
Lineare Kirchhoff-Netzwerke

Reiner Thiele

Lineare Kirchhoff-Netzwerke

Grundlagen, Analyse und Synthese

3. Auflage

Reiner Thiele
Zittau, Deutschland

ISBN 978-3-658-42515-9 ISBN 978-3-658-42516-6 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-42516-6>

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

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2022, 2022, 2023

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Reinhard Dapper

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Das Papier dieses Produkts ist recyclebar.

Vorwort zur dritten Auflage

Die freundliche Aufnahme der zweiten Auflage hat mich bestärkt, in die dritte Auflage eine weitere Synthese- und die zugehörige Analyse-Aufgabe zu einem dynamischen Netzwerk aufzunehmen. Dabei fiel die Wahl auf den sogenannten PID-Regler der klassischen Regelungstechnik. PID steht hierbei für den proportionalen, integralen sowie differenziellen Anteil in der Regler-Systemfunktion.

Des Weiteren wurde im Anhang zur Distributionentheorie eine wichtige Ergänzung vorgenommen, die erste Ableitung des Dirac-Impulses betreffend. Damit kann man die u-i-Relationen von Kondensator und Spule auf spezielle Faltungsintegrale mit Dirac-Impulsen ohne ihre ersten Ableitungen zurückführen.

Besonderer Dank gilt dem Verlag für die attraktive Gestaltung aller Versionen des vorgelegten Werkes im 4-farbigen Layout.

Reiner Thiele

Vorwort zur zweiten Auflage

Hinsichtlich der ersten Auflage hat es viel Zustimmung, aber auch konstruktive Kritik gegeben.

In Übereinstimmung mit dem Springer Verlag wurde deshalb das Grundkonzept des Buches in der zweiten Auflage beibehalten und auf meinen Wunsch hin nur der jeweilige Ort der Abbildungen innerhalb der einzelnen Kapitel gegenüber der ersten Auflage so verändert, dass sich die logische Geschlossenheit von Text, Formeln und Abbildungen ergab. Im Besonderen haben wir die einzelnen Abbildungen direkt den Lösungen der entsprechenden Aufgaben zugeordnet.

Weiterhin erfolgte in der zweiten Auflage zur Unterstützung der einfachen Lesbarkeit die Aufnahme geeigneter Verzeichnisse zum schnellen Auffinden von Abbildungen und Lösungen zu den Übungsaufgaben. Durch die Darstellung der eBooks und der Print-Versionen im 4-farbigen Layout haben wir ein Unterscheidungsmerkmal für strom- bzw. spannungsbezogene Sachverhalte in den Abbildungen kreiert.

Dem Verlag habe ich zu verdanken, dass trotz knapper Ressourcen viele meiner Wünsche in Erfüllung gegangen sind.

Reiner Thiele

Vorwort zur ersten Auflage

Jahrelang versuchte man, von der Synthese mit Hilfe aufwendiger Übertrager-Netzwerke wegzukommen.

Hier finden Sie die Lösungen für übertragerfreie Realisierungen mit Nullatoren und Noratoren. Sie ermöglichen eine Netzwerk-Zerlegung in Unternetzwerke, die getrennt voneinander das Kirchhoffsche Spannungs- bzw. Stromgesetz erfüllen. Durch Zusammenschaltung dieser Unternetzwerke mit Widerständen, Kondensatoren und Spulen lässt sich dann jedes lineare Kirchhoff-Netzwerk synthetisieren oder analysieren. Bei geeignet vorgegebenem Klemmenverhalten des gesuchten Netzwerkes sind manchmal auch Nullator-Norator-freie Realisierungen durch die Applikation entsprechender Äquivalenzen möglich.

Zum Verständnis der geschilderten Sachverhalte scheint die Einteilung des vorgelegten Werkes in die Kapitel Grundlagen, Netzwerk-Synthese und Netzwerk-Analyse zweckmäßig zu sein. Dabei wird bewusst auf die Darstellung der gesamten Netzwerktheorie verzichtet. Vielmehr stellen wir die exemplarische Wissensvermittlung mit praxisrelevanten Aufgaben in den Mittelpunkt. Durch die Angabe der vollständigen Lösungen im Anhang findet der Leser auch einen Zugang zu schwierigen mit Stern gekennzeichneten Aufgaben.

Es ist mir ein Bedürfnis, dem Springer Verlag für die sehr gute Zusammenarbeit bei der Herstellung und Veröffentlichung dieses Werkes zu danken.

Reiner Thiele

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
Literatur.....	2
2 Grundlagen	3
2.1 u-i-Relationen.....	3
2.1.1 Netzwerk-Definitionen.....	3
2.1.2 Widerstand, Kondensator und Spule.....	4
2.1.3 Nullator, Norator und Nullor.....	5
2.2 Kirchhoff-Gesetze.....	7
2.2.1 Stromgesetz.....	8
2.2.2 Spannungsgesetz.....	8
2.2.3 Kirchhoff-Netzwerk.....	8
2.2.4 Kirchhoffsches Tellegen-Netzwerk.....	10
2.3 Netzwerk-Eigenschaften.....	10
2.3.1 Linearität.....	10
2.3.2 Zeitinvarianz.....	11
2.3.3 Passivität, Verlustlosigkeit und Aktivität.....	11
2.3.4 Reziprozität.....	12
2.3.5 Äquivalenz.....	13
2.4 Aufgaben zu Netzwerk-Eigenschaften.....	16
Literatur.....	21
3 Netzwerk-Synthese	23
3.1 Klemmenverhalten.....	23
3.1.1 Belevitch-Darstellungen.....	25
3.1.2 Fallunterscheidung.....	29
3.1.3 Singulärwert-Zerlegung.....	30
3.1.4 Synthese-Algorithmus.....	31
3.2 Synthese resistiver Netzwerke.....	32
3.2.1 Definition resistiver Netzwerke.....	32

3.2.2	Synthese gesteuerter Quellen	33
3.2.2.1	Invertierende spannungsgesteuerte Stromquellen	33
3.2.2.2	Invertierende stromgesteuerte Spannungsquellen	37
3.2.2.3	Invertierende spannungsgesteuerte Spannungsquellen	41
3.2.2.4	Invertierende stromgesteuerte Stromquellen	45
3.2.3	Synthese des Positiv-Impedanzkonverters	50
3.3	Synthese dynamischer Netzwerke	58
3.3.1	Definition dynamischer Netzwerke	58
3.3.2	Synthese des Negativ-Impedanzkonverters	58
3.3.3	Synthese des Gytrators	63
3.4	Aufgaben zur Netzwerk-Synthese	68
	Literatur	74
4	Netzwerk-Analyse	75
4.1	Unternetzwerke	75
4.1.1	Netzwerk-Zerlegung	75
4.1.2	Analyse-Algorithmus	75
4.2	Analyse resistiver Netzwerke	76
4.2.1	Analyse gesteuerter Quellen	76
4.2.1.1	Nichtinvertierende spannungsgesteuerte Stromquellen	76
4.2.1.2	Nichtinvertierende stromgesteuerte Spannungsquellen	79
4.2.1.3	Nichtinvertierende spannungsgesteuerte Spannungsquellen	82
4.2.1.4	Nichtinvertierende stromgesteuerte Stromquellen	88
4.2.2	Analyse des Positiv-Impedanzkonverters	90
4.3	Analyse dynamischer Netzwerke	91
4.3.1	Analyse des Negativ-Impedanzkonverters	91
4.3.2	Analyse des Gytrators	91
4.4	Aufgaben zur Netzwerk-Analyse	92
5	Zusammenfassung	97
	Lösungen zu den Aufgaben	99
	Laplace-Transformation	187
	Distributionentheorie	189
	Weiterführende Literatur	191
	Stichwortverzeichnis	193

Abkürzungsverzeichnis

A	Arbeitspunkt
B	Basis
C	Kollektor
C-NW	Kondensator-Netzwerk
D-NW	Dioden-Netzwerk, dynamisches Netzwerk
E	Emitter
EV	Energieversorgung
G-NW	Gyrator-Netzwerk
IIQ	stromgesteuerte Stromquelle
IIIQ	invertierende stromgesteuerte Stromquelle
IIUQ	invertierende stromgesteuerte Spannungsquelle
IQ-NW	Stromquellen-Netzwerk
IUIQ	invertierende spannungsgesteuerte Stromquelle
IUUQ	invertierende spannungsgesteuerte Spannungsquelle
I0-NW	Leerlauf-Netzwerk
$L\{\circ\}$	Laplace-Transformierte von $L\{\circ\}$
$L^{-1}\{\square\}$	Laplace-Rücktransformierte von \square
L-NW	Spulen-Netzwerk
NIK	Negativ-Impedanzkonverter
NIIQ	nichtinvertierende stromgesteuerte Stromquelle
NIUQ	nichtinvertierende stromgesteuerte Spannungsquelle
NO-NW	Norator-Netzwerk
NUIQ	nichtinvertierende spannungsgesteuerte Stromquelle
NU-NW	Nullator-Netzwerk
NUUQ	nichtinvertierende spannungsgesteuerte Spannungsquelle
OPV	Operationsverstärker
PID	proportional-integral-differenziell
PIK	Positiv-Impedanzkonverter
R-NW	Widerstands-Netzwerk, resistives Netzwerk
Re	Realteil

RLC-NW	Netzwerk aus Widerständen, Spulen und Kondensatoren
UQ-NW	Spannungsquellen-Netzwerk
UUQ	spannungsgesteuerte Spannungsquelle
U0-NW	Kurzschluss-Netzwerk
Ü-NW	Übertrager-Netzwerk

Formelzeichen

A	Matrix in der Belevitch-Darstellung
$\bar{A}(s)$	Matrix im Bildbereich
$\bar{A}(t)$	Matrix im Zeitbereich
\bar{a}	Konstante, Verbindungskoeffizient
B	Matrix in der Belevitch-Darstellung
$\bar{B}(s)$	Matrix im Bildbereich
$\bar{B}(t)$	Matrix im Zeitbereich
\bar{b}	Konstante, Verbindungskoeffizient
C	konstante Matrix
\bar{C}	Kapazität
c	Verbindungskoeffizient
d	Verbindungskoeffizient
E	Einheitsmatrix
\bar{e}	Verbindungskoeffizient
f	Verbindungskoeffizient
G	Leitwertmatrix
\bar{G}	Leitwert
g	Gyrationsleitwert
I	äußerer Stromvektor im Bildbereich
\bar{I}	äußerer Strom im Bildbereich
\tilde{I}	äußerer Norator-Stromvektor im Bildbereich
$\tilde{\bar{I}}$	äußerer Noratorstrom im Bildbereich
i	äußerer Stromvektor im Zeitbereich
\bar{i}	äußerer Strom im Zeitbereich
\tilde{i}	äußerer Norator-Stromvektor im Zeitbereich
$\tilde{\bar{i}}$	äußerer Noratorstrom im Zeitbereich
J	innerer Stromvektor im Bildbereich
\bar{J}	innerer Strom im Bildbereich
j	innerer Stromvektor im Zeitbereich
\bar{j}	innerer Strom im Zeitbereich

j	innerer Strom im Zeitbereich, imaginäre Einheit
K	innerer Noratorstrom im Bildbereich
k	innerer Noratorstrom im Zeitbereich, Verbindungskoeffizient
L	Induktivität
M	Spannungs-Verbindungsmatrix
\bar{m}	Verbindungskoeffizient
N	Strom-Verbindungsmatrix
\bar{N}	Menge geordneter Paare aus Klemmenspannungen und –strömen
n	Anzahl der Tore, voller Rang
P	Leistung im Bildbereich
p	Leistung im Zeitbereich
R	Widerstandsmatrix
\bar{R}	Widerstand
r	Rang
s	komplexe Frequenz
$s(t)$	Sprungfunktion
t	Zeit
U	äußerer Spannungsvektor im Bildbereich
\bar{U}	äußere Spannung im Bildbereich
U	äußerer Norator-Spannungsvektor im Bildbereich
\bar{U}	äußere Noratorspannung im Bildbereich
u	äußerer Spannungsvektor im Zeitbereich
\bar{u}	äußere Spannung im Zeitbereich
\tilde{u}	äußerer Norator-Spannungsvektor im Zeitbereich
$\tilde{\bar{u}}$	äußere Noratorspannung im Zeitbereich
V	innerer Spannungsvektor im Bildbereich
\bar{V}	innere Spannung im Bildbereich
v	innerer Spannungsvektor im Zeitbereich
\bar{v}	innere Spannung im Zeitbereich, Verstärkungsfaktor
W	innere Noratorspannung im Bildbereich
w	innere Noratorspannung im Zeitbereich
Y	Admittanzmatrix
\bar{Z}	Impedanzmatrix
α	Verbindungskoeffizient
β	Verbindungskoeffizient
γ	Verbindungskoeffizient
δ	Verbindungskoeffizient
$\delta(t)$	Dirac-Impuls
ϑ	Substitutionsvariable
ε	Verbindungskoeffizient
φ	Verbindungskoeffizient
κ	Verbindungskoeffizient

μ	Verbindungskoeffizient
ω	Kreisfrequenz, Imaginärteil der komplexen Frequenz
χ	Äquivalenztyp
ρ	Gyrationswiderstand
σ	Relation, Realteil der komplexen Frequenz
τ	Zeit als Integrationsvariable
\emptyset	leere Menge
\bigcirc	beliebige Zeitfunktion
\square	beliebige Bildfunktion

Lösungsverzeichnis

L 2.1*	Definition affiner Netzwerke	99
L 2.2	Linearer Kondensator und lineare Spule	99
L 2.3	Zeitinvarianter Kondensator und zeitinvariante Spule	100
L 2.4*	Verlustlosigkeit von Kondensator und Spule	100
L 2.5*	Reziprozität von Kondensator und Spule	101
L 2.6	Äquivalenzen von Nullator-Norator-Paaren	102
L 2.7	Realisierungen des NIK	103
L 2.8	NIK als aktives Netzwerk	105
L 2.9	Verlustlosigkeit des idealen Übertragers	105
L 2.10*	Reziprozität des idealen Übertragers	105
L 2.11	Verlustlosigkeit des idealen Gyrators	106
L 2.12*	Nichtreziprozität des idealen Gyrators	106
L 2.13	Nichtlinearität von Dioden	107
L 2.14	Übertrager-Realisierung durch Gyrotoren	107
L 2.15	Eigenschaften von Nullatoren und Noratoren	107
L 2.16	Eigenschaften von Kurzschlüssen und Leerläufen	108
L 2.17	Eigenschaften von RLC-Netzwerken	108
L 2.18	RLC-Netzwerke als Tellegen-Netzwerke	109
L 2.19*	Verlustloses resistives Netzwerk	109
L 2.20*	Reziprokes dynamisches Netzwerk	110
L 3.1*	Belevitch-Darstellungen im Zeitbereich	110
L 3.2	Kirchhoff-Gesetze im Bildbereich	111
L 3.3*	Belevitch-Darstellungen im Bildbereich	112
L 3.4	Entartete Elementarnetze im Bildbereich	113
L 3.5	Transformation der Belevitch-Darstellung	113
L 3.6	Leitwert- und Widerstandsmatrix	114
L 3.7	RLC-Netzwerke im Bildbereich	115
L 3.8	Synthese nullorfreier resistiver Netzwerke I	115
L 3.9	Synthese nullorfreier resistiver Netzwerke II	122
L 3.10	Synthese einer UUQ mit Nullor	128

L 3.11	Synthese einer IIQ mit Nullor	132
L 3.12	Negative technische Induktivität und Kapazität	135
L 3.13	Synthese eines NIK mit durchgehender Masseleitung	136
L 3.14	Gyratorische Dualitäts-Transformation	141
L 3.15	Gyrator-Realisierung mit durchgehender Masse	141
L 3.16*	Arbeitspunkt-Einstellung der UUQ	145
L 3.17	Synthese nullorfreier dynamischer Netzwerke I	146
L 3.18	Synthese nullorfreier dynamischer Netzwerke II	149
L 3.19*	Synthese mit Gyrotoren I	153
L 3.20*	Synthese mit Gyrotoren II	158
L 3.21	Synthese durch Admittanzmatrix-Zerlegung	160
L 3.22	Synthese durch Impedanzmatrix-Zerlegung	162
L 3.23	Synthese eines PID-Reglers	164
L 4.1	Belevitch-Darstellung der UUQ	168
L 4.2	Belevitch-Darstellung der IIQ	168
L 4.3	Klemmenverhalten der NUIQ	169
L 4.4	Klemmenverhalten der NIUQ	170
L 4.5	Klemmenverhalten der NUUQ	170
L 4.6	Klemmenverhalten der NIIQ	171
L 4.7	Analyse nullorfreier resistiver Netzwerke I	171
L 4.8	Analyse nullorfreier resistiver Netzwerke II	172
L 4.9	Analyse nullorfreier dynamischer Netzwerke I	172
L 4.10*	Analyse nullorfreier dynamischer Netzwerke II	173
L 4.11	Sprungantwort der UUQ	175
L 4.12	Impulsantwort der IIQ	175
L 4.13	Rechteckantwort resistiver Netzwerke	175
L 4.14*	Rechteckantwort dynamischer Netzwerke	175
L 4.15	Indirekte Analyse des Gyrator-Netzwerkes II	176
L 4.16	Direkte Analyse des Gyrator-Netzwerkes I	177
L 4.17	Direkte Analyse des Gyrator-Netzwerkes II	178
L 4.18	Indirekte Analyse des Gyrator-Netzwerkes II	178
L 4.19	Analyse durch Netzwerk-Zerlegung I	179
L 4.20	Analyse durch Netzwerk-Zerlegung II	180
L 4.21	Masseklemme im Gyrator-Netzwerk	181
L 4.22	Strom- und Spannungs-Verbindungsmatrix	182
L 4.23	Charakteristische Gleichung des NIK	183
L 4.24	Analyse eines PID-Reglers	183

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Schaltsymbole und Zählpfeile der Elementarnetze. a Widerstand. b Kondensator. c Spule	5
Abb. 2.2	Kennlinien der Elementarnetze a Widerstand b Kondensator c Spule.	5
Abb. 2.3	Schaltsymbole und Zählpfeile von Nullator (a) und Norator (b).	5
Abb. 2.4	Kennlinien von Nullator (a) und Norator (b).	6
Abb. 2.5	Nullor-Modelle des OPV	7
Abb. 2.6	Zusammenschaltung von N und \tilde{N}	7
Abb. 2.7	Kirchhoff-Netzwerk	9
Abb. 2.8	Nullor-Modell des npn-Transistors	15
Abb. 2.9	Nullor-Modell des pnp-Transistors	15
Abb. 2.10	Nullator-Norator-Modell der UUQ	16
Abb. 2.11	Modifiziertes Modell der UUQ	16
Abb. 2.12	Transistor-Realisierung der UUQ.	16
Abb. 2.13	Negativ-Impedanzkonverter	18
Abb. 2.14	Aktives Netzwerk.	18
Abb. 2.15	Übertrager-Realisierung durch Gyratoren	19
Abb. 3.1	Beispiel für einen Wald aus drei Bäumen	24
Abb. 3.2	Norator-Netzwerk der IUIQ	35
Abb. 3.3	Nullator-Netzwerk der IUIQ	36
Abb. 3.4	Zusammengeschaltetes Netzwerk der IUIQ.	36
Abb. 3.5	Ersatzschaltung der IUIQ.	36
Abb. 3.6	Transistor-Realisierung der IUIQ.	37
Abb. 3.7	OPV-Realisierung der IUIQ	37
Abb. 3.8	Norator-Netzwerk der IIUQ	39
Abb. 3.9	Nullator-Netzwerk der IIUQ	40
Abb. 3.10	Zusammengeschaltetes Netzwerk der IIUQ.	40
Abb. 3.11	Äquivalentes Netzwerk der IIUQ.	40
Abb. 3.12	Ersatzschaltung der IIUQ.	40
Abb. 3.13	Transistor-Realisierung der IIUQ.	41

Abb. 3.14	OPV-Realisierung der IUUQ	41
Abb. 3.15	Norator-Netzwerk der IUUQ	43
Abb. 3.16	Nullator-Netzwerk der IUUQ	43
Abb. 3.17	Zusammengeschaltetes Netzwerk der IUUQ	44
Abb. 3.18	Äquivalentes Netzwerk der IUUQ	44
Abb. 3.19	Ersatzschaltung der IUUQ	45
Abb. 3.20	Transistor-Realisierung der IUUQ	45
Abb. 3.21	OPV-Realisierung der IUUQ	45
Abb. 3.22	Norator-Netzwerk der IIIQ	47
Abb. 3.23	Nullator-Netzwerk der IIIQ	48
Abb. 3.24	Zusammengeschaltetes Netzwerk der IIIQ	48
Abb. 3.25	Äquivalentes Netzwerk der IIIQ	49
Abb. 3.26	Ersatzschaltung der IIIQ	49
Abb. 3.27	Transistor-Realisierung der IIIQ	50
Abb. 3.28	OPV-Realisierung der IIIQ	50
Abb. 3.29	Norator-Netzwerk des PIK	54
Abb. 3.30	Nullator-Netzwerk des PIK	55
Abb. 3.31	Zusammengeschaltetes Netzwerk des PIK	56
Abb. 3.32	Äquivalentes Netzwerk des PIK	57
Abb. 3.33	Ersatzschaltung des PIK	57
Abb. 3.34	OPV-Realisierung des PIK	58
Abb. 3.35	NIK-Netzwerke a Norator-Netzwerke b Nullator-Netzwerke c Zusammengeschaltete Netzwerke d Brückenschaltungen	59
Abb. 3.36	OPV-Realisierungen des NIK a NIK I nach Definition 3.6 b NIK II nach Definition 3.7	60
Abb. 3.37	NIK zur Erzeugung negativer Parameter	61
Abb. 3.38	Norator-Netzwerk des Gytrators	65
Abb. 3.39	Nullator-Netzwerk des Gytrators	66
Abb. 3.40	Zusammengeschaltetes Gytrator-Netzwerk	66
Abb. 3.41	Äquivalentes Gytrator-Netzwerk	67
Abb. 3.42	Ersatzschaltung des Gytrators	67
Abb. 3.43	Transistor-Realisierung des Gytrators	67
Abb. 4.1	Unternetzwerke von N	76
Abb. 4.2	Transistor-Realisierung der NUIQ	77
Abb. 4.3	Ersatzschaltung der NUIQ	77
Abb. 4.4	Umgezeichnete NUIQ	77
Abb. 4.5	Äquivalente NUIQ	78
Abb. 4.6	Nullator-Netzwerk der NUIQ	78
Abb. 4.7	Norator-Netzwerk der NUIQ	78
Abb. 4.8	Transistor-Realisierung der NIUQ	80
Abb. 4.9	Ersatzschaltung der NIUQ	80
Abb. 4.10	Umgezeichnete NIUQ	80

Abb. 4.11	Äquivalente NIUQ	80
Abb. 4.12	Nullator-Netzwerk der NIUQ	81
Abb. 4.13	Norator-Netzwerk der NIUQ	81
Abb. 4.14	Transistor-Realisierung der NUUQ	83
Abb. 4.15	Ersatzschaltung der NUUQ	83
Abb. 4.16	Umgezeichnete NUUQ	83
Abb. 4.17	Äquivalente NUUQ	84
Abb. 4.18	Nullator-Netzwerk der NUUQ	84
Abb. 4.19	Norator-Netzwerk der NUUQ	85
Abb. 4.20	Transistor-Realisierung der NIIQ	86
Abb. 4.21	Ersatzschaltung der NIIQ	86
Abb. 4.22	Umgezeichnete NIIQ	86
Abb. 4.23	Äquivalente NIIQ	87
Abb. 4.24	Nullator-Netzwerk der NIIQ	87
Abb. 4.25	Norator-Netzwerk der NIIQ	88
Abb. 4.26	Rechteck-Impuls	94
Abb. 4.27	PID-Regler	96
Abb. 5.1	Realisierungskreuz	98
Abb. L1	Ideale Spannungsquelle a) Schaltsymbol mit Zählpfeilen b) u-i-Kennlinie	99
Abb. L2	Ideale Stromquelle a) Schaltsymbol mit Zählpfeilen b) u-i-Kennlinie	99
Abb. L3	Beispiel zur (0,8)-Äquivalenz	103
Abb. L4	Beispiel zur (8,0)-Äquivalenz	103
Abb. L5	OPV-Realisierung I des NIK	103
Abb. L6	Transistor-Realisierung I des NIK	104
Abb. L7	Transistor-Realisierung II des NIK	104
Abb. L8	Norator-Netzwerk I zu \underline{G}	117
Abb. L9	Nullator-Netzwerk I zu \underline{G}	117
Abb. L10	Zusammengeschaltetes Netzwerk I zu \underline{G}	118
Abb. L11	Äquivalentes Netzwerk I zu \underline{G}	118
Abb. L12	Nullorfreie Realisierung I zu \underline{G}	119
Abb. L13	Norator-Netzwerk I zu \underline{R}	120
Abb. L14	Nullator-Netzwerk I zu \underline{R}	121
Abb. L15	Zusammengeschaltetes Netzwerk I zu \underline{R}	121
Abb. L16	Äquivalentes Netzwerk I zu \underline{R}	122
Abb. L17	Nullorfreie Realisierung I zu \underline{R}	122
Abb. L18	Norator-Netzwerk II zu \underline{G}	124
Abb. L19	Nullator-Netzwerk II zu \underline{G}	124
Abb. L20	Zusammengeschaltetes Netzwerk II zu \underline{G}	124
Abb. L21	Äquivalentes Netzwerk II zu \underline{G}	125
Abb. L22	Nullorfreie Realisierung II zu \underline{G}	125

Abb. L23	Norator-Netzwerk II zu \underline{R}	126
Abb. L24	Nullator-Netzwerk II zu \underline{R}	126
Abb. L25	Zusammengeschaltetes Netzwerk II zu \underline{R}	127
Abb. L26	Äquivalentes Netzwerk II zu \underline{R}	127
Abb. L27	Nullorfreie Realisierung II zu \underline{R}	128
Abb. L28	Norator-Netzwerk der UUQ	129
Abb. L29	Nullator-Netzwerk der UUQ	130
Abb. L30	Zusammengeschaltetes Netzwerk der UUQ	130
Abb. L31	Äquivalentes Netzwerk der UUQ	131
Abb. L32	Ersatzschaltung der UUQ	131
Abb. L33	OPV-Realisierung der UUQ	131
Abb. L34	Norator-Netzwerk der IIQ	133
Abb. L35	Nullator-Netzwerk der IIQ	134
Abb. L36	Zusammengeschaltetes Netzwerk der IIQ	134
Abb. L37	Äquivalentes Netzwerk der IIQ	135
Abb. L38	Ersatzschaltung der IIQ	135
Abb. L39	OPV-Realisierung der IIQ	135
Abb. L40	Negative technische Induktivität	136
Abb. L41	Negative technische Kapazität	136
Abb. L42	Norator-Netzwerk des NIK	138
Abb. L43	Nullator-Netzwerk des NIK	138
Abb. L44	Zusammengeschaltetes Netzwerk des NIK	139
Abb. L45	Äquivalentes Netzwerk des NIK	140
Abb. L46	Ersatzschaltung des NIK	140
Abb. L47	OPV-Realisierung II des NIK	140
Abb. L48	Alternatives Norator-Netzwerk des Gytrators	143
Abb. L49	Alternatives Nullator-Netzwerk des Gytrators	143
Abb. L50	Zusammengeschaltetes Netzwerk des Gytrators	144
Abb. L51	Äquivalentes Netzwerk des Gytrators	144
Abb. L52	Arbeitspunkt-Einstellung der UUQ	145
Abb. L53	Norator-Netzwerk zu \underline{Y}	148
Abb. L54	Nullator-Netzwerk zu \underline{Y}	148
Abb. L55	Nullorfreie Realisierung zu \underline{Y}	149
Abb. L56	Norator-Netzwerk zu \underline{Z}	151
Abb. L57	Nullator-Netzwerk zu \underline{Z}	152
Abb. L58	Äquivalentes Netzwerk zu \underline{Z}	152
Abb. L59	Nullorfreie Realisierung zu \underline{Z}	153
Abb. L60	Norator-Netzwerk zur Gytrator-Applikation I	155
Abb. L61	Nullator-Netzwerk zur Gytrator-Applikation I	156
Abb. L62	Äquivalentes Gytrator-Netzwerk I	157
Abb. L63	Netzwerk-Realisierung mit Gytrator I	157
Abb. L64	Norator-Netzwerk zur Gytrator-Applikation II	160

Abb. L65	Nullator-Netzwerk zur Gyrator-Applikation II	161
Abb. L66	Äquivalentes Gyrator-Netzwerk II	162
Abb. L67	Netzwerk-Realisierung mit Gyrator II	162
Abb. L68	Netzwerk-Zerlegung mit Gyrator I	163
Abb. L69	Netzwerk-Zerlegung mit Gyrator II	163
Abb. L70	Norator-Netzwerk des PID-Reglers	165
Abb. L71	Nullator-Netzwerk des PID-Reglers	166
Abb. L72	Zusammengeschaltetes Netzwerk des PID-Reglers	166
Abb. L73	Äquivalentes Netzwerk des PID-Reglers	166
Abb. L74	Ersatzschaltung des PID-Reglers	167
Abb. L75	OPV-Realisierung des PID-Reglers	167
Abb. L76	Liniendiagramme des dynamischen Netzwerkes I a) Eingangsstrom b) Eingangsspannung c) Ausgangsstrom.	173
Abb. L77	Liniendiagramme des dynamischen Netzwerkes II a) Eingangsspannung b) Eingangsstrom c) Ausgangsspannung	174
Abb. L78	Liniendiagramme der resistiven UUQ a) Eingangsspannung b) Ausgangsspannung.	174
Abb. L79	Liniendiagramme der resistiven IIQ a) Eingangsstrom b) Ausgangsstrom.	174
Abb. L80	Rechteckantwort eines resistiven Netzwerkes	176
Abb. L81	Rechteckantwort eines dynamischen Netzwerkes	176
Abb. L82	Norator-Netzwerk mit separater Masseklemme.	180
Abb. L83	Nullator-Netzwerk mit separater Masseklemme	180
Abb. L84	Zusammengeschaltetes Netzwerk mit separater Masseklemme	181
Abb. L85	Äquivalentes Netzwerk mit separater Masseklemme.	182
Abb. L86	Beschalteter NIK	182
Abb. L87	Modifizierte Ersatzschaltung des PID-Reglers.	183

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Äquivalenzen von Nullatoren und Noratoren	14
Tab. 2.2	Äquivalenzen von Kurzschlüssen und Leerläufen	14
Tab. 2.3	Äquivalenzen von Nullator-Norator-Paaren	15
Tab. 2.4	Äquivalenzen von Kurzschluss-Leerlauf-Paaren	16
Tab. 3.1	Gleichungen zur Entnormierung	72
Tab. L1	Eigenschaften von Nullatoren und Noratoren	108
Tab. L2	Eigenschaften von Nullatoren und Noratoren	108
Tab. L3	Eigenschaften von RLC-Netzwerken	108
Tab. L4	Normierte und entnormierte Werte	153
Tab. L5	Korrespondenzen der Laplace-Transformation	187