

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Fragestellung und Motivation .....	1
1.2 Ziel und Struktur des Buches .....	2
<b>2 Grundlagen der Formgedächtnistechnik .....</b>	<b>3</b>
2.1 Werkstoffwissenschaftliche Grundlagen.....	3
2.2 Formgedächtniseffekte .....	5
2.2.1 Einwegeeffekt (EWE).....	5
2.2.2 Zweiwegeeffekt (ZWE) .....	6
2.2.3 Pseudoelastizität.....	7
2.3 Legierungstypen.....	8
2.3.1 Einfluss des Nickelgehaltes bei einer binären NiTi-Legierung .....	9
2.3.2 Einfluss ternärer Elemente bei einer NiTi-Legierung .....	10
2.4 Fertigung von Formgedächtnisbauteilen .....	11
2.4.1 Verfahren zur Beschichtung.....	11
2.4.2 Verfahren zur Umformung.....	12
2.4.3 Verfahren zur Strukturierung .....	13
2.4.4 Verfahren zur Urformung.....	15
2.5 Einfluss der Wärmebehandlung .....	17
2.5.1 Signifikanz der Wärmebehandlung verdeutlicht an Versuchsergebnissen .....	17
2.6 Leistungsfähigkeit und Temperaturstandfestigkeit .....	26
2.6.1 Lastabhängigkeit des FG-Effektes .....	27
2.6.2 Temperaturabhängigkeit des FG-Effektes.....	28
<b>3 Potentiale der Formgedächtnistechnik.....</b>	<b>30</b>
3.1 Aktoelemente .....	31
3.1.1 Chancen und Risiken.....	32
3.1.2 Anwendungspotentiale .....	34
3.2 Feder-/Dämpfungselemente .....	35
3.2.1 Chancen und Risiken.....	36
3.2.2 Anwendungspotentiale .....	37
3.3 Sensorelemente .....	38
3.3.1 Chancen und Risiken.....	38
3.3.2 Anwendungspotentiale .....	39
<b>4 Sichtweisen von Formgedächtnisaktoren.....</b>	<b>40</b>
4.1 Mechatronische Sichtweise .....	40
4.1.1 Grundlagen.....	40
4.1.2 Wegfall der Sensorik und Informationsverarbeitung .....	41
4.1.3 Wegfall der Informationsverarbeitung .....	43
4.1.4 Wegfall der Sensorik.....	43

4.2	Funktionale Sichtweise .....	44
4.3	Sichtweise als smarte Strukturen .....	47
<b>5</b>	<b>Systemintegration von Formgedächtnisaktoren.....</b>	<b>49</b>
5.1	Aktorbaufomren .....	49
5.2	Rückstellprinzipien .....	51
5.3	Grundlegende Bauweise .....	52
5.4	Erwärmungsprinzipien .....	52
5.5	Verbindungstechnik .....	55
5.5.1	Auswahl der Verbindungstechnik .....	56
5.5.2	Crimpverbindungen .....	57
5.5.3	Kunststoffintegration .....	62
5.5.4	Vergleich verschiedener Verbindungstechniken.....	66
5.6	Elektrische Kontaktierung.....	67
<b>6</b>	<b>Besondere Bauweisen von Formgedächtnisaktoren.....</b>	<b>68</b>
6.1	Dünnenschichtverbund-Bauweise .....	68
6.1.1	Grundlagen.....	68
6.1.2	Konzeption der Formgedächtniselemente .....	70
6.1.3	Entwurf der Formgedächtniselemente .....	70
6.1.4	Herstellung der Schichtverbundelemente.....	71
6.1.5	Messwerte und Funktionsweise der Aktorelemente.....	72
6.1.6	Anwendungs- und Herstellungskonzepte .....	73
6.2	Agonist-Antagonist-Bauweise .....	74
6.2.1	Grundlagen.....	74
6.2.2	Versuche zur Charakterisierung der Agonist-Antagonist-Bauweise.....	75
6.2.3	Versuche an einem Demonstrator .....	79
6.3	Partiell aktivierte Bauweise .....	80
6.4	Beispiele spezieller Aktorbauweisen .....	83
6.4.1	Multiaktorsystem .....	83
6.4.2	Harmonic Drive Schrittantrieb.....	84
<b>7</b>	<b>Analytische Auslegung von Formgedächtnisaktoren .....</b>	<b>85</b>
7.1	Dimensionierung von Formgedächtnis-Drahtaktoren .....	85
7.2	Dimensionierung von Formgedächtnis-Federaktoren .....	89
<b>8</b>	<b>Numerische Auslegung von Formgedächtnisaktoren .....</b>	<b>95</b>
8.1	Grundlagen.....	95
8.1.1	Berechnung der Dehnungsanteile des Formgedächtnisaktors .....	97
8.1.2	Berechnung der Konvektion .....	98
8.1.3	Berechnung der Drahttemperatur .....	98
8.1.4	Berechnung des Phasenumwandlungsgrades $\xi$ (Martensitanteil):.....	99
8.2	Geregeltes Simulationsmodell .....	102
8.3	Validierung des Simulationsmodells.....	103
8.4	Ursachen für die Abweichungen des Simulationsmodells .....	105

<b>9</b>	<b>Regelungsstrategien für Formgedächtnisaktoren .....</b>	<b>107</b>
9.1	Grundlagen.....	107
9.2	Nutzung des internen Sensoreffektes .....	108
9.2.1	Sensoreffekt von Formgedächtnisaktoren .....	108
9.2.2	Sensoreffekt von pseudoelastischen Formgedächtniskomponenten.....	112
9.3	Einfache Regler.....	113
9.3.1	Abschaltregelung von Formgedächtnisaktoren .....	113
9.3.2	Zustandsüberwachung von Aktorelementen .....	116
9.3.3	Zustandsüberwachung von pseudoelastischen Formgedächtniselementen	118
9.4	Adaptive Regler .....	119
9.4.1	Positionsregelung von Formgedächtnisaktoren.....	119
9.4.2	PI-Reglercharakteristik für widerstandsrückgekoppelte FG-Systeme.....	122
9.4.3	Regelung von pseudoelastischen Elementeneigenschaften.....	123
<b>10</b>	<b>Kritische Eigenschaften von Formgedächtnislegierungen.....</b>	<b>126</b>
10.1	Ermüdungsverhalten .....	127
10.1.1	Klassifizierung des Ermüdungsverhaltens .....	127
10.1.2	Einfluss der Verbindungstechnik .....	128
10.1.3	Einfluss von Stellweg und Last.....	130
10.1.4	Einfluss von Legierungselementen .....	131
10.2	Dynamisches Verhalten .....	133
10.2.1	Klassifizierung des dynamischen Verhaltens.....	133
10.2.2	Zyklische Dynamik .....	133
10.2.3	Grenzen der zyklischen Dynamik .....	135
10.2.4	Reaktionsdynamik.....	136
10.2.5	Einfluss der mechanischen Vorspannung.....	139
10.3	Optimierungsstrategien hinsichtlich des Ermüdungsverhaltens .....	142
10.3.1	Neue Prinzipien zur Lebensdaueroptimierung .....	142
10.3.2	Veränderung der Bauweise .....	144
10.3.3	Korrektur der Vorspannung .....	146
10.4	Optimierungsstrategien hinsichtlich des dynamischen Verhaltens .....	146
10.4.1	Veränderung der Umgebungsbedingungen .....	147
10.4.2	Veränderung der Umwandlungstemperaturen.....	148
10.4.3	Veränderung der Hysteresebreite .....	149
10.4.4	Veränderung der Form .....	150
<b>11</b>	<b>Anwendungspotentiale von Formgedächtnisaktoren .....</b>	<b>153</b>
11.1	Thermisch aktivierte Systeme .....	153
11.1.1	Anwendungsbeispiele .....	153
11.1.2	Konkurrierende Systeme .....	156
11.1.3	Analyse des Einsatzpotentials .....	159
11.2	Elektrisch aktivierte Systeme .....	160
11.2.1	Konkurrierende Systeme .....	166
11.2.2	Analyse des Einsatzpotentials .....	169
11.3	Anwendungspotentiale aus ökologischer Sicht .....	171
11.3.1	Ressourcenschonung durch Leichtbau .....	172

<b>12 Standardisierungspotentiale von Formgedächtnisaktoren.....</b>	<b>175</b>
12.1 Warum Standardisierung.....	175
12.2 Beispiele von FG-Standardaktoren .....	177
12.2.1 Standardaktor FGA-Basic.....	177
12.2.2 Standardaktor mit übersetzender Trägerstruktur.....	180
12.3 FGL-basierte Baukastensysteme.....	182
12.3.1 Definition von Baukastensystemen.....	182
12.3.2 Beispiel eines FGL-basierten Baukastensystems .....	183
12.3.3 Zukünftige Potentiale von FG-Baukastensystemen .....	186
<b>13 Leitfaden zur Entwicklung von Formgedächtnisaktoren.....</b>	<b>188</b>
13.1 Grundlagen.....	188
13.2 Anforderungsermittlung.....	189
13.3 Klassifizierung der Anforderungen .....	191
13.4 Systementwurf .....	194
<b>14 Entwicklung eines FGL-basierten Pneumatikventils.....</b>	<b>205</b>
14.1 Grundlagen.....	205
14.2 Methodische Konzipierung des FGL-basierten Ventils .....	208
14.2.1 Anforderungsanalyse .....	208
14.2.2 Funktionsstruktur und Wirkprinzipien.....	209
14.2.3 Prinzipielle Lösungsvarianten .....	211
14.2.4 Bewertung – Material, Stromleitung und Abdichtung .....	212
14.3 Methodischer Entwurf des Formgedächtnisaktors .....	212
14.3.1 Erfassung der Randbedingungen und Festlegung der Bauweise.....	212
14.3.2 Konkretisierung der Partitionen und Konzipierung der Effekte.....	214
14.4 Entwurf des FGL-basierten Ventils .....	217
14.4.1 Strömungsverlauf und Aktoreinbau .....	217
14.4.2 Energieversorgung .....	218
14.5 Dimensionierung des Formgedächtnisaktors .....	218
14.6 Überlegungen zur Montage des Systems .....	221
<b>15 Technologietrends in der Formgedächtnistechnik .....</b>	<b>224</b>
15.1 Hochtemperaturlegierungen.....	224
15.2 Adaptive Rückstellung.....	227
15.3 Lokale Konfiguration.....	228
<b>16 Schlusswort.....</b>	<b>232</b>
Literaturverzeichnis.....	235
Abbildungsverzeichnis .....	241
Tabellenverzeichnis .....	246
Sachwortverzeichnis.....	247