund stehenden Optimierungsmöglichkeiten und Potenziale für Einsatz und die Entwicklung von ASS in den Bereichen Ergonomie, Design und Technik (vgl. Abbildung 3.3):

- Ergonomie: Bedienbarkeit, Komfort, Ease of Use
- Technik: Sicherheit, Funktionalität, Leichtbaustrukturen, Regelungsaufgaben
- Design: Individualisierung, Ästhetik, Formgebung

Im Bereich Ergonomie können die gefundenen Anwendungen in die Gruppen Komfort und (haptische) Interfaces gegliedert werden. Im Bereich Technik zeigen sich Anwendungen vor allem in den Bereichen Sicherheit / Notfall, (Leichtbau-) Strukturen, Aerodynamik, Fluid- / Hydrodynamik, Schließ- und bewegliche Mechanismen, Mikrosysteme, Ressourcen und medizinische Geräte. Im Hinblick auf das Design werden SM eingesetzt, um Individualisierungen zu generieren oder zur Formanpassung aus ästhetischen Gründen.

Hauptkategorie	Anwendungsgruppe	Beispielanwendungen	Einflüsse	
Ergonomie	Komfort	Noise and Vibration		
		Dämpfung, Schallimmissionen		
		biomedizinische Massagevorrichtung		
	(Haptische) Interfaces	taktile / Haptische Displays / Touchscreens		
		Force Feedback Geräte		
		haptische Informationssysteme		
		Schalter		
Technik	Sicherheit / Notfall	Sicherheitskupplung		
		Notbremsen		
		Rauchmelder		
		Brandschutzventile / Sicherheitsventile		
		aktive Motorhaube		
		Gurtstraffer		

Tabelle 3.1: Anwendungsbeispiele mit Zuordnung zu den Hauptkategorien (Teil 1/2)

Hauptkategorie	Anwendungsgruppe	Beispielanwendungen	Einflüsse	
Technik	(Leichtbau-) Strukturen 	selbst (ent-)faltbare Strukturen (Sonnenschutz)		
		selbst (ent-)faltbare Strukturen (Weltraum)		
		wandelbare Tragwerke, Smart Skins		
		Tragfähigkeitssteigerung		
		adaptive Flügel / Tragflächen		
		adaptive Lichter (Fahrzeug)		
		Spiegelverstellung		
		Strukturkontrolle		
	Aerodynamik 	adaptive Flügel / Tragflächen, Chevron (Boeing)		
		adaptive Fahrzeugelemente (Spoiler, Kühlergrill)		
		Smart Skins		
		aktive Regelung, Lüfterräder		
	Schließ- und bewegliche Mechanismen 	Klappen, Greiferaktoren		
		Schalter		
		Gelenke		
		Spannvorrichtungen		
		Verbindungstechnik, Positionierungssysteme		
	Fluid- / Hydrodynamik 	Ventile		
		Pumpen, Motoren		
		Klimasteuerung		
	Mikrosysteme 	Mikroventile		
		Mikrorobotik, Mikrogreifer (für Mikromontage)		
		Mikroaktuatoren (künstlicher Finger)		
		künstliche Muskeln		
		Mikroelektronik		
	Ressourcen 	selbstheilende Strukturen		
		Energy Harvesting		
		Wärmeerkraftmaschinen		
Medizinische Geräte 	Stents / Gefäßprothesen			
	Einführsysteme minimalinvasive Operation			
	Endoskopie, Sonden, Steinfangkörbchen			
	Prothesen / Orthesen			
	Implantate			
	Mikrochirurgische Zangen			
	Klammern			
Design	Individualität 	Mode (intelligente Textilien, Schmuck)		
		Brillenfassungen		
		adaptive Logos und Schilder		
	Formgebung 	Mode (intelligente Textilien, tragbare Displays)		
		Vorhänge, Sonnenschutz Fassaden		

Tabelle 3.1: Anwendungsbeispiele mit Zuordnung zu den Hauptkategorien (Teil 2/2)

Die Matrix in Tabelle 3.2 verbindet Materialien und Anwendungen, um bereits vorhandene Erfahrung aufzudecken. Dadurch ist es möglich, neue potenzielle Applikationen

aufzuzeigen sowie von vorhandenen abzuleiten, Applikationen auf andere Anwendungen in einem Bereich, aber einem anderen Material zu übertragen (horizontal), Anwendungen eines Bereiches für eine Optimierung zusammenzufassen sowie Vorteile einer Applikation innerhalb desselben Materials auf Anwendungen eines anderen Bereiches zu übertragen (vertikal). Die Matrix enthält nur Anwendungen, die bereits in Forschung oder Entwicklung im Einsatz sind. Durch die umfangreiche Literaturrecherche wurden die Anwendungsbereiche sowohl im Hinblick auf existierende als auch auf die Art und Anzahl der Anwendungen hin untersucht. Die Kreise zeigen damit nicht nur die Anzahl der Applikationen, sondern auch die Qualität (Stadium) der untersuchten Anwendungen.

Ein Vergleich innerhalb der Materialien zeigt, dass im Bereich FGL und PZM am meisten geforscht wird, bzw. bereits Anwendungen realisiert werden. Es wird aber auch deutlich, dass im Bereich Ergonomie und Design noch großes Forschungspotenzial besteht. In der Technik können vor allem die Anwendungsgruppen (Leichtbau-) Strukturen, Aerodynamik und Schließ- und bewegliche Mechanismen weiterentwickelt und neue Anwendungen in diesen Gruppen, aufbauend auf existierenden Forschungsergebnissen, umgesetzt werden. Es ist empfehlenswert, sich zunächst auf Materialien zu konzentrieren, die bereits in Anwendungen eingesetzt werden, um so Erkenntnisse abzuleiten.

		Smarte Materialien						
		FGL	MFGL	FGP	DE	PZM	EM	MM
Ergonomie	Komfort	●●○	●○○	●○○	●○○	●●○	○○○	●○○
	(Haptische) Interfaces	●○○	○○○	●○○	●○○	●○○	●○○	○○○
Technik	Sicherheit / Notfall	●●○	○○○	●○○	●○○	●○○	○○○	○○○
	(Leichtbau-) Strukturen	●●○	○○○	●●○	●○○	●●○	●○○	○○○
	Aerodynamik	●●○	○○○	●○○	●○○	●●○	●○○	●○○
	Fluid- / Hydrodynamik	●●○	●○○	●○○	●○○	●○○	○○○	●○○
	Schließ- und bewegliche Mechanismen	●●○	●○○	●○○	●○○	●●○	●○○	●○○
	Mikrosysteme	●●○	●○○	●●○	●●○	●●○	●○○	●●○
	Ressourcen	●○○	○○○	●○○	○○○	●○○	●○○	○○○
	Medizinische Geräte	●●○	●○○	●●○	●○○	●○○	●○○	●○○
Design	Individualität	●○○	●○○	●○○	●○○	○○○	●○○	○○○
	Formgebung	●○○	○○○	●○○	○○○	●○○	●○○	○○○

Tabelle 3.2: Erfahrung aus Anwendungen bei verschiedenen Materialien im Vergleich
 Zur Auswahl des passenden Materials für die gewünschte Anwendung ist es notwendig, die wichtigen Eigenschaften der SM aufzuzeigen und zu vergleichen. Diese wurden in Kapitel 2.4.3 und Tabelle 2.14 zusammengefasst. Wichtige Eigenschaften in Bezug auf das TD und

die MMS sind vor allem diejenigen, die Einfluss auf die Applikation und den Nutzer, der in direktem Kontakt mit der Anwendung steht, haben. Dazu gehören: Temperatur, Spannung bzw. Kräfte, Dehnung bzw. typischer Stellweg, Zeit bzw. Frequenz und Lebensdauer.

Bei der Temperatur ist zum einen die zur Umwandlung benötigte Temperatur sowie die Einsatztemperatur wichtig. Erstere wirkt sich direkt auf das System aus, da die weiteren Komponenten entsprechend temperaturbeständig ausgelegt werden müssen und auf den Nutzer, da die ertragbare Temperatur eine wichtige Rolle spielt (vgl. Kapitel 2.4.3). Die Abschätzung der Einsatztemperatur ist notwendig, um eine unerwünschte Auslösung zu vermeiden. Spannung und Dehnung definieren die mögliche Applikation und Konstruktion. Die Spannung gibt die Kräfte an, die das SM aufbringen kann, um die umgebende Struktur zu verformen. Anhand der Dehnung kann der Weg abgeschätzt werden, um den das Material sich selbst und die umgebende Konstruktion verformen kann. Der typischen Stellweg zeigt, in welchen Bewegungsbereichen die vorliegenden SM eingesetzt werden. Die Zeit, die benötigt wird, um das Material in seinen neuen Zustand zu überführen, ist essenziell. Sie besagt, wie schnell sich das Material in seinen neuen Zustand umformen kann und damit wie oft eine Transformation in einer vorgegebenen Zeit durchgeführt werden bzw. wie schnell hintereinander die Anwendung betätigt werden kann. Dieser Prozess oder die dabei benötigte Temperatur ist nicht nur für das System wichtig, sondern auch für den Nutzer. Da die Mensch-Maschine-Interaktion ein wichtiges Thema im Entwicklungsprozess darstellt, ist es notwendig, ein sicheres System zu entwickeln. Des Weiteren ist es von Bedeutung, die Anzahl der möglichen Zyklen zu kennen, um so die Lebensdauer des Materials und damit des Systems zu definieren. Hierbei ist der Austausch oder die Wartung eines SM in Betracht zu ziehen, wenn ASS entwickelt werden. Anhand der Analyse von Tabelle 2.14 und 3.2 wird festgestellt, dass FGL sich zum einen aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften sehr gut für Anwendungen im Bereich der MMS eignen und zum anderen bereits breites Wissen bei Anwendungen im Bereich Technik zur Verfügung steht, das zur Übertragung auf weitere Anwendungen in den Bereichen Ergonomie und Design genutzt werden kann. Zusammenfassend sind FGL interessante und vielversprechende Materialien bezüglich einer weitreichenden Applikation. Aufgrund ihrer Eigenschaften ist es nicht nur möglich sie für sehr spezielle Anwendungen einzusetzen, sondern auch für solche, die viele Anforderungen in sich vereinigen. Daher findet in dieser Arbeit die Fokussierung auf FGL statt. Abbildung 3.6 zeigt die Vorteile von FGL im Hinblick auf den Einsatz in den Bereichen Ergonomie, Technik und Design.

mehrere Funktionen gleichzeitig realisierbar	hohe Arbeitsleistung pro Volumen	
- Funktionsintegration	- ressourcenschonend	klein
- Bauteilreduktion	- energieeffizient	- Kompaktheit
- Reduktion (System-) Komplexität	elektromagnetisch unbedenklich	- Reduktion Bauraum
unempfindlich		- Miniaturisierung möglich
- keine Korrosion bei Witterungseinflüssen	Vorteile FGL	Standard-Spannungsbereich 0 - 12 V
- Zuverlässigkeit	leicht	Bewegung kontinuierlich, geräuschlos, erschütterungsfrei und reibungsfrei
einfach	- Gewichtsreduktion	- Komfort
- wenig Einzelteile (Bauteilreduktion)	- Leichtbau	- für sensible Anwendungen geeignet
- Reduktion (System-) Komplexität	- erhöhte Tragbarkeit	
- Reduktion Kosten	- ressourcenschonend	

Abbildung 3.6: Vorteile von FGL

Es lassen sich daraus die vier Hauptvorteile:

- Bauraum: hohe Arbeitsleistung pro Volumen,
- Leichtbau: Funktionsintegration, hohe Arbeitsleistung/Volumen, Bauteilreduktion,
- Komplexität: Funktionsintegration, Bauteilreduktion, Ordnungsgrad und
- Komfort: erschütterungs-, reibungsfreie, kontinuierliche & geräuschlose Bewegung

ableiten. Der Vorteil im Bereich des Bauraums liegt vor allem in der hohen Arbeitsleistung pro Volumen. Durch die geringen Abmessungen und die gleichzeitig hohen zur Verfügung stehenden Kräfte, eignen sich FGL für Anwendungen, in denen stricte Bauraumvorgaben herrschen und kaum Spielraum zur Erweiterung zur Verfügung steht. Ein weiterer Vorteil ergibt sich bei Anwendungen, die eine Miniaturisierung erfordern, oder bei denen Kompaktheit wichtig ist. Beim Leichtbau ergibt sich der Nutzen durch die Funktionsintegration, die hohe Arbeitsleistung pro Volumen sowie die Bauteilreduktion. Es stehen dabei Anwendungen im Vordergrund, bei denen durch Leichtbau Kosten und Ressourcen gespart werden. Insbesondere bei Produkten mit bewegten Massen (z. B. im Fahrzeugbau oder in der Luftfahrt) sind hohe Einsparungen möglich. Interessant für Leichtbaukonzepte sind auch Bauwerke und handgeführte Geräte. Der Vorteil der geringen Komplexität ergibt sich durch die Eigenschaften Funktionsintegration, Bauteilreduktion und Ordnungsgrad. Hier profitieren hoch komplexe Anwendungen, bei denen sich die Reduktion der Komplexität stark auf Kosten, Montage, Wartung, Bedienbarkeit usw. auswirkt. Der Vorsprung im Bereich Komfort entsteht vor allem durch die erschütterungsfreie, kontinuierliche und geräuschlose Bewegung der FGL. Sensible Anwendungen oder Anwendungen mit direktem Nutzerkontakt können von diesen Vorteilen profitieren.

3.2.2 Potenzielle Anwendungsbereiche von ASS mit FGL

Um potenzielle Anwendungsbereiche zu definieren, werden die Erfahrungen aus den existierenden Anwendungen mit den Eigenschaften und Hauptvorteilen des jeweiligen Materials, hier FGL, verknüpft. Vielversprechend sind dabei vor allem die Anwendungs-

bereiche, bei denen die drei Hauptkategorien Ergonomie, Technik und Design kombiniert werden. Dadurch ist es möglich, das gesamte Potenzial, das SM bieten, auszuschöpfen. Tabelle 3.3 beinhaltet die Anwendungen aus Tabelle 3.1 verknüpft mit den Erfahrungen aus Tabelle 3.2 und kombiniert mit den Hauptvorteilen aus Abbildung 3.6. Die Einfärbung der Anwendungsgruppen entsteht aus den in Tabelle 3.1 dargestellten Einflüssen von Ergonomie, Design und Technik und zeigt die Verbindung der Hauptkategorien innerhalb der Anwendungsgruppen. Die Bewertung der Hauptkategorien mit den Hauptvorteilen findet anhand der in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Kriterien statt. Das Vorgehen soll an einem Beispiel erläutert werden. Bei den haptischen Interfaces spielt der Bauraumbedarf eine große Rolle, da sich diese häufig in Systemen befinden, die stricte Bauraumvorgaben aufweisen, wie z. B. in Fahrzeugen. Durch den Einsatz im Fahrzeug oder an handgeführten Geräten ist der Bedarf an Leichtbaustrukturen hoch. Haptische Interfaces sind in ein umgebendes System integriert und weisen viele bewegliche Komponenten auf, wodurch sich eine hohe Komplexität ergibt. Durch ihren direkten Kontakt mit dem Nutzer ist der Bedarf an Komfortfunktionen hoch. Eine Analyse von Tabelle 3.3 zeigt, dass Mikrosysteme, (Leichtbau-) Strukturen, Schließ- und bewegliche Mechanismen sowie (haptische) Interfaces die Vorteile der FGL am besten nutzen können. Die weiteren Anwendungsgruppen weisen nicht die Möglichkeit auf, alle Vorteile vollständig einzusetzen.

		Anwendung	Hauptvorteile FGL			
		Erfahrung	Bauraum	Leichtbau	Komplexität	Komfort
Ergonomie	Komfort	●●○○	●	●	●	●
	(Haptische) Interfaces	●○○○	●	●	●	●
Technik	Sicherheit / Notfall	●●○○	●	●	●	●
	(Leichtbau-) Strukturen	●●○○	●	●	●	●
	Aerodynamik	●●○○	●	●	●	●
	Fluid- / Hydrodynamik	●●○○	●	●	●	●
	Schließ- und bewegliche Mechanismen	●●○○	●	●	●	●
	Mikrosysteme	●●○○	●	●	●	●
	Ressourcen	●○○○	●	●	●	●
Design	Medizinische Geräte	●●○○	●	●	●	●
	Individualität	●○○○	●	●	●	●
	Form	●○○○	●	●	●	●

Tabelle 3.3: Verbindung aus Erfahrung der Anwendungen und Hauptvorteilen von FGL

Die Analyse von Erfahrungen aus der Anwendung und den Hauptvorteilen der FGL zeigt Anwendungsgruppen auf, die sich sehr gut (grün), gut (gelb) und bedingt (orange) für den

Einsatz von FGL eignen (Abbildung 3.7) und damit ein sehr gutes, gutes oder bedingtes Potenzial aufweisen. Zur Umwandlung in quantifizierbare Werte, entspricht ein Viertelkreis aus Tabelle 3.3 einem halben Punkt. Damit liegen der Matrix aus Abbildung 3.7 die unten dargestellten Werte und Bedeutungen zugrunde.

Erfahrung	hoch 5, 6		Medizinische Geräte Fluid- / Hydrodynamik	Mikrosysteme
	mittel 3, 4		Aerodynamik Komfort Sicherheit / Notfall	(Leichtbau-) Strukturen Schließ- und beweg- liche Mechanismen
	wenig 1, 2		Ressourcen Individualität Formgebung	Haptische Interfaces
		wenig 1 - 3	mittel 3,5 - 5,5	hoch 6 - 8
Vorteile FGL				
Erfahrung	hoch 5, 6	es existieren sehr viele Anwendungen, das Potenzial Neues zu entwickeln ist nicht hoch, vorhandene Anwendungen können aber optimiert werden		
	mittel 3, 4	großes Potenzial aus Erfahrung zu lernen und auf neue Anwendungen und Möglichkeiten zu übertragen		
	wenig 1, 2	sehr wenig Erfahrung aus bereits untersuchten Anwendungen vorhanden, alles muss neu erlernt werden		
Vorteile FGL	hoch 6 - 8	ein Einsatz von FGL bietet hohes Potenzial, die Anwendung innerhalb der Hauptvorteile stark zu optimieren		
	mittel 3,5 - 5,5	es gibt Vorteile beim Einsatz von FGL, allerdings sind nicht alle Hauptvorteile stark ausgeprägt		
	wenig 1 - 3	die Hauptvorteile von FGL können bei der Anwendung nicht ausgenutzt werden, ein Einsatz von FGL ist daher kritisch zu prüfen		

Abbildung 3.7: Erfahrung und Hauptvorteile bezüglich der Anwendungsgruppen

Es zeigt sich, dass vor allem im Bereich der (Leichtbau-) Strukturen und der Schließ- und beweglichen Mechanismen großes Potenzial zum Einsatz von ASS vorherrscht. Die Erfahrung liegt im mittleren Bereich, was bedeutet, dass es die Möglichkeit gibt, aus der Erfahrung bereits vorhandener Anwendungen zu lernen und Ergebnisse zu übertragen, aber noch nicht alle Möglichkeiten ausgeschöpft sind. Da zusätzlich alle Hauptvorteile der FGL genutzt werden können, ist ein Einsatz in diesen Bereichen äußerst vielversprechend. Auch bei haptischen Interfaces, Mikrosystemen sowie Aerodynamik, Komfort und Notfall / Sicherheit ist ein Einsatz von ASS sehr zu empfehlen, allerdings sind hier einige Herausforderungen zu meistern. Bei haptischen Interfaces können alle Hauptvorteile der ASS mit FGL genutzt werden, allerdings gibt es noch wenig Erfahrung und es müssen daher grundlegende Untersuchungen stattfinden.

Aus den Beispielen und Anwendungsmöglichkeiten von ASS (Kapitel 2.6.3) und der Literaturrecherche (Kapitel 3.2.1) können allgemeine Anwendungsbereiche abgeleitet, den Hauptkategorien Ergonomie, Design und Technik zugeordnet und bewertet werden (Ab-

bildung 3.8). Die Grafik zeigt den Anteil von Ergonomie, Design und Technik in den jeweiligen Anwendungsbereichen, der anhand der Kriterien aus Kapitel 3.2 vergeben wird. Zusätzlich werden die Hauptvorteile der FGL den Anwendungsbereichen zugeordnet, wobei die Bewertung anhand der in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Kriterien stattfindet. Es zeigt sich, dass vor allem in den Branchen Bauwesen, Feinwerktechnik, Luftfahrt, elektrische Geräte und Automobil die Hauptvorteile von FGL sehr gut genutzt werden können und zusätzlich alle drei Hauptkategorien Ergonomie, Technik und Design einen Einfluss haben (Schnittstellenanwendungen, TD). Damit eignen sich diese Bereiche sehr gut für den Einsatz von ASS, da hier das volle Potenzial ausgeschöpft werden kann.

	Hauptvorteile FGL			
	Bauraum	Leichtbau	Komplexität	Komfort
Raumfahrt	●	●	●	◐
Energie / Umwelt	◐	◐	◐	◐
Bauwesen	◐	◐	◐	◐
Medizintechnik	◐	◐	◐	◐
Feinwerktechnik	●	●	●	◐
Luftfahrt	●	●	●	◐
Elektrische Geräte	◐	◐	◐	◐
Automobil	◐	◐	◐	◐
Textil / Mode	◐	◐	◐	◐
Kunst / Unterhaltung	◐	◐	◐	◐

Abbildung 3.8: Ableitung der Anwendungsbereiche und Bewertung

Abbildung 3.9 fasst die Erkenntnisse zusammen und stellt die Erfahrung der Anwendungsgruppen, die Nutzung der Hauptvorteile sowie die Branchen dar.

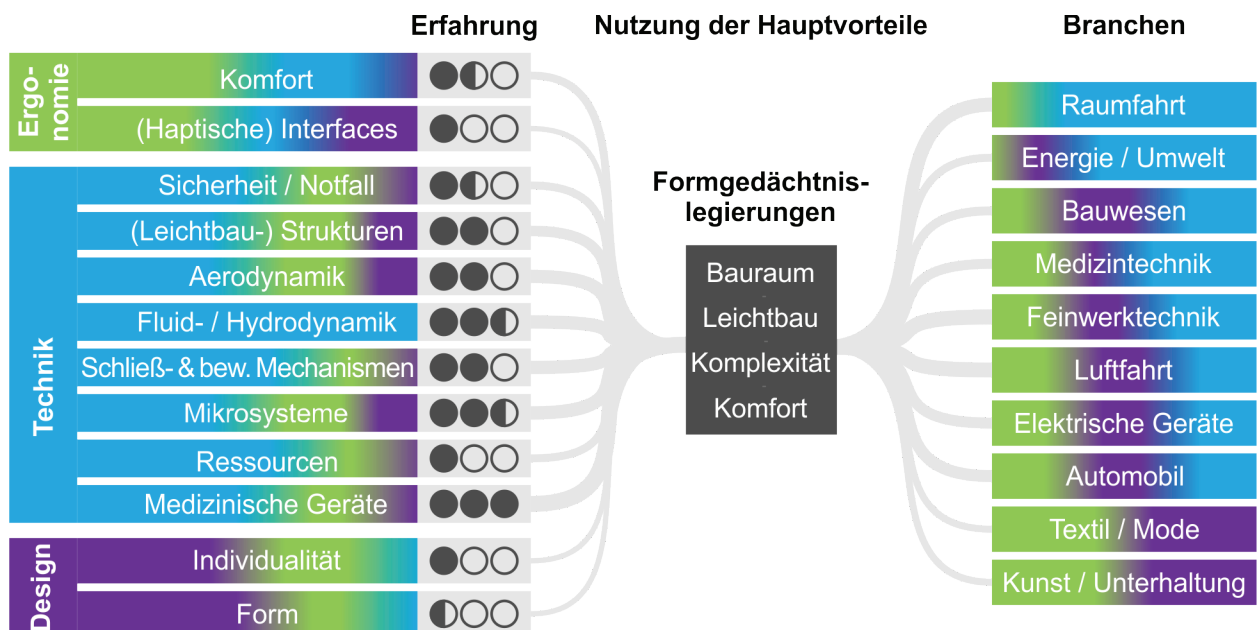


Abbildung 3.9: Verknüpfung von Anwendungsgruppen mit Anwendungsbereichen

3.2.3 Konkrete Anwendungsbeispiele von ASS im TD

Im Folgenden werden die Anwendungsbereiche untersucht, die die Hauptvorteile der FGL nutzen und gleichzeitig die Bereiche Ergonomie, Technik und Design beinhalten und damit klassische Schnittstellenanwendungen darstellen, die im TD untersucht werden. Wie in Kapitel 3.2.2 gezeigt, eignen sich vor allem die Branchen Bauwesen, Feinwerktechnik, Luftfahrt, elektrische Geräte und Automobil. Diese werden nachfolgend anhand von Beispielen analysiert. Mittels der Farbzuzuweisung erhalten die Beispiele eine Zuordnung zu den Bereichen Ergonomie, Design und Technik. Des Weiteren werden die Vorteile von FGL (Abbildung 3.6), die Hauptparameter von FGL (Kapitel 2.4.3) sowie die Anwendungsgruppen (Tabelle 3.1) in die Betrachtung und Bewertung miteinbezogen.

3.2.3.1 Bauwesen

Im Bauwesen finden ASS Einsatz beim Verstärken von Brücken, um die Spannung während einem Erdbeben konstant zu halten. Weitere Einsatzmöglichkeiten sind Schwingungsdämpfung, Verformungs- und Durchbiegungsminimierung, Verbesserung bauphysikalischer Eigenschaften, Ertragen hochdynamischer Lasten sowie Health-Monitoring. Sie können auch für veränderliche Geometrien im Bereich Gebäude, Brücken oder Architektur eingesetzt werden. Mögliche Anwendungsgruppen sind: Komfort, Sicherheit / Notfall, (Leichtbau-) Strukturen, Fluid- / Hydrodynamik, Schließ- und bewegliche Mechanismen, Ressourcen, Individualität und Formgebung. Wichtige Parameter stellen Funktionsintegration, Komplexität und Unempfindlichkeit dar. Im Bauwesen treten häufig große Spannungen und Kräfte auf, Stellwege können stark variieren, eine hohe Lebensdauer ist wichtig und die Umgebungstemperatur hat hohe Auswirkungen. Abbildung 3.10 zeigt Einsatzmöglichkeiten von ASS im Bauwesen.

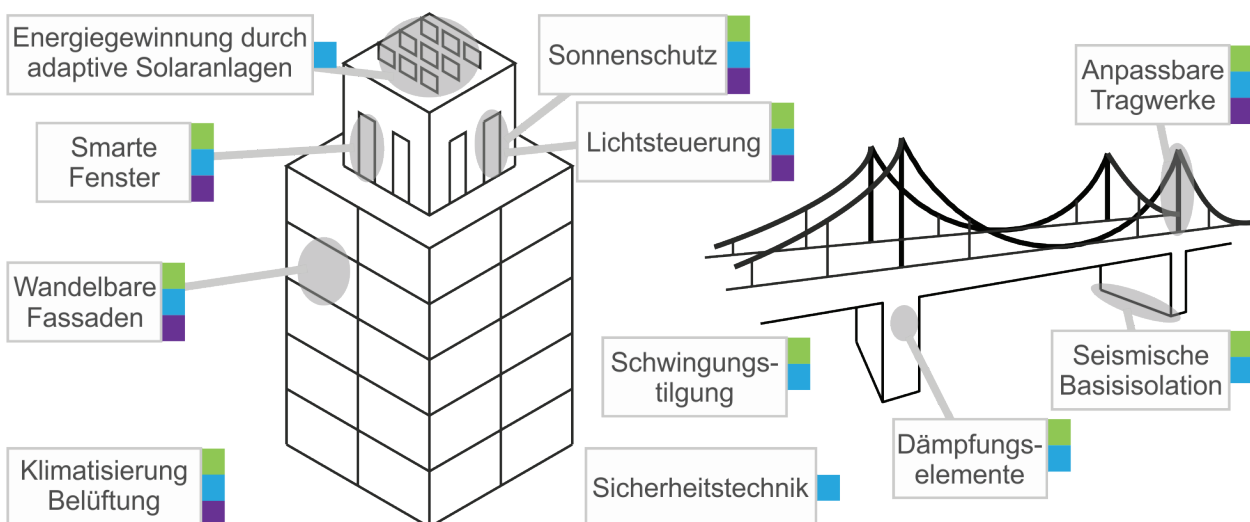


Abbildung 3.10: Einsatzmöglichkeiten ASS im Bauwesen

3.2.3.2 Feinwerktechnik

Die Feinwerktechnik befasst sich mit kleinen und / oder präzisen Erzeugnissen in den Bereichen der Feinmechanik, Mess-, Daten- und Steuerungstechnik, Optoelektronik, Mechatronik, Mikrosystemtechnik, Optik, Medizintechnik und Nachrichtentechnik, Informationstechnik, Unterhaltungselektronik, Datenverarbeitungstechnik und Sensortechnik. Interessante Anwendungsgruppen sind hier Komfort, (haptische) Interfaces, (Leichtbau-) Strukturen, Fluid- / Hydrodynamik, Schließ- und bewegliche Mechanismen, Mikrosysteme und Form. Entscheidend sind hier vor allem die Parameter Bauraum, Leichtbau, Komplexität, Miniaturisierung, Unempfindlichkeit, Energiedichte und Standard-Spannungsbereich. Einsatzmöglichkeiten bestehen im Bereich der Mikrosysteme, der Optimierung von Eigenschaften und der Automatisierung von Funktionen. Es kann im Allgemeinen davon ausgegangen werden, dass kleine Kräfte und Spannungen vorherrschen und kleine Stellwege gefordert werden. Die Frequenz kann stark variieren und eine niedrige Aktivierungsenergie ist vorteilhaft. Abbildung 3.11 zeigt Einsatzmöglichkeiten von ASS in der Feinwerktechnik.

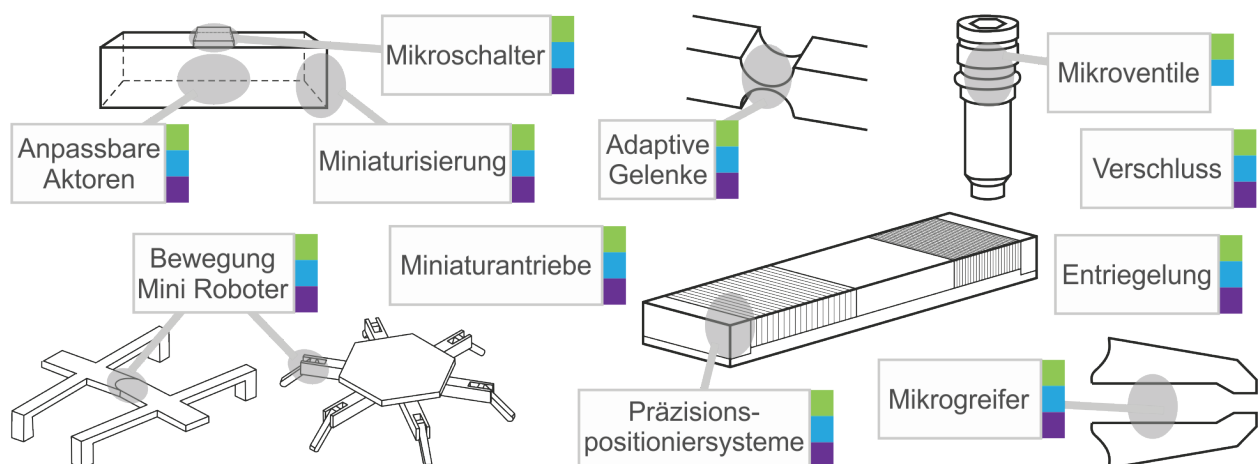


Abbildung 3.11: Einsatzmöglichkeiten ASS in der Feinwerktechnik

3.2.3.3 Luftfahrt

Die Luftfahrt umfasst sowohl den Transport von Gütern als auch von Personen. Hier wird vor allem der Bereich der Luftfahrttechnik und Flugzeugtechnik betrachtet. Es existieren bereits Anwendungen von adaptiven Strukturen und Systemen im Bereich des Flugzeug-Exteriors wie beispielsweise Tragflächen oder Chevrons (vgl. Kapitel 2.6.3). Es bestehen allerdings auch im Interior Einsatzmöglichkeiten, vor allem im Bereich der Mensch-Maschine-Schnittstelle, wie anpassbare Interfaces und Sitzfunktionen. Die Vorteile von FGL wie Unempfindlichkeit (speziell Zuverlässigkeit), hohe Energiedichte, geringe Komplexität, Funktionsintegration, Leichtbau, Miniaturisierung sowie Komfort können zielführend

eingesetzt werden. Wichtige Anwendungsgruppen sind Komfort, (haptische) Interfaces, Sicherheit / Notfall, (Leichtbau-) Strukturen, Aerodynamik, Fluid- / und Hydrodynamik, Schließ- und bewegliche Mechanismen und Form. Es herrschen vor allem im Exterior große Spannungen und Kräfte sowie hohe Stellwege vor. Die Temperatur variiert im Exterior stark und ist in hohem Maß von der Umgebung abhängig. Durch die hohen Sicherheitsanforderungen sind die Lebensdauer und die schnelle Einsatzbereitschaft wichtig. Abbildung 3.12 zeigt Einsatzmöglichkeiten von ASS in der Luftfahrt.

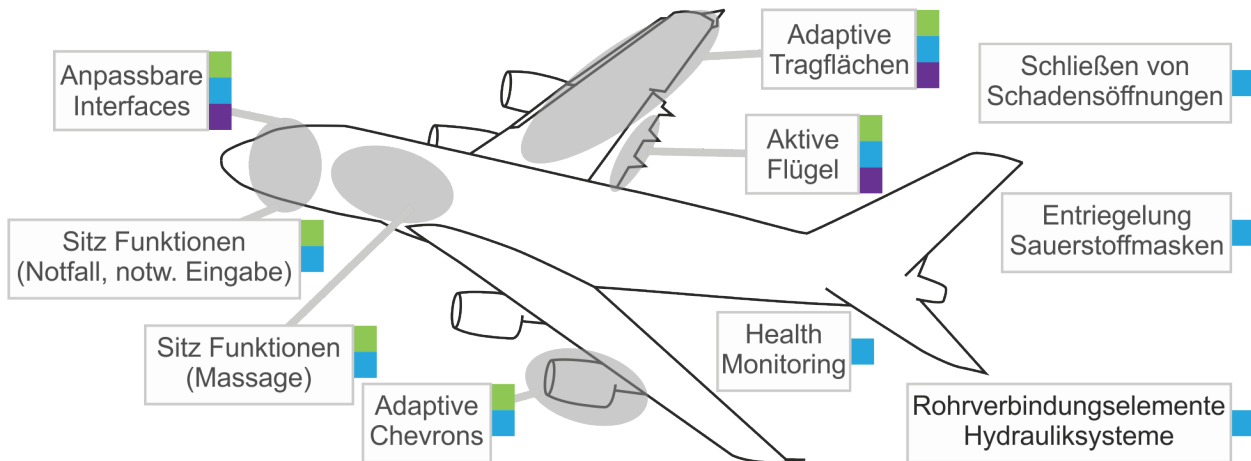


Abbildung 3.12: Einsatzmöglichkeiten ASS in der Luftfahrt

3.2.3.4 Elektrische Geräte

Eine weitere interessante Branche stellen elektrische Geräte und Wearables dar. Hier ist vor allem der Bereich der Informationsübertragung an den Menschen ein vielversprechender Anwendungsbereich. Mögliche Einsatzgebiete von ASS bestehen bei Griffen von elektrischen Werkzeugen im Bereich Anpassung der Griffform oder haptisches Feedback. Ganz allgemein ist der Handgriff ein interessantes Einsatzgebiet für ASS, die für die Anpassung an den Nutzer sowie Rückmelde-, Notfall-, oder Navigationsfunktionen genutzt werden können. Eine weitere Einsatzmöglichkeit stellen im Umfeld der Mensch-Maschine-Schnittstelle Stellteile und Anzeigen dar. Wichtige Vorteile beim Einsatz von FGL sind Leichtbau, Funktionsintegration, Kompaktheit, hohe Energiedichte, die geräuschlose Bewegung und der Standard-Spannungsbereich. Wichtige Anwendungsgruppen sind Komfort, (haptische) Interfaces, Sicherheit / Notfall, (Leichtbau-) Strukturen, Schließ- und bewegliche Mechanismen, Individualität und Form. Es können große Kräfte im Bereich der Stellteile durch den Nutzer entstehen. Die Temperatur ist von der Umgebungstemperatur abhängig, allerdings muss hier auch durch den direkten Kontakt mit dem Nutzer die Aktivierungstemperatur, Aktivierungsenergie und die Wiederholfrequenz

beachtet werden. Typische Stellwege befinden sich im mittleren Bereich. Abbildung 3.13 zeigt Einsatzmöglichkeiten von ASS bei elektrischen Geräten.

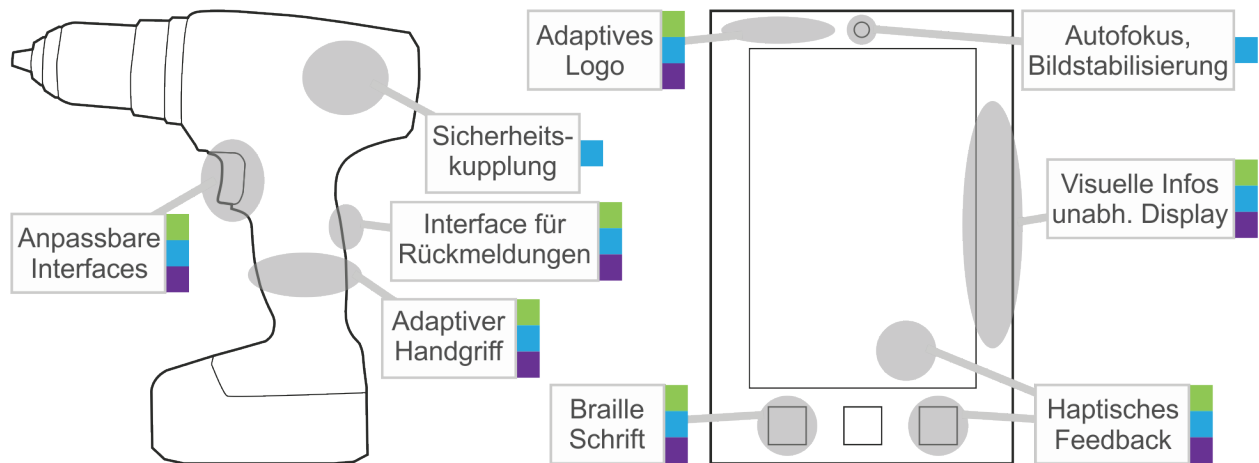


Abbildung 3.13: Einsatzmöglichkeiten ASS bei elektrischen Geräten

3.2.3.5 Automobil

Eine Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten von adaptiven Strukturen und Systemen eröffnet sich im Automobilbereich. Der Einsatz von ASS im Fahrzeugkontext führt zu Gewichtsreduktion, aerodynamischen Verbesserungen und erhöhtem Komfort sowie gesteigerter Ergonomie. Die Mobilität eines Fahrzeugs kombiniert mit der geforderten Ressourcenschonung bedarf eines konsequenten Einsatzes von Leichtbauweisen. Es existieren viele bewegliche Teile, die aktuell hauptsächlich über Elektromotoren angetrieben werden. Da ein Fahrzeug in direktem Kontakt zum Nutzer steht, sind auch Ästhetik und Komfort sehr wichtig. Zusätzlich steigt der Wunsch nach Individualisierung. Mögliche Anwendungen sind die Entwicklung adaptiver Elemente zur Verbesserung der Ergonomie, Individualisierung des Fahrzeug Exterior Designs und Verbesserung und Weiterentwicklung funktionaler Gestaltelemente. Konkrete Einsatzgebiete ergeben sich im Bereich temperaturabhängig zu steuernder Größen, adaptiver Türgriffe, Spiegelverstellung, anpassbarer, aerodynamischer Elemente und Nutzerschnittstellen im Interior. Wichtige Parameter von FGL im Automobilbereich sind Unempfindlichkeit und Zuverlässigkeit, hohe Energiedichte, geringe Komplexität, Funktionsintegration und Bauteilreduktion, Leichtbau, geringer Platzbedarf, Komfort und der Standard-Spannungsbereich. Mögliche Anwendungsgruppen stellen Komfort, (haptische) Interfaces, Sicherheit / Notfall, (Leichtbau-) Strukturen, Aerodynamik, Fluid- / Hydrodynamik, Schließ- und bewegliche Mechanismen, Individualität und Form dar. Im Bereich der Stellteile und Anbauteile können große Kräfte durch den Nutzer oder äußere Einflüsse auftreten. Die Temperatur ist von der Umgebungstemperatur und der Temperatur im Innenraum abhängig, durch den direkten Kon-

takt mit dem Nutzer muss auch die Aktivierungstemperatur und -energie in Betracht gezogen werden. Typische Stellwege befinden sich im mittleren Bereich. Durch die Sicherheitsanforderungen sind Lebensdauer und Einsatzbereitschaft wichtig. Abbildung 3.14 zeigt Einsatzmöglichkeiten von ASS im Automobilbereich.

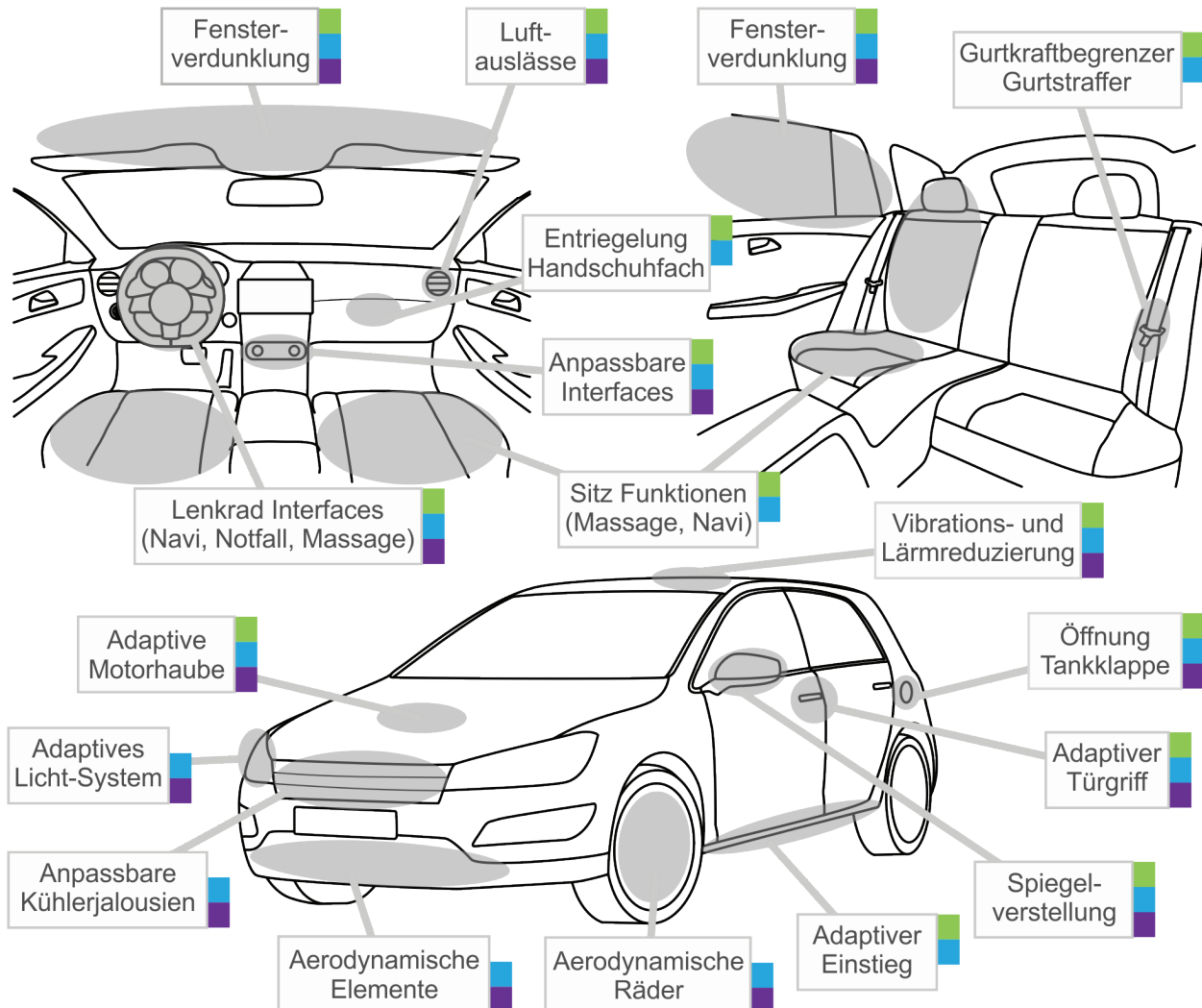


Abbildung 3.14: Einsatzmöglichkeiten ASS im Automobilbereich nach [HEIN ET AL. 2018]

3.2.3.6 Zusammenfassung

Tabelle 3.4 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die in den einzelnen Branchen genutzten Hauptparameter von FGL, die Vorteile von FGL und die Anwendungsgruppen sowie die Zuordnung zu Ergonomie, Design und Technik.

		Bauwesen	Feinwerk- technik	Luftfahrt	Elektrische Geräte	Automobil
Vorteile FGL	Unempfindlichkeit	x	x	x		x
	elektromagnetisch unbedenklich					
	hohe Arbeitsleistung / Volumen		x	x	x	x
	Leichtbau		x	x	x	x
	geräuschlos und reibungsfrei			x	x	x
	Standard-Spannungsbereich		x		x	x
	Kompaktheit		x	x	x	x
	Funktionsintegration	x	x	x	x	x
Einfachheit	x	x	x		x	
Parameter	Temperatur	x		x	x	x
	Spannung / Kräfte	x	x	x	x	x
	Dehnung / Stellweg	x	x	x	x	x
	Frequenz		x	x	x	x
	Lebensdauer	x		x		x
	Aktivierungsenergie		x		x	x
Anwendungsgruppen	Komfort	x	x	x	x	x
	(Haptische) Interfaces		x	x	x	x
	Sicherheit / Notfall	x		x	x	x
	(Leichtbau-)Strukturen	x	x	x	x	x
	Aerodynamik			x		x
	Fluid- / Hydrodynamik	x	x	x		x
	Schließ- und bew. Mechanismen	x	x	x	x	x
	Mikrosysteme		x			
	Ressourcen	x				
	Medizinische Geräte					
	Individualität	x			x	x
	Formgebung	x	x	x	x	x

Tabelle 3.4: Überblick über in den Branchen genutzte Parameter und Vorteile von FGL sowie die enthaltenen Anwendungsgruppen

3.3 Herausforderungen und Potenziale beim Entwurf und Einsatz von ASS

Der Einsatz von ASS weist neben den vielen Vorteilen auch zahlreiche Problematiken und Herausforderungen auf, die es für einen effizienten Einsatz zu bewältigen gilt. Einen zentralen Punkt stellt dabei die Interdisziplinarität dar. Zur Entwicklung und Auslegung von ASS werden unterschiedliche Disziplinen benötigt: Elektronik, Regelungstechnik, Materialwissenschaften, Konstruktionstechnik, Produktgestaltung u. a. Die in Kapitel 2.5 dargestellten Eigenschaften von FGL sowie die hauptsächlichen Anwendungsgebiete weisen unterschiedliche technische Problematiken und Herausforderungen auf. Im Folgenden wird ein Vergleich zwischen den Potenzialen und den zu überwindenden Herausforderungen aufgestellt sowie eine Möglichkeit zur Lösung der Diskrepanz aufgezeigt (Abbildung 3.15).

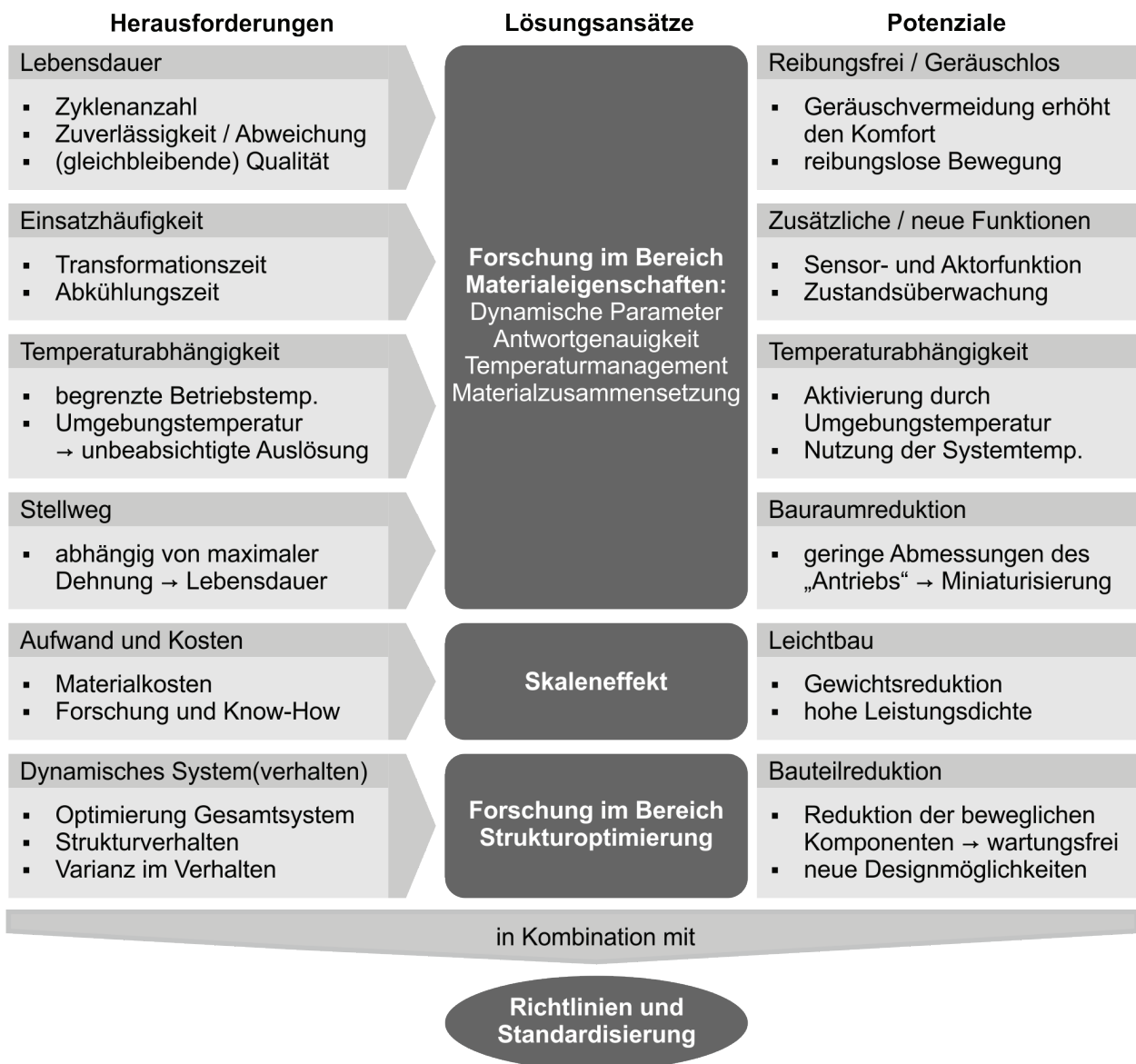


Abbildung 3.15: Herausforderungen und Potenziale von ASS nach [HEIN ET AL. 2018]

Eine große Herausforderung beim Einsatz stellt die Lebensdauer und damit die Zuverlässigkeit dar. Diese unterliegt starken Schwankungen und ist abhängig von Materialparametern wie Herstellung oder Materialzusammensetzung sowie anwendungsbezogenen Parametern wie Stellkraft, Stellweg oder Spannung. Trotz der fortschreitenden Entwicklung von FGL gibt es immer noch starke Qualitätsschwankungen [CZECHOWICZ 2012, S. 46]. Abbildung 3.16 zeigt den Einfluss unterschiedlicher Spannungen auf die Lebensdauer bei einer Vordehnung des Drahtes um 2 % [G.RAU 2020].

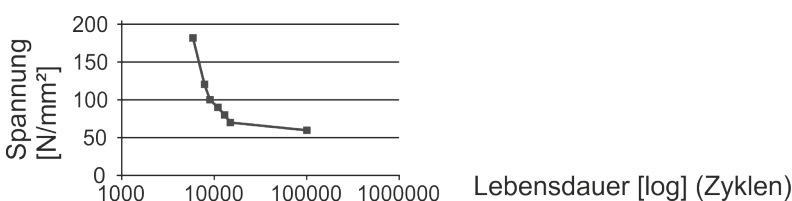


Abbildung 3.16: Zusammenhang zwischen Spannung und Lebensdauer [G.RAU 2020]

Die geforderte Einsatzhäufigkeit ist stark abhängig von der benötigten Umwandlungszeit (Aktivierungs- und Bewegungszeit) sowie der Abkühlzeit. Der Formgedächtnisdraht muss zur Aktivierung bis zu seiner Aktivierungstemperatur A_s aufgeheizt werden. Damit beginnt der Bewegungsvorgang, der bei der Austenit-Finish-Temperatur A_f abgeschlossen ist. Diese Zeitabschnitte sind wiederum abhängig von der Umgebungstemperatur und der mechanischen Last, da sich mit zunehmender Spannung auch die Umwandlungstemperaturen erhöhen (Abbildung 3.17). Um den Vorgang zu wiederholen, muss das Material abgekühlt werden. Bei der Martensit-Start-Temperatur M_s beginnt die Rückumwandlung und ist bei Martensit-Finish-Temperatur M_f abgeschlossen. Durch eine anliegende mechanische Last wird das Material beim Abkühlen gedehnt und der Bewegungszyklus kann erneut starten. Der Abkühlvorgang ist im Vergleich zur Aktivierung langsam, wenn keine weiteren Maßnahmen, wie beispielsweise eine externe Kühlung, ergriffen werden.

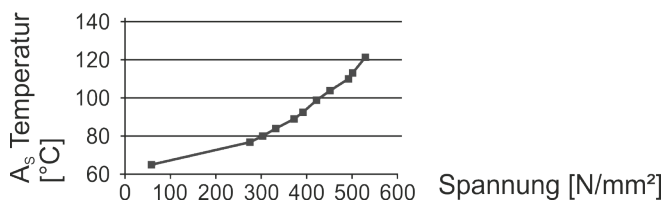


Abbildung 3.17: Zusammenhang zwischen Spannung und Temperatur [G.RAU 2020]

Die Abhängigkeit der Bewegung von der Temperatur wurde bereits im vorherigen Abschnitt angesprochen. In den Einsatzbereichen von ASS wird im Allgemeinen eine volle Funktionsfähigkeit bei jeder möglichen Umgebungstemperatur gefordert. Das System darf in diesem Bereich nicht falsch auslösen oder nicht unvollständig zurückstellen. Dies muss bei der Materialzusammensetzung, der angelegten mechanischen Spannung und den konstruktiven Gegebenheiten berücksichtigt werden. Bei der Abkühlung bewirken dabei Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion den Temperatenausgleich.

Der Stellweg von FGL ist aktuell auf etwa 8 % der Gesamtlänge begrenzt (vgl. Tabelle 2.7). Allerdings ist bei einem Stellweg von 8 % mit einer eingeschränkten Lebensdauer zu rechnen. Empfohlen wird von den Herstellern häufig ein Bereich von 2 - 5 % Dehnung [DYNALLOY 2020]. Größere Stellwege müssen konstruktiv umgesetzt werden. Hier fehlt es jedoch noch an Erfahrung und Konzepten zur Umsetzung, da aktuell vor allem die Regelung, Herstellung und Integration von ASS untersucht werden (vgl. Kapitel 2.6.3).

Aktuell stellen Aufwand und Kosten [LANGBEIN & CZECHOWICZ 2013, S. 35] noch eine Hürde bei der Durchsetzung der FG-Technologie dar. Oft sind Material- und Entwicklungskosten ein Grund, die Technologie nicht einzusetzen. Allerdings sind die Material-

kosten nicht das Hauptproblem. Diese liegen bei den in dieser Arbeit eingesetzten FGL bei 3 - 8 € pro Meter [DYNALLOY 2020], [INGPULS 2020]. Da Richtlinien und Standardisierung noch fehlen, gibt es keine Unterstützung für den Entwicklungsprozess. Try and Error Methoden führen hier zu hohen Kosten und Entwicklungszeiten.

ASS bewegen sich und stellen daher ein dynamisches System dar. Diese Dynamik und Bewegung wird beispielsweise durch die Umgebungstemperatur beeinflusst: Ist es innerhalb des Systems zu warm, kann der Draht möglicherweise nicht mehr vollständig abkühlen, ist es zu kalt, dauert die Erwärmungsphase länger. Dadurch bedingt und durch die unterschiedlichen Aufheiz- und Abkühlzeiten ist der Bewegungsablauf ohne Beeinflussung nicht gleichmäßig. Je nach Anwendungsfall und damit einhergehenden Erfordernissen wie komplizierte, mehrteilige Bewegung, Halten von Zwischenzuständen oder konstruktive Verlängerung des Stellwegs ist der Aufbau und die Auslegung der Grundstruktur kompliziert. Hierbei muss immer die Optimierung des Gesamtsystems, nicht nur einzelner Komponenten beachtet werden.

Den Herausforderungen gegenüber stehen zahlreiche Potenziale, die den Einsatz der FG-Technologie gegenüber konventionellen Technologien bestärken.

Eine Steigerung des Komforts, vor allem im Bereich der Mensch-Maschine-Schnittstelle, kann durch geräuschlose Aktoren erzielt werden. Die Geräuschentwicklung von Elektromotoren oder mechanischen Stellelementen kann zu einer hohen Belastung führen. So ist es auch möglich, dass mit der Zeit ebenfalls Geräusche entstehen, die den Eindruck eines kaputten oder minderwertigen Produkts erwecken. Die Bewegung der FGL erzeugt keine Geräusche und findet nahezu reibungsfrei statt.

Der Einsatz von FGL führt zu einer Funktionsintegration und ermöglicht die Realisierung neuer Funktionen. FGL besitzen sowohl sensorische als auch aktorische Eigenschaften. Ein Formgedächtnisdraht kann sich beispielsweise über die Temperatur selbst regeln. Zur Zustandsüberwachung kann der Widerstand genutzt werden. Auch ist es möglich, durch die Integration der Bewegung, das Produkt direkt an den Nutzer anzupassen.

Die Temperaturabhängigkeit der FGL stellt neben einer Herausforderung auch ein großes Potenzial dar. Durch Nutzung der Umgebungstemperatur kann die Legierung ohne weitere Eingriffe aktiviert und deaktiviert werden. Außerdem kann die benötigte Systemtemperatur für zusätzliche Funktionen genutzt werden, beispielsweise eine Erwärmung eines zu bedienenden Funktionselements.

Die geringen Abmessungen des Drahts als Antrieb und die geringe Anzahl an notwendigen Elementen und Bauteilen machen eine Miniaturisierung möglich. So kann der Bauraumbedarf insgesamt stark reduziert werden und FGL können auch bei beengten Platzverhältnissen eingesetzt werden. Dies kann zu neuen Gestaltungsmöglichkeiten führen.

Ein Formgedächtnisaktor bietet im Vergleich zu einem konventionellen Aktor eine Gewichtseinsparung um bis zu 80 % [CZECHOWICZ 2012, S. 32]. In Bezug auf die Bereiche, in denen die Formgedächtnistechnologie eingesetzt werden kann, kommt es dadurch zu einer großen Gewichts-, Kosten- und Ressourceneinsparung. Im Bereich Automobil, Luft- und Raumfahrt oder auch Feinwerktechnik befinden sich zahlreiche bewegliche Systeme, bei denen Elektromotoren durch Formgedächtnisaktoren ersetzt werden können.

Neben der Gewichts- und Bauraumreduktion, findet auch eine Reduktion der Bauteile statt. Das System besteht neben dem FG-Element aus einer mechanischen Struktur, die die gewünschte Bewegung umsetzt. Damit reduzieren sich die beweglichen Teile erheblich, was zu einer Senkung der Ausfallwahrscheinlichkeit und der Wartung führt. Der einfache und kompakte Aufbau begünstigt eine einfache und schnelle Montage mit einfachen Werkzeugen [STÖCKEL 1988B, S. 135ff] sowie ggf. Demontage und ist damit gut automatisierbar. Durch die Reduktion der Bauteile entstehen neue Designmöglichkeiten.

Lösungsansätze stellen vor allem vier grundlegende Bereiche dar: die Forschung im Bereich Materialeigenschaften, die Nutzung des Skaleneffekts (Steigerung der Produktion durch Wissensaustausch, Automatisierung u. a.), die Forschung im Bereich der Strukturoptimierung sowie die Festlegung von Richtlinien und Standardisierung. Im Bereich der Materialeigenschaften besteht dringender Forschungsbedarf bei dynamischen Parametern, der Antwortgenauigkeit, dem Temperaturmanagement und der Materialzusammensetzung. Um Kosten und Aufwand zu senken, muss die Produktion von smarten Produkten gesteigert werden und diese mehr Produktbereichen zugänglich gemacht werden. Dies kann durch einen interdisziplinären Wissensaustausch und eine Automatisierung der Produktion unterstützt werden. Um die FG-Technologie vollumfänglich nutzen zu können, muss die optimale Performance des ganzen Systems, nicht einzelner Komponenten betrachtet werden. Da der Draht als Antrieb genutzt wird, muss hier sowohl eine Unterstützung der Bewegung stattfinden als auch beispielsweise ein mechanisches Halten der Zwischenzustände. Die kann vor allem durch Forschung im Bereich der Strukturoptimierung unterstützt werden. Die größten Schwächen bestehen aktuell im fehlenden Know-how, das nur in auf FG-Technologie spezialisierten Unternehmen vorhanden ist, sowie fehlende Standardisierung, Richtlinien und Methoden zur Entwicklung.

4 Generierung des Aufbaus adaptiver Strukturen und Systeme

Kapitel 4 beinhaltet die theoretischen Vorüberlegungen zur Generierung des Aufbaus von adaptiven Strukturen und Systemen. Diese setzen sich zusammen aus der Vorgehensweise zur Gestaltung von aktiver und passiver Struktur sowie der Anwendung, der Definition des Bewegungsablaufs und der Ableitung von Parametern. In Kapitel 5 folgt, die auf den Erkenntnissen aus Kapitel 4 aufbauende, praktische Weiterführung der Vorüberlegungen zu einer Vorgehensweise zur Entwicklung von ASS.

4.1 Grundlegender Gestaltaufbau von ASS

Der grundlegende Gestaltaufbau von ASS leitet sich aus dem allgemeinen Gestaltaufbau (Kapitel 2.2) ab. Diese Definition wird auf den Gestaltaufbau von ASS übertragen. Demnach setzt sich dieser aus Funktionsgestalt, Interfacegestalt und Tragwerksgestalt zusammen. Die Funktionsgestalt wird im Fall von ASS durch das Multifunktionselement (FG-Element) abgebildet und ist zur technischen Funktionsfähigkeit notwendig. Sie dient als Antrieb, die eine Bewegung durch Kontraktion ausführt und wird im Folgenden als aktive Struktur (aS) bezeichnet. Der Aufbau der Interfacegestalt wird durch die Anwendung vorgegeben und ermöglicht das Betätigen und Benutzen der technischen Funktionen eines Produkts über Anzeigen und Stellteile. Die Tragwerksgestalt dient zur Positionierung und / oder zum Schutz von Funktion und Interface. Sie wird bei ASS im Folgenden als passive Struktur (pS) bezeichnet. Sie umfasst auch die Führung der aS und bildet allgemein alle Funktionen eines Tragwerks ab. Tabelle 4.1 zeigt die grundlegenden Eigenschaften von Funktions-, Interface- und Tragwerksgestalt des Aufbaus von ASS. Eine ausführliche Beschreibung erfolgt in Tabelle 4.3, 4.6 und 4.7.

Funktionsgestalt - aktive Struktur (aS)	Interfacegestalt - passive Struktur (pS)	Tragwerksgestalt - passive Struktur (pS)
Erfüllung der Funktion: Antrieb zur Umsetzung der Bewegung	Bedienungs- / Betätigungselemente, Benutzeroberfläche: Stellteile und Anzeigen	Tragwerk wie Rahmen, Säulen, Stützen: bewegliches Tragwerk, Aufnahme der aktiven Struktur
Geometrie & Eigenschaften: Draht, Feder oder Blech; funktionell, technisch-physikalisch Material: SM, speziell FGL	Geometrie & Eigenschaften: SE- und BB-Anforderungen Material: abhängig von Anwendung, aS	Geometrie & Eigenschaften: allg. Anforderungen an Tragwerke, SE- und BB-Anforderungen Material: abhängig von aS, Anwendung, Funktionserfüllung
Hauptaufgabe: Bewegung (durch Kontraktion)	Hauptaufgabe: BB & SE gewährleisten	Hauptaufgabe: bewegliches Tragwerk realisieren, Steifheit gewährleisten, aS aufnehmen
Aktivierung über Erwärmung	Aktivierung durch aS	Aktivierung durch aS
Anordnung: innerhalb oder außerhalb der pS	Anordnung: SE- und BB-Anforderungen	Positionierung, Anbindung, Führung des FG-Drahts

Tabelle 4.1: Funktions-, Interface und Tragwerksgestalt bei ASS

Der Aufbau besteht aus der aktiven Struktur, die die Funktionsstruktur abbildet, sowie aus der passiven Struktur, die die Tragwerks- und Interfacegestalt umfasst. Die Anwendung stellt spezielle Anforderungen bezüglich A, Fo, Fa und Gr an die aktive und passive Struktur. Werden die Teilgestalten auf die Bereiche des TD übertragen, so kann zusammenfassend festgestellt werden, dass die Anwendung das Design abbildet, die aktive Struktur die Technik umfasst und die passive Struktur die Ergonomie beinhaltet (Abbildung 4.1). Der Mensch reagiert auf das System über die Wahrnehmung (Sichtbarkeit und Erkennbarkeit) und agiert mit dem System über die Betätigung und Benutzung.

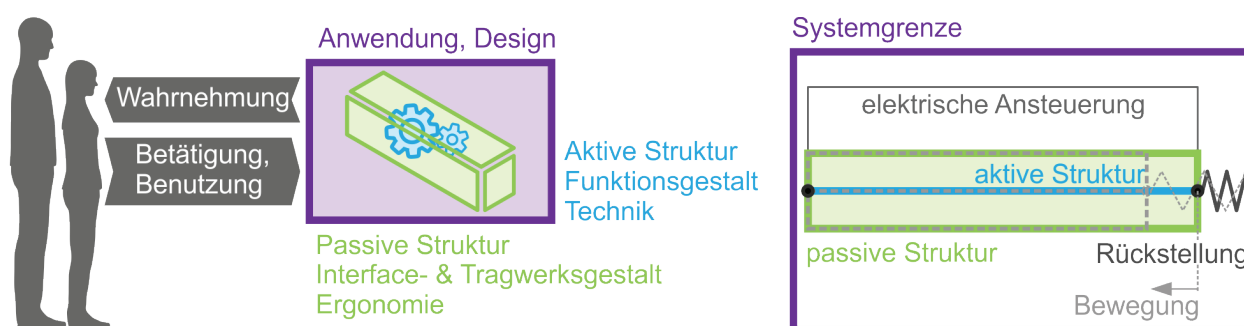


Abbildung 4.1: Übertragung der Teilbereiche des Technischen Designs auf ASS (links) sowie Darstellung der Elemente ASS (rechts)

4.1.1 Passive Struktur (Tragwerks- und Interfacegestalt)

Die Tragwerks- und Interfacegestalt wird bei ASS im Folgenden als passive Struktur bezeichnet. Sie zeichnet sich dadurch aus, dass sie ohne externe Aktivierung (Nutzer oder aktive Struktur) passiv verbleibt. Mithilfe der Aktivierung wird die gewünschte Bewegung bzw. Anpassung durchgeführt. Die aktive Struktur wirkt dabei als Antrieb. Als Grundmaterial wird für die passive Struktur kein smartes Material verwendet. Die passive Struktur setzt sich aus zwei grundlegenden Teilen zusammen: dem flexiblen Teil, der für die Umsetzung der gewünschten Bewegung verantwortlich ist, sowie dem festen Anteil für Anbindung, Drahtlänge, Führung, Position, Steifigkeit, Formgebung u. a. Abbildung 4.2 zeigt beispielhaft eine vereinfachte adaptive Struktur und ihre grundlegenden Bestandteile.

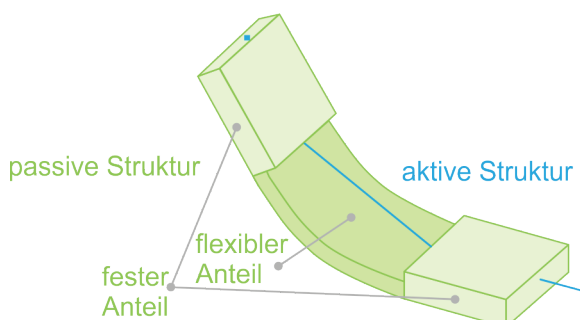


Abbildung 4.2: Aktive und passive Struktur einer vereinfachten adaptiven Struktur

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Tragwerksgestalt. Bei der Verbindung von aktiver und passiver Struktur weisen vor allem das aktive Material und die Tragwerksgestalt eine Vielzahl an Berührungspunkten und Einflussparametern auf. Die Interfacegestalt, die Stellteile und Anzeigen beinhaltet und damit vor allem Anforderungen aus dem Bereich der Sichtbarkeit und Erkennbarkeit sowie Betätigung und Benutzung umfasst, wird bei den Anforderungen an die passive Struktur in diesen Bereichen berücksichtigt.

4.1.1.1 Einordnung beweglicher Tragwerksstrukturen

Die Klassifizierungs- und Einteilungsmöglichkeiten von Tragwerken wurden in Kapitel 2.2.1 beschrieben. Diese Arbeit orientiert sich an den Einteilungen nach MAIER [2019] und BÜTTNER & HAMPE [1984]. Zusätzlich zu den biegesteifen und biegeweichen Tragwerksgestalten wird die bewegliche Tragwerksgestalt hinzugefügt (Abbildung 4.3). Flächen- und stabförmige Tragwerke im Allgemeinen wurden in Kapitel 2.2.1.1 untersucht. Hier liegt der Fokus auf den für ASS essenziellen beweglichen Strukturen.

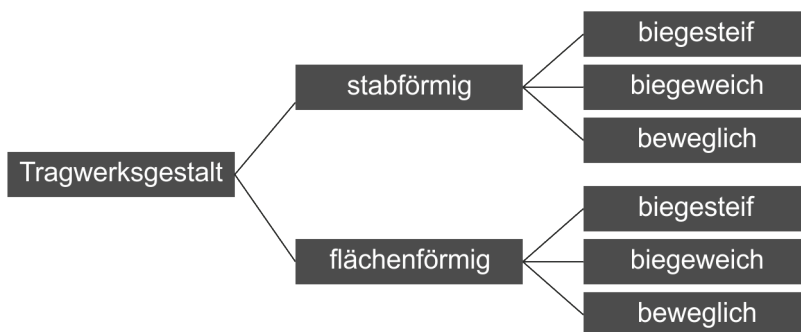


Abbildung 4.3: Einordnung beweglicher Tragwerksstrukturen

Flächen- und stabförmige Tragwerke lassen sich in biegesteife und biegeweiche Strukturen untergliedern. Zu dieser Einteilung werden die beweglichen Tragwerksstrukturen hinzugefügt, die aufgrund der zusätzlichen Anforderungen an die Tragwerksgestaltung und erweiterten Eigenschaften adaptiver Strukturen und Systeme (vgl. Kapitel 2.6 und 3) notwendig werden. Für die Umsetzung von ASS ist diese neue Struktur grundlegend, da die Hauptfunktion der ASS die Anpassung an äußere Bedingungen ist, welche durch Bewegungen umgesetzt wird. Da wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben häufig eingeschränkter Bauraum, größere Stellwege und damit große Verformungen im Bereich des Technischen Designs vorliegen, aber dennoch auch hohe Steifigkeitsanforderungen gelten und unterschiedliche Beanspruchungen auftreten können, sind biegeweiche Tragwerke ungeeignet. Tabelle 4.2 gibt die Haupteigenschaften biegesteifer, biegeweicher und der neuen beweglichen Tragwerksgestalten wieder.

Biegesteif [SEIDEL 2008], [BÜTTNER & HAMPE 1984]	Biegeweich [SEIDEL 2008], [BÜTTNER & HAMPE 1984]	Beweglich
<ul style="list-style-type: none"> • stabförmige Tragelemente: Bogen, Stab (Balken) • flächenförmige Tragelemente: Schalen, Scheiben, Platten 	<ul style="list-style-type: none"> • stabförmige: Seile, Gurte und Keder • flächenförmige: beschichtete Gewebe und Folien, weitgespannte, leichte Flächentragwerke (Membrantragwerke) 	<ul style="list-style-type: none"> • stabförmige: mehrteilige Gelenke, Festkörpergelenke • flächenförmige: mehrteilige Gelenke, Festkörpergelenke • bestehen aus zwei Anteilen: flexibler und fester Anteil
<ul style="list-style-type: none"> • keine Einschränkungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Abmessungen 2D, große Spannweiten und Längen 	<ul style="list-style-type: none"> • keine Einschränkungen
<ul style="list-style-type: none"> • Stabtragwerke: Belastung in der Stabachse (Zug- oder Druckkräfte) oder senkrecht dazu (Biegemomente) • Scheibentragwerke: Belastungsrichtung in Tragwerkebene (TE) • Plattentragwerke: Belastungsrichtung senkrecht zur TE • Schalentragwerke: Flächenlasten mit Normal- und Schubkräften sowie Momenten und Querkräften 	<ul style="list-style-type: none"> • Beanspruchung sowohl bei stab-, als auch bei flächenförmigen Tragwerken vor allem auf Zug • bezüglich Knick- und Beulverhalten in Abhängigkeit der Beanspruchung zum Tragsystem relativ biegeweich 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbindung aus fester und flexibler Struktur: Beweglichkeit in geforderte Richtung wird durch das ausgewählte Tragwerk bestimmt • Beanspruchungen können in allen Richtungen auftreten • Äußere Zusatzlasten müssen beachtet werden • Beanspruchung der passiven Struktur durch die Bewegung der aktiven Struktur
<ul style="list-style-type: none"> • Stabtragwerke erfüllen Tragfunktionen • Flächentragwerke erfüllen Bauwerksfunktionen und Raumbildung 	<ul style="list-style-type: none"> • Seiltragwerke erfüllen Tragfunktionen 	<ul style="list-style-type: none"> • trag- und raumbildende Funktionen • Hauptfunktion: Umsetzung der Bewegung und Gewährleistung der Tragfunktion
<ul style="list-style-type: none"> • steife Verbindung, Biegesteifigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • vernachlässigbare Biegesteifigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • zulassen und unterstützen von großen Verformungen

Tabelle 4.2: Eigenschaften biegesteifer, biegeweicher und beweglicher Tragwerke

Bei der Gestaltung des Tragwerks und damit der passiven Struktur wird zusätzlich auf die Regeln der allgemeinen Tragwerkkonzeption verwiesen (vgl. Kapitel 2.2.1). Das Ziel ist hierbei immer die Realisierung eines beweglichen Tragwerks für ASS.

4.1.1.2 Anforderungen an die passive Struktur

Die Anforderungen an die passive Struktur können grundlegend in drei Gruppen unterteilt werden: die Anforderungen an die Ergonomie, das Design und die Technik (Abbildung 4.4). Im Bereich der Ergonomie wird vor allem die Nutzung analysiert, im Bereich des Designs liegt der Fokus auf den Gestaltungsanforderungen und im Bereich der Technik auf den konstruktiven Anforderungen.

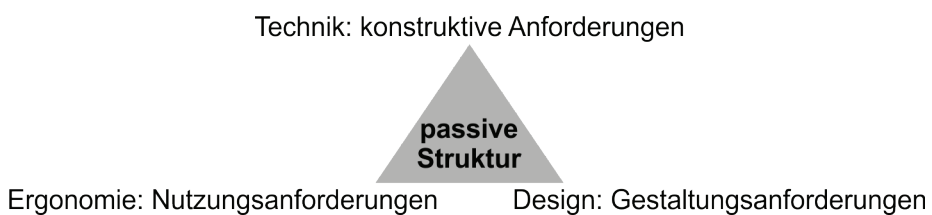


Abbildung 4.4: Grundlegende Anforderungen an die passive Struktur

Die konstruktiven Anforderungen dienen der Funktionserfüllung und beschreiben geometrische Anforderungen, Anforderungen an die Sicherheit und Steifigkeit sowie an die Verbindung von aktiver und passiver Struktur. Sie bestimmen damit deren Geometrie und Auslegung. Die Gestaltungsanforderungen legen die formale Gestaltung, v. a. in Bezug auf Sichtbarkeits- und Erkennbarkeitsanforderungen, fest. Des Weiteren wird das Erscheinungsbild, z. B. über Ordnungsgrad und Symmetrie, entworfen. Nutzungsanforderungen bestimmen die ergonomische Gestaltung der passiven Struktur. Ausgehend von der festgelegten Nutzung findet die Auslegung bezüglich der Betätigung und Benutzung statt. Einen Überblick über wichtige konstruktive Anforderungen sowie Gestaltungs- und Nutzungsanforderungen an bewegliche Tragwerksstrukturen für ASS gibt Tabelle 4.3. Weitere Anforderungen und Parameter werden in Kapitel 4.3 untersucht.

Konstruktive Anforderungen	Gestaltungsanforderungen	Nutzungsanforderungen
Funktionserfüllung: Bewegung ermöglichen	Sichtbarkeits- und Erkennbarkeitsanforderungen	Betätigungs- und Benutzungsanforderungen
geometrische Form: stab- oder flächenförmig, beweglich	formale Gestaltung der Elemente der passiven Struktur: Ordnungsgrad, Symmetrie, Proportionen, Anordnung	ergonomische Gestaltung der Elemente der passiven Struktur: Auslegung bezüglich anthropometrischer Maße
konstruktive Auslegung der Tragwerksgestalt: <ul style="list-style-type: none"> • aS: Positionierung, Führung / Lagerung, Anbindung, Umlenkung der Kraft, Aktivierung • Zu- und Abführung von Wärme • Rückstellung • Sicherheitsanforderungen: z. B. Zuverlässigkeit, Lebensdauer, Versagensgrenzen 	Auslegung der Tragwerksgestalt bzgl. der Gestaltung: <ul style="list-style-type: none"> • kennzeichnender Gestaltaufbau, Erscheinungsbild 	Auslegung der Tragwerksgestalt bzgl. der Nutzung: <ul style="list-style-type: none"> • Sicherheitsanforderungen z. B. Erwärmung, Zusatzlasten durch Betätigung
konstruktive Auslegung der Interfacegestalt (Stellteile & Anzeigen)	formale Gestaltung der Stellteile & Anzeigen: Design	ergonomische Gestaltung der Stellteile & Anzeigen: SE- & BB-Anforderungen
Nutzungsbedingungen bzgl. der auftretenden Spannungen / Kräfte	Nutzungsbedingungen bzgl. der Nutzer: SE-Anforderungen	Nutzungsbedingungen bzgl. der Nutzer: BB-Anforderungen
konstruktive Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe (funktional): mechanisch, physikalisch, thermisch, elektrisch, z. B. Dehnung, Steifigkeit, Fertigungsmöglichkeiten	Design-Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe (visuell & emotional): Oberflächenqualität	ergonomische Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe (haptisch): z. B. Wärmeübertragung an den Nutzer, Griffigkeit

Tabelle 4.3: Anforderungen an bewegliche Tragwerksstrukturen für ASS

4.1.1.3 Umsetzung und Generierung der passiven Struktur

Die Umsetzung der Bewegung der passiven Struktur (bewegliche Tragwerksgestalt) kann einteilig (Festkörpergelenk) oder zweiteilig (mehrteiliges Gelenk) erfolgen (vgl. Kapitel 2.2.1.2). Generell besteht die bewegliche Tragwerksgestalt aus zwei grundlegenden Teilen: dem flexiblen und dem festen (Abbildung 4.2). Der flexible Anteil setzt dabei die

Bewegung um. Dies kann zum einen durch ein Festkörpergelenk (FKG, Materialkombinationen möglich) oder durch ein mehrteiliges Gelenk (MG) erfolgen. Der feste Anteil ermöglicht die Anbindung, Drahtlänge, Führung, Position, Steifigkeit, Formgebung u. a. Die systematische Generierung der passiven Struktur erfolgt über einen morphologischen Kasten [ZWICKY 1966]. Dabei werden die Hauptanforderungen bzw. Hauptauswahlkriterien anhand von Kapitel 4.1.1.1 und 4.1.1.2 festgelegt und mögliche Lösungen dazu erarbeitet. Tabelle 4.4 zeigt den morphologischen Kasten zur Generierung der Aufbaugestalt der passiven Struktur.

Parameter		Ausprägung					
Tragwerk	Tragwerksart	stabförmig	flächenförmig				
	Grundform (GF)	Rechteck	Kreis	Dreieck			
	Variation GF	Anzahl	Größe	Profilverlauf	Anordnung	...	
Bewegung	Ermöglichen der Bewegung	FKG Struktur	FKG Elastizität	FKG Kombi	MG Translation	MG Rotation	MG Kombi
	Kraftumlenkung zur Bewegung	Struktur	Zusatzelement	Konstruktion			
	Zwischenzustände	nein	ja, mechanisch	ja, elektrisch	ja, durch FGL		
	Belastung Bew.	Zug	Druck	Biegung	Torsion	Kombi	
Belastung	Richtung	in Richtung Bewegung	entgegen Bewegung	dynamische Änderung			
	Übertragung	ja	nein	teilweise			
	Art	Zug	Druck	Biegung	Torsion	Kombi	
Funktionsbaugruppen	Führung / Integration aS	innerhalb	außerhalb				
	Verbindung / Anbindung aS & pS	Stoffschluss	Formschluss	Kraftschluss	Reibschluss		
	Rückstellung	Feder	Zusatzgewicht	Zusätzlicher FG-Draht	passive Struktur	Betätigung	
	Zu- & Abführung Wärme / Energie	Umgebung	zusätzliche Elemente	Joulesche Erwärmung			
	Regelung	integriert	außerhalb				
	Energiespeicher	integriert	außerhalb				

Tabelle 4.4: Morphologischer Kasten zur Generierung der Aufbaugestalt der pS

Flächenförmige und stabförmige Tragwerke sowie das Ermöglichen einer Bewegung über Festkörpergelenke (FKG) oder mehrteilige Gelenke (MG) wurde in Kapitel 2.2.1 beschrieben. Die Bewegung wird aufgrund der Wichtigkeit als Hauptfunktion adaptiver Strukturen und Systeme in Kapitel 4.2 betrachtet. Die Verbindung von aktiver und passiver Struktur wird in Kapitel 5.2.2 analysiert. Die weiteren Funktionsbaugruppen werden in Kapitel 4.3.4 und 6 untersucht. Im Folgenden wird auf die Generierung und Variation der Grundform sowie das Ermöglichen der Bewegung eingegangen.

Bei der systematischen Generierung beweglicher Strukturen durch Änderung der Gestalt von Flächen kann die grundlegende Entwicklung beweglicher Strukturen über die Variation der Parameter der Grundgestalten (sowohl für stabförmige als auch flächenförmige Elemente) stattfinden. Die erste Ebene bildet die Variation der Geometrie und Struktur über die Grundformen Rechteck, Kreis und Dreieck. In einem zweiten Schritt finden weitere Modifikationen, wie die Variation der Anzahl, der Größe u. a. statt, vgl. EHRENSPIEL & MEERKAMM [2017, S. 564 - 588]. Eine weitere Möglichkeit, die Bewegung umzusetzen, bietet die Nutzung der Elastizität des verwendeten Materials. Das Material kann flexibel (niedriger E-Modul) oder fest (hoher E-Modul) sein. Eine Variation der Parameter erfolgt bei der Elastizität nicht, da es sich dabei um die Kombination von Geometrie und Struktur mit der Elastizität und damit um die dritte Möglichkeit handelt. Abbildung 4.5 zeigt die Möglichkeiten bei der Vorgehensweise zur Generierung der passiven Struktur.

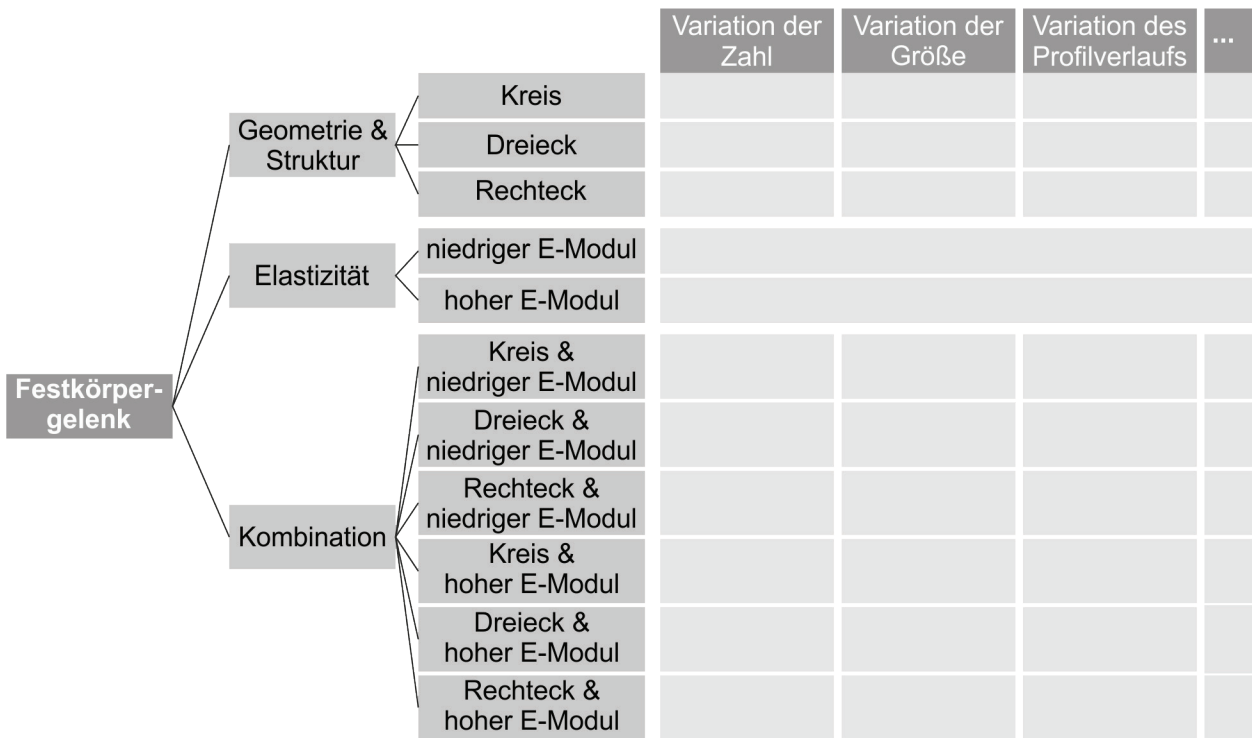


Abbildung 4.5: Systematische Generierung der passiven Struktur

Gestaltungsmöglichkeiten des flexiblen Anteils

Im Folgenden werden Konstruktions- und Gestaltungsmöglichkeiten vorgestellt, um auf bestimmte Beanspruchungsarten zu reagieren, bzw. gezielt eine bestimmte Bewegung zu ermöglichen. Die Tragfähigkeit ergibt sich nicht nur aus den werkstofflichen Kennwerten, sondern auch aus konstruktiven Gegebenheiten. Anhand dieser Empfehlungen kann die in Abbildung 4.5 vorgestellte Matrix ausgefüllt werden. Weiche Strukturen ergeben sich vor allem durch drei Möglichkeiten [ERHARD 2008, S. 223]:

- niedriger E-Modul,
- niedriges Flächenträgheitsmoment (Bauteilgeometrie) und
- beanspruchende Spannung (Beanspruchungsart).

Thermoplastische Elastomere besitzen ein geringes E-Modul und sind daher gut verformbar. Ein geringes Flächenträgheitsmoment gegen Biegung weisen dünnwandige Strukturen auf [ERHARD 2008, S. 225], [EHRENSTEIN 2007, S. 131]. Große Verformungen werden erzielt, indem die Beanspruchung bei weiten Teilen der Struktur auf Biegung oder Torsion stattfindet, feste Strukturen ergeben sich bei Belastung auf Zug- oder Druck [ERHARD 2008, S. 225], [EHRENSTEIN 2007, S. 130].

Biegeweiche bzw. -steife Strukturen werden beispielsweise durch niedrige E-Module von Kunststoffen ermöglicht. Die erzielbare Biegung hängt aber auch stark von der Konstruktion ab. Biegesteife Querschnitte können durch viel Werkstoff in den Randbereichen erreicht werden [ERHARD 2008, S. 299], [EHRENSTEIN 2007, S. 134]. Die Steifigkeit kann zusätzlich durch eine Erhöhung der Wanddicke oder das Hinzufügen von Rippen oder Sicken gesteigert werden [ERHARD 2008, S. 229], [EHRENSTEIN 2007, S. 135]. Das bedeutet, dass die Steifigkeit und Belastbarkeit einer biegeweichen Konstruktion wesentlich von der Querschnittsform und weniger vom Flächeninhalt abhängt. Eine die Biegesteifigkeit kennzeichnende Größe ist das Flächenträgheitsmoment [EHRENSTEIN 2007, S. 135], [STEINHILPER & KAHLE 1981B, S. 1548]. Eine hohe Biegesteifigkeit wird durch möglichst viel Querschnittsanteil in großem Abstand von der Biegeachse erzielt [STEINHILPER & KAHLE 1981B, S. 1549]. Für eine hohe Biegefestigkeit eignen sich Querschnitte mit hohem axialem Widerstandsmoment, was mit einem hohen axialen Flächenträgheitsmoment bei gleichzeitig geringem Randfaserabstand erzielt werden kann. Wird dementsprechend Material von Randbereichen entfernt, ergeben sich biegeweiche Strukturen.

Über torsionsweiche bzw. -steife Strukturen kann eine allgemeine Aussage anhand der Verteilung der Torsionsspannung über den Querschnitt (maximale Spannung in der Randfaser) und der zugehörigen Formel $\tau = T_M / W_t$ getroffen werden. Nach STEINHILPER & KAHLE [1981B, S. 1550] sollen torsionssteife Bauteile als dünnwandige Hohlquerschnitte konzipiert werden. Flächige Bauteile können durch Diagonalverrippung torsionssteif gestaltet werden [EHRENSTEIN 2007, S. 139]. Torsionsweiche Strukturen werden erzielt, indem der Schubfluss am Außenumfang durch Schlitze unterbrochen wird. Ist der Querschnitt am äußeren Umfang offen, so ist er torsionsweich [ebd., S. 135]. Torsionssteif sind geschlossene Profilquerschnitte [ERHARD 2008, S. 229], [EHRENSTEIN 2007, S. 133].

Für druckweiche bzw. drucksteife Konstruktionen gilt, dass zur Erzielung hoher Verformungen in Richtung einer äußeren Druckbelastung, die Umwandlung von Druckspannungen im Bauteil in Schubspannungen [EHRENSTEIN 2007, S. 141] oder Biegespannungen [ERHARD 2008, S. 236] konstruktiv umgesetzt werden kann. Für druckbeanspruchte Bauteile ist das Ziel, eine hohe Festigkeit gegen Knicken, das bedeutet eine hohe Knickkraft F_K , zu erreichen [STEINHILPER & KAHLE 1981A, S. 1517, 1518]. Dies kann durch eine Querschnittsform mit hohem minimalen äquatorialen Flächenträgheitsmoment umgesetzt werden [ebd.]. Im Optimalfall sind druckbeanspruchte Bauteile als dünnwandige, symmetrische, runde oder quadratische Hohlquerschnitte zu konzipieren [ebd.].

Für schubweiche bzw. schubsteife Konstruktionen gibt es keine geeignete Größe zur Beurteilung der Querschnittsformen bei Schubbeanspruchung. Nach STEINHILPER & KAHLE [1981B, S. 1550] gilt die Gestaltungsregel, dass durch die maximal auftretenden Schubspannungen im Bereich der Schwerpunktschwerachse dort viel Werkstoff aufzubringen ist, um eine schubsteife Konstruktion zu erhalten.

Gestaltungsmöglichkeiten für den festen Anteil

Der feste Anteil schließt direkt an den flexiblen Bereich an (vgl. Abbildung 4.2) und dient in erster Linie der Anbindung und Führung der aktiven Struktur und nicht der direkten Umsetzung der Bewegung. Durch die Führung wird die Position der aktiven Struktur innerhalb der passiven Struktur bestimmt. Die geometrische Auslegung des festen Anteils wird anhand der Drahtlänge sowie der Anbringung an das umgebende System festgelegt. Die Geometrie hat damit indirekt Einfluss auf die Bewegung, auch im Hinblick auf das zusätzliche Gewicht, das während des Bewegungsablaufs wirkt. Durch den festen Anteil werden Kraft und Bewegung, die die aktive Struktur auslöst, auf das System übertragen. Bei der Auslegung wird daher analog zur flexiblen Struktur und zur Auslegung von Tragwerken vorgegangen, allerdings existiert keine Bewegung innerhalb des festen Anteils, weshalb hier biegefesten Strukturen Einsatz finden. Für die späteren Prototypen wird der feste Anteil daher vereinfacht als rechteckiger Querschnitt modelliert.

4.1.1.4 Aufbau der Matrix passiver Strukturen

Im Folgenden findet die Generierung passiver Strukturen statt. Dabei wird der feste Anteil wie beschrieben als rechteckiger Querschnitt modelliert und nicht variiert. Der flexible Anteil wird anhand der Erkenntnisse aus Kapitel 2.2.1, 4.1.1 und der Matrix in Abbildung 4.5 entwickelt. Die Vorgehensweise wird an Beispielen (abstrakt und umgesetzt) in Abbildung 4.6 gezeigt. Dabei wird die Umsetzung der Bewegung über das Festkörper-

gelenk anhand der Geometrie und Struktur ausgewählt. Als Grundform wird der Kreis bestimmt. Nachfolgend kann anhand von Variationen die Struktur angepasst werden.

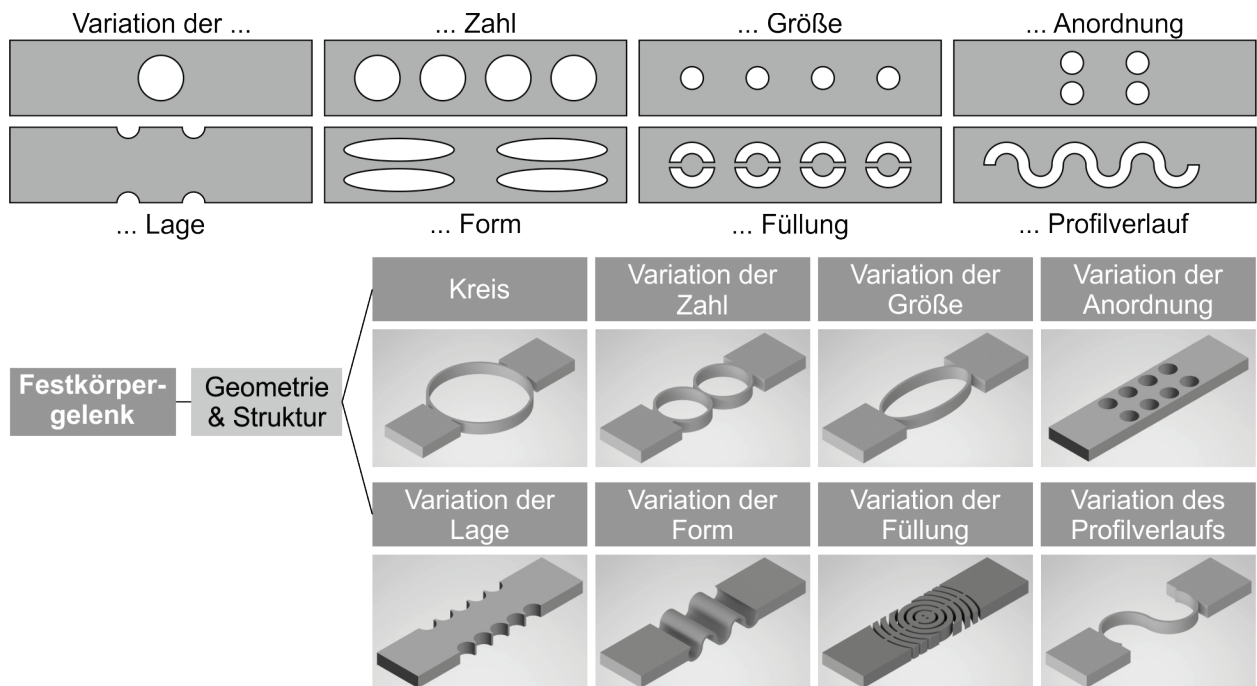


Abbildung 4.6: Beispiel zur systematischen Generierung von flexiblen Strukturen

Eine Kategorisierung der Strukturen kann anhand ihrer Grundform erfolgen. Die Form beschreibt die Gestalt über den Umriss und die äußere Begrenzung. Es wird dabei zwischen unterschiedlichen Arten von Formen unterschieden: von einfachen Grundformen bis hin zu komplizierten Formen als punkt-, linien- oder flächenförmige sowie räumliche Formen (Abbildung 4.7). Grundformen stellen dabei Dreieck, Rechteck (Quadrat) und Ellipse (Kreis) [HAMMER 2008, S. 287] dar. Der Punkt ist das kleinste und einfachste Formelement [ebd., S. 73], das mit zunehmender Größe zur Fläche wird. Eine Linie entsteht durch eine Aneinanderreihung von Punkten und eine Fläche ergibt sich durch die Erweiterung der Linie um eine zweite Dimension (Länge und Breite) oder der Erhöhung der Stärke eines Punktes [ebd., S. 74f]. Durch das Hinzufügen einer dritten Dimension (Länge, Breite und Höhe) entsteht ein Körper im Raum, dessen Form durch den Verlauf der Oberfläche (gerade, konvex oder konkav) gekennzeichnet ist.

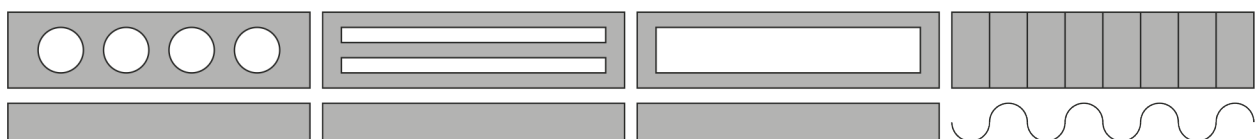


Abbildung 4.7: Punkt-, linien- und flächenförmige sowie räumliche Formen

Abbildung 4.8 stellt die Variation der Struktur mit den Grundformen (GF) für flächen- oder stabförmige Tragwerke dar. Die Struktur kann verändert und flexibler gestaltet werden,

indem Material entfernt wird (ME). Diese Entfernung kann nach den Grundformen, sowie der Art (Punkt, Linie, Fläche, Körper) eingeteilt werden. Innerhalb der Bereiche Punkt, Linie, Fläche und Körper wird auf die Gestaltanpassung in Abbildung 4.5 und 4.6 sowie bei EHRENSPIEL & MEERKAMM [2017, S. 564 - 588] zurückgegriffen. So kann zum einen die Flexibilität über die Elastizität des Materials angepasst werden, oder eine Gestaltvariation durch Variation der Struktur der ME durch Größe, Anzahl usw. stattfinden.

GF ME		Punkt	Linie	Fläche	Körper
flächennormig / stabnormig	●				
	■				
	▲				
	●				
	▲				
	▲				
	●				
	■				
	▲				

Abbildung 4.8: Matrix zur Generierung und Einteilung der passiven Struktur

Im weiteren Verlauf der Arbeit findet die Fokussierung auf flächennormige Festkörpergelenke (FKG) statt. Diese verstärken den Vorteil des minimalen Bauraums der FG-Drähte. Zusätzlich wird das Leichtbaupotenzial gesteigert, da bei einem mehrteiligen Gelenk (MG) die höhere Anzahl an Bauteilen für eine Erhöhung des Gewichts sorgen. Durch die Anzahl der Bauteile wird bei einem MG die Komplexität erhöht, ein FKG zeichnet daher die Einfachheit aus. Durch die Anzahl der Teile und die Komplexität ist eine Führung des Drahts innerhalb des MG schwer bzw. teilweise nicht möglich. Des Weiteren sind MG wie auch stabnormige FKG in der Literatur bereits stark vertreten (vgl. Kapitel 2.2.1.2), flächennormige FKG wurden bisher noch nicht eingehend analysiert. Sie besitzen durch ihre Eigenschaften ein hohes Potenzial beim Einsatz in ASS mit FGL, da sie, wie beschrieben, die Hauptvorteile der FGL (vgl. Abbildung 3.6) unterstützen und verstärken. Des Weiteren bieten FKG im Allgemeinen durch ihre Eigenschaften wie Gewichtseinsparung, verschleiß- und geräuschfreie Bewegung sowie Verringerung von Komplexität und Bauraum (vgl. Kapitel 2.2.1.2) Vorteile beim Einsatz in den definierten Anwendungsgruppen und Branchen adaptiver Strukturen und Systeme (vgl. Kapitel 3.2.3.6). Abbildung 4.9 zeigt beispielhaft die Anwendung der Vorgehensweise zur systematischen Generierung flächennormiger, beweglicher Tragwerke.

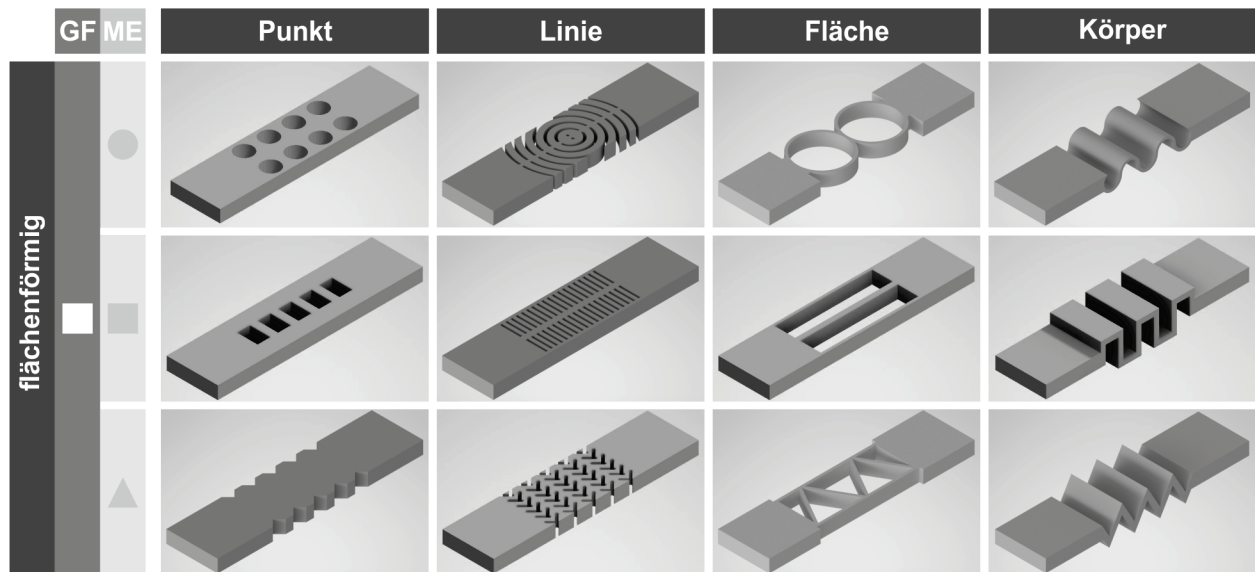


Abbildung 4.9: Matrix mit Beispielen zu flächenförmigen, beweglichen Tragwerken

4.1.2 Aktive Struktur (Funktionsgestalt)

Die aktive Struktur stellt die Funktionsgestalt dar und ist zur technischen Funktionsfähigkeit notwendig. Sie dient als Antrieb für die Umsetzung der benötigten Bewegung. Wie in Kapitel 2.4.3 beschrieben, wird als Material für die aktive Struktur die Formgedächtnislegierung gewählt. Bei der aktiven Struktur handelt es sich in der vorliegenden Arbeit um einen FG-Draht. Die Drahtform weist Vorteile auf, die für diese Arbeit wichtig sind. Die Temperaturverteilung ist aufgrund des einfachen, gleichbleibenden Querschnitts homogener als bei einer Feder oder einem Blech. Dadurch ist auch eine schnelle Wärmeabfuhr möglich. Der einfache Querschnitt eignet sich des Weiteren sehr gut für die Verbindung mit und die Anbindung an die passive Struktur sowie die Führung innerhalb dieser. Die Geometrie unterstützt die Umsetzung der Hauptvorteile der FGL (vgl. Abbildung 3.6), z. B. aufgrund des geringen Bauraumbedarfs und der niedrigen Komplexität. Für flächenförmige Festkörpergelenke eignet sich die Drahtform im Besonderen.

Tabelle 4.5 zeigt die Daten der für diese Arbeit definierten FG-Drähte. Es wurden Hersteller gewählt, deren Produkte eine gute Verfügbarkeit aufweisen. Zudem wurde Flexinol von DYNALLOY [2020] bereits in der Forschung erfolgreich eingesetzt (vgl. Tabelle 5.3). Flexinol ist ein FG-Draht der Firma DYNALLOY [2020] aus Kalifornien, der sich wie ein Muskel verformt. Positiv ist das Vorhandensein von technischen Daten. Allerdings können keine individuellen Drähte bestellt werden. INGPULS [2020] mit Sitz in Bochum produziert Produkte auf FG-Basis. Die Drähte werden je nach Kundenwunsch hergestellt, wodurch keine technischen Daten vorliegen. Als aktive Struktur werden FG-Drähte der Hersteller mit unterschiedlichen Durchmessern und Zusammensetzungen beschafft. Die

Umwandlungstemperatur gilt für den unbelasteten Zustand. Für Flexinol ist die Fließspannung ($\sigma_{\text{fließ}}$) für eine einzelne Kontraktion, die abgeleitete maximal zulässige Spannung für zyklische Bewegungen ($\sigma_{\text{zul., max}} = 2/3 \sigma_{\text{fließ}}$), die maximal, sichere Spannung für mögliche Anwendungen ($\sigma_{\text{empf.}}$) sowie die empfohlene Spannung ($\sigma_{\text{zykl.}}$) für zyklische Beanspruchung mit minimaler verbleibender Deformation angegeben [DYNALLOY 2020].

Hersteller & Bezeichnung		Dehnbereich [%]	Umwandlungstemp. A_r [°C]	Durchmesser [mm]	Widerstand [Ohm/m]	$\sigma_{\text{fließ}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{zul., max}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{empf.}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{zykl.}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{Rückstellung}} (\epsilon = 5 \%)$ [MPa]	Kraft bei Erwärmung [g]	Kraft bei Abkühlung [g]	Strom (1s Kontraktion) [mA]	Abkühlzeit [s]
Dynalloy Flexinol		2..5	70	0,25	18,5	345	230	172	138	103	891	356	1050	5,4
			70	0,38	8,3						2004	900	2250	10,5
ingpuls	NiTi	3..4	90	0,15										
	NiTiCu		55	0,2										
	NiTiCu		65	0,5										

Tabelle 4.5: Daten der eingesetzten FG-Drähte [INGPULS 2020], [DYNALLOY 2020]

Technisch relevant ist vor allem der zyklische Einwegeffekt (Kapitel 2.5.2.1), der daher in dieser Arbeit Anwendung findet. Der Draht durchläuft bei Aktivierung eine Kontraktion, die als Antriebsbewegung dient und über die konstruktive Auslegung der passiven Struktur sowie die Positionierung des FG-Elements innerhalb der passiven Struktur in eine Bewegung des Systems umgewandelt und übertragen wird. Die Aktivierung erfolgt über Temperatur oder Spannung (Kapitel 2.5). Die Regelung kann als Lage- / Positionsregelung über Kraft oder Dehnung oder widerstandsbasiert erfolgen (Kapitel 2.3.3).

Wie die Anforderungen an die passive Struktur, können auch die Anforderungen an die aktive Struktur den Gebieten Ergonomie, Design und Technik zugeordnet und damit in Nutzungs- und Gestaltanforderungen sowie konstruktive Anforderungen unterteilt werden. Die konstruktiven Anforderungen bestimmen die geometrische Form der FGL sowie die mechanischen und physikalischen Parameter. Die Gestaltungsanforderungen können auf die Sichtbarkeits- und Erkennbarkeitsanforderungen eingegrenzt werden. Das FG-Element kann für den Nutzer sichtbar oder unsichtbar angebracht werden. Die Nutzungsanforderungen beschreiben die Anforderungen in Bezug auf eine ergonomische Gestaltung. Hier werden vor allem die Anforderungen, die für den Nutzer des adaptiven Systems von Bedeutung sind, betrachtet. Dabei kann auch durch entsprechende Gestaltung der passiven Struktur Einfluss genommen werden. Einen Überblick über wichtige konstruktive Anforderungen sowie Gestaltungs- und Nutzungsanforderungen an die aktive Struktur von ASS gibt Tabelle 4.6. Eine genauere Untersuchung erfolgt in Kapitel 4.3

Konstruktive Anforderungen	Gestaltungsanforderungen	Nutzungsanforderungen
Funktionserfüllung: Bewegung durch Kontraktion	Sichtbarkeits- und Erkennbarkeitsanforderungen	Betätigungs- und Benutzungsanforderungen
geometrische Form (Draht, Feder, Blech) und Abmessungen		
konstruktive Auslegung Funktionsgestalt: <ul style="list-style-type: none"> Anbindung an die pS Rückstellung Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanforderungen, Lebensdauer, Versagensgrenzen zusätzliche Belastungen z. B. durch Nutzer oder Gewicht pS 	Auslegung der Funktionsgestalt bzgl. der Gestaltung: <ul style="list-style-type: none"> kennzeichnender Gesteltaufbau, Erscheinungsbild 	Auslegung der Funktionsgestalt bzgl. der Nutzung: <ul style="list-style-type: none"> Sicherheitsanforderungen z. B. Erwärmung, Zusatzlasten durch Betätigung
Nutzungsbedingungen bzgl. der auftretenden Spannungen / Kräfte	Nutzungsbedingungen bzgl. der Nutzer: SE-Anforderungen	Nutzungsbedingungen bzgl. der Nutzer: BB-Anforderungen
konstruktive Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe (funktional): mechanisch, physikalisch, thermisch, elektrisch, z. B. Kraft bei Erwärmung, Hysterese, Einsatzbereich (ertragbare Spannung & Dehnung), Umwandlungstemperatur, Aktivierungs- & Deaktivierungszeit	Design-Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe (visuell & emotional): Wahrnehmung der Bewegung, der „Intelligenz“ der Struktur	ergonomische Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe (haptisch): z. B. Wärmeübertragung an den Nutzer, Umwandlungstemperatur, Gleichförmigkeit der Bewegung, Geräusche

Tabelle 4.6: Anforderungen an die aktive Struktur für ASS

4.1.3 Anwendung

Die Anwendung gibt die Randbedingungen vor, die auf die aktive und passive Struktur wirken und nach denen diese ausgelegt werden. Diese Randbedingungen unterscheiden sich je nach Anwendungsfall. Sie ergeben sich aus den Anwendungsmöglichkeiten der ASS (vgl. Kapitel 3.2, speziell Kapitel 3.2.3.6). Beispiele sind die geforderten Nutzungsbedingungen, die Einsatztemperatur, der notwendige Stellweg sowie das Vorhandensein einer Bedienung.

Die Anforderungen im Bereich der Anwendung werden bei ASS nicht an die Anwendung gestellt, sondern resultieren aus der Anwendung und beziehen sich auf die aktive und passive Struktur. Die Einteilung erfolgt ebenfalls anhand der Gebiete Ergonomie, Design und Technik und umschließt damit die Nutzungs- und Gestaltungsanforderungen sowie die konstruktiven Anforderungen (Tabelle 4.7).

Die konstruktiven Anforderungen gliedern sich in geometrische Anforderungen, Anforderungen an die Auslegung der passiven Struktur bezüglich Sicherheit und Festigkeit sowie Anforderungen an die aktive Struktur hinsichtlich der notwendigen Bewegung und Aufnahme bzw. Abgabe von Kräften. Die Gestaltungsanforderungen umschließen Sichtbarkeits- und Erkennbarkeitsanforderungen sowie das Erscheinungsbild der passiven Struktur. Die Nutzungsanforderungen betreffen Betätigungs- und Benutzungsanforderungen.

Konstruktive Anforderungen	Gestaltungsanforderungen	Nutzungsanforderungen
Funktionsanforderungen: notw. Bewegung, Häufigkeit & Anpassung	Sichtbarkeits- und Erkennbarkeitsanforderungen	Betätigungs- und Benutzungsanforderungen
Vorgabe des Bauraums und des Gewichts	Vorgaben zur formalen Gestaltung: Ordnungsgrad, Symmetrie, Proportionen, Anordnung	Vorgaben zur ergonomischen Gestaltung: anthropomorphe Formgebung
konstruktive Anforderungen an Tragwerks- und Funktionsgestalt <ul style="list-style-type: none"> • Sicherheit & Zuverlässigkeit • Versagensgrenzen • ertragbare Kräfte / Spannungen • zusätzliche Belastungen • Einsatztemperaturen 	Anforderungen an Tragwerks- und Funktionsgestalt bzgl. der Gestaltung: <ul style="list-style-type: none"> • Vorgabe der Wirkung des Erscheinungsbilds 	Anforderungen an Tragwerks- und Funktionsgestalt bzgl. der Nutzung: <ul style="list-style-type: none"> • Sicherheitsvorschriften z. B. gegen Erwärmung • Vorgabe von Zusatzlasten durch Betätigung
konstruktive Anforderungen an die Interfacegestalt: notwendige Stellteile & Anzeigen	formale Gestaltung der Stellteile & Anzeigen: Design & Wahrnehmung	Ergonomische Anforderungen an Gestaltung der Stellteile & Anzeigen: SE-, BB-Anf.
Nutzungsbedingungen bzgl. der auftretenden Spannungen / Kräfte	Nutzungsbedingungen bzgl. der Nutzer: SE- Anforderungen	Nutzungsbedingungen bzgl. der Nutzer: BB-Anforderungen

Tabelle 4.7: Anforderungen aus der Anwendung an die aktive und passive Struktur

4.2 Bewegungsablauf von ASS

Die Durchführung der Bewegung und damit die Anpassung ist die Hauptfunktion von ASS zur Erfüllung der an sie gestellten Aufgabe. Daher wird in diesem Kapitel genauer auf die im morphologischen Kasten (Tabelle 4.4) angesprochenen Ausprägungen der Bewegung eingegangen. Zunächst wird ein Überblick über die allgemeine Beanspruchung, Steifigkeit und das Flächenträgheitsmoment gegeben. Darauf aufbauend werden die Gestaltungsmöglichkeiten zur Realisierung der Bewegung diskutiert und Bewegungsrichtungen sowie Bewegungsarten abgeleitet.

4.2.1 Beanspruchung, Steifigkeit und Flächenträgheitsmoment

Die Festigkeitslehre bildet die Grundlage für die Berechnung der auftretenden Beanspruchungen und damit der Auslegung der Konstruktion. An dieser Stelle wird auf die Werke der Mechanik und Festigkeitslehre (vgl. Kapitel 2.6.1) sowie speziell im Bereich der Kunststoffe [EHRENSTEIN 2011] verwiesen und eine kurze Zusammenfassung der für diese Arbeit relevanten Grundlagen gegeben.

Wichtig in Bezug auf das Zusammenspiel von aktiver und passiver Struktur sowie der Bewegung sind die Verteilung der inneren Kräfte und die dadurch hervorgerufenen elastischen und / oder plastischen Formänderungen. Die Längenänderung eines Elements pro Längeneinheit wird auch als Dehnung bezeichnet. Bei Kunststoffen überlagern sich drei Verformungsanteile [EHRENSTEIN 2011, S. 209]: spontan elastische (reversibel), zeitabhängig viskoelastische (reversibel) und zeitabhängig viskose (irreversibel) Anteile.

Wichtige Festigkeitswerte sind die Streckspannung σ_s , die Zugfestigkeit σ_B , und die Bruchspannung σ_R [Ehrenstein 2011, S. 217]. Weitere Kennwerte sind die Schubfestigkeit, Druckfestigkeit und Biegefestigkeit [Ehrenstein 2011, S. 217].

Die Verformung wird über Streck- und Bruchdehnung, Elastizitätsmodul sowie Sekanten-, Tangenten- und Kriechmodul charakterisiert [EHRENSTEIN 2011, S. 220]. Die Steifigkeit und Verformbarkeit hängen von den Werkstoffeigenschaften und der Geometrie des Bauteils ab (vgl. Kapitel 4.1.1.3). Hier bilden Querschnittsfläche und Flächenträgheitsmoment eine geeignete Größe zur Vergleichbarkeit und Beschreibung (vgl. Kapitel 4.1.1.3). Allgemein gibt das Flächenträgheitsmoment die Abhängigkeit vom Querschnitt bei der Belastung durch Biegung- oder Torsionsbeanspruchung an. Einen Überblick der Flächenträgheitsmomente verschiedener Geometrien geben STEINHILPER & KAHLE [1981A, S. 1517].

4.2.2 Gestaltungsmöglichkeiten zur Realisierung der Bewegung

In Kapitel 2.2.1.2 und 4.1.1 wurde auf die Bewegung der passiven Struktur eingegangen, die sich über die Parameter

- des Materials (elastische Verformbarkeit, angepasste Geometrie & Struktur) oder
- der flexiblen Verbindung (Gelenke, mechanische Führungselemente)

realisieren lässt (Abbildung 4.10). Dieser Ansatz wurde in zwei Studien durch den Verfasser untersucht [HEIN ET AL. 2019], [OBERHOFER & HEIN ET AL. 2019].



Abbildung 4.10: Grundlegende Gestaltungsmöglichkeiten der passiven Struktur zur Realisierung der Bewegung nach HEIN ET AL. [2019]

4.2.3 Bewegungsrichtungen

Die Bewegung von ASS ergibt sich aus der Positionierung der aktiven Struktur innerhalb der passiven Struktur sowie der aktiven Struktur zueinander. Die aktive Struktur übt während ihrer Aktivierung, je nach konstruktiver Auslegung der passiven Struktur und ihrer Positionierung innerhalb dieser, auf die passive Struktur die Grundbelastungsarten Zug, Druck, Biegung, Schub oder Torsion aus. Dadurch kann sowohl eine rotatorische als auch eine translatorische Bewegung erzeugt werden. Des Weiteren ist eine gemischte Bewegung bei einer Überlagerung von Translation und Rotation möglich.

Neben der Positionierung beeinflusst auch der eingesetzte FG-Effekt (vgl. Kapitel 2.5.2) die Richtung und Art der Bewegung. Während beim Einwegeffekt eine Verkürzung beim

Übergang von Martensit zu Austenit auftritt, kann beim Zweivegeeffekt durch das Einprägen einer Form der Bewegungsablauf gesteuert werden. Beim pseudoelastischen Effekt ist der Werkstoff bei Einwirkung einer mechanischen Belastung stark verformbar und kehrt bei Entlastung selbstständig wieder in seine Ausgangsform zurück.

Aufgrund der möglichen hohen Kraftverrichtung bei Verformung wird der Einwegeeffekt mit zyklischer Nutzung durch eine Rückstellkraft in technischen Anwendungen am häufigsten eingesetzt (vgl. Kapitel 2.5.2.1). Da in diesem Fall die Bewegung aus einer linearen Verkürzung (Kontraktion) des Drahts entsteht, muss die gewünschte Bewegung durch die Positionierung innerhalb der passiven Struktur sowie die konstruktive Auslegung der passiven Struktur erzielt werden. Im Folgenden wird ein Überblick zur Positionierung des aktiven Elements (in blau) innerhalb (gestrichelte Linie) und außerhalb (durchgezogene Linie) der passiven Struktur gegeben. Es werden dabei die unterschiedlichen Belastungsfälle analysiert und Bewegungsrichtungen aufgezeigt.

Zug / Druck: Durch eine Belastung der passiven Struktur auf Zug und Druck, kann eine lineare Bewegung erzielt werden. Dazu wird die aktive Struktur innerhalb der neutralen Faser des Bauteils geführt oder durch eine entsprechende Konstruktion über einen einseitigen Ziehmechanismus außerhalb der Struktur angebracht (Abbildung 4.11).

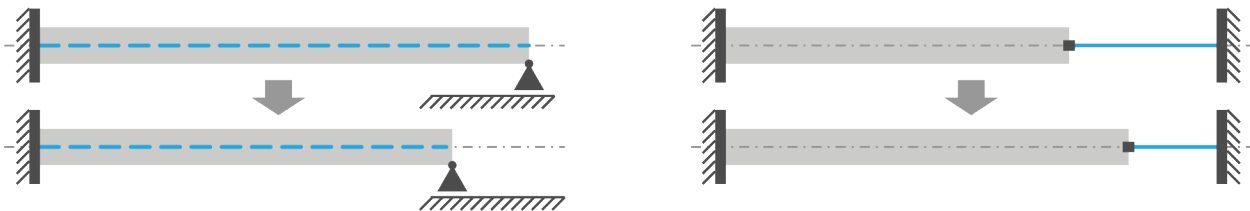


Abbildung 4.11: Zug- / Druck-Belastung durch die Führung des aktiven Elements innerhalb (links) oder außerhalb (rechts) der Struktur

Biegung: Die passive Struktur wird durch die Führung des Drahtes außerhalb der neutralen Faser auf Biegung belastet. Es entsteht eine Durchbiegung oder eine rotatorische Bewegung quer zur Biegelinie (Abbildung 4.12). Bei der Führung außerhalb der Struktur ist ein größerer Abstand möglich.

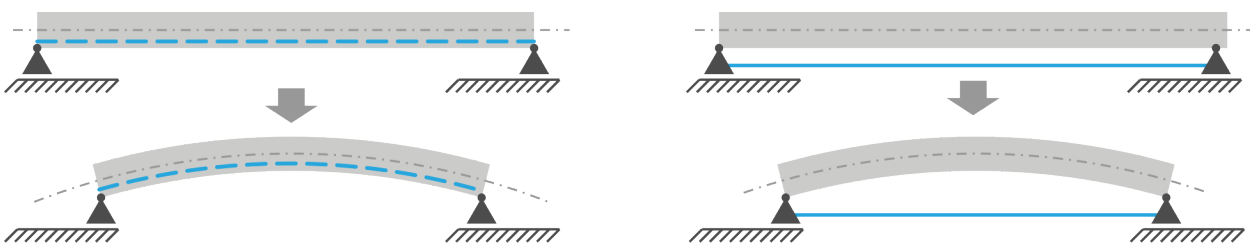


Abbildung 4.12: Biegebelastung durch die Führung des aktiven Elements innerhalb (links) oder außerhalb (rechts) der Struktur

Torsion: Durch die gekreuzte Führung des Drahts außerhalb der neutralen Faser wird die passive Struktur tordiert. Es entsteht eine rotatorische Bewegung nahezu in Drahtlängsrichtung (Abbildung 4.13).

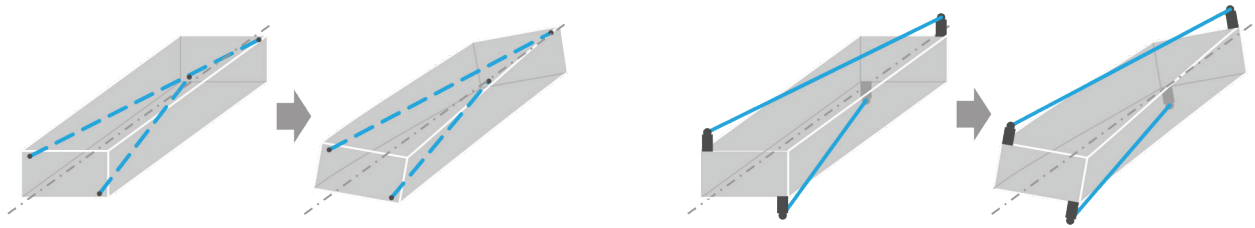


Abbildung 4.13: Torsion durch die Führung des aktiven Elements innerhalb (links) oder außerhalb (rechts) der Struktur

Schub / Scherung: Die Belastung durch Schub / Scherung ist häufig ein ungewünschter Nebeneffekt und wird nicht berücksichtigt, da keine direkt nutzbare Bewegung entsteht.

4.2.4 Bewegungsarten

Unter der Bewegungsart wird die Art und Weise verstanden, auf die sich ASS bewegen. Unterschieden wird dabei zwischen gleichförmiger und ungleichförmiger, unterbrochener oder ununterbrochener sowie direkter und indirekter Bewegung. Die Gleichförmigkeit der Bewegung ist abhängig von der Art der Erwärmung und der Legierung. Die Bewegung kann mechanisch durch Halteelemente oder durch Anpassung der Energiezufuhr unterbrochen werden. Die Bewegung der aktiven Struktur kann direkt an das System weitergegeben werden oder indirekt (z. B. durch entsprechende Anordnung oder konstruktive Auslegung) umgesetzt werden.

Die Bewegungszustände von ASS umfassen den Anfangs- und Endzustand während der Aktivierung sowie mögliche Zwischenzustände. Der Anfangszustand beschreibt den Zustand von passiver und aktiver Struktur in ihrer verbundenen, nicht aktivierten Gestalt. Der Endzustand der Aktivierung tritt ein, wenn sich die aktive Struktur im austenitischen Zustand befindet und die passive sowie aktive Struktur damit maximal verformt sind. Zwischenzustände treten zwischen der Anfangs- und Endposition auf. Sie resultieren aus der Vorgabe, ASS an bestimmten Positionen zu halten. Dies kann durch konstruktive Auslegung (mechanische Feststellung, Bremse) oder Anpassung der Energiezufuhr erfolgen.

4.2.5 Einfluss der aktiven und passiven Struktur auf die Bewegung

Einen Einfluss auf die Bewegung haben zum einen die Parameter, die die Bewegung direkt betreffen. Dazu gehören, wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, die Bewegungsrichtung und die Bewegungsart. Des Weiteren beeinflusst die Wahl der Le-

gierungsart und die Länge der aktiven Struktur die Bewegung. Die Legierungsart wirkt sich auf die maximal mögliche Dehnung aus. Zusammen mit der Drahtlänge kann daraus die Länge der Kontraktion berechnet werden, die die maximal mögliche Bewegung der aktiven Struktur darstellt (vgl. Kapitel 2.4.2.1 und 4.1.2).

Zusätzlich wirken sich weitere Parameter indirekt auf die Bewegung aus. Dazu zählen vor allem die vorherrschende Belastung und der zur Verfügung stehende Bauraum. Daher ist die aktive Struktur innerhalb der passiven Struktur entsprechend zu positionieren, damit keine zusätzliche Belastung auf den Draht wirkt und dadurch der Bewegung entgegenwirkt. Der verfügbare Bauraum bestimmt den zur Verfügung stehenden Bereich, um die aktive Struktur zu positionieren und hat daher Auswirkungen auf die konstruktive Umsetzung der Bewegung. Des Weiteren wird über den Bauraum die Drahtlänge eingeschränkt. Tabelle 4.8 fasst die Bewegungsparameter sowie den Einfluss von Geometrie und Auslegung der aktiven und passiven Struktur auf die Bewegung zusammen.

Bewegungsparameter	Aktive Struktur (aS)	Passive Struktur (pS)
Bewegungsrichtung	<ul style="list-style-type: none"> • Anordnung zueinander • Positionierung in Struktur • FG-Effekt 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbindung aS & pS • Auslegung Struktur
Bewegungsart	<ul style="list-style-type: none"> • Art der Erwärmung • phys. Eigenschaften • Anordnung • Halten über konstante Temperatur 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbindung aS & pS • Positionierung Draht in Struktur • Auslegung Struktur (z. B. Wärmeabfuhr) • Halten über mechanische Konstruktion
Bewegungslänge	<ul style="list-style-type: none"> • Drahtlänge • Anordnung Draht 	<ul style="list-style-type: none"> • Auslegung Struktur • Steifigkeit
Belastungsart, äußere Belastung	<ul style="list-style-type: none"> • Anordnung zueinander • Positionierung in Struktur • Drahtanzahl 	<ul style="list-style-type: none"> • Auslegung Struktur • Positionierung Draht (Entkopplung) • Verbindung aS & pS
Verfügbare Bauraum	<ul style="list-style-type: none"> • Drahtlänge • Anordnung Draht • Drahtanzahl 	<ul style="list-style-type: none"> • konstruktive Auslegung (Bewegungsübertragung, zusätzliche Kühlelemente)

Tabelle 4.8: Einfluss von Geometrie und Auslegung der aS und pS auf die Bewegung

4.3 Parameter zur Entwicklung von ASS

In den vorausgegangenen Kapiteln wurden Parameter bezüglich ASS angesprochen: physikalischen Eigenschaften (Kapitel 2.4.2.1 und 2.5), Regelungstheorien (Kapitel 2.3.3), Geometrie und Aufbaugestalt (Kapitel 2.1, 2.2.1, 4.1.1 und 4.1.2) sowie Bewegungen und daraus entstehende Beanspruchungen (Kapitel 4.2). Die Vorgabe von Parametern ist von hoher Bedeutung für die methodische Konzeption, Entwicklung und Gestaltung von ASS. Um die Parameter vollständig zu umfassen, werden zunächst allgemeine Parameter definiert, die sich aus der Zielsetzung der ASS ergeben. Ein Vergleich der

Parameter führt zu kritischen Parametern, die zur Bewertung des Einsatzes von ASS in den in Kapitel 3.2.1 - 3.2.3 definierten Anwendungsgruppen herangezogen werden. Dadurch können für die Konzeption und Entwicklung notwendige und kritische Eigenschaften definiert werden. Neben den theoretischen Parametern sollen praktische, sekundäre Parameter aus der Anwendung abgeleitet werden. Zur vollständigen Betrachtung der ASS werden weitere Randbedingungen zur Erfüllung der Funktionsweise analysiert.

4.3.1 Primäre Parameter aus der Zielsetzung

Im Folgenden werden die Parameter untersucht, die wichtige Kenngrößen zur Auslegung von ASS bilden. Dazu werden zunächst Anforderungen an ASS gestellt und daraus Parameter abgeleitet. Dabei wird das System als Ganzes betrachtet sowie die einzelnen Teilbereiche passive und aktive Struktur sowie Anwendung genauer fokussiert. Anhand einer Bewertungsmethode wird der gegenseitige Einfluss der Parameter aufgezeigt und kritische Parameter identifiziert.

4.3.1.1 Anforderungen an ASS

Um neue Anwendungsgebiete abzuleiten, mögliche Anwendungen zu bewerten und eine Vorgehensweise zur Entwicklung und Auslegung aufzustellen, ist es notwendig, objektive Kriterien festzulegen. ASS beinhalten ein multifunktionales Element (SM), das es dem System ermöglicht, sich anzupassen und die aktive Struktur darstellt. Die Tragwerksstruktur (passive Struktur) führt die aktive Struktur und stellt eine Verbindung zwischen Anwendung und Nutzer dar. ASS beinhalten daher die drei Hauptbestandteile passive Struktur, aktive Struktur und Anwendung (vgl. Kapitel 4.1). Parameter, die diese drei Elemente beschreiben und eine Verbindung zwischen ihnen als System herstellen, werden daher im Folgenden untersucht. Dafür werden die Parameter zunächst methodisch nach den Hauptmerkmalen für Anforderungslisten [FELDHUSEN & GROTE 2013, S. 330f] abgeleitet. In Abbildung 4.14 sind die für ASS wichtigen Hauptmerkmale dargestellt.

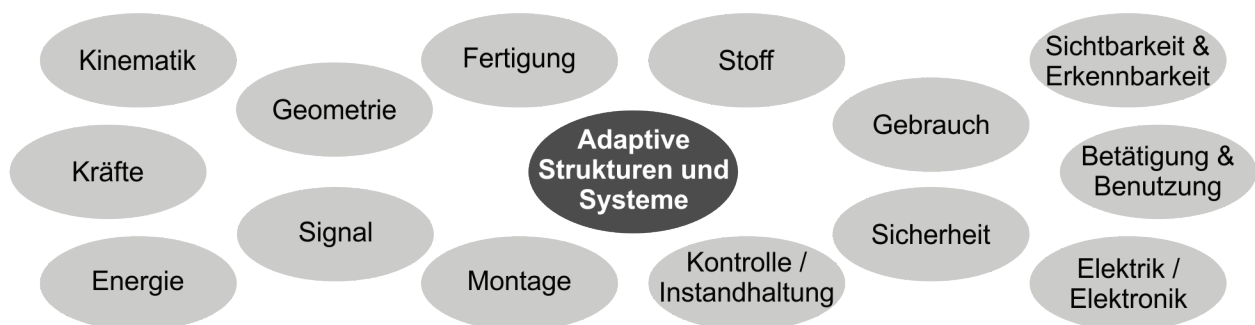


Abbildung 4.14: Hauptmerkmalkategorien aus der Hauptmerkmalliste nach [FELDHUSEN & GROTE 2013, S. 330f]

Anhand der Hauptmerkmale werden allgemeine Anforderungen und wichtige Parameter bestimmt, die an die Entwicklung, Konzeption und Auslegung adaptiver Strukturen und Systeme gestellt werden. Dazu werden die Anforderungen, die in Kapitel 4.1.1 - 4.1.3 untersucht wurden, den Hauptmerkmalkategorien zugeordnet und erweitert (Tabelle 4.9).

Hauptmerkmale	Wichtige Parameter adaptiver Strukturen und Systeme
Geometrie	Länge, Durchmesser, Form, Anzahl, Position, Bauraum, Anordnungsmöglichkeiten, Auslegung (u. a. Anschlussmöglichkeiten, Stellweg, Führung, Lagerung, Rückstellung, Anbindung)
Kinematik	Geschwindigkeit, Bewegungsart, Bewegungsrichtung, Bewegungszustand, Bewegungshäufigkeit, Beschleunigung
Kräfte	Kraftgröße, Krafthäufigkeit, Kraftübertragung, Kraftart (statisch, dynamisch), Kraftangriffspunkt, Festigkeit (Verformung, Steifigkeit) Stabilität, Bedienkraft, Eigengewicht
Energie	Temperatur, Erwärmung, Kühlung, Energiedichte, Verlust, Wirkungsgrad, Energieumformung, Art der Aktivierung & Deaktivierung, Aktivierungsenergie
Elektrik / Elektronik	Spannung, elektrische Aktivierung, Ansteuerung, Sicherung, Isolation der Anschlussstellen, Verdrahtung
Stoff	physikalische Eigenschaften der Materialien (Dichte, Zugfestigkeit, Versagensgrenzen, ...)
Signal	Eingangs- und Ausgangssignal, Überwachung
Sicherheit	Überhitzung, ungewollte Aktivierung, Schutz des Nutzers, Betriebssicherheit, Arbeitssicherheit
Fertigung	herstellbare Abmessungen, Fertigungsverfahren, Qualität, Toleranzen
Kontrolle / Instandhaltung	Möglichkeiten zur Kontrolle und Instandhaltung, Wartungsfreiheit
Montage	Zusammenbau aktive und passive Struktur, Einbau im System
Gebrauch	Geräuscharm, Anwendung, Einsatzort, Verschleiß, Lebensdauer
Betätigung & Benutzung	Bedienung, Bedienungsart, Bedienungsart, Bedienungsart, Bedienungsart, Bedienungsart, Bedienungsart, Bedienungsart, Bedienungsart, Bedienungsart
Sichtbarkeit & Erkennbarkeit	Anzeige, Formgestalt

Tabelle 4.9: Allgemeine Anforderungen an ASS

4.3.1.2 Ableitung der primären Parameter

Die übergeordneten Hauptmerkmale und Anforderungen werden weiter in Parameter untergliedert, die die aktive und passive Struktur sowie die Anwendung beschreiben (Tabelle 4.10). Dafür findet eine Anpassung der Hauptmerkmale auf die speziellen Anforderungen bezüglich ASS statt. Die Tabelle zeigt, dass die übergeordneten Merkmale für die drei Bereiche übereinstimmen, aber die Beschreibung sowie die weiter spezifizierten Parameter variieren. Dies soll ein Beispiel am Parameter Temperatur verdeutlichen: Innerhalb der aktiven Struktur ist die Aktivierungstemperatur wichtig. Für die passive Struktur hingegen ist die für das Material ertragbare Temperatur entscheidend. Bei der Anwendung spielt die Temperatur, die für eine Bedienung angenehm ist und die Einsatztemperatur eine wichtige Rolle.

	Aktive Struktur (aS)	Passive Struktur (pS)	Anwendung
Geometrie	Länge, Durchmesser, Form, Anzahl, Anordnung	Abmessungen, Form, Auslegung, Bauteilanzahl	Bauraum
Zeit	Aktivierungs- und Deaktivierungszeit, Lebensdauer	Verzögerungszeit, Lebensdauer	erforderliche Aktivierungs- und Deaktivierungszeit, geforderte Lebensdauer
Bewegung	Bewegungslänge, -richtung, -häufigkeit, -art	Bewegungslänge, -richtung, -art, Beschleunigung / Geschwindigkeit	erforderliche Bewegungshäufigkeit, -richtung, -art, -länge
Physikalische Eigenschaften	Dichte, Schmelztemperatur, E-Modul, Versagensgrenzen (z. B. Bruchdehnung, Zugfestigkeit) usw.		-
Energie	Aktivierungs- und Deaktivierungstemperatur, Art der Aktivierung und Deaktivierung	ertragbare Temperatur, Art der Wärmeleitung	Einsatztemperatur, zulässige Temperatur für Nutzer / System
Kraft	Kraftgröße, Krafthäufigkeit, Kraftart	Kraftangriffspunkt, Krafthäufigkeit, Kraftgröße, Gewicht	erforderliche Kraftübertragung, Bedienkraft, Krafthäufigkeit, max. Gewicht
Betätigung & Benutzung	Anpassbarkeit an den Nutzer / die Anwendung		Bedienung, Bedienungsart, -ort, -häufigkeit, -person
Sichtbarkeit & Erkennbarkeit	Formgestalt (Zweck, Funktion usw. erkennbar)	Formgestalt, Anordnung / Ordnungsgrad, Wahrnehmung, Erkennung der Bedienung	notwendige Anzeigen, Erkennungsmerkmale / -inhalte, Informationen, Wahrnehmung

Tabelle 4.10: Parameter für die aktive und passive Struktur sowie die Anwendung

Bei der aS beschreibt die Geometrie die Abmessungen des FG-Elements, dessen Form sowie Anzahl und Anordnung der benötigten Elemente. In Bezug auf die pS beinhaltet die Geometrie Abmessungen, Formgestaltung, Bauteilanzahl (Tragwerkaufbau, Festkörpergelenk, mehrteiliges Gelenk) sowie Auslegung (Zu- und Ableitung von Wärme, Anbindung, Entkopplung, Zwischenzustände). Die Geometrie bezüglich der Anwendung legt den zur Verfügung stehenden Bauraum (Volumen, Vorgaben zur Nutzung) fest.

Die Zeit umfasst bei der aS die Dauer, die benötigt wird, bis sich das FG-Element vollständig verformt, bzw. zurückverformt hat. Dies entspricht der Aktivierungszeit (Dauer der Energiezufuhr und Dauer bis zur vollständigen Aktivierung). Im Hinblick auf die pS stellt die Zeit die Verzögerung der Bewegung dar, z. B. durch Zu- und Ableitung von Wärme oder einem erhöhten benötigten Kraftaufwand zur Verformung zu Beginn der Bewegung. Bei der Anwendung gibt die Zeit die Dauer vor, in der die Bewegung stattfinden muss (Zeit bis Endzustand oder Zwischenzustand erreicht werden soll).

Die Bewegung der aS wird untergliedert in die Art (gleich- oder ungleichförmige, unterbrochene oder ununterbrochene sowie direkte oder indirekte Bewegung (Anfangs- und Endzustand, oder Zwischenzustände)) und Richtung (translatorisch oder rotatorisch), die auch den FG-Effekt (eingeprägte Form oder Kontraktion) einschließt. Die Beschleunigung entspricht im Fall der aS der Zeit bis zur vollständigen Aktivierung und gibt damit

auch die Bewegungshäufigkeit vor. Die Bewegungslänge ist ableitbar aus der Drahtlänge und der maximal möglichen Dehnung der FGL. Bezüglich der pS ergibt sich die Bewegungslänge aus der möglichen Verformbarkeit bzw. Steifigkeit bzw. dem E-Modul und der Struktur. Die Beschleunigung bzw. Geschwindigkeit ist von dem gewählten Material und der konstruktiven Auslegung abhängig. Die Art der Bewegungsumsetzung kann direkt oder indirekt (Führung des Drahts inner- oder außerhalb der Struktur), über eine mechanische Konstruktion oder eine konstruktive Umwandlung der Kontraktion, gleichförmig und ungleichförmig sowie mit oder ohne Unterbrechung erfolgen. Die Bewegungsrichtung ist translatorisch, rotatorisch oder kombiniert und ergibt sich aus der konstruktiven Auslegung der pS und der Anordnung der FG-Elemente. Die Anwendung definiert die erforderliche Bewegungshäufigkeit, -richtung, -art und -länge, wobei die Bewegungslänge dem geforderten Stellweg entspricht.

Die physikalischen Eigenschaften beschreiben die stoffspezifischen, charakteristischen Größen der Werkstoffe der aS und pS. Beispiele dafür sind Dichte, Schmelztemperatur, E-Modul und Wärmeleitfähigkeit.

Der Parameter Energie beinhaltet bei der aS die Temperatur, bei der es zu einer vollständigen Formveränderung kommt. Sie wird als Aktivierungs- (Austenit-Finish A_f) bzw. Deaktivierungstemperatur (Martensit-Finish M_f) bezeichnet. Des Weiteren umschließt die Energie die Art der Aktivierung (Joulesche Wärme, Umgebungsmedien, Heizdrähte u. a.) bzw. Deaktivierung (Umgebungstemperatur, externe Kühlung u. a.). Im Hinblick auf die pS ist die ertragbare Temperatur des Werkstoffs (Erweichungstemperatur) von Bedeutung. Zusätzlich umfasst die Energie die konstruktive Auslegung der Wärmeleitung. Bei der Anwendung sind die Einsatztemperatur sowie die zulässige Temperatur für den Bediener oder das umgebende System ausschlaggebend.

Die Kraft beschreibt bei der aS und pS die Art der Belastung (Biegung, Zug / Druck, Torsion, Schub), die Kraftgröße (Spannung) sowie die Krafthäufigkeit (Zyklen). Bei der pS sind zusätzlich der Kraftangriffspunkt sowie das Eigengewicht von Bedeutung. Die Anwendung gibt die erforderlichen Kräfte (Art, Häufigkeit, Größe) vor, die zur Erfüllung der Aufgabe notwendig sind sowie das maximal zulässige Gewicht der Komponenten.

Im Bereich der Betätigung und Benutzung dienen aS und pS der Anpassung an Nutzer und Anwendung. Die Anwendung legt dabei fest, ob eine Bedienung stattfindet und bestimmt die Bedienungsart (z. B. keine Bedienung durch den Nutzer, Ein- oder Zweihandbedienung) entsprechend dem Zweck der Bedienung, Bedienungsort (innen oder außen), Bedienperson sowie Bedienungshäufigkeit.

Sichtbarkeit und Erkennbarkeit der aS zeigen sich vor allem in deren Formgestalt, sofern diese sichtbar ist. Dadurch ist es möglich, den Zweck oder die Funktion erkennbar zu machen. Die pS kann bezüglich der Formgestalt (Funktionen oder Zweck erkennbar), Ordnungsgrad, Wahrnehmung und Erkennung der Bedienung gestaltet werden. Die Anwendung gibt dabei notwendige Anzeigen, Erkennungsmerkmale / -inhalte und Informationen sowie die allgemein geforderte Wahrnehmung vor.

4.3.1.3 Vergleich und Bewertung der primären Parameter

Durch eine vergleichende Analyse können die Einflüsse der identifizierten Parameter aufeinander aufgezeigt werden und damit bei der konstruktiven Auslegung genutzt werden. Dadurch ist es möglich, aS, pS und Anwendung als ein effizientes und gut funktionierendes Gesamtsystem auszulegen und zu entwickeln. Für die Analyse wird der paarweise Vergleich und zur Darstellung eine Abwandlung der QFD Methode genutzt (Abbildung A.1). Dazu werden die in Kapitel 4.3.1.2 identifizierten und analysierten Parameter teilweise zu übergeordneten Gruppen zusammengefasst, wenn sich ihr Einfluss nicht wesentlich unterscheidet. Dadurch wird der Vergleich erleichtert und übersichtlich gestaltet. Zur Bewertung wird eine 0 vergeben, wenn sich die beiden Parameter nicht beeinflussen, + kennzeichnet eine Beeinflussung und ++ eine starke Beeinflussung.

Bei der pS wird die Geometrie über den Parameter Abmessung abgebildet, der auch Form und Auslegung beinhaltet und die Bauteilanzahl miteinschließt. Die Bewegungslänge definiert sich hauptsächlich über Steifigkeit und Verformbarkeit des Materials. Die Struktur, die sich zusätzlich auf die Bewegungslänge auswirkt, wird in die Auslegung eingeschlossen. Die ertragbare Temperatur beinhaltet die Leitung der Wärme zum System bzw. Nutzer, die Unterstützung der Deaktivierung umfasst die Möglichkeiten der Kühlung. Die Kraftgröße beinhaltet die ertragbare Kraft und beachtet zusätzlich das Eigengewicht. Die Belastungsart beschreibt Kraftangriffspunkt, Kraftrichtung und Art der Kraft.

Bei der aS werden Länge, Durchmesser und Form zum Parameter Abmessung kombiniert. Die Abmessung erfasst damit zusätzlich die Bewegungslänge (Stellweg), die v. a. durch die Drahtlänge vorgegeben wird. Die Bewegungsrichtung wird durch den FG-Effekt bestimmt. Beschleunigung und Geschwindigkeit geben Auskunft über die Bewegungshäufigkeit. Die Belastungsart beinhaltet Kraftangriffspunkt, Kraftrichtung und Art der Kraft. Bei der Anwendung erfasst die erforderliche Bewegungszeit die erforderliche Aktivierungs- und Deaktivierungszeit. Die Bewegungshäufigkeit wird über die Beschleunigung / Geschwindigkeit abgebildet. Die Belastungsart beinhaltet zusätzlich zu Kraftangriffs-

punkt, Krafrichtung und Art der Kraft vor allem die Bedienkraft. Der Bedienungsort macht Angaben dazu, ob sich das System im Innen- oder Außenbereich befindet und gibt damit Aufschluss über die Einsatztemperatur. Unter dem Parameter Nutzer wird die Bedienperson sowie deren Bedürfnisse zusammengefasst. Die Sichtbarkeits- und Erkennbarkeitskriterien umfassen die in Tabelle 4.9 beschriebenen Elemente.

4.3.1.4 Ergebnisse der vergleichenden Parameteranalyse

Die Auswertung des paarweisen Vergleichs zeigt die gegenseitige Beeinflussung der Parameter und dient als Hilfestellung, kritische Parameter für das Zusammenwirken von aS und pS sowie Anwendung zu identifizieren. Damit können die spätere Auslegung und Entwicklung entsprechend unterstützt werden. Parameter, die unter der kritischen Grenze von 1/3 der Gesamtpunktzahl liegen, werden als unkritisch angesehen (hellgrau). Parameter, die nur in zwei Kategorien den kritischen Wert erreichen, werden in der hellen Erkennungsfarbe (blau für die aktive Struktur, grün für die passive Struktur und lila für die Anwendung bzw. mittelgrau innerhalb der Gesamtpunktzahl) markiert. Diese Parameter sind in Bezug auf zwei Kategorien kritisch, in einer Kategorie aber unkritisch. Parameter, die unkritisch sind, aber in einer bestimmten Kategorie kritische Werte erreichen, werden im Bereich der Punktzahlen ebenfalls in der hellen Erkennungsfarbe markiert.

Beim paarweisen Vergleich der pS ergeben sich Abmessung, Auslegung, Steifigkeit, Kraftgröße, Belastungsart und Anpassung N / A als kritische Parameter. Bewegungsrichtung, Beschleunigung, Bewegungsart und Formgestalt sind ebenfalls kritisch, allerdings nur in zwei Kategorien. Von den unkritischen Parametern sind Lebensdauer, physikalischen Eigenschaften, ertragbare Temperatur und Krafthäufigkeit in einer, bzw. die Lebensdauer in zwei Kategorien kritisch. Abbildung 4.15 stellt dies grafisch dar.

	Passive Struktur																	
	Abmessung	Auslegung	Lebensdauer	Verzögerungszeit	Bewegungsrichtung	Beschleunigung	Bewegungsart	Steifigkeit	Phys. Eigenschaften	Ertragbare Temp.	Unterstütz. Deakt.	Kraftgröße	Krafthäufigkeit	Belastungsart	Anpassung N / A	Formgestalt	Anordnung	
Anwendung	22	26	12	5	10	14	9	12	10	6	9	16	11	18	19	13	4	32
Passive Struktur	25	28	11	10	16	10	12	22	18	12	7	21	10	21	23	14	9	32
Aktive Struktur	18	30	8	3	11	13	14	13	4	7	8	18	7	14	22	10	6	36
Gesamt	65	84	31	18	37	37	35	47	32	24	24	55	28	53	64	37	19	100

Abbildung 4.15: Kritische Parameter der passiven Struktur

Bei der aS sind die Parameter Abmessung, Anordnung, Anzahl, Deaktivierungszeit, FG-Effekt, Beschl. / Geschw., Aktivierungstemperatur, Kraftgröße und Belastungsart kritische Parameter. Aktivierungszeit, Bewegungsart und Anpassung N / A sind nur in zwei Kategorien kritisch. Lebensdauer, physikalische Eigenschaften, Art der Aktivierung, Art der Deaktivierung, Krafthäufigkeit und SE Kriterien sind unkritisch. Allerdings sind beispielsweise die physikalischen Eigenschaften innerhalb der aS kritische Parameter, da sie deren Eigenschaften stark beeinflussen. Abbildung 4.16 stellt die kritischen Parameter der aS dar.

		Aktive Struktur																		
		Abmessung	Anordnung	Anzahl	Aktivierungszeit	Deaktivierungszeit	Lebensdauer	FG-Effekt	Beschl. / Geschw.	Bewegungsart	Phys. Eigenschaften	Aktivierungstemp.	Art der Aktivierung	Art der Deaktivierung	Kraftgröße	Krafthäufigkeit	Belastungsart	Anpassung N / A	SE Kriterien	
Anwendung		13	23	14	19	19	10	15	14	10	7	12	12	12	12	8	16	9	8	32
Passive Struktur		13	20	15	10	12	6	12	12	12	5	14	8	9	13	6	18	14	8	34
Aktive Struktur		13	16	13	21	20	10	11	19	12	15	14	10	10	18	15	16	16	5	34
Gesamt		39	59	42	50	51	26	39	45	34	27	45	30	31	43	29	50	39	23	100

Abbildung 4.16: Kritische Parameter der aktiven Struktur

Bei der Anwendung zählen Bauraum, Bedienungsart, Bedienungshäufigkeit und Nutzer zu den kritischen Parametern. Bewegungszeit, Bewegungslänge, Beschleunigung / Geschwindigkeit, Bewegungsart, Belastungsart und Kraftübertragung sind in zwei Kategorien kritisch, in einer allerdings unkritisch. Von den unkritischen Parametern sind Lebensdauer, Bewegungsrichtung, zulässige Temperatur, Krafthäufigkeit und SE Kriterien in jeweils einer Kategorie kritisch. In Abbildung 4.17 sind die Parameter der Anwendung dargestellt.

		Anwendung																
		Bauraum	Bewegungszeit	Lebensdauer	Bewegungslänge	Bewegungsrichtung	Beschl. / Geschw.	Bewegungsart	Zulässige Temperatur	Belastungsart	Kraftübertragung	Krafthäufigkeit	Bedienungsart	Bedienungsort	Bedienungshäufigkeit	Nutzer	SE Kriterien	
Anwendung		11	8	0	7	4	9	8	6	6	7	8	20	6	12	25	13	30
Passive Struktur		17	13	14	13	11	13	12	14	20	16	10	15	7	13	18	10	34
Aktive Struktur		21	23	10	17	7	19	14	9	18	18	13	17	8	14	16	8	36
Gesamt		49	44	24	37	22	41	34	29	44	41	31	52	21	39	59	31	100

Abbildung 4.17: Kritische Parameter der Anwendung

4.3.1.5 Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse

Insgesamt ergibt sich die in Tabelle 4.11 dargestellte Rangfolge der Parameter (Sortierung absteigend nach Nennung). In Klammer ist die Anzahl der kritischen Nennungen angegeben. Die unkritischen Parameter sind grau dargestellt.

Aktive Struktur	Anwendung	Passive Struktur
Anordnung (59)	Nutzer (59)	Auslegung (84)
Deaktivierungszeit (51)	Bedienungsart (52)	Abmessung (65)
Aktivierungszeit (50) Belastungsart (50)	Bauraum (49)	Anpassung N / A (64)
Aktivierungstemperatur (45) Beschleunigung / Geschw. (45)	Bewegungszeit (44) Belastungsart (44)	Kraftgröße (55)
Kraftgröße (43)	Beschleunigung / Geschw. (41) Kraftübertragung (41)	Belastungsart (53)
Anzahl (42)	Bedienungshäufigkeit (39)	Steifigkeit (47)
Abmessung (39) FG-Effekt (39) Anpassung N / A (39)	Bewegungslänge (37)	Formgestalt (37) Beschleunigung (37) Bewegungsrichtung (37)
Bewegungsart (34)	Bewegungsart (34)	Bewegungsart (35)
Art der Deaktivierung (31)	Krafthäufigkeit (31) S & E Kriterien (31)	Physikalische Eigenschaften (32)
Art der Aktivierung (30)	Zulässige Temperatur (29)	Lebensdauer (31)
Krafthäufigkeit (29)	Lebensdauer (24)	Krafthäufigkeit (28)
Physikalische Eigenschaften (27)	Bewegungsrichtung (22)	Ertragbare Temperatur (24) Unterstützung Deaktivierung (24)
Lebensdauer (26)	Bedienungsort (21)	Anordnung (19)
SE Kriterien (23)		Verzögerungszeit (18)

Tabelle 4.11: Rangfolge der kritischen Parameter

Es zeigt sich, dass es Parameter gibt, die über alle Bereiche hinweg kritisch sind. Dies betrifft Geometrie, Kraft und Bewegung. Es kann dennoch festgestellt werden, dass in den jeweiligen Bereichen unterschiedliche Parameter kritisch sind. So ist beispielsweise die Aktivierungstemperatur im Bereich der aS ein kritischer Parameter, da hiervon die gesamte Bewegung beeinflusst wird. Im Bereich der Anwendung und der pS handelt es sich bei der Temperatur aber nicht um einen kritischen Parameter, da keine starken Abhängigkeiten zu den anderen Parametern bestehen. Hier sind Parameter kritisch, die den Nutzer betreffen, wie die Möglichkeit zur Anpassung, ob es einen Nutzer für die Anwendung gibt und auf welche Art bedient wird. Tabelle 4.12 zeigt zusammengefasst die kritischen Parameter sowie die wichtigsten beeinflussenden und abhängigen Parameter. Beispielhaft wird die Tabelle an der obersten Zeile erläutert: Innerhalb der aktiven Struktur sind Anordnung, Anzahl und Abmessungen (= Geometrie) stark abhängig von Geometrie, Kraft und Bewegung, bezogen auf die passive Struktur und die Anwendung haben Geometrie / Bauraum, Kraft, Bewegungszeit und Bedienung einen großen Einfluss.

		Aktive Struktur	Anwendung	Passive Struktur
Aktive Struktur	Anordnung, Anzahl, Abmessung	Geometrie, Kraft, Bewegung	Bauraum / Geometrie, Bewegung, Kraft	
	Deaktivierungs- & Aktivierungszeit, Beschl. / Geschw.	Abmessung, phys. Eigenschaften, Bewegung	Bauraum / Unterstützung der Deaktivierung, Häufigkeit der Bewegung (Zeit)	
	Aktivierungstemperatur	Zeit, Kraft	Zeit, Nutzer	Geometrie, Auslegung, Steifigkeit, Lebensdauer
	Belastungsart & Kraftgröße	Geometrie, Kraft, Lebensdauer	Bedienung und Belastung	Geometrie, Auslegung
	FG-Effekt & Bewegungsart	Anordnung	vorgegebene Bewegung	Geometrie, Anpassung N / A
	Anpassung N / A	Temperatur, SE Kriterien	Bauraum	Anpassung N / A, Formgestalt
Passive Struktur	Auslegung & Abmessung	Geometrie, De- & Aktivierungsart, Belastungsart	alle Parameter	alle Parameter
	Anpassung N / A	Geometrie, Bewegung, Temperatur	Bauraum, Nutzer	Geometrie, Bewegung, Nutzer
	Kraftgröße & Belastungsart	Geometrie, Temperatur, Kraft	Bauraum, Lebensdauer, Bedienung	Geometrie, Bewegung, Kraft
	Steifigkeit	Bewegung, Temperatur, Kraft		Geometrie, Bewegung, Kraft
	Formgestalt	Anpassung N / A	Bauraum, Nutzer	Geometrie
	Bewegungsrichtung & -art	Geometrie, Bewegung		Geometrie, Anpassung N / A
	Beschl. / Geschw.	Deaktivierungs- & Aktivierungszeit	Zeit, Häufigkeit, Bedienung	Steifigkeit
Anwendung	Nutzer / Bedienungsart	Anordnung, Temperatur, Belastung	fast alle Parameter	Geometrie, Anpassung N / A
	Bauraum	Geometrie, Zeit, De- & Aktivierungsart, Anpassung N / A	Bewegungslänge, Bedienungsart, Nutzer, SE Kriterien	Geometrie, Form, Belastungsart, Anpassung N / A
	Bewegungszeit, Beschl. / Geschw.	Geometrie, Zeit, De- & Aktivierungsart, Temperatur	Häufigkeit, Nutzer	Zeit, Häufigkeit
	Belastungsart, Kraftübertragung	Geometrie, Kraft / Belastung	Bedienungsart, Nutzer	Geometrie, Steifigkeit, Kraft, Anpassung N / A
	Bedienungshäufigkeit	Zeit, De- & Aktivierungsart, Häufigkeit	Zeit, Häufigkeit, Nutzer	Zeit, Häufigkeit, Anpassung N / A
	Bewegungslänge	Geometrie, Zeit, phys. Eigenschaften	Nutzer	Auslegung, Bew.richtung, Steifigkeit, Belastungsart
	Bewegungsart	Anordnung, Anzahl, Bewegungsart	Bedienungsart, Nutzer	Auslegung, Bewegungsart

Tabelle 4.12: Zusammenfassung der kritische Parameter sowie der Haupteinflüsse

4.3.2 Bewertung der Anwendungsgruppen

Anhand der kritischen Parameter aus der Anwendung ist es möglich, die Anwendungsgruppen nach ihrer Eignung sowie auftretenden Schwierigkeiten bei der Umsetzung zu beurteilen, um damit kritische Anwendungen und Einsatzgebiete aufzuzeigen. Dazu werden anhand der kritischen Parameter die folgenden Fragen gestellt:

- Nutzer: Gibt es einen Nutzer? Erfolgt eine Bedienung durch den Nutzer?
- Bedienungsart: Wie erfolgt die Bedienung? Wird sie durch den Nutzer (Einhand, Zweihand) oder automatisch durchgeführt?
- Bauraum: Welches Volumen ist verfügbar? Gibt es Einschränkungen / Vorgaben?
- Bewegungszeit: Welche Zeit wird von Anfangs- bis Endzustand benötigt?
- Belastungsart: Wie ist die Krafrichtung und die Kraftart? Wo greift die Kraft an?
- Beschleunigung / Geschw.: Gibt es zeitliche Vorgaben während der Bewegung?
- Kraftübertragung: Findet eine Kraftübertragung zusätzlich zum Eigengewicht statt? Wie hoch ist diese Kraft?
- Bedienungshäufigkeit: Ist die Anwendung im Dauereinsatz oder selten betätigt?
- Bewegungslänge: Wie groß ist der notwendige Stellweg?
- Bewegungsart: Ist die Bewegung gleichförmig? Gibt es Zwischenzustände?

Bei der Untersuchung der Anwendungsgruppen in Bezug auf die kritischen Parameter der Anwendung, dient Kapitel 3 als Basis, vor allem die in Tabelle 3.1 dargestellten Anwendungsbeispiele, sowie die in Tabelle 3.4 analysierten Anwendungsgruppen. Es werden dabei die aktuellen Anwendungsbeispiele aus Tabelle 3.1 hinsichtlich der Parameter miteinbezogen und allgemeine Aussagen abgeleitet. Tabelle 4.13 gibt eine Übersicht über die verwendeten Bewertungskriterien für die kritischen Parameter der Anwendung, die anhand der Fragen gruppiert und teilweise weiter untergliedert werden.

		Bewertung		
		0: nicht relevant	+: wichtig	++: sehr wichtig
Bewegung	Zeit	keine Begrenzung der Zeit notwendig	zügiges Schalten bei Vorgabe der Bedingungen	schnelle Zustandsänderung, z. B. im Notfall
	Geschw. / Beschl.	keine bestimmte Geschw. notwendig	spürbare / sichtbare Veränderung des Zustands	schnelle Geschwindigkeit, z. B. im Notfall
	Stellweg	kurze Wege	kurze - mittlere Wege	kurze - lange Wege
	Art	zwei Zustände	Zwischenzustände	viele Zwischenzustände
Belastung	Richtung	in Richtung Bewegung	entgegen der Bewegung	dynamische Änderung
	Übertragung	nein	teilweise	ja
	Größe	klein	klein - mittel	klein - groß
	Art	Zug / Druck	Biegung / Torsion	kombiniert
	Kraftangriff	keine zusätzlichen Kräfte oder Momente	teilweise zusätzlichen Kräfte oder Momente	zusätzlichen Kräfte oder Momente
Bau- raum	Volumen	mittel - groß	klein - mittel	klein
	Vorgaben	frei	eingeschränkt	stark eingeschränkt
BB	Nutzer	nein	teilweise	ja
	Art	automatisch	teilweise per Hand	immer per Hand
	Häufigkeit	nur im Notfall	selten - häufig	sehr häufig

Tabelle 4.13: Übersicht der Bewertungskriterien

Tabelle 4.14 zeigt die Bewertung der Einsatzgebiete anhand der kritischen Parameter der Anwendung. Im Folgenden werden die Erkenntnisse zusammengefasst.

		Anwendungsgruppen											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Bewegung	Zeit	0	+	++	+	+	++	++	+	0	+	+	+
	Geschw. / Beschl.	0	+	++	+	+	+	+	+	0	+	0	0
	Stellweg	+	+	0	++	++	++	0	0	+	+	++	++
	Art	+	+	0	++	++	++	0	++	+	+	++	++
Belastung	Richtung	+	+	+	++	++	++	++	++	0	++	++	++
	Übertragung	+	++	+	+	++	++	+	+	+	+	+	+
	Größe	++	+	+	++	++	++	+	+	0	+	+	+
	Art	++	+	++	++	++	++	++	++	0	++	++	++
	Kraftangriff	+	+	+	++	++	+	+	+	0	+	+	+
Bau- raum	Volumen	+	+	++	+	+	+	++	++	0	+	+	+
	Vorgaben	+	0	+	+	+	+	+	++	0	+	0	+
BB	Nutzer	+	++	0	+	0	+	0	+	0	+	++	+
	Art	+	++	0	+	0	+	0	+	0	+	+	+
	Häufigkeit	+	++	0	+	0	++	+	++	0	+	+	+
Ergebnis		14	17	13	20	18	22	14	19	3	16	17	17

Legende: 0 unkritischer Parameter ++ kritischer Parameter für die jeweilige Anwendungsgruppe

Tabelle 4.14: Bewertung der Anwendungsgruppen anhand der kritischen Parameter der Anwendung

Bei aktuellen Anwendungen im Bereich Komfort (1) handelt es sich zumeist um Anwendungen, die einen geringen Stellweg ausführen müssen (Noise & Vibration, Dämpfung, Schallimmissionen). Daher ist die Bewegung kein kritischer Parameter. Zeit, Geschwindigkeit und Stellweg stellen ebenfalls keine entscheidenden Parameter dar. Die Bewegungslänge ist klein bis mittel und Zwischenzustände können erforderlich sein. Bei der Belastung kann die Kraftgröße stark variieren. Das Bauraumvolumen ist begrenzt. Es finden nur teilweise Interaktionen mit dem Nutzer statt (z. B. bei Massagefunktionen).

Bei den haptischen Interfaces (2) ist die Bewegung ein wichtiger Parameter, da hier z. B. ein Feedback bei einer Bedienung in einer angemessenen Zeit erfolgen muss. Durch die Bedienung findet eine Kraftübertragung statt, die beachtet werden muss. Im Fall von Schaltern oder haptischen Displays findet eine häufige Bedienung durch den Nutzer statt.

Anwendung aus dem Bereich Sicherheit / Notfall (3) erfordern ein schnelles Schalten und damit eine schnelle Bewegung. Häufig sind kurze Stellwege und zwei Zustände (an / aus) ausreichend. Die Belastung sowie die Betätigung und Benutzung spielen eine untergeordnete Rolle, da die Systeme zum großen Teil selbstauslösend sind und nicht bedient werden. Da sich die Anwendungen z. T. in Systemen befinden, die einen eingeschränkten Bauraum zur Verfügung stellen (Automobil), ist dieser ein wichtiger Parameter.

Im Gebiet der (Leichtbau-) Strukturen (4) ist die Bewegung in Bezug auf die Länge des Stellwegs sowie die Anzahl von Zwischenzuständen von hoher Bedeutung, z. B. bei wandelbaren Tragwerken, adaptiven Flügeln oder Spiegelverstellung. Die Belastung ist hoch, da durch die starke Bewegung die Krafrichtung, Kraftgröße und der Kraftangriffspunkt entscheidend sind. Durch äußere Einflüsse und teilweise durch den Nutzer findet eine hohe und häufige Kraftübertragung statt. Die Anwendungen befinden sich zum Teil in Systemen, die einen eingeschränkten Bauraum zur Verfügung stellen (Automobil).

Die Anwendungen in Bezug auf die Aerodynamik (5) verhalten sich ähnlich zu (4). Die Länge des Stellwegs, die Anzahl von Zwischenzuständen sowie die Belastung sind von hoher Bedeutung, beispielsweise im Bereich adaptive Flügel, Chevrons oder adaptive Fahrzeugelemente. Allerdings findet hier keine Interaktion mit dem Nutzer statt.

Ebenso verhält es sich mit den Schließ- und beweglichen Mechanismen (6). Es sind kurze bis lange Stellwege möglich und Zwischenzustände von Bedeutung. Durch die Bewegung und die Schließ- bzw. Haltevorrichtung (z. B. Spannvorrichtungen oder Verbindungstechnik) ist die Belastung hoch. Zusätzlich kommt eine Betätigung durch den Nutzer, beispielsweise bei Klappen oder Schaltern hinzu. Aufgrund der engen Zugehörigkeit zu einem umschließenden System ist der Bauraum von Bedeutung.

Im Bereich der Fluid- / Hydrodynamik (7) sind bei der Bewegung die Parameter Zeit und Geschwindigkeit / Beschleunigung aufgrund der Anwendung in Ventilen von Bedeutung. Die Stellwege sind kurz und die Zustände beschränken sich größtenteils auf zwei (Ventile). Die Belastung ist von Bedeutung, es findet aber keine Interaktion mit dem Nutzer statt. Der Bauraum ist aufgrund der engen Systemzugehörigkeit beschränkt.

Mikrosysteme (8) beschäftigen sich mit schnell schaltenden Elementen, wie z. B. Mikroventile, -greifern oder -elektronik. Aufgrund der Miniaturisierung sind die Stellwege klein, es können viele Zwischenzustände nötig sein. Eine Kraftübertragung tritt in den meisten Fällen auf, teilweise findet auch eine Interaktion mit dem Nutzer statt (Mikroaktuatoren wie künstliche Finger). Durch die Miniaturisierung ist der Bauraum stark eingeschränkt.

Anwendungen im Bereich Ressourcen (9) weisen bezüglich der Parameter keine starken Abhängigkeiten auf. Es finden Bewegungen statt (selbstheilende Strukturen), aber es treten keine großen Belastungen auf. Eine Interaktion mit dem Nutzer findet nicht statt.

Bei medizinischen Geräten (10) treten mittlere Stellwege auf, Zeit und Geschwindigkeit sind unkritisch (Stents, Implantate). Teilweise findet eine Kraftübertragung statt (Prothe-

sen, Steinfangkörbchen). Bauraumvolumen und -vorgaben sind stark abhängig vom Einsatzort (innerhalb der Arterie). Eine Bedienung durch den Nutzer findet statt.

Im Bereich Individualität (11) spielen Zeit und Geschwindigkeit / Beschleunigung eine untergeordnete Rolle, Stellweg und Zwischenzustände sind sehr wichtig, z. B. bei intelligenten Textilien oder adaptiven Logos. Eine Belastung kann durch äußere Einflüsse oder den Nutzer stattfinden. Der Bauraum ist frei.

Die Formgebung (12) verhält sich äquivalent zur Individualität. Auch hier sind Stellweg und Zwischenzustände von Bedeutung, beispielsweise bei Sonnenschutz-Fassaden. Die Belastung kann durch den Nutzer oder äußere Einflüsse entstehen. Der Bauraum ist frei.

Die Anwendungsgruppen mit den meisten kritischen Parametern sind Schließ- und bewegliche Mechanismen (6), Leichtbaustrukturen (4), Mikrosysteme (8), Aerodynamik (5) sowie haptische Interfaces (2), Individualität (11) und Formgebung (12). Bei der Ableitung weiterer Parameter aus der konkreten Anwendung sind daher vor allem diese kritischen Einsatzgebiete zu beachten. Dadurch ergeben sich kritische Pfade in der Konzeption und Entwicklung, anhand derer weitere wichtige sekundäre Parameter abgeleitet werden können.

4.3.3 Sekundäre Parameter aus der prototypischen Anwendung

Bei den sekundären Parametern handelt es sich um Parameter, die aus der prototypischen Anwendung abgeleitet werden. Diese sind wichtig, um die theoretisch untersuchten Parameter um weitere praktisch untersuchte Parameter zu erweitern. Es sollten dabei zunächst vor allem die in Kapitel 4.3.2 aufgezeigten Einsatzgebiete mit den meisten kritischen Parametern untersucht werden, da es dadurch möglich ist, weitere wichtige Parameter zu identifizieren, die bei unkritischen Anwendungen möglicherweise nicht auftreten. Hier wird auf Kapitel 5.6 verwiesen, in dem die Ergebnisse der Prototypen diskutiert werden, auf Kapitel 5.7 mit den sekundären Parametern aus den Versuchen sowie auf Kapitel 6.4, in dem ein anwendungsbezogener Prototyp näher betrachtet werden. Abbildung 4.18 stellt das Ableiten der primären und sekundären Parameter dar.

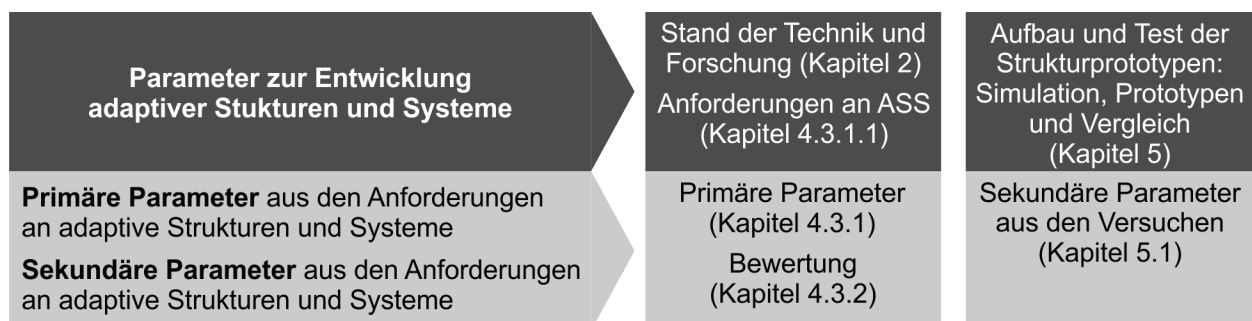


Abbildung 4.18: Ableiten von primären und sekundären Parametern

4.3.4 Randbedingungen zur Erfüllung der Funktionsweise

Zur Erfüllung der Funktionsweise von ASS gehören zusätzlich zur aktiven und passiven Struktur sowie zur Anwendung weitere Funktionsbaugruppen. Diese betreffen vor allem das System als Ganzes. Einige werden indirekt der passiven Struktur zugeordnet, da sie sich über die konstruktive Auslegung integrieren lassen (vgl. Tabelle 4.4: Funktionsbaugruppen). Andere dienen der Steuerung und Regelung oder der Energiebereitstellung.

Zu den der passiven Struktur zugeordneten Funktionsbaugruppen gehören

- die Führung / Integration der aktiven Struktur,
- Verbindung / Anbindung von aktiver und passiver Struktur,
- Rückstellung und
- Zu- & Abführung von Wärme / Energie.

Weitere systembedingte Funktionsbaugruppen sind die

- Regelung / Steuerung,
- die Anbindung an das umgebende System und
- Energiespeicher.

Die aktive Struktur muss innerhalb oder außerhalb der passiven Struktur geführt werden, um eine Bewegung umzusetzen. Für die Zusammenführung von aktiver und passiver Struktur wird eine Anbindung oder Verbindung zwischen den beiden Strukturen benötigt. Je nach eingesetztem FG-Effekt ist eine Rückstellung nötig, um eine Bewegung erneut auszuführen (Kapitel 2.5.2). Um die Bewegung zu aktivieren bzw. zu deaktivieren ist die Zuführung von Wärme / Energie zu gewährleisten. Mögliche Arten und Variationen der beschriebenen Funktionsbaugruppen finden sich in Tabelle 4.4.

Die Bewegung wird durch ein Signal oder eine Zustandsänderung hervorgerufen. Die Weitergabe dieses Aktivierungsauslösers kann durch einen Sensor erfasst und über eine Regeleinrichtung an die aktive Struktur weitergegeben werden (vgl. Kapitel 2.3 und 5.1). Eine Anbindung an das umgebende System kann über die passive Struktur oder weitere Anbindungselemente erfolgen. Ein Energiespeicher dient der Bereitstellung der benötigten Energie zur Aktivierung. Dieser muss sich nicht zwingend in der adaptiven Struktur bzw. dem adaptiven System befinden, sondern kann auch außerhalb angeordnet und für mehrere Systeme nutzbar sein.

5 Simulation, Aufbau und Versuch der Struktur-Prototypen

In den vorangegangenen Kapiteln wurden adaptive Strukturen und Systeme theoretisch untersucht. Es fand zunächst eine Analyse der FG-Technik statt. Darauf aufbauend wurden Anwendungsgebiete abgeleitet, Potenziale aufgezeigt und ein Vorgehen zur Generierung des Aufbaus vorgestellt. Im Folgenden werden die erarbeiteten Erkenntnisse in Simulationen und Prototypen praktisch umgesetzt, um die Vorgehensweise sowie die Parameter zu evaluieren und zu vervollständigen. Der Fokus liegt dabei auf der Bewegung der ASS. Zusätzlich werden weitere Randbedingungen, wie die Anbindung oder die Führung betrachtet und die folgenden Fragen geklärt:

- Wie können die Prototypen (und das spätere System) angesteuert werden?
- Welches Fertigungsverfahren / welche Materialien eignen sich zur Umsetzung?
- Welche (Tragwerks-) Strukturen bilden die Grundbewegungen der Prototypen ab?
- Wie können die Bewegung (Bewegungsrichtung und -art sowie speziell Stellwege) und Belastung vorhergesagt werden, um eine Vorauslegung zu ermöglichen?

5.1 Regelung der Prototypen / Ansteuerung des FG-Drahts

Kapitel 2.3 beschäftigte sich mit den Grundlagen der Regelungstechnik und zeigte den Stand der Forschung zur Regelung von ASS mit FGL auf. Abbildung 5.1 gibt die Struktur eines Regelkreises von ASS angelehnt an Abbildung 2.5 sowie an die Erkenntnisse aus Kapitel 2.3.3 wieder. Das Regelglied wird in den meisten Fällen durch einen PI- oder PID-Regler abgebildet (vgl. Tabelle 2.5). Die Stelleinrichtung, die aus Steller und Stellglied besteht, ist eine Verbindung von Energiezufuhr und FG-Draht. Die Energiezufuhr kann aus einem Speicher für elektrische Energie (Stromquelle) oder einer anderen Möglichkeit zur Erzeugung der benötigten thermischen Energie zur Umwandlung (vgl. Tabelle 4.4) gewährleistet werden. Durch den Fokus auf Elemente im Bereich der MMS wird ersteres bevorzugt. Die Regelstrecke wird durch die Verbindung von FG-Element und passiver Struktur (FDM-Struktur, vgl. Kapitel 5.2) gebildet. Als Messglied dient ein Sensor zur Aufnahme der zu messenden Größe. Die Position und Lage kann mit einem Abstandssensor oder durch die Messung des Widerstands erfolgen (vgl. Tabelle 2.5).

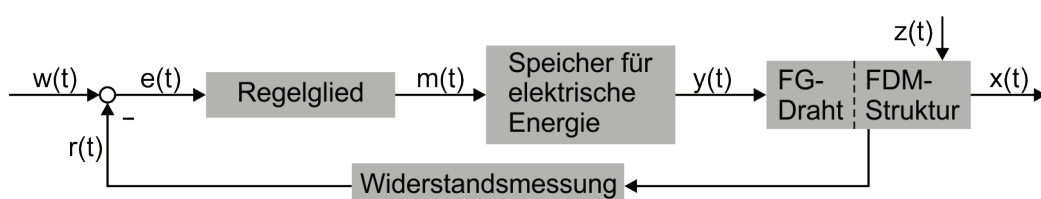


Abbildung 5.1: Struktur eines Regelungssystems adaptiver Strukturen und Systeme

Zur Regelung der Prototypen ist ein ortsfestes Regelsystem ausreichend. Durch den Einsatz eines Labornetzteils ist der Aufbau schnell an die verschiedenen Prototypen anpassbar und es ergibt sich ein geringer Aufwand zum Testen der Prototypen. Des Weiteren ist ein genaues Einstellen von Spannung bzw. Strom möglich.

Der FG-Draht lässt sich sowohl über die Einstellung des Stroms als auch über die Spannung erwärmen. Bei dem verwendeten Draht wird der benötigte Strom für 1 s Kontraktion angegeben (vgl. Tabelle 4.5). Generell ist zu beachten, dass bei Kaltleitern (Metalle) der Widerstand bei steigender Temperatur abnimmt. Dies trifft damit auch auf NiTi-Elemente zu. Da bei FGL der Widerstand bei der Phasenumwandlung zusätzlich abnimmt (vgl. Kapitel 2.3.3 und 2.5.1) muss bei Erwärmung und Phasenumwandlung mit einem Widerstandsabfall gerechnet werden. Würde die Erwärmung über die Spannung erfolgen, so steigt nach der Definitionsgleichung für den elektrischen Widerstand $R = U / I$ bei abfallendem Widerstand und gleichbleibender Spannung der Strom I . Durch einen zu hohen Strom wird der Draht weiter erwärmt und kann dadurch weit über die Austenit-Finish-Temperatur A_f hinaus erhitzt werden, wodurch das FG-Element beschädigt werden kann. Wird das FG-Element über den elektrischen Strom geregelt, so sinkt die Spannung bei abfallendem Widerstand und gleichbleibendem Strom. Damit findet während der Phasenumwandlung ein Spannungsabfall statt. Die Regelung über den Strom wird vertiefend in [SCHIEDECK 2009, S. 67] und [LANGBEIN & CZECHOWICZ 2013, S. 119, 120] behandelt.

5.2 Umsetzung und Fertigung: Additive Fertigung mittels FDM

Bei additiven Fertigungsverfahren wird die gewünschte Geometrie durch einzelne Schichten zusammengesetzt [GEBHARDT ET AL. 2019, S. 45]. Das Fused Deposition Modeling (FDM) ist ein häufig eingesetztes Fertigungsverfahren für Konzeptmodelle und Funktionsprototypen [GEBHARDT ET AL. 2019, S. 73]. Es gehört zu den Extrusionsverfahren [GEBHARDT ET AL. 2019, S. 71]: Das gewählte Filament wird kontinuierlich durch eine Düse gepresst (Abbildung 5.2).

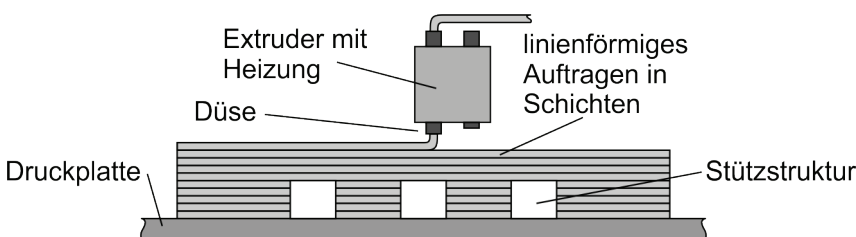


Abbildung 5.2: Fused Deposition Modeling (FDM)

In dieser Arbeit wird zur Umsetzung und Fertigung der Prototypen das FDM-Verfahren gewählt, da es zahlreiche Vorteile allgemein beim Einsatz im Bereich der Prototypen sowie speziell bei ASS bietet. Das FDM-Verfahren eignet sich durch die Schnelligkeit und Einfachheit im Gegensatz zu anderen AM-Verfahren sehr gut in der prototypischen Anwendung sowie zur Durchführung von Funktionstests. Dadurch können schnell und preiswert unterschiedliche Konzeptvarianten erstellt werden. Mit dem FDM-Verfahren ist die direkte Fertigung mit unterschiedlichen Materialien, beispielsweise durch einen Drucker mit zwei Düsen möglich. Durch das schichtweise Auftragen des Materials ist die Gestaltung von komplexen Geometrien sowie Hohlräumen möglich. Diese sind notwendig zur Integration von FG-Elementen. Aufgrund des Verfahrens ist es ebenfalls möglich, den Prozess zu jeder Zeit gezielt zu unterbrechen und dadurch beispielsweise ein Einlegen der FG-Elemente zu ermöglichen. Damit ist die Fertigung beweglicher Strukturen in nur einem Schritt möglich. Eine Herausforderung stellt teilweise die Maßhaltigkeit und deren Reproduzierbarkeit dar [KNOOP ET AL. 2017].

5.2.1 Hardwareauswahl

Nach den in Kapitel 5.2 beschriebenen Vorteilen, wird ein Drucker im FDM-Verfahren eingesetzt. Bei dem verwendeten Drucker handelt es sich um den Ultimaker 3 mit zwei Düsen zur dualen Extrusion und den folgenden Spezifikationen [3DMENSIONALS 2020]:

- Bauraum: 215 x 215 x 200, Schichtdicke mit 0,4 mm Düse: 0,02 - 0,20 mm
- Düsendurchmesser: 0,25 mm, 0,4 mm und 0,8 mm, Filament-Ø: 2,85 mm
- Druckgeschwindigkeit: bis 300 mm/s, Materialflussgeschwindigkeit: bis 16 mm³/s
- Drucktemperatur: 180° - 280°C, Heizbett: 20 - 100 °C

5.2.2 Materialauswahl

Das FDM-Verfahren ist für thermoplastische Kunststoffe geeignet. Häufig werden ABS und PLA eingesetzt. Des Weiteren können auch Kunststoffe wie PC und mittlerweile auch thermoplastische Elastomere wie TPE verwendet werden. Die Zusammensetzung der Filamente variiert je nach Hersteller, daher sind allgemeine Aussagen zu spezifischen Merkmalen nicht möglich. Um einen Überblick über die verschiedenen Materialien und ihre Kennwerte zu erhalten, dienen Tabelle 5.1 und 5.2 als Orientierung.

Im Folgenden werden die gängigen FDM-Materialien und ihre physikalischen Eigenschaften (Tabelle 5.1), speziell die temperaturspezifischen Eigenschaften (Tabelle 5.2) aufgezeigt. Die physikalischen Eigenschaften geben Aufschluss über die Steifigkeit des Mate-

rials und damit über die Bewegungsmöglichkeiten. Über die Dichte kann das Gewicht bestimmt werden. Die temperaturspezifischen Parameter sind wichtig, um den Einsatz während der Erwärmung des Drahts zu gewährleisten. Bei der Auswahl des Materials sind nicht nur die aufgeführten physikalischen Parameter ausschlaggebend, sondern auch die Druckbarkeit, die Formstabilität und die Möglichkeit zur Verbindung unterschiedlicher Materialien, um dadurch die bestmöglichen Ergebnisse zu erzielen.

	ABS	TPE	PLA	PC	PETG	PA
Dichte [g/cm³]	1,12 [3] 1,05 [10] 1,10 [14] 1,03 [22]	1,20..1,24 [8] 1,09 [12] 1,22 [19], [21] 1,15 [20]	1,17..1,24 [1, 2] 1,24 [11], [15], [23] 1,22 [16]	1,18..1,20 [4], [18] 1,19..1,20 [5]	1,25 [6] 1,25 [7] 1,27 [13]	1,12 [9] 1,14 [17]
E-Modul [MPa]	2174 ± 285 [3] 1681,5 [14] 1860 [22]	26 [19] 9,4 ± 0,3 [8] (100 % Modul)	2636 ± 330 [1] 1879 ± 109 [2] 2346,5 [15] 1820 [16] 3145 [23]	2048 ± 66 [4] 2307 ± 60 [5] 2134 [18]	1523 ± 50 [6] 1472 ± 270 [7] 2020 [13]	2223 ± 199 [9] 579 [17]
Zugfestigkeit [N/mm²] (Streckspannung)	33,3 ± 0,8 [3] 47 [10] 39 [14] 36 [22]	29,0 ± 2,8 [8] 14 [12] 8,6 [19] 9 [21]	46,6 ± 0,9 [1] 28,1 ± 1,3 [2] 63 [11] 49,5 [15] 37 [16] 105 [23]	59,7 ± 1,8 [4] 62,7 ± 1,3 [5]	31,7 ± 0,1 [6] 31,9 ± 1,1 [7] 50 [13]	66,2 ± 0,9 [9] 27,8 [17]
Streckdehnung [%]	3,5 [14]	55 [19] 55 [21]	3,3 [15] 3,1 [16]		6 [13]	20 [17]
Bruchspannung [MPa]	33 [14]	39 [19] 39 [21]	45,6 [15] 37 [16]	76,4 [18]		34,4 [17]
Bruchdehnung [%]	2,7 ± 0,4 [3] 4,8 [14] 9 [22]	330,1 ± 14,9 [8] 990 [12] 580 [19] 580 [21]	1,9 ± 0,2 [1] 1,4 ± 0,3 [2] 4 [11], 5,2 [15] 3,1 [16] 175 [23]	12,2 ± 1,4 [4] 3,2 ± 0,4 [5] 6,4 [18]	4,4 ± 0,6 [6] 6,8 ± 0,9 [7] 23 [13]	9,9 ± 1,5 [9] 210 [17]
Biegemodul [MPa]	1339 ± 238 [3] 2050 [10] 2070 [14] 2148 [22]	78,7 [19]	3283 ± 132 [1] 2119 ± 60 [2] 3150 [15] 2490 [16] 2364,3 [23]	2044 ± 55 [4] 2477 ± 159 [5] 2410 [18]	1174 ± 64 [7] 2050 [13]	1667 ± 118 [9] 463,5 [17]
Biegefestigkeit [N/mm²]	59,0 ± 1,3 [3] 76 [10] 70,5 [14] 65,7 [22]	4,3 [19]	85,1 ± 2,9 [1] 48,0 ± 1,9 [2] 103 [15] 78 [16] 54,4 [23]	94,1 ± 0,9 [4] 100,4 ± 2,7 [5] 110 [18]	58,3 ± 0,4 [6] 53,7 ± 2,4 [7] 69 [13]	97,0 ± 1,1 [9] 24 [17]
Shore Hardness	76D	95A [8] A85 [12] 95A, 46D [19] 45D [20] 95A [21]	83D [15] 79D [16]	82D [18]		74D
Izod-Schlagzähigkeit [kJ/m²]	10,5 [14] 29 [22]	34,4 [19] 19,1 [21]	5,1 [15] 9 [16]	4,1 [18]		34,4 [17]
Charpy-Schlagzähigkeit [kJ/m²]	12,6 ± 1,1 [3] 21 [10]		2,7 ± 0,2 [1] 12,2 ± 1,03 [2]	25,1 ± 1,9 [4] 3,4 ± 0,1 [5] 3,41 [18]	9,7 ± 2,6 [6] 5,1 ± 0,3 [7] 8,1 [13]	9,6 ± 1,4 [9]

Quellen: [1 - 9]: eu.polymaker.com (100 % Füllung): [1]: PolyLite PLA, [2]: PolyMax PLA, [3]: PolyLite ABS, [4]: PolyMax PC, [5]: Poly-Lite PC, [6]: PolyMax PETG, [7]: PolyLite PETG, [8]: PolyFlex TPU95, [9]: PolyMide CoPA, [10 - 13]: verbatim.de: [10]: ABS, [11]: PLA, [12]: Primalloy TPE, [13]: PETG, [14 - 19]: ultimaker.com (90 % Füllung): [14]: ABS, [15]: PLA, [16]: Tough PLA, [17]: Nylon, [18]: PC, [19]: TPU 95A, [20]: innofil3d.de, Innofil3D Innoflex 45, [21]: ninjatek.com, Ninjatek Cheetah, [22 - 23]: formfutura.com [22]: Premium ABS, [23]: Premium PLA

Tabelle 5.1: Physikalische Eigenschaften typischer FDM-Materialien

Es zeigt sich, dass die Werte innerhalb der physikalischen Eigenschaften eines Materials teilweise stark schwanken. Dies liegt zum einen an den unterschiedlichen Herstellern und damit abweichenden Zusammensetzungen, zum anderen an den verschiedenen Druckparametern wie Füllung oder Materialfluss und Drucktemperatur.

		T_D [°C]	T_s [°C]	VST [°C]	HDT [°C]	T_H [°C]	T_g [°C]
ABS	Formfutura Premium	220..270	145 ± 10	92		90..110	
	Ultimaker ABS	250	225..245	97	85	80	
	Verbatim ABS	220..240		104		0..100	
	Polymaker PolyLite	245..265		104		90..105	101
PLA	Formfutura Premium	190..225	210 ± 10	62		0..60	
	Polymaker PolyLite	190..230	150	63		25..60	61
	Polymaker PolyMax	190..230	149	62		25..60	61
	Verbatim PLA	200..220	168			60	58
	Ultimaker PLA	210	145..160		50	60	60
	Ultimaker Tough PLA	205	151	63	60		62
PC	Polymaker PolyMax	250..270		117		90..105	113
	Polymaker PolyLite	250..270		119		90..105	113
	Ultimaker PC	260			110	110	112..113
TPE	Polymaker PolyFlex TPU95	210..230				25..60	
	Verbatim Primalloy TPE	230 ± 10	175..195			60	
	Innofil3D InnoFlex 45 TPC	230 ± 20	180			60	-35
	Ninjatek Cheetah	230..240	220		49..74 belastet	Zimmer-temp.	-24
	Ultimaker TPU 95A	235..260	220		100 (49..74 belastet)	45..70	-24
PETG	Polymaker PolyMax	230..240		82		70..80	79
	Polymaker PolyLite	230..240		84		70..80	81
	Verbatim PETG	235 ± 10				90	
PA	Polymaker PolyMide CoPA	250..270	190	180		25..70	67
	Ultimaker Nylon	250	185..195		80	60	50

Drucktemperatur: T_D Glasübergangstemperatur: T_g
 Temperatur Heizbett: T_H Vicat-Erweichungstemperatur: VST
 Schmelztemperatur: T_s Wärmeformbeständigkeitstemperatur: HDT

Quellen: [formfutura.com], [ultimaker.com], [verbatim.de], [eu.polymaker.com], [innofil3d.de], [ninjatek.com]

Tabelle 5.2: Temperatur-Parameter typischer FDM Materialien

PLA kann aufgrund der geringen Erweichungstemperatur nicht in Kombination mit FGL verwendet werden, da sich der FG-Draht bereits ohne Belastung auf 70 °C (vgl. Kapitel 4.1.2) erwärmt, was über der Erweichungstemperatur von PLA liegt. Bei PETG gilt dies ebenfalls. Das Filament PolyMide von Polymaker (PA) weist eine hohe VST auf. Leider erwies sich das Material mit dem eingesetzten Ultimaker 3 als schlecht druckbar, wenig formstabil und der Zusammenhalt der einzelnen Schichten war sehr gering. Versuche mit der Verbindung von PC und TPE haben ebenfalls gezeigt, dass sich die beiden

Materialien schlecht miteinander verbinden. Die Nahtstellen zwischen TPE und PC lösen sich bereits nach leichter Beanspruchung. ABS hat zwar eine geringere VST als PC und PA, allerdings haben Testdrucke gezeigt, dass die Schichten bei ABS gut haften, die Proben eine gute Oberfläche aufweisen und sehr formstabil sind. Auch die Verbindung von TPE und ABS hat sich als sehr gut erwiesen. Aufgrund der guten Druckeigenschaften wird für die Prototypen das Filament Ultimaker ABS gewählt.

Das Drucken von TPE-Filamenten mit dem Ultimaker 3 ist aufgrund der Weichheit des Materials mit Schwierigkeiten verbunden. Je flexibler das Material ist, desto langsamer muss gedruckt werden. Ein weiteres Problem bei der Verwendung eines TPE Filaments im FDM-Druck stellt die Extrusion dar. Da das Material weich ist, kann sich das Filament im Extruder biegen und abreiben und damit den Extruder verstopfen. Auch die Retraktion (Rückzug des Filaments in den Extruder, um das ungewollte Austreten des Materials, beispielsweise bei Bewegungen, zu verhindern) stellt ein Problem dar, da dadurch eine Verstopfung des Extruders begünstigt wird. Versuche mit den in Tabelle 5.2 aufgeführten TPE Werkstoffen haben gezeigt, dass sich das Filament Verbatim Primalloy TPE mit dem vorhandenen Drucker am besten verarbeiten lässt.

5.2.3 Verbindung von passiver und aktiver Struktur mittels FDM

Die Parameter zur Entwicklung von ASS wurden bereits in Bezug auf die aktive und passive Struktur sowie die Anwendung untersucht (Kapitel 4.3). Im Folgenden sollen daher zusätzlich die Parameter betrachtet werden, die aufgrund der Wahl des Fertigungsverfahrens der passiven Struktur einen Einfluss auf das System haben. Dazu werden zunächst die Möglichkeiten einer Verbindung untersucht (Kapitel 5.2.3.1). Auf dieser Grundlage werden Einflussparameter auf die Eigenschaften von FDM-Bauteilen im Hinblick auf die Verwendung in ASS aufgezeigt (Kapitel 5.2.3.2). Zusammenfassend werden diese Parameter mit den Parametern zur Entwicklung von ASS verknüpft, um so wichtige Merkmale bei der Konzeption und Entwicklung der Prototypen festzulegen (Kapitel 5.2.3.3).

Die Untersuchung der Verbindung von passiver und aktiver Struktur mittels FDM wurde bereits im Rahmen einer Vorstudie unter Anleitung des Verfassers durchgeführt und veröffentlicht [OBERHOFER & HEIN ET AL. 2018]. Hier soll genauer auf die einzelnen Eigenschaften und Merkmale eingegangen werden und eine Verknüpfung mit den vorangegangenen Untersuchungen stattfinden.

5.2.3.1 Kombination von FDM und FGL

Der Hauptvorteil der Kombination von FGL und FDM ist die Möglichkeit flexible, bewegliche Strukturen zu generieren, die sich an äußere Randbedingungen anpassen. Durch den Einsatz des FDM-Verfahrens sind komplexe Geometrien herstellbar. Durch die Möglichkeit des Eingriffs im Druckprozess kann das FG-Element während des Drucks eingebracht werden. Das Drucken mit zwei Materialien ermöglicht eine Vielzahl an unterschiedlichen Strukturen und Gelenken zur Umsetzung der Bewegung.

Trotz der Potenziale stellt die Verbindung und die Integration von FGL in die Struktur, speziell in eine FDM-Struktur, noch eine große Herausforderung dar. Daher werden zunächst Beispiele in der Forschung untersucht, die sich mit der Verbindung von FDM und FGL beschäftigen, mit dem Antrieb eines FDM gedruckten Bauteils über einen Draht oder mit dem FDM-Druck von beweglichen Strukturen. Darauf aufbauend werden die grundlegenden Arten einer möglichen Integration analysiert.

Ein wesentlicher Aspekt, um die Forderung nach einer beweglichen Struktur zu erfüllen, ist die Flexibilität der Strukturkomponenten. Eine Analyse der identifizierten Strukturen zeigt, dass es zwei grundlegende Designmöglichkeiten gibt: die Nutzung der elastischen Verformbarkeit des Materials und die Generierung einer flexiblen Verbindung durch mindestens zwei Komponenten (kontaktlos). Im Bereich Material kann zwischen der Verwendung eines flexiblen Materials (niedriger E-Modul) oder einer angepassten Geometrie sowie eine Kombination der beiden unterschieden werden. Erste Untersuchungen zur Verbindung fanden bereits in einer Vorstudie statt [OBERHOFER & HEIN ET AL. 2019]. Diese bestätigt die vorangegangenen Designmöglichkeiten und gibt einen Überblick über erste Beispiele, die in dieser Arbeit erweitert und analysiert werden. Tabelle 5.3 gibt einen Überblick über aussagekräftige Beispiele, die stellvertretend für die durchgeführte Recherche stehen. Die Einteilung der Kategorie zur Realisierung der Bewegung findet dabei entsprechend der Definition in Kapitel 4.2.2 statt.

Insgesamt wird festgestellt, dass die Verbindung von FDM und FGL bereits erste Anwendung in der Forschung findet, aber das volle Potenzial noch nicht ausgenutzt wird. In vielen Fällen wird das FDM-Verfahren zum Druck der Gussformen verwendet oder ein normaler Draht als Antrieb eingesetzt. Dennoch zeigt sich, dass mit FGL unterschiedliche Bewegungsrichtungen erzeugt werden können und für die Umsetzung der Bewegung sowohl der Ansatz über das flexible Material als auch über die Geometrie genutzt wird.



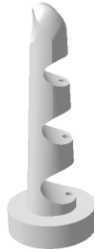

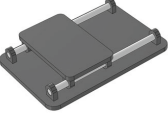
	Kategorie	Beschreibung	Beispiel
Material	Flexibles Material	Twisting Actuator [RODRIGUE ET AL. 2014], Wrist-like Actuator [RODRIGUE ET AL. 2015] <ul style="list-style-type: none"> • Struktur: Polydimethylsiloxane (PDMS) Matrix (Gussform ABS mit FDM-Druck) • Antrieb: FG-Draht (Flexinol) 	 [RODRIGUE ET AL. 2014]
		Soft Robot [UMEDACHI ET AL. 2013] <ul style="list-style-type: none"> • Struktur: TPE (Polyjet Verfahren) • Antrieb: FG-Draht 	
		Hinge Actuator [WANG ET AL. 2016A], [WANG ET AL. 2016B] <ul style="list-style-type: none"> • Struktur: PDMS-Matrix, Form ABS mit FDM gedruckt • Antrieb: FG-Draht (Flexinol) 	
		Soft Morphing Structure [KIM ET AL. 2013], <ul style="list-style-type: none"> • Struktur: Grundstruktur ABS, Matrix außen PDMS • Antrieb: FG-Draht (Flexinol) 	
		Soft Morphing Hand [KIM ET AL. 2016] <ul style="list-style-type: none"> • Struktur: PDMS Matrix (Finger), FDM (Hand) • Antrieb: FG-Draht (NiTi) 	
	Geometrie / Struktur	Textil-based Structures [GÜRCÜM ET AL. 2017], Lace Pattern [MELNIKOVA ET AL. 2014] <ul style="list-style-type: none"> • Struktur: FDM-Druck (ABS) / Soft PLA (FDM) 	 [BREUNINGER ET AL. 2013]
		Living Hinge [CAHOON 2016] <ul style="list-style-type: none"> • Struktur: 3D-Druck Nylon, TPE, TPU, Soft PLA 	
		Generative Fertigung von Festkörpergelenken und elastischen Elementen [BREUNINGER ET AL. 2013]	
	Kombination	Robotic Joint [CASE ET AL. 2016] <ul style="list-style-type: none"> • Struktur: Gelenk: Elastomer, in 3D-PLA-Teile gegossen • Antrieb: FG-Draht (NiTi) 	 [MUTLU ET AL. 2015]
		Prosthetic Finger [MUTLU ET AL. 2015], [LIU ET AL. 2016] <ul style="list-style-type: none"> • Struktur: TPE mit elliptischen Aussparungen / PolyFlex (3D gedruckt) mit elliptischen Aussparungen • Antrieb: normaler Draht 	
Flexible Verbindung	Mehrteilige Gelenke	Elastic parts in Joints [ROSA ET AL. 2017] <ul style="list-style-type: none"> • Struktur: TPU und PLA (2-Komponenten-FDM-Drucker) • Antrieb: normaler Draht 	 [SCHULZ ET AL. 2017]
		Rotational Joint [SCARCIA ET AL. 2017] <ul style="list-style-type: none"> • Struktur: FDM-Druck (ABS) Finger mit Federelementen • Antrieb: Bogensehne 	
		Additiv gefertigte Kunststoffgelenke [SCHULZ ET AL. 2017] <ul style="list-style-type: none"> • Struktur: FDM (ABS, PLA) und SLA (Standardharze) 	
		Wing Actuation [COLORADO 2012] <ul style="list-style-type: none"> • Struktur: einfaches Drehgelenk aus Plastik • Antrieb: FG-Draht als Antrieb zum Morphing 	
	Generative Fertigung von Gelenken [BREUNINGER ET AL. 2013]		
Führungen	Generative Fertigung von Führungen [BREUNINGER ET AL. 2013]		

Tabelle 5.3: Bewegliche Strukturen im Bereich FDM und FGL

In dieser Arbeit wird die passive Struktur im FDM-Verfahren hergestellt (Kapitel 5.2). Möglichkeiten zur Verbindung mit der aktiven Struktur wurden in einer Voruntersuchung [OBERHOFER & HEIN ET AL. 2019] diskutiert. Diese sollen im Folgenden vertiefend betrachtet und eine geeignete Option für die Fertigung der Prototypen ausgewählt werden. Bei der Nutzung des FDM-Druckers ergeben sich als Möglichkeiten zur Verbindung (Abbildung 5.3):

- 4D-Druck: direktes Drucken des FG-Elements und der passiven Struktur,
- Zuführung: Einlegen des FG-Elements während des Druckprozesses,
- Zusammenbau: Einlegen des FG-Elements und
- Umgießen: FDM zur Erstellung einer Gussform.

DIREKT		INDIREKT	
4D-Druck	Zuführung	Zusammenbau	Umgießen
FG- & FDM-Elemente werden direkt gedruckt	FDM-Element wird gedruckt und FGL wird während des Prozesses eingesetzt	FDM-Element wird gedruckt (Einzelteil oder mehrere Teile) und mit FG-Element zusammengebaut	FDM indirekt verwendet (Gussform) und FGL eingesetzt und umgossen
	automatisiert ohne Prozessunterbrechung manuell mit Prozessunterbrechung	ohne Nachbearbeitung mit Nachbearbeitung	

Abbildung 5.3: Darstellung der Ansätze zur Verbindung von FDM und FGL nach OBERHOFER & HEIN ET AL. [2019]

Die ersten beiden Ansätze werden als direkte Ansätze bezeichnet, da hier die Verbindung von FGL und FDM direkt im Fertigungsprozess stattfindet. Die Option des 4D-Druckens des FG-Elements wird nicht weiter vertieft, da sich die Forschung noch in den Grundlagen befindet und der Fokus dieser Arbeit nicht auf der Herstellung von FG-Elementen liegt.

Die Zuführung während des Druckprozesses kann automatisiert, ohne Unterbrechung des Prozesses, über eine Zuführung erfolgen oder manuell, mit Unterbrechung des Prozesses, über das Einlegen durch den Anwender. Durch die Zuführung ist das FG-Element optimal und frei in der Struktur platzierbar. Allerdings kann es durch eine Unterbrechung des Prozesses zu Ablösungen, Haftungsproblemen und Verzug kommen. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, dass durch die hohen Temperaturen im Druckprozess FG-Elemente ungewollt aktiviert werden oder Schaden nehmen.

Bei Zusammenbau und Umgießen handelt es sich um indirekte Ansätze, da eine Zusammenführung von aktiver und passiver Struktur erst nach Fertigstellung beider Komponenten erfolgt, beziehungsweise der FDM-Druck als Mittel zur Herstellung der Gussform dient. Beim Zusammenbau wird das FG-Element nach der Fertigstellung der FDM-Struktur mit dieser verbunden. Diese Verbindung kann mit oder ohne Nachbearbeitung erfol-

gen: Wird in der Struktur bereits eine Aussparung für das FG-Element vorgesehen, so erfolgt ein Zusammenführen ohne Nachbearbeitung. Die Vorteile bei dieser Verbindungsart bestehen darin, dass der Druckprozess nicht unterbrochen werden muss und negative Einflüsse auf das FG-Element durch den Prozess ausgeschlossen werden können. Nachteile ergeben sich dadurch, dass die Positionierung des FG-Drahts nur eingeschränkt möglich ist, der Draht beim Zusammenbau beschädigt werden kann (Knicken), dass bei Nachbearbeitung ein weiterer Schritt notwendig ist und dass aufgrund der Aussparung eine komplizierte Struktur (teilweise mit Stützstruktur) vorgesehen werden muss. Beim Umgießen wird der FDM-Druck als Mittel zur Gestaltung der Negativform genutzt und ein Gussmodell gedruckt. Vorteile sind die optimale Platzierungsmöglichkeit des FG-Drahts und die homogene Materialverteilung der passiven Struktur. Nachteilig ist auch hier, dass die Temperatur beim Eingießen des Materials zur ungewollten Aktivierung oder Schädigung des FG-Elements führen kann. Da die Verbindung von FDM und FGL nur über die Gussform besteht, wird dieser Ansatz nicht weiter betrachtet.

Zu den Ansätzen Zuführung und Zusammenbau wurden Versuche mit einfachen Prototypen durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass ein Einlegen der Struktur während des Druckprozesses schwer möglich ist. Durch die Temperatur beim Druck von über 200 °C wird das verwendete FG-Element aktiviert, was bedeutet, dass es sich verkürzt. Daher muss die aktive Struktur entsprechend befestigt werden, um zu verhindern, dass durch die Bewegung der Druckprozess gestört wird. Des Weiteren ist durch die Aktivierung bei Nutzung des Einwegeffekts (Kapitel 2.5.2.1) eine weitere Vordehnung der FGL notwendig. Dies muss im Fall des Zuführens nachträglich erfolgen, was zu Problemen führt, beispielsweise bei Einspannung, Dehnungsmessung und Befestigung. Dennoch soll der Ansatz nicht komplett verworfen werden, da die oben beschriebenen Vorteile wie die optimale Positionierung, die direkte Fertigung der Verbindung und die Einsparung des Zusammenbaus in speziellen Einsatzfällen Anwendung finden kann. Dies hängt auch stark von der Modellform und den physikalischen Eigenschaften des FG-Elements ab.

Der Ansatz Zusammenbau hat sich bei den Vorversuchen als zielführend erwiesen. Durch die Einfachheit der Prototypen und des FG-Elements ist der Zusammenbau ohne Nachbearbeitung möglich, da die Führung des Drahts direkt als Aussparung gedruckt werden kann. Aufgrund der Anbindung des Drahts außerhalb der passiven Struktur, ist eine Vorbereitung des FG-Elements und ein nachträgliches Einlegen und Befestigen möglich. Durch die horizontale Führung ohne Umlenkung in den Prototypen ergeben sich beim Einlegen keine Einschränkungen durch eine Beschädigung des Drahts aufgrund von Knicken.

5.2.3.2 Einflussparameter auf FDM-Bauteile

Um die Verbindung der aktiven und passiven Struktur zu untersuchen, ist es notwendig, neben den allgemeinen Parametern (Kapitel 4.3), den spezifischen Parametern und Eigenschaften der FGL (Kapitel 2.4.2.1, 2.5) sowie der materialabhängigen Eigenschaften der passiven Struktur (Tabelle 5.1, 5.2) auch die verfahrensabhängigen Einflüsse zu betrachten. Beim FDM-Verfahren kann zwischen drei grundlegenden Einflussgruppen unterschieden werden: die vom Drucker und vom Material fest vorgegebenen Parameter sowie die vom Nutzer zu bestimmenden bzw. einstellbaren Parameter. Die vom Drucker fest vorgegebenen Parameter wurden in Kapitel 5.2.1 betrachtet, die materialabhängigen Eigenschaften wurden in Kapitel 5.2.2 beschrieben und auf die vom Anwender zu bestimmenden bzw. einstellbaren Parameter wird im Folgenden näher eingegangen.

Anhand der Randbedingungen des eingesetzten Druckers (Ultimaker 3) und der verwendeten Druck-Software (Ultimaker Cura) kann der Nutzer Druckparameter anpassen. Dazu gehören beispielsweise Schichtdicke, Orientierung der einzelnen Schichten, prozentualer Anteil sowie die Geometrie der Füllung, Linienabstand, Druckgeschwindigkeit, Drucktemperatur usw. Des Weiteren bestimmt der Anwender über Geometrie und Auslegung der Struktur Steifigkeit und Formgestalt. Tabelle 5.4 fasst wichtige Parameter und Einstellmöglichkeiten FDM-gedruckter Bauteile mit dem eingesetzten Drucker, vor allem im Hinblick auf den Einsatz in ASS, zusammen. Grundlage dafür bildet die in dieser Arbeit zum Druck verwendete Software Ultimaker Cura 4.6.1. [ULTIMAKER 2020].

	Untergeordnete Parameter	Beschreibung, Abhängigkeiten, Einflüsse
Qualität	Schichtdicke	niedrig: höhere Auflösung aber langsamer Druck
	Linienbreite / Breite Fülllinien	Düsenbreite; leichte Reduzierung → bessere Drucke
Gehäuse	Wanddicke / Wandlinien / obere, untere Dicke	Dicke der Wand / Anzahl Wandlinien / Dicke obere und untere Schichten, Anzahl der Schichten
	oberes / unteres Muster	Muster der oberen / unteren Schichten
	Richtung obere / untere Linien	als Liste eingetragen: wird je Schicht definiert
	Außenwände vor Innenwände	kann Maßgenauigkeit bspw. bei ABS erhöhen
	Lücken füllen / ausfiltern	füllt Lücken aus / reduziert Tropfen an Außenseite
	Außenhaut überlappen	Überlappung zw. Wänden zur festen Verbindung
Füllung	Fülldicke / Linienabstand	Dichte Füllung / Abstand zwischen Fülllinien
	Füllmuster / Linienrichtung Füllung / Füllung überlappen	s. o. entspricht Gehäuse
	Füllungslinien verbinden	Verbindung zwischen Füllmuster und Innenwand, bessere Haftung und Qualität vertikaler Flächen
	Füllung vor Wänden	Wände zuerst: präzise Wände, aber schlechtere Überhänge, Füllung zuerst: stabilere Wände

Tabelle 5.4: Parameter und Einstellmöglichkeiten [ULTIMAKER 2020] FDM-gedruckter Bauteile mit Fokus auf adaptive Strukturen und Systeme (Teil 1/2)

	Untergeordnete Parameter	Beschreibung, Abhängigkeiten, Einflüsse
Material	Temp. Druck, Druckplatte	abh. vom Material, beeinflusst Verbindung aS & pS
	Fluss	erhöht / verringert Materialmenge, erhöht Zusammenhalt der Linien
Geschwindigkeit	Druckgeschwindigkeit	niedrige Geschwindigkeit <ul style="list-style-type: none"> • Außenwand: bessere Qualität • erste Schicht: bessere Haftung
		hohe Geschwindigkeit <ul style="list-style-type: none"> • bessere Verbindung durch kurze Druckzeit
Bewegung	Einzug aktivieren	Materialeinzug, wenn Düsenbewegung, ohne Druck
	Einzugsabstand / Einzugs- geschwindigkeit	langsam: Materialaustritt während Bewegung schnell: Material reißt ab und wird nicht vollständig eingezogen, Material schleift im Extruder → Beschä- digung
	max. Anzahl von Einzügen	begrenzt Anzahl von Einzügen → wiederholtes Ein- ziehen desselben Filamentabschnitts → Schleifen
	Combing-Modus	Düse bleibt während Bewegung innerhalb von be- reits gedruckten Bereichen, reduziert Einzüge
Kühlung	Kühlung aktivieren	verbessert Qualität von Schichten mit kurzen Zeiten
	Mindestzeit für Schicht	verlangsamt Druck, damit Schicht abkühlen kann
	Mindestgeschwindigkeit	Mindestgeschw. zur Beibehaltung der Druckqualität
Stützstruktur	Stützstruktur generieren	Unterstützung bei Überhängen
Druckplat- tenhaftung	Haftungstyp	Brim: flacher Bereich, verhindert Warping Raft: Gitter unter Modell; Skirt: Linie um Modell
	Geometrie des Haftungstyps	Einstellen von Breite, Länge usw.
Duale Extrusion	Einzugsturm	Einziehen des Materials nach Düsenwechsel
	Sickerschutz	Hülle um das Modell zum Abstreifen der Düse
	Einzugsabstand / -geschwin- digkeit	Einzug beim Wechsel / hohe Geschwindigkeit bes- ser, aber mögl. Schleifen des Filaments
Netzrepara- turen	Volumen vereinen / Lücken entfernen / Stitching usw.	Verbesserung der internen Geometrie
Sonderfunk- tionen	Form / Oberflächenmodus / Spiralisieren	Modell als Form / als Oberfläche / Glätten der z-Be- wegung der äußeren Kante

Tabelle 5.4: Parameter und Einstellmöglichkeiten [ULTIMAKER 2020] FDM-gedruckter Bauteile mit Fokus auf adaptive Strukturen und Systeme (Teil 2/2)

5.2.3.3 Parameter bei der Verbindung von FGL und FDM

Bei der Verbindung von FGL und FDM werden zusätzlich zu den in Kapitel 4.3 abgeleiteten Parametern spezielle Parameter in Bezug auf das FDM-Verfahren (Kapitel 5.2.3.2, Tabelle 5.4) eingebracht. Der Fokus liegt dabei auf adaptiven Strukturen und Systemen, die sich durch ihre Bewegung und Flexibilität auszeichnen.

Die Parameter im Bereich FGL wurden in Kapitel 4.3.1 beschrieben und diskutiert, daher wird im Folgenden auf die spezifischen Parameter im Bereich FDM eingegangen. Grundlage bilden die übergeordneten Hauptmerkmale. Der Bereich Geometrie beinhaltet Qualität, Komplexität, Gehäuse und Füllung. Die untergeordneten Parameter und Einstellmöglichkeiten können Tabelle 5.4 entnommen werden. Die Zeit beschreibt die zu erwar-

tende Lebensdauer der Konstruktion sowie die benötigte Mindestzeit pro Schicht. Unter der Bewegung werden Material- und Druckbewegungen, wie Fahrweg, Einzug, Materialfluss und Druckgeschwindigkeit zusammengefasst. Die physikalischen Eigenschaften umfassen Materialparameter wie Erweichungstemperatur, Dichte, Leitfähigkeit, E-Modul oder Biegefestigkeit (vgl. auch Tabelle 5.1 und 5.2). Bei der Energie handelt es sich um die Drucktemperatur und die Temperatur der Druckplatte. Die Kraft beinhaltet das Eigengewicht der Struktur, die ertragbare Kraft sowie die Druckplattenhaftung.

Der paarweise Vergleich der Parameter von FDM und FGL (Tabelle 5.5) weist hohe Einflüsse und Abhängigkeiten auf. Dadurch ist die Beeinflussung ableitbar und eine Abschätzung des Effekts bei einer Anpassung der Parameter möglich.

FDM	Geometrie Qualität, Komplexität, Gehäuse, Füllung	Zeit Lebensdauer, Mindestzeit Schicht	Bewegung Fahrweg, Materialfluss, Druckgeschw.	Phys. Eig. Erweichungstemp., Dichte, Leitfähigkeit, ..	Energie Drucktemp., Temp. Platte	Kraft Gewicht, ertragb. Kraft, Haftung
FGL						
Geometrie Länge, Form, Anzahl, Anordnung, Durchmesser	Geometrie ↔ Komplexität ↔ Integration aS ↔ Fkt.integration		Geometrie ↔ Fahrweg (*)	Anordnung ↔ Leitfähigkeit		Geometrie ↔ mögliche Kraft ↔ ertragbare Kraft
Zeit Akt.- & Deakt.zeit, Lebensdauer	Deakt.zeit ↔ Füllung / Gehäuse (Muster, Wandlinien)			Akt.- & Deakt.zeit ↔ Leitfähigkeit	Lebensdauer ↔ Drucktemp.	Lebensdauer ↔ Gewicht
Bewegung Länge, Art, Richtung, Häufigkeit	Art, Richtung ↔ Komplexität	Häufigkeit ↔ Lebensdauer		Bewegung ↔ E-Modul, Biegefestigkeit usw.		Bewegung ↔ Gewicht
Phys. Eig. Dichte, E-Modul, Temp.					Schmelztemp., Effektivverlusttemp. ↔ Drucktemp.	E-Modul ↔ Gewicht, ertragb. Kraft
Energie Aktivierungstemp., Art der Akt. / Deakt.	Art der Deakt. ↔ Füllung / Gehäuse (Muster, Wandlinien)		Akt.temp. ↔ Fahrweg (*)	Art der Akt. / Deakt. ↔ Leitfähigkeit Akt.temp. ↔ Erweichungstemp.	Akt.temp. ↔ Drucktemp.	Akt.temp. ↔ Gewicht
Kraft Größe, Art, Häufigkeit	Krafthäufigkeit, -größe ↔ Qualität, Füllung, Gehäuse	Kraft ↔ Lebensdauer		Kraft ↔ E-Modul		ertragb. Kraftgröße ↔ Gewicht Kraftgröße ↔ ertragb. Kraft

(*): bei Integration aS während Druck

Tabelle 5.5: Abhängigkeiten und Einflüsse von FGL und FDM

Die Matrix bildet damit die Grundlage für eine Vorgehensweise zur Integration von FGL in FDM-gedruckte, passive Strukturen. Eine Analyse der Einflüsse zeigt, dass bei der

passiven Struktur mit dem FDM-Verfahren vor allem die Bereiche Geometrie, physikalische Eigenschaften und Kraft starke Interaktionen und Abhängigkeiten mit den Parametern der Formgedächtnislegierung aufweisen. Bei den FGL ist es die Energie. Daher müssen diese bei einer Konzeption und Entwicklung verstärkt beachtet werden.

Neben den dargestellten Abhängigkeiten wirkt sich das FDM-Verfahren auch auf die Randbedingungen zur Erfüllung der Funktionsweise (Funktionsbaugruppen Kapitel 4.3.4) aus. Mit dem Einsatz des FDM-Verfahrens ist aufgrund der Möglichkeit zur Umsetzung komplexer Strukturen (Kapitel 5.2.3.1) eine hohe Funktionsintegration realisierbar. Daher werden im Folgenden die Auswirkungen von FDM auf die Umsetzung der Funktionsbaugruppen geprüft. Tabelle 5.6 fasst die Ergebnisse zusammen, wobei nur die Parameter mit Auswirkung auf die Funktionsbaugruppen aufgelistet werden.

Funktionsbaugruppen	Parameter FDM	Beschreibung
Führung der aktiven Struktur	Geometrie	komplexe Geometrien → direktes Drucken der Führung
	Phys. Eigenschaften	Auswahl eines Materials, das als Führung der Aktivierungstemperatur der aktiven Struktur standhält
Verbindung / Anbindung von aktiver und passiver Struktur	Geometrie	komplexe Geometrien → direktes Drucken einer Anbindung, z. B. über Schlaufe (z. B. bei Ansatz Zuführung Kap. 5.2.3.1) Vorsehen einer Aussparung / äußeren Anbindungsmöglichkeit
	Phys. Eigenschaften	Auswahl Material, das sich zum Verbinden (Kleben, Schweißen, Klemmen usw.) eignet
Rückstellung	Geometrie	Integration zusätzliches Element, z. B. Rückstellfeder komplexe Struktur mit integrierter Rückstellung komplexe Geometrien → optimale Anordnung von FGL (z. B. bei Agonist-Antagonist-Bauweise)
	Kraft / Geometrie / phys. Eigenschaften	Rückstellung über Eigengewicht → durch Füllichte oder Materialauswahl variierbar
Zu- und Abführung Wärme / Energie	Geometrie	Ableitung der Wärme über Einbindung von Kühlelementen
		Ableitung der Wärme über konstruktive Gestaltung
		Zuführung der Energie über Einbindung von Heizelementen
		Zuleitung / Führung / Aussparungen für Kabeln etc.
Phys. Eigenschaften	Auswahl eines Materials mit hoher Wärmeleitfähigkeit (schnelle Deaktivierung) oder niedriger Wärmeleitfähigkeit (langsame Deaktivierung, keine Ableitung nach außen)	
	elektrisch leitfähiges Material zur Integration Energiezufuhr	
Regelung / Steuerung	Geometrie	Drucken einer Aussparung, z. B. für Sensoren, Mikrocontroller (Integration im Druckprozess oder durch späteren Einbau)
Anbindung an das umgebende System	Geometrie	Drucken einer Anbindung an das umgebende System
	Phys. Eigenschaften	Auswahl Material, das sich zum Verbinden (Kleben, Schweißen, Klemmen usw.) eignet
Energiespeicher	Geometrie	Drucken einer Aussparung, z. B. für einen Akku (Integration im Druckprozess oder durch späteren Einbau)
		Verknüpfung von Energiezufuhr und Energiespeicher
		Drucken einer Anbindung an den Energiespeicher

Tabelle 5.6: Auswirkungen des FDM-Verfahrens auf die Funktionsbaugruppen

Auswirkungen auf die Funktionsbaugruppen haben die Geometrie und die physikalischen Eigenschaften und in einem Fall die Kraft. In Bezug auf die Geometrie zeigt sich der Haupteinfluss in der Möglichkeit, komplexe Formen und Strukturen umzusetzen. Dadurch können komplexe Anbindungen an ein System, die Verbindung von Struktur und Antrieb sowie Antriebskomponenten, Aussparungen und Funktionsstrukturen umgesetzt werden, wodurch eine hohe Funktionsintegration möglich ist. Die physikalischen Eigenschaften, speziell die Materialauswahl, beeinflusst die stoff-, kraft- und reibschlüssigen Verbindungsmöglichkeiten und die Eigenschaften in Bezug auf Wärmeleitfähigkeit. Das Potenzial einer breiten Materialauswahl sowie deren Kombination eröffnet vielfältige Lösungsoptionen für die Anbindung, Einbindung und Umsetzung der Funktionsbaugruppen. Werden die Funktionsbaugruppen direkt in den Druckprozess integriert (z. B. Einlegen während des Drucks) sind weitere Parameter wie der Einfluss der Drucktemperatur (Energie) und des Verfahrenswegs (Bewegung) auf die verwendeten Bauteile zu beachten.

5.3 Aufbau der Simulation für ASS in ANSYS

Durch die zunehmende Modellvielfalt und Produktkomplexität in heutigen Anwendungen gewinnt die Analyse der Eigenschaften anhand von Simulationen an Bedeutung. Mit dem Einsatz in den frühen Phasen der Entwicklung, können durch gezielte Vorhersagen relevante Prototypen entwickelt und damit Aufwand und Kosten gespart werden.

Die Simulation mit finiten Elementen stellt eine Möglichkeit dar, den Einfluss von Konstruktions- oder Designparametern einer Struktur oder eines Systems mit hoher Genauigkeit abzubilden und vorherzusagen. Das System aus aktiver und passiver Struktur kann ganzheitlich abgebildet und dadurch als komplettes System optimiert werden. Die Simulation ermöglicht es, Bewegungen abzuschätzen, die passive und aktive Struktur schnell zu variieren und unterschiedliche Parameter effektiv anzupassen. Abbildung 5.4 fasst allgemeine Vorteile (hellgrau) sowie spezielle in Bezug auf ASS (dunkelgrau) zusammen.

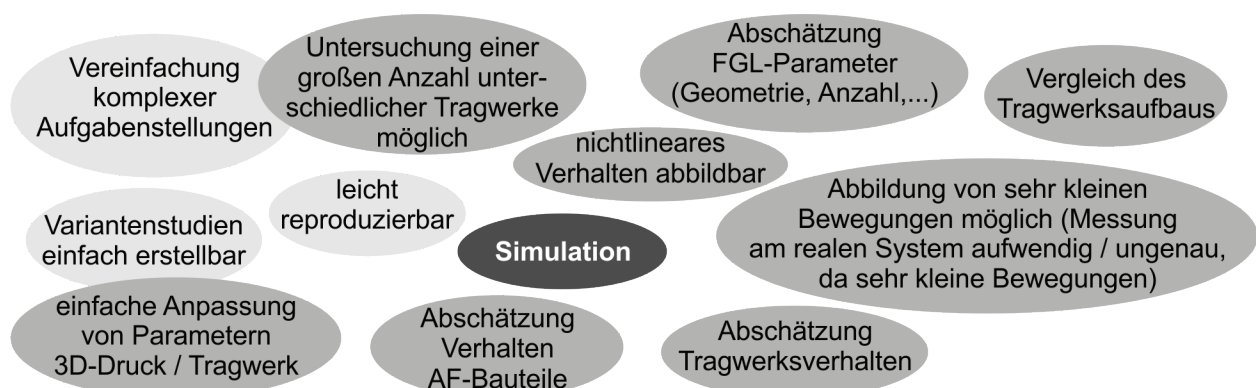


Abbildung 5.4: Vorteile der Simulation

Im Folgenden liegt der Fokus auf statisch-strukturmechanischen Analysen zur Ermittlung der Verformung, Spannungen und Dehnungen in Abhängigkeit von äußeren, ruhenden Lasten. Zur Simulation und Berechnung wird die Finite-Elemente-Software ANSYS (Version 19.1 Workbench) verwendet. Die Grundidee der Finiten-Elemente-Methode besteht darin, beliebige komplexe Geometrien in einzelne Grundelemente zu diskretisieren. Diese Elemente werden dadurch einfacher beschreibbar. Mithilfe von Ansatzfunktionen wird für jedes Element ein Gleichungssystem aufgestellt. So kann beispielsweise das Verformungsverhalten für jedes einzelne Element berechnet werden. Dazu wird die Grundgleichung der Statik herangezogen. Die Lösung erfolgt durch iterative oder direkte Gleichungslöser und ergibt die Verschiebung der einzelnen Knoten. Daraus kann die Spannung unter Verwendung eines Materialgesetzes abgeleitet werden. Die einzelnen Lösungen werden im zweiten Schritt aufsummiert und ergeben die Lösung des Gesamtsystems. Im Allgemeinen gliedert sich eine Finiten-Elemente-Simulation in drei Bereiche:

- Preprocessing / Vorbereitung: Idealisierung und Diskretisierung
- Solving / Lösung: Durch die Diskretisierung werden Differentialgleichungen in algebraische Gleichungen überführt. Diese werden numerisch gelöst.
- Postprocessing / Auswertung und Bewertung: Darstellung der Ergebnisse und Berechnung der ausgewählten Größen

Bei der Auswertung der Simulationsergebnisse wird das Ergebnis mit dem zu erwartenden Ergebnis verglichen. Wichtig ist hierbei die Kontrolle der Konvergenz, um zu zeigen, dass die Diskretisierung sich nicht wesentlich auf das Ergebnis auswirkt.

Die Konstruktion der Prototypen erfolgt in Autodesk Inventor. Die Verknüpfung zu ANSYS erweist sich v. a. im Hinblick auf eine Variation der Parameter als großer Vorteil. Die Bewegungen (Kapitel 4.2) werden in ANSYS durch eine Beanspruchung auf Zug, Druck, Biegung und Torsion betrachtet (Abbildung 5.5) und die Biegung genauer untersucht.

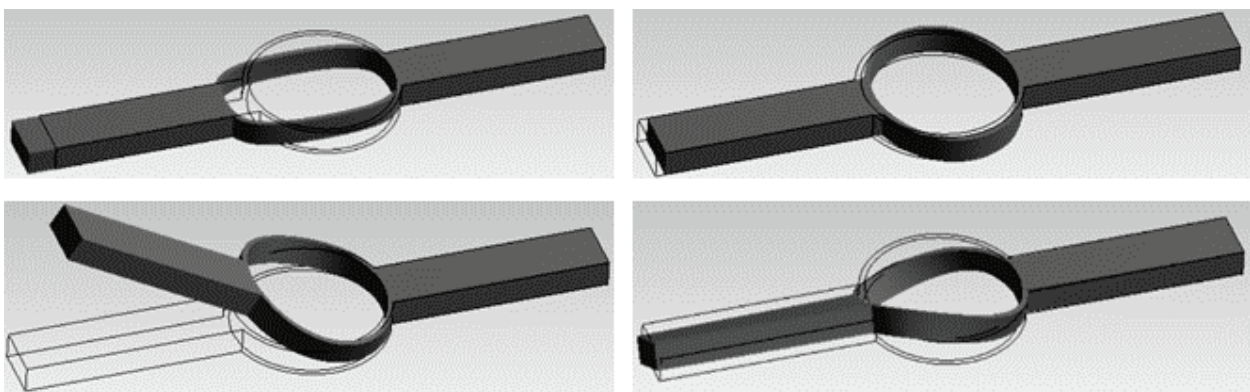


Abbildung 5.5: Belastung einer Struktur durch Zug, Druck, Biegung und Torsion

Der Schwerpunkt liegt aufgrund der Komplexität auf der Biegebeanspruchung. Im Sinne der Vereinfachung und Vergleichbarkeit mit realen Prototypen wird eine Seite fest eingespannt und die FGL durch einen Draht mit angreifender Kraft bzw. Verschiebung ersetzt (Kapitel 5.3.1.6). Anhand der Matrix zur Generierung von beweglichen Strukturen (Kapitel 4.1.1.3) werden geeignete Strukturen für die Simulation abgeleitet (Kapitel 5.4.4). Anhand derer erfolgt der Aufbau von Prototypen zur Überprüfung der Vorgehensweise und der Simulationsergebnisse. Erkenntnisse werden in die Richtlinien zum Entwurf adaptiver Strukturen und Systeme (Kapitel 6.3) überführt.

Die Simulation wird in zwei Schritten durchgeführt. Zunächst finden Vorversuche in Form von Simulationen von einfachen Strukturen für alle Bewegungsarten sowie Veränderung von Parametern statt. Darauf aufbauend werden optimierte Strukturen durch die Anpassung der Parameter festgelegt und die Biegung fokussiert. Messbare Parameter der Simulation sind z. B. Zug- / Druck-, Biege- und Torsionskräfte zur Auslegung der passiven Struktur, Dehnung / Stauchung (Zug / Druck), Biegewinkel (Biegung) und Torsionswinkel (Torsion). Ergebnisse sind Dehn-, Biege- und Torsionssteifigkeit sowie die maximal mögliche Bewegung der passiven Struktur (Auslenkung), die notwendige aufzubringende Kraft und die Bewegung der aktiven Struktur (Stellweg) und daraus abgeleitet geeignete passive Strukturen (Tragwerke) für die in der Anwendung geforderten Bedingungen.

Ziel dieser Simulation ist die Abbildung der ASS, um den Bewegungsablauf einzuschätzen, die notwendige Drahtkraft abzuschätzen und die passive Struktur schnell anzupassen. Daher ist keine identische Abbildung des realen Modells vorrangig, sondern einen in Zeit und Aufwand effizienten Weg zu finden, erste Abschätzungen zu treffen und damit Prototypen methodisch und effizient zu entwickeln.

5.3.1 Preprocessing (Idealisierung und Diskretisierung)

Zur Überführung des realen Modells in das Simulationsmodell wird eine Idealisierung des zu simulierenden Systems durchgeführt. Dabei werden Vereinfachungen der Bauteilform vorgenommen, nicht modellierte Bereiche freigeschnitten und durch Randbedingungen ersetzt sowie Materialmodelle definiert. Dazu müssen im ersten Schritt wesentliche Einflüsse erkannt werden. Danach ist es möglich, das Bauteil zu abstrahieren, die mechanischen Eigenschaften zu beschreiben, Randbedingungen festzulegen und die Materialeigenschaften zu bestimmen. Die Diskretisierung beschreibt die Zerlegung der Geometrie in einzelne Grundelemente. Es folgt die Festlegung des Elementtyps und die Vernetzung.

5.3.1.1 Modellerstellung

Das Strukturmodell wird zur Beschreibung der Bewegungen, Verformungen und Spannungen von ASS unabhängig vom verwendeten Material oder der Fertigungstechnologie erstellt. Zur Datenübergabe nach ANSYS stehen grundsätzlich zwei Wege [ANSYS 2020] zur Verfügung. Zum einen ist es möglich, die Geometrie in einem konventionellen CAD-System zu erstellen und in einem Datenformat zu speichern das in ANSYS importiert werden kann. Dabei kann das FEM-Berechnungsmodell direkt mit der CAD-Geometrie verknüpft werden. Durch die assoziative CAD-Schnittstelle besteht die Möglichkeit, Änderungen an der Geometrie im CAD-System vorzunehmen und diese dann direkt in ANSYS zu übernehmen [GEBHARDT 2018, S. 132]. Dies funktioniert auch umgekehrt: wenn der ANSYS DesignModeler zur Anpassung der Geometrie verwendet wird, kann diese Änderung auch in das CAD-System rücküberführt werden. Zum anderen kann die Modellierung der Geometrie direkt in ANSYS stattfinden.

Für die Erstellung der Modelle wird Autodesk Inventor eingesetzt. Die direkte Schnittstelle zu ANSYS ermöglicht die Anpassung der Geometrien in Inventor und die Übertragung der Anpassungen in ANSYS. Dies eignet sich, um im Bereich der passiven Strukturen unterschiedliche Geometrien schnell und einfach zu variieren oder auszutauschen.

Wie beschrieben, wird die Belastung durch Biegung genauer untersucht. Hier sind der Bewegungsablauf sowie die Positionierung des Drahts anspruchsvoll und die Simulation aufwändig. Die Modelle werden für die Simulation vereinfacht. Da die Anbindung an der Einspannungsstelle (Abbildung 5.6 rechte Anbindung) in Bezug auf die Biegung keinen Einfluss hat, wird ihre Länge verringert, um so die Simulation zu beschleunigen und die Konvergenz zu verbessern, da an der Verbindungsstelle von aktiver und passiver Struktur zusätzliche Randbedingungen eingefügt werden müssen. Der FG-Draht wird durch einen Draht aus Titanlegierung ersetzt, an dem eine Kraft bzw. Verschiebung die Kontraktion der FGL simuliert. Voraussetzung für die Auswahl des Drahtmaterials ist eine geringe Verformbarkeit durch die aufbrachte Kraft bzw. Verschiebung, um so die Bewegung nicht zu beeinflussen. Die Modelle werden einseitig fest eingespannt (rechts). Die andere Seite ist frei beweglich. Der Draht wird an der linken Seite über das zylinderförmige Element mit der Anbindung fest verbunden. Rechts am würfelförmigen Drahtende wird die Kraft bzw. die Verschiebung für die Biegung aufgebracht. Der Draht hat im Simulationsmodell wie im Realen einen Durchmesser von 0,25 mm. Der Kontakt zwischen Draht und Anbindung wird reibungsfrei (Reibungsverluste sind im Prototyp durch die Führung des Drahts in Messinghülsen vernachlässigbar) und ohne Durchdringung modelliert.

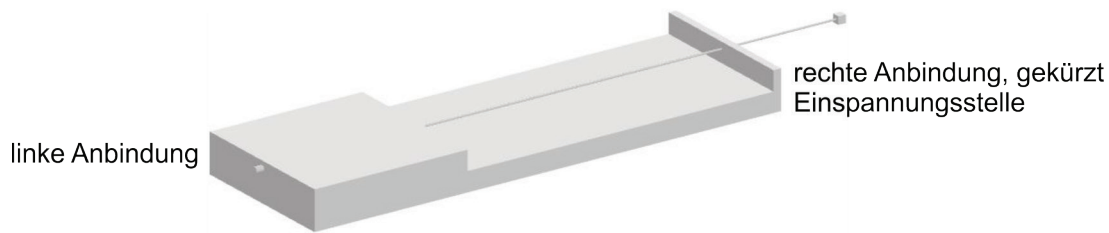


Abbildung 5.6: Vereinfachtes Simulationsmodell

Voruntersuchungen zum gesamten und gekürzten Modell sowie mit unterschiedlichen Drahtmaterialien zeigen, dass deren Einfluss vernachlässigbar und die Vereinfachung gültig ist. Die Abweichung von Auslenkung, Kraft und Stellweg liegt bei $\ll 1\%$.

5.3.1.2 Vernetzung

Bei der Vernetzung wird das Modell in einzelne, einfach berechenbare Elemente zerlegt, die durch Knoten miteinander verbunden sind. Es wird zwischen zwei grundlegenden Vernetzungstypen unterschieden [GEBHARDT 2018, S. 181 - 191]: manuelle und adaptive Vernetzung. Bei der manuellen Vernetzung wird zu Beginn das Netz für die Geometrie festgelegt. Dabei kann Art oder Größe der Elemente für die Baugruppe oder für einzelne Elemente festgelegt werden. Aus der zunächst manuellen Vernetzung wird durch die adaptive Vernetzung das Netz an den Spannungszustand, die Deformation oder eine andere Ergebnisgröße angepasst. Dazu wird die Funktion Konvergenz zu der jeweiligen Ergebnisgröße hinzugefügt. Diese passt das Netz an, bis es nur noch einen geringen Einfluss (1 % bis 20 % [ANSYS 2020]) auf das Ergebnis hat.

Zur Überprüfung der Genauigkeit des Ergebnisses, ist die Vernetzung zu kontrollieren. Dies kann beispielsweise anhand der folgenden Kriterien erfolgen [GEBHARDT 2018, S. 192 - 195]: vor der Analyse innerhalb der Funktion „Netz“ \rightarrow „Qualität“ \rightarrow „Netzqualität“ oder nach der Analyse. Hier gibt es drei Möglichkeiten zur Überprüfung. Zum einen die adaptive Vernetzung (Konvergenz) oder manuelle Netzverfeinerung an kritischen Stellen (unterscheiden sich die Ergebnisse nicht wesentlich, ist die Vernetzung ausreichend). Eine weitere Option ist die Analyse anhand der Fehlerenergie (Bereiche mit hoher Fehlerenergie sollten nicht an Auswertestellen vorherrschen). Die dritte Option ist ein Vergleich von gemittelter und ungemittelter Spannung.

Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit der Modelle wird zunächst mit identischen Größen manuell vernetzt (0,8 mm). Die Kontaktstellen (0,3 mm), der bewegliche Anteil der passiven Struktur (0,5 mm) sowie der Draht (0,1 mm) werden feiner vernetzt. Bei ABS wird zusätzlich die adaptive Vernetzung für die Deformation durch die Funktion Konvergenz mit einer Genauigkeit von 1 % eingestellt (vgl. Abbildung 5.7).

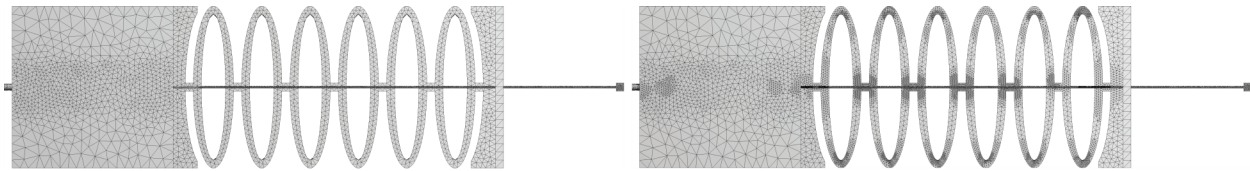


Abbildung 5.7: Vernetzung vor (links) und nach (rechts) der adaptiven Verfeinerung

5.3.1.3 Konvergenz

Allgemein beschreibt die Konvergenz die Annäherung an einen Grenzwert. In der FE-Simulation wird sie vor allem in zwei Bereichen verwendet [GEBHARDT 2018, S. 56, 182, 192]: bei der iterativen Lösung von Nichtlinearitäten sowie bei der Kontrolle der Ergebnisse durch eine zunehmende Diskretisierung. Eine zunehmende Netzdichte führt zur Annäherung der Spannung an einen Grenzwert, was als Konvergenz definiert ist.

Divergenzen können auftreten, wenn das Modell unendlich scharfe Kerben enthält. In diesem Fall wird die Spannung an dieser Stelle unendlich hoch und führt zu einer Divergenz der Lösung. In der Realität kann dies nicht auftreten, da jede Kerbe eine Ausrundung enthält und das Material lokal plastifiziert, wodurch die Spannung abgebaut wird. Eine Erhöhung der Netzdichte führt daher an Kerben und scharfen Kanten zu einer zunehmend genaueren und höheren Berechnung des Spannungswertes. Es ergeben sich singuläre Stellen, an denen eine Auswertung nicht mehr sinnvoll ist. Dies zeigt sich auch an den hohen Abweichungen beim Vergleich von gemittelter und ungemittelter Spannung. Zusätzlich können Lager durch die Modellierung mit unendlich hoher Steifigkeit zu Singularitäten mit unendlich hohen Spannungen führen. [GEBHARDT 2018, S. 19f]

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Singularitäten, die durch eine Einzelkraft auf einen Punkt oder scharfe Kerben entstehen, genauer modelliert werden müssen, z. B. indem die Kraft auf eine Fläche wirkt und Kanten verrundet werden oder bei der Auswertung nicht in Betracht gezogen werden. Bei der Überführung der CAD-Modelle in das Simulationsmodell sind daher die angesprochenen Punkte zu berücksichtigen.

5.3.1.4 Materialmodelle

Für eine realitätsnahe Beschreibung des Bauteilverhaltens ist zusätzlich zu den beschriebenen Parametern das Werkstoffverhalten von entscheidender Bedeutung. In ANSYS werden Materialmodelle zur Verfügung gestellt, um die Eigenschaften der in der Simulation verwendeten Materialien zu beschreiben. Es ist zu beachten, dass Materialmodelle nur die Eigenschaften aufweisen, die entwickelt und getestet wurden. Parameter müssen im Vorfeld experimentell ermittelt werden, was mit hohem Aufwand verbunden sein kann.

Eine Formänderung wird durch mechanische Spannung hervorgerufen. Die mathematische Beziehung zwischen Formänderungen (Dehnung, Verzerrung) und Spannungen wird durch Stoffgesetze beschrieben [LÄPPLE 2006, S. 107]. Der Elastizitätstensor verknüpft in der Elastizitätstheorie Verzerrungen und Spannungen [KIENZLER & SCHRÖDER 2009, S. 125f]. Tabelle 5.7 beschreibt die grundlegenden Stoffgesetze für Feststoffe.

Elastizität	Viskoelastizität	Plastizität
umkehrbar eindeutiger Zusammenhang zw. Spannungs- & Deformationszustand, Be- & Entlastungspfad auf gleicher Kurve	Dehnung nimmt bei konst. Spannung mit Zeit zu (Kriechen) bzw. Spannung nimmt bei konst. Dehnung mit Zeit ab (Relaxation)	nach Erreichen Grenzspannung Be- & Entlastungspfad nicht mehr aufeinander, bei völliger Entlastung verbleibt plast. Dehnung
zeitunabhängig	zeitabhängig	zeitunabhängig
reversibel	reversibel (elast. Anteil) irreversibel (viskoser Anteil)	nach Überschreiten der Fließgrenze irreversibel
linear und nichtlinear	linear (kleine Dehnungen) und nichtlinear (große Dehnungen)	nichtlinear
geschwindigkeitsunabhängig	geschwindigkeitsabhängig	geschwindigkeitsunabhängig
linearer Sonderfall: Hookesches Gesetz $\sigma = E \cdot \epsilon$	tw. elastisches, tw. viskoses Verhalten, tw. stark überlagert	
Hyperelastizität: nichtlinear-elast. Verhalten für sehr große ϵ	stark temperaturabhängig	

Tabelle 5.7: Stoffgesetze und ihre Eigenschaften [EHRENSTEIN 2011, S. 210ff], [GROSS ET AL. 2018, S. 317ff], [GRELLMANN & SEIDLER 2015, S. 83ff]

Bei den in dieser Untersuchung eingesetzten Materialien wird das linear-elastische (ABS) und das hyperelastische Stoffmodell (TPE) angewendet. Es wird vereinfachend angenommen, dass die Dehnungen bei ABS, unterstützt durch die Strukturen der Modelle im linear-elastischen Bereich liegen (vgl. Kapitel 5.3.2.6). Zusätzlich findet eine kurzzeitige Belastung mit langsam steigender Last bei konstanter Temperatur statt. Für TPE kann daher ein nichtlinear-elastisches und inkompressibles Werkstoffverhalten, auch bezeichnet als hyperelastisches Materialmodell angenommen werden [STOMMEL ET AL. 2018, S. 90] (vgl. Kapitel 5.3.2.6). Die Hyperelastizität ist ein Modell der Elastizität. Das bekannteste Beispiel mit nichtlinear-elastischem Verhalten ist Gummi. Kennzeichnend für die Hyperelastizität ist die Beschreibung von Materialien bei großen Verformungen. Der Zusammenhang zwischen Spannung und Verzerrung wird durch nichtlineare Funktionen abgebildet [WAGNER 2017, S. 174]. Die Eigenschaften der Elastizität, wie reversibel, weg-unabhängig und dissipationsfrei, bleiben erhalten [ebd.]. Der unbelastete Ausgangszustand wird nach jeder Verformung wieder eingenommen, wenn die Belastungen entfernt werden. Dissipative Vorgänge wie plastisches Fließen oder Kriechen sind ausgeschlossen. Das Material ist somit konservativ [PARISCH 2003, S. 137]. Eine Übersicht über eingesetzte Modelle für hyperelastische Materialien gibt Tabelle 5.8.

Mooney-Rivlin-Modell	Neo-Hooke-Modell	Ogden-Modell	Yeoh-Modell
mittlere Dehnungen < 100 % (2. & 3. Grad) < 200 % (5. & 9. Grad)	kleine Dehnungen bis 30 % (70 %)	sehr große Dehnungen bis 700 %	große Dehnung bis 300 %
Definition mit bis zu 9 Parametern	Charakterisierung an- hand von 2 Parametern	Grad variabel	3 Parameter

Tabelle 5.8: Hyperelastische Materialmodelle [ANSYS 2020], [WRIGGERS 2001, S. 50], [STOMMEL ET AL. 2018, S. 91, 120], [NAGL 2014]

5.3.1.5 Lineare und nichtlineare Analysen

Bei der linearen Analyse ist das Ergebnis proportional zu den Lasten und nicht abhängig vom Weg (Zwischenschritte). Geometrie, Material und Lasten sind linear. Voraussetzungen sind Gleichgewichtsbetrachtungen am unverformten System, kleine Verformungen und linear-elastisches Materialverhalten. Bei linearen Analysen ist kein iteratives Berechnungsverfahren mit aktualisierter Steifigkeit erforderlich. Nichtlineare Analysen hingegen können komplexere Effekte beschreiben, die die Realität besser abbilden. Allerdings wird die Analyse aufwendiger, da die Ermittlung der Lösung mehrere Schritte benötigt.

Bei nichtlinearen Modellen ist das Ergebnis nicht proportional zu den Lasten, Superposition ist nicht zulässig, das Ergebnis wird abhängig vom Weg berechnet und die Lösung erfolgt iterativ. Eine nichtlineare Analyse benötigt mehrere Zwischenschritte innerhalb eines Lastschrittes, damit die Gesamtlast in kleinen Beträgen aufgebracht werden kann und sich ändernde Steifigkeiten und Lasten berücksichtigt werden, um eine akkurate Lösung zu erzielen [ANSYS 2020]. Die Ursachen für eine Nichtlinearität des Modells sind Geometrie-, Material- und Strukturnichtlinearitäten [BATHE 2002, S. 570], [WRIGGERS 2001, S. 7-18], [BETTEN 1998, S. 237 - 240]. Materialnichtlinearitäten treten auf, wenn das Materialverhalten nicht mehr linear-elastisch ist. Strukturnichtlinearitäten beschreiben die Änderung von Randbedingungen. Geometrienichtlinearitäten liegen vor, wenn große Verformungen auftreten, sich die Lasten mit der Deformation ändern oder die mit der Verformung auftretende Spannung die Steifigkeit wesentlich beeinflusst.

In den vorliegenden Simulationen handelt es sich um nichtlineare Analysen. Bei dem Simulationsmodell aus ABS treten Geometrienichtlinearitäten durch große Verformungen auf, die durch entsprechende Strukturen unterstützt werden und dadurch im linear-elastischen Bereich des Materials liegen. Das Simulationsmodell aus TPE weist zusätzlich zu den Geometrienichtlinearitäten Materialnichtlinearität aufgrund des hyperelastischen Materialmodells auf. Die Zwischenschritte zur Durchführung der Analysen werden bei aufgebrachter Verschiebung auf 0,2 mm und Kraft auf 0,1 N pro Schritt festgelegt.

5.3.1.6 Randbedingungen

Randbedingungen stellen Vereinfachungen dar. Diese Bereiche eignen sich daher nicht zur Auswertung. Jeder Körper besitzt im Raum sechs Freiheitsgrade, die in der Simulation definiert werden sollten. Wichtige Randbedingungen für die in dieser Arbeit durchgeführte Simulation stellen Lasten, Lagerungen und Kontakte dar (Abbildung 5.8).

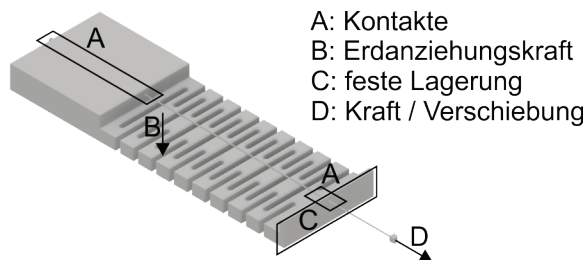


Abbildung 5.8: Randbedingungen im Simulationsmodell

Zu den Lasten zählen: Druck (wirkt normal auf eine Fläche und folgt der Geometrie bei Verformungen), Kraft (wirkt gleichmäßig auf die ausgewählte Geometrie), Verschiebung (bewirkt eine Verschiebung gegenüber der Ausgangslage) sowie Erdanziehungskraft. Lagerungen umfassen z. B. fixierte oder reibungsfreie Lagerungen und Kontakte werden als Bereiche zwischen den Baugruppen definiert, um eine Interaktion zu ermöglichen.

5.3.2 Ermittlung der Materialdaten

Die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften und des Materialmodells basiert auf Versuchen, die möglichst alle im realen Bauteil auftretenden Faktoren berücksichtigen, beispielsweise den Spannungszustand und die Belastungsgeschwindigkeit. Mit dem im Folgenden durchgeführten Zugversuch werden die Werkstoffkennwerte bei einachsiger, statischer Zugbeanspruchung ermittelt. Der Fokus liegt auf den folgenden Kennwerten:

- Dehnungsberechnung: Bestimmung des Dehnungszustands, der sich aufgrund einer äußeren Kraft auf die Probe einstellt.
- Querdehnungsverhalten: Die Querkontraktionszahl ν stellt das Verhältnis von Querdehnung zu Längsdehnung dar.
- Spannungsberechnung: Die Spannung ergibt sich aus dem Quotienten von Kraft und zugehöriger Fläche. Unter Zugbelastung ändert sich der Probenquerschnitt.

Zur vollständigen Beschreibung der Materialdaten in der Simulation wird neben den Werten des einachsigen Zugversuchs die Querkontraktionszahl (Poissonzahl) benötigt. Sie beschreibt das Verhalten des Volumens bei der Deformation eines Körpers und somit das Verhältnis der relativen Änderung der Dicke zur relativen Änderung der Länge. Bei einer Poissonzahl nahe 0,5 bleibt das Volumen konstant (Elastomere), Werte $< 0,5$ be-

deuten, dass eine Volumenänderung bei Längs- und Querdehnung bzw. Stauchung vorliegt [EHRENSTEIN 2007, S. 21f]. Für ABS wird die Querkontraktionszahl anhand der Literatur [KUNZ 2011], [ABTS 2010, S. 173], [EHRENSTEIN 2007, S. 21] auf 0,375 festgelegt.

Anhand der Materialkennwerte wird ein Materialmodell in ANSYS aufgestellt. Die Herstellung der Prototypen mittels FDM-Verfahren schließt die Verwendung von typischen Werten aus der Literatur aus. Wie in Tabelle 5.1 ersichtlich, ist der E-Modul von den Druckeinstellungen abhängig und variiert stark. Durch veränderte Materialeigenschaften aufgrund des Zusammenhalts der einzelnen Schichten und Linien oder der Lage der gedruckten Linien ergeben sich hohe Abweichungen zu den vorhandenen Materialmodellen für TPE und ABS. Daher wird das Deformationsverhalten von mittels FDM gedruckten Proben anhand einer Literaturrecherche analysiert. Dazu werden typische Einstellparameter identifiziert und ein Wertebereich aufgezeigt (Tabelle 5.9). Die relevanten Druckparameter sind: Schichtdicke d , Richtung, Probenform, Material und Geschwindigkeit v .

Quelle	d [mm]	Richtung [°]	Probenform [Norm]	Material	v [mm/min]
[ASHU & ANIRBAN 2016]	0,178, 0,254, 0,330	0, 90, 0/90	ASTM D638	ABS	5
[AFROSE ET AL. 2014]	0,2	0, 90, 45	ASTM D638	PLA	50
[LOHR ET AL. 2018]	0,2, 0,358	3 Richtungen	EN ISO 527-2, 1B	PLA	1
[FARBMAN & MCCOY 2016]	-	Verschiedene Füllstrukturen	ASTM standards ASTM B557-06	ABS, PLA	3, 6, 15
[DAWOUD ET AL. 2016]	0,5	± 90	EN ISO 178, 179, 527-2	ABS	5
[BASAVARAJ & VISHWAS 2016]	0,1, 0,2, 0,3	0, 15, 30	ASTM	Nylon	-
[GÓRSKI ET AL. 2015]	0,254	0, 90, 15, 30, 45	EN ISO 178, 527, EN 10045-1	ABS	-
[CHRISTIYAN ET AL. 2017]	0,2, 0,25, 0,3	± 45	ASTM D790	PLA	1
[SHUBHAM ET AL. 2016]	0,075, 0,1, 0,25, 0,5	k. A.	ASTM D-1708	ABS	5
[RANKOUHI ET AL. 2016]	0,2, 0,4	0, 90, 45	ASTM D638, D3039	ABS	5
[TYMRAK ET AL. 2014]	0,2, 0,3, 0,4	0/90, ± 45	ASTM D638	ABS, PLA	5
[TORRADO & ROBERSON 2016]	0,27	90, 0/90, aufrecht	ASTM D638	ABS	5, 10
[MESSEMER ET AL. 2016]	0,05, 0,1, 0,15	Gitter-, Wabenstruktur	EN ISO 527	PLA	5
[XIAO & GAO 2017]	0,2	0/90, ± 45	ASTM D412	TPU	500

Tabelle 5.9: Einstellparameter bei Zugversuchen von FDM-Proben

Eine Analyse von Tabelle 5.9 macht deutlich, dass die in der Literatur verwendete und untersuchte Schichtdicke stark variiert. Bei der FDM-Druckrichtung werden vor allem die Richtungen 0° , $\pm 90^\circ$ ($\triangleq 0^\circ/90^\circ$) und $\pm 45^\circ$ untersucht. Als Probenform wird die Normgeometrie verwendet. Allerdings ist diese nicht für additiv gefertigte Proben ausgelegt, wird

jedoch mangels Alternativen eingesetzt. Hinsichtlich des Materials wird häufig ABS und PLA eingesetzt. Die Geschwindigkeit der Zugversuche beträgt größtenteils 5 mm/min.

5.3.2.1 Festlegung auf das zu prüfende Material

Bei der Festlegung des Materials spielen verschiedene Faktoren eine Rolle. Zum einen werden Parameter wie die Temperaturbeständigkeit durch die Verbindung von FGL und FDM vorgegeben, zum anderen werden Parameter durch die Anwendung festgelegt, wie beispielsweise die Bewegung, die erzielt werden soll. Die Materialauswahl fand in Kapitel 5.2.2 (ABS und TPE) statt. Wichtige Kriterien waren:

- Hitzebeständigkeit: Die Aktivierungstemperatur des eingesetzten FG-Drahts beträgt 70 °C im unbelasteten Zustand. Vorversuche haben ergeben, dass sich bei anliegender Kraft etwa 86 °C einstellen [OBERHOFER & HEIN ET AL. 2019].
- Geringe Härte und Sprödigkeit: Die Verformung als Festkörpergelenk muss ermöglicht werden. Nylon hat sich als äußerst spröde und brüchig erwiesen.
- Materialkombination: Vortests zeigen eine sehr gute Verbindung zwischen ABS und TPE. PLA und TPE haben sich im Versuch gelöst.

5.3.2.2 Probengeometrie

Die Probengeometrie wird nach der Norm [DIN EN ISO 527-2 2012] für Kunststoffe zur Bestimmung der Zugeigenschaften sowie [DIN 53504 2017] zur Prüfung von Kautschuk und Elastomeren festgelegt. Die Zugprüfmaschine gibt aufgrund der Einspannvorrichtung sowie des Traversenwegs Randbedingungen, v. a. bezüglich der Probenlänge, vor. Damit ergeben sich die Probengeometrie 1BA sowie der Schulterstab S2 (Abbildung 5.9).

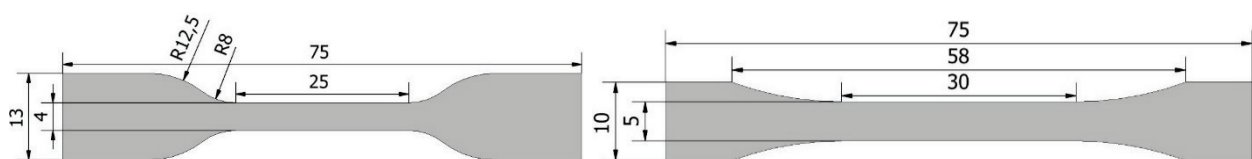


Abbildung 5.9: Probengeometrie S2 (links) und 1BA (rechts) in der Draufsicht

Beim Druck der Probe wird zusätzlich zur Qualität auch die spätere Anwendung in die Bestimmung der Druckparameter miteinbezogen. Da die Bauteileigenschaften je nach Druckparametern stark variieren (Kapitel 5.2.3), muss für eine korrekte Simulation der späteren Modelle die Probe die späteren Modelleigenschaften möglichst gut abbilden. Druckparameter, die die Materialeigenschaften stark beeinflussen, sind die FDM-Druckrichtung sowie die Ausrichtung der Proben, die Schichtdicke, die Linienbreite und eine hohe Gleichmäßigkeit sowie Qualität von Linien, Schichten und Füllgrad (Kapitel 5.2.3.2).

Die einzelnen Linien werden mit einer leichten Überlappung gedruckt, damit zwischen ihnen beim Drucken keine Lücken entstehen, die den Zugversuch beeinflussen. Die Überlappung sowie die feine Linienbreite sind auch aufgrund der Geometrien der Proben notwendig. Die starke Querschnittsveränderung hat sonst zur Folge, dass kleine Lücken zwischen Außenwand und Füllung der Proben entstehen, was im Zugversuch zu einer erhöhten Dehnung in diesen Bereichen führen und die Ergebnisse verfälschen kann.

Bezogen auf die Anwendung muss in die späteren Modelle der FG-Draht eingebracht werden. Aufgrund des geringen Durchmessers des Drahtes, ist eine feine Schichtstärke notwendig, um in die Modelle eine Führung für den Draht zu drucken.

Beim Druck der zwei Probengeometrien mit verschiedenen Linienrichtungen werden dieselben Druckeinstellungen verwendet, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Daher werden die Parameter für beide Geometrien und alle Linienrichtungen so optimal wie möglich gewählt. Dies hat zur Folge, dass Kompromisse bezüglich der Verbindung von Wand- und Fülllinien sowie der Überlappung der einzelnen Linien eingegangen werden müssen. Ein Vortest mit Linienbreiten von 0,25 bis 0,4 mm (min. bis max. Linienbreite der Düse) sowie einem Linienabstand von 0,25 bis 0,3 mm (max. Überlappung bis max. Abstand, sonst ergeben sich Materialanhäufungen bzw. Abstände zwischen den Fülllinien) liefert für beide Geometrien die besten Ergebnisse. Tabelle 5.10 zeigt die ausgewählten Parameter für die Werkstoffe TPE und ABS sowie die je zwei Probengeometrien.

	TPE	ABS
Norm, Probengeometrie	[DIN 53504 2017], S2 & [DIN EN ISO 527-2 2012], 1BA	[DIN EN ISO 527-2 2012], 5A \pm [DIN 53504 2017], S2 & [DIN EN ISO 527-2 2012], 1BA
Ausrichtung	$\pm 45^\circ$, Zugrichtung (0°), $\pm 90^\circ$ ($\pm 0^\circ/90^\circ$)	
FDM-Druckrichtung	liegend	
Drucktemperatur	230°C	
Temperatur Druckplatte	80°C	
Fluss	130 %	100 %
Druckgeschwindigkeit	25 mm/s	55 mm/s
Schichtdicke	0,1 mm (erste Schicht 0,2 mm)	
Linienbreite	0,3 mm	
Linienabstand Füllung	0,27 mm	

Tabelle 5.10: Druckparameter für die Proben aus TPE und ABS

Die innere Struktur von FDM-Bauteilen bestimmt maßgeblich die Festigkeit und hat somit großen Einfluss auf die Belastbarkeit und die Flexibilität der Struktur. Um die Zugprüfung unabhängig von der Füllstruktur durchzuführen, die Simulation der Strukturen zu vereinfachen, eine exakte Führung des Drahtes zu ermöglichen und komplexe Strukturen mit gleichbleibender Qualität zu drucken, wird als innere Struktur das Vollmaterial gewählt.

5.3.2.3 Zugversuche an der Materialprüfmaschine

Die Zugversuche werden an der Materialprüfmaschine Instron 5566 am Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart durchgeführt. Dehnungen werden berührungslos mit einem Videoextensometer erfasst. Bei der Prüfung werden die Proben bis zum Bruch bei konstanter Geschwindigkeit quasistatisch auf Zug belastet. Dabei wird die Längenänderung der Probe sowie die dazu aufgewendete Kraft gemessen. Anhand der Änderung der Parameter über die Zeit werden die relevanten Kennwerte berechnet.

Nach DIN EN ISO [527-2 2012] und [527-1 2019], mithilfe der Literaturrecherche (vgl. Tabelle 5.9), zur Gewährleistung einer sicheren und reproduzierbaren Probeneinspannung sowie anhand von Erfahrungswerten an der Zugprüfmaschine werden die Geschwindigkeiten von 1 und 5 mm/min für ABS sowie 5 und 15 mm/min für TPE ausgewählt. Um die Zeit für die Durchführung zu begrenzen und der in der Anwendung höheren Geschwindigkeit besser zu entsprechen, wird für TPE die Geschwindigkeit von 15 mm/min festgelegt. Die Abhängigkeit der Geschwindigkeit bei TPE wurde in einem Vorversuch getestet und gezeigt, dass es für TPE keinen nennenswerten Unterschied der Zugversuch-Ergebnisse zwischen den beiden Geschwindigkeiten gibt. Daher wird der Zugversuch für TPE mit 15 mm/min durchgeführt. Bei ABS wird der Zugversuch mit beiden Geschwindigkeiten durchgeführt, da der E-Modul berechnet wird. Es zeigt sich, dass für die Geschwindigkeit von 1 mm/min die Einschwingvorgänge zu Beginn stärker ausgeprägt sind als bei 5 mm/min. Insgesamt verhält sich die Zugprobe bei der geringeren Geschwindigkeit etwas steifer, der berechnete E-Modul ist dementsprechend höher (vgl. Kapitel 5.3.2.6).

Der Zugversuch wird für ABS und TPE mit beiden Probengeometrien durchgeführt, um einen möglichen Einfluss der Geometrie festzustellen. Aufgrund der Druckeigenschaften und der damit verbundenen notwendigen Wandlinien, ist anzunehmen, dass durch die größere Querschnittsfläche der Probengeometrie 1BA ein Einfluss von Wandlinien oder Unebenheiten besser ausgeglichen werden kann. Dies soll anhand der Ergebnisse überprüft werden. Nach DIN EN ISO [527-1 2019, S. 16] sind mindestens fünf Proben pro Versuch zu verwenden. Die durchgeführten Versuche umfassen diese, bei fehlerhaften Versuchen (Rutschen oder Brechen im Bereich der Einspannklemmen) werden weitere Proben getestet. Tabelle 5.11 fasst die im Zugversuch eingestellten Parameter zusammen, Abbildung 5.10 zeigt die zu testenden Proben (links), die eingespannte Probe ohne Dehnung (Mitte) und die gedehnte Probe (rechts).

Parameter	Beschreibung im Zugversuch
Material	TPE (flexibel), ABS (fest, hitzebeständig bis 97 °C)
Probengeometrie	[DIN EN ISO 527-2 2012] für Kunststoffe zur Bestimmung der Zugeigenschaften sowie [DIN 53504 2017] zur Prüfung von Kautschuk und Elastomeren
Prüftemperatur	Raumtemperatur 22 °C
Geschwindigkeit	1 mm/min, 5 mm/min (ABS) und 15 mm/min (TPE)
Anzahl der Proben	mindestens 5 (nach Norm)
Auswertung	Mittelwert (nach Norm)

Tabelle 5.11: Zusammenfassung der im Zugversuch eingestellten Parameter

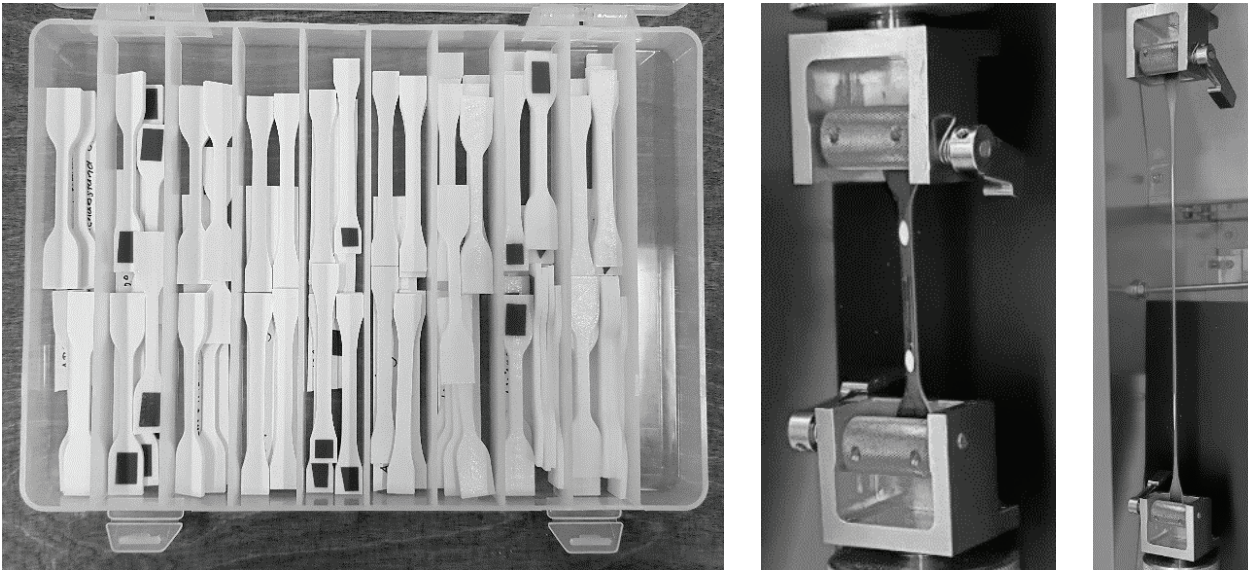


Abbildung 5.10: Darstellung der Proben und des Zugversuchs

5.3.2.4 Ergebnisse des Zugversuchs

TPE weist im Zugversuch Dehnungen mit $\epsilon > 300\%$ auf, bei ABS ergibt sich $\epsilon < 3,5\%$. Aufgrund der berührungslosen Messung der Dehnung durch ein Videoextensometer kann die Dehnung bis zu einem Wert von etwa 300 % gemessen werden. Danach sind die aufgezeichneten Punkte auf der TPE-Probe durch die starke Verzerrung für das System nicht mehr erfassbar und die Messung bricht ab. Da in der späteren Anwendung und den prototypischen Versuchen Dehnungen $< 10\%$ vorliegen, ist die Messung ausreichend genau.

Die Abbildungen 5.11 und 5.12 veranschaulichen die Ergebnisse des Zugversuchs. Die Auswertung zeigt, dass bei TPE die Linienrichtung bei beiden Probengeometrien bis zu einer Dehnung $< 300\%$, entgegen der anhand der Literaturrecherche (Tabelle 5.9) zu ABS und PLA getroffenen Annahme, geringen Einfluss auf das Materialverhalten hat. Ein Grund dafür ist das starke Verschmelzen der einzelnen Linien durch die in diesen Proben gedruckte Überlappung (vgl. Tabelle 5.11), wodurch bei TPE in jeder Linienrichtung eine homogene Fläche gebildet wird. Auch der Unterschied zwischen den Probengeometrien ist aus den angegebenen Gründen sehr gering, wobei sich die Geometrie S2 in jeder

FDM-Druckrichtung etwas steifer verhält. Die Auswertung erfolgt nach DIN EN ISO [527-1 2019, S. 22] über die arithmetischen Mittelwerte der Prüfergebnisse. Abbildung 5.11 zeigt die Darstellung der Mittelwerte von TPE mit den Probengeometrien 1BA und S2 über die verschiedenen Druckrichtungen.

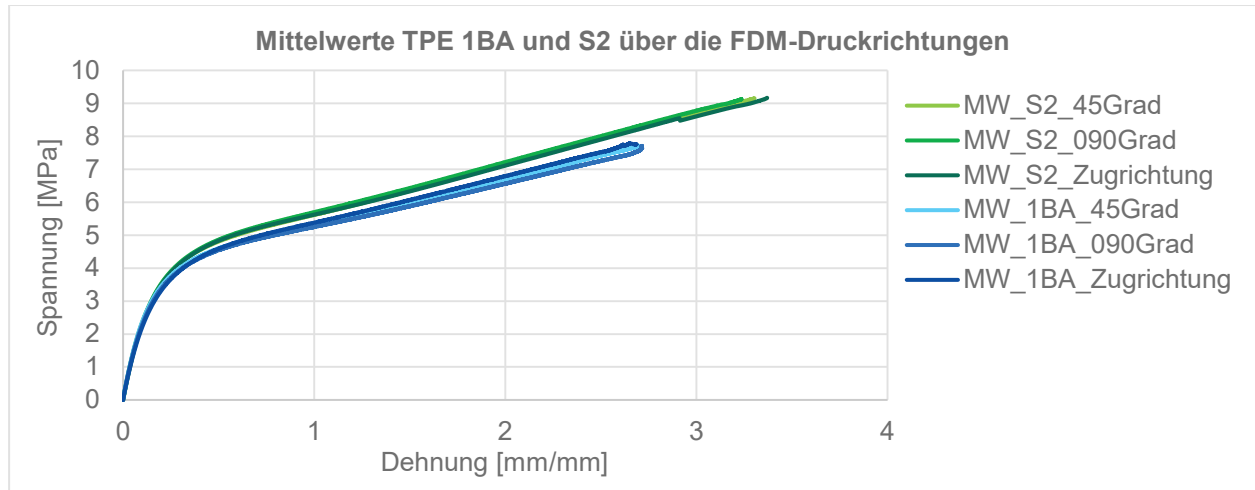


Abbildung 5.11: Mittelwerte (MW) von TPE mit den Probengeometrien 1BA und S2 über die verschiedenen FDM-Druckrichtungen

Abbildung 5.12 fasst die FDM-Druckrichtungen zu einem Gesamtmittelwert über die Probengeometrien zusammen. Zusätzlich wird der Verlauf von Zugversuchen mit dem Rohmaterial angegeben. Dieses lag als Druckfilament mit einem Durchmesser von 2,85 mm vor.

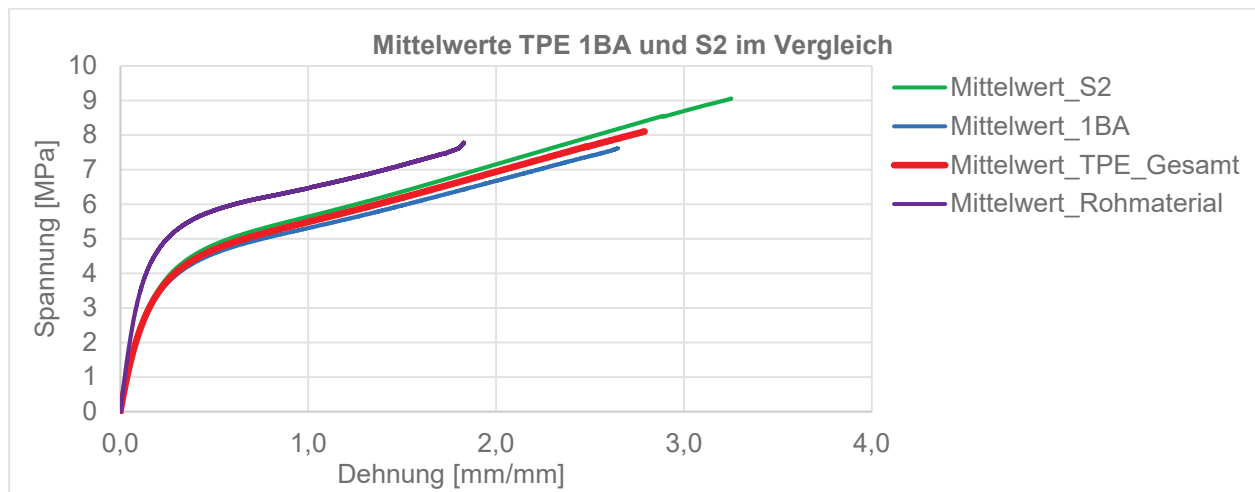


Abbildung 5.12: Mittelwerte (MW) von TPE über die Probengeometrien 1BA und S2

Bei ABS zeigt sich im Gegensatz zu TPE, dass die FDM-Druckrichtung einen stärkeren Einfluss auf das Materialverhalten hat und bestätigt die getroffene Annahme. Abbildung 5.13 stellt die Mittelwerte von ABS mit den Probengeometrien 1BA und S2 über die FDM-Druckrichtungen dar. Die Ergebnisse der Probengeometrien S2 und 1BA bezogen auf die unterschiedlichen FDM-Druckrichtungen verhalten sich im linearen Bereich na-

hezu identisch. Proben der Linienrichtung 45° verhalten sich weicher - sie weisen bei gleicher Spannung eine höhere Dehnung auf. Proben in Zugrichtung (0°) sowie $0^\circ/90^\circ$ verlaufen vor allem im Bereich bis zu einer Dehnung von $0,015$ mm/mm fast deckungsgleich und besitzen tendenziell eine höhere Steifigkeit. Proben der FDM-Druckrichtung 45° ertragen im Mittel bei gleicher Dehnung eine um ca. 13 % geringere Spannung.

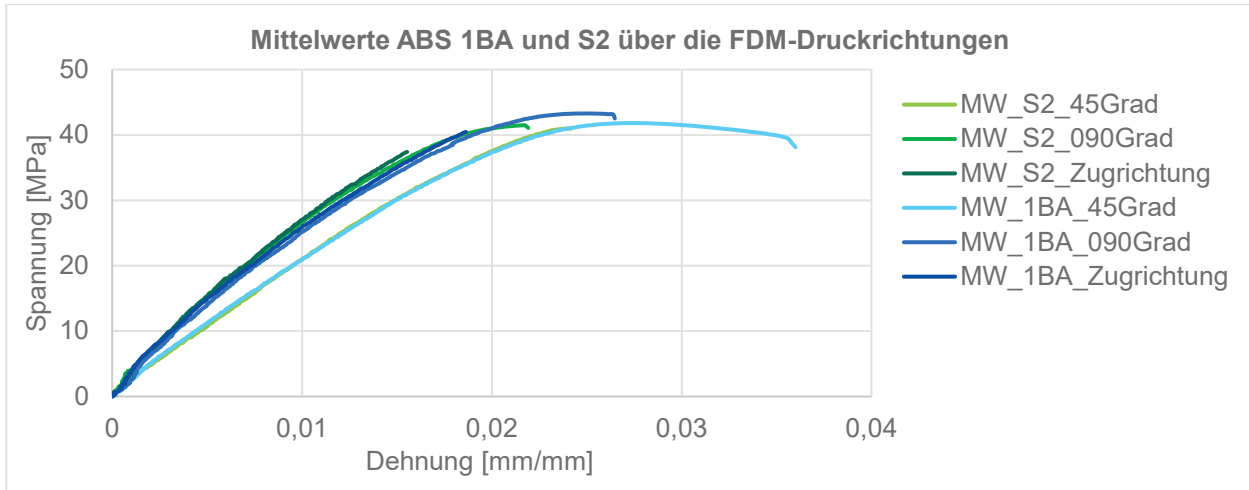


Abbildung 5.13: Mittelwerte (MW) von ABS mit den Probengeometrien 1BA und S2 über die verschiedenen FDM-Druckrichtungen

Abbildung 5.14 fasst die Ergebnisse der FDM-Druckrichtungen über die Geometrien zusammen und bildet den Gesamtmittelwert (rote Linie) ab. Die Probengeometrien S2 und 1BA sind im Mittel nahezu identisch. Für ABS wurde das Rohmaterial ebenfalls im Zugversuch getestet, eine Auswertung ist jedoch nicht möglich, da die Materialbeschaffenheit, die Materialgeometrie und die Art der Einspannung starkes Rutschen zur Folge haben.

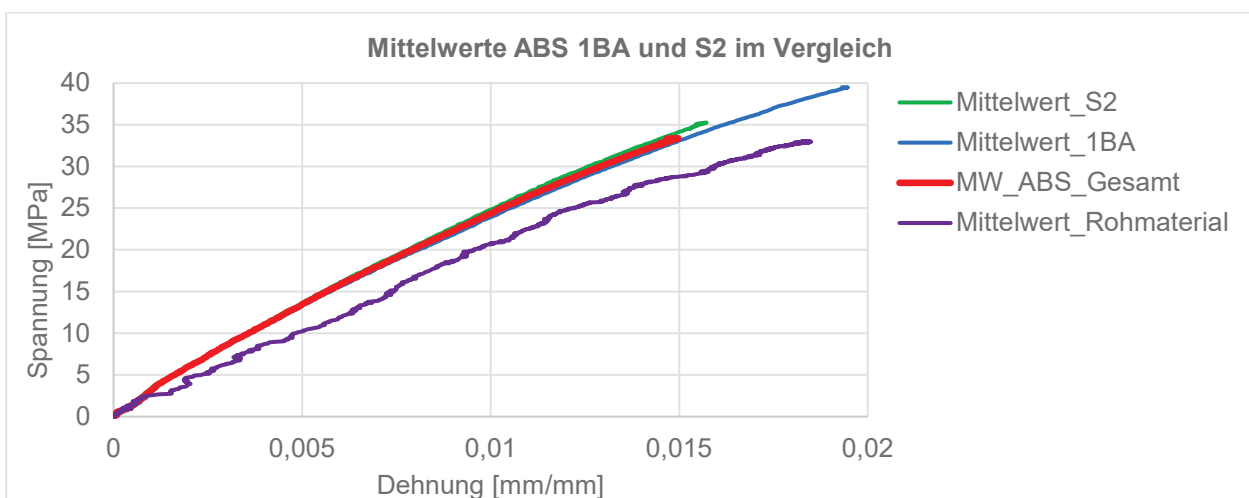


Abbildung 5.14: Mittelwerte (MW) von ABS über die Probengeometrien 1BA und S2
Eine detaillierte Ansicht der Ergebnisse des Zugversuchs der einzelnen Proben über die FDM-Druckrichtungen und Materialien geben die Abbildungen A.2 und A.3.

5.3.2.5 Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse

Für die Diskussion der Ergebnisse wird zunächst der Verlauf der Drucklinien der Geometrien analysiert. Abbildung 5.15 zeigt diesen nach dem Slicing. Es ist zu erkennen, dass sich trotz der Optimierungen von Linienbreite und Überlappung kleine Lücken an den Übergängen zwischen Wandlinien (dunkel) und Fülllinien (hell) ergeben. Diese haben Einfluss auf die Ergebnisse des Zugversuchs. Vor allem in Richtung 0° ergeben sich bei Probe 1BA starke Lücken zwischen Wand- und Fülllinien. Bei 45° entstehen Lücken im Bereich der Querschnittsveränderung.

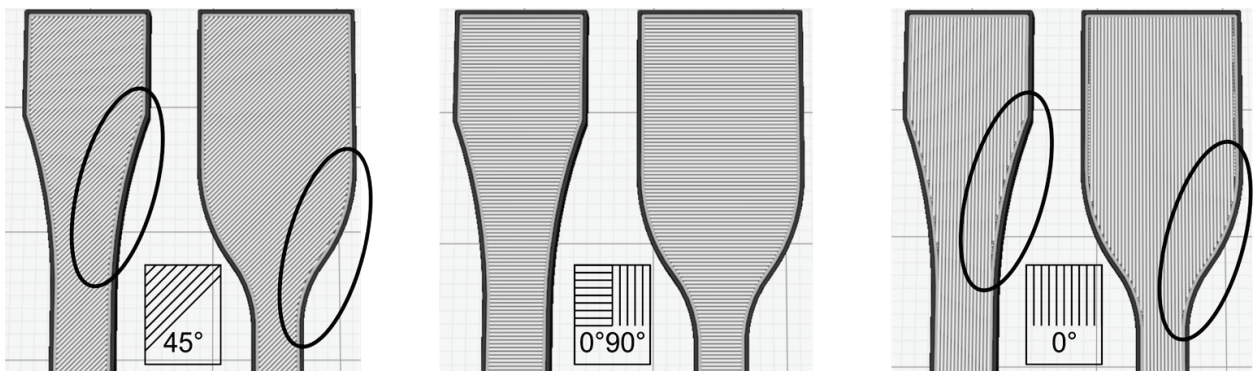


Abbildung 5.15: Verlauf der Drucklinien mit den unterschiedlichen Richtungen, mit Markierung der Schwachstellen in der Draufsicht

ABS-Proben in Zugrichtung (0°) sowie $0^\circ/90^\circ$ liegen im linearen Bereich zwar aufeinander (vgl. Abbildung 5.13), die Ergebnisse der Proben in Zugrichtung sind jedoch nur bedingt verwertbar, da die Proben bei den Versuchen an den Einschnürungen gebrochen sind. Trotz Veränderung der Druckparameter für Proben in Zugrichtung, konnten die Ergebnisse nicht verbessert werden. Bei der Analyse dieser Proben zeigt sich, dass an den Einschnürstellen kleine Lücken im Druck vorhanden sind (vgl. Abbildung 5.15), was zum einen auf die Probengeometrie und zum anderen auf den Verfahrenweg des Druckers zurückzuführen ist. Bei TPE kann dies durch die starke Verschmelzung der einzelnen Schichten kompensiert werden, ABS hingegen weist keine so starke Verschmelzung der Linien auf. Für bessere Ergebnisse müsste die Probengeometrie angepasst oder der Verfahrenweg des Druckers programmiert werden, was nicht Teil dieser Untersuchung war.

Ein Vergleich der Ergebnisse des Zugversuchs zeigt, dass bei TPE bis ca. 20 % Dehnung die Kurven der Proben der Geometrien S2 und 1BA nahezu aufeinanderliegen und dann mit einem vertikalen Versatz von ca. 6,5 % verlaufen. Bei ABS liegen die Kurven der Proben der Geometrien S2 und 1BA bis ca. 0,3 % Dehnung nahezu aufeinander, dann besteht ein vertikaler Versatz von ca. 9 %. Das Rohmaterial von der Druckspule ($\varnothing 2,85$ mm) kann nur im Fall von TPE als Vergleichswert in die Betrachtung einbezogen

werden. TPE verhält sich vom Kurvenverlauf sehr ähnlich wie die gedruckten Proben. Die Gerade zu Beginn verläuft steiler, der „Sattelpunkt“ bei ca. 50 % Dehnung ist ausgeprägter, ab ca. 50 % Dehnung verlaufen die Kurven parallel, wobei das Rohmaterial bei gleicher Dehnung eine 21 - 28 % größere Spannung aufnehmen kann. Das Rohmaterial von ABS ist nicht auswertbar, da es bereits zu Beginn leicht rutscht. Das Material wird an den Einspannstellen stark verformt und teilweise so zusammengedrückt, dass es bricht.

Insgesamt kann ein starker Einfluss des FDM-Verfahrens nicht ausgeschlossen werden. Zum einen sind die Verfahrenswege abhängig von der Geometrie, zum anderen entstehen aufgrund der Geometrie und Querschnittsveränderung Lücken zwischen den Wand- und Fülllinien. Zusätzlich unterscheidet sich die Anzahl von Wand- und Fülllinien aufgrund der unterschiedlichen Querschnitte der Geometrien. Die Geometrie S2 (4 mm Breite) weist vier Wand- und elf Fülllinien und damit prozentual mehr Wandlinien in Zugrichtung auf (3,75 Linien/mm). Die Geometrie 1BA (5 mm Breite) besteht aus vier Wand- und 15 Fülllinien und besitzt damit prozentual weniger Wandlinien in Zugrichtung (3,8 Linien/mm), woraus sich eine etwas stärkere Überlappung als bei S2 ergibt. Des Weiteren weist die Probengeometrie S2 eine bessere Einspannung auf, da der Querschnitt größer ist. Aufgrund der Vorteile der Probengeometrie S2 - prozentual mehr Wandlinien in Zugrichtung, größere Einspannung, Querschnittsveränderung verursacht Lücken nur auf geringerem Abschnitt - verhält sich die Probengeometrie in den Versuchen etwas steifer als die Geometrie 1BA. Tabelle 5.12 beschreibt zusammenfassend das Bruchverhalten der Proben. Insgesamt wird festgestellt, dass trotz identischer Druckparameter in Bezug auf Ausrichtung, Druckrichtung, Drucktemperatur, Temperatur der Druckplatte, Schichtdicke, Linienbreite, Linienabstand und Füllung (vgl. Tabelle 5.11) ein Unterschied in der Verarbeitung der Materialien besteht. Damit geht einher, dass die Geometrien unterschiedlich gute Eignung als Zugproben aufweisen, da beispielsweise der Grad der Verschmelzung der Linien starken Einfluss auf das Bruchverhalten hat und geometrisch bedingte Lücken dadurch besser kompensiert werden können. Eine Lösung des Problems der auftretenden Schwachstellen stellt die Anpassung der Geometrie der Zugproben an das AF-Verfahren oder die manuelle Programmierung des Verfahrens dar. Eine Anpassung der Proben an das AF-Verfahren im Allgemeinen bedarf Versuchsreihen mit unterschiedlichen Werkstoffen und Druckern. Der Aufwand in die Druckprogrammierung einzugreifen oder die Probengeometrien anzupassen ist sehr hoch. Die Ergebnisse der Druckrichtungen $0^{\circ}/90^{\circ}$ oder 45° liefern zum großen Teil sehr gute Ergebnisse und es muss beachtet werden, dass für die spätere Anwendung je nach Geometrie nicht nur in eine Richtung

gedruckt werden kann. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse über alle FDM-Druckrichtungen ist daher sinnvoll und ermöglicht das Ausgleichen einzelner Ausreißer. Außerdem ist es nicht möglich, den Druckweg so zu programmieren, dass nie über die bereits gedruckten Teile gefahren wird. Aufwand und Nutzen eines Eingriffs in das Druckprogramm oder die Änderung der Probengeometrie stehen daher in keinem Verhältnis und sind nicht relevant für die Ziele dieser Arbeit.

		Zugrichtung (0°)	0°90°	45°
ABS	S2	<ul style="list-style-type: none"> Probe bricht unterhalb der Einspannstelle ohne charakt. Plastizitätskurve Drucker verfährt unterhalb Einspannstelle horizontal → Schwachstelle 	<ul style="list-style-type: none"> teilweise ausgeprägte Plastizitätskurve Drucker verfährt in Zugrichtung unterhalb Einspannstelle → Schwachstelle (vgl. Zugrichtung) 	<ul style="list-style-type: none"> keine ausgeprägte Plastizitätskurve Bruch unter Einspannstelle → Schwachstelle durch Lücken an Querschnittsveränderung
	1BA	<ul style="list-style-type: none"> Probe bricht unterhalb der Einspannstelle ohne charakt. Plastizitätskurve Drucker verfährt unterhalb Einspannstelle horizontal → Schwachstelle 	<ul style="list-style-type: none"> ausgeprägte Plastizitätskurve Proben gleichmäßiger durch Linienrichtungswechsel, gleicht Schwachstelle aus 	<ul style="list-style-type: none"> ausgeprägte Plastizitätskurve seitl. Lücken sind auf weiteren Bereich verteilt, langsamere Querschnittsveränderung
TPE	S2	<ul style="list-style-type: none"> Drucker verfährt unterhalb Einspannstelle horizontal → Schwachstelle Linien lösen sich tw. bei Zugversuch → Lücken zw. Wand- & Fülllinien 	<ul style="list-style-type: none"> Ausgleich zu Zugrichtung, da sich die Linienrichtung abwechself teilweise Lücken unter dem Einspannbereich 	<ul style="list-style-type: none"> keine Lücken unterhalb des Einspannbereichs geringe Ablösung zwischen Wand- und Fülllinien
	1BA	<ul style="list-style-type: none"> am steifsten trotz horizontalem Verfahren durch große Querschnittsfläche homogen 	<ul style="list-style-type: none"> Ablösungen an den Rändern zwischen Füllung und Wandlinien 	<ul style="list-style-type: none"> Ablösungen zw. Füll- & Wandlinien → Schwachstelle durch Lücken an Querschnittsveränderung

Tabelle 5.12: Zusammenfassung der Ergebnisse beim Zugversuch der Druckproben

Insgesamt können aus den Zugversuchen die folgenden Erkenntnisse zur Verbesserung der Ergebnisse von FDM-Proben gewonnen werden. Für die Prüfung von FDM-Proben muss die Probengeometrie an die Gegebenheiten des Druckverfahrens angepasst werden. Beim Drucken entstehen aufgrund der Probengeometrie Lücken im Bereich zwischen Füllung und Wandlinien, vor allem im Bereich der Einschnürungen. Querschnittsveränderungen sind daher so zu gestalten, dass diese Lücken an den Übergängen zwischen Wandlinien und Fülllinien nicht entstehen. Des Weiteren muss in den Code für den

Verfahrweg des Druckers eingegriffen werden, um ein Überfahren der bereits gedruckten Linien und damit eine Schwächung der Probe direkt unterhalb der Einspannstelle zu verhindern. Die Einspannungsvorrichtung an der eingesetzten Zugprüfmaschine eignet sich besser für einen großen Einspannbereich der Proben. Es mussten einige Proben aufgrund von Rutschen ausgeschlossen werden.

5.3.2.6 Überführung der Daten in ein Materialmodell

Für die Qualität der Ergebnisse ist es wichtig, dass Simulationsmodell und Realität bestmöglich übereinstimmen. Daher ist ein passendes Materialmodell für die Vergleichbarkeit von Bedeutung. In dieser Untersuchung findet die Umsetzung der passiven Struktur über AF im FDM-Verfahren statt. Aufgrund der dadurch bedingten Veränderung der Materialeigenschaften wurde ein Zugversuch zur Bestimmung des Materialmodells durchgeführt.

Bei TPE konnte gezeigt werden, dass die FDM-Druckrichtung einen sehr geringen Einfluss im Spannungs-Dehnungs-Diagramm aufweist. Die Probengeometrie hat bis ca. 20 % Dehnung keinen Einfluss, erst danach zeigt die Geometrie S2 eine etwa 6,5 % höhere Spannung bei gleicher Dehnung. Da die zu druckenden Strukturen teilweise komplexe Geometrien aufweisen und die FDM-Druckrichtung je nach Querschnittsfläche variieren kann, wird für das Materialmodell der Mittelwert aller Proben gebildet (rote Linie Abbildung 5.12) und diese Daten in ein Materialmodell überführt (vgl. auch Kapitel 5.3.2.5).

Elastomere zeichnen sich durch einen geringen Widerstand gegen Gestaltänderung, aber einen vergleichsweise hohen gegen Volumenänderungen aus. Sie werden daher als (quasi-)inkompressibel bezeichnet [EHRENSTEIN 2011, S. 124f], [PARISCH 2003, S. 158]. Es können große Verformungen und Verzerrungen auftreten, ohne dass Schädigungen zurückbleiben. Ein geeignetes Materialmodell ist hyperelastisch (vgl. Kapitel 5.3.1.4).

Mit den von ANSYS bereitgestellten Materialmodellen wird ein Curve-Fitting durchgeführt und das am besten übereinstimmende Modell gewählt. Beim Hyperelastic Curve-Fitting werden durch Input der experimentellen Daten und Vergleich dieser mit den hyperelastischen Materialmodellen die Materialkonstanten bestimmt. Aufgrund der erwarteten Dehnungen wird Mooney-Rivlin (vgl. Tabelle 5.8) für das Curve-Fitting ausgewählt. Das Modell mit drei Parametern liefert die beste Übereinstimmung der Werte aus dem Zugversuch mit denen des Materialmodells und wird daher zur Abbildung des Verhaltens der TPE-Proben verwendet.

Die Zugversuche mit ABS wurden mit 5 mm/min durchgeführt (Kapitel 5.3.2.3). Aufgrund der Abweichung des E-Moduls zu typischen Werten von FDM-Proben aus ABS (Ta-

belle 5.1) wurde in einer weiteren Versuchsreihe der E-Modul mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min bestimmt. Die Abweichung ist auch darauf zurückzuführen, dass in der Literatur nicht mit einer Überlappung der Linien und häufig nicht mit 100 % Füllung gedruckt wurde. Ein Vergleich der Werte aus den Versuchen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit zeigt, dass die Ergebnisse nur geringfügig voneinander abweichen, der Einschwingbereich bei 1 mm/min allerdings stärker ausgeprägt ist als bei 5 mm/min (Abbildung 5.16). Da die Werte zur Berechnung des E-Moduls nach Norm in diesem Einschwingbereich liegen, ergibt sich ein höherer E-Modul (Abbildung 5.17). Zusätzlich ist zu beachten, dass sich die passive Struktur in späteren Anwendungen teilweise schnell verformt und sich Werte von Schnellzugversuchen von langsamen unterscheiden [KEUERLEBER 2006].

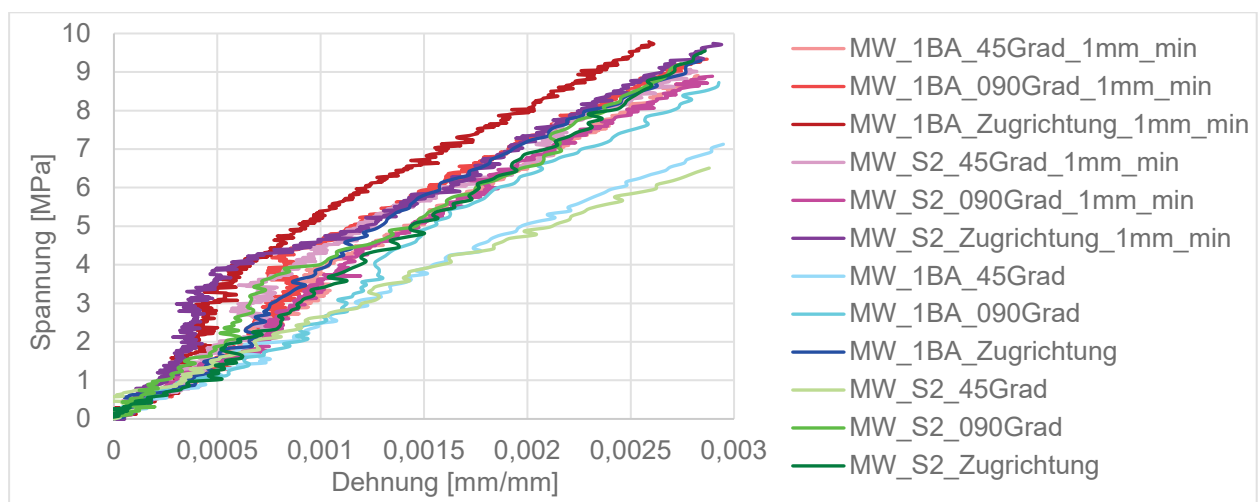


Abbildung 5.16: Einlaufbereich der Proben durch Setzen und Rutschen

Bei ABS verhalten sich Proben der Linienrichtung 45° weicher als Proben in Zugrichtung bzw. 0°/90°, im linearen Bereich weisen sie, wie die Probengeometrie, nur geringe Unterschiede auf. Aufgrund der teilweise komplexen Geometrien der zu druckenden Strukturen und der variierenden FDM-Druckrichtung je nach Querschnittsfläche, wird für das Materialmodell der Mittelwert aller Proben gebildet (rote Linie Abbildung 5.14) und diese Daten in ein Materialmodell überführt (vgl. auch Kapitel 5.3.2.5). ABS zeichnet sich durch linear-elastisches Verhalten aus. Daher wird zur Beschreibung des Materialmodells der E-Modul und die Poissonzahl benötigt. Der E-Modul wird aus dem Zugversuch bestimmt, die Poissonzahl aus der Literatur entnommen (vgl. Kapitel 5.3.2). Abbildung 5.17 zeigt die Mittelwerte der Probengeometrien und die Gesamtmittelwerte der Zugversuche mit den Geschwindigkeiten 1 mm/min und 5 mm/min. Dargestellt ist auch der Bereich, in dem aus der Normgeraden nach DIN EN ISO [527-1 2019, S. 21] der E-Modul berechnet wird sowie die Berechnung des E-Moduls aus der Normgeraden für die beiden getesteten Geschwindigkeiten. Es ergibt sich ein Unterschied von $3274,6 \text{ MPa} - 2965,9 \text{ MPa} = 308,7 \text{ MPa}$.

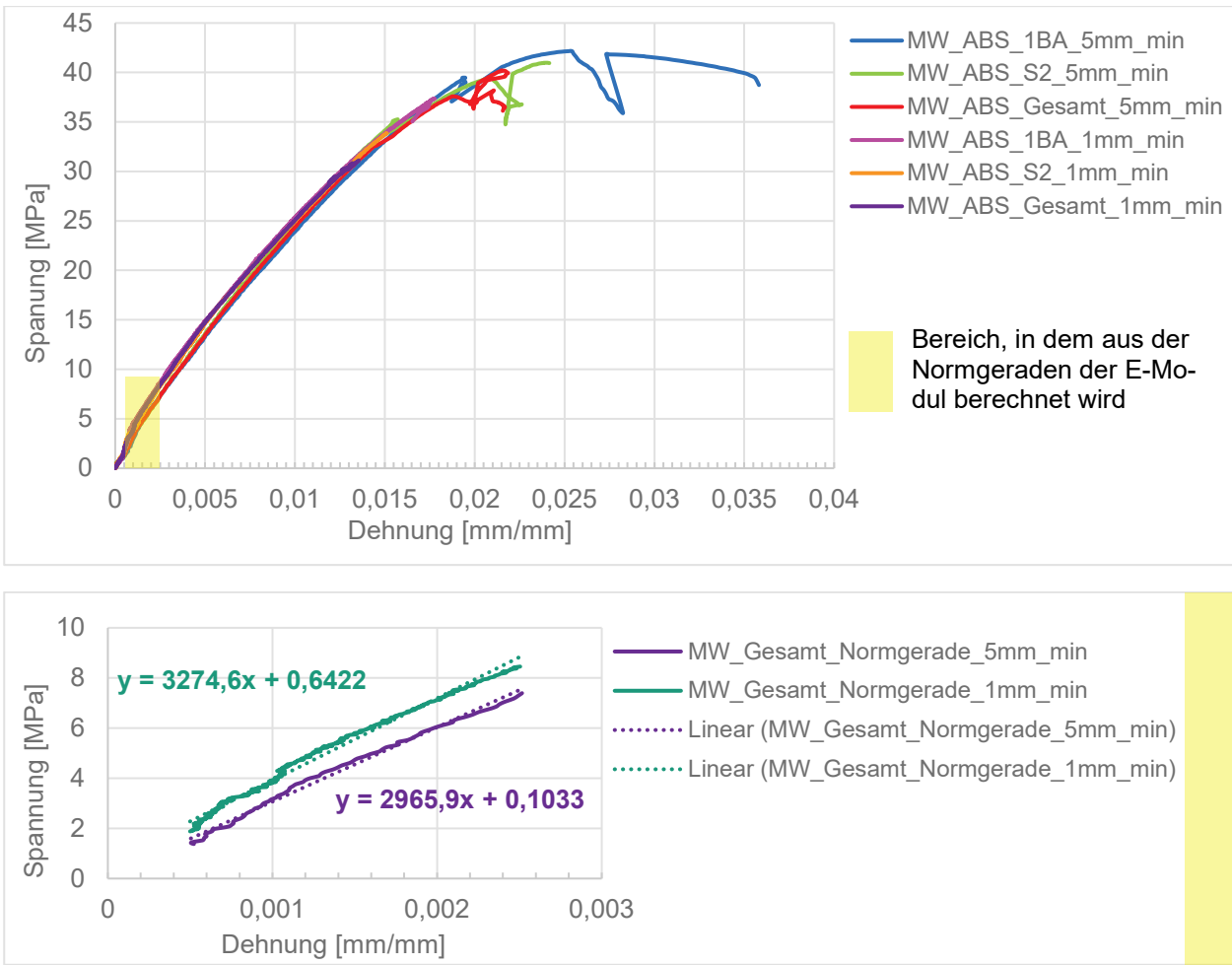


Abbildung 5.17: Mittelwerte der Proben und Berechnung des E-Moduls

Wird die Lage des Bereichs der Berechnung des Moduls betrachtet, wird deutlich, dass die untere Grenze des Intervalls unterhalb des Einlaufbereichs und damit im Bereich starker Schwankungen (vgl. Abbildung 5.16) beginnt. Der Einlaufbereich endet ab ca. 0,13 % Dehnung (0,0013 mm/mm). Es ist daher sinnvoll, für eine neutrale Berechnung des E-Moduls ein neues Intervall zu definieren (vgl. [KEUERLEBER 2006]). Abbildung 5.18 zeigt die zum Vergleich gewählten Intervalle, Abbildung 5.19 die Berechnung des E-Moduls.

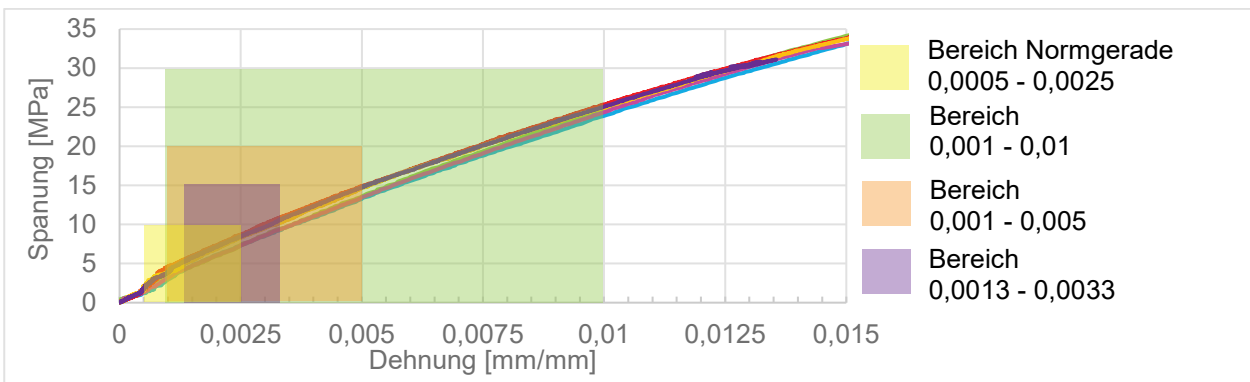


Abbildung 5.18: Mögliche Intervalle zur Berechnung des E-Moduls

Das gelbe Intervall bildet die Normgerade ab. Das grüne Intervall umfasst einen großen Teil des linear-elastischen Bereichs (0,001 - 0,01 mm/mm). Das orangene Intervall deckt einen kleineren Teil des linear-elastischen Bereichs ab und ist halb so groß wie das grüne Intervall (0,001 - 0,005 mm/mm). Das lila Intervall setzt direkt nach dem Einlaufbereich ein (0,0013 - 0,0033 mm/mm). Es bildet denselben Bereich wie die Normgerade ab, nur um den Wert des Einlaufbereichs nach rechts verschoben. Aufgrund des Einschwingbereichs und des dadurch verfälschten E-Moduls wird der gelbe Bereich (vgl. Abbildung 5.17, 5.18) nicht verwendet. Der grüne Bereich deckt eine zu weite Spanne der Geraden ab. Orange und Lila weisen sehr ähnliche E-Module auf. Da Lila die Berechnung des E-Moduls der Normgerade um den Einschwingbereich verschoben abbildet, wird dieser Bereich für die Berechnung verwendet. Wie bereits gezeigt, weist die Prüfung mit 5 mm/min einen geringeren Einschwingbereich auf. Der E-Modul wird daher auf 2600 MPa festgelegt.



Abbildung 5.19: Berechnung des E-Moduls

5.4 Aufbau der Prototypen im CAD

Nach dem grundlegenden Aufbau der Simulation für adaptive Strukturen und Systeme werden im Folgenden die Prototypen im CAD aufgebaut. Vorausgegangen sind der Erstellung der Prototypen Untersuchungen bezüglich des Aufbaus der aktiven und passiven Struktur (Kapitel 4.1), die Analyse des Bewegungsablaufs (Kapitel 4.2) sowie eine Untersuchung und ein Vorversuch zur Verbindung von FGL und FDM (Kapitel 5.2.3). Daraus folgten erste Erkenntnisse bezüglich der Geometrie der passiven Struktur.

Anhand der in Kapitel 4.1.1.3 vorgestellten Matrix sowie der Ergebnisse aus Kapitel 5.2 (FDM) und Kapitel 5.3 (Simulation) werden Struktur-Prototypen abgeleitet und simuliert. Zur Überprüfung der Simulation werden die für die Anwendung relevanten Strukturen als reale Prototypen gefertigt und mit den Ergebnissen der Simulation verglichen. Dazu werden aus der Matrix in Abbildung 4.8 wie beschrieben die flächigen Festkörpergelenke betrachtet. Die Ergebnisse dienen der Ableitung weiterer Parameter, Kriterien und Empfehlungen für die Richtlinien zum Entwurf adaptiver Strukturen und Systeme (Kapitel 6).

5.4.1 Aufbau der aktiven und passiven Struktur

Die Modelle werden in Autodesk Inventor parametrisch aufgebaut. Dadurch sind eine schnelle Anpassung und Variation im CAD-System und in der Simulation möglich. Zudem können die Einflüsse der einzelnen Geometrieänderungen abgeschätzt werden. Die Dimensionierung der Modelle wird durch die vier Haupteinflüsse bestimmt:

- Eigenschaften des Fertigungsverfahrens, hier FDM-Drucker (Druckzeit, Bauraum),
- Eigenschaften der aktiven Struktur (Aktivierungsenergie, aufzubringende Kraft, verfügbarer Durchmesser, mögliche Bewegungslänge),
- Eigenschaften der Anwendung (erkennbare und messbare Bewegung & Kraft) und
- Eigenschaften der passiven Struktur (Gewährleistung von Anbindung, Drahtlänge, Führung und Positionierung, Abbildung der Strukturen, flächiges Tragwerk)

bestimmt. Bedingt durch den FDM-Druck der Modelle werden die Abmessungen so gewählt, dass die Prototypen den Bauraum des Druckers nicht überschreiten und in einer angemessenen Zeit gedruckt werden können, um unterschiedliche Geometrien in kurzer Zeit zu fertigen und zu vergleichen. Für die Versuche soll ein einzelner FG-Draht eingesetzt werden, um die Struktur zu verformen. Dadurch werden Aufbau und Zusammenbau der Prototypen sowie die Regelung vereinfacht, da die Drähte nicht aufeinander abgestimmt werden müssen. Zusätzlich folgt aus der Forderung, dass das Gewicht und die Struktur der Modelle auf die mögliche aufzubringende Kraft des Drahts auszulegen sind.

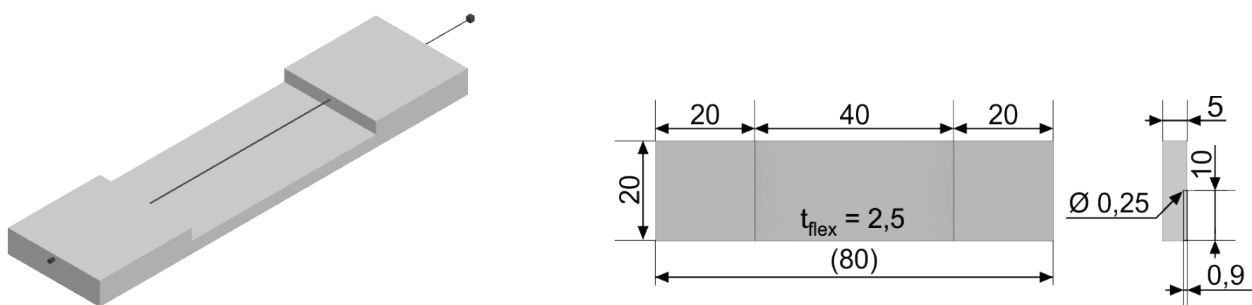
Aufgrund der kommerziellen Verfügbarkeit, werden für die aktive Struktur Drähte mit einem Durchmesser von 0,15 - 0,5 mm ausgewählt (vgl. Kapitel 4.1.2). Je größer der Drahtdurchmesser, desto höher ist der Widerstand und der benötigte Strom zur schnellen Aktivierung sowie die Abkühlzeit (vgl. Tabelle 4.5). Um dennoch eine im Verhältnis zum Modell hohe Kraft für die Verformung zur Verfügung zu haben und nach Vorversuchen, wird der FG-Draht von Dynalloy mit einem Durchmesser von 0,25 mm ausgewählt.

Für die Auswertung und Vergleichbarkeit der Versuche wird festgelegt, dass Kraft und Bewegung erkennbar und messbar gestaltet werden. Der ausgewählte Draht verfügt über eine maximal zulässige Kraft von 8,4 N (vgl. Kapitel 4.1.2). Je stärker der Draht belastet wird, desto höher steigt die Aktivierungstemperatur (Kapitel 3.3, Abbildung 3.17). Um eine Überlastung des Drahts zu vermeiden, die Aktivierungstemperatur zu begrenzen und die passive Struktur nicht zu beschädigen, wird die maximale Kraft auf 5 N festgelegt. Diese darf bei der vollständigen Stellbewegung des FG-Drahts durch die Belastung aufgrund der Bewegung der Struktur und deren Eigengewicht nicht überschritten werden.

Die passive Struktur besteht aus einem festen und einem flexiblen Anteil (Kapitel 4.1.1). Aus den Anforderungen an die Messbarkeit der Ergebnisse, die maximale Kraft und die Abmessungen der Modelle wird ein Stellweg von mindestens 4 mm und ein Gesamtgewicht der Struktur von 5 - 10 g gefordert ($\pm 1 - 2$ % der festgelegten Kraft von 5 N). Durch den geforderten Stellweg ergibt sich bei einer Dehnung von 5 % des FG-Drahts eine Drahtlänge von 80 mm und damit die Gesamtlänge der passiven Struktur. Diese teilt sich auf in den flexiblen und festen Anteil (Kapitel 4.1.1). Der flexible Anteil bildet die Bewegung ab. Die Länge ergibt sich als Kompromiss aus notwendiger Steifigkeit (definierte Bewegung, keine zu starke Durchbiegung der Struktur durch Eigengewicht ohne zusätzliche Belastung) und Umsetzung der geforderten Auslenkung. Für die Modelle soll der flexible Anteil im Vergleich zur Anbindung nicht zu klein ausfallen und die Möglichkeit bieten, unterschiedliche Strukturen abzubilden. Die Länge wird daher auf 40 mm bestimmt. Der feste Anteil, der vor allem der Anbindung, Drahtlänge, Führung und Positionierung dient, wird damit auf 20 mm festgelegt. Dadurch soll der Draht nicht unnötig durch eine zu hohe Gewichtskraft belastet werden, aber gleichzeitig die Möglichkeit der Anbindung an ein System darstellen. Des Weiteren kann durch die Länge der Anbindung die Drahtlänge vergrößert werden, wodurch sich der Stellweg erhöht. Die Breite wird unter Berücksichtigung des Gewichts und des flächigen Tragwerks zu 20 mm bestimmt. Damit es sich um flächige Strukturen handelt, müssen die Abmessungen stark zweidimensional sein, das heißt, dass die Höhe klein gegenüber den anderen beiden Abmessungen ist

(vgl. Kapitel 2.2.1.1). Die Höhe wird daher und unter Berücksichtigung des Gewichts auf 5 mm festgelegt. Zur Realisierung einer Biegung, wird der Draht außerhalb der neutralen Faser und des flexiblen Anteils positioniert. Von diesem werden 2,5 mm der Höhe entfernt ($t_{\text{flex}} = 2,5 \text{ mm}$). Bei der Positionierung stehen sich zwei Anforderungen gegenüber: die Nutzung eines möglichst großen Hebelarms, um ein hohes Biegemoment zu erzeugen und die sichere Führung innerhalb der passiven Struktur mit ausreichend Deckschichten, um eine exakte Positionierung ohne Verformung der Struktur zu gewährleisten. Der Abstand zur obersten Schicht wird auf 0,9 mm festgelegt. Damit befinden sich neun Schichten oberhalb der Aussparung für den Draht.

Abbildung 5.20 zeigt Aufbau und Dimensionierung der Modelle. Oben links ist die Verbindung dargestellt, oben rechts die Bemaßung des Modells. Die tabellarische Abbildung unten zeigt eine mögliche Parametrisierung. Zur Übertragung der Parameter in ANSYS wird das Kürzel DS vor die Parameter gestellt. Dadurch können diese direkt in ANSYS bearbeitet und Variantenstudien durchgeführt werden.



DS_Breite	d34, Skizze1	mm	20 mm	20,000000	●	20,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Breite flexibler Anteil
DS_Höhe	Extrusion1	mm	2,5 mm	2,500000	●	2,500000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Höhe flexibler Anteil
DS_Länge	Skizze1	mm	40 mm	40,000000	●	40,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Länge flexibler Anteil

Abbildung 5.20: Aufbau, Dimensionierung und Parametrisierung der Modelle

5.4.2 Aufbau der Prototypen für den Druck

Für das Druckmodell wird die Aussparung für den FG-Draht vergrößert und die Geometrie angepasst (Abbildung 5.21 Detail). Dies ist bedingt durch die Fertigung der Prototypen mit dem FDM-Drucker und durch den Umstand, dass zusätzlich zum Draht eine Messinghülse (vgl. Kapitel 5.3.1.1 und Abbildung 5.21 rechts) verbaut wird. Aufgrund der Qualität des FDM-Drucks mit der vorhandenen Hardware muss mit den durch den Fertigungsprozess bedingten Veränderungen der Abmessungen gerechnet und die Aussparung entsprechend dimensioniert sowie die Geometrie zur besseren Druckbarkeit angepasst werden. Die Messinghülse schützt die Anbindung vor einem Einschneiden des heißen FG-Drahts, da eine Verteilung von Kraft und Wärme auf eine größere Fläche stattfindet. Des

Weiteren ist die Oberfläche innerhalb der Bohrung durch den Druck rau. Die Messinghülse besitzt eine glatte Oberfläche und minimiert die Reibung.

Die Modelle werden aus ABS und TPE gedruckt. Für die Prototypen aus TPE wird die Konstruktion der Anbindung angepasst, da der feste Anteil der passiven Struktur mit ABS gedruckt wird. Dies liegt an der höheren Wärmeformbeständigkeitstemperatur von ABS um etwa 10 °C (vgl. Tabelle 5.2) und an der besseren Formbeständigkeit unter Belastung, wodurch bei einer Belastung keine Verformung der Führung durch die Nachgiebigkeit von TPE stattfindet. Um ein Lösen von TPE und ABS zu verhindern, wird zusätzlich zur stofflichen Verbindung eine formschlüssige konzipiert (Abbildung 5.21 Mitte).

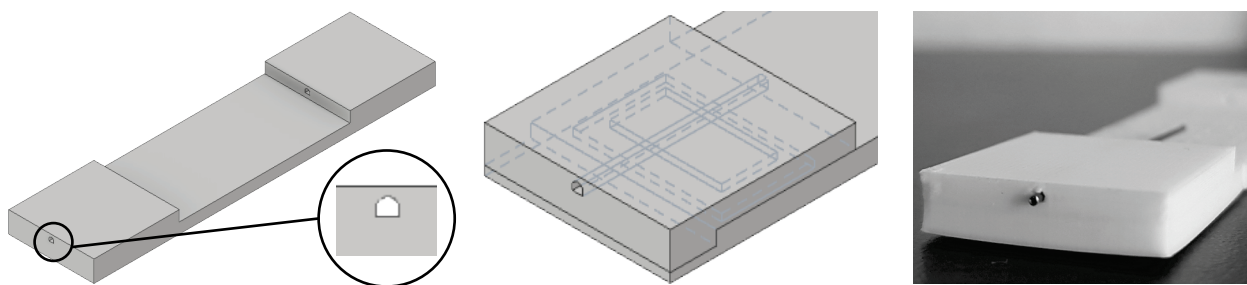


Abbildung 5.21: Aufbau der Modelle in Autodesk Inventor für den FDM-Druck

5.4.3 Aufbau der Prototypen für die Simulation

Für die Simulation werden die Prototypen aus einem Material aufgebaut, da der Simulationsaufwand durch Verbindungsstellen steigt und diese Kontakte Ursache für fehlerhafte Einflüsse sein können (vgl. Kapitel 5.3.1.6). Dies betrifft nur die Prototypen aus TPE ($\rho = 1,09 \text{ g/cm}^3$), bei denen die Anbindung im Druck aus ABS ($\rho = 1,05 \text{ g/cm}^3$) ist (Dichte vgl. Tabelle 5.1). Ein Einfluss, der daraus entsteht, ist die abweichende Gewichtskraft. Da sich das Gewicht durch die Anbindung nur unwesentlich verändert ($\sim 0,4 \%$), kann diese Vereinfachung angenommen werden. Ein Vorversuch zeigte eine Abweichung $\ll 1 \%$ der Ergebnisse mit und ohne Verbindung.

Die rechte Anbindung, die in der Simulation und im Versuch fest eingespannt ist, wird gekürzt (Abbildung 5.22), um die Simulation zu beschleunigen und die Kontaktfläche zwischen aktiver und passiver Struktur zu minimieren. Die aktive Struktur wird mit dem, dem FG-Draht entsprechenden, Durchmesser von 0,25 mm modelliert. Am linken Ende wird ein Anschlag angefügt, um den Draht in der Simulation mit der passiven Struktur zu verbinden. Er bildet in der Simulation die spätere reale Anbindung durch Crimpen ab. Am anderen Ende befindet sich ein Würfel, der dem Anbringen von Kraft und Verschiebung dient, um das Auftreten einer Divergenz (vgl. Kapitel 5.3.1.3) in der Simulation durch den Angriff einer hohen Kraft auf eine sehr kleine Fläche auszuschließen.

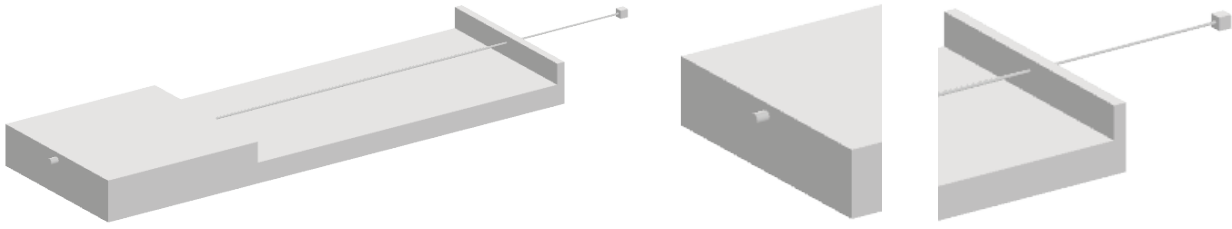


Abbildung 5.22: Aufbau der Modelle für die Simulation in Autodesk Inventor

Anhand der Parametrisierung der CAD-Modelle ist eine schnelle Anpassung der Geometrie in ANSYS möglich. Dadurch kann auf Anforderungen an Kraft und Bewegung reagiert und die Modelle entsprechend angepasst werden. Abbildung 5.23 zeigt die Ansicht und Einstellmöglichkeit der Parameter in ANSYS. Es können CAD-Parameter (Abbildung 5.23 links oben) ausgewählt werden, die in der Simulation über ein Parameterset verändert werden sollen. Diese werden als Input Parameter angezeigt (Abbildung 5.23 rechts oben). In der unten dargestellten Tabelle (Abbildung 5.23 unten) können Design Points mit unterschiedlichen Parametern erzeugt und ausgewertet werden. So ist eine schnelle und übersichtliche Vergleichbarkeit wichtiger Konstruktionsparameter möglich.

Statistics		Input Parameters	
CAD Parameters		Static Structural TPU (Modell 0 gekürzt) manuell verfeinert (A1)	
<input type="checkbox"/> DS_Breite	20	P1	DS_Breite 20
<input type="checkbox"/> DS_Länge	40	P2	DS_Länge 40
<input type="checkbox"/> DS_Höhe	2,5	P3	DS_Höhe 2,5

Name	P1 - DS_Breite	P2 - DS_Länge	P3 - DS_Höhe	P4 - DS_Anbindung_Höhe	P5 - DS_Anbindung_Breite	P6 - DS_Anbindung_Länge	Ret...
DP 0 (Current)	20	40	2,5	5	20	20	<input checked="" type="checkbox"/>
DP 1	20	40	2	5	20	20	<input type="checkbox"/>

Abbildung 5.23: Ansicht der Parametrisierung der Modelle in ANSYS

5.4.4 Auswahl der Prototypen für die Versuche

Für die Versuche werden Strukturen mithilfe der Matrizen in Abbildung 4.5 und 4.8 generiert. Bei der Auswahl werden die Erkenntnisse und Ergebnisse aus Kapitel 4.1 zum Aufbau der grundlegenden Gestalt, 4.2 zur Bewegung und 4.3 zu den Einflussparametern beachtet. Dabei stehen die folgenden Kriterien im Vordergrund:

- Beschränkung auf flächige Tragwerke (K1)
- Anpassung der Geometrie an die geforderte Bewegung hier: einseitige Biegung (K2)
- Flexibilität durch Elastizität, Geometrie und Struktur sowie Kombinationen (K3)
- Ableitbare Strukturen zur Darstellung der Einflüsse bei Veränderungen (K4)
- Vergleichbarkeit von Geometrieveränderungen (K5)
- Ermöglichen von Parameteranpassungen (K6)
- Unterschiedliche Komplexität der Strukturen (K7)

Insgesamt werden mithilfe der Matrizen die in Abbildung 5.24 dargestellten Prototypen in Inventor aufgebaut und die 14 markierten anhand der aufgeführten Kriterien ausgewählt (Nichterfüllen der Kriterien siehe Abbildung), gedruckt und getestet sowie in ANSYS bezüglich der benötigten Kraft zur Verformung mit den Materialien ABS und TPE simuliert.

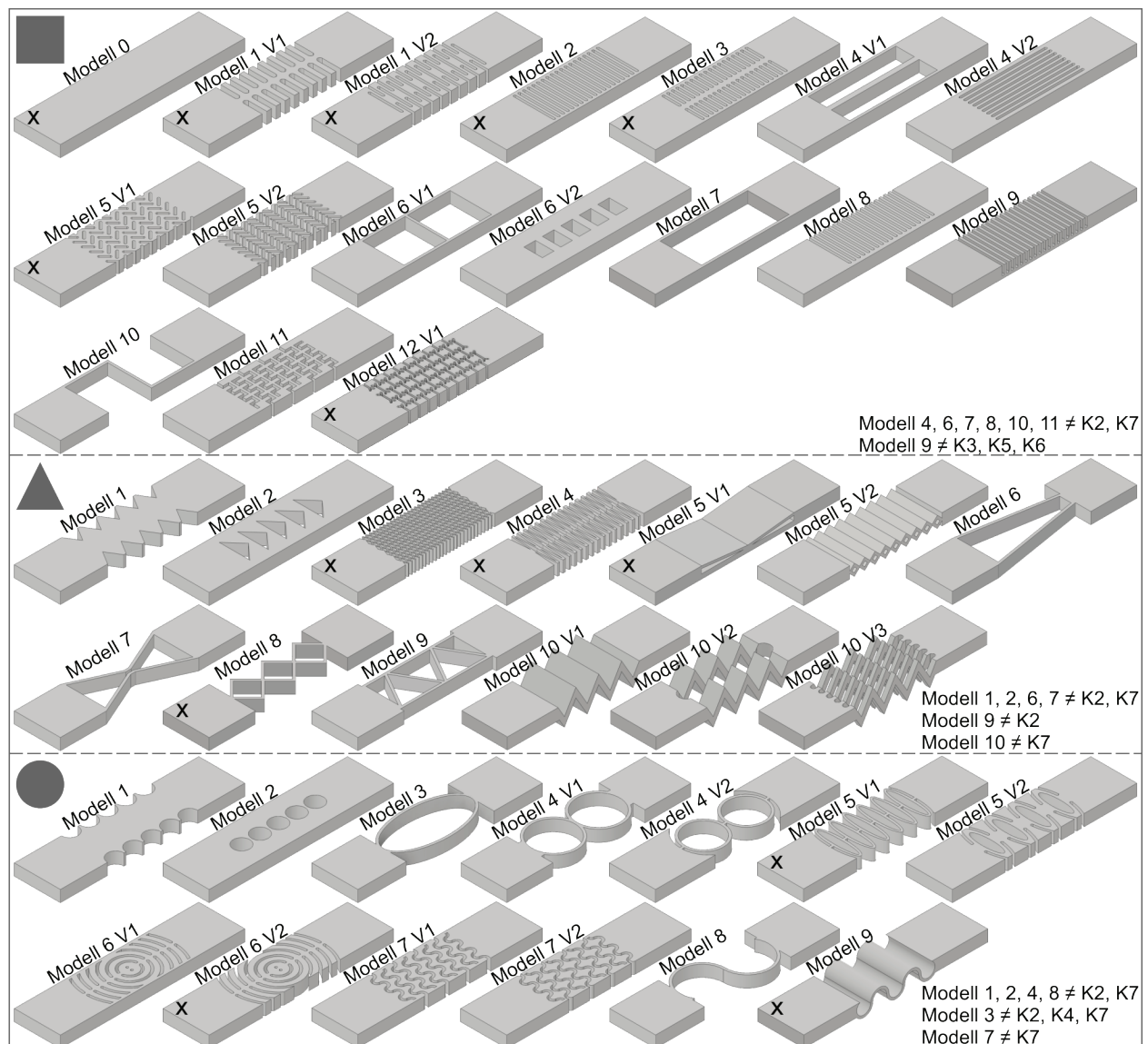


Abbildung 5.24: Auswahl an Prototypen

Nach Vorversuchen mit den 14 markierten Prototypen in Bezug auf die geforderte Belastungsart, die definierte maximale Kraft von 5 N und die Durchbiegung zu Beginn (vgl. Kapitel 5.4.1.) - eine gewisse Steifigkeit der flexiblen Struktur ist aufgrund der teilweise hohen Durchbiegung zu Beginn für eine definierte Bewegung notwendig - werden für die Hauptversuche die in Abbildung 5.25 dargestellten Modelle ausgewählt und für die Simulation sowie die Verbindung mit dem FG-Draht vorbereitet. Aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften ist es nicht sinnvoll und teilweise nicht möglich, dieselben Strukturen zu verwenden. Die dargestellten Strukturen

aus TPE weisen in ABS eine zu hohe benötigte Kraft für eine Bewegung auf, während die unten dargestellten Strukturen in TPE eine zu starke Durchbiegung bereits ohne Belastung, hervorgerufen durch die Gewichtskraft, besitzen.

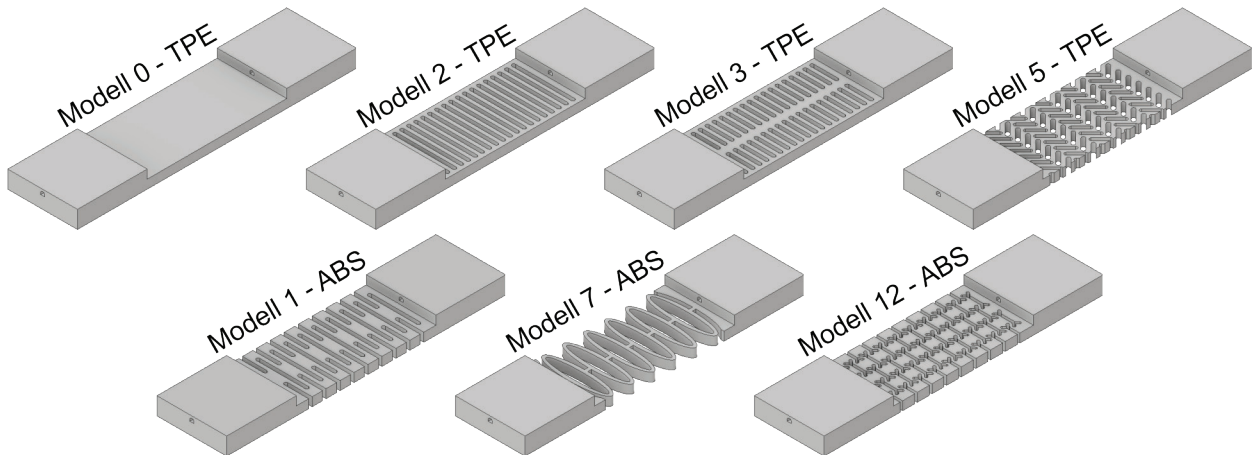


Abbildung 5.25: Ausgewählte Modelle aus TPE und ABS für die Versuche

5.5 Realer Aufbau und Versuch der Prototypen

Das vorliegende Kapitel umfasst die Erstellung der Prototypen, den Versuchsaufbau sowie die Vorbereitung des FG-Drahts. Die Prototypen werden anhand der Vorgehensweise von Kapitel 5.4.2 für die in Kapitel 5.4.4 definierten Proben mit dem FDM-Drucker erstellt. Zur Durchführung der realen Testläufe ist ein Prüfstand notwendig, der Kraft, Weg und Auslenkung der Proben aufbringen und messen kann. Für die Verbindung von aktiver und passiver Struktur ist der FG-Draht vorzubereiten und die Vordehnung einzubringen.

5.5.1 Erstellung der Prototypen

Die Prototypen für den realen Aufbau werden mit denselben Druckeinstellungen wie die Proben für den Zugversuch gedruckt (Kapitel 5.3.2.2), um die Vergleichbarkeit mit der Simulation zu gewährleisten. Sie werden aus den ausgewählten und in den Zugversuchen verwendeten Materialien ABS und TPE gefertigt (Abbildung 5.26).

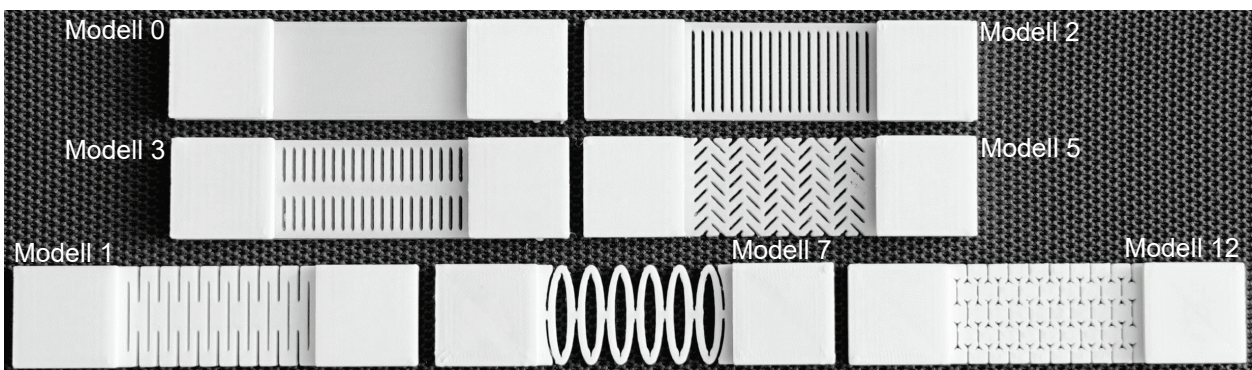


Abbildung 5.26: Mittels FDM-Verfahren gefertigte Prototypen

Die Genauigkeit des eingesetzten FDM-Druckers ist für die Gestaltung von Prototypen ausreichend, weicht jedoch von den Werten des CAD-Modells und damit auch vom Simulationsmodell ab. Dies ist beim Vergleich der Ergebnisse von Simulation und FDM-Prototypen zu berücksichtigen und in die Diskussion der Ergebnisse miteinzubeziehen. Daher werden zur Überprüfung der Simulation die gedruckten Proben vermessen, um die Unterschiede zwischen CAD-Modell und FDM-Prototyp aufzuzeigen. Abbildung 5.27 und 5.28 stellen die zur Vermessung herangezogenen Hauptwerte dar. Durch die Anpassung der CAD-Modelle anhand der dargestellten Parameter kann im weiteren Verlauf der angepasste Prototyp erneut simuliert werden, um eine bessere Vergleichbarkeit von Messung und Simulation zu erreichen.

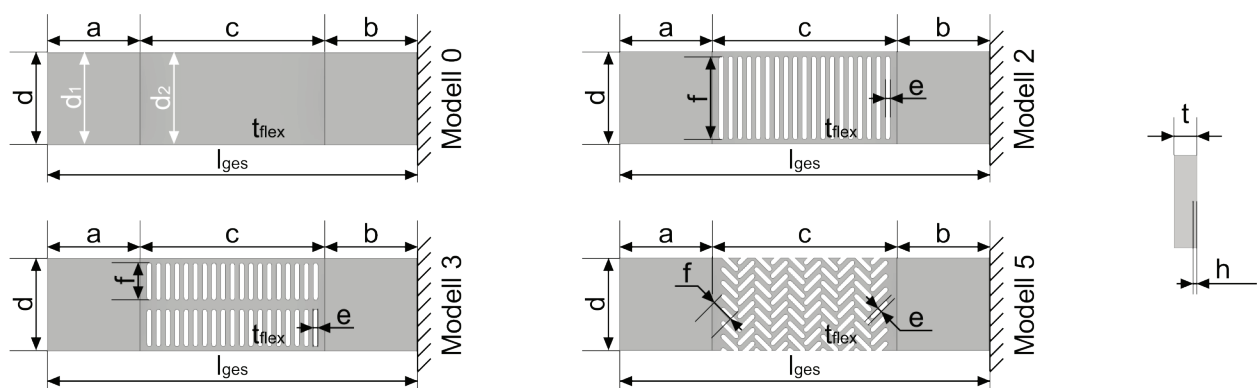


Abbildung 5.27: Parameterangaben zur Vermessung der gedruckten TPE-Proben

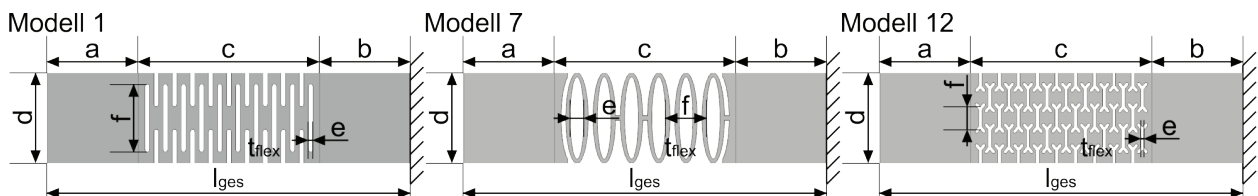


Abbildung 5.28: Parameterangaben zur Vermessung der gedruckten ABS-Proben

Das manuelle Vermessen (digitaler Messschieber) der Proben ergibt die in Tabelle 5.13 und 5.14 dargestellten Werte. P0 stellt das CAD Modell dar, P1 bis P3 die gedruckten Proben und P_M deren Mittelwert. Die Abmessungen sind in mm angegeben. Der Parameter d beschreibt die Breite der Proben, mit d_1 = Breite des festen und d_2 = Breite des flexiblen Anteils. Der Wert des Parameters h gibt den Abstand zwischen Modelloberseite und Führung an.

Bei TPE zeigt sich eine Vergrößerung des festen Anteils (a , b) der passiven Struktur und eine Verkleinerung des flexiblen Anteils (c). Die Gesamtlänge (l_{ges}) liegt unter der konstruierten Länge von 80 mm. Die Tiefe (t_{flex}) ist annähernd konstant und wird durch den FDM-Drucker sehr gut abgebildet. Die feinen Strukturen bei Modell 2, 3 und 5 (Parameter e und f) sowie die Höhe der Führung (h) weichen vom CAD-Modell ab.

		a	b	c	l_{ges}	d_1	d_2	t_{flex}	h	e	f
Modell 0	P0	20	20	40	80	20	20	2,5	0,9		
	P1	20,40	20,25	39,02	79,67	20,30	19,80	2,48	0,73		
	P2	20,18	20,25	39,20	79,63	19,94	19,75	2,45	0,80		
	P3	20,09	20,20	39,20	79,49	20,10	19,90	2,47	0,79		
	P _M	20,22	20,23	39,14	79,60	20,11	19,82	2,47	0,77		
Modell 2	P0	20	20	40	80	20	20	2,5	0,9	1	18
	P1	20,40	20,34	39,18	79,92	20,43	19,77	2,48	0,80	0,70	17,01
	P2	20,34	20,40	39,18	79,92	20,31	19,70	2,49	0,80	0,85	16,96
	P3	20,21	20,15	39,25	79,61	20,20	19,68	2,47	0,84	0,73	17,25
	P _M	20,32	20,30	39,20	79,82	20,31	19,72	2,48	0,81	0,76	17,07
Modell 3	P0	20	20	40	80	20	20	2,5	0,90	1	8
	P1	20,35	20,42	39,13	79,90	20,35	19,85	2,49	0,85	0,89	7,25
	P2	20,25	20,18	39,22	79,65	20,18	19,73	2,47	0,85	0,92	7,38
	P3	20,20	20,15	39,30	79,65	20,15	19,76	2,47	0,80	0,91	7,33
	P _M	20,27	20,25	39,22	79,73	20,23	19,78	2,48	0,83	0,91	7,32
Modell 5	P0	20	20	40	80	20	20	2,5	0,9	1	5
	P1	20,31	20,30	38,91	79,52	20,30	19,90	2,50	0,88	0,96	4,46
	P2	20,25	20,35	39,23	79,83	20,23	19,93	2,47	0,81	0,98	4,37
	P3	20,24	20,23	39,10	79,57	20,15	19,89	2,48	0,68	0,94	4,40
	P _M	20,27	20,29	39,08	79,64	20,23	19,91	2,48	0,79	0,96	4,41

Tabelle 5.13: Messwerte der FDM-gedruckten Proben aus TPE

Bei ABS zeigt sich ebenfalls eine Vergrößerung des festen Anteils (a, b) und eine Verkleinerung des flexiblen Anteils (c). Allerdings liegt die gedruckte Gesamtlänge (l_{ges}) leicht über der konstruierten. Die Tiefe (t_{flex}) ist annähernd konstant, aber im Gegensatz zu TPE größer als die konstruierte Tiefe. Auch hier weisen die feinen Strukturen (e, f) des flexiblen Anteils sowie die Höhe der Führung (h) teilweise hohe Abweichungen auf.

		a	b	c	l_{ges}	d_1	d_2	t_{flex}	h	e	f
Modell 1	P0	20	20	40	80	20	20	2,5	0,9	1	15
	P1	20,24	20,25	39,68	80,17	20,21	20,10	2,55	0,73	0,85	14,12
	P2	20,38	20,24	39,56	80,17	20,22	20,13	2,54	0,65	0,84	14,06
	P3	20,21	20,27	39,67	80,15	20,18	20,04	2,54	0,80	0,85	14,13
	P _M	20,28	20,25	39,64	80,16	20,20	20,09	2,54	0,73	0,85	14,10
Modell 7	P0	20	20	40	80	20	20	2,5	0,9	3	9
	P1	20,39	20,49	39,37	80,25	20,20	19,98	2,54	0,70	2,56	9,22
	P2	20,38	20,46	39,32	80,16	20,20	20,00	2,54	0,75	2,55	9,27
	P3	20,47	20,42	39,39	80,28	20,19	19,98	2,57	0,73	2,56	9,24
	P _M	20,41	20,46	39,36	80,23	20,20	19,99	2,55	0,73	2,55	9,24
Modell 12	P0	20	20	40	80	20	20	2,5	0,9	0,7	5,089
	P1	20,23	20,14	39,72	80,09	20,19	20,12	2,63	0,68	0,58	5,23
	P2	20,21	20,16	39,74	80,11	20,17	20,10	2,62	0,79	0,59	5,20
	P3	20,21	20,22	39,68	80,11	20,18	20,12	2,62	0,73	0,61	5,23
	P _M	20,22	20,17	39,71	80,10	20,18	20,11	2,62	0,73	0,59	5,22

Tabelle 5.14: Messwerte der FDM-gedruckten Proben aus ABS

Insgesamt wird festgestellt, dass der eingesetzte FDM-Drucker die Hauptabmessungen der passiven Struktur gut abbildet, die feinen Strukturen aber Abweichungen aufweisen und bei der Ergebnisdiskussion zu berücksichtigen sind.

5.5.2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Der Versuch mit den FDM-Prototypen findet in zwei Schritten statt. Zunächst wird die festgelegte Kraft zur Verformung des Prototyps mit einem Kraftmessgerät eingestellt. Dabei wird der Weg, um den sich der Draht bei der aufbrachten Kraft bewegt und die zugehörige Auslenkung gemessen. Im zweiten Schritt wird der FG-Draht in die Prototypen eingesetzt und aktiviert. Hierbei wird die Auslenkung der Probe gemessen. Die Anbindung erfolgt durch Klemmung im fest eingespannten Bereich (rechtes Ende der Probe), da sich diese Verbindung in den Vorversuchen stabiler als Crimpen erwiesen hat und besser einstellbar ist. Um keine zusätzliche Belastung auf die Bewegung auszuüben, wird an der beweglichen Seite der Anbindung der Draht gecrimpt (Abbildung 5.29).



Abbildung 5.29: Probe mit eingespanntem FG-Draht und Befestigung im Prüfstand

Bei der Messung von Kraft und Weg wird ein dafür konzipierter Linearprüfstand (Abbildung 5.30) eingesetzt. Dieser besteht aus einem Grundgerüst (1), darauf angebrachten linearen Führungsschienen (2), einer gelagerten Spindel (3) zur linearen Verschiebung, einer FDM-gedruckten Aufnahme (4) für das Kraftmessgerät sowie einer weiteren Aufnahme für die Probe (5). Zur Messung des zurückgelegten Wegs dient ein Maßband (6).

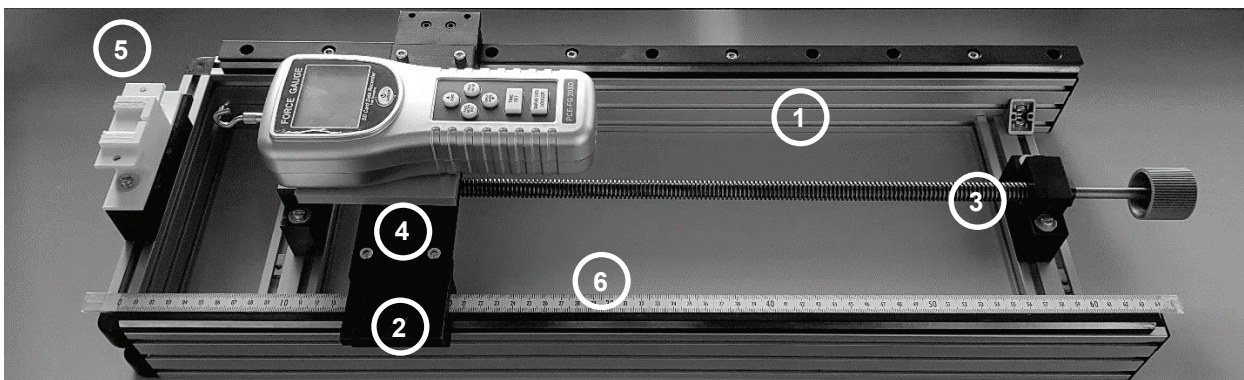


Abbildung 5.30: Prüfstand mit Versuchsaufbau Kraftmessgerät

Zur Durchführung der Versuche wird der beschriebene Prüfstand eingesetzt. Zu jedem Modell werden drei Proben geprüft, um den Einfluss möglicher Schwankungen und Ungenauigkeiten des Fertigungs- und Messverfahrens auszugleichen.

Zur Kraftmessung (Versuchsteil 1) wird ein konventioneller Draht mit dem Durchmesser 0,25 mm in die Probe eingelegt. Er wird am frei beweglichen Ende der Probe gecrimpt und ist rechts über eine Schlaufe mit dem Kraftmessgerät verbunden. Die Probe wird in

der Einspannvorrichtung (5) befestigt. Das Kraftmessgerät wird in eine Position gebracht, in der keine Kraft auf den Draht wirkt. Aus der damit erreichten Null-Lage wird die Messung gestartet. Dazu wird über das Drehrad (die Bewegung wird durch die Drehung der Spindel (3) erzeugt) die für die Probe festgelegte Kraft eingestellt (vgl. Tabelle 5.15 - 5.18) und die Auslenkung an einer Messplatte abgelesen. Diese ist mit einer Messabbildung versehen und wird an der Einspannvorrichtung befestigt (Abbildung 5.31). Eine Anbringung von Messtechnik an den Proben ist mit zusätzlichem Gewicht verbunden. Dieses wirkt sich negativ auf die Messung der notwendigen Kraft für die Auslenkung aus. Aus der erreichten Endlage wird das Kraftmessgerät über das Drehrad wieder in die Null-Lage bewegt. Dabei wird der Stellweg über das Maßband der Führungsschiene bestimmt. Dadurch fließen vorhandene Ungleichmäßigkeiten, die sich vor der Bewegung im Draht befinden und sich erst durch das Spannen ausgleichen, nicht in die Wegmessung ein. Dieser Vorgang wird pro Probe dreimal wiederholt und das Ergebnis über den Mittelwert bestimmt. Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.6.2 dargestellt.

Im zweiten Teil des Versuchs werden die Proben (\cong Proben aus Versuchsteil 1) mit einem FG-Draht ausgestattet und verbunden. Für diesen Versuchsaufbau wird eine Energieversorgung benötigt. Die Probe wird weiterhin in die Vorrichtung (5) eingespannt, zur Aktivierung verkabelt und an ein Labornetzteil angeschlossen. Die Versuche werden einmal durchgeführt, da die Proben keine definierte Rückstellung beinhalten (bei den vorliegenden Modellen findet die Rückverformung nur über die Geometrie und das Gewicht der passiven Struktur statt). Es ist daher kein zyklischer Einwegeffekt umsetzbar. Nach der Aktivierung der FGL wird die Auslenkung an der Messplatte abgelesen. Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.6.4 dargestellt. Abbildung 5.31 zeigt den Prüfstand mit Messplatte und Labornetzteil.

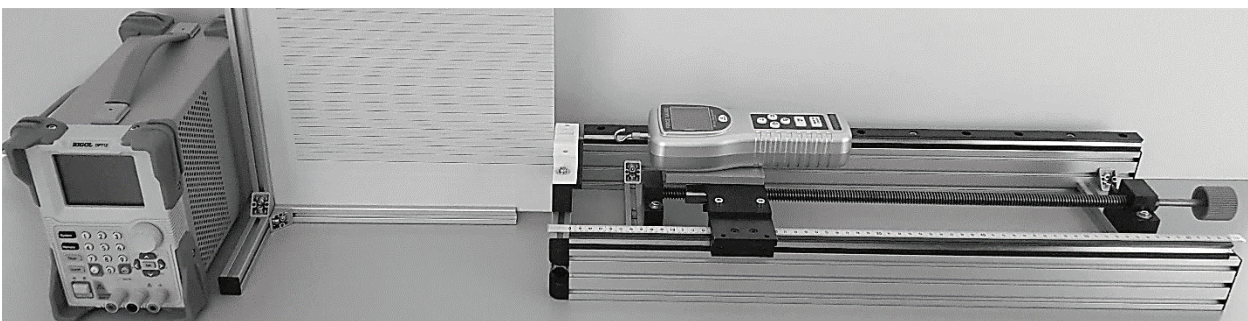


Abbildung 5.31: Prüfstand mit Versuchsaufbau für FG-Proben

5.5.3 Vorbereitung des FG-Drahts

Zur Versuchsdurchführung ist eine Vordehnung des FG-Drahts notwendig, um den Formgedächtniseffekt in der Legierung auszulösen. Dazu wird der Draht im martensitischen Zu-

stand reversibel verformt, um bei einer anschließenden Erwärmung in den austenitischen Zustand überzugehen und in die ursprüngliche Form zurückzukehren (vgl. Kapitel 2.5.2.1). Zur Vorbereitung der Dehnung wird der verwendete Draht unbelastet auf seine Austenit-Finish-Temperatur von 70°C (vgl. Kapitel 4.1.2) erhitzt, um eventuelle Dehnungen auszuschließen bzw. zurückzubilden. Danach findet eine Vordehnung um 5 % statt (vgl. Kapitel 5.4.1). Dabei ist der elastische Anteil der Dehnung zu berücksichtigen, um eine tatsächliche Verformung von 5 % zu erreichen. Zur Überprüfung wird der Draht vor und nach der Dehnung vermessen und gedehnt, bis eine bleibende Dehnung von 5 % erreicht wird.

Zur Vordehnung des FG-Drahts dient ebenfalls der beschriebene Linearprüfstand. Dazu wird die Aufnahme für das Kraftmessgerät (4) und die Probenaufnahme (5) durch eine Aufnahme für den FG-Draht ersetzt. Diese besteht aus einer FDM-gedruckten Aufnahme mit Messing-Klemmplatten, um eine feste Einspannung des Drahts während der Dehnung zu gewährleisten. Die benötigte Drahtlänge von 80 mm wird für den Vorgang verdoppelt, um Einflüsse durch die Klemmung auszuschließen. Damit wird der Draht mit einer Gesamtlänge von 160 mm um 5 % gedehnt.

Für die Versuche erfolgt eine beidseitige Kürzung um 20 mm auf eine Gesamtlänge von 120 mm zur Entfernung der geklemmten Drahtenden sowie der Übergangsbereiche. Die zusätzliche Länge von 40 mm dient der Verbindung von aktiver und passiver Struktur, wie beschrieben über eine Crimp- und Klemmverbindung. Für die FG-Drähte ergeben sich nach der Vordehnung die in Tabelle 5.19 und 5.20 angegebenen Dehnungen.

5.6 Vergleich von Simulation und Prototypen-Versuchen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Simulation und der Prototypen-Versuche dargestellt, verglichen, analysiert und diskutiert. Eine Zusammenfassung der Vorgehensweise der Simulation sowie die Ergebnisse werden in Kapitel 5.6.1 vorgestellt. Es folgen die Ergebnisse und Diskussion der Kraftmessung (Proben mit konventionellem Draht) sowie der FG-Proben von Simulation und Versuchen (Kapitel 5.6.2 - 5.6.5). Abschließend werden die Ergebnisse gesamtheitlich betrachtet.

Der Vergleich von Simulation und Versuchen findet über die zwei Versuchsdurchführungen (vgl. Kapitel 5.5.2) statt. Beim Versuch mit dem konventionellen Draht wird die Kraft eingestellt und die sich ergebenden Wege und Auslenkungen aufgenommen und mit der Simulation über die schrittweise aufgebrachte Kraft verglichen. Der zweite Vergleich findet zwischen der Simulation mit schrittweise aufgebrachter Verschiebung und dem FG-Prototyp statt. Dabei wird die eingebrachte Vordehnung in den Stellweg des FG-Drahts

umgerechnet und in der Simulation als Verschiebung festgelegt. Analysiert werden die sich ergebenden Auslenkungen. Bei der Ergebnisdiskussion wird zusätzlich zur Modellerstellung in der Simulation (Genauigkeit und Vereinfachungen) und der Geometrieänderung durch das Fertigungsverfahren auch die Ablesegenauigkeit in die Betrachtung miteinbezogen. Abbildung 5.32 zeigt die Versuche in einer abstrahierten Darstellung.

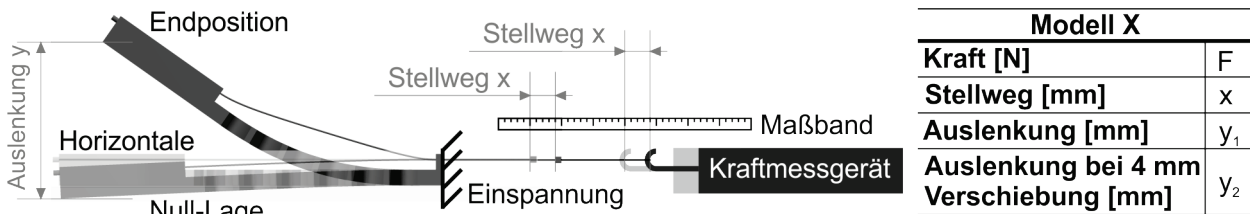


Abbildung 5.32: Darstellung der Versuche

5.6.1 Simulation und Ergebnisse der Simulation

Die in Kapitel 5.4 konstruierten Prototypen werden im Folgenden in ANSYS simuliert. Dabei werden die in Kapitel 5.3 definierten Simulations- und Modellparameter verwendet. Die Ziele der Simulation sind, den Aufwand von realen Versuchsprototypen zu minimieren, schnell erste Aussagen zum Bewegungsablauf zu treffen, die Vordimensionierung von FG-Draht und Struktur zu ermöglichen, die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Strukturen, Varianten und Parameteranpassungen umzusetzen und die Abschätzung des Zusammenwirkens von Struktur und FG-Draht.

Es wird zunächst darauf verzichtet, das tatsächliche Gewicht der Prototypen oder Abweichungen der Abmessung in die Simulation zurückzuführen, da diese Differenzen stark vom eingesetzten Fertigungsverfahren abhängen. Das übergeordnete Ziel ist, durch die Simulation effizient und effektiv Aussagen über den Bewegungsablauf der Struktur zu gewinnen und anhand der Vorgaben aus der Anwendung die Bewegungsmöglichkeiten abzuschätzen sowie das Tragwerk und den FG-Draht entsprechend der bestehenden Belastungen auszulegen. Zur Vergleichbarkeit der Strukturen untereinander und mit den realen Prototypen werden für die Simulation Vereinfachungen und Randbedingungen festgelegt (vgl. Kapitel 5.3.1), die wichtigsten werden kurz zusammengefasst.

Die Simulation wird für den Belastungsfall Biegung durchgeführt. Das FG-Element wird durch einen Draht aus Titanlegierung ersetzt, der sich reibungsfrei in der Führung bewegt. Die Verbindung des FG-Drahts mit der passiven Struktur erfolgt über eine Crimpverbindung, die in der Simulation als zylindrisches Element modelliert wird. Eine Seite des Modells ist fest eingespannt. Durch die Lage des Drahts oberhalb der neutralen Faser und die in Drahrichtung aufgebrachte Kraft bzw. Verschiebung entsteht die Biegung.

Die Struktur wird im Bereich der festen Einspannung verkürzt, um die Simulation zu vereinfachen und die Konvergenz zu verbessern. Die Vernetzung wird manuell erstellt, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Durch Netzverfeinerung wird die Genauigkeit der Deformation verbessert, um den Einfluss des Netzes auf die Ergebnisse zu verringern.

Wie in Kapitel 5.5.2 beschrieben, besteht der Versuch aus zwei Teilen. Im ersten wird die Kraft zur Verformung aus der Null-Lage der Probe eingestellt. Die Simulation wird entsprechend mit einer schrittweisen Zunahme der Kraft durchgeführt. Der Draht wird am rechten Ende in Zugrichtung frei beweglich definiert, alle anderen Richtungen werden gesperrt. Das schrittweise Aufbringen der Kraft und der in Krafrichtung frei bewegliche Draht ermöglichen die Abbildung der Durchbiegung des Modells zu Beginn. In der Simulation wirkt im ersten Schritt entsprechend dem Realversuch eine Kraft von 0 N. Damit verformt sich das Modell zunächst aufgrund der wirkenden Gewichtskraft. Eine schrittweise Erhöhung der Kraft bis zur definierten Endkraft simuliert den Bewegungsablauf.

Im zweiten Teil des Versuchs wird der FG-Draht eingesetzt die Auslenkung bei vorgegebenem Stellweg bestimmt. Durch die Verbindung von aktiver und passiver Struktur entsteht beim Einspannen in den Prüfstand eine Vorspannung in Modell und Draht aufgrund der festen Verbindung und der wirkenden Gewichtskraft. Dies muss in der Simulation abgebildet werden. Dazu wird der Draht mit einer Verschiebung beaufschlagt, die zu Beginn der Simulation auf 0 mm in Bewegungsrichtung gesetzt wird. Dadurch verschiebt sich der Draht nicht innerhalb des Modells, die Länge von 80 mm bleibt konstant, es stellt sich aber eine Durchbiegung ein, die durch die Gewichtskraft hervorgerufen wird. Diese Durchbiegung ist im realen Modell durch die eingespannte Länge des FG-Drahts begrenzt und entspricht in der Simulation dem ersten Schritt mit einer Verschiebung von 0 mm. Im weiteren Verlauf wird eine schrittweise Verschiebung auf das Ende des Drahts aufgetragen, bis der definierte Stellweg erreicht ist.

Bei der Simulation der Verschiebung kann die notwendige Kraft zur Verformung als Reaktionskraft aus der festen Anbindung ausgegeben werden. Da sich das System im Gleichgewicht befindet, entspricht die Reaktionskraft in der festen Lagerung oder an der Verschiebungsstelle der aufgewendeten Verformungskraft. Ein Vergleich mit der Kraftmessung des realen Prototyps ist nicht möglich, da der konventionelle Draht nicht fest eingespannt wird. Ein entsprechender Versuchsaufbau ist komplex, aufwändig und kann zu Ungenauigkeiten bei der Messung führen. Als Bestätigung der Kraft-Werte aus der Simulation eignet sich der zuvor beschriebene Versuchsablauf. Zur Auslegung der FG-Drähte kann die Kraftreaktion aus der Simulation der Verschiebung verwendet werden.

Für ABS und TPE werden aufgrund der sich unterscheidenden Bewegungsverformbarkeit unterschiedliche Kräfte angesetzt. Da sich TPE deutlich weicher verhält, wird die Kraft reduziert. Auch innerhalb der Materialien zeigt sich, dass die Strukturen bezüglich ihrer Bewegung und Flexibilität Unterschiede aufweisen. Bei TPE besitzt Modell 0 bei einer Kraft von 0,5 N eine Auslenkung von 3,8 mm und einen Weg von 0,25 mm. Speziell der Wert des Wegs ist bei einer manuellen Messung schwer ablesbar. Im Gegensatz dazu weist Modell 5 bei einer Kraft von 0,5 N eine Auslenkung von 31,7 mm und einen Weg von 3,6 mm auf. Eine Kraft von 1 N würde einen Weg > 4 mm hervorrufen, der mit dem FG-Draht der Länge 80 mm und einer Dehnung von 5 % ($\cong 4$ mm Stellweg) nicht erreichbar ist. Dies gilt auch für Modell 2, 3 und 7. Daher ist es nicht möglich, alle Strukturen mit derselben Kraft zu simulieren und zu testen. Zur Vergleichbarkeit stellen die Tabellen 5.15 und 5.16 die Ergebnisse der Simulation mit einer schrittweise aufgebrachten Kraft von 0,5, 1 und 2 N für ABS bzw. 0,25, 0,5 und 1 N für TPE dar. Des Weiteren wird die Auslenkung bei einer schrittweisen Verschiebung von 4 mm (\cong Stellweg des FG-Drahts mit einer Vordehnung von 5 %), angegeben. Bei der Auslenkung ist zu beachten, dass sie aus der Null-Lage erfolgt (\cong bei den Versuchen dem Einspannen der Modelle und der Verformung durch die Gewichtskraft), die unterhalb der Horizontalen liegen kann. Bei kleinen Kräften ist es daher möglich, dass keine Bewegung über die horizontale Lage hinaus stattfindet, da zunächst die Durchbiegung aufgrund der Gewichtskraft überwunden werden muss. Abbildung 5.33 zeigt beispielhaft die Simulation von Modell 1, eine vollständige Übersicht gibt Tabelle A.1.

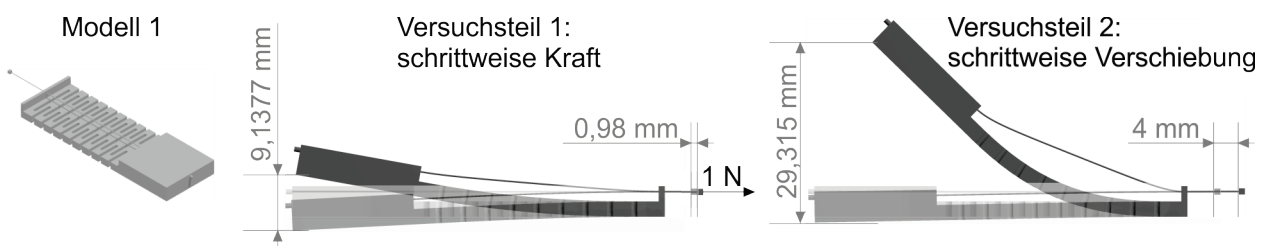


Abbildung 5.33: Ergebnisse der Simulation am Beispiel von Modell 1

	Modell 1		Modell 7		Modell 12	
Kraft [N]	1	2	0,5	1	1	2
Weg [mm]	0,9833	3,1189	1,0804	2,5742	0,4285	0,6182
Auslenkung [mm]	9,1377	25,0441	6,8400	16,6139	4,8836	6,3501
Auslenkung bei 4 mm Verschiebung [mm]	29,3146		24,9043		30,4165	

Tabelle 5.15: Ergebnisse der Simulation für die Prototypen aus ABS

Bei ABS zeigt sich, dass eine hohe Kraft aufgebracht werden muss, um die Probe zu verformen. Durch die Anpassung der Struktur ist es möglich, diese Kraft deutlich zu reduzieren und die Bewegung zu unterstützen. Insbesondere Modell 1 weist eine sehr gute

Beweglichkeit bei hoher Formstabilität auf. Modell 7 führt eine hohe Bewegung bei geringer Kraft aus, ist allerdings weniger formstabil.

	Modell 0		Modell 2		Modell 3		Modell 5	
Kraft [N]	0,5	1	0,25	0,5	0,25	0,5	0,25	0,5
Weg [mm]	0,2448	0,5412	0,8408	2,6861	0,4782	1,1702	1,0581	3,5929
Auslenkung [mm]	3,8171	6,5538	10,783	29,408	6,2241	14,511	10,292	31,715
Auslenkung bei 4 mm Verschiebung [mm]	30,9210		31,4096		31,9606		31,3112	

Tabelle 5.16: Ergebnisse der Simulation für die Prototypen aus TPE

Bei TPE wird die Verformung der Modelle sowie die Abnahme der Kraft bei zunehmender Strukturierung deutlich. Interessant ist der Vergleich von Modell 2 und 3: Durch den Mittelsteg verhält sich Modell 3 deutlich steifer und benötigt eine höhere Kraft zur Verformung. Bei 0,5 N erreicht Modell 3 die halbe Auslenkung von Modell 2, weist aber eine geringere Durchbiegung zu Beginn auf und verhält sich formstabiler. Modell 0 zeigt die Bewegung und die notwendige Kraft ohne Strukturierung.

Im Folgenden werden die Ergebnisse von Simulation und Versuchen vorgestellt. Aus der Simulation mit aufgebrachtener Kraft kann die notwendige Kraft zur Verformung der Struktur ausgelesen werden. Damit wird ermöglicht, Simulation und Versuch auf die Abbildgenauigkeit bezüglich des Wegs, der Kraft und der Auslenkung zu untersuchen. Durch die Simulation mit schrittweiser Verschiebung wird der notwendige Weg, um den der FG-Draht sich verkürzen muss, um eine gewünschte Auslenkung zu erreichen, bestimmt. Mittels der Kraftreaktion an der festen Lagerung wird die wirkende Kraft bestimmt. Des Weiteren kann der FG-Draht anhand der benötigten Kraft bezüglich seines Durchmessers oder der Anzahl der Drähte ausgelegt werden.

5.6.2 Ergebnisse der Kraftmessung

Es werden jeweils drei Proben in den Versuchen eingesetzt, um Unterschiede durch die Fertigung und Messungenauigkeiten auszugleichen. Jede Probe wird dreimal belastet, und der Mittelwert (M) gebildet, um Messungenauigkeiten weiter zu reduzieren. Die Proben werden mit derselben Kraft, mit der simuliert wird (vgl. Tabelle 5.15 und 5.16), beaufschlagt. Tabelle 5.17 zeigt die Ergebnisse des realen Versuchs (V) und der Simulation (S) bei ABS, Tabelle 5.18 bei TPE. Zur Vergleichbarkeit wird die Abweichung der Auslenkung angegeben, da der Weg, aufgrund der geringen Werte und der Art der Messung (vgl. Kapitel 5.5.2) schwer ablesbar und damit fehlerbelastet ist. Ein Vergleich von simuliertem und gemessenem Weg zur Bewertung der Simulationsgenauigkeit ist daher nicht sinnvoll. Es zeigt sich eine teilweise sehr hohe Abweichung bzgl. der Auslenkung zwischen simuliertem und ge-

messenem Modell. Daher wird eine weitere Simulation mit den nachgemessenen und angepassten Modellen (a) mit den Werten aus Tabelle 5.13 bzw. 5.14 durchgeführt.

	Kraft (S) [N]	Kraft (V) [N]	Weg (S) [mm]	Weg (V) [mm]	Auslenkung (S) [mm]	Auslenkung (V) [mm]	Abwei- chung [%]
Modell 1	2	P1: 2 P2: 2 P3: 2	3,11885	P1: 2,5 P2: 2,15 P3: 2,4	25,0441	P1: 15,1667 P2: 13,833 P3: 15,5	-
Modell 1_M	2	2	3,11885	P _M : 2,35	25,0441	P _M : 14,833	68,84
Modell 1_a	2	2	1,61659	P _M : 2,35	14,4287	P _M : 14,833	2,8
Modell 7	1	P1: 1 P2: 1 P3: 1	2,57424	P1: 1,933 P2: 1,667 P3: 1,8	16,6139	P1: 9,333 P2: 9,267 P3: 9	-
Modell 7_M	1	1	2,57424	P _M : 1,8	16,6139	P _M : 9,2	80,58
Modell 7_a	1	1	1,46402	P _M : 1,8	9,5529	P _M : 9,2	3,84
Modell 12	2	P1: 2 P2: 2 P3: 2	1,0782	P1: 1,7 P2: 1,567 P3: 1,5	11,4445	P1: 6,267 P2: 6,167 P3: 6,6	-
Modell 12_M	2	2	1,0782	P _M : 1,589	11,4445	P _M : 6,345	80,37
Modell 12_a	2	2	0,61817	P _M : 1,589	6,35013	P _M : 6,345	0,08

Tabelle 5.17: Messwerte von Versuch (V) und Simulation (S) der ABS-Prototypen

Eine Analyse von Tabelle 5.17 zeigt, dass der Weg und vor allem die Auslenkung bei Simulation und Messung bei den Ursprungsmodellen eine sehr hohe Abweichung aufweist. Ein Vergleich mit dem angepassten Modell (a) zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der Auslenkung, die bei allen Modellen unter 4 % liegt. Allerdings wird trotz Anpassung eine teilweise starke Abweichung beim Weg festgestellt (vgl. z. B. Modell 12).

	Kraft (S) [N]	Kraft (V) [N]	Weg (S) [mm]	Weg (V) [mm]	Auslenkung (S) [mm]	Auslenkung (V) [mm]	Abwei- chung [%]
Modell 0	1	P1: 1 P2: 1 P3: 1	0,5412	P1: 1,133 P2: 1,1 P3: 1,133	6,5538	P1: 7,0 P2: 6,833 P3: 6,933	-
Modell 0_M	1	1	0,5412	P _M : 1,122	6,5538	P _M : 6,922	5,62
Modell 0_a	1	1	0,60623	P _M : 1,122	7,009	P _M : 6,922	1,26
Modell 2	0,4	P1: 0,4 P2: 0,4 P3: 0,4	1,71275	P1: 1,6 P2: 1,4 P3: 1,633	20,936	P1: 18,667 P2: 17,667 P3: 18,333	-
Modell 2_M	0,4	0,4	1,71275	P _M : 1,544	20,936	P _M : 18,222	14,89
Modell 2_a	0,4	0,4	1,46882	P _M : 1,544	17,6052	P _M : 18,222	3,5
Modell 3	0,5	P1: 0,5 P2: 0,5 P3: 0,5	1,1702	P1: 1,1 P2: 1,2 P3: 1,233	14,5108	P1: 10 P2: 12 P3: 12,333	-
Modell 3_M	0,5	0,5	1,17024	P _M : 1,178	14,5108	P _M : 11,444	26,8
Modell 3_a	0,5	0,5	0,95694	P _M : 1,178	11,7004	P _M : 11,444	2,24
Modell 5	0,5	P1: 0,5 P2: 0,5 P3: 0,5	3,5929	P1: 2,55 P2: 2,3 P3: 2,1	31,715	P1: 23,25 P2: 21,333 P3: 17,5	-
Modell 5_M	0,5	0,5	3,5929	P _M : 2,317	31,715	P _M : 20,6943	37,89
Modell 5_a	0,5	0,5	1,9979	P _M : 2,317	20,2976	P _M : 20,6943	1,95

Tabelle 5.18: Messwerte von Versuch (V) und Simulation (S) der TPE-Prototypen

Tabelle 5.18 zeigt die Ergebnisse der Messung und Simulation der Proben aus TPE. Bei Modell 0 stimmen die Werte von Kraft und Auslenkung bei Realversuch und Simulation bereits beim unangepassten Modell mit einer Abweichung von 5,62 % ($\pm 0,37$ mm) sehr gut überein. Aufgrund der fehlenden Strukturierung des flexiblen Anteils sind die Abweichungen zwischen CAD-Modell und FDM-Prototyp deutlich geringer. Dennoch sinkt die Abweichung der Auslenkung beim Vergleich von angepasstem und simuliertem Modell weiter auf 1,26 %. Bei Modell 2 kann durch die Anpassung des Simulationsmodells an den FDM-Prototypen die Abweichung von 14,89 % auf 3,5 % verringert werden, bei Modell 3 von 26,8 % auf 2,24 % und bei Modell 5 von 37,89 % auf 0,338 %.

Es zeigt sich deutlich, dass je komplexer die Struktur und damit je größer die Abweichung zwischen FDM- und CAD-Modell wird, die Differenz der Auslenkung stark zunimmt. Des Weiteren ist erkennbar, dass die Abweichung der Wege bei geringen Werten wie bei Modell 0 deutlich größer ausfallen als bei größeren Stellwegen (Modell 2 und 5).

5.6.3 Diskussion der Ergebnisse der Kraftmessung

Die Ergebnisse der Kraftmessung zeigen eine Abweichung bei den Werten von Weg und Auslenkung von Simulationsmodell und FDM-Prototyp, bei identisch aufgebrachtener Kraft. Diese Abweichung wird durch die Anpassung der Abmessungen des Simulationsmodells an das gedruckte Modell vor allem im Bereich der Auslenkung deutlich verbessert.

Werden Weg und Auslenkung zwischen Ursprungs-Simulationsmodell und angepasstem Simulationsmodell unabhängig von der Kraft verglichen, so zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung, die Kurven verlaufen nahezu identisch (vgl. Abbildung A.4 und A.5). Die äquivalente Kraft fällt bei TPE und ABS im angepassten Modell höher aus, da durch die Anpassung der Strukturen die notwendige Kraft zur Verformung steigt. Eine Ausnahme bildet Modell 0. Aufgrund der fehlenden Strukturierung verhält sich das angepasste Modell durch die etwas geringeren Hauptabmessungen, nachgiebiger. Insgesamt ergibt sich, dass das Verhältnis von Weg und Auslenkung innerhalb der Modellgruppe nur gering von leichten Geometrie-Anpassungen abhängt. Die Kraft im Gegenzug weist eine sehr starke Abhängigkeit auf.

Durch das FDM-Verfahren entstehen Abweichungen im Bereich der Abmessungen von gedrucktem Modell und CAD-Modell, vor allem bei feinen Strukturierungen. Dies ist durch das FDM-Verfahren im Allgemeinen (Maßhaltigkeit, vgl. Kapitel 5.2), aber auch durch den verwendeten FDM-Drucker, die eingestellten Parameter und das Material begründet. Bei den angepassten Modellen aus TPE sind die Maße von Länge, Breite und Höhe etwas

geringer als die CAD-Maße. Die Strukturierungen fallen allerdings schmaler aus, d. h. an diesen Stellen wird mehr Material aufgetragen. Die Geometrieabweichungen, die daraus entstehen, haben einen hohen Einfluss auf die Abhängigkeit zwischen Kraft und Auslenkung bzw. Weg. Die Kraft wird durch die Anpassung der Geometrie stark beeinflusst und fällt höher aus. Eine Verringerung der Abmessungen der Aussparungen in den Modellen führt zu einer starken Zunahme der Kraft bei gleicher Auslenkung (vgl. Abbildung A.4 und A.5).

Die Veränderung der Struktur durch den Druck hat auch zur Folge, dass sich das Gewicht von angepasstem und nicht angepasstem Modell unterscheidet. Durch die Abweichung der Hauptabmessungen, z. B. Verringerung der Strukturierung (\cong mehr Material) erhöht sich das Gewicht der angepassten Modelle im Vergleich zu den nicht angepassten in der Simulation um 1,8 % bei TPE und 4,2 % bei ABS. Davon ausgenommen ist Modell 0, da das angepasste Modell durch die fehlende Struktur und die geringere Gesamtlänge um 0,84 % leichter ist. Auch nach der Anpassung unterscheidet sich das Gewicht der realen Modelle zu den angepassten in der Simulation. Bei TPE sind die angepassten Modelle in der Simulation im Mittel 1,2 % leichter als die realen Prototypen, bei ABS um etwa 3,7 % leichter, was einen Einfluss auf die erforderliche Kraft aufgrund der veränderten Gewichtskraft haben kann. Allerdings sind die Abweichungen sehr gering und werden daher nicht in der Simulation korrigiert.

Ein weiterer Einflussparameter auf die Ergebnisse ist die Messmethode. Das Vermessen der gedruckten Modelle erweist sich durch die komplexen Strukturen und im Fall von TPE durch das nachgiebige Material als schwierig. Somit ist eine Rückführung in die Simulation mit Messfehlern behaftet. Das verwendete Kraftmessgerät weist eine Genauigkeit von $\pm 0,5$ % auf. Die Linearführung, auf der das Kraftmessgerät angebracht ist, hat leichtes Spiel ($\sim 0,2$ mm). Die Messung des Wegs erfolgt an einem Maßband und die Messung der Auslenkung wird mit Millimeterpapier vorgenommen. Die Messgenauigkeit der manuellen Messung liegt bei ca. 0,25 mm. Insgesamt treten Messungenauigkeiten von 0,25 - 0,5 mm auf. Bezogen auf eine Auslenkung von 30 mm entspricht dies einem Messfehler im Bereich 0,8 - 1,6 %. Bei kleineren Messungen, wie z. B. einer Wegmessung von 4 mm, ergeben sich im schlimmsten Fall Abweichungen von 6,25 - 12,5 %. Dies wirkt sich daher vor allem auf die Messung des Wegs aus, da die geringen Bewegungen von häufig weniger als 2 mm (vgl. Tabelle 5.17, 5.18) schwer ablesbar sind und durch das Spiel der Führungsschienen beeinflusst werden. Zusätzlich wirken sich Verformungen und Ungleichmäßigkeiten im konventionellen Draht auf die Genauigkeit der Wegmessung aus. Im Schnitt liegt die Abweichung des Wegs bei 0,28 mm bei TPE und 0,68 mm bei ABS.

Insgesamt ist bei der Messung von Kraft, Weg und Auslenkung sowie der Interpretation der Ergebnisse daher folgendes zu beachten:

- Die Geometrie von Druckmodell und Simulationsmodell weist vor allem im flexiblen Bereich bei komplexen, feinen Strukturen Abweichungen auf.
- Die Geometrieabweichungen haben großen Einfluss auf den Zusammenhang zwischen Kraft und Auslenkung bzw. Weg, nicht jedoch auf die Beziehung zwischen Auslenkung und Weg.
- Bei TPE sind die angepassten Modelle in der Simulation im Mittel um 1,2 % leichter als die realen Prototypen, bei ABS im Mittel um 3,7 %.
- Es treten Messungenauigkeiten (Messmethode, Genauigkeit Prüfstand und Kraftmessgerät, Verformungen im Draht) auf, die bei ca. 0,25 - 0,5 mm liegen. Bei kleinen Messgrößen, wie der Wegmessung ergeben sich daher Abweichungen.
- Die durchschnittliche Auslenkung der Modelle beträgt 12,335 mm. Eine Abweichung von 5 % entspricht in diesem Fall nur einer Abweichung von 0,62 mm. Dies liegt im Bereich der beschriebenen Messungenauigkeit.

Es zeigt sich, dass die Gründe für die Abweichung hauptsächlich am eingesetzten Fertigungsverfahren, den Druckparametern und der dadurch entstehenden Abweichung zwischen CAD-Modell und FDM-Prototyp liegen, aber auch eine Messungenauigkeit miteinbezogen werden muss. Wird Modell 0 (TPE) als Referenzmodell betrachtet, da es keine Struktur aufweist, die fertigungsbedingten Abweichungen damit gering ausfallen und auch die Messungenauigkeit beim Nachmessen des FDM-Prototyps durch die fehlende Struktur verringert wird, ergibt sich bereits beim nicht angepassten Modell eine gute Übereinstimmung bei den Ergebnissen von Simulationsmodell und FDM-Prototyp. Dies zeigt sich auch bei der Betrachtung des Zusammenhangs von Auslenkung und Kraft beim angepassten und nicht angepassten Modell (vgl. Abbildung A.4). Weitere Ursache des Unterschieds können auf das abweichende Gewicht und die Vereinfachung in der Simulation zurückgeführt werden.

Im Vergleich zu den anderen Modellen liegt bei Modell 0 die Abweichung zwischen Simulations- und Druckmodell bei nur 5,62 %. Die Vergleiche zeigen, dass eine zunehmende Komplexität der Struktur zu einer steigenden Abweichung führt. Hier ist die Einführung eines Komplexitätsfaktors denkbar, der anhand der Strukturierung des flexiblen Teils einen Korrekturfaktor miteinberechnet. Dadurch kann aus den Ergebnissen der Simulation auf die realen Werte geschlossen werden. Dies ist zusätzlich immer im Hinblick auf das jeweilige Fertigungsverfahren und die damit verbundene Maßhaltigkeit zu sehen.

Insgesamt wird festgestellt, dass das Referenzmodell sehr geringe Abweichungen zwischen Simulations- und Prototypenmodell aufweist. Auch bei den anderen Modellen ist die Abweichung nach der Anpassung der Modelle sehr gering. Die vorliegenden Abweichungen sind vor allem auf das Fertigungsverfahren und dessen Maßhaltigkeit sowie die Messmethode zurückzuführen.

Damit bestätigen die Ergebnisse, dass die Simulation die Bewegung der Strukturen sowie den Zusammenhang von Kraft und Auslenkung sehr gut abbildet. Daraus wird abgeleitet, dass auch der notwendige Stellweg gut abgebildet wird und dessen Abweichungen auf die Messmethode und den Prüfaufbau zurückzuführen sind. Die erzielten Ergebnisse sind für eine erste Auswahl der FG-Elemente einsetzbar. Mithilfe von den aus der Simulation gewonnenen Werten kann abgeschätzt werden, welche Strukturen sich für die Anforderungen aus der jeweiligen Anwendung eignen und wie hoch die Kraft bei einer geforderten Auslenkung ist, um damit Rückschlüsse auf den benötigten FG-Draht zu ziehen. Aus der notwendigen Kraft kann auf den Drahtdurchmesser geschlossen werden (vgl. Kapitel 4.1.2). Ist der erforderliche Durchmesser aufgrund des zu hohen benötigten Stroms zur Erwärmung nicht erreichbar, können auch Drähte parallelgeschaltet werden.

5.6.4 Ergebnisse der Messung der FG-Proben

Die drei zur Messung der Kraft eingesetzten Proben werden mit einem FG-Draht ausgestattet und die Auslenkung gemessen. Dazu wird der vorbereitete FG-Draht (vgl. Kapitel 5.5.3) eingesetzt. Dabei werden die Unterschiede in der prozentualen Dehnung der FG-Drähte bei der Zuordnung der Drähte zu den Modellen berücksichtigt. Anhand der prozentualen Dehnung und der Probenlänge (\triangleq Einspannlänge) kann der Weg, den die FGL zurücklegen, bestimmt werden. Für die Simulation wird der maximal mögliche Weg der eingesetzten FG-Drähte gewählt, der bei 5 % Dehnung (\triangleq bei einer Gesamtlänge von 80 mm Draht einem Stellweg von 4 mm) liegt. Die manuelle Vorbereitung des Drahts ergibt die aufgeführten Dehnungen. Die gemittelten Werte bei der Simulation berechnen sich durch lineare Interpolation der naheliegenden Schritte, bei den FGL anhand des Mittelwerts der drei Drähte. Zusätzlich zum ursprünglichen CAD-Modell wird auch hier das angepasste Modell (a) simuliert. Dabei wird zusätzlich die gemessene Gesamtlänge (l_{ges}) miteinbezogen, die sich durch die Drahtlänge auf den Stellweg auswirkt. Da bei der Vorbereitung des Drahts und bei der Vermessung der Einspannlänge Messungenauigkeiten auftreten, soll der Vergleich der Simulation mit dem gemittelten Wert diese ausgleichen. Tabelle 5.19 und 5.20 zeigen die gemessenen und simulierten Werte für ABS und TPE.

Es wird zunächst die Auslenkung des unangepassten und angepassten Modells bei der Simulation des maximalen Wegs angegeben (erste Zeile). Dann die Auslenkung bei mittlerem Weg (zweite Zeile). Die dritte Zeile zeigt die Auslenkung des angepassten Modells mit angepasster Gesamtlänge (l_{ges}). Durch die angepasste Gesamtlänge ändert sich der Weg, den die FGL zurücklegen können, da der eingespannte Anteil der FGL bei ABS zu- und bei TPE abnimmt (vgl. l_{ges} aus Tabelle 5.13, 5.14).

Die Messung der Auslenkung bei den realen Prototypen aus ABS weicht innerhalb der Proben um höchstens 1 mm voneinander ab. Die Abweichung zwischen simulierter und gemessener Auslenkung liegt bei Modell 1_M und 12_M bereits bei 2,44 % bzw. 5,22 % und kann durch die Anpassung der Modelle weiter auf 1,7 % bzw. 2,84 % verbessert werden. Modell 7 verhält sich bei der Abweichung sowohl beim Ursprungs- als auch beim angepassten Modell mit 7,54 % bzw. 7,93 % schlechter.

	Dehnung FGL [%]	Weg FGL [mm]	Weg (S) [mm]	Auslenkung (S) [mm]	Auslenkung (V) [mm]	Abweichung [%]
Modell 1 Modell 1_a	P1: 5,68 P2: 5,08 P3: 5,08	P1: 4,544 P2: 4,064 P3: 4,064	4,544	31,849 31,579 (a)	P1: 30 P2: 29,5 P3: 29,5	-
Modell 1_M	-	P _M : 4,224	4,224	30,391	P _M : 29,667	2,44
Modell 1_a ($l_{ges} = 80,16$)	-	P _M : 4,24	4,233	30,17	P _M : 29,667	1,7
Modell 7 Modell 7_a	P1: 5,26 P2: 5,04 P3: 5,18	P1: 4,208 P2: 4,032 P3: 4,144	4,208	25,987 25,821 (a)	P1: 28 P2: 27,5 P3: 27	-
Modell 7_M	-	P _M : 4,128	4,128	25,571	P _M : 27,5	7,54
Modell 7_a ($l_{ges} = 80,23$)	-	P _M : 4,14	4,14	25,478	P _M : 27,5	7,93
Modell 12 Modell 12_a	P1: 5,2 P2: 5,25 P3: 5,06	P1: 4,16 P2: 4,2 P3: 4,048	4,2	31,332 30,668 (a)	P1: 29,5 P2: 30 P3: 29	-
Modell 12_M	-	P _M : 4,136	4,136	31,039	P _M : 29,5	5,22
Modell 12_a ($l_{ges} = 80,10$)	-	P _M : 4,14	4,14	30,337	P _M : 29,5	2,84

Tabelle 5.19: Messwerte von Versuch (V) und Simulation (S) der ABS-FGL-Prototypen

Bei den TPE-FGL-Prototypen liegt die Abweichung zwischen simulierter und gemessener Auslenkung bei den Modellen 0_M und 2_M beim nicht angepassten Modell bereits bei 0,64 % bzw. 0,11 %. Die Anpassung führt zu einer leichten Verschlechterung der Ergebnisse, die aber dennoch bei 1,23 % bzw. 0,57 % liegen, was auf natürliche Schwankungen zurückgeführt werden kann. Bei Modell 3 findet eine leichte Verbesserung von 2,67 % auf 1,62 % statt. Modell 5_a weicht auch beim angepassten Modell um 6,09 % von der Simulation ab. Dennoch konnte eine Verbesserung um 2,11 % zum Ursprungsmodell erzielt werden.

	Dehnung FGL [%]	Weg FGL [mm]	Weg (S) [mm]	Auslenkung (S) [mm]	Auslenkung (V) [mm]	Abweichung [%]
Modell 0 Modell 0_a	P1: 5,29 P2: 5,34 P3: 4,96	P1: 4,232 P2: 4,272 P3: 3,968	4,272	32,548 32,049 (a)	P1: 31 P2: 32,5 P3: 32	-
Modell 0_M	-	P _M : 4,157	4,157	32,038	31,833	0,64
Modell 0_a (I_{ges} = 79,60)	-	P _M : 4,137	4,137	31,446	31,833	1,23
Modell 2 Modell 2_a	P1: 5,14 P2: 5,09 P3: 4,96	P1: 4,112 P2: 4,072 P3: 3,968	4,112	31,883 32,166 (a)	P1: 31,5 P2: 31,5 P3: 32	-
Modell 2_M	-	P _M : 4,051	4,051	31,627	31,667	0,11
Modell 2_a (I_{ges} = 79,82)	-	P _M : 4,042	4,042	31,847	31,667	0,57
Modell 3 Modell 3_a	P1: 4,95 P2: 5,23 P3: 5,13	P1: 3,96 P2: 4,184 P3: 4,104	4,184	32,793 32,529 (a)	P1: 34 P2: 31 P3: 29,5	-
Modell 3_M	-	P _M : 4,083	4,083	32,34	31,5	2,67
Modell 3_a (I_{ges} = 79,73)	-	P _M : 4,069	4,069	32,011	31,5	1,62
Modell 5 Modell 5_a	P1: 5,08 P2: 5,32 P3: 5,2	P1: 4,064 P2: 4,256 P3: 4,16	4,256	32,567 32,007 (a)	P1: 29,5 P2: 30 P3: 29,5	-
Modell 5_M	-	P _M : 4,16	4,16	32,101	29,667	8,2
Modell 5_a (I_{ges} = 79,64)	-	P _M : 4,141	4,141	31,475	29,667	6,09

Tabelle 5.20: Messwerte von Versuch (V) und Simulation (S) der TPE-FGL-Prototypen

5.6.5 Diskussion der Ergebnisse der Messung der FG-Proben

Die Abweichungen zwischen gemessener und simulierter Auslenkung sind bereits zu Beginn sehr gering und werden durch die Anpassung nur geringfügig verändert (bei einer gemittelten Auslenkung von 30,4 mm entspricht eine Abweichung von 5 % nur 1,5 mm). Es wird deutlich, dass sich die Auslenkungen von unangepasstem und angepasstem Modell unwesentlich unterscheiden, bei ABS im Mittel um 1,22 %, bei TPE um 1,25 %. Dies bestätigt die in Kapitel 5.6.3 abgeleitete Annahme, dass sich leichte Anpassungen der Geometrie stark auf die Kraft, aber nur geringfügig auf den Zusammenhang von Auslenkung bzw. Weg des unangepassten und angepassten Modells auswirken. Es folgt daher, dass bei komplexen Strukturen, die bereits zu Beginn eine höhere Abweichung aufweisen, trotz Anpassung eine Abweichung bestehen bleibt (vgl. Modell 5 und 7). Hier erweist sich vor allem die Rückführung der Ergebnisse in die Simulation über ein manuelles Vermessen als schwierig und die Veränderungen der Geometrie sind deutlicher ausgeprägt, aber durch die Messmethode schwer übertragbar.

Bei den Ergebnissen ist zu beachten, dass die Messung der Prototypen, wie in Kapitel 5.6.2 beschrieben, stattgefunden hat (Spiel der Führung etc.). Aufgrund der Ablese-

genauigkeit ist mit Abweichungen von etwa 0,25 - 0,5 mm zu rechnen. Zusätzlich wird die Dehnung der FGL manuell eingestellt und vermessen. Dies hat Einfluss auf den Stellweg, der in der Simulation verwendet wird.

Wie in Kapitel 5.6.3 erläutert, ist der Zusammenhang von Weg und Auslenkung abhängig von der Struktur. Die Modelle untereinander nehmen aufgrund ihrer unterschiedlichen Geometrien verschiedene Auslenkungen bei identischem Weg ein, was auf das Verhalten der Geometrien bei Belastung zurückgeführt werden kann. Dies zeigt sich bei einem Vergleich von Modell 2 und 3. Der Mittelsteg in Modell 3 verhindert ein Zusammenziehen der Geometrie bei Biegung. Das Fehlen führt bei Modell 2 dazu, dass es sich nicht ausschließlich um eine Biegung handelt, sondern die Struktur zusätzlich zusammengeschoben wird, was Auswirkungen auf die maximale Auslenkung haben kann, da der zurücklegbare Weg der FGL aufgrund der Verkürzung der Gesamtlänge des Prototyps sinkt.

Insgesamt betrachtet ist der Vergleich der Werte sehr gut zu bewerten. Bereits die nicht angepassten Modelle weisen eine sehr gute Übereinstimmung auf und bieten eine optimale Grundlage zur Abschätzung von Bewegungsverlauf und Auslenkungsgröße in Abhängigkeit von der Dehnung bzw. Bewegungslänge des FG-Elements. Die notwendige Kraft zur Verformung kann als Reaktionskraft aus der festen Anbindung ausgegeben werden (vgl. Kapitel 5.6.1) und zur Auslegung von FG-Element und Struktur eingesetzt werden.

5.6.6 Gesamtheitliche Ergebnisbetrachtung

Gesamtheitlich wird festgestellt, dass durch den Vergleich der Simulation mit den realen Prototypen die Ergebnisse aus der Simulation bestätigt werden. Speziell beim Referenzmodell ohne Strukturierung (Modell 0), zeigt sich bereits ohne Anpassung eine sehr gute Übereinstimmung von Simulation und Versuch, sowohl bei der Kraftmessung (vgl. Kapitel 5.6.2) als auch bei der Messung der FG-Proben (vgl. Kapitel 5.6.4). Durch die geringen Auswirkungen leichter Geometrieanpassungen auf den Zusammenhang zwischen Auslenkung und Weg können Rückschlüsse zur Bewegung der ASS und dem dafür notwendigen Stellweg ($\hat{=}$ Dehnung FGL) gezogen werden. Die Anpassung der CAD-Modelle ermöglicht es, die zur Bewegung notwendige Kraft zu ermitteln. Durch das Vermessen der gedruckten Proben und die Anpassung der Simulation konnten sehr gute Übereinstimmungen, auch bei den Modellen mit starker Strukturierung erzielt werden. Allerdings sind das Vermessen der Proben und die erneute Simulation mit erhöhtem Aufwand verbunden. Die Kraft in der Simulation über die schrittweise Kraft (voreingestellte Kraft in der Simulation, Versuchsteil 1) weicht von der Kraft in der Simulation über die schrittweise Ver-

schiebung (Reaktionskraft aus der festen Einspannung, Versuchsteil 2) ab, da durch die Verbindung von passiver und aktiver Struktur eine feste Länge des eingelegten Drahts vorgegeben ist (vgl. Abbildung A.4 und A.5). Dadurch kann sich die passive Struktur in ihrer Ausgangslage im Prüfstand nicht mehr vollständig in die zuvor, bei freier Bewegung mögliche, Ausgangslage bewegen. Das heißt, dass die durch die Gewichtskraft hervorgerufene Bewegung zu Beginn ($\hat{=}$ einer Auslenkung nach unten) nicht vollständig ausgeführt werden kann. Es ergibt sich somit eine bereits in der Null-Lage wirkende Kraft in Draht und Einspannung. Zur Auslegung der FG-Elemente bezüglich der notwendigen Kraft zur Verformung ist daher die jeweilige Einbausituation ausschlaggebend.

Es ist festzuhalten, dass sich das Fertigungsverfahren stark auf die Qualität der Vorhersagen auswirkt. Je geringer die Abweichungen zwischen CAD-Modell (und damit Simulationsmodell) und dem realen Prototyp sind, desto besser sind die Werte der Simulation übertragbar und nutzbar. Das FDM-Verfahren mit der eingesetzten Hardware hat trotz der vielen Vorteile damit Nachteile bezüglich Genauigkeit und Reproduzierbarkeit, die sich stark auf die Qualität der Vorhersagen der Simulation auswirken.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Anpassung bei Modellen mit starker Strukturierung des flexiblen Anteils zu einer Abnahme der Abweichungen führt. Der Aufwand der Anpassung kann durch die Einführung eines Komplexitätsfaktors ausgeglichen werden, der in die Berechnung der Ergebnisse einfließt, und feine, komplexe Strukturen berücksichtigt.

Mit der vorliegenden Simulation können daher Rückschlüsse zu Bewegungsparametern und zu auf die passive Struktur wirkenden Kräfte gezogen werden. Bezüglich der aktiven Struktur ermöglicht die Simulation eine Auslegung der notwendigen aufzubringenden Kraft bzw. des Wegs. Die Auslegung von aktiver und passiver Struktur wird dadurch erheblich erleichtert und es kann eine effiziente Entwicklung von ASS ermöglicht werden.

5.7 Sekundäre Parameter aus den Versuchen

Aus den vorhergehenden Kapiteln werden zusammenfassend sekundäre Parameter abgeleitet (Tabelle 5.21), die sich zusätzlich zu den primären Parametern (Kapitel 4.3) aus den Erkenntnissen der durchgeführten Versuche ergeben und diese ergänzen. Als Basis dienen die Hauptparameter aus Tabelle 4.10, erweitert durch die Randbedingungen zur Erfüllung der Funktionsweise aus Kapitel 4.3.4. Die Anwendung wurde in den Versuchen zunächst nicht betrachtet, da die Untersuchung grundlegender Struktur-Prototypen stattfand. Daher wird im Folgenden nur die Beschreibung der Parameter der aktiven und passiven Struktur erweitert. Die Betrachtung einer Anwendung findet in Kapitel 6.4 statt.

		Aktive Struktur	Passive Struktur
Geometrie	Form, Abmessungen	Draht-Form <ul style="list-style-type: none"> • Vordehnung der FGL • zusätzliche Länge zur Vorbereitung notwendig 	flexible Struktur <ul style="list-style-type: none"> • ungewünschte Bewegung vermeiden, z. B. bei Biegung keine zusätzliche Translation durch optimierte Struktur • Genauigkeit des Fertigungsverfahrens
	Auslegung und Anordnung	Anordnung abhängig von <ul style="list-style-type: none"> • der gewünschten Bewegung • Fertigungsverfahren Auslegung <ul style="list-style-type: none"> • nach Ergebnissen aus Simulation bzgl. Kraft und Stellweg Zusammenhang zwischen Weg a_S & Auslenkung p_S stabil gegenüber leichten Geometrieänderungen	Simulation <ul style="list-style-type: none"> • liefert Bewegungsablauf, auftretende Spannungen, Kräfte und Auslenkung • zur Vorauslegung komplexer Geometrien, deren Verhalten analytisch teilweise nicht lösbar ist
Zeit	Aktivierungs- und Deaktivierungszeit	Aktivierungs- & Deaktivierungszeit <ul style="list-style-type: none"> • nehmen zu, da sich Aktivierungstemperatur durch wirkende Kraft um ca. 20 °C erhöht 	<ul style="list-style-type: none"> • ungewünschte Bewegung (s. o.) und Durchbiegung zu Beginn führen zu Verzögerung bei Bewegungszeit
	Lebensdauer	<ul style="list-style-type: none"> • Überhitzung durch Steuerung über Strom vermeiden • sukzessive Vordehnung auf die vorgegebene mögl. Dehnung • zusätzliche Kraft dehnt FGL → durch Auslegung vermeiden 	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Temperaturresistenz notwendig • bei flächigen Gelenken Materialparameter bzgl. zulässiger Dehnungen beachten
Bewegung	Länge	<ul style="list-style-type: none"> • ergibt sich aus eingespannter Drahtlänge und Vordehnung • Umsetzung stark abhängig von der Verbindung mit der p_S 	<ul style="list-style-type: none"> • Auslenkung ergibt sich aus Simulation • Verformung durch Gewichtskraft zu Beginn der Bewegung (Durchbiegung)
	Richtung	<ul style="list-style-type: none"> • Translation durch Kontraktion • Umwandlung der Translation durch Positionierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Umwandlung der Richtung durch Verbindung, Positionierung und Auslegung a_S und p_S
	Verhalten	<ul style="list-style-type: none"> • ohne Zwischenpositionen, nur Beginn- & Endposition untersucht 	
phys. Eigensch.	Material	<ul style="list-style-type: none"> • mögliche Dehnung liegt bei ca. 5 % 	<ul style="list-style-type: none"> • bei Kraft- und Wärmeeinwirkung gibt Material nach, verformt sich dauerhaft • Bestimmung des Gewichts abh. von Fertigungsverfahren
Energie	Art der Aktivierung & Deaktivierung	Joulische Erwärmung <ul style="list-style-type: none"> • sehr gut einstell- und regelbar • einfache Verbindung mit a_S 	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmeleitkoeffizient Material • konstruktiv (weite Teile der FGL außerhalb der p_S) über Abgabe der Wärme an Umgebungsmedium
	Temperatur	Aktivierungstemperatur <ul style="list-style-type: none"> • schränkt Materialauswahl für passive Struktur stark ein • belastungsabhängig bei 70 - 105 °C 	<ul style="list-style-type: none"> • starke Erwärmung durch FGL an Belastungsstellen → Ausgleich durch Wärmeableitung, Verteilung Wärme • hohe Temperaturresistenz notwendig, oder FGL mit niedriger Aktivierungstemperatur (Nachteil: ungewünschte Aktivierung)
BB und SE	Art und Anforderungen	Betätigung und Benutzung (BB) <ul style="list-style-type: none"> • a_S erwärmt sich stark und gibt Wärme an p_S ab → Übertragung an Nutzer • a_S direkt mit p_S verbunden → Übertragung der Kräfte bei Betätigung Sichtbarkeit und Erkennbarkeit (SE) <ul style="list-style-type: none"> • FGL außerhalb der p_S zur Kühlung → Sichtbarkeit der FGL 	

Tabelle 5.21: Sekundäre Parameter aus den Versuchen (Teil 1/2)

		Aktive Struktur	Passive Struktur
Kraft	Größe, Gewicht, Richtung	<p>Gewichtskraft der pS</p> <ul style="list-style-type: none"> kann je nach Belastungsfall und Anbindung an das System bereits zu Beginn auf den Draht wirken → Vorspannung kann zu Kraft entgegen der Bewegung führen z. B. Durchbiegung erhöht die Aktivierungstemperatur der aS <p>Kraft der aS</p> <ul style="list-style-type: none"> kann zu Beschädigung der Struktur führen, Einschneiden, Erwärmung etc. muss pS verformen können → Drahtdurchmesser, Parallelschaltung bei Verbindung von aS und pS: starker Zusammenhang zw. Kraft & Auslenkung bei leichten Geometrieanpassungen 	
Verbindung / Anbindung	Art und Anforderungen	<p>hohe Kräfte in unterschiedliche Richtungen, hohe Temperaturunterschiede, thermische Beanspruchung</p> <ul style="list-style-type: none"> Kleben ungeeignet, da möglichst nur auf Schub oder Druck beansprucht, flächige Verbindungen mit Überlappung der Fügeteile bevorzugt, geringere Wärmefestigkeit, Vermeidung von Schäl- und Biegebeanspruchung Verschweißen von Kunststoff und FGL sehr aufwändig, durch untersch. Schmelztemp usw. tw. nicht möglich, Eingießen und Formschluss möglich Schrauben, Klemmen eignet sich sehr gut, da einstellbar, wieder lösbar, nachjustierbar; Crimpverbindung sehr leicht, allerdings nicht lösbar, dadurch schwer die FGL in die pS einzuspannen und nachzujustieren Bereich zur Befestigung & elektrischen Kontaktierung 	
Führung / Integration	Art und Anforderungen	<p>innerhalb und außerhalb der passiven Struktur</p> <ul style="list-style-type: none"> innerhalb mit Führung (z. B. Messingrohr) zur Verteilung von Wärme und Kraft sowie zur Minimierung der Reibung außerhalb zur schnelleren Abkühlung, je nach Bewegung bessere Kraft- & Stellwegnutzung, geringere notw. Kontraktion, Bewegungsumsetzung 	
Rückstellung	Art und Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> präzise Rückstellung für reproduzierbare Ergebnisse notwendig feste, formstabile Strukturen zeigen sehr gute Rückstellung bei Rückstellung über Struktur kann die Kraft bei Rückbewegung aus der Simulation ausgelesen und mit der Kraft, die zur Dehnung des Drahts notwendig ist, abgestimmt werden jede zusätzliche Kraft verringert die nutzbare Kraft der FGL und erhöht die Aktivierungstemperatur 	
Zu- & Abführung Wärme	Art und Anforderungen	<p>konstruktive Wärmezufuhr und -abfuhr</p> <ul style="list-style-type: none"> Struktur kann sich schneller zurückverformen Positionierung der aS außerhalb der pS kein Wärmestau, Schutz der pS <p>Wärmeleitkoeffizient</p> <ul style="list-style-type: none"> hoher Wärmeleitkoeffizient des Materials der pS 	
Regelung	Art und Anforderungen	<p>Ansteuerung der Prototypen über Labornetzteil</p> <ul style="list-style-type: none"> definierte el. Ansteuerung über Steuerung des Stroms → aS nicht überhitzen Positions- und Lageregelung über Steuerung des Stroms Erstellung Widerstandsdiagramm über Stellweg zur Regelung möglich 	
Anbindung System	Art und Anforderungen	<p>für Prototypen eignet sich die Anbindung mittels Probenaufnahme</p> <ul style="list-style-type: none"> keine ungewünschte Bewegung zulassen, aber freie Bewegung ermöglichen Erwärmung standhalten Kontaktierung ermöglichen 	
Energiespeicher	Art und Anforderungen	<p>für Prototypen eignet sich die Nutzung eines Labornetzteils</p> <ul style="list-style-type: none"> Strom zur Regelung sehr gut für die unterschiedlichen Modelle einstellbar Spannung und Widerstand direkt ablesbar im Allgemeinen geringer Energieverbrauch: (eingesetzter Draht ~ 1,15 A für 1 s Kontraktion, ~ 4,9 V) 	

Tabelle 5.21: Sekundäre Parameter aus den Versuchen (Teil 2/2)

6 Richtlinien zum Entwurf adaptiver Strukturen und Systeme

Basierend auf den theoretischen Erkenntnissen aus dem Stand der Technik und Forschung, der Generierung des Aufbaus adaptiver Strukturen und Systeme im Allgemeinen und speziell den Parametern zur Entwicklung sowie den praktischen Ergebnissen aus Simulation und Prototypenversuchen werden Richtlinien für die Entwicklung und Auslegung von ASS mit FGL im Allgemeinen sowie speziell im Bereich der MMS abgeleitet. Dazu werden ASS zunächst im Gesamtsystemkontext dargestellt und die einzelnen Interaktionen aufgezeigt. Anhand der Funktionsstruktur wird ein Überblick über die innerhalb des Systems auftretenden Zustandsänderungen gegeben. Im Folgenden werden die Interaktionen zwischen aktiver und passiver Struktur in Form von Richtlinien dargestellt. Des Weiteren werden wichtige Randbedingungen, die in den Struktur-Prototypen nicht ausführlich untersucht wurden, genauer betrachtet. Die Richtlinien werden in Kapitel 6.4 auf eine Anwendung übertragen und beispielhaft erläutert sowie prototypisch umgesetzt.

6.1 Eingliederung von ASS in den Gesamtsystemkontext

Basierend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Kapitel werden die Interaktionen zwischen ASS sowie den umgebenden Faktoren gesamtheitlich dargestellt und an einem Beispiel erläutert. Abbildung 6.1 zeigt die Einflüsse auf ASS. Von außen wirken drei grundlegende Faktoren auf ASS: externe Einflüsse, Randbedingungen und der Nutzer.

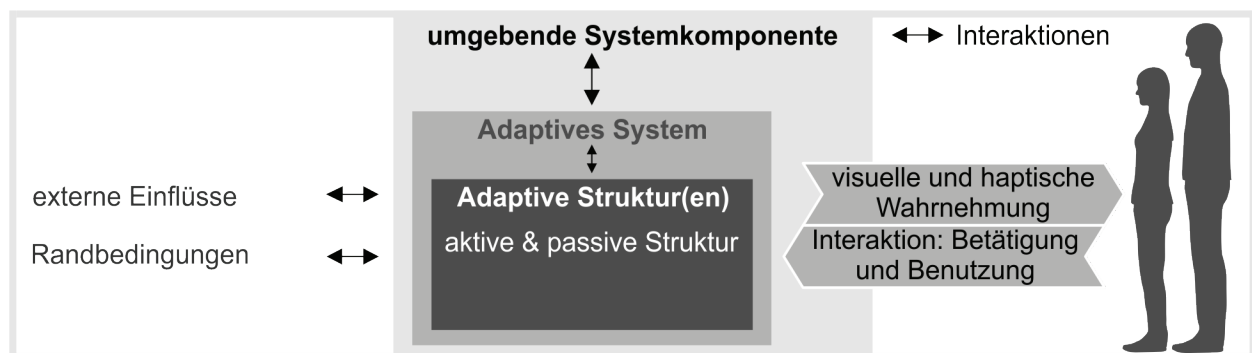


Abbildung 6.1: Einordnung von ASS im Bereich der MMS in den Gesamtsystemkontext

Die externen Einflüsse teilen sich in umweltbedingte und system-/anwendungsbedingte Faktoren auf. Die externen Einflüsse der Umwelt sind hauptsächlich Veränderungen der Umgebungsbedingungen wie der Temperatur, die des Systems / der Anwendung umfassen z. B. den vorgegebenen Bauraum und die ertragbare Temperatur weiterer Komponenten.

Die Randbedingungen folgen aus der eingesetzten Technik und umschließen Anforderungen der aktiven und passiven Struktur sowie der eingesetzten Fertigungs- und Montageverfahren. Bei der aktiven Struktur umfassen sie z. B. die zur Aktivierung benötigte Energie,

maximal mögliche Dehnung und ertragbare Spannung. Ebenso haben Aktivierungs- und Deaktivierungszeit Einfluss auf das Systemverhalten. Hinsichtlich der passiven Struktur sind ertragbare Temperatur, maximal mögliche Spannungen und Dehnung sowie das eingesetzte Fertigungsverfahren und die daraus resultierenden Anforderungen zu beachten.

Im Bereich des Technischen Designs findet eine Interaktion zwischen Nutzer und System statt, die in Form von Anzeigen oder Stellaufgaben auftritt. Dadurch entsteht eine Interaktion durch Wahrnehmung und Erkennung sowie durch Betätigung und Benutzung. Innerhalb der direkt betätigten MMS ist es notwendig, die durch den Nutzer zusätzlich aufgebrauchte Kraft zu beachten und damit eine mögliche Schädigung der adaptiven Struktur zu verhindern. Zur Auslegung der passenden Struktur, muss die Betätigungsart definiert werden, da sie die aufgebrauchte Kraft (z. B. Griff: Zug, Tasten: Druck) beeinflusst. Durch die Verbindung mit dem Nutzer existieren spezielle Anforderungen, wie z. B. die maximale Bedientemperatur des Systems, eine anthropomorphe Formgebung, die Bedienkraft, der Nutzungskomfort sowie die Sichtbarkeit und Erkennbarkeit. Die Verbindung zum Nutzer von Seiten des Systems findet über eine Bewegung und Anpassung statt. Bezüglich der Auslegung des adaptiven Systems müssen das System selbst sowie die adaptive Struktur berücksichtigt werden. So ist beispielsweise die Art der Bewegung zu spezifizieren, da die Bewegung der aktiven Struktur in die gewünschte Bewegung des Systems umgesetzt werden muss. Aufbau und Form der passiven Struktur sind daher entsprechend auszulegen (Unterstützung der Deformation der passiven Struktur, z. B. mittels niedriger Biegesteifigkeit). Die benötigten Zustände müssen optimal für eine komfortable, zuverlässige und genaue Bedienung ausgelegt werden. Da es einen direkten Kontakt zwischen adaptivem System bzw. adaptiver Struktur und dem Nutzer gibt, sind auch ästhetische Aspekte und Individualisierung wichtig.

Die umgebende Systemkomponente interagiert mit dem adaptiven System über die Verbindung der einzelnen Teilkomponenten. Die Interaktion besteht vor allem über die Anbindung. Hier sind gegenseitige Einflüsse wie Temperatur und Belastung von Bedeutung. Das adaptive System besteht aus mindestens einer adaptiven Struktur und weiteren z. B. adaptiven oder passiven Strukturen. Das adaptive System verbindet die einzelnen Strukturen zu einem funktionsfähigen Gesamtmodul. Die Interaktion findet über die Verbindung statt, aber auch Temperaturen, Führungen und Belastungen spielen eine Rolle.

Die adaptive Struktur selbst besteht aus der aktiven und der passiven Struktur. Die Auslegung sowie gegenseitige Einflüsse sind Kern dieser Arbeit und wurden in Kapitel 4 und 5 ausführlich untersucht und dargestellt.

Zur Verdeutlichung wird das Zusammenspiel der Verbindungen am Beispiel eines Fahrzeugtürgriffs gezeigt (Abbildung 6.2, vgl. auch Kapitel 6.4).

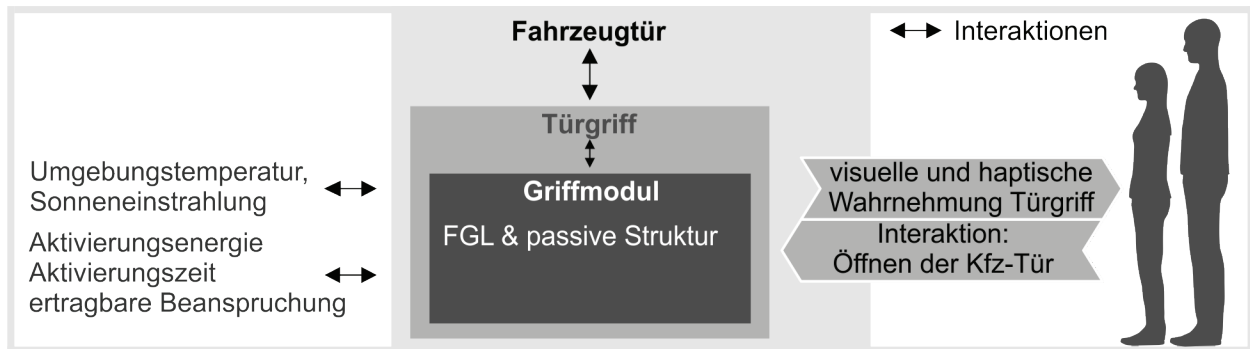


Abbildung 6.2: Darstellung von ASS am Beispiel eines Kfz-Türgriffs

ASS interagieren hauptsächlich über ihre mechanische Verbindung. Das umgebende System stellt die gesamte Fahrzeugtüre dar. Das adaptive System ist der komplette Türgriff (inkl. Anbindung, Schloss u. a.) und das Griffmodul stellt die adaptive Struktur dar. Zwischen umgebendem und adaptivem System findet eine Interaktion über die Verbindung zwischen Tür und Griff statt. Das Grundmaterial des umgebenden Systems muss Temperatur und Spannung des adaptiven Systems ertragen. Innerhalb der adaptiven Struktur setzt die Verbindung zwischen passiver und aktiver Struktur die Bewegung zum Öffnen der Tür um. Der Nutzer und die adaptive Struktur interagieren beispielsweise über die Parameter Temperatur und Form. Die tolerierbare Temperatur des Nutzers entspricht nicht unbedingt der benötigten Temperatur der aktiven Struktur (FGL). Daher muss eine entsprechende Auslegung die Differenz ausgleichen können. Eine anthropomorphe Formgebung ist für den Nutzer zur Bedienung wichtig. Die Form muss für unterschiedliche Nutzer ausgelegt werden. Der Türgriff ist als solcher erkennbar zu gestalten, wenn ein Öffnen der Tür möglich ist. Eine Interaktion findet daher auch über die visuelle und haptische Wahrnehmung statt. Von außen wirken die äußeren Einflüsse wie beispielsweise die Umgebungstemperatur oder auch direkte Sonneneinstrahlung auf das adaptive System ein. Es ist zu vermeiden, dass es dadurch zu einer Fehlauflösung kommt. Auch die Randbedingungen der eingesetzten Technik sind zu beachten: Durch den Einsatz von FGL wird die zur Aktivierung benötigte Energie sowie die Aktivierungszeit bestimmt. Die Aktivierungs- und Deaktivierungszeit kann durch den Einsatz entsprechender Materialien oder die konstruktive Auslegung der passiven Struktur beeinflusst werden.

Eine Übersicht über weitere, spezielle Anforderungen sowie ein Überblick über eine mögliche Umsetzung eines adaptiven Fahrzeugtürgriffs wird in Kapitel 6.4 gegeben.

6.2 Funktionsstruktur

Die Funktionsstruktur gibt einen Überblick über die innerhalb des Systems auftretenden Zustandsänderungen von Energie und Information [ROTH 2000, S. 81]. Abbildung 6.3 zeigt eine vereinfachte Funktionsstruktur für ASS mit FGL. Die dem System zugeführte elektrische Energie wird über das Stromwärmegesetz in thermische Energie umgewandelt und erhitzt die FGL. Durch die Erwärmung tritt der Phasenübergang von Martensit zu Austenit ein und die FGL verändert ihre Länge (Kontraktion). Dadurch wird die zugeführte thermische Energie in mechanische Energie umgewandelt. Diese kann auf drei Wegen weitergeleitet werden. Zum einen ist eine Leitung direkt über die pS möglich. Die Bewegung der FGL wird dabei unverändert in eine Bewegung des Systems umgesetzt. Im zweiten Fall wird die Bewegung der aS durch konstruktive Auslegung der pS umgeformt. So kann z. B. die lineare Bewegung eines FG-Drahts in eine rotatorische Bewegung des Systems umgewandelt oder verstärkt werden. Ein Teil der mechanischen Energie wird im dritten Fall an ein Rückstellelement weitergeleitet und in potenzielle Energie umgewandelt und gespeichert. Wird diese zur Rückstellung benötigt, kann sie im zweiten Bewegungsschritt (Rückstellung) freigegeben, gewandelt und / oder umgeformt werden, um das System in der Rückwärtsbewegung zu unterstützen und die Ausgangslage wiederherzustellen.

Der Informationsfluss im System findet über das Umformen von Eingangs- in relevante Ausgangsgrößen statt. ASS wird zur Umwandlung ein Strom I zugeführt (vgl. Kapitel 5.1). Durch den spezifischen Widerstand R der FGL ergibt sich die Spannung U . Bei der Phasenumwandlung nimmt der Widerstand ab. Dies kann zur Positionsbestimmung genutzt werden.

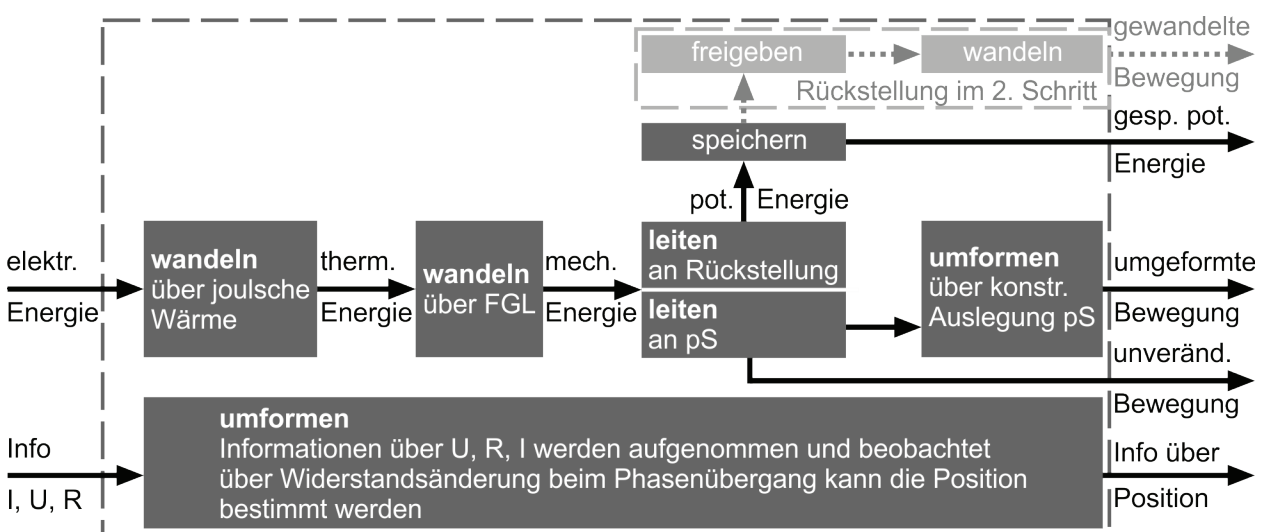


Abbildung 6.3: Funktionsstruktur für adaptive Strukturen und Systeme

Mithilfe der System- und Funktionsbeschreibung werden für ASS im Folgenden Richtlinien aufgestellt und Empfehlungen ausgesprochen, um einen Entwurf zu erleichtern.

6.3 Richtlinien

Aus den Erkenntnissen der Kapitel 2, 3 und 4 sowie den Ergebnissen aus Kapitel 5 werden Richtlinien zum Entwurf adaptiver Strukturen und Systeme aufgestellt. Die Grundlage bilden die in Kapitel 4.3 abgeleiteten Parameter, die mit den Ergebnissen der Prototypen und der Simulation vervollständigt und bestätigt werden. Tabelle 6.1 zeigt die Richtlinien aufgeteilt in aktive und passive Struktur sowie die abgeleiteten Empfehlungen.

		Aktive Struktur	Passive Struktur
Geometrie	Grundgestalt (Tragwerk und Aufbau)	<ul style="list-style-type: none"> • Draht (4.1.2, 5.7) • Feder • Blech 	<ul style="list-style-type: none"> • Tragwerksgestalt stabförmig oder flächenförmig (2.2.1.1) • bewegl. Tragwerk (2.2.1.2, 4.1.1)
	Material	<ul style="list-style-type: none"> • smarte Materialien (2.4) • speziell FGL (2.5) 	Auswahl durch Anforderungen: <ul style="list-style-type: none"> • Materialauswahl aktive Struktur • Ergonomie (2.1) • Anwendung (3.2) • Fertigungsart (5.2)
	Anordnung und Auslegung	<ul style="list-style-type: none"> • Materialauswahl • Parameter (4.3) • Bewegung (4.2.4) • Simulation (5) 	<ul style="list-style-type: none"> • Materialauswahl • Ergonomie (2.1) • Parameter (4.3) • Simulation (5) • zusätzliche Komponenten
	Empfehlung	Die Grundgestalt der aktiven Struktur als Draht eignet sich sehr gut, da sich die Wärme über den Querschnitt gleichmäßig verteilt und eine Wärmeabfuhr schnell stattfinden kann. Außerdem ist bei der Verbindung von aktiver und passiver Struktur ein einfacher Querschnitt zu bevorzugen. Bei beweglichen Tragwerken haben sich die flächenförmigen Festkörpergelenke als vorteilhaft erwiesen. Als Material für die aktive Struktur empfiehlt es sich aufgrund der Vorteile in Bezug auf Stellweg, Energiebedarf und Kraft FGL einzusetzen. Das Material der passiven Struktur ist entsprechend den Anforderungen aus Ergonomie, Anwendung und Fertigungsverfahren zu wählen. Die Auslegung von aktiver und passiver Struktur hängt zunächst von der Materialauswahl ab. Folgend sind die Abhängigkeiten durch die definierten Parameter zu untersuchen und mit einer Simulation zu überprüfen.	
Zeit	Bewegungsgeschwindigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • FGL: 0 - 20 Hz (2.4.2.1) • smarte Materialien (2.4.2) 	<ul style="list-style-type: none"> • Verzögerung, Rückstellkomponenten etc. (5.7)
	Aktivierungs- und Deaktivierungszeit	<ul style="list-style-type: none"> • siehe Bewegungsgeschw. • schnellere Deaktivierung durch zusätzliche Kühlung 	<ul style="list-style-type: none"> • Vorsehen von konstruktiver Wärmezufuhr und -abfuhr
	Lebensdauer	<ul style="list-style-type: none"> • FGL: < 100.000 Zyklen (2.4.2.1) • smarte Materialien (2.4.2) 	<ul style="list-style-type: none"> • Materialauswahl
	Empfehlung	FGL eignen sich aufgrund ihrer Frequenz nicht ohne zusätzliche Elemente für Hochgeschwindigkeitsanwendungen. Um die Wiederholungsfrequenz zu steigern, kann durch externe Kühlung und konstruktive Wärmeabfuhr die Deaktivierungszeit verkürzt werden. Bei der passiven Struktur ist im Bereich der Auslegung zu beachten, dass der Einsatz von Rückstellkomponenten den Bewegungsablauf und die Bewegungsgeschwindigkeit verändern kann. Die Zyklenanzahl von FGL dient der Berechnung der Lebensdauer in der Anwendung, die abhängig von der Wiederholung der Bewegung ist. Die Anzahl der Zyklen kann durch eine hohe Dehnung der FGL und der passiven Struktur (v. a. bei Festkörpergelenken, Ermüdung) stark eingeschränkt werden. Aus der Zyklenanzahl ist die Häufigkeit der Bedienung / Bewegung abzuleiten.	

Tabelle 6.1: Richtlinien für den Entwurf adaptiver Strukturen und Systeme (Teil 1/4)

		Aktive Struktur	Passive Struktur
Bewegung	Länge	<ul style="list-style-type: none"> Produkt aus Drahtlänge und maximaler Vordehnung ($l_0 * \epsilon$) mit $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \approx 5 \dots 8 \%$ und $\Delta l = \text{reversible Längenänderung}$ $l_0 = \text{Ausgangslänge Draht}$ 	<ul style="list-style-type: none"> bei komplexen Strukturen / Bewegungen aus Simulation (5.6) analytische Lösung (2.6.1)
	Richtung	<ul style="list-style-type: none"> Formgedächtniseffekt (Einweg, Zweiweg, Pseudoelastizität) (2.5.2) 	<ul style="list-style-type: none"> aus Simulation (5.6) aus Verbindung von aS und pS (Positionierung) (4.2.3)
	Art / Verhalten	<ul style="list-style-type: none"> einstufig (Beginn- & Endposition) (4.2.4, 5.7) mehrstufig (Zwischenpositionen) (4.2.4) 	
	Position & Lage	<ul style="list-style-type: none"> über Energiezufuhr (2.3.3) 	<ul style="list-style-type: none"> mech. Feststellung, Bremse
	Empfehlung	<p>Die Bewegungslänge ergibt sich bei FGL aus dem Produkt von Drahtlänge und gewählter Vordehnung. Dabei ist zu beachten, dass sich der Draht nicht nur plastisch-reversibel, sondern auch elastisch und damit direkt reversibel verhält. Die Bewegungslänge der passiven Struktur entsteht durch die Übertragung der Drahtbewegung. Sie kann in einfachen Fällen analytisch oder in komplexen Fällen über die Simulation bestimmt werden. Die Bewegungsrichtung des FG-Elements ergibt sich durch die Wahl des FG-Effekts. Technisch relevant ist der zyklische Einwegeffekt, die Bewegung des Drahts ist damit eine Kontraktion (translatorisch). Über die Verbindung von aktiver und passiver Struktur, bzw. der Positionierung der aktiven in der passiven Struktur wird die Bewegungsrichtung der passiven Struktur festgelegt. Der Bewegungsablauf kann aus mehreren Zwischenschritten oder der Anfangs- und Endposition bestehen, wobei die Zwischenpositionen bevorzugt mechanisch über die passive Struktur zu gewährleisten sind.</p>	
Energie	Erwärmungsart & Energieverbrauch	<ul style="list-style-type: none"> passiv über Umgebungstemperatur (Luft, Wasser, Öl) aktiv über Heizelemente, induktive oder Joulesche Erwärmung geringer Energieverbrauch (5.7) 	<ul style="list-style-type: none"> Wärmeleitkoeffizient Material (5.7)
	Regelung	<ul style="list-style-type: none"> Regelung ASS (2.3.3) über Steuerung des Stroms (5.7) Prototypen (5.1, 5.7) 	
	Temperatur	<p>Einsatztemperatur</p> <ul style="list-style-type: none"> abh. von Anwendung (3.2) beeinflusst Aktivierung, Deaktivierung, Materialauswahl <p>Aktivierungstemperatur FGL</p> <ul style="list-style-type: none"> typisch: 60 .. 90 °C (2.4.2.1) belastungsabhängig (3.3, 5.7) 	<ul style="list-style-type: none"> Einsatztemperatur abhängig von Anwendung (3.2) Einsatztemperatur & Aktivierungstemp. FGL beeinflusst Materialauswahl der pS (5.7) Temp. Fertigungsverfahren beeinflusst Verbindung (5.2.3)
	Empfehlung	<p>Die Erwärmungsart ist stark von der Anwendung abhängig. Passiv ist sie nur dann zu empfehlen, wenn sich die ASS in Anwendungen mit umgebenden Medien befinden und aufgrund einer Temperaturveränderung eine Bewegung ausführen sollen. Durch die sehr gute Steuer- und Regelbarkeit sowie die schnelle Reaktionsfähigkeit empfiehlt sich die Nutzung der Jouleschen Erwärmung. Die zunehmende Elektrifizierung von Produkten und der geringe Energiebedarf von ASS machen die Nutzung der vorhandenen Energiequellen möglich (im portablen Einsatzfall Akkus). Aufgrund der Formveränderung der aktiven Struktur durch die Zu- und Abgabe von Wärme ist bei der passiven Struktur der Wärmeleitkoeffizient bei der Materialauswahl von Bedeutung. Die Regelung der Energiezufuhr ist ausschlaggebend für die Bewegung. Die Einsatztemperatur ist direkt mit der Anwendung verknüpft und beeinflusst die Aktivierungstemperatur und -zeit sowie die Deaktivierungszeit. Entsprechend der Anwendung ist die Auswahl der Legierung zu treffen. Dies wiederum hat Einfluss auf die Materialauswahl der passiven Struktur.</p>	

Tabelle 6.1: Richtlinien für den Entwurf adaptiver Strukturen und Systeme (Teil 2/4)

		Aktive Struktur	Passive Struktur
Kraft	Größe und Herkunft	<ul style="list-style-type: none"> • Gewichtskraft pS (5.7) • Kraft der aS (4.1.2) • Gegenkraft bei Bewegung • Kraft durch BB sowie zusätzliche Elemente (z. B. Rückstellung) 	
	Art	<ul style="list-style-type: none"> • Zug, Druck, Torsion, Biegung, Schub (4.2.3, 4.3.2) • direkte / indirekte Belastung 	
	Wirkrichtung	<ul style="list-style-type: none"> • in / entgegen der Richtung der Bewegung / dynamische Änderung 	
	Empfehlungen	<p>Die Gewichtskraft der pS wirkt auf das System und damit auf die aS. Dies ist bei der Auslegung der aS zu berücksichtigen. Des Weiteren muss definiert werden, ob das System zusätzlich zum Eigengewicht belastet wird. Dies kann durch BB, Umwelteinflüsse oder ein Rückstellelement entstehen. Das FG-Element darf keiner zusätzlichen Belastung ausgesetzt sein, die eine weitere Dehnung hervorruft. Im Fall einer Betätigung oder hohen Zusatzkräften ist der Draht so zu positionieren (Entkopplung), dass eine überhöhte Belastung ausgeschlossen werden kann. Die Wirkrichtung von zusätzlichen Kräften sollte der Bewegungsrichtung nicht entgegenwirken (außer im Fall der Rückstellung). Die Kraft der aS wirkt bei der Aktivierung auf die pS, um diese zu verformen. Dabei ist eine Beschädigung der pS durch Einschneiden oder Erwärmen z. B. mittels Führungen zu vermeiden.</p>	
Betätigung und Benutzung (BB) Sichtbarkeit und Erkennbarkeit (SE)	Art	<ul style="list-style-type: none"> • gekoppelt oder entkoppelt • sichtbar oder nicht sichtbar 	<ul style="list-style-type: none"> • sichtbar, hörbar, taktil (2.1.2) • Handhaltung, Bewegungsumfang, Griffform & -art (2.1.2)
	Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • keine zusätzliche Kraft • Kontaktsicherheit 	<ul style="list-style-type: none"> • Erkennungsmerkmale / -inhalte • Auslegung auf Betätigungsart (2.1.2), Anthropometrie (2.1.1)
	Empfehlung	<p>Die aS kann vom betätigten System entkoppelt oder damit gekoppelt sein. Es ist eine Entkopplung bei zusätzlicher wirkender Kraft notwendig, um eine ungewollte Dehnung des Drahts zu vermeiden. Bei der passiven Struktur sind die Betätigungsart und die Anthropometrie bei der Auslegung zu berücksichtigen. Mit der Sichtbarkeit der aS kann der Zweck oder die Funktion erkennbar gemacht werden. Außerdem ist eine gute Ableitung der Wärme möglich. Allerdings muss die aS vor Berührung geschützt werden (Wärme, elektrische Sicherheit). Die pS ist bezüglich Formgestalt, Ordnungsgrad, Wahrnehmung und Erkennung der Bedienung zu gestalten. Die Anwendung gibt notwendige Anzeigen, Erkennungsmerkmale / -inhalte und Informationen sowie die geforderte Wahrnehmung vor.</p>	
Verbindung / Anbindung	Art (4.3.4, 5.2.3, 5.7)	<ul style="list-style-type: none"> • Stoffschluss: Schweißen, Löten, Kleben • Kraftschluss: Schrauben, Klemmen • Formschluss: Schlaufe innerhalb der passiven Struktur 	
	Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • bei starker Erhitzung: negative Beeinflussung des FG-Effekts (5.1) → Verbindungstechniken, die große thermische Beanspruchung (v. a. Stoffschluss) der aktiven Struktur als Folge haben, vermeiden • effektfreien Bereich vorsehen zur Befestigung elektrische Kontaktierung 	
	Empfehlungen	<p>Die stoffschlüssige Verbindung ist aufgrund der starken punktuellen Erhitzung bedingt zu empfehlen, da der FG-Effekt negativ beeinflusst oder zerstört werden kann. Ein Formschluss ist nur bei bestimmten Fertigungsverfahren (z. B. FDM) umsetzbar und durch die Kontraktion des Drahts und die hohe Kraftentwicklung oft nicht ausreichend. Der Kraftschluss hat sich als äußerst zuverlässig erwiesen, wobei durch die Klemmung aufgrund von Einstellbarkeit und Haltbarkeit noch bessere Resultate als durch Crimpen erzielt werden konnten. Allerdings umfasst die Klemmung mehrere Bauteile und hat ein höheres Gewicht. Bei Verbindungen mittels leitfähiger Materialien sollten diese elektrisch isoliert oder in die Berechnung und Auslegung bei elektrischer Erwärmung miteinbezogen werden.</p>	

Tabelle 6.1: Richtlinien für den Entwurf adaptiver Strukturen und Systeme (Teil 3/4)

		Aktive Struktur	Passive Struktur
Führung / Integration	Art	<ul style="list-style-type: none"> • innerhalb / außerhalb der passiven Struktur • durch die passive Struktur / durch zusätzliche Elemente 	
	Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Reibung bei Bewegung minimieren • Wärmebeständigkeit • Wärme / Abwärme und Kraft leiten • Kraft und Wärme verteilen 	
	Empfehlungen	<p>Die Führung innerhalb der passiven Struktur hat die Vorteile, dass der Bauraum optimal genutzt werden kann und der Draht durch die umgebende Struktur geschützt wird. Dafür muss die Platzierung des Drahts innerhalb der Struktur sowie Anforderungen an die Führung, wie Reibungsfreiheit, Wärmebeständigkeit u. a. beachtet werden. Des Weiteren soll sich die Führung nicht negativ auf das Gewicht auswirken und ist daher entsprechend zu dimensionieren. Messinghülsen haben sich als vorteilhaft erwiesen, um Wärme und Kraft zu verteilen und eine reibungsfreie Bewegung zu ermöglichen. Bei der Berechnung und Auslegung bei elektrischer Erwärmung muss bei Kontakt von Führung und FG-Element diese miteinbezogen werden.</p>	
Materialauswahl	Auswahlkriterien	<ul style="list-style-type: none"> • Umwandlungstemperatur • maximale Bewegung • Bewegungsart (z. B. breite Hysterese bei Zwischenpositionen, da Schaltzeit größer) • 4.1.2 	<ul style="list-style-type: none"> • Umwandlungstemperatur aS bzw. entsprechende Maßnahmen (Kühlung, Freiraum, Führungen etc.) • phys. Parameter: elast. Dehnung, Steifigkeit & Festigkeit u. a. • 4.1.1, 4.2.2, 5.2.2
	Art	<ul style="list-style-type: none"> • smarte Materialien (2.4.2) 	<ul style="list-style-type: none"> • Kunststoff, Metall u. a.
	Empfehlungen	<p>Die Umwandlungstemperatur ist entscheidend bei der Materialauswahl. Durch sie wird sichergestellt, dass die aS in der Anwendung nicht ungewollt aktiviert wird. Die Anwendung hat ihrerseits ebenfalls Einfluss auf die Umwandlungstemperatur, da beispielsweise bei einer Betätigung durch Nutzer die Temperatur des Stellelements beachtet werden muss. Aufgrund der Verbindung mit der pS hängt auch deren Materialauswahl stark von der Umwandlungstemperatur ab, da das Material dieser standhalten muss. Dies kann beispielsweise unterstützt werden durch entsprechende Maßnahmen wie Kühlung, Freiraum, Führungen etc. Des Weiteren muss bei der Auswahl der aS der geforderte Stellweg oder die Bewegungsart beachtet werden. Bei der pS spielen vor allem physikalische Parameter wie Dehnbarkeit und Steifigkeit eine große Rolle, um z. B. den Anforderungen an die Lebensdauer und die Bewegung zu entsprechen.</p>	
Rückstellung	Art (6.3.4)	<ul style="list-style-type: none"> • Verschaltung von FG-Aktoren (Agonist-Antagonist, 2.3.2, 6.3.4) 	<ul style="list-style-type: none"> • konstante Last (Gewichtskraft) • Rückstellfeder • Rückstellung durch Form der pS
	Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • passende Regelstrategie (2.3.2) • Entkopplung 	<ul style="list-style-type: none"> • minimales zusätzliches Gewicht • definierte & präzise Rückstellung
	Empfehlungen	<p>Die notwendige Kraft zur Rückstellung kann aus der Simulation gewonnen werden. Bei der Rückstellung muss beachtet werden, dass jede zusätzliche Kraft die nutzbare Kraft der FGL und die Aktivierungstemperatur erhöht. Durch die Einsparung zusätzlicher Komponenten und damit Gewicht eignet sich daher die Rückstellung über die Formgestaltung der passiven Struktur. Allerdings ist diese im Hinblick auf die Auslegung kompliziert und häufig nicht ausreichend. Eine konstante Last oder eine Rückstellfeder können zusätzlich notwendig sein, aber in deutlich geringerem Ausmaß als ohne Rückstellstruktur. Daher ist die Möglichkeit der Verschaltung mehrerer FG-Elemente ebenfalls eine interessante Alternative. Das geringe zusätzliche Gewicht und der minimale Bauraumbedarf bieten Vorteile. Hier muss allerdings die Regelung und Ansteuerung der einzelnen FG-Elemente sowie die aufwendige und komplexe Positionierung und Abstimmung beachtet werden.</p>	

Tabelle 6.1: Richtlinien für den Entwurf adaptiver Strukturen und Systeme (Teil 4/4)

Im Folgenden wird die Anwendung genauer betrachtet, da aufgrund der anwendungsspezifischen Anforderungen das Aufstellen allgemeiner Richtlinien und Empfehlungen schwer umsetzbar ist. Zusätzlich werden Randbedingungen betrachtet, die aufgrund der prototypischen Versuche nicht tiefergehend untersucht wurden.

6.3.1 Anforderungen und Empfehlungen aus der Anwendung

Die Anwendung beinhaltet alle Anforderungen an das Zielsystem, z. B. in Form eines Lastenhefts. Diese Anforderungen aus der Anwendung werden an die aktive und passive Struktur gestellt. Zunächst wurden in Kapitel 3.2.3 konkrete Anwendungsbeispiele von ASS im TD untersucht und die Hauptparameter (Kapitel 2.4.3) und -vorteile (Kapitel 3.2.1) von FGL in die Betrachtung miteinbezogen. Daraus ergaben sich erste Anforderungen, die an ASS gestellt werden. Auf dieser Basis konnten in Kapitel 4.3.1.1 aus den Hauptmerkmalkategorien und der Hauptmerkmalliste allgemeine Anforderungen abgeleitet werden, die in Tabelle 4.10 zusammengestellt und in den folgenden Kapiteln verglichen und bewertet wurden. Kritische Parameter der Anwendung stellten dabei Nutzer, Bedienungsart, Bauraum, Bewegungszeit, Belastungsart, Beschl. / Geschw., Kraftübertragung, Bedienungshäufigkeit, Bewegungslänge und Bewegungsart dar (vgl. Kapitel 4.3.1.4, 4.3.1.5). In Kapitel 4.3.2 wurden die Anwendungsgruppen anhand der kritischen Parameter der Anwendung bewertet und gezeigt, welche Einsatzgebiete kritische Parameter beinhalten und für eine Untersuchung und Ableitung spezieller, sekundärer Parameter in Betracht kommen. Im Folgenden werden die kritischen Parameter und deren Einfluss erläutert und in Bezug auf eine konkrete Anwendung in Kapitel 6.4 untersucht.

Gibt es bei einer Anwendung einen aktiven Nutzer, dann entstehen durch ihn Anforderungen an die aS und pS. Bedient der Nutzer das System, setzt er eine ertragbare Bedientemperatur, eine ergonomische, anthropomorphe Formgebung, eine klare Funktionserkennung und wichtige Anzeigen voraus. Auch ästhetische Aspekte müssen bei der Gestaltung beachtet werden. Zusätzlich ist die Krafteinwirkung, die auf das System durch eine Bedienung entsteht, zu berücksichtigen. Der Nutzer ist eng mit der Kraftübertragung und der Bedienungsart verknüpft, die angibt, auf welche Weise die Anwendung bedient wird. Wird das System durch den Nutzer bedient, müssen die BB-Anforderungen beachtet werden, erfolgt eine automatische Bedienung, gewinnen vor allem die Anzeige und Erkennungsinhalte an Bedeutung, um das System zu überwachen. Je nach Bedienungshäufigkeit ist das System entsprechend auszulegen. Aus dem Bauraum und der Bewegungslänge folgen Anforderungen an Geometrie und Auslegung der aS und pS. Die Bewegungszeit gibt die zur Verfügung stehende Zeit bis zur Ausführung der Stellaufgabe

an. Dabei sind Geometrie und Art der Aktivierung und Deaktivierung der aS sowie Geometrie und Auslegung der pS von Bedeutung (z. B. Ermöglichen eines konstruktiven / physikalischen Wärmeabtransports). Ebenso verhält es sich mit Beschleunigung und Geschwindigkeit. Die Belastungsart beinhaltet Kraftangriffspunkt, -richtung und Art der Kraft und gibt damit Anforderungen bezüglich Geometrie und Auslegung sowie der Materialauswahl vor. Bei der Bewegungsart hat vor allem die Notwendigkeit von Zwischenzuständen starken Einfluss auf die aS und pS bezüglich deren Auslegung und Ansteuerung.

Anforderungen an die Betätigung und Benutzung (BB) sowie die Sichtbarkeit und Erkennbarkeit (SE) stellt die Anwendung an die aS und pS. Sie treten genau dann auf, wenn ein Nutzer mit dem System in Verbindung steht und dieses aktiv bedient oder überwacht und auf bestimmte Signale reagieren soll. Bei der Gestaltung der MMS stehen zwei grundlegende Anforderungen im Vordergrund: die Anpassung an die Aufgabe und an den Nutzer. Wie beschrieben, ergeben sich durch den Nutzer spezielle Anforderungen an das System, die bezüglich der Auslegung der MMS notwendig sind. Im Folgenden werden daher Empfehlungen und Richtlinien für Stellteile und Anzeigen in ASS gegeben.

In Kapitel 2.4.3 wurden die Parameter von FGL beim Einsatz im Bereich der MMS untersucht und mit deren Parametern (Stellweg Stellteile, Stellkräfte, Betätigungsfrequenz, Temperatur und elektrische Sicherheit) abgeglichen. DIN EN 894-1 [2009] beinhaltet die ergonomischen Grundsätze, die bei der Gestaltung eines Mensch-Maschine-Systems zu berücksichtigen sind. Dazu gehören: Aufgabenangemessenheit, Selbsterklärungsfähigkeit, Steuerbarkeit, Erwartungskonformität, Fehlerrobustheit sowie Anpassbarkeit und Erlernbarkeit [ebd.]. Der menschliche Informationsverarbeitungsprozess wird in Informationsaufnahme, -verarbeitung und Handlung [LUCZAK 1998, S. 55ff], [WINNER ET AL. 2015, S. 4] unterteilt. Die Bedienung findet nach der Informationsaufnahme, z. B. hervorgerufen durch eine Anzeige, und deren Verarbeitung statt. Aus der Wahrnehmung der Anzeige kann eine notwendige Bedienung erfolgen. Durch die Bedienelemente wird die Aufgabe ausgeführt. In Bezug auf ASS in MMS sind daher die Anforderungen:

- ergonomische und anthropometrische Formgebung: an verschiedene Nutzer und Körperabmessungen anpassbar (Kapitel 2.1),
- anpassbar an die Bedienungsart: Einhand, Zweihand, Finger (Kapitel 4.3.1.2),
- anpassbar an Bedienkräfte (Finger / Einhand): 10 - 55 N (Kapitel 2.4.3),
- Betätigungsfrequenz von 30 Tätigkeiten/min ermöglichen (Kapitel 2.4.3),
- Anpassung an die Aufgabe / Anwendung (Kapitel 3.2.3),
- bei Stellteilen einen Stellweg von bis zu 40 mm ermöglichen (Kapitel 2.4.3),

- Umgebungstemperaturen von bis zu 70 °C standhalten (2.4.3),
- bei Bedienung Erwärmungstemperatur von 60 °C nicht überschreiten (2.4.3),
- Abbildung von Anzeigen, Erkennungsmerkmale / -inhalte, Informationen und
- Fehlfunktionen (z. B. Klemmen) und Fehlbedienungen vermeiden

zu erfüllen. Die ergonomische Anpassbarkeit an den Nutzer wird über die Gestaltung der pS ermöglicht. Bei den Bedienkräften ist zu beachten, dass die aS nicht beschädigt wird (z. B. durch Überlast). Die ertragbare Temperatur für den Nutzer ist abhängig von der Betätigungsart und -zeit sowie vom Material (Kapitel 2.4.3). Es ist wichtig, dass eine Rückmeldung erfolgt, wenn eine Bedienung stattgefunden hat, um mehrfaches oder verstärktes Betätigen zu vermeiden. Die Rückmeldung kann optisch, akustisch oder haptisch erfolgen. ASS können auch als rein optische oder taktile Anzeigen umgesetzt werden. Durch die Bewegung des Systems kann dem Nutzer z. B. ein Signal gesendet werden, dass eine Handlung notwendig ist. Dabei gelten die allgemeinen Anforderungen an Anzeigen nach DIN EN 894-2 [2009], die die Erkennbarkeit, Identifizierung und Interpretation beschreiben.

6.3.2 Verbindungstechnik

Die Verbindung zwischen aS und pS hat starke Auswirkungen auf die Funktionalität und die Eigenschaften des Gesamtsystems. Es ist zu beachten, dass die hohen auftretenden Spannungen sicher ausgehalten und die Eigenschaften des FG-Effekts nicht negativ beeinflusst werden. Dies gilt vor allem für stoffschlüssige Verbindungen, bei denen hohe thermische Belastungen, wie z. B. beim Schweißen, auf das FG-Element wirken, durch die der FG-Effekt zerstört werden kann. Bei einer Klebeverbindung ist je nach Form des FG-Elements eine Verbindung schwer möglich (z. B. bei Drahtform). Des Weiteren muss der Klebstoff der hohen Temperatur, die bei der Aktivierung der FGL entsteht, standhalten. Das FG-Element kann formschlüssig mit der pS verbunden werden, indem es z. B. eingegossen wird. Dabei kann es mit schlaufenförmigen Enden in eine Negativform eingelegt werden. Vorteile sind die direkte Verbindung während der Fertigung, das Entfallen von zusätzlichen Verbindungselementen und keine Einschränkung oder Beschädigung des FG-Effekts. Es ist allerdings zu beachten, dass bei großen Kräften ein Lösen der Verbindung auftreten kann und ein nachträgliches Einstellen der Verbindung nicht mehr möglich ist. Form- und kraftschlüssige Verbindungen können über Crimphülsen oder Klemmverbindungen mit Klemmplatten und Schrauben erfolgen. Vor allem bei der Drahtform ist diese Art der Verbindung zu bevorzugen und hat sich in den durchgeführten Versuchen als äußerst stabil erwiesen. Allerdings kann durch beide Arten der FG-Effekt im

eingespannten Bereich beeinträchtigt werden. Nachträgliche Änderungen sind daher auch bei einer Klemmung nicht immer möglich, kleine Justierungen sind aber durchführbar.

6.3.3 Regelungsstrategien für ASS

Die Eingabe einer Stellgröße führt zum Vergleich von Ist- und Sollzustand des Aktors. Ergibt der Vergleich keine Übereinstimmung, aktiviert der Regler den Steller, der den Zustand des Aktors beeinflusst. Der Sensor gibt den Ist-Wert zurück an Regler.

Die Abfrage des Ist-Zustands kann, wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben über verschiedene Größen stattfinden: direkt über einen externen Sensor, der die Deformation oder den Stellweg misst, oder indirekt über die Temperatur oder den Widerstand der FGL. Da FG-Elemente sowohl sensorische als auch aktorische Funktion aufweisen, wird das mechanische System durch den Übergang zum adaptiven bzw. adaptronischen System stark vereinfacht. Der Stellweg bzw. die Lage der FG-Komponente kann direkt über den Eigenwiderstand oder die Temperatur des FG-Elements bestimmt werden, womit kein zusätzlicher Sensor notwendig ist. Allerdings ist die Temperatur bei Drähten mit kleinem Durchmesser aufgrund der schlechten Anbringungsmöglichkeiten, der Lage des Drahts innerhalb der Struktur und der starken Bewegung des Drahts schwierig zu messen. Die Empfehlung ist daher aufgrund der Geometrie des FG-Elements sowie dem Stand der Forschung (Kapitel 2.3.3) auf die widerstandsbasierte Regelung zurückzugreifen.

6.3.4 Rückstellung

Die Rückstellung wurde nicht prototypisch umgesetzt, daher sollen im Folgenden Hinweise und Empfehlungen gegeben werden. Zur Umsetzung einer zyklischen und mehrfach möglichen Bewegung, muss das FG-Element nach einer Bewegung wieder in den vorgespannten Zustand überführt werden (vgl. Kapitel 2.5.2.1). Nur so kann eine erneute Stellbewegung ausgeführt werden. Bei einer externen Rückstellung wird bei der Auslegung empfohlen, diese nicht am FG-Element zu befestigen, sondern davon zu entkoppeln. Die direkte Verbindung führt zu einer komplizierten Anbindung und der Auslegung des Rückstellelements auf die Temperaturveränderungen der FGL. Zu bevorzugen ist daher die Verbindung mit dem FG-Modul (adaptive Struktur bestehend aus aS und pS). Als Rückstellelemente eignen sich Federn, die das FG-Modul in ihre Ausgangslage zurückführen. Dazu wird die Feder im vorgespannten Zustand integriert. Das Rückstellelement ist mit dem Modul und dem umgebenden System zu verbinden. Durch die zusätzlichen Bauelemente erhöht sich das Gewicht. Des Weiteren muss das FG-Element während seiner Bewegung gegen die Feder arbeiten (vgl. [LANGBEIN & CZECHOWICZ 2013,

S. 52]). Ähnlich der Anbringung einer Rückstellfeder ist die Verwendung einer konstanten Last. Auch hier gilt, dass eine Integration notwendig ist und zusätzliche Kraft und Gewicht zum System hinzugefügt werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Rückstellung und Regelung ist eine Verschaltung von Formgedächtniselementen, die in der Literatur als Agonist-Antagonist-Bauweise bezeichnet wird [IKUTA ET AL. 1988]. Durch eine abwechselnde Aktivierung der Drähte kann die Stellbewegung sowie die Rückbewegung ausgeführt werden. Vorteilhaft sind dabei der geringe Gewichtszuwachs und damit die geringe zusätzliche Verformungskraft, da lediglich die Kraft zur Vorspannung des FG-Elements überwunden werden muss. Nachteilig ist der hohe Auslegungsaufwand zur Positionierung der Drähte. Dabei muss die Temperaturdifferenz zwischen den Drähten beachtet werden, damit sich diese nicht gegenseitig aktivieren, und die Lage innerhalb des FG-Moduls, um einen korrekten Bewegungsablauf zu gewährleisten. Des Weiteren müssen beide FG-Elemente angesteuert werden.

Eine interessante Möglichkeit stellt die Integration der Rückstellung in die adaptive Struktur, speziell in die pS, dar. Durch die Auslegung und die geometrische Anpassung der pS ist eine Rückstellung über Aufbau und Form möglich. Im Hinblick auf den Einsatz von Festkörpergelenken findet in der pS eine hohe Funktionsintegration statt, indem sowohl die Bewegung als auch die Tragwerkseigenschaften in einem Element zusammengefasst werden. Außerdem nimmt die pS weitere Funktionen, wie die Gestaltung der Form, das Design sowie die Gewährleistung von Tragfähigkeit und Steifigkeit wahr. Da das Festkörpergelenk die Bewegung umsetzt, wird auch eine Rückbewegung in die Ausgangslage durchgeführt. Soll das FG-Element dabei in seine Ausgangsform zurückgebracht werden, ist die Struktur so auszulegen, dass die Rückverformung die Kraft zur Vorspannung des Drahts aufweist. Nachteilig wirken sich die komplizierten Berechnungen und Auslegungen aus. Zudem ist zu beachten, dass eine steifere Auslegung zu einer Einschränkung der Stellbewegung (vgl. Strukturen Kapitel 5) führen kann. Daher ist häufig ein zusätzliches Gewicht oder eine Rückstellfeder notwendig (vor allem bei weichen Strukturen, vgl. TPE-Prototypen), die allerdings deutlich geringer bzw. leichter ausfallen.

Weitere zu untersuchende Ansätze stellen bistabile Strukturen oder eine Rückstellung über die Betätigung des adaptiven Systems dar. Bei ersteren kann das Umklappen der Struktur vom einen in den anderen Zustand zur Vorspannung des Drahts genutzt werden. Allerdings sind keine Zwischenzustände möglich. Dazu könnten multistabile Strukturen oder eine Kopplung von bistabilen Strukturen eingesetzt werden. Beim zweiten Ansatz ist es möglich, die Kraft der Betätigung zu nutzen, um den Ausgangszustand wiederherzustellen.

6.4 Anwendungsbezogener Prototyp - Türgriff

Zusätzlich zu den Struktur-Prototypen und in Ergänzung der Richtlinien bezüglich der Anwendung wird im Folgenden ein anwendungsbezogener Prototyp analysiert. Dabei wird die Verdeutlichung des Einsatzes von ASS in der konkreten Anwendung sowie die Umsetzung und der Einsatz der Richtlinien diskutiert. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Anwendungsmöglichkeit näher betrachtet, die in Kapitel 3.2.3 identifiziert wurde: der aerodynamische, anpassbare Türgriff. Zunächst werden Vorteile und Potenziale des Einsatzes von ASS in der Anwendung aufgezeigt. Es folgt eine Beschreibung der Struktur sowie des umgebenden Systems und ein Ableiten von Vorgaben sowie allgemeine und spezielle Anforderungen hinsichtlich der Richtlinien aus Kapitel 6.3.

Ein konventioneller Kfz-Türgriff hat Nachteile bezüglich des aerodynamischen Widerstands und des Designs eines Fahrzeugs. Vor allem die Form des Griffs ist verantwortlich für entstehende Turbulenzen beim Fahren, muss aber gleichzeitig durch den Nutzer bedient werden, wodurch sich Anforderungen bezüglich der Ergonomie ergeben. Auch das Design ist von Bedeutung, da der Türgriff als direkter Kontakt zum Nutzer stark in die Gesamtwahrnehmung des Fahrzeugs einfließt. Auf dieser Grundlage wurde durch den Verfasser dieser Arbeit eine studentische Arbeit ausgegeben und eine Studie durchgeführt [HEIN ET AL. 2018], die die Anwendung von ASS mit FGL am Fahrzeug-Türgriff untersucht. Vorteile ergeben sich, da die Potenziale der FGL, wie Anpassungsmöglichkeit an verschiedene Nutzer und aerodynamische Forderungen, geringer Bauraumbedarf und Leichtbau optimal angewendet werden können. Zusätzlich sind die Bereiche Technik, Ergonomie und Design über Aerodynamik, Nutzerbetätigung und Ästhetik eng verknüpft. Aus dem Einsatz resultieren für die betroffenen Komponenten allgemeine Vorgaben, die zu erfüllen sind (vgl. Abbildung 6.2). Die Fahrzeugtür ist als umgebendes System die Verbindung zum adaptiven System (Türgriff). Sie muss den adaptiven Türgriff aufnehmen, die Formanpassung, z. B. durch anpassbare Gegenformen, unterstützen und eine Weiterleitung der Energie gewährleisten. Der Türgriff wird durch den Einsatz adaptiver Strukturen verformbar und beweglich gestaltet. Er passt sich damit den unterschiedlichen Fahrsituationen an. Aufgrund der Nutzerbetätigung ist eine Entkopplung von der aS und den auftretenden Kräften sowie eine anthropomorphe Formgebung umzusetzen. Durch die sichtbare Anbringung am Fahrzeug-Exterior spielt das Design eine große Rolle. Dabei ist sowohl der Zustand bei Stillstand / Fahrt sowie bei einer Betätigung zu beachten. Eine weitere wichtige Anforderung ist die Unabhängigkeit von äußeren Temperatureinflüssen.

Durch Sonneneinstrahlung oder Frost ist der Türgriff am Fahrzeug-Exterior extremen Bedingungen und Temperaturschwankungen ausgesetzt. Es ist durch die Positionierung des FG-Elements und ggf. zusätzliche Kühlung sicherzustellen, dass keine unbeabsichtigte Aktivierung stattfindet. Bezogen auf die Parameter zur Entwicklung von ASS (Kapitel 4.3) und die allgemeinen Richtlinien (Kapitel 6.3) sowie speziell bezogen auf die Anforderungen und Empfehlungen aus der Anwendung (Kapitel 6.3.1) ergeben sich Anforderungen und Umsetzungsmöglichkeiten an den adaptiven Türgriff, die im Folgenden erläutert und in Tabelle 6.2 dargestellt werden.

Die Grundgestalt der aS in Drahtform eignet sich aufgrund ihrer flachen Gestalt, der gleichmäßigen Wärmeverteilung, des durch die Länge großen Stellwegs und der Anzahl an Drähten zur Erzeugung einer hohen Kraft. Bei der pS eignet sich ein flächenförmiges Tragwerk zur Abbildung des Türgriffs. Die Anwendung gibt den zur Verfügung stehenden Raum vor, der durch Form und Tiefe der Tür beeinflusst wird. Bei der Auslegung sind die notwendigen Zustände, Bedienkraft, Bewegung und Umgebungstemperatur zu beachten. Die Aktivierungszeit bis die Tür bedient werden kann soll wenige Sekunden nicht überschreiten. In dieser Zeit wird das Fahrzeug geöffnet und die Tür erreicht. FGL stellen eine Frequenz von bis zu 20 Hz zur Verfügung. Die eingesetzten FGL (Kapitel 4.1.2) erzielen eine vollständige Kontraktion in einer Sekunde. Es ist zu beachten, dass die pS und zusätzliche Rückstellkomponenten eine Bewegung verlangsamen können. Die Deaktivierung und damit das Erreichen des inaktiven Zustands ist unkritisch, da keine Bedienung stattfindet und die Rückverformung während der Fahrt oder im Stillstand eingenommen wird. Die Lebensdauer des Türgriffs muss auf die des Fahrzeugs abgestimmt sein. Wird von 3,1 Wegen pro Tag [INFAS 2020] und einer durchschnittlichen Lebensdauer von 18 Jahren [STATISTA 2020] ausgegangen, wird der Türgriff etwa 20.000-mal bedient.

Für eine komfortable und sichere Betätigung durch verschiedene Nutzer muss der Türgriff einen Freiraum für die Hand zur Verfügung stellen. Bei der Bedienung sind keine Zwischenzustände notwendig. Der Griff wird in zwei Positionen benötigt: bedienbar und ausgefahren (aktiv), wenn die Tür geöffnet werden soll sowie in allen anderen Situationen eingefahren und nicht bedienbar (inaktiv). Zustand zwei zu erreichen kann beispielsweise über eine Biegung, eine einseitige oder eine zweiseitige lineare Verschiebung herbeigeführt werden (Abbildung 6.4). Für die Dauer der Bedienung ist ein Halten der aktivierten Position notwendig. Dies ist aufgrund der kurzen Dauer nicht zwingend mechanisch umzusetzen. Da eine Dauerbestromung aber zur Verkürzung der Lebensdauer führen kann (Kapitel 6.3) ist ein mechanisches Halten zu empfehlen.

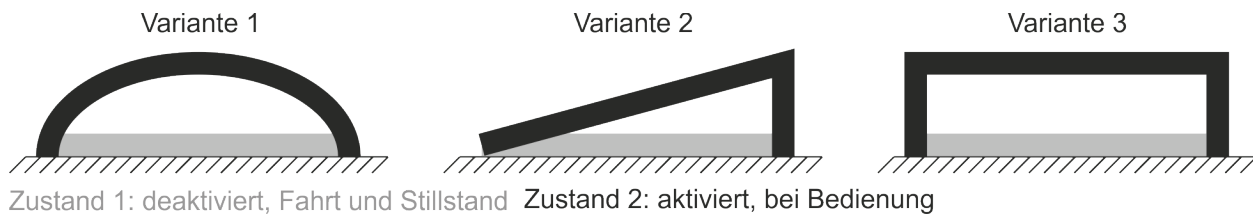


Abbildung 6.4: Vereinfachte Zustände der Bewegung eines Türgriffs (Draufsicht)

Für die Aktivierung sollen vorhandene Ressourcen genutzt werden. Dabei bietet sich das Bordnetz des Fahrzeugs an, womit die FGL über Joulsche Erwärmung aktiviert werden können. Insgesamt sind die Zuverlässigkeit sowie eine reproduzierbare Bewegung eine wichtige Anforderung. Dies muss unter jeder Bedingung erreicht werden. Spezielle Anforderungen betreffen die Umgebungsbedingungen des Türgriffs: Durch Sonneneinstrahlung darf der Griff nicht unbeabsichtigt aktiviert werden. Zusätzliche Kühlelemente für hohe Umgebungstemperaturen sind daher vorzusehen. Des Weiteren darf die Aktivierungstemperatur nicht auf den Nutzer übertragen werden. Je nach Material und Berührzeit sind dabei Temperaturen unter 60 °C notwendig (Kapitel 2.4.3).

Beim Öffnen der Tür findet durch den Nutzer eine Betätigung mit hoher Kraft statt. Es ist zu beachten, dass dadurch keine zusätzliche Kraft auf das FG-Element wirkt, die zu einer Beschädigung führt. Zustand 1 ist der deaktivierte Zustand, indem sich der Türgriff an die Form der Fahrzeugtür anpasst. In Zustand 2 wird der Türgriff bedient. Dafür muss aus dem geraden oder leicht gebogenen deaktivierten Zustand eine ergonomische, anthropomorphe Gegenform für die Bedienung mit der Hand angenommen werden. In diesem Fall kann durch die Biegung (Variante 1, Abbildung 6.4) aus der geraden Türgriffform die Bedienform gebildet werden. Allerdings ist je nach Material des Türgriffs und einer Lackierung eine Biegung schwer durchführbar. Die Hervorhebung des Türgriffs durch eine andere Materialart oder Farbe kann allerdings zur Erkennung der ASS genutzt werden, um so die Anpassbarkeit auch in Form und Wahrnehmung umzusetzen. Wichtig ist außerdem eine Information, wann die Bedienung stattfinden kann und eine Rückmeldung über die korrekte Ausführung der Bedienung an den Nutzer zu übermitteln.

Durch die Bedienung findet eine Kraftübertragung durch den Nutzer auf das Element statt, die bei der Auslegung beachtet werden muss. Die Krafthäufigkeit entspricht der Bedienungshäufigkeit. Zusätzlich wirkt die Gewichtskraft der pS und die Rückstellung auf die aS.

Bei der Verbindung von aS und pS sowie der Anbindung an das umgebende System werden hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit und die Lebensdauer gestellt. Da der Türgriff notwendig für den Einstieg in das Fahrzeug ist, muss eine Möglichkeit zur Wartung oder Reparatur vorgesehen werden.

Bei der Führung und Integration sind die allgemeinen Anforderungen zu beachten: die Reibung soll bei einer Bewegung minimiert werden, die verwendeten Materialien müssen anhand ihrer Wärmebeständigkeit ausgewählt werden, die Führung soll Wärme und Kraft leiten sowie verteilen. Die aS kann innerhalb oder außerhalb der pS geführt werden.

Die Materialauswahl ist anhand der folgenden Kriterien zu treffen: die Umwandlungstemperatur der FGL muss auf die Umgebungsbedingungen abgestimmt werden und es sind gegebenenfalls zusätzliche Elemente zur Kühlung einzusetzen. Die definierte maximale Bewegung muss sowohl von aS als auch pS über die gesamte Lebensdauer zuverlässig erreicht werden. Wichtige physikalische Parameter betreffen vor allem die Wärmeformbeständigkeit der pS, sowie Dehnbarkeit, Steifigkeit und Kraftaufnahme. Speziell bei der Wahl der Materialien der pS sind durch die Bedienung und die Wahrnehmung ästhetische, designtechnische und ergonomische Faktoren von Bedeutung.

Da der Türgriff zwei Zustände einnimmt und die Rückstellung nicht durch den Nutzer stattfindet, ist eine automatische Rückstellung notwendig. Anforderungen sind minimales zusätzliches Gewicht sowie eine definierte und präzise Rückstellung. Dies kann durch das Verschalten von FG-Aktoren oder die Rückstellung anhand der pS mit zusätzlicher Rückstellfeder oder Last umgesetzt werden.

		Aktive Struktur	Passive Struktur	Anwendung
Geometrie	Grundgestalt	<ul style="list-style-type: none"> • Draht 	<ul style="list-style-type: none"> • flächenförmig, bewegliches Tragwerk 	<ul style="list-style-type: none"> • vorgegebener Bauraum durch Türform, Türdicke
	Material	<ul style="list-style-type: none"> • FGL 	<ul style="list-style-type: none"> • Aktivierungstemp. • Ergonomie 	<ul style="list-style-type: none"> • Bewegung & Anpassung • Umgebungsbed.
	Anordnung & Auslegung	<ul style="list-style-type: none"> • Parameter FGL • Bewegung • Kraft 	<ul style="list-style-type: none"> • Parameter Material • zusätzliche Komponenten • Ergonomie 	<ul style="list-style-type: none"> • Temp. bis 70 °C • Bedienkraft • Bedienung (Nutzer) • Bewegungszustände
Zeit	Bewegungsgeschw.	<ul style="list-style-type: none"> • FGL: 0 - 20 Hz 	<ul style="list-style-type: none"> • Rückstellkomponenten beachten 	<ul style="list-style-type: none"> • wenige Sekunden: Aktivierung, Deaktivierung nicht kritisch
	Aktiv.- & Deaktivierungszeit	<ul style="list-style-type: none"> • schnellere Deaktivierung durch zusätzliche Kühlung 	<ul style="list-style-type: none"> • konstruktive Wärmezufuhr & -abfuhr • Kühlelemente 	
	Lebensdauer	<ul style="list-style-type: none"> • < 100.000 Zyklen 	<ul style="list-style-type: none"> • Materialauswahl 	<ul style="list-style-type: none"> • > 20.000 Zyklen
Bewegung	Länge	<ul style="list-style-type: none"> • Produkt aus Drahtlänge und maximaler Vordehnung 	<ul style="list-style-type: none"> • aus Simulation • analytische Lösung 	<ul style="list-style-type: none"> • Griffbereich zur Verfügung stellen
	Richtung	<ul style="list-style-type: none"> • FG-Effekt (zyklischer Einwegeffekt) 	<ul style="list-style-type: none"> • aus Verbindung von aS und pS 	<ul style="list-style-type: none"> • siehe Abbildung 6.4
	Art & Verhalten	<ul style="list-style-type: none"> • Beginn- & Endposition 		<ul style="list-style-type: none"> • Bedienzustand sowie Zustand für Fahrt und Stillstand
	Position & Lage	<ul style="list-style-type: none"> • Regelung über Widerstand 	<ul style="list-style-type: none"> • mech. Feststellung, Bremse 	

Tabelle 6.2: Anforderungen an einen adaptiven Kfz-Türgriff (Teil 1/2)

		Aktive Struktur	Passive Struktur	Anwendung
Energie	Aktivierungsart	<ul style="list-style-type: none"> Joulsche Erwärmung über Bordnetz 	<ul style="list-style-type: none"> Wärmeleitungs-koeffizient Material 	<ul style="list-style-type: none"> Nutzung vorhandener Ressourcen
	Regelung	<ul style="list-style-type: none"> Regelung ASS über Stromsteuerung 		<ul style="list-style-type: none"> Zuverlässigkeit
	Temperatur	Aktivierungstemp. <ul style="list-style-type: none"> typisch: 60 .. 90 °C belastungsabhängig 	<ul style="list-style-type: none"> Umgebungstemp. → Kühlelemente Temp. FGL 	<ul style="list-style-type: none"> Umgebungstemp. von -40 °C bis 70 °C Bedientemp. < 60 °C
BB, SE	Art & Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> entkoppelt sichtbar / unsichtbar keine zusätzliche Kraft Kontaktsicherheit 	<ul style="list-style-type: none"> Rückmeldung sichtbar, hörbar, taktil Handhaltung, Bewegungsumfang, Griff-form & -art Erkennungsmerkmale / -inhalte 	<ul style="list-style-type: none"> Öffnen der Tür Ergonomie Bedienung verschiedene Nutzer Rückmeldung korrekte Ausführung Bedienung Rückmeldung, wann bedient werden kann
Kraft	Größe und Herkunft	<ul style="list-style-type: none"> Gewichtskraft pS Kraft der aS Kraft durch BB und Rückstellung 		<ul style="list-style-type: none"> Kraftübertragung Bedienkraft N Krafthäufigkeit \triangleq Bedienhäufigkeit
	Art	<ul style="list-style-type: none"> Zug, Torsion, Biegung direkte und indirekte Belastung 		
	Wirkrichtung	<ul style="list-style-type: none"> in Richtung der Bewegung 		
Ver-/Anbin-dung	Art & Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> Stoffschluss: Schweißen, Löten, Kleben Kraftschluss: Schrauben, Klemmen 		<ul style="list-style-type: none"> Zuverlässigkeit, Lebensdauer Möglichkeit Wartung / Reparatur Anbindung umgebendes System
Führung Integration	Art & Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> innerhalb / außerhalb der passiven Struktur durch die passive Struktur / durch zusätzliche Elemente 		<ul style="list-style-type: none"> min. Reibung bei Bewegung Wärmebeständigkeit Wärme / Abwärme & Kraft leiten Kraft & Wärme verteilen
Materialauswahl	Art & Auswahlkriterien	<ul style="list-style-type: none"> FGL 	<ul style="list-style-type: none"> Kunststoff, Metall 	<ul style="list-style-type: none"> Umwandlungs- vs. Umgebungstemperatur maximale Bewegung Design & Ergonomie phys. Parameter: elast. Dehnung, Steifigkeit, Festigkeit u. a.
Rückstellung	Art & Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> Verschaltung von FG-Aktoren 	<ul style="list-style-type: none"> Rückstellung durch Form der pS & Rückstellfeder / Last 	<ul style="list-style-type: none"> minimales zusätzliches Gewicht definierte & präzise Rückstellung

Tabelle 6.2: Anforderungen an einen adaptiven Kfz-Türgriff (Teil 2/2)

Abbildung 6.5 zeigt eine stark vereinfachte adaptive Struktur eines Türgriffs [HEIN ET AL. 2018] der Variante 1 aus Abbildung 6.4. Die aS wird dabei von der pS entkoppelt (blauer Bereich), da durch die Nutzerbetätigung eine hohe Kraft auf den Griff wirkt, die nicht auf die FGL übertragen werden darf, um Beschädigungen zu vermeiden. Der Draht wird über

Umlenkrollen geführt, um eine Verlängerung des Stellwegs zu erzeugen. Die Rückstellung in die Ausgangsposition erfolgt durch eine Kombination aus Rückstellfeder und der natürlichen Bewegung der pS in ihre Ausgangslage.

Die pS ist als Festkörpergelenk umgesetzt. Die Strukturierung im unteren Bereich dient der Ausführung der Biegung. Der Griffbereich (grüner Bereich) wird entsprechend den ergonomischen Anforderungen gestaltet. Um eine Betätigung zu ermöglichen muss die pS die Kräfte und Belastungen aufnehmen und weiterleiten, um ein Öffnen der Tür zu ermöglichen. Der lila Bereich ist die Schnittstelle zwischen aS und pS, dient der Verbindung und Anbindung und ist zusätzlich nach designtechnischen Gesichtspunkten zu gestalten, um die Form des Türgriffs im Gesamtsystem ästhetisch zu integrieren.

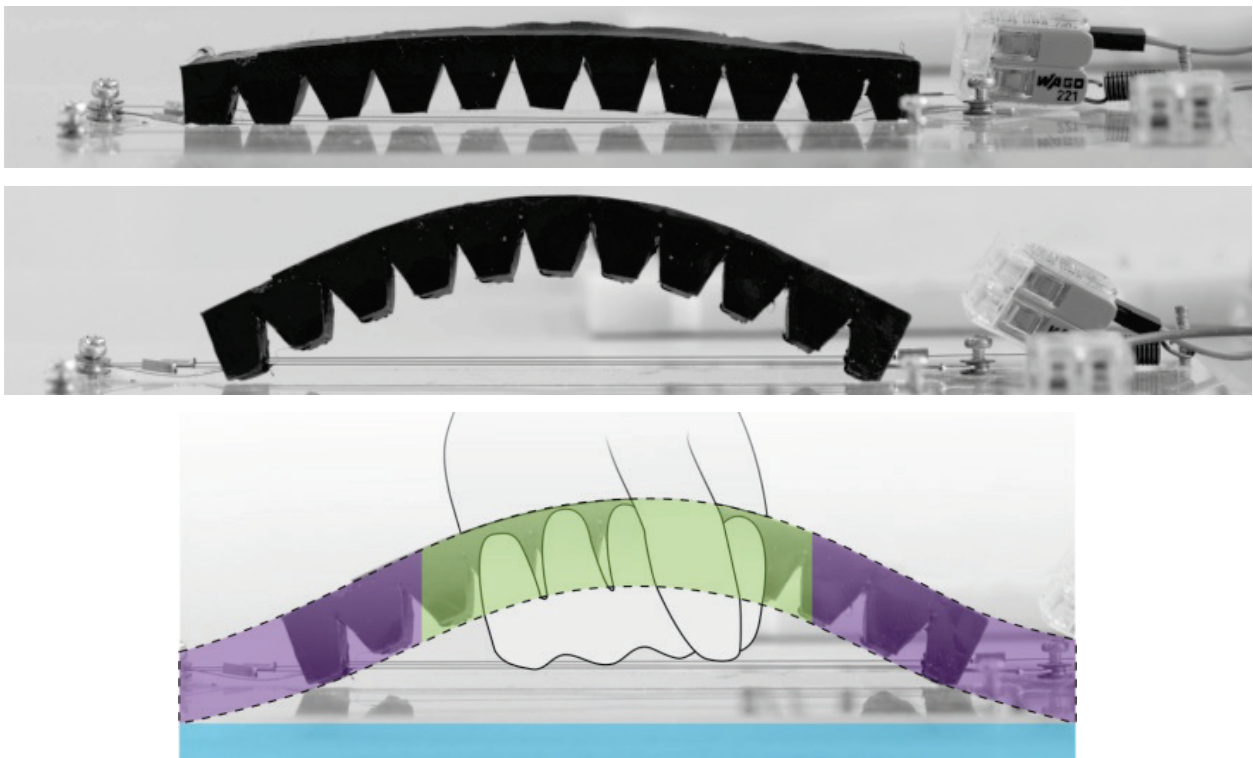


Abbildung 6.5: Vereinfachte Struktur eines Türgriffs mit ASS nach [HEIN ET AL. 2018]

Es zeigt sich, dass durch die Richtlinien eine Beachtung wichtiger Anforderungen effizient und vollständig ermöglicht wird. Der Entwickler wird unterstützt, kritische Parameter hinsichtlich aktiver und passiver Struktur der Anwendung zu identifizieren und Lösungsmöglichkeiten aus den Empfehlungen anzuwenden sowie weitere abzuleiten.

Im Folgenden wird abschließend das Vorgehen zur Entwicklung adaptiver Strukturen und Systeme zusammenfassend vorgestellt.

7 Vorgehen zur Entwicklung adaptiver Strukturen und Systeme

Die Zusammenführung der Ergebnisse und Erkenntnisse der vorangegangenen Kapitel resultiert in einem Vorgehen zur Entwicklung adaptiver Strukturen und Systeme (Abbildung 7.1). Dieses orientiert sich an der VDI 2221 [2019] mit angepassten und auf ASS zugeschnittenen Schritten. Dadurch soll ermöglicht werden, die Potenziale der FGL effizient zu nutzen und durch Vorgehensweisen und Richtlinien die Hürden des Einsatzes von ASS mit FGL zu überwinden. In der Analyse werden die Parameter der aktiven und passiven Struktur sowie der Anwendung bestimmt und in der Phase theoretische Konzeption: Funktions- und Bauweise konzeptionell auf ASS übertragen. Die Grobauslegung dient der Vordimensionierung von passiver und aktiver Struktur anhand der festgelegten Parameter. In der Feinauslegung findet die Simulation mit Anpassung der Parameter von aktiver und passiver Struktur statt sowie eine Überprüfung der Einhaltung der Anforderungen.



Abbildung 7.1: Vorgehen zur Entwicklung adaptiver Strukturen und Systeme

Adaptive Strukturen und Systeme stellen grundlegende neuartige Anforderungen, sowohl an das Produkt als auch an die Entwickler. Durch die Anpassung werden im Bereich der MMS Anforderungen an Ergonomie und Anthropometrie gestellt, die auch erfüllt werden können. Die Produktgestalt kann sich durch den Einsatz beweglicher, neuartiger Tragwerke von bekannten unterscheiden. Mit der Einbindung aktiver Strukturen erhöht sich

der Regelungsaufwand und gewinnt an Bedeutung. Damit einher geht das Verständnis über Eigenschaften von und Anforderungen an smarte Materialien.

Der komplexe Bewegungsablauf aufgrund der Positionierung der aktiven Struktur und der Umwandlung der Bewegung aus einer Kontraktion in die geforderte Bewegung macht ein Variieren und Anpassen der beweglichen Tragwerke häufig notwendig. Durch den erhöhten Regelungsaufwand und die einschränkenden Eigenschaften der aktiven Struktur treten bei der Auslegung Korrekturen auf. Dadurch werden parametrische Modelle notwendig, die es ermöglichen, die entwickelten Produkte innerhalb kurzer Zeit durch die Veränderung einzelner Parameter anzupassen (z. B. zur Simulation des Bewegungsablaufs). Mithilfe der Simulation können Design-Variablen festgelegt werden, die bei der Optimierung modifiziert werden können. Ebenso ist es möglich Beschränkungen bzw. Restriktionen, die eingehalten werden müssen, abzubilden.

7.1 Analyse

In der Analyse werden zunächst die Anforderungen an die Anwendung sowie an die passive und aktive Struktur festgelegt. Dazu dienen die in Kapitel 4.3 festgelegten Parameter zur Entwicklung adaptiver Strukturen und Systeme. Ergänzt werden diese durch die in Kapitel 5.7 diskutierten sekundären Parameter. Kapitel 6.3 fasst die Richtlinien zum Entwurf adaptiver Strukturen und Systeme zusammen. Abbildung 7.2 zeigt das Vorgehen in der Analyse.

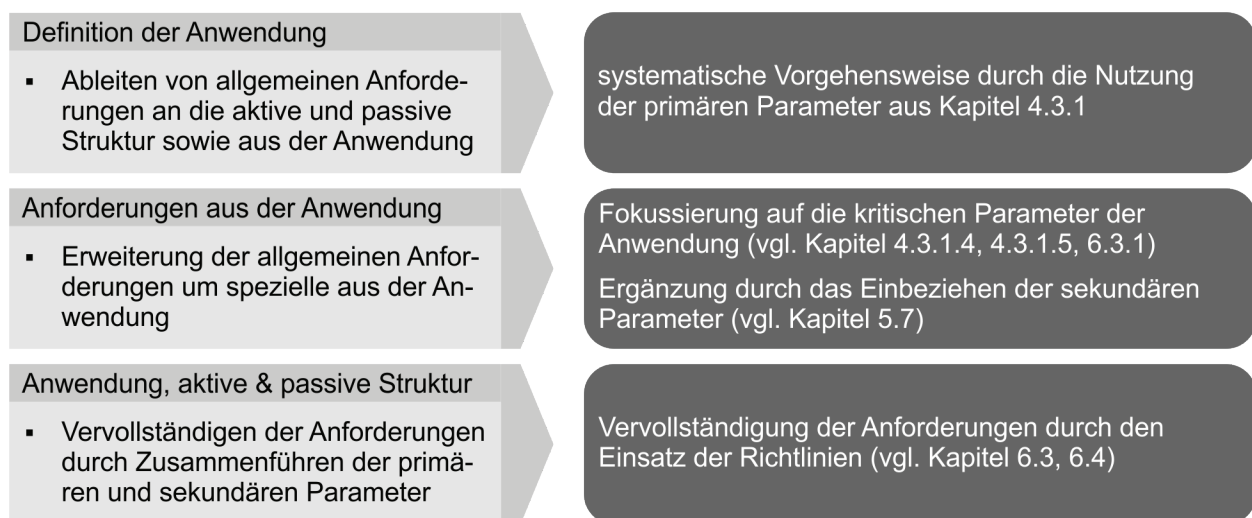


Abbildung 7.2: Ableitung der Anforderungen aus den Parametern und Richtlinien

7.2 Theoretische Konzeption: Funktions- und Bauweise

Bei der theoretischen Konzeption wird die Funktions- und Bauweise betrachtet. Dazu wird zunächst die Funktionsweise der ASS anhand der Anforderungen aus der Anwendung

abgeleitet und in einer Funktionsstruktur festgehalten. Seitens der aktiven Struktur wird der einzusetzende Effekt festgelegt. Daraus und aus den Anforderungen an die Bedienung ergibt sich die Form der Rückstellung. Die Anwendung legt die notwendigen Parameter der Bewegung fest, beispielsweise die Länge und Häufigkeit sowie die Anzahl der Zustände, die die Bewegung aufweisen muss, woraus die Anforderungen an ein Halten der Position erfolgen. Die Bauweise der ASS folgt aus der geforderten Bewegung. Daraus wird abgeleitet, wie die Bewegung der aktiven Struktur (Kontraktion bei Einweg-Effekt) umgeformt werden muss, um die gewünschte Bewegung zu erhalten. Aus dieser Festlegung ergeben sich die Anforderungen an die Positionierung innerhalb der passiven Struktur sowie deren Bewegungsauslegung. Daraus kann die Geometrie der passiven Struktur bestimmt werden. Abbildung 7.3 zeigt die Vorgehensweise bei der theoretischen Konzeption und der Bestimmung der Funktions- und Bauweise.



Abbildung 7.3: Vorgehensweise bei der theoretischen Konzeption

7.3 Grobauslegung

Während der Grobauslegung erfolgt die Vordimensionierung von aktiver und passiver Struktur, d. h. die Übertragung der Anforderungen und konzeptionellen Überlegungen aus Kapitel 7.1 und 7.2 in Werte, die Analyse der physikalischen Eigenschaften, die Vorauslegung der Parameter Geometrie und Kraft sowie der Entwurf erster CAD-Modelle und Prototypen. Abbildung 7.4 zeigt die Vorgehensweise bei der Grobauslegung.



Abbildung 7.4: Vorgehensweise Grobauslegung

Aus der Anwendung ergeben sich die Anforderungen an die Bewegung sowie an erforderliche Kräfte (z. B. Größe, Dauer, Wiederholungen). Die geforderte Bewegung hat starken Einfluss auf die notwendige Dehnung der FGL, deren Positionierung innerhalb der

passiven Struktur (z. B. Verstärkung / Umwandlung der Bewegung) sowie deren Auslegung. Aus der Kraftgröße kann der Drahtdurchmesser bestimmt werden. Die Dauer legt fest, welche Art der Regelung eingesetzt und wie der Zustand gehalten wird. Über die Wiederholungen kann auf die notwendige Lebensdauer der aktiven Struktur geschlossen werden (Spannungs-Dehnungs-Diagramm anhand von Dauerlastversuchen). Umgebungstemperatur und Nutzerbetätigung wirken sich auf die Auswahl der FGL hinsichtlich der Aktivierungstemperatur aus. Die physikalischen Eigenschaften beruhen auf den bereitgestellten Daten bzw. den durchgeführten Versuchen. Wichtig ist die maximal zulässige Spannung, bei der die geforderte Zyklanzahl ohne Einfluss auf die eingebrachte Dehnung erreicht werden kann, sowie die benötigte Spannung für die Rückstellung bei gegebener Dehnung (vgl. Tabelle 4.5).

7.4 Feinauslegung

Mithilfe der Simulation der vorausgelegten Strukturen kann die Feinauslegung stattfinden. Die Strukturen werden dabei zunächst im CAD modelliert und in die Simulation übertragen. Es werden die notwendigen Randbedingungen festgelegt und Vereinfachungen getroffen. Durch die parametrische Konstruktion der Modelle ist es möglich, Designparameter schnell anzupassen und Variantenstudien durchzuführen. Dadurch kann der Bewegungsablauf, die aufzubringende Kraft oder die resultierende Beanspruchung korrigiert werden, indem Änderungen an der aktiven oder passiven Struktur vorgenommen werden. Von den optimierten Modellen werden Prototypen für Versuche gefertigt. Abbildung 7.5 gibt die Schritte zur Feinauslegung adaptiver Strukturen und Systeme an.

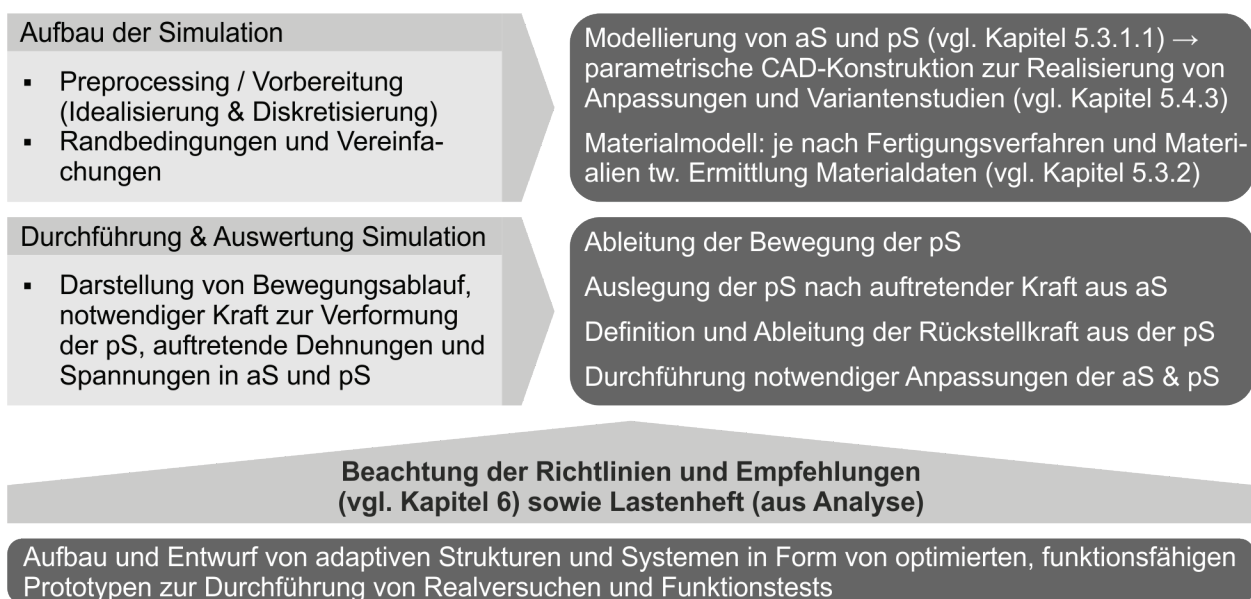


Abbildung 7.5: Vorgehensweise Feinauslegung

8 Zusammenfassung

Adaptive Strukturen und Systeme unterstützen durch ihre Anpassungsfähigkeit aufgrund von steuerbaren Eigenschaften die Entwicklung leichter, leistungsfähiger, energieeffizienter, innovativer und intelligenter Konzepte. Die Einsatzmöglichkeiten sind breit gefächert und branchenübergreifend, von Luft- und Raumfahrt- sowie Fahrzeugtechnik, über Bauwesen, elektrische Geräte, Feinwerktechnik und Medizintechnik bis hin zu Kunst. Im Besonderen geeignet sind Anwendungen aus dem Bereich des Technischen Designs, die durch die Kombination von Technik, Ergonomie und Design die Hauptvorteile der FGL wie geringer Platzbedarf (Bauraum), niedriges Gewicht (Leichtbau), geringe Anzahl an Komponenten (Komplexität) und geräuschloser Betrieb (Komfort) optimal nutzen.

Zur Entwicklung einer Vorgehensweise zum Einsatz von ASS im Bereich des TD wurden in Kapitel 2 die relevanten Grundlagen erarbeitet. Dazu erfolgten Untersuchungen zu den Gebieten Ergonomie durch die Anthropometrie und Mensch-Maschine-Schnittstelle, Design in Bezug auf die Produktgestalt sowie Technik durch Aufbaugestalt, Regelung, smarte Materialien und FGL. Die Zusammenführung fand im Bereich der Anpassungsfähigkeit und der Definition von ASS in der Forschung sowie deren Anwendungsmöglichkeiten statt.

Darauf aufbauend leitet Kapitel 3 eine Definition zum Entwurf und zur Gliederung von ASS ab, die dieser Arbeit als Grundlage dient. Im Weiteren wurde der Einsatz von ASS im Kontext des TD untersucht. Anhand einer Literaturrecherche erfolgte die Identifikation bestehender Anwendungen, um neue abzuleiten und von den Erfahrungen bereits existierender zu profitieren. Aus der erarbeiteten Matrix mit Anwendungsbeispielen ergab sich eine Matrix mit Erfahrungen aus den Anwendungen. Das Zusammenführen verknüpfte Erfahrungen und Hauptvorteile. Das Ergebnis stellen potenzielle Anwendungsbereiche von ASS mit FGL dar, die bestätigen, dass vor allem Anwendungen und Bereiche geeignet sind, die durch das Zusammenwirken von Ergonomie, Design und Technik die Hauptvorteile der FGL nutzen und klassische Schnittstellenanwendungen darstellen, die im TD untersucht werden. Die identifizierten Branchen wurden anhand von Beispielen analysiert und umfassen Bauwesen, Feinwerktechnik, Luftfahrt, elektrische Geräte und Automobil. Das Kapitel schließt mit einer Betrachtung der Potenziale und Herausforderungen beim Entwurf und Einsatz von ASS und zeigt, dass letzteren mit Richtlinien und Standards zu begegnen ist.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde in Kapitel 4 der Aufbau von ASS untersucht und ein Vorgehen zu dessen Generierung erarbeitet. Das Ergebnis ist die Definition von ASS durch aktive und passive Struktur sowie Anwendung und ermöglicht das Ableiten von

Anforderungen. Das Multifunktionselement (SM, FG-Draht) bildet die Funktionsgestalt ab und stellt die aktive Struktur, d. h. den Antrieb für die Bewegung, dar. Die Interfacegestalt wird durch die Anwendung bestimmt. Die Tragwerksgestalt beinhaltet die allgemeinen Eigenschaften eines Tragwerks, dient zur Positionierung und / oder zum Schutz von Funktion und Interface und führt die Bewegung aus. Bei der passiven Struktur lag der Fokus auf der Tragwerksgestalt, da durch die Verbindung von aktiver und passiver Struktur das FG-Element und das Tragwerk eine Vielzahl an Berührungspunkten und Einflussparametern aufweisen. Es fand eine Einordnung und Beschreibung beweglicher Tragwerkstrukturen in aktuelle Klassifizierungsmöglichkeiten sowie eine Untersuchung zum Ermöglichen einer Bewegung über Festkörpergelenke statt. Für die systematische Generierung der Aufbaugestalt der passiven Struktur wurde ein morphologischer Kasten erarbeitet. Der Fokus lag auf dem flexiblen Teil des Tragwerks, dessen Beweglichkeit durch die Anpassung von Geometrie und Struktur, Elastizität oder eine Kombination von beidem entsteht. Eine Variation fand über Parameter wie Zahl, Größe oder Profilverlauf statt. Das Ergebnis bildet eine Matrix zur systematischen Generierung flexibler Strukturen. In Bezug auf die aktive Struktur wurde das Material und dessen Eigenschaften bestimmt und Anforderungen formuliert. Die Anforderungen an die Anwendungen leiteten sich aus den vorangegangenen Kapiteln ab. Durch die Untersuchung des Bewegungsablaufs, d. h. die Anpassung als Hauptfunktion von ASS, wurden Gestaltungsmöglichkeiten zur Realisierung der Bewegung aufgezeigt, Bewegungsrichtungen sowie Bewegungsarten beschrieben und der Einfluss der aktiven und passiven Struktur auf die Bewegung bestimmt. Den Schwerpunkt stellten das gesamtheitliche Aufzeigen und Untersuchen der Parameter zur Entwicklung von ASS dar. Es zeigte sich, dass die übergeordneten Merkmale für aktive und passive Struktur sowie Anwendung übereinstimmen, die Beschreibung und die spezifizierten Parameter aber variieren. Zur Entwicklung des Gesamtsystems erfolgte ein Vergleich und eine Bewertung der Parameter, um Einflüsse aufzuzeigen und kritische Parameter bei der Systementwicklung zu bestimmen. Anhand der kritischen Parameter aus der Anwendung fand eine Beurteilung der Einsatzgebiete nach ihrer Eignung sowie auftretenden Schwierigkeiten bei der Umsetzung statt. Den Abschluss bildete eine Analyse der Randbedingungen zur Erfüllung der Funktionsweise von ASS.

Auf die theoretische Untersuchung der ASS folgten in Kapitel 5 der Aufbau und Test von Struktur-Prototypen. Dazu wurden die erarbeiteten Erkenntnisse in Simulationen und Prototypen umgesetzt, um die Parameter zu evaluieren und zu vervollständigen. Für die Regelung der Prototypen wurde ein ortsfestes System in Form eines Labornetzteils und

für deren Umsetzung ein additives Fertigungsverfahren gewählt. Speziell das FDM-Verfahren konnte die Forderungen, sich für unterschiedlichste Prototypen zu eignen und komplexe Geometrien abbilden zu können, erfüllen. Die Wahl des Druckmaterials wird stark durch die Verbindung mit der aktiven Struktur, z. B. durch die Erwärmung der FGL, beeinflusst. Als Ergebnis von Voruntersuchungen wurden ABS und TPE festgelegt. Im Folgenden fand auf Basis einer Vorstudie sowie einer Recherche zu in der Forschung eingesetzten Verbindungen die Untersuchung der Verbindung von passiver und aktiver Struktur mittels FDM statt. Die Verbindungsmöglichkeiten ergaben sich zu: 4D-Druck, Zuführung, Zusammenbau und Umgießen. Nach Vortests wurde das Verfahren Zusammenbau als geeignet betrachtet. Zur Verbindung der aktiven und passiven Struktur war es notwendig, neben den allgemeinen Parametern für aktive und passive Struktur, den spezifischen Parametern und Eigenschaften der FGL sowie den materialabhängigen Eigenschaften der passiven Struktur, auch die verfahrenstechnischen Einflüsse zu betrachten. Das Ergebnis stellen Parameter dar, die bei der Verbindung von FGL und FDM kritisch sind und beim Aufbau der Prototypen beachtet werden müssen. Aufgrund des hohen Einflusses von Konstruktions- und Designparametern auf ASS stellt die Simulation eine Möglichkeit dar, diesen abzubilden und vorherzusagen. Ein Einsatz in den frühen Phasen der Entwicklung führt zur Reduzierung der realen Untersuchung auf relevante Prototypen und zur Einsparung von Aufwand und Kosten. Im Preprocessing wurden die Modelle erstellt, vernetzt, die Analysemethode festgelegt und Randbedingungen definiert. Zur korrekten Abbildung der gedruckten Strukturen wurde ein Materialmodell über die Bestimmung von Materialdaten in einem Zugversuch für ABS und TPE aus dem FDM-Drucker erstellt und in ANSYS überführt. Das Ergebnis ist ein hyperelastisches Materialmodell für TPE und ein linear-elastisches Modell für ABS. Auf die Simulation folgte der Aufbau der Prototypen für den Druck und die Simulation im CAD. Als Belastungsfall wurde die einseitige Biegung definiert. Anhand der Matrix zur Generierung der passiven Struktur erfolgte die Erstellung und Analyse von Struktur-Prototypen. Die Erkenntnisse und Ergebnisse aus Kapitel 4.1 zur Gestalt, 4.2 zur Bewegung und 4.3 zu den Einflussparametern sowie den Vorversuchen führte zur Auswahl passender Prototypen. Danach erfolgten der reale Aufbau und der Versuch der Prototypen. Es zeigte sich, dass die gedruckten Prototypen in ihren Abmessungen, vor allem im Bereich von feinen Strukturen, vom CAD Modell und damit vom Simulationsmodell abweichen. Ein manuelles Nachmessen der Prototypen und die Anpassung der Simulationsgeometrie ermöglichte die Gewährleistung der Vergleichbarkeit mit dem realen Prototyp. Der Versuch setzte sich aus

zwei Teilen zusammen. Zunächst wurde die notwendige Kraft zur Verformung mit einem konventionellen Draht gemessen und im zweiten Schritt eine Probe mit einem FG-Draht verbunden, um damit die maximale Auslenkung zu bestimmen. Ein Vergleich der Simulation und Prototypen-Versuche zeigte, dass eine Zunahme von feinen Strukturen zu höheren Abweichungen zwischen den Ergebnissen der Simulation und den Prototypen-Versuchen führt. Durch die Rückführung der realen Abmessungen in das Simulationsmodell konnte hier eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse für Kraft und Auslenkung erreicht werden. Insgesamt bestätigten sich die Ergebnisse aus der Simulation. Damit ist es möglich, anhand der Simulation Rückschlüsse zu Bewegungsparametern und auf die passive Struktur wirkenden Kräfte zu ziehen. Eine Vorauslegung von aktiver und passiver Struktur wird erheblich erleichtert. Die Ergebnisse wurden in Form von sekundären Parametern, die aus den Versuchen resultieren, zusammengefasst und dienen als praktische Ergänzung zu den theoretisch untersuchten primären Parametern.

Auf Grundlage der in Kapitel 4.3 abgeleiteten Parameter, die mit den Ergebnissen der Prototypen und Simulationen aus Kapitel 5 vervollständigt und bestätigt wurden, leitet Kapitel 6 Richtlinien für die Auslegung und Entwicklung von ASS mit FGL im Allgemeinen sowie speziell im Bereich der Mensch-Maschine-Schnittstellen ab. Enthalten sind Beschreibungen, Anforderungen und Empfehlungen zur Auslegung der aktiven und passiven Struktur. Gesondert betrachtet wurden Anforderungen und Empfehlungen aus der Anwendung, da diese stark variieren. Im Fokus standen Betätigung und Benutzung sowie Sichtbarkeit und Erkennbarkeit. Des Weiteren wurden Regelungsstrategien, Verbindungstechnik und Rückstellung näher betrachtet. Abschließend fand die Analyse eines anwendungsbezogenen Prototyps und die Diskussion des Einsatzes sowie der Umsetzung von ASS mithilfe der Richtlinien statt. Es zeigte sich, dass durch die Richtlinien die Beachtung wichtiger Anforderungen effizient und vollständig ermöglicht wird. Der Entwickler wird unterstützt, kritische Parameter hinsichtlich aktiver und passiver Struktur der Anwendung zu identifizieren, Lösungsmöglichkeiten aus den Empfehlungen einzusetzen und weitere abzuleiten.

Das Zusammenführen der gesamten Ergebnisse dieser Arbeit erfolgte in Kapitel 7 und stellt ein Vorgehen zur Entwicklung von ASS dar. In der Analyse werden die Parameter der aktiven und passiven Struktur sowie der Anwendung bestimmt und in der theoretischen Konzeption: Funktions- und Bauweise konzeptionell auf ASS übertragen. Die Grobauslegung dient der Vordimensionierung von passiver und aktiver Struktur anhand der festgelegten Parameter. Die Feinauslegung beinhaltet die Simulation mit Anpassung der Parameter von aktiver und passiver Struktur und eine Überprüfung der Einhaltung der Anforderungen.

9 Ausblick

Im Folgenden wird ein Ausblick gegeben, welche weiteren Forschungsansätze für die Umsetzung und den Einsatz adaptiver Strukturen und Systeme zielführend sind. Es soll zudem gezeigt werden, wie die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse in die Praxis zu überführen und anzuwenden sind.

Hinsichtlich der Produktgestalt liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Aufbaugestalt. Dennoch zeigt sich, dass auch die Formgestalt großen Einfluss auf die Auslegung von ASS hat. Vor allem im Bereich des Technischen Designs und der Mensch-Maschine-Schnittstelle sind ergonomische Aspekte von hoher Bedeutung. Diese wirken sich stark auf die Formgestalt der ASS aus. Bezüglich der Form spielt auch die Individualisierung eine große Rolle. Personalisierte Produkte sind individuell auf den jeweiligen Nutzer zugeschnitten und optimal für ihn geeignet. Dies stellt die Hersteller und Entwickler vor neue Herausforderungen: Sonderanfertigungen bringen hohe Kosten mit sich, die Wünsche der Kunden müssen berücksichtigt sowie individuell umgesetzt werden und die Aufgaben müssen zuverlässig erfüllt werden können. Durch die Anpassbarkeit von ASS kann die Individualisierung der Produkte erfolgen, ohne für jeden Nutzer ein personalisiertes Produkt zu entwerfen. Durch die stufenlose Bewegung sind mittels ASS eine Vielzahl von Zuständen erreichbar und abbildbar.

Bei der Aufbaugestalt selbst können im Rahmen von ASS bewegliche Strukturen durch mehrteilige Gelenke eingehend betrachtet werden. Den Nachteilen der komplexen Verbindung, Integration und Führung stehen die Vorteile einer hohen Lebensdauer und die Umsetzung komplexer Bewegungen gegenüber. Bezüglich weiterer Aufbauarten ist der Einsatz von bistabilen und multistabilen Strukturen zu untersuchen, da diese definierte Zustände vorweisen, wodurch eine Rückstellung direkt integriert wäre.

Für eine industrielle Umsetzung sind die Parameter Lebensdauer, Rückstellung und Regelung durch Versuche zu bestätigen, um eine gleichbleibende Leistung und Wiederholbarkeit über die geforderte Zyklenanzahl zu gewährleisten. Im Bereich der aktiven Struktur sind Parameter wie die Zunahme der Aktivierungstemperatur bei wirkender Kraft und die Widerstandsänderung beim Übergang vom martensitischen in den austenitischen Zustand durch Versuche darzustellen, um das Material sowie die Parameter Geometrie und Regelung entsprechend auszulegen.

Ein vielversprechender Forschungsansatz ist die Verbindung von aktiver und passiver Struktur mittels additiver Fertigung. In der vorliegenden Arbeit konnte das Potenzial bereits anhand eines FDM-Druckers gezeigt werden. Forschungsbedarf besteht in einer Erhöhung der Genauigkeit der gedruckten Strukturen, um mittels Simulation verlässliche Ergebnisse ohne Nachbesserungen zu erhalten. Dazu sind weitere additive Fertigungsverfahren, wie beispielsweise das SLA-Verfahren mit hoher Genauigkeit und weitgehend isotropen Eigenschaften der gedruckten Elemente zu untersuchen.

Der vorgestellte Simulationsansatz bildet die Bewegung der adaptiven Strukturen ab und dient der ersten Auslegung von aktiver und passiver Struktur sowie des gesamten Systems. Allerdings werden aktive und passive Struktur stark vereinfacht. Bei der aktiven Struktur kann ein Materialmodell für FGL eingebunden werden, um diese zu simulieren. Dadurch ist es möglich, auch den Einfluss der Temperaturveränderung abzubilden. Hinsichtlich der passiven Struktur sind vor allem bei dem eingesetzten Druckverfahren die Eigenschaften der AF in das Materialmodell miteinzubeziehen. Dazu bedarf es weiterer Forschung auf dem Gebiet der Simulation von AF-Bauteilen.

Der untersuchte anwendungsbezogene Prototyp stellt nicht nur einen Demonstrator zur Validierung der Untersuchungen und Richtlinien dar, sondern bietet Potenzial für eine weiterführende Entwicklung. In Bezug auf den Türgriff ist vor allem die hohe wirkende Kraft und die Integration in die Fahrzeugtüre näher zu untersuchen. Des Weiteren können die Vorteile eines adaptiven Türgriffs auf andere Griffe und Bedienelemente übertragen werden, wie beispielsweise Handgriffe für Fahrräder, Rollatoren oder als Tragegriffe. Eine weitere interessante Anwendung stellt beispielsweise ein Navigationsinterface in Form eines Armbands dar. Dieses gewinnt in einer zunehmend digitalen und komplexen Umgebung an Bedeutung. Die Nutzung betrifft nicht ausschließlich Autofahrer, sondern auch Fußgänger und Fahrradfahrer setzen vermehrt Navigationssysteme ein. Allerdings sind diese aktuell hauptsächlich visuell und tragen damit zur Erhöhung der Ablenkung bei. Durch ASS ist es möglich, auch den haptischen Informationskanal zu nutzen. Im Kontext eines nutzerzentrierten, tragbaren Navigationselements ergeben sich Vorteile, da die Eigenschaften und die Anpassungsmöglichkeit von ASS optimal angewendet werden können. Aufgrund der körpernahen Tragweise und der notwendigen Signalübertragung ist das Armband bezüglich der Erwärmung bei Aktivierung und der Wahrnehmbarkeit der Signale zu untersuchen. Potenzial bietet weitere Funktionsintegration wie Warnmeldungen, auch im Hinblick auf das automatisierte Fahren.

Literaturverzeichnis

- [3DMENSIONALS 2020] 3Ddimensionals: <https://www.3dimensionals.de/ultimaker-3-dual-extruder-3d-drucker-inkl.-service-und-support>, 05.07.2020.
- [ABTS 2010] Abts, G.: Kunststoff-Wissen für Einsteiger. München: Carl Hanser Verlag, 2010.
- [AFROSE ET AL. 2014] Afrose, M. F.; Masood, S. H.; Nikzad, M.; Iovenitti, P.: Effects of Build Orientations on Tensile Properties of PLA Material Processed by FDM. In: Advanced Materials Research Vols. 1044, 1045, 2014, S. 31-34.
- [AHMAD 1988] Ahmad, I.: "Smart" Structures and Materials. In: Rogers, C. A.: U. S. Army Research Office Workshop. Smart Materials, Structures and Mathematical Issues, Virginia, 15.-16.09.1988.
- [ANSYS 2020] ANSYS, Inc.: <https://ansyshelp.ansys.com/>. 05.07.2020.
- [ASHU & ANIRBAN 2016] Ashu, G.; Anirban, B.: An insight to the failure of FDM parts under tensile loading: finite element analysis and experimental study. In: International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 120, 2017, S. 225-236.
- [BASAVARAJ & VISHWAS 2016] Basavaraj, C. K.; Vishwas, M.: Studies on Effect of Fused Deposition Modelling Process Parameters on Ultimate Tensile Strength and Dimensional Accuracy of Nylon. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 149, International Conference on Advances in Materials and Manufacturing Applications (IConAMMA-2016) 14.-16.7.2016, Bangalore, India.
- [BATHE 2002] K.-J. Bathe: Finite-Elemente-Methoden. 2. Aufl., Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2002.
- [BAZ & CHEN 1995] Baz, A.; Chen, T.: Active control of the lateral buckling of nitinol-reinforced composite beams. In: Proc. SPIE 2427, Active Materials and Smart Structures, 2.2.1995.
- [BEHL & LENDLEIN 2007] Behl, M.; Lendlein, A.: Shape-memory polymers. In: materialstoday, Vol. 10, Nr. 4, 20.4.2007, S. 20-29.
- [BEHL ET AL. 2010] Behl, M.; Razzaq M. Y.; Lendlein, A.: Multifunctional Shape-Memory Polymers. In: Advanced Materials. Vol. 22, Issue 31, Special Issue: Stimuli-Sensitive Polymers, 17.8.2010, S. 3388-3410.
- [BEIN ET AL. 1998] Bein, T.; Hanselka, H.; Breitbach, E.: The Adaptive Spoiler - Mechanical Aspects of a Local Thickening (Bump) to Control the Transonic Shock. In: 9th Int. Conf. On Adaptive Struct. And Technol. Cambridge, Massachusetts, 14.-16.10.1998.
- [BEIN ET AL. 2005] Bein, T.; Hanselka, H.; Nuffer, J.: Adaptronik - ein technischer Ansatz zur Lösung bionischer Aufgaben. In: Rossmann, T.; Tropea, C.: Bionik. Aktuelle Forschungsergebnisse in Natur-, Ingenieur- und Geisteswissenschaft, S. 17-30. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- [BEIN ET AL. 2008] Bein, T.; Bös, J.; Herold, S.; Mayer, D.; Melz, T.; Thomaier, M.: Smart interfaces and semi-active vibration absorber for noise reduction in vehicle structures. In: Aerospace Science and Technology 12, Elsevier, 2008, S. 62-73.
- [BETTEN 1998] Betten, J.: Finite Elemente für Ingenieure 2. Variationsrechnung, Energiemethoden, Näherungsverfahren, Nichtlinearitäten. Berlin Heidelberg: 2. Aufl., Springer-Verlag, 2004.
- [BEXTEN 2017] Bexten, J.: Vorbild Natur: Leichtbau gewinnt zunehmend an Gewicht (17.04.2017): <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/maschinenbau/vorbild-natur-leichtbau-gewinnt-zunehmend-an-gewicht/>, 20.05.2020
- [BMW 2020] BMW Group: BMW Vision Next 100. <https://www.bmwgroup.com/de/unternehmen/the-next-100-years/markenvisionen.html#BMW>. 05.06.2020.
- [BOLLER 2000] Boller, C.: Smarte Werkstoffe und Strukturen und ihre Anwendung in der Luft- und Raumfahrt. In: Stahlbau, Vol. 69, Issue 7, S. 556-567. Weinheim: Ernst & Sohn, 2000.

- [BREITBACH ET AL. 2000] Breitbach, E. J.: Smart Structures (Adaptronics) - State of the Art and Future Outlook. In: Grassie, K., Tenckhoff, E., Wegner, G., Haußelt, J., Hanselka, H. (eds.): *Functional Materials, Euromat 99*, Vol. 13, S. 485-495. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2000.
- [BREUNINGER ET AL. 2013] Breuninger J.; Becker, R.; Wolf, A.; Rommel, S.; Verl, A.: *Generative Fertigung mit Kunststoffen. Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- [BRUNNER 2015] Brunner, B.: Sensorik mit haptischer Rückmeldung: smart und fühlbar. 7. TechnologyMountains iNOVATION FORUM, *Smarte Technologien & Systeme*“. 25.2.2015, Donaueschingen.
- [BUBB 2001] Bubb H.: Haptik im Kraftfahrzeug. In: Jürgensohn T., Timpe KP. (eds.): *Kraftfahrzeugführung*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001.
- [BUBB 2015] Bubb, H.: Ergonomie spielt bei der Gestaltung des Automobils eine größer werdende Rolle. Interview vom 10.06.2015: <https://www.springerprofessional.de/fahrzeugtechnik/ergonomie-spielt-bei-der-gestaltung-des-automobils-eine-groesser/6562926>, 25.5.2020.
- [BUBB ET AL. 2015] Bubb, H.; Vollrath, M.; Reinprecht, K.; Mayer, E.; Körber, M.: Der Mensch als Fahrer. In: Bubb, H.; Bengler, K.; Grünen, R. E.; Vollrath, M. (Hrsg.): *Automobilergonomie*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 67-162.
- [BUCHT 2015] Bucht, A.: Adaptronik. Passive Strukturen zum Leben erwecken. Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU 2015: <https://www.iwu.fraunhofer.de/content/dam/iwu/de/documents/Broschueren/IWU-KB-Adaptronik-und-Akustik.pdf>, 25.05.2020.
- [BUEHLER ET AL. 1963] Buehler, W. J.; Gilfrich, J. V.; Wiley R. C.: Effect of Low-Temperature Phase Changes on the Mechanical Properties of Alloys near Composition TiNi. In: *Journal of Applied Physics* 34, S. 1475-1477, 1963.
- [BULLINGER 1994] Bullinger H.-J.: *Ergonomie. Produkt- und Arbeitsplatzgestaltung*. Stuttgart: B. G. Teubner, 1994.
- [BÜTTNER & HAMPE 1984] Büttner, O.; Hampe, E.: *Bauwerk. Tragwerk. Tragstruktur. Klassifizierung, Tragqualität, Bauwerkbeispiele (Band 2)*. Berlin: Verl. Für Bauwesen, 1984.
- [CAHOON 2016] Cahoon, S.: *Living Hinge: Design Guidelines and Material Selection*, 2016: www.matterhackers.com/news/living-hinge--design-guidelines-and-material-selection, 25.5.2020.
- [CAMPANILE & JÄHNE 2013] Campanile, F.; Jähne, R.: Gelenke einmal anders. In: *Konstruktion* 9, 2013, S. 70-73.
- [CARPI ET AL. 2008] Carpi, F.; De Rossi, D.; Kornbluh, R.; Pelrine, R.; Sommer-Larsen, P.: *Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers. Fundamentals, Materials, Devices, Models and Applications of an Emerging Electroactive Polymer Technology*. Elsevier Science, 2008.
- [CASE ET AL. 2016] Case, J.; White, E. L.; Kramer, R. K.: Sensor enabled closed-loop bending control of soft beams. In: *Smart Materials and Structures*, Vol. 25, Nr. 4, 2016.
- [CHANG & READ 1951] Chang L. C.; Read, T. A.: Plastic Deformation and Diffusionless Phase Changes in Metals - The Gold-Cadmium Beta Phase. In: *Transactions AIME*, Vol. 189, 01.1951, *Journal of Metals*, S. 47-52.
- [CHRISTIYAN ET AL. 2017] Christiyan, K. G. J.; Chandrasekhar, U.; Mathivanan, N. R.; Venkateswarlu K.: Influence of manufacturing parameters on the strength of PLA parts using Layered Manufacturing technique: A statistical approach. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 310, International Conference on Advances in Materials and Manufacturing Applications (IConAMMA-2017) 17.-19.8.2017, Bengaluru, India.
- [CLARK ET AL. 1998] Clark, R. L.; Saunders, W. R.; Gibbs, G. P.: *Adaptive Structures. Dynamics and Control*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998.

- [COLORADO 2012] Colorado M., J. D.: BaTboT: a biologically inspired flapping and morphing bat robot actuated by SMA-based artificial muscles. Dissertation, Department of Electronics, Informatics and Industrial Engineering, Universidad Politécnica de Madrid, 2012.
- [CRAWLEY 1994] Crawley E., F.: Intelligent Structures for Aerospace: A Technology Overview and Assessment. In: AIAA Journal, S. 1689-1709, Vol. 32, No. 8, 08.1994.
- [CZECHOWICZ 2012] Czechowicz, A.: Adaptive und adaptronische Optimierungen von Formgedächtnisaktorsystemen für Anwendungen im Automobil. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau der Ruhr-Universität Bochum, 2012.
- [CZECHOWICZ 2019] Czechowicz, A.: Intelligente Mensch-Maschine Schnittstellen durch intelligente aktive Materialien. Veranstaltungsunterlagen VDI-Wissensforum 2019.
- [CZECHOWICZ ET AL. 2016] Czechowicz, A.; Zobel, F.; Dültgen, P.; Bucher, L.; Hofmann, M.: Entwicklung von haptischen Informationselementen auf Basis von Formgedächtnislegierungen zur Unterstützung älterer Menschen. In: Tagungsband des 4SMARTS Symposiums, Darmstadt, 6.-7.4.2016.
- [DAWOUD ET AL. 2016] Dawoud, M.; Taha, I.; Ebeid, S. J.: Mechanical behavior of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques. In: Journal of Manufacturing Processes, Vol. 21, 01. 2016, S. 39-45.
- [DIN 53504 2017] DIN 53504: Prüfung von Kautschuk und Elastomeren - Bestimmung von Reißfestigkeit, Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2017.
- [DIN EN 894-1 2009] DIN EN 894-1: Sicherheit von Maschinen - Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen - Teil 1: Allgemeine Leitsätze für Benutzer-Interaktion mit Anzeigen und Stellteilen. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2009.
- [DIN EN 894-2 2009] DIN EN 894-2: Sicherheit von Maschinen - Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen -Teil 2: Anzeigen. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2009.
- [DIN EN 894-3 2010] DIN EN 894-3: Sicherheit von Maschinen - Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen - Teil 3: Stellteile. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010.
- [DIN EN 1005-5 2007] Din EN 1005-5: Sicherheit von Maschinen - Menschliche körperliche Leistung - Teil 5: Risikobeurteilung für kurzzyklische Tätigkeiten bei hohen Handhabungsfrequenzen. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2007.
- [DIN EN 1990 2010] DIN EN 1990: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010.
- [DIN EN ISO 527-1 2019] DIN EN ISO 527-1: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2019.
- [DIN EN ISO 527-2 2012] DIN EN ISO 527-2: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2012.
- [DIN EN ISO 13732-1 2008] DIN EN ISO 13732-1: Ergonomie der thermischen Umgebung - Bewertungsverfahren für menschliche Reaktionen bei Kontakt mit Oberflächen - Teil 1: Heiße Oberflächen (ISO 13732-1:2006). Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2008.
- [DIN EN ISO 26800 2011] DIN EN ISO 26800: Ergonomie - Genereller Ansatz, Prinzipien und Konzepte. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [DIN IEC 60050-351 2014] DIN IEC 60050-351: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2014.
- [DIN SPEC 33402-2 2005] DIN 33402-2: Ergonomie - Körpermaße des Menschen - Teil 2: Werte. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2005.
- [DIN SPEC 33402-6 2015] DIN SPEC 33402-6: Ergonomie - Körpermaße des Menschen - Teil 6: Leitfaden für die richtige Auswahl und Anwendung anthropometrischer Daten. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015.

- [DUDEN 2020] Duden: Bibliographisches Institut GmbH. <https://www.duden.de>, 20.05.2020
- [DUERIG 2002] Duerig, T. W.: The Use of Superelasticity in Modern Medicine. In: MRSBulletin, Vol. 27, Issue 2, 02. 2002, S. 101 - 104.
- [DYNALLOY 2020] Dynalloy, Inc.: Nickel-Titanium Alloy Physical Properties. <https://www.dynalloy.com/pdfs/TCF1140.pdf>, 25.05.2020
- [EHRENSTEIN 2007] Ehrenstein, G. W.: Mit Kunststoffen konstruieren. Eine Einführung. 3. Aufl., München: Carl Hanser Verlag, 2007.
- [EHRENSTEIN 2011] Ehrenstein, G. W.: Polymer Werkstoffe. Struktur - Eigenschaften - Anwendung. 3. Aufl., München: Carl Hanser Verlag, 2011.
- [EHRENSPIEL & MEERKAMM 2017] Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 6. Aufl., München Wien: Carl Hanser Verlag, 2017.
- [ELSPASS & FLEMING 1998] Wilfried J. ElspASS, W. J.; Flemming, M.: Aktive Funktionsbauweisen. Eine Einführung in die Strukturonik. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1998.
- [ERHARD 2008] Erhard, G.: Konstruieren mit Kunststoffen. 4. Aufl., München: Carl Hanser Verlag, 2008.
- [FARBMAN & MCCOY 2016] Farbman, D.; McCoy, C.: Materials Testing of 3D Printed ABS and PLA Samples to Guide Mechanical Design. In: Proceedings of the ASME 2016 International Manufacturing Science and Engineering Conference MSEC2016 27.6.-1.7.2016, Blacksburg, Virginia, USA.
- [FELDHUSEN & GROTE 2013] Feldhusen J.; Grote K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. Aufl. Springer Vieweg, 2013.
- [FLEMMING & ROTH 2003] Flemming, M.; Roth, S.: Faserverbundbauweisen. Eigenschaften. Mechanische, konstruktive, thermische, elektrische, ökologische, wirtschaftliche Aspekte. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2003.
- [FRANZ ET AL. 1969] Franz, G.; Schäfer K.; Hampe E.: Konstruktionslehre des Stahlbetons. Zweiter Band Tragwerke. Berlin, Heidelberg: Springer, 1969.
- [FRIEDRICH 2016] Friedrich R.: Modellierung und Optimierung nachgiebiger Mechanismen auf Basis elastischer Festkörpergelenke mit Hilfe von nichtlinearen Finiten Balkenelementen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, 2016.
- [FRIEDRICH ET AL. 2008] Friedrich, H. E.; Treffinger, P.; Kopp, G.; Knäbel, H.: Werkstoffe und Bauweisen ermöglichen neue Fahrzeugkonzepte. In: Schindler, V., Sievers, I. (eds.) Forschung für das Auto von morgen. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [G.RAU 2020] G.Rau GmbH & Co. KG: Thermische Aktoren: https://www.g-rau.de/fileadmin/gustavrau/downloads/service/downloads/Thermische_Aktoren.pdf, 25.05.2020.
- [GANDHI & THOMPSON 1992] Gandhi, M. V.; Thompson, B. D.: Smart Materials and Structures. London: Chapman & Hall, 1992.
- [GEBHARDT 2018] Gebhardt, C.: Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench. Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik. 3. Aufl., München: Carl Hanser Verlag, 2018.
- [GEBHARDT ET AL. 2019] Gebhardt, A.; Kessler, J.; Schwarz, A.: Produktgestaltung für die Additive Fertigung. München: Carl Hanser Verlag, 2019.
- [GHEORGHITA ET AL. 2014] Gheorghita, V.; Gümpel, P.; Chiru, A.; Strittmatter, J.: Future applications of Ni-Ti alloys in automotive safety systems. In: International Journal of Automotive Technology, Vol. 15, Nr. 3, S. 469-474, 2014.
- [GÓRSKI ET AL. 2015] Górski, F.; Wichniarek, R.; Kuczko, W.; Zawadzki, P.; Buń, P.: Strength of ABS Parts Produced by Fused Deposition Modelling Technology - A Critical Orientation Problem. In: Advances in Science and Technology Research Journal Vol. 9, Nr. 26, 06.2015, S. 12-19.

- [GOUKER ET AL. 2006] Gouker, R. M.; Gupta, S. K.; Bruck, H. A.; Holzschuh, T.: Manufacturing of multi-material compliant mechanisms using multi-material molding. In: The international journal of advanced manufacturing technology 30, Nr. 11, S. 1049-1075, 2006.
- [GRAVINA 1961] Gravina, P. B. J.: Theorie und Berechnung der Rotationsschalen. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1961.
- [GRELLMANN & SEIDLER 2015] Grellmann, W.; Seidler, S.: Kunststoffprüfung. 3. Aufl., München: Carl Hanser Verlag, 2015.
- [GROSS ET AL. 2017] Gross, D.; Hauger, W.; Schröder, J.; Wall W. A.: Technische Mechanik 2. Elastostatik. 13. Aufl., Berlin: Springer Vieweg, 2017.
- [GROSS ET AL. 2018] Gross, D.; Hauger, W.; Wriggers, P.: Technische Mechanik 4. Hydromechanik, Elemente der Höheren Mechanik, Numerische Methoden. 10. Aufl., Berlin: Springer Vieweg, 2018.
- [GROSS ET AL. 2019] Gross, D.; Hauger, W.; Schröder, J.; Wall W. A.: Technische Mechanik 1. Statik. 14. Aufl., Berlin: Springer Vieweg, 2019.
- [GRUNDSTEIN ET AL. 2009] Grundstein, A.; Meentemeyer, V.; Dowd, J.: Maximum vehicle cabin temperatures under different meteorological conditions. In: International Journal of Biometeorology 53, S. 255-261, 2009.
- [GÜRCÜM ET AL. 2017] Gürcüm, B. H.; Börklü, H. R.; Sezer, K.; Eren, O.: Implementing 3D Printed Structures as the Newest Textile Form. In: Journal of Fashion Technology & Textile Engineering (2018) Proceedings of ITMC-2017 Conference.
- [HAMMER 2008] Hammer, N.: Mediendesign für Studium und Beruf. Grundlagenwissen und Entwurfssystematik in Layout, Typografie und Farbgestaltung. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [HANSELKA 1997] Hanselka, H.: Realization of Smart Structures by Using Fiber Composite Materials. In: VDI-Fortschritt-Bericht, Smart Mechanical System - Adaptronics, Reihe 11: Schwingungstechnik Nr. 244, S. 1-10, 1997.
- [HEIN ET AL. 2017] Hein, A.; Patzer, E.; Maier, T.: Improving HMIs of Vehicle Exterior Design Using Adaptive Structures and Systems. In: Rebelo, F.; Soares, M. (Hrsg.): Proceedings of the AHFE 2017 International Conference on Ergonomics in Design, 17.-21.6.2017, Los Angeles, California, USA, S. 261-273.
- [HEIN ET AL. 2018] Hein, A.; Holder, D.; Maier, J.; Maier, T.: Potential Analysis of Smart Materials and Methodical Approach developing Adaptive Designs using Shape Memory Alloys. In: Proceedings of NordDesign 2018, 14.-17.08.2018, Linköping, Sweden.
- [HEIN ET AL. 2019] Hein, A.; Holder, D.; Maier, T.: Adaptive Structures and Systems: Interaction of Application, Passive and Active Structure. In Karwowski, W.; Ahram, T. (Hrsg.): Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Human Systems Integration (IHSI 2019): Integrating People and Intelligent Systems, S. 641-647.
- [HEINRICH & SCHNEIDER 2019] Heinrich, B.; Schneider, W.: Grundlagen Regelungstechnik. Einfach Übungen, praktische Beispiele und komplexe Aufgaben. 5. Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.
- [HEINRICH 2017] Heinrich, B.: Regler. In: Böge, A.; Böge, W. (Hrsg.): Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik, S. 1643-1654. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [HEINRICH ET AL. 2020] Heinrich, B.; Linke, P.; Glöckler, M.: Grundlagen Automatisierung Erfassen - Steuern - Regeln. 3. Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020.
- [HENEIN ET AL. 2003] Henein, S.; Spanoudakis, P.; Droz, S.; Myklebust, L. I.; Onillon, E.: Flexure Pivot for Aerospace Mechanisms. In: Proceedings of the 10th ESMATS, ESA SP-524, 2003.
- [HENRY ET AL. 2001] Henry, C.; Feuchtwanger, J.; Bono, D.; Marioni, M.; Tello, P.; et al.: AC performance and modeling of ferromagnetic shape memory actuators. In: SPIE's 8th

- Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, S. 151-162. Newport Beach, 2001.
- [HESSELBACH 2007] Hesselbach, J.: Shape Memory Actuators. In: Janocha, H.: Adaptronics and Smart Structures. Basics, Materials, Design and Applications, S. 145-163. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [HEYWANG 1993] Heywang W.: Überblick über genutzte Effekte. In: Sensorik. Halbleiter-Elektronik, Vol. 17, S. 6 - 8. Berlin, Heidelberg: Springer, 1993.
- [HIRSCHFELD 1959] Hirschfeld, K.: Baustatik. Theorie und Beispiele. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1959.
- [HISSEINE 2006] Hisseine, D.: Modeling and Control of Shape Memory Actuators. In: 4th IFAC Symposium on Mechatronic Systems, Proceedings Volumes, Vol. 39, Issue 16, S. 1059-1064. 2006.
- [HOLDER 2016] Holder, D.: Gefallensurteil und Blickanalyse zum Fahrzeugdesign zukünftiger Aufbaugestalten anhand einer technischen Prognose. Dissertation am Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design der Universität Stuttgart, 2016.
- [HÜBLER 2015] Hübler, M.: Methodik zur Auslegung und Herstellung von aktiven SMA-FKV-Hybridverbunden. Dissertation Fachbereich für Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Technischen Universität Kaiserslautern, 2015.
- [HUFENBACH ET AL. 2002] Hufenbach, W.; Gude, M.; Kroll, L.: Design of multistable composites for application in adaptive structures. In: Composites Science and Technology, S. 2201 - 2207, Elsevier Science Ltd. 2002.
- [IKUTA 1990] Ikuta, K.: Micro/Miniature Shape Memory Alloy Actuator. In: IEEE S. 2156 - 2161, 1990.
- [IKUTA ET AL. 1988] Ikuta, K.; Tsukumoto, M.; Hirose, S.: Shape Memory Alloy Servo Actuator System with Electric Resistance Feedback and Application for Active Endoscope. In: IEEE S. 427-430, 1988.
- [INFAS 2020] infas: Mobilität in Deutschland. Kurzreport. http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/infas_Mobilitaet_in_Deutschland_2017_Kurzreport.pdf, 06.07.2020
- [INGPULS 2020] Ingpuls GmbH: <https://ingpuls.de/>, 26.06.2020.
- [IRIE 1998] Irie, M.: Shape Memory Polymers. In: Otsuka, K.; Wayman, C. M.: Shape Memory Materials, S. 203-219. Cambridge University Press, 1998.
- [JANOCHA 1992] Janocha, H.: Aktoren. Grundlagen und Anwendungen. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1992.
- [JANOCHA 2007] Janocha, H.: Adaptronics and Smart Structures. Basics, Materials, Design and Applications. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [JANOCHA 2010] Janocha, H.: Unkonventionelle Aktoren. Eine Einführung. München: Oldenburg Wissenschaftsverlag GmbH, 2010.
- [JIN 2002] Jin, X.; Marioni, M.; Bono, D.; Allen, S. M.; O'Handley, R. C.; Hsu T. Y.: Empirical mapping of Ni-Mn-Ga properties with composition and valence electron concentration. In: Journal of Applied Physics 91, 8222, 13.5.2002.
- [JUST 2001] Just, E.: Entwicklung eines Formgedächtnis-Mikrogreifers. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe (T. H.), 2001.
- [KAAL 2014] Kaal, W.: Dielektrische Elastomer-Stapelaktoren mit gelochten Elektroden für strukturdynamische Anwendungen. Dissertation Fachbereich Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt, 2014.
- [KASPER 1998] Kasper, R.; Theis, T.; Kayser, A.: Block-Oriented Modeling of Adaptive Mechanical Systems. In: Proceedings of the Euromech 373 Colloquium Modelling and Control of Adaptive Mechanical Structures, S. 143-152. Otto-von-Guericke University of Magdeburg, 11.-13.3.1998.

- [KEHL 1999] Kehl, G.: Gestaltung von Formgedächtnis-Aktorsystemen für sensorgeführte Inspektionsgeräte. Dissertation, Fakultät Konstruktions- und Fertigungstechnik der Universität Stuttgart, Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen. Stuttgart, 1999.
- [KEUERLEBER 2006] Keuerleber, M.: Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Kunststoffen bei hohen Dehnraten am Beispiel von PP. Dissertation, Fakultät Maschinenbau der Universität Stuttgart, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde. 2006.
- [KIENZLER & SCHRÖDER 2009] Kienzler, R.; Schröder, R.: Einführung in die Höhere Festigkeitslehre. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [KIM ET AL. 2013] Kim, J.-S.; Lee, J.-Y.; Lee, K.-T.; Kim, H.-S., Ahn, S.-H.: Fabrication of 3D soft morphing structure using shape memory alloy (SMA) wire/polymer skeleton composite. In: Journal of Mechanical Science and Technology 27 (10) (2013) S. 3123-3129.
- [KIM ET AL. 2016] Kim, H.-I.; Han, M.-W.; Song, S.-H.; Ahn, S.-H.: Soft morphing hand driven by SMA tendon wire. In: Composites Part B: Engineering, Vol. 105, 15.11.2016, S. 138-148.
- [KINNAIRD & KIRCHBECK 2018] Kinnaird, C.; Kirchbeck, B.: Wie viele Elektromotoren befinden sich in Ihrem Auto? Onlineartikel vom 21.06.2018: <https://www.next-mobility.news/wie-viele-elektromotoren-befinden-sich-in-ihrem-auto-a-726466/>, 20.05.2020.
- [KLAMSER 2013] Klamser, M.: Entwicklung und Herstellung von Karosseriebauteilen. In: Karosseriebau I, II Impulsvorlesung. Universität Stuttgart, 2013.
- [KNIPPERS 2012] Knippers, J.: Entwicklung der Uni Stuttgart auf der EXPO 2012 in Yeosu, Südkorea. Pflanzenbewegung Pate für kinetische Fassade. https://www.uni-stuttgart.de/universitaet/aktuelles/presseinfo/Entwicklung_der_Uni_Stuttgart_auf_der_EXPO_2012_in_Yeosux_Suedkorea/, 25.05.2020.
- [KNOOP ET AL. 2017] Knoop, F.; Lieneke, T.; Schöppner, V.: Reproduzierbarkeit der Maßhaltigkeit im Fused Deposition Modeling. In: Kynast, M.; Eichmann, M.; Witt, G.: Rapid.Tech - International Trade Show & Conference for Additive Manufacturing. Proceedings of the 14th Rapid.Tech Conference, Erfurt, 20.-22.6.2017, S. 52-66.
- [KÖHNLEIN 2000] Köhnlein, J.: Smart Materials - Intelligente Werkstoffe. In: Stahlbau 69, Heft 6, S. 430-440. Ernst & Sohn, 2000.
- [KORMANÍKOVÁ & KORMANÍKOVÁ 2017] Kormaníková, L.; Kormaníková, E.; Katunská, D.: Shape Design and Analysis of Adaptive Structures. In: Procedia Engineering 190, 2017, S. 7-14.
- [KORNBLUH & PELRINE 2008] Kornbluh, R.; Pelrine, R.: High-Performance Acrylic and Silicone Elastomers. In: Carpi, F.; De Rossi, D.; Kornbluh, R.; Pelrine, R.; Sommer-Larsen, P.: Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers. Fundamentals, Materials, Devices, Models and Applications of an Emerging Electroactive Polymer Technology. Elsevier Science, 2008.
- [KORNBLUH ET AL. 1999] Kornbluh, R.; Pelrine, R.; Joseph, J.; Heydt, R.; Pei, Q.: High-field electrostriction of elastomeric polymer dielectrics for actuation. In: 1999 Symposium on Smart Structures and Materials, Newport Beach.
- [KORNBLUH ET AL. 2002] Kornbluh, R.; Pelrine, R.; Pei, Q.; Heydt, R.; Stanford, S.; et al.: Electroelastomers: applications of dielectric elastomer transducers for actuation, generation, and smart structures. In: SPIE's 9th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, 2002, San Diego.
- [KOSSIRA 1996] Kossira, H.: Grundlagen des Leichtbaus. Einführung in die Theorie dünnwandiger stabförmiger Tragwerke. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1996.
- [KOTA ET AL. 2005] Kota, S.; Lu, K.-J.; Kreiner, Z.; Trease, B.; Arenas, J.; Geiger, J.: Design and Application of Compliant Mechanisms for Surgical Tools. In: Journal of Biomechanical Engineering, Vol. 127, 11.2005, S. 981-989.
- [KUNZ 2011] Kunz, J.: Die Querkontraktionszahl in der Konstruktionspraxis. In: KunststoffXtra, 6/2011, S. 27-30. Zug: Sigwerb GmbH.

- [KUNZE ET AL. 2010] Kunze, H.; Drossel, W-G.; Bucht, A.: Multifunktionaler Leichtbau. Leichtbauansätze mittels Adaptronik. In: LiMA-Symposium, Leichtbau, 23.6. Chemnitz, 2010.
- [LACHEISSERIE ET AL. 2005] du Trémolet de Lacheisserie, É.; Gignoux, D.; Schlenker, M.: Magnetism. Materials and Applications. Boston: Springer Science + Business Media, Inc., 2005.
- [LAGOUDAS 2008] Lagoudas D. C.: Shape Memory Alloys. Modeling and Engineering Applications. New York, Springer Science+Business Media, 2008.
- [LANGBEIN & CZECHOWICZ 2013] Langbein, S.; Czechowicz, A.: Konstruktionspraxis Formgedächtnistechnik. Potentiale - Auslegung - Beispiele. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [LANGE ET AL. 2005] Lange, W.; Windel, A.; Kirchner, J.-H.; Lazarus, H.; Schnauber, H.: Kleine ergonomische Datensammlung. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. 10. Aufl., Köln: TÜV-Verlag GmbH, 2005.
- [LÄPPLE 2006] Läpple, V.: Einführung in die Festigkeitslehre. Lehr- und Übungsbuch. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2006.
- [LENDLEIN & GOULD 2019] Lendlein, A.; Gould, O. E. C: Reprogrammable recovery and actuation behaviour of shape- memory polymers. In: Nature Reviews Materials Vol. 4, S. 116-133, 2019.
- [LIN ET AL. 2013] Lin, R.; Zhang, X.; Long, X.; Fatikow, S.: Hybrid flexure hinges. In: Review of Scientific Instruments 84, Nr. 8, S. 085004-1-058004-14. 2013.
- [LINß & ZENTNER 2013] Linß, S. Zentner, L.: Einfluss der Festkörpergelenkkontur auf die Bewegungsgenauigkeit und die Gestaltfestigkeit nachgiebiger Koppelmechanismen. In: 10. Kolloquium Getriebetechnik: Technische Universität Ilmenau, 11.-13.09.2013, Ilmenau. Univ.-Verl. Ilmenau, 2013, S. 355-372. (Berichte der Ilmenauer Mechanismentechnik 2)
- [LINß 2015] Linß, S.: Ein Beitrag zur geometrischen Gestaltung und Optimierung prismatischer Festkörpergelenke in nachgiebigen Koppelmechanismen. Dissertation, Technische Universität Ilmenau Fachgebiet Mechanismentechnik. Ilmenau, 2015.
- [LINß ET AL. 2019] Linß, S.; Henning, S.; Zentner, L.: Modeling and design of flexure hinge-based compliant mechanisms. In: Kinematics. Analysis and Applications. TechOpen, 2019.
- [LIU ET AL. 2007] Liu, C.; Qin, H.; Mather, P. T.: Review of progress in shape-memory polymers. In: Journal of Materials Chemistry, 2007, 17, S. 1543-1558.
- [LIU ET AL. 2014] Liu, Y.; Du, H.; Liu, L.; Leng, J.: Shape memory polymers and their composites in aerospace applications: a review. In: Smart Materials and Structures, S. 1-22, Vol. 23, Nr. 2, 2014.
- [LIU ET AL. 2016] Liu, S. Q.; Zhang, H. B.; Yin, R. X.; Chen, A.; Zhang, W. J.: Flexure Hinge Based Fully Compliant Prosthetic Finger. In: Bi, Y.; Kapoor, S.; Bhatia, R.: Proceedings of SAI Intelligent Systems Conference (IntelliSys) 2016, Vol. 2, S. 839-849. Springer International Publishing AG 2018.
- [LOBONTIU & PAINE 2002] Lobontiu, N.; Paine J. S. N.: Design of Circular Cross-Section Corner-Filletted Flexure Hinges for Three-Dimensional Compliant Mechanisms. In: Journal of mechanical design 124, Nr. 3, S. 479-484, 2002.
- [LOBONTIU 2003] Lobontiu, N.: Compliant Mechanisms. Design of Flexure Hinges. Taylor & Francis, 2003.
- [LOBONTIU ET AL. 2011] Lobontiu, N.; Cullin M.; Ali, M; McFerran Brock, J.: A generalized analytical compliance model for transversely symmetric three-segment flexure hinges. In: Review of Scientific Instruments 82, Nr. 10, S. 105116-1-105116-9, 2011.
- [LOHR ET AL. 2018] Lohr, W.; Härtle, A.; Reinicke, T.: Ermittlung von Materialkennwerten für additiv gefertigte Bauteile im Kreuzverbund nach dem FDM-Verfahren zur numerischen Berechnung der Festigkeitseigenschaften. Wissenschaftlicher Artikel der Universität Siegen, 2018.
- [LUCZAK 1998] Luczak, H.: Arbeitswissenschaften. 2. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer, 1998.

- [LUNZE 2010] Lunze, J.: Regelungstechnik 1. Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen. 10. Aufl., Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- [LUNZE 2014] Lunze, J.: Regelungstechnik 2. Mehrgrößensysteme, Digitale Regelung. 8. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014.
- [MABE ET AL. 2006] Mabe, J. H.; Calkins, F. T.; Butler, G. W.: Boeing's Variable Geometry Chevron, Morphing Aerostructure for Jet Noise Reduction. In: 47th ZIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 1.-4.5.2006, Newport, Rhode Island.
- [MAHNKEN 2015] Mahnken, R.: Lehrbuch der Technischen Mechanik - Elastostatik. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2015.
- [MAIER 2019] Maier, T.: Skript zur Vorlesung Technisches Design. Institut für Konstruktions-technik und Technisches Design, Universität Stuttgart, 2019.
- [MAIER ET AL 2019] Maier, T.; Müller, A.; Holder, D.: Skript zur Vorlesung Fahrzeug-Design. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, 2019.
- [MANN ET AL. 2018] Mann, H.; Schiffelgen, H.; Froiep, R.; Webers, K.: Einführung in die Regelungstechnik. Analoge und digitale Regelung, Fuzzy-Regler, Regel-Realisierung, Software. München: Carl Hanser Verlag, 2018.
- [MATTHIESEN 2002] Matthiesen, S.: Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. Dissertation Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau Universität Karlsruhe (TH), 2002.
- [MEIER ET AL. 2009] Meier, H.; Czechowicz, A.; Haberland, C.: Control loops with detection of inner electrical resistance and fatigue-behaviour by activation of NiTi -Shape Memory Alloys. In: ESOMAT 2009 - 8th European Symposium on Martensitic Transformations 7.-11.09.2009, Prague.
- [MELCHER ET AL. 1998] Melcher, J.; Krajenski, V.; Hanselka, H.: Adaptronik im Automobilbau. Potentiale, Chancen und Notwendigkeiten. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 100, 1998, S. 256-265.
- [MELNIKOVA ET AL. 2014] Melnikova, R.; Ehrmann, A.; Finsterbusch, K.: 3D printing of textile-based structures by Fused Deposition Modelling (FDM) with different polymer materials. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 62, 2014, Global Conference on Polymer and Composite Materials (PCM 2014) 27.-29.5.2014, Ningbo, China.
- [MELTON 1990] Melton, K. N.: Ni-Ti Based Shape Memory Alloys. In: Duerig, T. W.; Melton, K. N.; Stöckel, D.; Wayman, C. M.: Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, S. 21-35. London: Butterworth-Heinemann, 1990.
- [MELZ ET AL. 2006] Melz, T.; Hanselka, H.; Matthias, M.: Adaptronische Systeme für automotiv Anwendungen am Beispiel eines modularen, aktiven Strukturinterfaces. In: Automatisierungstechnik 54, 2006, 6, S. 284-293.
- [MESSEMER ET AL. 2016] Messemer, J.; Kaufmann, T.; Martin, C.; Neises, M.; Schmidt, A.; te Heesen, H.: Untersuchung der Zugfestigkeit von FLM-Zugproben aus PLA bei Variation von Schichtdicke und Füllgrad. In: RteJournal - Fachforum für Rapid Technologie, Vol. 2016, Issue 1, 2016.
- [MIURA & FURUYA 1988] Miura, K.; Furuya, H.: Adaptive Structure Concept for Future Space Applications. In: AIAA Journal, S. 995 - 1002, Vol. 26, No. 8, 08.1988.
- [MIURA 1992] Miura, K.: Adaptive Structures Research at ISAS, 1984-1990. In: Journal of Intelligent Material Systems and Structures, S. 54-74, Vol. 3, 01.1992.
- [MONNER 2020] Monner, H. P.: Adaptronik. Die Adaptronik-Pioniere in Europa: https://www.dlr.de/fa/desktopdefault.aspx/tabid-10597/18454_read-43036/, 20.05.2020

- [MÜLLER 2010] Müller, A.: Systematische und nutzerzentrierte Generierung des Pkw-Maßkonzepts als Grundlage des Interior- und Exterior-Design. Dissertation, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design. Stuttgart, 2010.
- [MUSOLFF 2005] Musolff, A.: Formgedächtnislegierungen - Experimentelle Untersuchung und Aufbau von adaptiven Strukturen. Dissertation, Fakultät III - Prozesswissenschaften der Technischen Universität Berlin. Berlin, 2005.
- [MUTLU ET AL. 2015] Mutlu, R.; Alici, G.; in het Panhuis, M.; Spinks, G.: Effect of Flexure Hinge Type on A 3D Printed Fully Compliant Prosthetic Finger. In: IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 7-11.06.2015, S. 790 - 795. Busan, Korea
- [NAGL 2014] Nagl, N.: Komplexe Kontakt- und Materialmodellierung am Beispiel einer Dichtungssimulation. Konferenzbeitrag, Technische Universität Chemnitz, 2014.
- [NAKAJIMA ET AL. 1985] Nakajima, Y.; Hayashi, T.; Hayashi, I.; Uchino, K.: Electrostrictive Properties of PMN Stacked Actuator. In: Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 24, No. 2, 02.1985, S. 235-238.
- [NEUMANN 1995] Neumann, D.: Bausteine „intelligenter“ Technik von morgen: Funktionswerkstoffe in der Adaptronik. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1995.
- [NEUMANN 2017] Neumann, D.: Persönliche Kommunikation über Adaptronik per E-Mail, 2.-5.3.2017.
- [OBERHOFER & HEIN ET AL. 2018] Oberhofer, F.; Hein, A.; Holder, D.; Maier, T.: Approach to a Design Guideline Regarding the Interaction of Shape Memory Alloys and Fused Deposition Modeling. In Karwowski, W.; Ahram, T. (Hrsg.): Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Human Systems Integration (IHSI 2019): Integrating People and Intelligent Systems, S. 621-627.
- [OLABI & GRUNWALD 2008] Olabi, A. G.; Grunwald, A.: Design and application of magnetostrictive materials. In: Materials and Design 29, 2008, S. 469-483.
- [PAGEL 2012] Pagel, K.: Einsatz von Formgedächtnislegierungen im Automobil. In: Vortrag auf dem VDI-FGL Expertenforum „Einblicke in die Formgedächtnistechnologie“, 26.6.2012, Dresden.
- [PAGEL 2014] Pagel, K.: Smart materials for automotive and aircraft design. Materials, basics and examples. Presentation held at Elmia Subcontractor, 11.-14.11.2014, Jönköping.
- [PARISCH 2003] Parisch, H.: Festkörper-Kontinuumsmechanik. Von der Grundgleichung zur Lösung mit Finiten Elementen. Stuttgart: B. G. Teubner, 2003.
- [PAROS & WEISBORD 1965] Paros, J. M.; Weisbord, L.: How to design Flexure Hinges. In: Machine Design Vol. 37, No. 27. The Penton Publishing, 1965.
- [PELRINE ET AL. 2000] Pelrine, R.; Kornbluh, R.; Pei, Q.; Joseph, J.: High-Speed Electrically Actuated Elastomers with Strain Greater Than 100%. In: Science, Vol. 287, 4.2.2000.
- [PELRINE ET AL. 2001] Pelrine, R.; Kornbluh, R.; Eckerle, J.; Jeuck, P.; Oh, S.; et al.: Dielectric elastomers: generator mode fundamentals and applications. In: SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, 2001, Newport Beach.
- [PILATE ET AL. 2016] Pilate, F.; Toncheva, A.; Dubois, P.; Raquez, J.-M.: Shape-memory polymers for multiple applications in the materials world. In: European Polymer Journal Vol. 80, 2016, S. 268-294.
- [PONS ET AL. 1997] Pons, J. L.; Reynaerts, D.; Peirs, J.; Ceres, R.; VanBrussel, H.: Comparison of Different Control Approaches to Drive SMA Actuators. In: IEEE, ICAR 97, 7.-9.6.1997, Monterey, CA.
- [PRITSCHOW 1998] Pritschow, G.; Wurst, K.-H.; Kehl, G.: Design and Control of Parallel SMA-Actuator Systems for Adaptive Structures. In: Proceedings of the Euromech 373 Colloquium Modelling and Control of Adaptive Mechanical Structures, S. 375-384. Otto-von-Guericke University of Magdeburg, 11.-13.3.1998.

- [PRITSCHOW ET AL. 2000] Pritschow, G.; Wadehn, W.; Kehl, G.: Simulation of Adaptive Structures with Shape Memory Alloys. In: IFAC Conference on Mechatronic Systems, 18.-20.9.2000, Darmstadt.
- [RANKOUHI ET AL. 2016] Rankouhi, B.; Javadpour, S.; Delfanian, F.; Letcher, T.: Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS With Respect to Layer Thickness and Orientation. In: Journal of Failure Analysis and Prevention, Vol. 16, S. 467-481, 2016.
- [REDINIOTIS ET AL. 1997] Rediniotis, O.; Lagoudas, D.; Mashio, T.; Garner, L.; Qidwai, M.: Theoretical and experimental investigations of an active hydrofoil with SMA actuators. In: Proc. SPIE 3039, Smart Structures and Materials 1997: Mathematics and Control in Smart Structures, 13.6.1997.
- [RICHARD & SANDER 2016] Richard H. A.; Sander M.: Technische Mechanik. Statik. Mit Praxisbeispielen, Klausuraufgaben und Lösungen. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [RITTER 2007] Ritter, A.: smart materials in architektur, innenarchitektur und design. Basel: Birkhäuser - Verlag für Architektur, 2007.
- [ROBOTSHOP 2020] RobotShop Inc.: <https://www.robotshop.com>, 07.07.2020.
- [RODENACKER 1970] Rodenacker, W. G.: Methodisches Konstruieren. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1970.
- [RODRIGUE ET AL. 2014] Rodrigue, H.; Wang, W.; Bhandari, B.; Han, M.-W.; Ahn, S.-H.: Cross-Shaped Twisting Structure Using SMA-Based Smart Soft Composite. In: International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Green Technology, Vol. 1, Nr. 2, S. 153-156, 04.2014.
- [RODRIGUE ET AL. 2015] Rodrigue, H.; Wang, W.; Bhandari, B.; Ahn, S.-H.: Fabrication of wrist-like SMA-based actuator by double smart soft composite casting. In: Smart Materials and Structures 24, 2015.
- [ROGERS & AHMAD 1988] Rogers, C. A.; Ahmad, I.: U. S. Army Research Office Workshop. Smart Materials, Structures and Mathematical Issues, 15.-16.9.1988, Virginia.
- [ROSA ET AL. 2017] Rosa, F.; Bordegoni, M.; Dentelli, A.; Sanzone, A.; Sotgiu, S.: Print-in-Place of Interconnected Deformable and Rigid Parts of Articulated Systems. In: Procedia Manufacturing 11, S. 555-562. 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017, 27.-30.6.2017, Modena, Italy.
- [RÖSNER 2015] Rösner, M.: Effiziente räumliche Modelle komplexer nachgiebiger Mechanismen auf Basis elastischer Festkörpergelenke. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg. Hamburg, 2015.
- [ROSSMANN & TROPEA 2005] Rossmann, T.; Tropea, C.: Bionik. Aktuelle Forschungsergebnisse in Natur-, Ingenieur- und Geisteswissenschaft. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- [ROTH 1996] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 3: Verbindungen und Verschlüsse, Lösungsfindung. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1996.
- [ROTH 2000] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 1: Konstruktionslehre. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2000.
- [RSCOMPONENTS 2020] RS Components GmbH: <https://de.rs-online.com>, 07.07.2020.
- [SABURI 1998] Saburi, T.: Ti-Ni shape memory alloys. In: Otsuka, K.; Wayman, C. M.: Shape Memory Materials, S. 49-96. Cambridge University Press, 1998.
- [SCARCIA ET AL. 2017] Scarcia, U.; Berselli, G.; Palli, G.; Melchiorri, C.: Modeling, Design, and Experimental Evaluation of Rotational Elastic Joints for Underactuated Robotic Fingers. In: IEEE-RAS 17th International Conference on Humanoid Robotics (Humanoids) Birmingham, UK, 15.-17.11.2017, S. 353-358.
- [SCHIEDECK 2009] Schiedeck, F.: Entwicklung eines Modells für Formgedächtnisaktoren im geregelten dynamischen Betrieb. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2009.

- [SCHLICK ET AL. 2010] Schlick, C.; Bruder, R.; Luczak, H.: Arbeitswissenschaft. 3. Aufl., Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- [SCHMID & MAIER 2017] Schmid, M.; Maier, T.: Technisches Interface Design. Anforderungen, Bewertung und Gestaltung. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [SCHMID & MAIER 2019] Schmid, M.; Maier T.: Vorlesung Technisches Interface Design. Universität Stuttgart, 2019.
- [SCHMIDTKE 2013] Schmidtke, H.: Handbuch der Ergonomie. Mit ergonomischen Konstruktionsrichtlinien und Methoden. Band 4, Teil C: Ergonomische Konstruktionsrichtlinien. 2. Auflage, Koblenz: Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr, 2013.
- [SCHULZ ET AL. 2017] Schulz, S., Schlattmann, J., Rosenthal, S.: Konstruktionsrichtlinien für die funktionsgerechte Gestaltung additiv gefertigter Kunststoffgelenke. In: SSP 2017.
- [SCHUMACHER 2013] Schumacher, A.: Optimierung mechanischer Strukturen. Grundlagen und industrielle Anwendung. 2. Aufl., Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- [SEEGER 2005] Seeger, H.: Design technischer Produkte, Produktprogramme und -systeme. Industrial design engineering. 2. Aufl., Berlin: Springer, 2005.
- [SEIDEL 2008] Seidel, M.: Textile Hüllen. Bauen mit biegeweichen Tragelementen. Berlin: Ernst & Sohn, 2008.
- [SHUBHAM ET AL. 2016] Shubham, P.; Sikidar, A.; Chand, T.: The Influence of Layer Thickness on Mechanical Properties of the 3D Printed ABS Polymer by Fused Deposition Modeling. In: Key Engineering Materials, Vol. 706, S. 63-67, 2016.
- [SOBEK ET AL. 2000] Sobek, W.; Haase, W.; Teuffel, P.: Adaptive Systeme. Ernst & Sohn, Stahlbau 69 (2000), Heft 7, S. 544-555.
- [SOBEK ET AL. 2012] Sobek, W.; Sawodny, O.; Grobe, J.: Adaptive Tragwerke: Revolution für ressourcenschonendes Bauen. Ultraleichtbau steht auf Hydraulik. https://www.uni-stuttgart.de/universitaet/aktuelles/presseinfo/Adaptive_structuresx_Revolution_for_sustainable_construction/, 26.06.2020.
- [SRINIVASAN & MCFARLAND 2001] Srinivasan, A. V.; McFarland, D. M.: Smart Structures. Analysis and Design. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [SRINIVASAN ET AL. 1991] Srinivasan, A. V.; Cutts, D. G.; Schetky, L. M.: Thermal and Mechanical Considerations in Using Shape Memory Alloys to Control Vibrations in Flexible Structures. In: Metallurgical Transactions A, Vol. 22A, S. 623-627, 03.1991.
- [STATISTA 2020] Statista GmbH: Lebensdauer von Autos in Deutschland 2014. <https://de-statista.com/statistik/daten/studie/316498/umfrage/lebensdauer-von-autos-deutschland/>, 06.07.2020.
- [STEINHILPER & KAHLE 1981A] Steinhilper, W.; Kahle, U.: Mit minimalem Werkstoffaufwand. Bauteilquerschnitte und Tragfähigkeiten ermitteln nach Beanspruchungsart. Maschinenmarkt, Würzburg 87 (1981) 73, S. 1516-1518.
- [STEINHILPER & KAHLE 1981B] Steinhilper, W.; Kahle, U.: Symmetrisch, dünnwandig und hohl. Biegung, Schub und Torsion die Gestalt eines Bauteiles. Maschinenmarkt, Würzburg 87 (1981) 73, S. 1548-1550.
- [STIEPER & FÖRST 2012] Steeper, R.; Först, A.: Elektrofachkräfte. BGI 548 Berufsgenossenschaft Holz und Metall. Mainz, 2012.
- [STÖCKEL 1988] Stöckel, D.: Formgedächtnislegierungen. In: Stöckel, D.; Hornbogen, E.; Ritter, F.; Tautzenberger, P.: Legierungen mit Formgedächtnis. Industrielle Nutzung des Shape-Memory-Effektes. Grundlagen, Werkstoffe, Anwendungen, S. 32-63. Ehningen bei Böblingen: expert verlag, 1988.
- [STÖCKEL 1988B] Stöckel, D.: Verbindungs- und Befestigungselemente. In: Stöckel, D.; Hornbogen, E.; Ritter, F.; Tautzenberger, P.: Legierungen mit Formgedächtnis. Industrielle Nutzung des Shape-Memory-Effektes. Grundlagen, Werkstoffe, Anwendungen, S. 122-151. Ehningen bei Böblingen: expert verlag, 1988.

- [STÖCKEL ET AL. 1988] Stöckel, D.; Hornbogen, E.; Ritter, F.; Tautzenberger, P.: Legierungen mit Formgedächtnis. Industrielle Nutzung des Shape-Memory-Effektes. Grundlagen, Werkstoffe, Anwendungen. Ehningen bei Böblingen: expert verlag, 1988.
- [STOMMEL ET AL. 2018] Stommel, M.; Stojek, M.; Korte, W.: FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen. 2. Aufl., München: Carl Hanser Verlag, 2018.
- [STORK 1997] Stork, H.: Aufbau, Modellbildung und Regelung von Formgedächtnis-Aktorsystemen. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1997.
- [STRITTMATTER & GÜMPEL 2011] Strittmatter, J.; Gümpel, P.: Long-Time Stability of Ni-Ti-Shape Memory Alloys for Automotive Safety Systems. In: Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 20, S. 506 - 510, 2011.
- [TAKASHIMA ET AL. 2010] Takashima, K.; Rossitera, J.; Mukaia, T.: McKibben artificial muscle using shape-memory polymer. In: Sensors and Actuators A: Physical. Vol. 164, Issues 1 - 2, 11.-12.2010, S. 116-124.
- [TAUTZENBERGER 1988] Tautzenberger, P.: Shape-Memory-Stellelemente. In: Stöckel, D.; Hornbogen, E.; Ritter, F.; Tautzenberger, P.: Legierungen mit Formgedächtnis. Industrielle Nutzung des Shape-Memory-Effektes. Grundlagen, Werkstoffe, Anwendungen, S. 64 - 102. Ehningen bei Böblingen: expert verlag, 1988.
- [TELLINEN ET AL. 2002] Tellinen, J.; Suorsa, I.; Jääskeläinen, A.; Aaltio I.; Ullakko, K.: Basic Properties of Magnetic Shape Memory Actuators. In: 8th international conference Actuator, Bremen, 10. - 12.6.2002.
- [TEUFFEL 2004] Teuffel, P.: Entwerfen adaptiver Strukturen. Lastpfadmanagement zur Optimierung tragender Leichtbaustrukturen. Dissertation der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren 2004.
- [TORRADO & ROBERSON 2016] Torrado, A. R.; Roberson, D. A.: Failure Analysis and Anisotropy Evaluation of 3D-Printed Tensile Test Specimens of Different Geometries and Print Raster Patterns. In: Journal of Failure Analysis and Prevention, Vol. 16, S. 154-164, 2016.
- [TYMRAK ET AL. 2014] Tymrak, B. M.; Kreiger, M.; Pearce, M.: Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. In: Materials & Design, Vol. 58, 06.2014, S. 242-246.
- [ULTIMAKER 2020] Ultimaker B.V.: <https://ultimaker.com/de/software/ultimaker-cura>, 05.07.2020.
- [UMEDACHI ET AL. 2013] Umedachi, T.; Vikas, V.; Trimmer, B. A.: Highly Deformable 3-D Printed Soft Robot Generating Inching and Crawling Locomotions with Variable Friction Legs. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) 3.-7.11.2013, Tokyo, Japan.
- [UNDISZ 2009] Undisz, A.: Optimierung von strukturellen und funktionellen Eigenschaften von NiTi mit Pseudoelastizität/Formgedächtnis für den medizinischen Einsatz. Dissertation, Physikalisch-Astronomischen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2009.
- [VAN HUMBEECK 2001] Van Humbeeck, J.: Shape Memory Alloys: A Material and a Technology. In: Advanced Engineering Materials, 3, No. 11, S. 837-850. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH, 2001.
- [VAN HUMBEECK ET AL. 1991] Van Humbeeck, J.; Chandrasekaran, M.; Delaey, L.: Shape memory alloys: materials in action. In: Endeavour, New Series, Vol. 15, No. 4, S. 148-154, 1991.
- [VDI 2221 2019] VDI 2221: Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung. Blatt 1. Düsseldorf, 2019.
- [VDI 2248 2019A] VDI 2248: Produktentwicklung mit Formgedächtnislegierungen (FGL). Grundlagen und Anwendungsbeispiele. Blatt 1. Düsseldorf, 2019.
- [VDI 2248 2019B] VDI 2248: Produktentwicklung mit Formgedächtnislegierungen (FGL). Werkstoffauswahl und Nomenklatur. Blatt 2. Düsseldorf, 2019.
- [VDI 2248 2019C] VDI 2248: Produktentwicklung mit Formgedächtnislegierungen (FGL). Prüf- und Messmethoden. Blatt 3. Düsseldorf, 2019.

- [VDI 2248 2019D] VDI 2248: Produktentwicklung mit Formgedächtnislegierungen (FGL). Simulation und Modellentwicklung. Blatt 4. Düsseldorf, 2019.
- [VDI 2248 2019E] VDI 2248: Produktentwicklung mit Formgedächtnislegierungen (FGL) Entwicklungsmethodik. Blatt 5. Düsseldorf, 2019.
- [VINARICKY 2013] Vinaricky, E.: Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen: Grundlagen, Technologien, Prüfverfahren. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- [VOS 2009] Vos, R.: Mechanics and Applications of Pressure Adaptive Honeycomb. Dissertation, Aerospace Engineering and the Graduate Faculty of the University of Kansas, 2009.
- [WADA ET AL. 1990] Wada, B. K., Fanson, J. L., Crawley, E. F.: Adaptive Structures. In: Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 1, S. 157-174. (1990)
- [WAGG ET AL. 2007] Wagg, D.; Bond, I.; Weaver, P.; Friswell, M.: Adaptive Structures. Engineering Applications. John Wiley & Son Ltd, Chichester, 2007.
- [WAGNER 2017] Wagner, M.: Lineare und nichtlineare FEM. Eine Einführung mit Anwendungen in der Umformsimulation mit LS-DYNA®. Wiesbaden: Springer Fachmedien GmbH, 2017.
- [WANG ET AL. 2016A] Wang, W.; Rodrigue, H.; Kim, H.-I.; Han, M.-W.; Ahn, S.-H.: Soft composite hinge actuator and application to compliant robotic gripper. In: Composites Part B: Engineering, Vol. 98, 1.8.2016, S. 397-405.
- [WANG ET AL. 2016B] Wang, W.; Rodrigue, H.; Ahn, S.-H.: Deployable Soft Composite Structures. In: Scientific Reports Vol. 6, Artikel Nr. 20869, 2016.
- [WANG ET AL. 2020] Wang, Q.; Senatore, G.; Jansen, K.; Habraken, A.; Teuffel, P.: Design and characterization of variable stiffness structural joints. In: Materials & Design, Vol. 187, 02.2020.
- [WAYMAN & DUERIG 1990] Wayman, C. M.; Duerig, T. W.: An Introduction to Martensite and Shape Memory. In: Engineering Aspects of Shape Memory Alloys 1990, S. 3-20.
- [WEBER 1998] Weber Ch.-T., Cao, X.; Poetzsch, R.; Schulz, I.: Optimization of Control Force Induction in Adaptive Structures. In: Proceedings of the Euromech 373 Colloquium Modelling and Control of Adaptive Mechanical Structures, S. 189-198. Otto-von-Guericke University of Magdeburg, 11.-13.3. 1998.
- [WEILANDT 2007] Weilandt, A.: Adaptivität bei Flächentragwerken. Dissertation der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, 2007.
- [WINNER ET AL. 2015] Winner, H.; Hakuli, S.; Lotz, F.; Singer, C.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. 3. Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [WRIGGERS 2001] Wriggers, P.: Nichtlineare Finite-Elemente-Methoden. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2001.
- [XIAO & GAO 2017] Xiao, J.; Gao, Y.: The manufacture of 3D printing of medical grade TPU. In: Progress in Additive Manufacturing Vol. 2, S. 117-123, 2017.
- [YAMAMOTO ET AL. 2000] Yamamoto, Y.; Makino, T.; Matsui, H.: Micro Positioning and Actuation Devices Using Giant Magnetostriction Materials. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, S. 3636-3640. San Francisco, 2000.
- [ZACHER & REUTER 2014] Zacher, S.; Reuter, M.: Regelungstechnik für Ingenieure. Analyse, Simulation und Entwurf von Regelkreisen. 14. Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [ZIMMERMAN ET AL. 2009] Zimmerman, E.; Muntean, V.; Melz, T.; Seipel, B.; Koch, T.: Novel Pre-Crash-Actuator-System based on SMA for Enhancing Side Impact Safety. In: Meyer, G.; Valldorf, J.; Gessner W.: Advanced Microsystems for Automotive Applications, S. 49 - 64. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [ZWICKY 1966] Zwicky, F.: Entdecken - Erfinden - Forschen im morphologischen Weltbild. München, Zürich: Droemer/Knauer, 1966.

Anhang

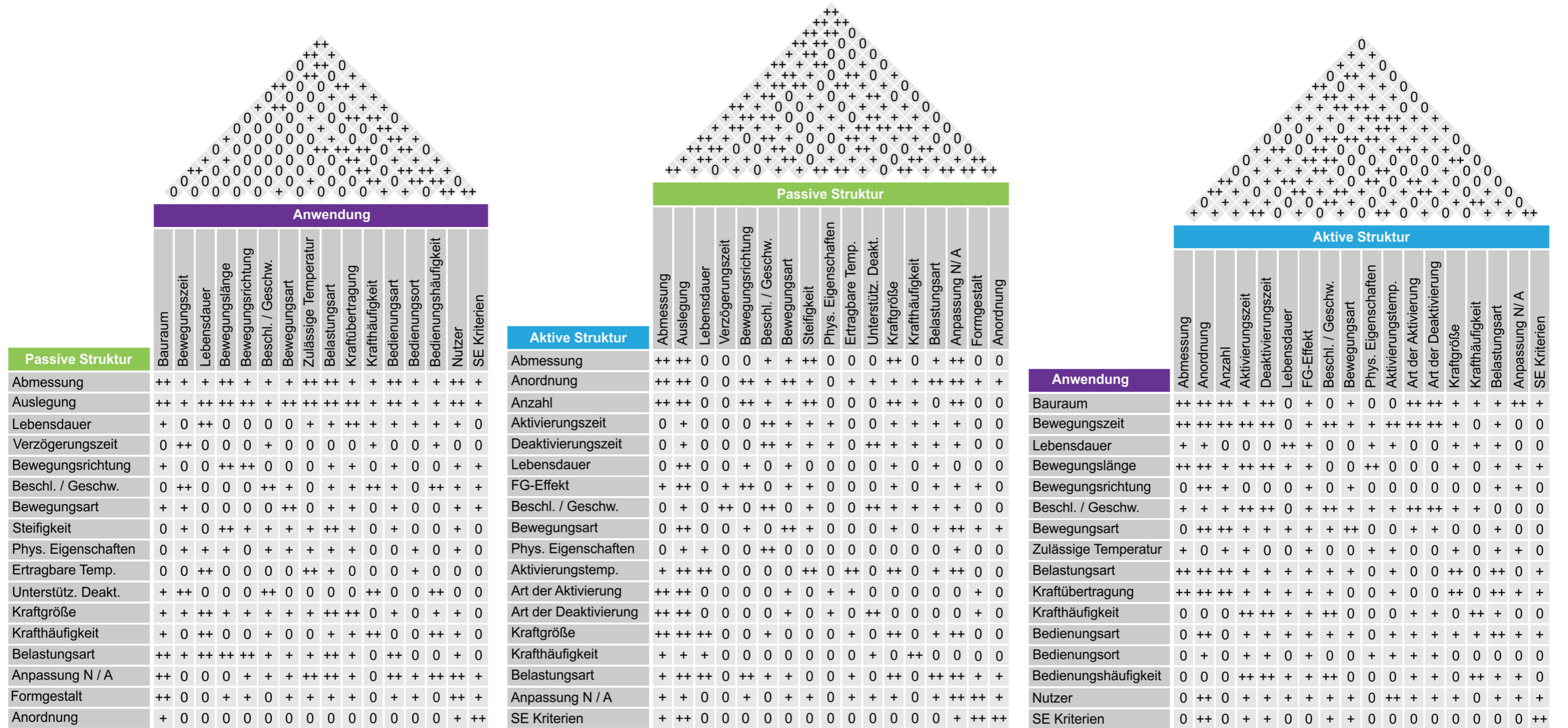


Abbildung A.1: Paarweiser Vergleich der passiven und aktiven Struktur sowie der Anwendung

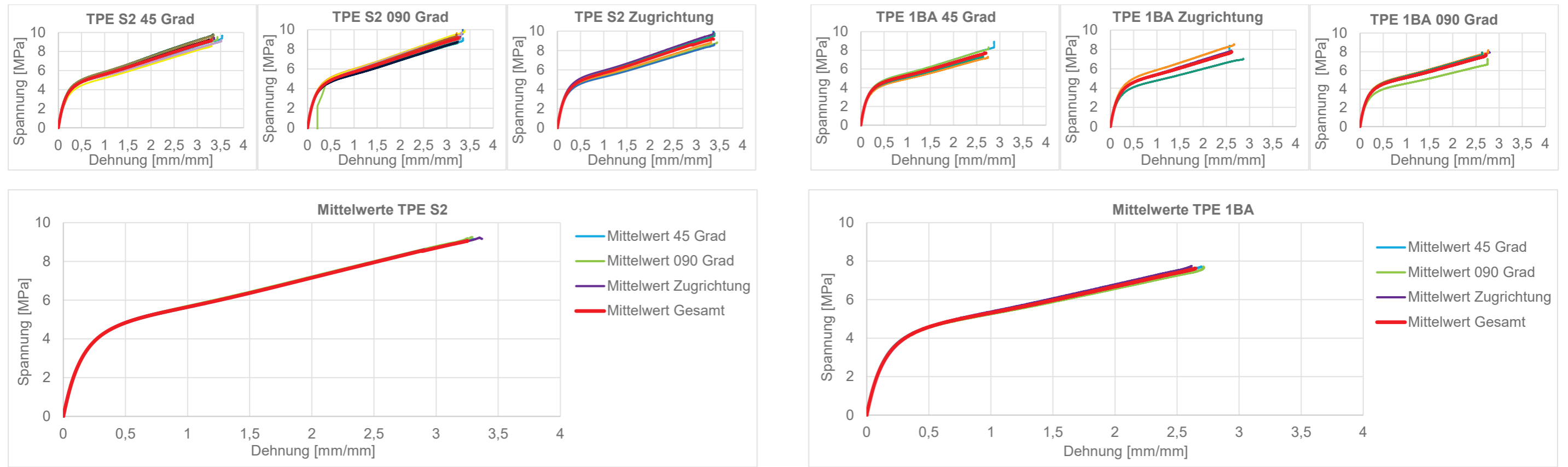


Abbildung A.2: Ergebnisse Zugversuch TPE

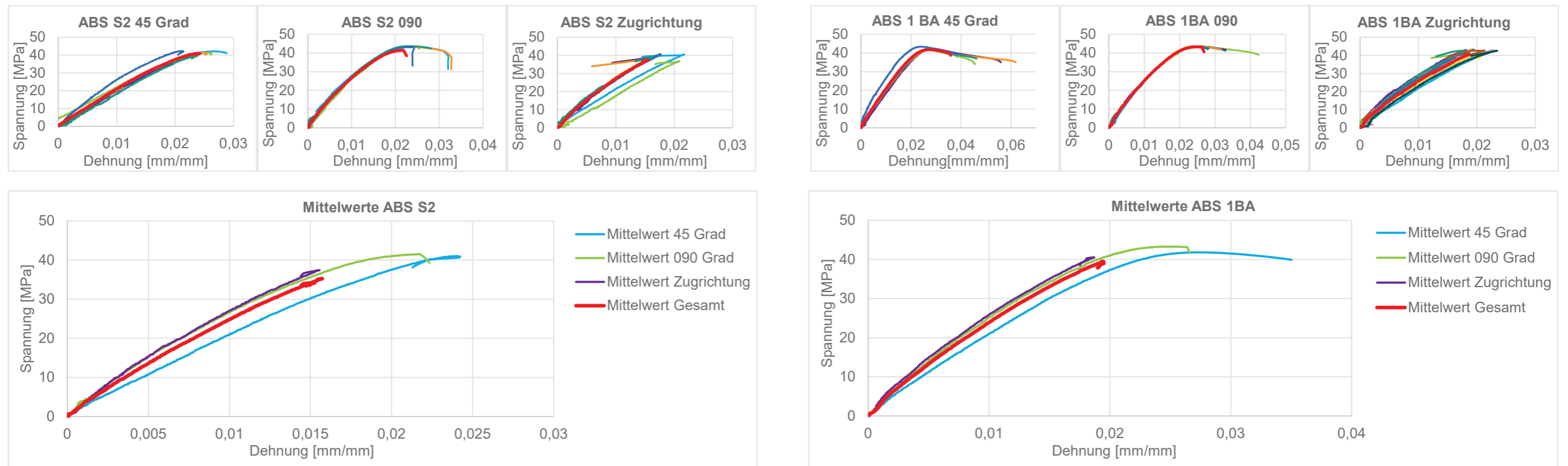


Abbildung A.3: Ergebnisse Zugversuch ABS

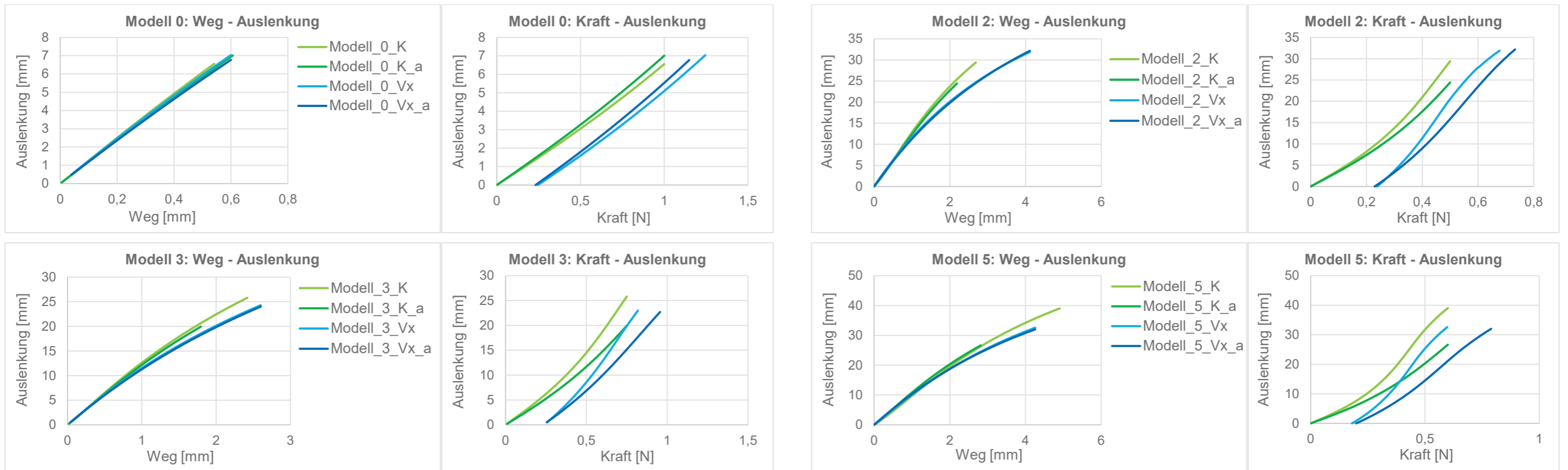


Abbildung A.4: Ergebnisse der Simulation von Kraft (K) und Verschiebung (Vx) des CAD-Modells und des angepassten Modells (a) von TPE

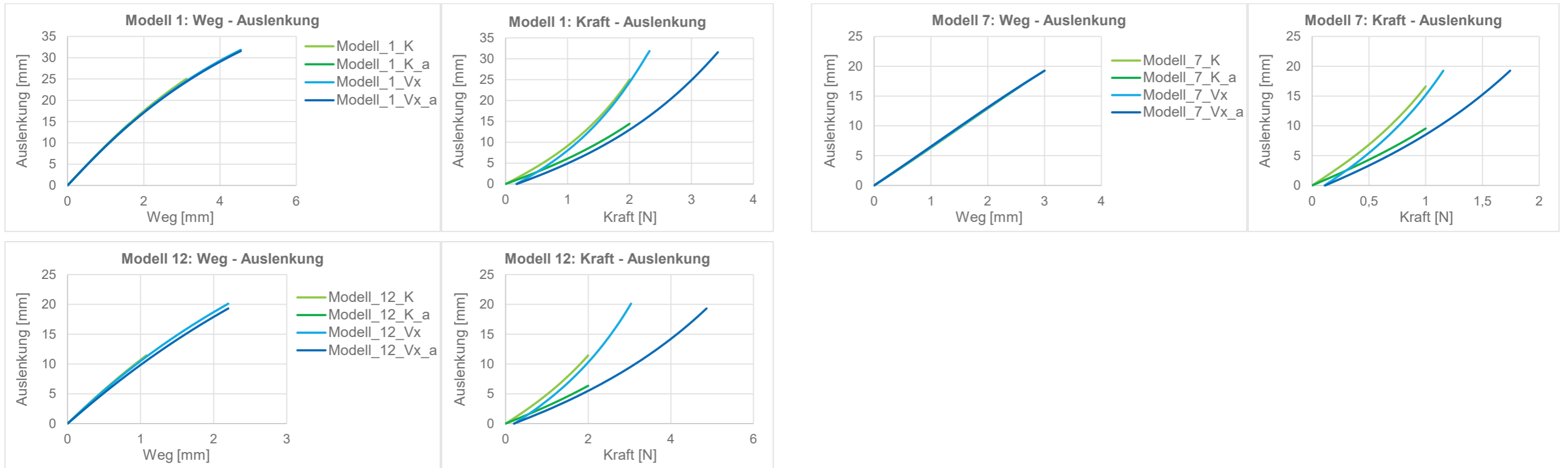


Abbildung A.5: Ergebnisse der Simulation von Kraft (K) und Verschiebung (Vx) des CAD-Modells und des angepassten Modells (a) von ABS

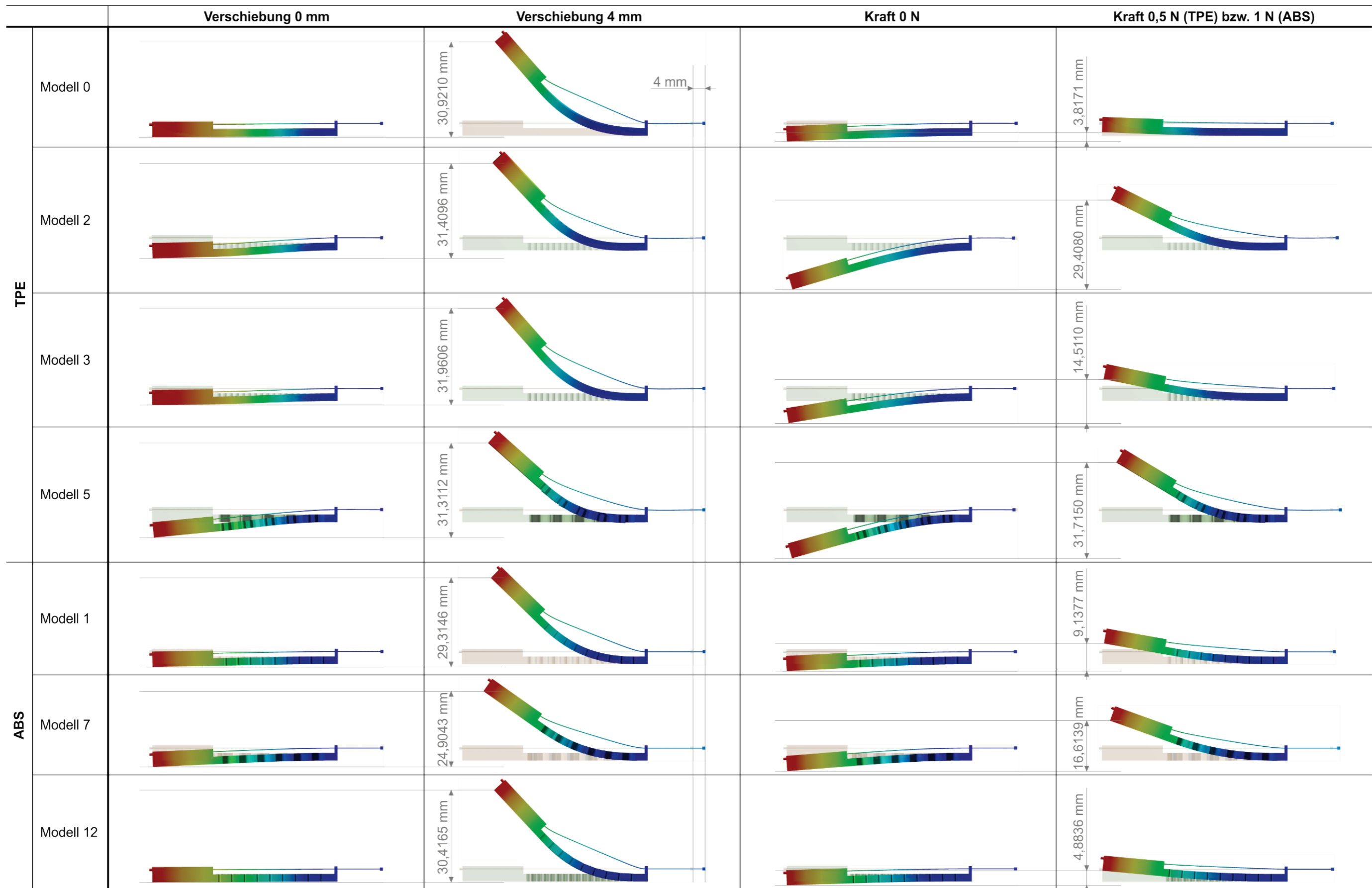


Tabelle A.1: Darstellung der Ergebnisse von Verschiebung (V) und Kraft (K) der simulierten Modelle

Lebenslauf

Persönliche Angaben:

Name: Andrea Hein
Geburtsdatum: 19.03.1989
Geburtsort: Herrenberg
Staatsangehörigkeit: deutsch

Ausbildung:

09/1999 - 09/2008 Schickhardt Gymnasium Herrenberg
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

10/2008 - 04/2012 Studium der Mechatronik an der Universität Stuttgart
Schwerpunkte: Elektrotechnik, Informationstechnik sowie
Steuerungs- und Regelungstechnik
Abschluss: Bachelor of Science

04/2012 - 12/2014 Studium des Maschinenbaus an der Universität Stuttgart
Spezialisierung: Fahrzeugtechnik und Konstruktionstechnik
Abschluss: Master of Science

Beruflicher Werdegang:

01/2015 - 09/2020 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Konstruktions-
technik und Technisches Design (IKTD), Forschungs- und
Lehrgebiet Technisches Design der Universität Stuttgart

seit 10/2020 Mitarbeiterin bei der Firma ANDREAS STIHL AG & Co. KG
im Bereich Vorentwicklung Motorgeräte Funktion, Sensorik,
Aktorik

ISBN-13: 978-3-946924-16-6