

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	xv
1 Einführung	1
1.1 Gegenstand des Buches	1
1.2 Merkmale der Netzwerkbeschreibung	3
1.3 Strukturierte Netzwerkdarstellung linearer dynamischer Systeme ...	4
1.4 Grundgleichungen linearer Netzwerke	5
1.5 Vorzüge der Netzwerkmodellierung	7
1.5.1 Systeme überblicken und verstehen	7
1.5.2 Systeme schnell analysieren	9
1.5.3 Einflussparameter bestimmen und Systeme optimieren. . . .	12
1.5.4 Robuste Systeme entwerfen.	14
1.5.5 Messen auf Basis der Umkehrbarkeit linearer Netzwerke . .	15
1.5.6 Finite-Elemente-Modelle vereinfachen	17
2 Mechanische Netzwerke	19
2.1 Translatorische Teilsysteme	19
2.1.1 Grundbeziehungen translatorischer Teilsysteme	19
2.1.2 Übungsaufgaben für translatorische mechanische Systeme .	24
Aufgabe 2.1 Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung.	24
Aufgabe 2.2 Parallel-Resonanzkreis in der komplexen Ebene	26
Aufgabe 2.3 Arbeiten mit komplexen Größen	27
Aufgabe 2.4 Dynamisches Verhalten passiver Netzwerkelemente. .	29
Aufgabe 2.5 Simulation des Einrastens einer Feder.	32
Aufgabe 2.6 Zeitverhalten eines Feder-Masse-Dämpfer-Systems. .	34
Aufgabe 2.7 Mechanischer Parallelresonanzkreis	36
Aufgabe 2.8 Kenngrößen eines mechanischen Resonanzsystems . .	37
Aufgabe 2.9 Ableitung mechanischer Schemata und Schaltungen .	39
Aufgabe 2.10 Mechanische Netzwerke realer Systeme.	42
Aufgabe 2.11 Mechanik eines Beschleunigungssensors	46
Aufgabe 2.12 Resonanzfrequenz eines Feder-Masse-Systems . . .	48

	Aufgabe 2.13 Schwingungsdämpfung mit weicher Unterlage	48
	Aufgabe 2.14 Schwingungssystem mit Kraftquelle	50
	Aufgabe 2.15 Schwingungssystem mit Bewegungsquelle	52
	Aufgabe 2.16 Passiver Schwingungstilger	54
	Aufgabe 2.17 Bestimmung des komplexen E-Moduls	61
	Aufgabe 2.18 Mechanische Quellen unterschiedlicher Frequenz . .	63
	Aufgabe 2.19 Impedanzbehaftete mechanische Quelle	65
	Aufgabe 2.20 Shaker-Ankopplung	68
	Aufgabe 2.21 Resonanzfrequenz, Kenn- und Ausschwingfrequenz.	71
2.2	Arbeiten mit dem BODE-Diagramm	81
	Aufgabe 2.22 Rechnen mit Pegeln im BODE-Diagramm	86
	Aufgabe 2.23 BODE-Diagramme von Elementar-Filtern	86
	Aufgabe 2.24 BODE-Diagramm einer mechanischen Waage	88
	Aufgabe 2.25 BODE-Diagramm eines Beschleunigungssensors . .	89
	Aufgabe 2.26 BODE-Diagramm eines Feder–Masse–Dämpfer- Systems.	91
	Aufgabe 2.27 BODE-Diagramm eines Feder–Masse–Dämpfer- Systems mit nachgiebiger Anregung	94
	Aufgabe 2.28 BODE-Diagramm-Analyse eines Kraftmikroskops . .	97
2.3	Translatorische Systeme mit Hebel	100
	2.3.1 Bauelement Hebel	100
	2.3.2 Übungsaufgaben für Systeme mit Hebel	102
	Aufgabe 2.29 Hebel mit Belastung durch Reibungselemente. . . .	102
	Aufgabe 2.30 Hebel mit Belastung durch Feder	103
	Aufgabe 2.31 Modellierung eines Transformators mit Quellen . .	104
	Aufgabe 2.32 Hebel mit Feder-, Masse- und Reibungsbelastung . .	105
	Aufgabe 2.33 Mechanisches Schwingungssystem mit Hebel	107
	Aufgabe 2.34 Hebel mit über Federn wirkender Massebelastung . .	110
	Aufgabe 2.35 Im Drehpunkt nachgiebig gelagerter Hebel.	111
	Aufgabe 2.36 Elastischer Hebel	113
	Aufgabe 2.37 Massebehafteter starrer Hebel	115
2.4	Rotatorische Systeme	116
	2.4.1 Grundbeziehungen	116
	2.4.2 Übungsaufgaben für rotatorische mechanische Teilsysteme .	120
	Aufgabe 2.38 Rotatorische Impedanz eines Stabes	120
	Aufgabe 2.39 Stirnradgetriebe mit Drehmasse	121
	Aufgabe 2.40 Rotatorischer Schwingungstilger einer Turbine	122
	Aufgabe 2.41 Kupplung.	126
	Aufgabe 2.42 Drehschwinger mit Zusatzmasse	128
2.5	Translatorisch-rotatorische Wandler	132
	2.5.1 Idealer Stab als translatorisch-rotatorischer Wandler	132
	2.5.2 Übungsaufgaben für Systeme mit idealem Stab.	133
	Aufgabe 2.43 Impedanz einer blattfederbelasteten Welle	133
	Aufgabe 2.44 Pendel.	134
	Aufgabe 2.45 Pendelschwingungstilger	137

	Aufgabe 2.46 Hantelschwinger mit Drehfeder	142
	2.5.3 Biegebalken als translatorisch-rotatorischer Wandler	148
	2.5.4 Übungsaufgaben für Systeme mit Biegebalken	148
	Aufgabe 2.47 Blattfeder.	148
	Aufgabe 2.48 Nachgiebigkeit eines fest eingespannten Biegers . . .	149
	Aufgabe 2.49 Nachgiebigkeit eines drehbar gelagerten Biegers . .	151
	Aufgabe 2.50 Bieger als Momentenquelle.	152
	Aufgabe 2.51 Biegenachgiebigkeit eines Bimorph	153
	Aufgabe 2.52 Spiralfeder mit Unruh	155
	Aufgabe 2.53 Endlicher Bieger mit Drehmasse	157
	Aufgabe 2.54 Zweitordarstellung eines Hebels mit Biegebalken . .	161
2.6	Hochachsen-rotatorische Systeme	164
	2.6.1 Netzwerkdarstellung	164
	2.6.2 Übungsaufgaben für Hochachsen-rotatorische Systeme . . .	165
	Aufgabe 2.55 Im Inertialsystem ruhende Punktmasse	165
	Aufgabe 2.56 Funken eines Trennschleifers.	167
	Aufgabe 2.57 Mikromechanischer Drehratensensor.	169
3	Akustische Netzwerke	171
3.1	Grundbeziehungen zur Berechnung akustischer Teilsysteme	171
3.2	Übungsaufgaben zur Berechnung akustischer Systeme	175
	Aufgabe 3.1 Akustische Bauelemente im Frequenzbereich.	175
	Aufgabe 3.2 Thermische Zustandsgleichung für Gase	176
	Aufgabe 3.3 Kompression eines gasgefüllten Hohlraums	177
	Aufgabe 3.4 Akustische Impedanz eines dünnwandigen Rohres . .	180
	Aufgabe 3.5 Helmholtz-Resonanzabsorber in der Bauakustik	181
	Aufgabe 3.6 Rohrsystem mit Hohlräumen.	182
	Aufgabe 3.7 Netzwerkdarstellung einer akustischen Brücke	184
	Aufgabe 3.8 Schwingungsanalyse eines wassergefüllten U-Rohrs .	185
	Aufgabe 3.9 Übertragungsverhalten eines passiven Luftdämpfers .	188
	Aufgabe 3.10 Pistonfon zur Mikrofon-Kalibrierung	190
	Aufgabe 3.11 Kondensatormikrofon.	192
	Aufgabe 3.12 Frequenzabhängige Impedanz des Schallfeldes	195
	Aufgabe 3.13 T-Schaltung zwischen zwei Öffnungen	196
	Aufgabe 3.14 Akustische Bauelemente einer Membran	198
	Aufgabe 3.15 Kesselpauke	201
4	Mechanisch-akustische Systeme	205
4.1	Grundbeziehungen zur Berechnung mechanisch-akustischer Wandler	205
4.2	Übungsaufgaben mit mechanisch-akustischen Wandlern	208
	Aufgabe 4.1 Akustische Impedanz einer federnden Platte.	208
	Aufgabe 4.2 Netzwerk eines Hohlraums mit federnder Platte	209
	Aufgabe 4.3 Schwingender Zylinder mit Kolbenwandler	211
	Aufgabe 4.4 Netzwerk eines Kolbenwandlers	213

Aufgabe 4.5	Kolbenwandler mit Leckströmung	214
Aufgabe 4.6	Übertragungsverhalten einer Druckmesseinrichtung	216
Aufgabe 4.7	Ölgefüllte miniaturisierte Drucksensoren	220
Aufgabe 4.8	Biegeplatte	224
Aufgabe 4.9	Experimente am elastomechanischen Plattenwandler	227
Aufgabe 4.10	Zwei Biegeplatten im Rohr	229
Aufgabe 4.11	Luftdämpfungselement mit zähem Medium	231
5	Elektromechanische Wandler	241
5.1	Grundlagen	241
5.2	Anwendungsbeispiel	244
Aufgabe 5.1	Charakterisierung elektromechanischer Wandler	244
6	Magnetische Wandler	247
6.1	Elektrodynamischer Wandler	247
6.1.1	Grundbeziehungen elektrodynamischer Wandler	247
6.1.2	Anwendungsbeispiele zum elektrodynamischen Wandler	248
Aufgabe 6.1	Elektrodynamischer Schwingtisch (Shaker)	248
Aufgabe 6.2	Elektrodynamischer Linearaktor	254
Aufgabe 6.3	Elektrodynamischer Kalibrier-Schwingtisch	256
Aufgabe 6.4	Elektrodynamischer Lautsprecher	259
Aufgabe 6.5	Übertragungsverhalten einer Bassreflexbox	263
6.2	Piezomagnetische Wandler	268
6.1.1	Grundbeziehungen piezomagnetischer Wandler	268
6.1.2	Anwendungsbeispiele zum piezomagnetischen Wandler	270
Aufgabe 6.6	Zylinderspule	270
Aufgabe 6.7	Flachspule auf dicker magnetischer Schicht	271
Aufgabe 6.8	Flachspule auf dünner magnetischer Schicht	273
Aufgabe 6.9	Magnetostriktiver Dickenschwinger	274
Aufgabe 6.10	Piezomagnetischer Unimorph als Aktor	277
7	Elektrische Wandler	283
7.1	Elektrostatische Wandler	283
7.1.1	Grundbeziehungen elektrostatischer Wandler	283
7.1.2	Anwendungsbeispiele zum elektrostatischen Wandler	285
Aufgabe 7.1	Kondensatorplatten mit Nachgiebigkeit	285
Aufgabe 7.2	Tastsonde	289
Aufgabe 7.3	Biegezungel als elektromechanisches Filter	291
Aufgabe 7.4	Übertragungsverhalten eines Kondensatormikrofons	295
Aufgabe 7.5	Elektronisches Stethoskop	298
7.2	Piezoelektrische Wandler	304
7.2.1	Grundbeziehungen piezoelektrischer Wandler	304
7.2.2	Anwendungsbeispiele zum piezoelektrischen Wandler	307
Aufgabe 7.6	Piezoelektrische Materialien	307
Aufgabe 7.7	Mechanisches Dehnungsfeld	309

	Aufgabe 7.8 Feld- und integrale Größen beim piezoelektrischen Längs- und Dickenschwinger	311
	Aufgabe 7.9 Formänderung eines piezoelektrischen Elementes	313
	Aufgabe 7.10 Umkehrbarkeit elektrischer Wandler	315
	Aufgabe 7.11 Modellierung eines Gyrotors mit Quellen	317
	Aufgabe 7.12 Allseitig druckbelastete Piezoscheibe	319
	Aufgabe 7.13 Piezoscheiben in einem mit Wasser gefüllten Gefäß	323
	Aufgabe 7.14 Piezoelektrischer Bimorph	325
	Aufgabe 7.15 Piezoelektrischer Aktor eines Tunnelmikroskops	327
	Aufgabe 7.16 Abtastsystem eines Kraftmikroskops	331
	Aufgabe 7.17 Piezoelektrischer Beschleunigungssensor	332
	Aufgabe 7.18 Piezoelektrisches Mikrofon mit Bimorph	335
	Aufgabe 7.19 Piezoelektrischer Signalgeber	338
8	Wellenleiter	343
8.1	Dehnwellenleiter	343
8.1.1	Eindimensionale Dehnwellen in einem Stab	343
8.1.2	Anwendungsbeispiele zum Dehnwellenleiter	345
Aufgabe 8.1	Zweistufiges Feder-Masse-System	345
Aufgabe 8.2	Wellenleiterabschluss	349
Aufgabe 8.3	Aluminiumstab als Dehnwellenleiter	350
Aufgabe 8.4	Dehnwellenleiter mit Zusatzmasse	354
Aufgabe 8.5	Aluminiumstab als $\lambda/2$ -Schwinger	356
Aufgabe 8.6	Piezoelektrischer Dickenschwinger	360
8.2	Gassäulen als akustische Wellenleiter	363
Aufgabe 8.7	Pfeifen als akustische Wellenleiter	364
Aufgabe 8.8	Querschnittssprung	367
Aufgabe 8.9	Exponentialtrichter	370
Aufgabe 8.10	MRT-Kopfhörer	373
8.3	Biegewellenleiter	376
8.3.1	Grundbeziehungen von Biegewellen in einem Balken	376
8.3.2	Anwendungsbeispiele zum Biegewellenleiter	377
Aufgabe 8.11	Simulation von Eigenschwingungen eines Balkens	377
Aufgabe 8.12	Netzwerkmodell einer Stimmgabel	382
Aufgabe 8.13	Die EULER-BERNOULLISCHE DGL	385
Aufgabe 8.14	Einseitig freier Biegebalken	387
Aufgabe 8.15	Biegebalken mit Zusatzmasse	394
Aufgabe 8.16	Impedanz eines Biegebalkens mit Drehmasse	396
9	Nichtlineare Netzwerke	399
9.1	Aktive nichtlineare Elemente in SPICE	399
9.2	Anwendungsbeispiele mit nichtlinearen Elementen	399
Aufgabe 9.1	Prellfreier mechanischer Anschlag	399
Aufgabe 9.2	Pendel	401
Aufgabe 9.3	Hydrogel-basiertes Mikroventil	402

	Aufgabe 9.4 Chaosgenerator	407
A	Grundlagen	409
	A.1 Elektrische Netzwerke	409
	A.2 Verhaltensbeschreibungen linearer zeitinvarianter Systeme	410
	A.2.1 Parallelschwingkreis im Zeitbereich	410
	A.2.1.1 Freie gedämpfte Schwingung	411
	A.2.1.2 Erzwungene harmonische Schwingung	413
	A.2.2 Parallelschwingkreis im Frequenzbereich	415
B	Mathematische Ausdrücke in SPICE für B-Quellen	417
C	LTSPICE-Aufruf aus MATLAB	419
	Literaturverzeichnis	421
	Methodische Schritte (Auswahl)	423