

Elektromechanische Systeme der Mikrotechnik und Mechatronik

2. Auflage

Rüdiger G. Ballas • Günther Pfeifer • Roland
Werthschützky

Elektromechanische Systeme der Mikrotechnik und Mechatronik

Dynamischer Entwurf –
Grundlagen und Anwendungen

2. Auflage

 Springer

Dr. Rüdiger G. Ballas
KARL MAYER Textilmaschinenfabrik GmbH
Kompetenzbereich Piezoaktomatik &
Antriebstechnik
Entwicklungszentrum
Bruehlstraße 25
63179 Obertshausen
rballas@karlmayer.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Roland Werthschützky
Technische Universität Darmstadt
FB 18 ET/IT
Institut für Elektromechanische
Konstruktionen
Merckstr. 25
64283 Darmstadt
werthschuetzky@emk.tu-darmstadt.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Günther Pfeifer
Technische Universität Dresden
Fakulät Elektrotechnik und
Informationstechnik
Institut für Halbleiter- und
Mikrosystemtechnik
Nöthnitzer Str. 64
01187 Dresden
guenther.pfeifer@tu-dresden.de

ISBN 978-3-540-89317-2

e-ISBN 978-3-540-89320-2

DOI 10.1007/978-3-540-89320-2

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2000, 2009

Die 1. Auflage ist erschienen unter: Lenk/Pfeifer/Werthschützky: Elektromechanische Systeme

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Einbandgestaltung: eStudio Calamar S.L.

Gedruckt auf säurefreiem Papier

9 8 7 6 5 4 3 2 1

springer.de

Dieses Buch ist unserem Lehrer Prof. Dr.-Ing. habil. Arno Lenk
gewidmet

Vorwort

Im Prozess der technischen Informationsverarbeitung nehmen *elektromechanische Systeme*, bestehend aus miteinander verkoppelten elektrischen und mechanischen Funktionselementen, eine Vorrangstellung ein. Durch sie erfolgt sowohl die Gestaltung der Schnittstelle zwischen dem Menschen und der Informationsverarbeitungseinrichtung als auch die Gestaltung der Schnittstellen mit dem materiellen Prozess bei der messtechnischen Erfassung und aktori-schen Beeinflussung der Prozessgrößen. Zu den Realisierungen elektromechanischer Systeme in Form von Geräten, Baugruppen oder Bauelementen zählen:

- periphere Geräte von Informationsverarbeitungssystemen, wie Drucker, Scanner, Laufwerke und Datenspeicher,
- elektroakustische Geräte, wie Lautsprecher, Mikrofone und Ultraschallwandler,
- Sensoren für die Medizin-, Fahrzeug- und Prozessmesstechnik,
- Aktoren in Form von Kleinantrieben und Präzisionspositioniersystemen.

Diese Aufzählung wird zunehmend durch direktgekoppelte Sensor-Aktor-Systeme mit integrierter Informationsverarbeitung erweitert. Damit erfolgt ein fließender Übergang zu den noch komplexeren elektromechanischen Systemen der *Mechatronik*.

Die Herstellung von elektromechanischen Systemen erfolgt durch weiterentwickelte feinwerktechnische Verfahren als auch durch moderne Technologien der Mikrotechnik und Mikrosystemtechnik. Aber auch die verwendeten Werkstoffe, wie Edelstähle, Keramik, Gläser, Silizium und Quarz, unterliegen einer stetigen Weiterentwicklung.

In der Phase der industriellen Entwicklung von elektromechanischen Systemen bildet der auf einer Lösungskonzeption beruhende *Entwurfsprozess* einen

entscheidenden Abschnitt. Hier erfolgt die Festlegung der geometrischen, elektrischen und technologischen Parameter des Systems auf der Basis eines physikalischen Modells sowie unter Berücksichtigung spezieller Entwurfskriterien und technologischer Randbedingungen. Der geschlossene dynamische Entwurf des Gesamtsystems wird durch die unterschiedlichen Teilsysteme mit elektrischen, mechanischen, akustischen und fluidischen Elementen erschwert.

Das Hauptanliegen dieses Buches besteht daher in der Vermittlung einer physikalisch anschaulichen Entwurfsmethode für komplexe elektromechanische Systeme. Diese Entwurfsmethode beruht auf der für Ingenieure der Elektro- und Informationstechnik bekannten *Netzwerktheorie*. Mit Hilfe der Netzwerktheorie wird das elektromechanische Gesamtsystem in Form einer gemeinsamen schaltungstechnischen Darstellung der unterschiedlichen Teilsysteme einschließlich deren Wechselwirkungen beschrieben. Den konzentrierten bzw. verteilten Bauelementen des Netzwerks werden anschaulich physikalische Funktionen zugeordnet.

Die Vorteile dieser Entwurfsmethode liegen in der Anwendung der übersichtlichen und anschaulichen Analyseverfahren elektrischer Netzwerke, der Möglichkeit des geschlossenen Entwurfs physikalisch unterschiedlicher Teilsysteme und der Anwendung von vorhandener Schaltungssimulationssoftware.

Voraussetzung für die Anwendung der Netzwerktheorie ist die Strukturierung elektromechanischer Systeme in elektrische, mechanische und akustische Elementarnetze und die Einführung passiver Wandler als Vierpole, die die verlustfreien linearen Wechselwirkungen zwischen den Teilsystemen beschreiben.

Das Buch ist für Studenten der Informationstechnik, der Mess- und Automatisierungstechnik, der Mechatronik, der Akustik sowie der Mikrosystem- und Feinwerktechnik geeignet. Es ermöglicht dem mit der Netzwerktheorie vertrauten Ingenieur der Elektrotechnik einen raschen Einstieg in die Lösung vieler dynamischer Probleme beim Entwurf gekoppelter elektrischer, mechanischer, akustischer und fluidischer Systeme. Aber auch für Ingenieure des Maschinenbaus ist dieses Buch zur Einarbeitung in eine leistungsfähige, praxisorientierte Entwurfsmethodik für *mechatronische Systeme* geeignet. Die erforderlichen Grundkenntnisse zur Netzwerktheorie werden daher einführend in einem Extrakapitel zusammenfassend dargestellt.

Das vorliegende Buch stellt in wesentlichen Teilen eine Überarbeitung und Erweiterung unseres 2001 im Springer-Verlag erschienenen gleichnamigen Buches dar. Die Grundzüge des Buches beruhen auf der von Arno Lenk in den 60er bis 90er Jahren erarbeiteten strukturorientierten Theorie elektromechanischer Systeme. In seinen Büchern „Elektromechanische Systeme – Systeme mit konzentrierten Parametern“ [1], „Elektromechanische Systeme – Systeme mit verteilten Parametern“ [2] und „Elektromechanische Systeme – Systeme mit Hilfsenergie“ [3], die in den 70er Jahren im Verlag Technik erschienen, fasste er die Ergebnisse zusammen. Auch an der ersten Auflage unseres Buches

war er durch eigene Beiträge und kritische Begleitung maßgeblich beteiligt. Hervorzuheben ist hier Kapitel 2, in dem er die wesentlichen Grundlagen zur Beschreibung elektromechanischer Systeme zusammenfasst. Unserem Lehrer, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Arno Lenk, sind wir hierfür als auch für seine stete Unterstützung zu großem Dank verpflichtet.

Unser Dank geht auch an die Herrn Stephan Sindlinger, Stephan Leschka und Eric Starke, deren aktuelle Forschungsergebnisse in die Abschnitte zu den finiten Netzwerkelementen (Leschka, Abschn. 6.3.1 und Sindlinger, Abschn. 6.3.2) und der Kombination von FEM und Netzwerktheorie (Starke, Abschn. 6.4) einfließen. Schließlich möchten wir dem Springer-Verlag für die Möglichkeit der Veröffentlichung und hier besonders Frau Hestermann-Beyerle für die sehr angenehme Zusammenarbeit und die Geduld bei der Manuskriptfertigung danken.

Darmstadt und Dresden, November 2008

Rüdiger G. Ballas, Günther Pfeifer, Roland Werthschützky

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	XVII
-------------------------	------

Teil I Gegenstand des Buchs

1 Einführung	3
1.1 Gegenstand des Buchs	4
1.2 Anwendungsfelder und Beispiele elektromechanischer Systeme	6
1.3 Entwurf elektromechanischer Systeme	9
1.4 Simulationsverfahren für elektromechanische Systeme	11
1.4.1 Historischer Abriss	11
1.4.2 Entwurfsverfahren	13
2 Elektromechanische Netzwerke und Wechselwirkungen	17
2.1 Signalbeschreibung und Signalübertragung in linearen Netzwerken	18
2.1.1 Die Kreisfunktion als Grundbaustein für Zeitfunktionen linearer Netzwerke	18
2.1.2 Fourier-Entwicklung von Zeitfunktionen	22
2.1.3 Fourier-Transformation	27
2.1.4 Laplace-Transformation	36
2.2 Elektrische Netzwerke	39
2.3 Mechanische Netzwerke	42
2.4 Wechselwirkungen	47
2.4.1 Mechanische Wechselwirkungen	47
2.4.2 Elektromechanische Wechselwirkungen	49
2.5 Strukturierte Netzwerkdarstellung linearer dynamischer Systeme	59
2.6 Grundgleichungen linearer Netzwerke	61

Teil II Netzwerkdarstellung konzentrierter und verteilter Systeme

3	Mechanische und akustische Netzwerke mit konzentrierten Parametern	65
3.1	Mechanische Netzwerke für translatorische Bewegungen	66
3.1.1	Vereinbarungen	66
3.1.2	Koordinaten	68
3.1.3	Bauelemente	70
3.1.4	Zusammenschaltungsregeln	79
3.1.5	Isomorphie zwischen mechanischer und elektrischer Schaltung	82
3.1.6	Darstellung des Übertragungsverhaltens von Punktmassensystemen im Frequenzbereich (BODE-Diagramm)	84
3.1.7	Netzwerkdarstellung von Punktmassensystemen	90
3.1.8	Anwendungsbeispiele	93
3.2	Mechanische Netzwerke für rotatorische Bewegungen	104
3.2.1	Koordinaten	105
3.2.2	Bauelemente und Systemgleichungen	106
3.2.3	Isomorphie zwischen mechanischen und elektrischen Schaltungen	109
3.2.4	Beispiel für ein rotatorisches Netzwerk	111
3.3	Akustische Netzwerke	113
3.3.1	Koordinaten	114
3.3.2	Akustische Bauelemente	115
3.3.3	Netzwerkdarstellung akustischer Systeme	118
3.3.4	Reale akustische Bauelemente	119
3.3.5	Isomorphie zwischen akustischer und elektrischer Schaltung	125
3.3.6	Anwendungsbeispiele	127
4	Abstraktes lineares Netzwerk	135
4.1	Koordinaten	135
4.2	Bauelemente	136
4.3	Knoten- und Maschensätze	138
4.4	Eigenschaften des abstrakten linearen Netzwerks	138
5	Mechanische Wandler	143
5.1	Translatorisch-rotatorischer Wandler	143
5.1.1	Starrer Stab	143
5.1.2	Biegestab	147
5.2	Mechanisch-akustischer Wandler	152
5.2.1	Ideale und reale mechanisch-akustische Kolbenwandler	152

5.2.2 Allgemeiner elastomechanisch-akustischer
Plattenwandler 155

5.3 Eigenschaften ausgewählter mechanisch-akustischer Wandler . . 161

6 Mechanische und akustische Netzwerke mit verteilten Parametern 171

6.1 Darstellung mechanischer Systeme als eindimensionale Wellenleiter 171

6.1.1 Dehnwellen in einem Stab 172

6.1.2 Näherungsweise Berechnung der Eingangsimpedanz . . . 178

6.1.3 Näherungsweise Abbildung einer Impedanz bei Resonanz 183

6.1.4 Genäherte Vierpoldarstellung bei Resonanz 184

6.1.5 Biegewellen in einem Stab 190

6.2 Darstellung akustischer Systeme als eindimensionale Wellenleiter 198

6.3 Modellbildung mit finiten Netzwerkelementen bei Wandlerstrukturen 201

6.3.1 Ultraschall-Mikroaktor mit kapazitivem Membranwandler 202

6.3.2 Flüssigkeitsgefülltes Druckübertragungssystem eines Differenzdrucksensors 204

6.4 Kombinierte Simulation mit Netzwerk- und Finite-Elemente-Methoden 210

6.4.1 Verbindung von Netzwerkmethoden und Finite-Elemente-Methoden auf Anwenderebene 210

6.4.2 Kombinierte Simulation am Beispiel eines Dipol-Bass-Lautsprechers 215

6.4.3 Kombinierte Simulation am Beispiel eines Mikrofons mit dünnem akustischen Dämpfungsgewebe 222

Teil III Elektromechanische Wandler

7 Elektromechanische Wechselwirkungen 235

7.1 Klassifikation der elektromechanischen Wechselwirkungen 235

7.2 Netzwerkbeschreibung elektromechanischer Wechselwirkungen 239

8 Magnetische Wandler 253

8.1 Elektrodynamischer Wandler 253

8.1.1 Ableitung Wandlervierpolschaltbild 253

8.1.2 Anwendungsbeispiele 257

8.2 Elektromagnetischer Wandler 270

8.2.1 Ableitung des Wandlervierpolschaltbildes 271

8.2.2 Anwendungsbeispiele 278

8.3	Piezomagnetischer Wandler	288
8.3.1	Ableitung des Wandlervierpolschaltbildes	289
8.3.2	Anwendungsbeispiele	299
9	Elektrische Wandler	307
9.1	Elektrostatischer Wandler	307
9.1.1	Elektrostatischer Plattenwandler	307
9.1.2	Anwendungsbeispiele	317
9.1.3	Elektrostatischer Membranwandler	325
9.1.4	Anwendungsbeispiele	329
9.1.5	Elektrostatische Festkörperwandler	334
9.1.6	Anwendungsbeispiel	335
9.2	Piezelektrische Wandler mit konzentrierten Bauelementen ...	339
9.2.1	Modellvorstellungen zum piezelektrischen Effekt	339
9.2.2	Piezelektrische Zustandsgleichungen und Schaltbild für die eindimensionale Längskopplung	343
9.2.3	Allgemeine piezelektrische Zustandsgleichungen	345
9.2.4	Technisch übliche Konfigurationen piezelektrischer Wandler und zugehörige Ersatzparameter	348
9.2.5	Piezelektrische Bimorph-Biegeelemente	353
9.2.6	Piezelektrische Werkstoffe	355
9.2.7	Anwendungsbeispiele	360
9.3	Piezelektrischer Wandler als eindimensionaler Wellenleiter ...	365
9.3.1	Übergang von konzentrierten Bauelementen zum Wellenleiter am Beispiel eines Beschleunigungssensors ..	366
9.3.2	Piezelektrischer Längsschwinger als Wellenleiter	370
9.3.3	Piezelektrischer Dickenschwinger als Wellenleiter	371
9.3.4	Anwenungsbeispiele von piezelektrischen Längs- und Dickenschwingern	376
9.3.5	Piezelektrisches Biegeelement als Wellenleiter	382
9.3.6	Anwendungsbeispiele von piezelektrischen Biegeelementen	384
10	Reziprozität in linearen Netzwerken	403
10.1	Reziprozitätsbeziehungen in Netzwerken mit nur einer physikalischen Struktur	403
10.2	Reziprozitätsbeziehungen in allgemeinen linearen Vierpolen ...	405
10.3	Elektromechanische Wandler	407
10.4	Mechanisch-akustische Wandler	410

A	Materialkennwerte ausgewählter Werkstoffe	415
A.1	Materialkennwerte von kristallinem Quarz	415
A.2	Piezoelektrische Konstanten von Sensor-Werkstoffen	416
A.3	Materialkennwerte metallischer Konstruktionswerkstoffe	417
A.4	Materialkennwerte von Silizium und Passivierungsschichten ...	418
A.5	Materialkennwerte keramischer Konstruktionswerkstoffe	419
A.6	Materialkennwerte ausgewählter Polymere	420
A.7	Materialkennwerte von Kunststoffen als Konstruktionswerkstoffe	421
A.8	Zusammensetzung und Materialkennwerte ausgewählter Gläser	422
A.9	Materialkennwerte metallischer Lote und Glaslote	423
A.10	Schallgeschwindigkeit und Wellenwiderstand	424
 B	 Zur Signalbeschreibung und -übertragung in linearen Netzwerken	 425
B.1	Fourier-Entwicklung von Zeitfunktionen	425
B.1.1	Abschätzung des Approximationsfehlers bei numerischen Analysen von Fourier-Reihen	425
B.1.2	Anwendungsbeispiel zur periodischen Wiederholung einmaliger Vorgänge	428
B.2	Ideale Stoß- und Sprungfunktionen	431
B.2.1	Problemstellung	431
B.2.2	Ideale Stöße und ihre Systemantwort	431
B.2.3	Die ideale Sprungfunktion und ihre Systemantwort ...	436
B.3	Das Faltungs-Integral	437
 Literatur		 441
 Index		 445

Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Querschnittsfläche, Polfläche	m^2
$\underline{\mathbf{A}}$	Vierpolmatrix	
A_{el}	elektrisch wirksame Fläche	m^2
A_i	Fläche, Stabsegmentfläche	m^2
\underline{A}_{ij}	Vierpolmatrixelemente	
A_K	Kolbenfläche	m^2
A_{mech}	mechanisch wirksame Fläche	m^2
$a(t)$	Beschleunigung	m s^{-2}
\underline{a}	komplexe Beschleunigung (Anregung)	m s^{-2}
$a(\omega), b(\omega)$	Koeffizienten (Fourier-Integraltransformation)	s
a_i, b_i, c_i	Fourierkoeffizienten	s
\mathbf{B}	Vektor der magnetischen Induktion	T
$\underline{B}(p)$	komplexe Übertragungsfunktion (Laplace-Transformation)	
$\underline{B}(\omega)$	komplexe Übertragungsfunktion (Fourier-Transformation)	
\underline{B}	komplexe Amplitude der Übertragungsfunktion	
B_0	magnetische Induktion	T
B_k	Komponente der magnetischen Induktion	T
B_{max}	maximale magnetische Induktion	T
B_S	Sättigungsinduktion	T
b	Breite	m
C	Kapazität	F
C_0	Referenzkapazität	F
C_b	Kapazität (mechanisch festgebremst)	F
C_K	Kabelkapazität	F
C_{nm}	Kapazitätsmatrixelemente	F
$c(\omega)$	Spektraldichten	s
$\underline{c}(\omega)$	Koeffizient (Fourier-Integraltransformation)	s

XVIII Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit
c	Wellengeschwindigkeit	m s^{-1}
\underline{c}_i	komplexer Fourierkoeffizient	s
\underline{c}_i^*	konjugiert komplexer Fourierkoeffizient	s
$c_{ij}^{(Q)}$	elastischer Koeff. für $Q = \text{const.}$	N m^{-1}
c_{ij}^E	elastischer Koeff. für $E = 0$	N m^{-2}
c_{ij}^H	elastischer Koeffizient für $H = 0$	N m^{-2}
c_l	Dehnwellengeschwindigkeit	m s^{-1}
c_L	Schallgeschwindigkeit (Luft)	m s^{-1}
c_p	spez. Wärmekapazität für $p = \text{const.}$	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
c_V	spez. Wärmekapazität für $V = \text{const.}$	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
c_W	Schallgeschwindigkeit (Wasser)	m s^{-1}
D	elektrische Verschiebungsdichte	C m^{-2}
\mathbf{D}	Vektor der elektrischen Verschiebungsdichte	C m^{-2}
D_0	elektrische Referenzverschiebungsdichte	C m^{-2}
D_{el}	elektrisch erzeugte Verschiebungsdichte	C m^{-2}
D_{mech}	mechanisch erzeugte Verschiebungsdichte	C m^{-2}
D_n	Komponente el. Verschiebungsdichte	C m^{-2}
d_{ij}	piezoelektrische Ladungskonstanten	m V^{-1}
d_{ji}	piezomagnetische Flusskonstante	m A^{-1}
d_{eff}	effektiver Abstand	m
E	E-Modul	N m^{-2}
	elektrische Feldstärke	V m^{-1}
\underline{E}	komplexer E-Modul	N m^{-2}
\mathbf{E}	Vektor der elektrischen Feldstärke	V m^{-1}
E_0	elektrische Referenzfeldstärke	V m^{-1}
E_c	Koerzitivfeldstärke	V m^{-1}
E_m	Komponente elektrische Feldstärke	V m^{-1}
E_{max}	maximale elektrische Feldstärke	V m^{-1}
e_{nj}	piezoelektrische Kraftkonstanten	N V^{-1}
e_{jn}	piezomagnetische Kraftkonstanten	$\text{N A}^{-1} \text{m}^{-1}$
$\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$	Einheitsvektoren	
$F(t)$	Kraft	N
$F(p)$	Laplace-Transformierte	
$F(\omega)$	Fourier-Transformierte	
$\underline{F}, \underline{F}_i$	komplexe Kraft	N
\hat{F}	Kraftamplitude	N
\underline{F}_0	Erregerkraft, Quellkraft	N
\underline{F}_B	Bodenkraft	N
F_{el}	Coulomb-Kraft	N
\mathbf{F}_{el}	Vektor der elektrischen Feldkraft	N
$\mathbf{F}_{\text{el},n}$	Vektor el. Feldkraft am Systempunkt n	N
\mathbf{F}_i	Vektor der eingepprägten Kraft	N
F_K	Kurzschlusskraft	N
F_m	Trägheitskraft	N

Symbol	Bedeutung	Einheit
F_{mag}	magnetische Feldkraft	N
\mathbf{F}_{mag}	Vektor der magnetischen Feldkraft	N
$\mathbf{F}_{\text{mag},n}$	Vektor mag. Feldkraft am Systempunkt n	N
F_{max}	maximale Kraft	N
F_{mech}	mechanische Systemkraft	N
$\mathbf{F}_{\text{mech},n}$	Vektor mech. Kraft am Systempunkt n	N
F_n	Federkraft	N
\underline{F}_n	komplexe Federkraft	N
\mathbf{F}_n	Kraftvektor am Systempunkt n	N
\hat{F}_n	Amplitude der Federkraft	N
F_r	Reibungskraft	N
\underline{F}_r	komplexe Reibungskraft	N
\hat{F}_r	Amplitude der Reibungskraft	N
\underline{E}_W	Wandlerkraft	N
F_x, F_y, F_z	Komponenten Kraftvektor	N
f	Frequenz	Hz
$\underline{f}(x)$	komplexe Linienlast	N m^{-1}
f_0	Resonanzfrequenz, Kennfrequenz	Hz
f_g	Grenzfrequenz	Hz
f_P	Parallelresonanzfrequenz	Hz
f_S	Serienresonanzfrequenz	Hz
G	Leitwert	S
	Schubmodul	N m^{-2}
G_i	Proportionalitätsfaktor	
\underline{G}_{mn}	Zweigleitwert	S
$g(t)$	normierte Stoßantwort (Gewichtsfunktion)	1
H	Enthalpie	J
	magnetische Feldstärke	A m^{-1}
$\underline{\mathbf{H}}$	Mitgangsmatrix	
H_m	Komponente der mag. Feldstärke	A m^{-1}
H_{max}	maximale magnetische Feldstärke	A m^{-1}
h	Höhe	m
	translatorische Admittanz	$\text{m s}^{-1} \text{N}^{-1}$
$\underline{h}(\omega)$	komplexe Admittanz	
h_D	Wellenadmittanz	s kg^{-1}
h_i	Schichtdicke (Schicht i)	m
$\underline{h}_{i,j}$	Mitgangsmatrixelemente	
h_R	rotatorische Admittanz	$\text{J}^{-1} \text{s}^{-1}$
I	axiales Flächenträgheitsmoment	m^4
	Integral des DIRAC-Stoßes	s
	Gleichstrom	A
I_0	Speisestrom	A
$i(t)$	Strom	A

Symbol	Bedeutung	Einheit
\hat{i}	Stromamplitude	A
\underline{i}	komplexer Strom	
i	Summationsindex	
\hat{i}_K	Kurzschlussstrom	A
\hat{i}_W	Wandlerstrom	A
J	magnetische Polarisierung	T
j	imaginäre Einheit	
K, M, N	Summationsgrenzen	
K_{el}, K'_{el}	Koeffizienten	
K_{mag}, K'_{mag}	Koeffizienten	
K_i	Konstante	1
$K_{km}^{(\xi)}$	rezipr. Induktivitätskoeffizient bei $\xi = \text{const.}$	H ⁻¹
k	Kopplungsfaktor	1
k_{el}	elektrischer Kopplungsfaktor	1
k_{mech}	mechanischer Kopplungsfaktor	1
$k_{mn,i}$	Kopplungsfaktor (Schicht i)	1
L	Induktivität	H
L_0	Referenzinduktivität	H
L_b	Induktivität (mechanisch festgebremst)	H
l	Länge, Hebellänge, Biegerlänge	m
l_0	Referenzlänge, Ruhelage	m
l_{el}	elektrisch wirksame Länge	m
l_i	Stabsegmentlänge	m
l_{mech}	mechanisch wirksame Länge	m
M	Drehmoment	N m
\underline{M}_0	Erregermoment	N m
\mathbf{M}_i	Drehmomentvektor	N m
\underline{M}_i	komplexes Drehmoment	N m
\underline{M}_W	Wandlermoment	N m
$M_a, M_{a,Si}, M_{ai}$	akustische Massen	kg m ⁻⁴
$M_{a,L}$	akustische Masse bewegter Luft	kg m ⁻⁴
$M_{a,M}$	akustische Masse einer Streifenmembran	kg m ⁻⁴
M_{a0}	akustische Referenzmasse	kg m ⁻⁴
m^*	effektive Masse	kg
m	Masse	kg
m, n	Systempunkte	
m', μ	längenbezogene Masse	kg m ⁻¹
m_{ers}	Ersatzmasse	kg
N_a, N_{ai}	akust. Nachgiebigkeit (adiab. Zustandsänd.)	m ⁵ N ⁻¹
$N_{a,iso}$	akust. Nachgiebigkeit (isoth. Zustandsänd.)	m ⁵ N ⁻¹
$N_{a,K}$	akustische Kurzschlussnachgiebigkeit	m ⁵ N ⁻¹
$N_{a,L}$	akustische Leerlaufnachgiebigkeit	m ⁵ N ⁻¹
$N_{a,M}$	akustische Nachgiebigkeit (Membran)	m ⁵ N ⁻¹
$N_{a,P}$	akustische Nachgiebigkeit (Platte)	m ⁵ N ⁻¹

Symbol	Bedeutung	Einheit
N_{a0}	akustische Referenznachgiebigkeit	$m^5 N^{-1}$
n	mechanische Nachgiebigkeit	$m N^{-1}$
n'	längenbezogene Nachgiebigkeit	N^{-1}
n_0	translatorische Nachgiebigkeit	$m N^{-1}$
n_C	Feldnachgiebigkeit	$m N^{-1}$
n_{ers}	Ersatznachgiebigkeit	$m N^{-1}$
n_K	Kurzschlussnachgiebigkeit, Nachgiebigkeit Piezokeramik	$m N^{-1}$
n_L	Nachgiebigkeit (elektrischer Leerlauf)	$m N^{-1}$
n_{mech}	mechanische Nachgiebigkeit	$m N^{-1}$
n'_R	längenbezogene rotatorische Nachgiebigkeit	$N^{-1} m^{-2}$
n_R	rotatorische Nachgiebigkeit	$N^{-1} m^{-1}$
n_{RK}	rotatorische Kurzschlussnachgiebigkeit	$N^{-1} m^{-1}$
n_{stat}	statische Nachgiebigkeit	$m N^{-1}$
P	Leistung	W
P_a, P_{ak}	abgestrahlte akustische Leistung	W
P_{el}	elektrische Leistung	W
P_{mech}	mechanische Leistung	W
\mathbf{P}	Vektor der Polarisation	$C m^{-2}$
P_i	innere Polarisation	$C m^{-2}$
P_r	remanente Polarisation	$C m^{-2}$
p	komplexe Frequenz	s^{-1}
$p(t)$	Druck	Pa
\hat{p}	Druckamplitude	Pa
p_0	Referenzdruck	Pa
\underline{p}_i	komplexer Druck	Pa
\underline{p}_W	Wandlerdruck	Pa
Q	Ladung	C
Q_0	Referenzladung	C
Q	Resonanzgüte (Güte)	1
Q_{el}	elektrisch erzeugte Ladung	C
Q_{m0}	Referenzpunktladung	C
Q_{mech}	mechanisch erzeugte Ladung	C
Q_n	Ladung am Systempunkt n	C
$q(t)$	Volumenfluss	$m^3 s^{-1}$
\underline{q}_0	Erregervolumenfluss	$m^3 s^{-1}$
\underline{q}_W	Wandlervolumenfluss	$m^3 s^{-1}$
R	allgemeine Gaskonstante	$J mol^{-1} K^{-1}$
R, r	Radius	m
R	Widerstand	Ω
R_i	Innenwiderstand	Ω
R_{mag}	magnetischer Widerstand	H^{-1}
R_{mn}	Zweigwiderstand	Ω
r	Reibungsimpedanz	$N s m^{-1}$

Symbol	Bedeutung	Einheit
r_a	längenbezogener Reibungsbeiwert	N s m^{-2}
\mathbf{r}_i	Ortsvektor (Systempunkt i)	m
r_R	Drehreibungsimpedanz	N m s
S	mechanische Dehnung	1
S_A	Flächendehnung	1
\underline{S}_i	kompl. mechanische Dehnung (Schicht i)	1
S_i	Komponente der mechanischen Dehnung	1
S_{\max}	maximale mechanische Dehnung	1
S_r	remanente mechanische Dehnung	1
S_S	Sättigungsmagnetostriktion	1
$s(t)$	normierte Sprungfunktion	1
s	elastische Konstante	$\text{m}^2 \text{N}^{-1}$
s_{ij}^E	elastische Materialkonstante für $E = 0$	$\text{m}^2 \text{N}^{-1}$
s_{ij}^H	elastische Materialkonstante für $H = 0$	$\text{m}^2 \text{N}^{-1}$
T	mechanische Spannung	N m^{-2}
	Periodendauer	s
T_0	Grundperiodendauer	s
	mechanische Vorspannung	N m^{-2}
	Referenztemperatur	K
T_j	Komponente der mechanischen Spannung	N m^{-2}
\underline{T}	komplexe mechanische Spannung	N m^{-2}
T_M	MAXWELL'sche Spannung	N m^{-2}
T_{\max}	maximale mechanische Spannung	N m^{-2}
t	Zeit	s
U	Gleichspannung	V
U_0	Speisespannung	V
$u(t)$	elektrische Spannung	V
\ddot{u}	Übersetzungsverhältnis	1
\underline{u}_0	Quellspannung	V
\underline{u}_L	komplexe Leerlaufspannung	V
\underline{u}_W	Wandlerspannung	V
V	Volumen	m^3
V_0	Referenzvolumen	m^3
V_A	Ankervolumen	m^3
$v(t)$	Geschwindigkeit	m s^{-1}
\underline{v}	komplexe Geschwindigkeit	m s^{-1}
\underline{v}_L	Leerlaufgeschwindigkeit	m s^{-1}
\underline{v}_S	Geschwindigkeit (Sender)	m s^{-1}
\underline{v}_W	Wandlersgeschwindigkeit	m s^{-1}
W	innere Energie	J
W_{el}	elektrische Feldenergie	J
W_{kin}	kinetische Energie	J
W_{mag}	magnetische Feldenergie	J
W_{mech}	mechanische Energie	J

Symbol	Bedeutung	Einheit
w	Windungszahl	1
	Energiedichte	J m^{-3}
w_{el}	elektrische Feldenergiedichte	J m^{-3}
w_{mag}	magnetische Feldenergiedichte	J m^{-3}
X	transformatorische Wandlerkonstante	
X_m	ausbreitungsfähige Mode	1
\underline{x}	komplexe Eingangsgröße	1
$\underline{x}(t), \tilde{x}(t)$	komplexe Zeitfunktionen	1
$\tilde{x}(t)$	periodische Näherungsfunktion	1
$\tilde{x}^*(t)$	konjugiert komplexe Zeitfunktion	1
x, y, z	Koordinatenachsen	
\hat{x}	Amplitude der Eingangsgröße	1
\bar{x}	arithmetischer Mittelwert	1
x_0	Bezugslage	m
x_1, x_2, x_3	Koordinatenachsen	
Y	gyratorische Wandlerkonstante	
Y^*	imaginäre Wandlerkonstante	
\underline{y}	komplexe Ausgangsgröße	1
\hat{y}	Amplitude der Ausgangsgröße	1
\underline{Z}	elektrische Impedanz	Ω
\underline{Z}_a	akustische Impedanz	N s m^{-5}
$Z_{a,L}$	akustische Reibung bewegter Luft	N s m^{-5}
$Z_{a,r}$	akustische Reibung	N s m^{-5}
Z_{a0}	akustische Referenzreibung	N s m^{-5}
\underline{z}	mechanische Impedanz	kg s^{-1}
z_0	Bezugswellenimpedanz	kg s^{-1}
z_W	Wellenimpedanz	kg s^{-1}
α	linearer Temperatur-Ausdehnungskoeffizient	K^{-1}
$\alpha(\omega), \beta(\omega)$	Koeffizienten (Fourier-Integraltransformation)	s
α, β, γ	abstrakte Bauelemente	
α_f	Temperaturkoeffizient der Resonanzfrequenz	K^{-1}
α_i, β_i	Fourierkoeffizienten	1
β	Wellenzahl	m^{-1}
$\underline{\gamma}$	Ausbreitungskonstante	m^{-1}
	abstrakte Admittanz	
$\underline{\gamma}_{mn}, \underline{\rho}_{mn}$	Matrixelemente	
ΔA	Flächensegment	m^2
ΔC	Kapazitätsänderung	F
ΔC_b	Änderung d. translatorisch festgebremsten Kapazität	F
$\Delta F, \Delta F_i$	Kraftänderung	N
ΔF_{mag}	magnetische Feldkraftänderung	N
Δi	Stromänderung	A
Δl	Längenänderung	m

XXIV Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit
Δm	Massenelement	kg
Δn	Federelement	$\text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$
Δn_{R}	rotatorische Nachgiebigkeit (Balkensegment)	$\text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$
Δn_{RK}	rotatorische Kurzschlussnachgiebigkeit (Balkensegment)	$\text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$
Δp	Druckänderung	Pa
ΔP	Leistungsänderung	W
ΔQ	Ladungsänderung	C
Δr	äquivalent viskose Dämpfung (differentielles Balkenelement)	N s m^{-1}
ΔR	Widerstandsänderung	Ω
Δt	Zeitdifferenz	s
ΔT	Temperaturänderung	K
Δu	Spannungsänderung	V
ΔV	Volumenänderung	m^3
ΔW	Energieänderung	J
ΔW_{el}	elektrische Feldenergieänderung	J
Δx	Stabsegmentlänge, Wegänderung	m
$\Delta \varphi$	Winkeländerung	rad
$\Delta \Phi$	magnetische Flussänderung	Wb
$\Delta \omega$	Kreisfrequenzänderung	s^{-1}
δ	Fehler der Fourierspektraldichte	1
$\delta(t)$	Dirac-Stoß	s^{-1}
ε	Permittivität	
ε_0	elektrische Feldkonstante	F m^{-1}
ε_{mn}^S	Permittivität für $S = 0$	F m^{-1}
ε_{mn}^T	Permittivität für $T = 0$	F m^{-1}
ε_{r}	Dielektrizitätszahl	1
η	Verlustfaktor, Wirkungsgrad	1
θ	Massenträgheitsmoment	kg m^2
ϑ	Temperatur	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_{Curie}	Curie-Temperatur	$^{\circ}\text{C}$
κ	Adiabatexponent	1
λ	Wärmeleitfähigkeit	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
$\lambda, \lambda_{\text{B}}, \lambda_{\text{D}}$	Wellenlänge	m
$\underline{\lambda}_m$	abstrakte Flusskoordinate	1
$\hat{\lambda}$	Amplitude der abstrakten Flusskoordinate	1
μ	Differenzkoordinate	1
	Permeabilität	H m^{-1}
	Spannungsintegral	V s
	Zähigkeit	Pa s
$\hat{\mu}$	Amplitude der abstrakten Differenzkoordinate	1
μ_0	magnetische Feldkonstante	H m^{-1}
μ_{ij}^H	Permeabilität für $H = 0$	H m^{-1}

Symbol	Bedeutung	Einheit
μ_{Luft}	dynamische Viskosität von Luft	Pa s
$\underline{\mu}$	Differenzkoordinate	1
μ_{nm}^T	magnetische Permeabilität bei $T = 0$	H m^{-1}
μ_r	Permeabilitätszahl	1
ν	Querdehnungszahl	1
$\xi(t)$	Auslenkung, Verrückung	m
$\underline{\xi}$	komplexe Verrückung	m
ξ_g	Grenzausschlag	m
ξ_{max}	maximale Auslenkung	m
ρ	Dichte	kg m^{-3}
$\underline{\rho}$	abstrakte Impedanz	
$\rho(x)$	Ladungsdichteverlauf	C m^{-3}
ϱ	Unwuchtamplitude	m
ρ_0	Referenzdichte	kg m^{-3}
ρ_L	Dichte (Luft)	kg m^{-3}
ρ_W	Dichte (Wasser)	kg m^{-3}
σ	Leitwert	S
τ	Stoßzeit	s
Φ	magnetischer Fluss	Wb
Φ_e	magnetischer Fluss im Eisenkreis	Wb
Φ_0	Gleichflussanteil	Wb
φ	Phasenwinkel	rad
φ_0	Bezugswinkel	rad
$\varphi_B(\omega)$	Phasenwinkel der Übertragungsfunktion	rad
φ_i	Phasenwinkel einer harmonischen Schwingungskomponente	rad
φ_n	Phasenwinkel Federkraft	rad
φ_r	Phasenwinkel Reibungskraft	rad
φ_v	Phasenwinkel Geschwindigkeit	rad
φ_x	Phasenwinkel Eingangsgröße	rad
φ_y	Phasenwinkel Ausgangsgröße	rad
χ	Porosität	1
Ω	Winkelgeschwindigkeit	s^{-1}
$\underline{\Omega}$	komplexe Winkelgeschwindigkeit	s^{-1}
$\underline{\Omega}_0$	Erregerwinkelgeschwindigkeit	s^{-1}
$\underline{\Omega}_W$	Wandlerwinkelgeschwindigkeit	s^{-1}
ω	Kreisfrequenz	s^{-1}
ω'	Bezugsfrequenz	s^{-1}
ω_0	Resonanzfrequenz	s^{-1}
ω_g	Grenzkreisfrequenz	s^{-1}
ω_i	charakteristische Frequenz, Kreisfrequenz einer harmonischen Schwingungskomponente	s^{-1}
ω_k	diskrete Kreisfrequenz	s^{-1}

Gegenstand des Buchs

Einführung

Das vorliegende Buch wendet sich vorrangig an Ingenieure und Studenten der Elektrotechnik und Informationstechnik, die im Rahmen der Produktentwicklung oder Forschungsarbeiten von Geräten der Mechatronik deren dynamischen Entwurf herleiten wollen. Dabei handelt es sich um technische Aufgabenstellungen, die stark mit elektronischen, mechanischen und akustischen Funktionselementen verknüpft sind. Diese elektromechanischen Systeme enthalten viele Fragestellungen, die mit den in dem vorliegenden Buch dargestellten Verfahren und Methoden effektiv und gut strukturiert gelöst werden können. Dabei werden vorrangig die dem Elektrotechniker geläufigen Verfahren der Problembehandlung mit Netzwerkmethoden und die in der Elektrotechnik üblichen Methoden zur Behandlung dynamischer Vorgänge angewendet. Die zwischen den elektrischen und mechanischen Teilen eines Systems wirkenden Wandlerelemente und die durchgängige Abbildung des Systems über die Wandlerelemente hinweg bilden den Schwerpunkt der Darstellung. Besonders das funktionelle Verständnis von Rückwirkungsmechanismen, z. B. aus mechanischen oder akustischen Systemteilen in elektrische Systemteile hinein, wird damit ohne Schwierigkeiten ermöglicht. Gerade diese Überlegungen sind für den Elektrotechnikstudenten im Allgemeinen nicht selbstverständlich. Die strukturierte Darstellung gestattet einerseits eine oft hilfreiche gedankliche Zerlegung des Systems in verknüpfte Einzelbaugruppen und gestattet andererseits eine schnelle Berechenbarkeit des dynamischen Verhaltens. Darüber hinaus zwingt die Modellbildung den Anwender bereits zur Konzentration auf den Kern des Systems. Die dabei erforderlichen Einschränkungen durch Annahmen und Näherungen werden in verfeinerten Modellierungsschritten nur soweit abgebaut, wie es für die Lösung des speziellen Problems notwendig ist. Dadurch bleibt das Modell auf einer problemorientierten optimalen Größe. Es werden lineare oder näherungsweise linearisierbare Beziehungen zwischen physikalischen Größen angenommen. Für Vorgänge, die vorrangig einen stark nichtlinearen Effekt ausnutzen oder voraussetzen, sind die vorgestellten Strukturierungs- und Rechenverfahren weniger geeignet. Sie können aber als Ausgangspunkt für iterative Lösungen verwendet werden.

1.1 Gegenstand des Buchs

Der Gegenstand dieses Buches sind Systeme – Geräte, Baugruppen und Bauelemente – der Feinwerk- und Mikrotechnik, die aus miteinander verkoppelten elektrischen, mechanischen und akustischen Funktionselementen bestehen. Die Wechselwirkungen zwischen diesen unterschiedlichen Domänen – elektrische, mechanische und akustische Teilsysteme – erfolgt durch elektrische, magnetische oder mechanische Wandlungsmechanismen. Bemerkenswert bei diesen Wandlungsmechanismen ist die Umkehrbarkeit der Signalverarbeitungsrichtungen, also von der mechanischen auf die elektrische Seite und umgekehrt. In Abbildung 1.1 ist die Grobstruktur der hier betrachteten elektromechanischen Systeme angegeben.

Signalverarbeitungsrichtungen



Grundstruktur

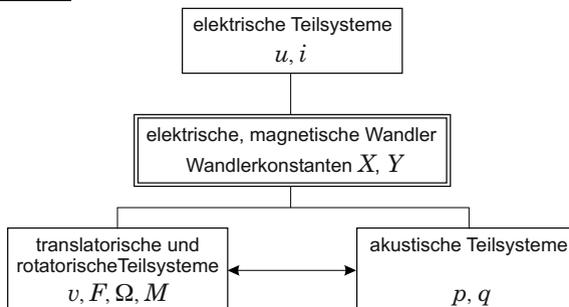


Abbildung 1.1. Signalverarbeitungsrichtungen und Grundstruktur elektromechanischer Systeme

Elektromechanische Systeme als Teilgebiet der Mechatronik beruhen im Entwurf und der Realisierung auf Synergien verschiedener theoretisch und technologisch geprägter Fachdisziplinen. So sind die Entwurfsverfahren durch die Grundlagen der Signal- und Systemtheorie, der Theorie elektrischer und magnetischer Felder, der Akustik und Mechanik sowie der Netzwerktheorie geprägt. Zur Realisierung der Systeme werden Technologien der Feinwerk- und Mikrotechnik, der Mikrosystemtechnik, der Optomechanik und Optoelektronik sowie der Halbleiterelektronik und Schaltungstechnik verwendet. Im Abschnitt 1.2 sind Anwendungsbereiche und aktuelle Produktbeispiele aufgeführt.

Der Schwerpunkt der Analyse und Synthese elektromechanischer Systeme liegt im vorliegenden Buch bei der Bestimmung des Zeitverlaufs der physikalischen Größen (Koordinaten), also beim *dynamischen Systementwurf*, für unterschiedliche Anregungen. Als Beschreibungsverfahren wird die aus der Elektrotechnik bekannte *Netzwerktheorie* verwendet. Auswahlgründe hierfür sind die Möglichkeit einer gut strukturierten und anschaulichen Netzwerkbeschreibung unterschiedlicher Teilsysteme, die vorhandenen ausgereiften und komfortablen Lösungs- und Darstellungsverfahren sowie der leichte Zugang für die Elektrotechniker. Die Grundlagen zur Netzwerkbeschreibung und Wechselwirkungen mit elektrischen und magnetischen Feldern sind im Kapitel 2 zusammengefasst.

Zunächst wird im Abschnitt 2.1 das Basiswissen zur Signalbeschreibung und Signalübertragung in *linearen Netzwerken* behandelt. Diese allgemein gehaltene Darstellung wird nachfolgend auf die elektrischen (Abschn. 2.2) und mechanischen Netzwerke (Abschn. 2.3) angewandt. Anschließend erfolgt die Behandlung der mechanischen und elektromechanischen Wechselwirkungen im Abschnitt 2.4. Diese Darstellungen sind bewusst allgemein gehalten, um dem Leser mit bereits vorhandenen Kenntnissen zur Behandlung gekoppelter elektrischer und mechanischer Systeme die Abgrenzung der in diesem Buch verwendeten Methodik gegenüber alternativen Darstellungen aufzuzeigen. Die Strukturierung der Netzwerkbeschreibung von elektromechanischen Systemen erfolgt abschließend im Abschnitt 2.5.

Im Kapitel 3 wird die Netzwerkdarstellung mechanisch-translatorischer, mechanisch-rotatorischer und akustischer Teilsysteme eingeführt und an Beispielen demonstriert. Nachfolgend wird im Kapitel 4 auf einem höheren Abstraktionsniveau das *allgemeine lineare* Netzwerk behandelt. Diese Ausführungen sind auch auf lineare magnetische und thermische Netzwerke übertragbar.

Die im Kapitel 5 erörterten mechanischen Wandler kennzeichnen die Kopplungsbeziehungen zwischen translatorischen und rotatorischen mechanischen Teilsystemen sowie zwischen mechanischen und akustischen Systemen.

Die bisherige Netzwerkanalyse erfolgte ausschließlich für Systeme mit konzentrierten Parametern. Im Kapitel 6 erfolgt die Erweiterung auf Systeme mit verteilten, also ortsabhängigen, Parametern. Diese Erweiterung ist für höhere Frequenzen der Dehnwellen, bei denen die Wellenlänge in die Größenordnung der Bauelementeabmessungen gelangt, erforderlich. Die Systeme werden als lineare Wellenleiter oder finite Netzwerkelemente beschrieben. Abschließend wird die Erweiterung auf eine kombinierte Simulation von FEM-Berechnungen der Bauelemente und dynamische Analyse durch Netzwerkbeschreibung vorgestellt.

Die Beschreibung der elektromechanischen Wandler erfolgt in den Kapiteln 7 bis 9. Ausgehend von den Grundlagen der elektromechanischen Wechselwirkungen im Kapitel 7 werden in den Kapiteln 8 und 9 die Wandlervierpole für die magnetischen und elektrischen Wandler abgeleitet. Die Anwendung dieser verlustfreien, linearen Wandlervierpole auf ausgewählte Realisierungsbeispiele erfolgt anschließend.

Das den linearen passiven Wandlern eigene Reziprozitätsprinzip wird abschließend im Kapitel 10 nochmals eigenständig dargestellt.

Schließlich sind im Anhang A die Materialkennwerte der für elektromechanische Systeme besonders wichtigen Werkstoffe zusammengestellt. Im Anhang B sind als Ergänzung zum Abschnitt 2.1 weiterführende Grundlagen zur Signalbeschreibung und Signalübertragung in linearen Netzwerken angegeben.

1.2 Anwendungsfelder und Beispiele elektromechanischer Systeme

Eine Übersicht wichtiger Anwendungsbereiche elektromechanischer Systeme mit zugeordneten Beispielen zeigt Tabelle 1.1.

Tabelle 1.1. Anwendungsbereiche und typische Beispiele elektromechanischer Systeme

Anwendungsbereiche	Beispiele
Verfahrenstechnik	Durchfluss- und Drucksensoren (Prozessmesstechnik), elektromagnetische Steleinrichtungen
Kfz-Technik	Silizium-Drehratensensoren, Kleinmotoren, piezoelektrische Einspritzventile
Fahrzeugtechnik (Nutzfahrzeuge, Schienenfahrzeuge, Schiffe, Flugzeuge)	aktive Schalldämpfer, hydraulische Koppelsysteme, Dünnfilm-Drucksensoren, optische und US-Abstands-sensoren
Maschinenbau	piezoelektrische Pneumatikventile, elektrodynamische Positioniersysteme, Schwingungsdämpfer, elektrodynamische Schwingungserreger
Kommunikationstechnik	Mikrofone, Kopfhörer, Lautsprecher, Laser-Drucker, Festplattenlaufwerke, Tintendrucker, Beamer, Kameraobjektive
Hausgerätetechnik	Füllstandssensoren, Kleinmotoren, Heizungsregler
Medizintechnik	Ultraschallwandler, miniaturisierte Druck- und Kraftsensoren, Mikropumpen, Prothetik

Tabelle 1.1 zeigt, dass die Hauptanwendungen elektromechanischer Systeme in Form von Geräten, Baugruppen und integrierten Bauelementen in der Aktorik, z. B. Kleinmotoren und Positioniersysteme, in der Sensorik, z. B. Einzelsensoren und Sensorsysteme, sowie in direkt gekoppelten Sensor-Aktor-Systemen mit integrierter Informationsverarbeitung liegen.

Mit der Ergänzung der traditionellen Feinwerktechnik durch die Mikrotechnik und Mikrosystemtechnik erfolgte die Abmessungsreduzierung von elektromechanischen Systemen bei gleichzeitiger Erhöhung des Integrationsgrades. Die mit diesen Technologien verbundenen typischen Strukturabmessungen sind in Tabelle 1.2 angegeben.

Tabelle 1.2. Bauteilgröße und Strukturabmessungen wichtiger Fertigungstechnologien für elektromechanische Systeme

Fertigungstechnologie	Bearbeitungsverfahren	typische Bauteilgröße	kleinste Strukturabmessung
Feinwerktechnik	NC-Fräsen u. Drehen, Schneiden, Spritzgießen, Funken-erosion, Laser-Schweißen	einige cm ²	> 50 µm
Mikrotechnik	Lithographische Strukturierung, Dünnschichttechnik durch Bedampfen und Sputtern, Mikrogalvanik, Mikroschweißen, dreidimensionales isotropes u. anisotropes Ätzen	> 10 mm ²	< 50 µm
Mikrosystemtechnik	Silizium-Volumen- oder Oberflächen-Mikromechanik mit integrierter Mikroelektronik oder integrierter Optik	< 10 mm ²	< 5 µm

Gleichzeitig mit der Einführung der Mikrotechnik und Mikrosystemtechnik erfolgte die Anwendung neuer Werkstoffe in Sensoren und Aktoren. Hierzu zählen vor allem Silizium, Borosilikatgläser und spezielle Keramiken, wie hochreine Aluminiumoxidkeramik und mechanisch bearbeitbare Low Temperature Cofired Ceramic – LTCC. Diese Werkstoffe zeichnen sich insbesondere durch ihr extrem geringes viskoelastisches und viskoplastisches Verhalten sowie leichte Integrationsmöglichkeiten von elektrischen und optischen Komponenten aus. Die zugehörigen Realisierungen werden als *Micro Electromechanical Systems – MEMS* – bezeichnet. Zur Einführung in die Grundlagen

der Mikrotechnik und Mikrosystemtechnik zur Fertigung elektromechanischer Systeme wird auf die Ausführungen in [4–7] verwiesen.

Verbunden mit der Einführung dieser neuen Technologien und Werkstoffe erfolgte in den letzten Jahren ein starker Produktwandel bei elektromechanischen Systemen in Richtung MEMS-Realisierungen. Aus Tabelle 1.3 ist erkennbar, dass sich dieser Produktwandel neben der Reduzierung der Abmessungen auch durch einen zunehmenden Funktionsumfang auszeichnet.

Tabelle 1.3. Produktwandel bei elektromechanischen Systemen durch Einsatz der Mikrotechnik und Mikrosystemtechnik sowie neuartiger Werkstoffe

Anwendung	feinwerktechnisches Gerät	Mikrotechnisches Gerät
Drucken	Nadeldruck	Tintendruckkopf (Bubble-Jet-Prinzip)
Daten-Speicher	Magnet-Schreib-Lese-Kopf, Festplattenlaufwerk	Dünnschicht-Schreib-Lese-Kopf (GMR-Lese-Sensor), Mikro-Festplattenlaufwerk (Microdrive)
Informationswiedergabe	Langspielschallplatte, Magnetbandkassette	DVD-Abtastsystem, MP3-Player
Lichtprojektion	Beamer mit Drehspiegelsystem	Beamer mit Mikrospiegelarray
Kfz-Sensorik	piezoelektrische Airbag-Beschleunigungssensoren, Widerstandstemperatursensoren, potentiometrische Füllstandssensoren	hochintegrierter Silizium-Drehratensensor, Mikrowellen- und Ultraschallabstandssensoren, energieautarke Silizium-Reifendrucksensoren
Prozess-Sensorik	kraftkompensierter Differenzdruckmessumformer, potentiometrischer Füllstandsmessumformer	BAW-Silizium-Resonanz-Differenzdrucksensor, selbstüberwachender US-Füllstandssensor
Schalten elektrischer Kreise	elektromagnetisches Relais	elektrostatisches Silizium-Mikrorelais, Silizium-Mikrorelais-Array
Stelleinrichtung	elektromagnetisches Regelventil	Kfz-Einspritzventil mit piezoelektrischem Stapelaktor, elektrostatische Polymeraktoren

In den folgenden Kapiteln 3, 6, 8 und 9 werden zur Erläuterung des Entwurfsverfahrens „Netzwerkbeschreibung“ sowohl traditionelle als auch neuartige

MEMS-Realisierungen als Beispiele für elektromechanische Systeme verwendet.

1.3 Entwurf elektromechanischer Systeme

Zielstellung des Entwurfs ist die Berechnung der Parameter – Entwurfsparameter – der konzipierten Lösung für ein technisches Produkt. Damit nimmt die Entwurfsphase eine zentrale Stellung innerhalb des Produktentwicklungsprozesses mechatronischer, elektromechanischer und mikroelektromechanischer Systeme ein. Sowohl beim „V-Modell“ [8] mechatronischer Systeme als auch bei den Entwicklungsmodellen der Mikrosystemtechnik [4, 9] ist die Entwurfsphase besonders ausgeprägt.

In Tabelle 1.4 sind nach [10] die Phasen des Produktentwicklungsprozesses eines elektromechanischen Systems als grobes Stufenmodell angegeben.

Tabelle 1.4. Einordnung des Entwurfs in den technischen Produktentwicklungsprozess

Technische Aufgabenstellung	
<u>Entwicklungsphase</u>	<u>Ergebnis</u>
Klären der Aufgabenstellung	→ Anforderungsliste oder Pflichtenheft
Konzipieren	→ <ul style="list-style-type: none"> • Ermittlung der Teilprobleme • Aufstellen von Lösungsprinzipien • Auswahl der Teillösungen • Grobkonzept des Gesamtsystems
Entwurf	→ Festlegung der Entwurfsparameter der Komponenten und der Gesamtlösung
Konstruktion	→ Gestaltung der Gesamtlösung
Musterbau und Test	→ Präzisierung Grobkonzept, Entwurf und Konstruktion
Dokumentation	→ Erstellen Zeichnungssatz und Fertigungstechnologien
Produktionsfreigabe	

Die Phase des Entwurfs schließt sich an die Konzeption der Gesamtlösung an und bildet die Grundlage für die anschließende Erstellung der Konstruktionsunterlagen. Dem Entwurf – quantitative Festlegung der technischen Parameter für die konzipierte Lösung – liegt ein physikalisches Modell der konzipierten Lösung zu Grunde. Die Berechnung der Modellparameter – Entwurfsparameter – kann durch unterschiedliche Beschreibungsverfahren – Simulationsverfahren – erfolgen (Abschn. 1.4). Zielstellungen dieser Simulationen sind entweder die Absicherung fest vorgegebener Kenngrößen des elektromechanischen Systems – Entwurfskenngrößen – oder die Erfüllung spezieller Optimierungskriterien wie minimaler Energieverbrauch, minimales Bauvolumen bzw. Masse oder maximaler Arbeitsfrequenzbereich. Die Bewertung – Verifikation – der Simulationsergebnisse mit den Vorgaben der Anforderungsliste schließt die Entwurfsphase in Abbildung 1.2 ab. Weicht das Ergebnis von den Zielwerten gegenüber den vorgegebenen Schranken zu stark ab, erfolgt mit veränderten Parametersätzen eine erneute Simulation. Lässt sich keine Konvergenz erzielen, ist eine Validierung des Modellansatzes erforderlich.

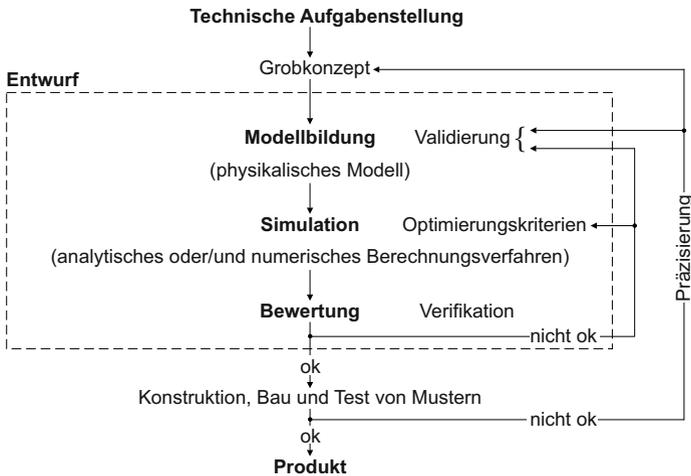


Abbildung 1.2. Entwurfsablauf bei elektromechanischen Systemen

Die Vervollkommnung des Entwurfsprozesses führt zu einer Verringerung des experimentellen Testaufwandes zur Bewertung von Entwicklungsparametern bei gleichzeitiger Reduzierung des Musterumfanges. Damit verbunden sind kürzere Entwicklungszeiten und geringere Entwicklungskosten. Entscheidend für die anzustrebende Entwurfsvervollkommnung sind der praktische Bezug, die ingenieurmäßige Anwendbarkeit und die Beschreibungstiefe der Simulationsverfahren.