

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XIII</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Entwurf analoger Schaltungen . . . . .	2
1.1.1. Oszillatorentwurfskonzepte . . . . .	4
1.1.2. Entwurf von Frequenzmischern . . . . .	7
1.2. Linearisierungsverfahren . . . . .	9
1.2.1. Stand der Technik: Carleman-Linearisierung . . . . .	11
1.3. Beitrag zum Stand der Technik . . . . .	14
1.3.1. Ablauf für den Entwurf und Analyse von analogen Schaltungen mit Hilfe der Carleman-Linearisierung . . . . .	18
1.4. Gliederung der Arbeit . . . . .	20
<b>2. Transformation allgemeiner Netzwerkgleichungen</b>	<b>23</b>
2.1. Modellierung elektrischer Netzwerke . . . . .	23
2.2. Methode von Kerner . . . . .	26
2.3. Numerische Integration gewöhnlicher Differentialgleichung mit Neben- bedingungen . . . . .	31
2.3.1. Numerische Stabilisierung nach Baumgarte . . . . .	32
2.4. Beispiel: Franklin-Oszillator . . . . .	36
<b>3. Carleman-Linearisierung</b>	<b>41</b>
3.1. Allgemeine Theorie zur Carleman-Linearisierung . . . . .	41
3.2. Selbstkonsistente Carleman-Linearisierung . . . . .	48
3.2.1. Anwendung der selbstkonsistenten Carleman-Linearisierung an- hand eines einfachen Beispiels . . . . .	50
3.3. Die Standardbasis und die Carleman-Linearisierung . . . . .	53
<b>4. Oszillatoren</b>	<b>57</b>
4.1. Carleman-Linearisierung und Oszillatoren . . . . .	57
4.1.1. Anwendung des Verfahrens für die Van-der-Pol-Gleichung . . . . .	61
4.2. Colpitts-Oszillator . . . . .	65
4.2.1. Herleitung der polynomiellen Netzwerkgleichungen . . . . .	66
4.2.2. Anwendung der selbstkonsistenten Carleman-Linearisierung und Berechnung der Poincaré-Abbildung . . . . .	69

4.3. LC-Tank-Oszillator . . . . .	71
4.3.1. Herleitung der allgemeinen Netzwerkgleichung . . . . .	73
4.3.2. Anwendung der selbstkonsistenten Carleman-Linearisierung und Berechnung der Poincaré-Abbildung . . . . .	76
<b>5. Frequenzmischer</b>	<b>81</b>
5.1. Carleman-Linearisierung und Frequenzmischer . . . . .	81
5.2. Single-balanced-Frequenzmischer . . . . .	87
5.2.1. Herleitung der allgemeinen Netzwerkgleichung . . . . .	87
5.2.2. Transformation in ein System von polynomiellen Differential- gleichungen . . . . .	88
5.2.3. Anwendung der selbstkonsistenten Carleman-Linearisierung . .	90
<b>6. Implementierung der selbstkonsistenten Carleman-Linearisierung mit Bose-Operatoren</b>	<b>95</b>
6.1. Carleman-Linearisierung mit Hilfe von Bose-Operatoren . . . . .	96
6.2. Bose-Operatoren in Matrixdarstellung . . . . .	101
6.3. Anpassung der Approximation durch Anwendung der Expansion nach Günther . . . . .	104
6.3.1. Demonstration des Verfahrens anhand eines einfachen Beispiels	109
6.4. Erweiterung der Approximation für den mehrdimensionalen Fall . . .	112
6.4.1. Single-balanced-Frequenzmischer und Bose-Operatoren . . . .	114
<b>7. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>117</b>
<b>A. Expansion von Günther</b>	<b>121</b>
<b>B. Sturm-Liouvillesche Differentialgleichung und weitere Polynome</b>	<b>123</b>
<b>Publikationen und Lebenslauf</b>	<b>143</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1. Blockschaltbild eines Superheterodynempfängers [162]. . . . .	1
1.2. Darstellung des iterativen Entwurfsprozesses . . . . .	3
1.3. Lineares Oszillatormodell [29]. . . . .	5
1.4. Ein- und Ausgangsspektrum eines Frequenzmischers . . . . .	7
1.5. Konzepte für einen Frequenzmischer . . . . .	8
1.6. Ablauf für die Analyse mit Hilfe der selbstkonsistenten Carleman-Linearisierung . . . . .	19
2.1. Transformation mit der Methode von Kerner . . . . .	30
2.2. Beispiel für einen Franklin-Oszillator . . . . .	36
2.3. Numerische Simulation des Franklin-Oszillators unter Verwendung der Methode von Kerner . . . . .	39
3.1. Darstellung einer Funktion $P(\tilde{x})$ mit Jacobi-Polynomen . . . . .	44
3.2. Einfaches nichtlineares Netzwerk . . . . .	50
3.3. Approximation der rechten Seite von $\frac{dp_3(\tilde{x})}{dt}$ . . . . .	52
3.4. Vergleich der numerischen Lösung mit den Ergebnissen der Carleman-Linearisierung . . . . .	53
4.1. Geometrische Interpretation der Poincaré-Abbildung [76]. . . . .	59
4.2. Trioden-Oszillator . . . . .	61
4.3. Berechneter zeitlicher Verlauf für $u_a$ und $x_1$ mit der Carleman-Linearisierung . . . . .	63
4.4. Poincaré-Abbildung für die Van-der-Pol-Gleichung . . . . .	64
4.5. Approximierter Grenzyklus mit der selbstkonsistenten Carleman-Linearisierung . . . . .	65
4.6. Parameterabhängigkeit der Amplitude der Oszillation . . . . .	65
4.7. Realisierung eines Colpitts-Oszillators . . . . .	66
4.8. Berechneter zeitlicher Verlauf von $x_1$ (a), $x_2$ (b) und $x_3$ (c) mit der Carleman-Linearisierung . . . . .	70
4.9. Approximierter Grenzyklus mit der selbstkonsistenten Carleman-Linearisierung . . . . .	71
4.10. Parameterabhängigkeit der Amplitude der Oszillation . . . . .	72
4.11. Topologie eines LC-Tank-Oszillators . . . . .	72
4.12. Nichtlineare Charakteristik des Transistorpaars . . . . .	75
4.13. Berechneter zeitlicher Verlauf von $i_L$ (a) und $u$ (b) mit der Carleman-Linearisierung . . . . .	77

4.14. Poincaré-Abbildung für den LC-Tank-Oszillator . . . . .	78
4.15. Approximierter Grenzyklus mit der selbstkonsistenten Carleman-Linearisierung . . . . .	78
4.16. Parameterabhängigkeit der Amplitude der Oszillation . . . . .	79
5.1. Zuordnung der Spektralanteile . . . . .	86
5.2. <i>Single-balanced</i> -Frequenzmischer realisiert mit MOS-Transistoren . . .	87
5.3. Approximation des Frequenzmischers mit der Carleman-Linearisierung	91
5.4. Spektrum von $u_{\text{out}}$ für $\tilde{N}_{\text{max}} = 2$ . . . . .	91
5.5. Spektrum von $u_{\text{out}}$ für $\tilde{N}_{\text{max}} = 3$ . . . . .	93
5.6. Parameterabhängigkeit der Amplitude eines Spektralanteils . . . . .	93
6.1. Verteilung der Eigenwerte für den Bose-Operator $\mathbf{b}_{\text{Selb.}}$ durch Verwendung der Expansion nach Günther. . . . .	110
6.2. Eigenwerte der Matrizen $\mathbf{A}_{\text{Tr.}}$ (Kreuze) und $\mathbf{A}_{\text{Selb.}}$ (rote Punkte) aus (6.80) und (6.81). . . . .	111
6.3. Numerische Lösung mit Bose-Operatoren . . . . .	112