

Dipl.-Ing. Lutz Hofmann, Hannover

**Modellierung von
Freileitungen mit
frequenzabhängigen
Parametern
im Kurzzeitbereich**

Reihe **21**: Elektrotechnik

Nr. **243**

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Indizes	IX
Abstract	XIV
1 Einleitung und Aufgabenstellung	1
2 Leitungsgleichungen und Leitungsparameter	5
2.1 Gleichungen, Anordnung, Voraussetzungen und Näherungen	5
2.2 Bestimmung der elektrischen und magnetischen Felder in der Luft und im Erdboden	9
2.2.1 Lösungsansatz für die Felder im Dielektrikum Luft	10
2.2.1.1 Durch den Strom im Erdboden erzeugte Felder	10
2.2.1.2 Durch den Strom im Leiter i erzeugte Felder	12
2.2.2 Lösungsansatz für die Felder im Erdboden	12
2.2.3 Bestimmung der Funktionen $\underline{A}_0(k_x)$ und $\underline{A}_E(k_x)$ über die Randbedingungen	13
2.2.4 Lösungen für die elektrischen und magnetischen Feldstärken	15
2.2.4.1 Magnetische Feldstärken	15
2.2.4.2 Elektrische Feldstärken	16
2.3 Bestimmung des elektrischen und magnetischen Feldes im Leiterinneren	18
2.4 Herleitung der Leitungsgleichungen im Frequenzbereich	20
2.5 Zusammenfassung	23
3 Berechnung der Freileitungsimpedanzen	25
3.1 Impedanzen durch das magnetische Feld in der Luft	25
3.2 Innere Impedanz	26
3.3 Impedanzen durch das magnetische Feld im Erdboden	27
3.3.1 Berechnung des Integrals $\underline{F}_1(j\omega)$	29
3.3.2 Berechnung des Integrals $\underline{F}_2(j\omega)$	31
3.3.3 Zusammenfassung der Lösung: $\underline{F}(j\omega) = \underline{F}_1(j\omega) + \underline{F}_2(j\omega)$	36
3.3.4 Auswertung der Potenzreihenentwicklung	38
3.3.5 Spezialfälle	41
3.3.6 Impedanzen im Bereich der Nennfrequenz	43
3.3.7 Lösung mit einer asymptotischen Reihenentwicklung	44
3.3.8 Lösung mit einer Approximationsfunktion	45
3.4 Resultierende Impedanzen im Bereich der Nennfrequenz	52
3.5 Zusammenfassung	52

4 Exaktes Leitungsmodell	54
4.1 Leitungsgleichungen im Frequenzbereich.....	54
4.1.1 Leitungsgleichungen in natürlichen Koordinaten	54
4.1.2 Leitungsgleichungen in modalen Koordinaten.....	55
4.2 Leitungsgleichungen im Zeitbereich.....	57
4.3 Bestimmung der Transformationsmatrizen $\underline{\mathbf{I}}_U(s)$ und $\underline{\mathbf{I}}_I(s)$	58
4.3.1 Zusammenhang zwischen den Transformationsmatrizen $\underline{\mathbf{I}}_U(s)$ und $\underline{\mathbf{I}}_I(s)$	59
4.3.2 Spezialfall: diagonal-zyklisch symmetrische Parametermatrizen	59
4.3.2.1 Bestimmung der Transformationsmatrix $\underline{\mathbf{I}}_M$ für die Einfachleitung.....	61
4.3.2.2 Bestimmung der Transformationsmatrix $\underline{\mathbf{I}}_{MDL}$ für die Doppelleitung	61
4.4 Mehrpolgleichungen des exakten Leitungsmodells.....	62
4.4.1 Lösungsansatz für die Spannungen und die Ströme.....	62
4.4.2 Berücksichtigung der Randbedingungen.....	63
4.4.3 Exaktes Leitungsmodell in Hybridform.....	64
4.4.4 Exaktes Leitungsmodell in Admittanzform.....	65
4.4.5 Exaktes Leitungsmodell in Impedanzform	66
4.4.6 Exaktes Leitungsmodell in Form der laufenden Wellen.....	67
4.4.7 Stromquellenersatzschaltung des exakten Leitungsmodells	69
4.5 Kenngrößen des exakten Leitungsmodells	70
4.5.1 Ausbreitungskoeffizient $\underline{\gamma}(s)$	70
4.5.2 Wellenimpedanz $\underline{Z}_W(s)$	72
4.6 Lösung der Leitungsgleichungen	72
4.7 Lösung der Leitungsgleichungen für die verlustlose Leitung	75
4.8 Zusammenfassung.....	77
5 Genäherte Leitungsmodelle	78
5.1 Einleitung und Einteilung.....	78
5.2 Wellen-Leitungsmodelle.....	79
5.2.1 Entwicklung der ersten Wellen-Leitungsmodelle	79
5.2.2 Leitungsmodell von A. Semlyen und A. Dabuleanu.....	80
5.2.3 Leitungsmodell von J. Marti	82
5.2.4 Leitungsmodell von T. Noda, N. Nagaoka und A. Ametani.....	83
5.2.5 Leitungsmodell von H. Grabinski	84
5.3 Netzwerk-Leitungsmodelle	88
5.3.1 Kettenleiter	88
5.3.2 Zustandsgleichungen der Kettenleiter	91
5.3.2.1 Grundlagen der Zustandsdarstellung	91
5.3.2.2 Allgemeine Form der Zustandsgleichungen der Kettenleiter	92

5.3.2.3 T- und T*-Kettenleiter	92
5.3.2.4 Π - und Π^* -Kettenleiter	93
5.3.3 Differenzgleichungen der Kettenleiter	94
5.4 Zusammenfassung	95
6 Eigenwerte des exakten Leitungsmodells und der Kettenleiter	98
6.1 Zustandsgleichung und Übertragungsfunktion.....	98
6.2 Eigenwerte des exakten Leitungsmodells.....	99
6.3 Gleichungen und Parameter eines symmetrischen Vierpols.....	101
6.4 Eigenwerte des T-Kettenleiters	103
6.4.1 Eigenwerte bei Kurzschluß am Leitungsende B.....	103
6.4.2 Eigenwerte bei Leerlauf am Leitungsende B.....	107
6.5 Eigenwerte des Π -Kettenleiters	108
6.5.1 Eigenwerte bei Kurzschluß am Leitungsende B.....	109
6.5.2 Eigenwerte bei Leerlauf am Leitungsende B.....	109
6.6 Eigenwerte des T*-Kettenleiters.....	110
6.6.1 Eigenwerte bei Kurzschluß am Leitungsende B.....	110
6.6.2 Eigenwerte bei Leerlauf am Leitungsende B.....	112
6.7 Eigenwerte des Π^* -Kettenleiters	113
6.7.1 Eigenwerte bei Kurzschluß am Leitungsende B.....	113
6.7.2 Eigenwerte bei Leerlauf am Leitungsende B.....	114
6.8 Vergleich und Zusammenfassung.....	115
7 Entwicklung eines Netzwerk-Leitungsmodells durch Polvorgabe	118
7.1 Partialbruchzerlegung der Übertragungsfunktionen.....	118
7.2 Zustandsdarstellung des Netzwerk-Leitungsmodells durch Polvorgabe	121
7.2.1 Vorbetrachtungen.....	121
7.2.2 Vergleich der Frequenzgänge	124
7.2.3 Modifikation der Partialbruchzerlegungen	127
7.2.4 Diagonalisierung der Übertragungsfunktionen	131
7.2.5 Zustandsgleichung	132
7.2.6 Spezialfall: diagonal-zyklisch symmetrische Parametermatrizen.....	134
7.3 Interpretation der Zustandsgleichungen durch Ersatzschaltungen	136
7.3.1 R-L-Ersatzschaltung der reellen Eigenwerte	137
7.3.2 L-C-Ersatzschaltung der konjugiert komplexen Eigenwertpaare	138
7.4 Startwertberechnung.....	140
7.5 Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit der Leitungsparameter	141
7.6 Simulationsergebnisse	146
7.7 Zusammenfassung	153

8 Entwicklung eines Wellen-Leitungsmodells im Zustandsraum	154
8.1 Ausgangsgleichungen und Approximation der Übertragungsfunktionen.....	154
8.2 Zustandsdarstellung des Wellen-Leitungsmodells	159
8.3 Startwertberechnung.....	164
8.4 Simulationsergebnisse	164
8.5 Zusammenfassung.....	169
9 Zusammenfassung	171
10 Anhang	176
11 Literaturverzeichnis	177