

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Energiespeichernde Komponenten</b>	<b>1</b>
1.1	Einführung	1
1.1.1	Schaltungen mit Widerständen	1
1.1.2	Schaltungen mit Widerständen, Induktoren und Kondensatoren	4
1.2	Kondensatoren	5
1.2.1	Didaktische Beispiele	6
1.2.2	Ersatzkapazität parallel geschalteter Kondensatoren	9
1.2.3	Ersatzkapazität in Reihe geschalteter Kondensatoren	9
1.3	Induktoren	10
1.3.1	Ersatzinduktivität in Reihe geschalteter Induktoren	13
1.3.2	Ersatzinduktivität parallel geschalteter Induktoren	14
1.3.3	Didaktische Beispiele	15
1.4	Gegeninduktivität	19
1.4.1	Der Transformator mit T-Ersatzschaltung	23
1.4.2	Anwendungen für Transformatoren	27
1.5	Antwort energiespeichernder Elemente auf Gleichstromquellen	30
1.6	Numerische Lösung der Differentialgleichungen erster Ordnung	31
1.7	Zeitantwort der Schaltungen erster Ordnung	33
1.8	Die RC-Reihenschaltung	34
1.8.1	Homogene Lösung	35
1.8.2	Partikuläre Lösung für eine konstante Anregung	36
1.8.3	Gesamtlösung für eine konstante Anregung	36
1.8.4	Partikuläre Lösung für eine sinusförmige Anregung	41
1.8.5	Gesamtlösung für eine sinusförmige Anregung	48
	Experiment 1.8.1: Glättung pulsartiger Spannungen mit RC-Glied	50
	Experiment 1.8.2: RC-Glied angeregt mit zwei Quellen	56
	Experiment 1.8.3: Dissipierte Leistung in einer RC-Reihenschaltung	62
	Experiment 1.8.4: Energiebilanz für einen MOSFET-Inverter	68
1.9	Die RL-Reihenschaltung	76
1.9.1	Partikuläre Lösung für eine konstante Anregung	77

1.9.2	Gesamtlösung für eine konstante Anregung .....	78
1.9.3	Partikuläre Lösung für eine sinusförmige Anregung .....	80
1.9.4	Gesamtlösung für eine sinusförmige Anregung .....	82
	Experiment 1.9.1: Glättung pulsartiger Spannungen mit RL-Glied .....	84
1.10	Zeitantwort der Schaltungen zweiter Ordnung .....	87
1.11	Die RLC-Reihenschaltung .....	88
1.11.1	Homogene Lösung der Differentialgleichung .....	90
1.11.2	Partikuläre und Gesamtlösung für eine konstante Anregung .....	92
1.11.3	Differentialgleichung des Stroms der RLC-Reihenschaltung .....	97
	Experiment 1.11.1: DC-DC-Wandler mit RLC-Schaltung .....	98
1.11.4	Partikuläre und Gesamtlösung für eine sinusförmige Anregung der RLC-Reihenschaltung .....	105
1.11.5	Resonanz der RLC-Reihenschaltung .....	107
	Experiment 1.11.2: Prinzip eines Oszillators mit Reihenresonanzkreis ....	107
1.12	Die RLC-Parallelschaltung .....	114
1.12.1	Homogene Lösung für die RLC-Parallelschaltung .....	116
1.12.2	Partikuläre und Gesamtlösung für eine konstante Anregung .....	118
1.12.3	Partikuläre Lösung der RLC-Parallelschaltung für sinusförmige Anregung .....	120
1.12.4	Gesamtlösung der RLC-Parallelschaltung für sinusförmige An- regung .....	122
	Experiment 1.12.1: Prinzip eines Oszillators mit Parallelresonanzkreis ...	128
1.13	Zusätzliche Experimente .....	133
	Experiment 1.13.1: Einschwingvorgang einer RL-Schaltung mit Gleich- stromquelle .....	133
	Experiment 1.13.2: Einschwingvorgang einer RL-Schaltung mit Gleich- stromquelle und nicht idealem Schalter .....	136
	Experiment 1.13.3: Einschwingvorgang einer RL-Schaltung mit zwei Gleichstromquellen .....	136
	Experiment 1.13.4: Einschwingvorgang einer RL-Schaltung mit Wech- selstromquelle .....	139
	Experiment 1.13.5: Einschwingvorgang einer RLC-Schaltung mit Wech- selstromquelle .....	142
	Experiment 1.13.6: Simulation des Zeit- und Frequenzverhaltens eines Tastkopfes .....	145
	Experiment 1.13.7: Invertierender DC-DC-Wandler .....	155
	Experiment 1.13.8: Untersuchung eines Transformators .....	162
	Experiment 1.13.9: Transformatormodell mit Gegeninduktivität .....	173
<b>2</b>	<b>Sinusförmige Anregung elektrischer Schaltungen</b>	<b>177</b>
2.1	Kenngrößen sinusförmiger Schwingungen .....	177
2.1.1	Mittelwert sinusförmiger Schwingungen .....	178
2.1.2	Effektivwert sinusförmiger Schwingungen .....	178
2.1.3	Leistung in Netzwerken mit sinusförmiger Anregung .....	179

2.1.4	Die Leistung in den passiven Komponenten R, L, C .....	184
2.2	Zeigerdarstellung .....	184
2.2.1	Zeigerdiagramm des Reihenresonanzkreises .....	188
2.2.2	Zeigerdiagramm des Parallelresonanzkreises .....	192
2.2.3	Frequenzabhängigkeit der Impedanz in RLC-Parallelschaltung ..	193
2.2.4	Identifikation eines Induktors .....	195
2.2.5	Bestimmung der Kapazität eines Kondensators .....	197
2.2.6	Wechselstrombrücke .....	198
	Experiment 2.2.1: Reale Induktoren .....	199
	Experiment 2.2.2: Realer Kondensator .....	202
	Experiment 2.2.3: Realer Widerstand .....	205
	Experiment 2.2.4: Ersatzschaltung einer Piezodose ausgehend vom me- chanischen Verhalten .....	207
2.3	Mehrphasensysteme .....	213
2.3.1	Zweiphasensystem .....	215
2.3.2	Das symmetrische Dreiphasensystem. Stern- und Dreieckschal- tung .....	218
2.3.3	Einfacher ohmscher Dreiphasenverbraucher .....	224
2.3.4	Einfacher ohmscher Einphasen- und Dreiphasenverbraucher ...	225
	Experiment 2.3.1: Verschiedene Verbraucher am Dreiphasensystem mit festem Sternpunkt .....	225
2.4	Zusätzliche Beispiele und Experimente .....	230
	Experiment 2.4.1: Leistung im Wechselstromkreis .....	230
	Experiment 2.4.2: Wirkleistungsanpassung .....	234
	Experiment 2.4.3: Zusammenschalten zweier Netzsysteme .....	237
	Experiment 2.4.4: Leistungsfaktorkompensation .....	242
	Experiment 2.4.5: Zuschalten des Kompensationskondensators .....	247
	Experiment 2.4.6: Blindleistungskompensation .....	251
<b>3</b>	<b>Beschreibung elektrischer Schaltungen im Frequenzbereich</b> .....	<b>255</b>
3.1	Einführung .....	255
3.2	Frequenzgang linearer elektrischer Schaltungen .....	257
3.2.1	Frequenzgang eines Produkts von Übertragungsfunktionen ....	267
3.3	Filterschaltungen .....	269
3.3.1	Einfache passive Filter .....	272
3.3.2	Beispiel für die Entwicklung eines passiven Tiefpassfilters .....	282
3.3.3	Beispiel für die Entwicklung eines passiven Bandpassfilters .....	286
3.3.4	Aktive Filter .....	288
	Experiment 3.3.1: Zeitverhalten eines Hochpassfilters 3. Ordnung .....	295
3.4	Integrierte Filterschaltungen .....	300
3.4.1	Universal-Filter .....	300
3.4.2	Filter mit geschalteten Kapazitäten ( <i>Switched Capacitor Filter</i> ) .....	302
3.4.3	OTA-Filter ( <i>Operational-Transconductance-Amplifier-Filters</i> ) .....	303

3.5	Zusätzliche Experimente.....	308
	Experiment 3.5.1: Übertragungsfunktion eines Tiefpassfilters 3. Ordnung mit drei Spannungsfolgern.....	308
	Experiment 3.5.2: Numerische Ermittlung der Sprungantwort des Tiefpassfilters 3. Ordnung.....	311
	Experiment 3.5.3: Numerische Identifikation der Übertragungsfunktion aus dem Frequenzgang.....	313
	Experiment 3.5.4: Bestimmung der Zustands- und Ausgangsgleichung für das Filter aus dem vorherigen Experiment.....	317
<b>4</b>	<b>Nichtsinusförmige Ströme und Spannungen</b>	<b>321</b>
4.1	Einführung.....	321
4.2	Fourier-Zerlegung periodischer Zeitfunktionen.....	321
4.2.1	Fourier-Reihe eines rechteckigen, periodischen Signals.....	328
4.2.2	Gibbs-Phänomen.....	331
4.2.3	Annäherung der Fourier-Reihe mit Hilfe der FFT.....	333
	Experiment 4.2.1: Das DFT-Spektrum für zwei periodische Signale.....	338
4.2.4	Fehler bei der Schätzung der Fourier-Reihe über die DFT.....	346
4.3	Lineare Schaltungen mit harmonischen Anregungen.....	350
4.3.1	Diskrete Fourier-Reihe.....	350
	Experiment 4.3.1: Filtern der Oberwellen eines Umrichters mit Saugkreisen.....	356
4.4	Kenngrößen.....	361
4.4.1	Effektivwert.....	361
4.4.2	Schwingungsgehalt und Klirrfaktor.....	362
	Experiment 4.4.1: Kenngrößen über die DFT ermitteln.....	362
4.5	Zusätzliche Experimente.....	367
	Experiment 4.5.1: Simulation einer Dimmer-Schaltung.....	367
	Experiment 4.5.2: Simulation eines Wechselrichters.....	373
<b>5</b>	<b>Nichtlineare Schaltungen im Wechselbetrieb</b>	<b>379</b>
5.1	Einführung.....	379
5.2	Nichtlineare Widerstände.....	379
5.2.1	Die Newton-Raphsonsche Methode.....	385
	Experiment 5.2.1: Spannungsbegrenzung mit VDR-Widerstand.....	386
5.3	Nichtlineare Induktivitäten.....	390
	Experiment 5.3.1: DC-DC Wandler mit nichtlinearer Induktivität.....	391
5.4	Die Halbleiterdiode als nichtlineare Komponente.....	396
5.5	Gleichrichterschaltungen.....	402
5.5.1	Einweggleichrichtung mit Glättung über Induktivität.....	402

5.5.2	Einweggleichrichtung mit Glättung über Induktivität und Kapazität .....	409
5.6	Mischer mit einer Diode .....	415
5.7	Mischer mit geschalteter Spannung .....	420
5.8	Zusätzliche Experimente.....	424
	Experiment 5.8.1: Einfache Reihenschaltung eines Widerstands und eines Induktors mit nichtlinearer Magnetisierungskennlinie .....	424
	Experiment 5.8.2: DC-DC Abwärtswandler mit nichtlinearer Magnetisierungskennlinie des Induktors .....	429
	Experiment 5.8.3: Transformator mit Einweggleichrichtung im Sekundär .....	433
<b>6</b>	<b>Vierpolschaltungen</b> .....	<b>447</b>
6.1	Einführung.....	447
6.1.1	Zweipolersatzschaltung für Verstärker mit JFET-Transistor.....	447
6.2	Vierpolersatzschaltungen .....	450
6.2.1	Vierpol mit Leitwertparametern.....	450
	Experiment 6.2.1: Vierpol mit Leitwertparametern für JFET-Verstärker ...	454
6.2.2	Vierpol mit Impedanzwertparametern .....	458
6.2.3	Vierpol mit Hybrid-Parametern .....	459
	Experiment 6.2.2: Vierpol mit Hybrid-Parametern für Verstärker mit Bipolartransistor .....	461
6.2.4	Weitere Vierpolmodelle .....	467
	Experiment 6.2.3: FET-Transistor mit Rückkopplung über Source-Widerstand .....	469
<b>7</b>	<b>Ausblick</b> .....	<b>475</b>
7.1	Beispiel einer Simulation mit LTSPICE .....	475
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>479</b>
	<b>Index</b> .....	<b>481</b>