
Wellenbeschreibung elektrischer Netzwerke mit der Streumatrix

Siegfried Martius

Wellenbeschreibung elektrischer Netzwerke mit der Streumatrix

Siegfried Martius
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen
Erlangen, Deutschland

ISBN 978-3-658-38874-4 ISBN 978-3-658-38875-1 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-38875-1>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 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

für Irmela

Vorwort

Das Buch über die Streumatrix S verdankt seine Entstehung meinem aktiven Umgang mit der Streumatrix während des ganzen Berufslebens. Diese Zeit korrelierte mit der umfassenden Anwendung der Streumatrix S für die Beschreibung des linearen Verhaltens von Netzwerken als auch mit der dazu gehörenden Messtechnik und deren Entwicklung von der koaxialen Messleitung bis hin zum rechnergesteuerten Mehrtor-Netzwerkanalytator im Hochfrequenzbereich.

Warum sollte man heute so ein Buch schreiben, wo es die umfassenden Programme wie das ADS®, MWO® u. a. gibt? Die Erfahrung lehrt, dass der unbedarfte Umgang mit den Programmen und die Gutgläubigkeit an die Richtigkeit der Ergebnisse dieser Programme häufig für unliebsame Abweichungen bezüglich der Messwerte in der Praxis geführt hat. Es ist wichtig, dass der Anwender die Programme beherrscht und nicht umgekehrt.

Dafür ist es notwendig, zu wissen, wie die Programme die Realität modellieren. Nur dann wird das Ergebnis gut mit der Praxis übereinstimmen. Dazu sind die elementaren Kenntnisse der Netzwerktheorie und der Modellierung von Grundschaltungen nötig. Dieser Wissensvorrat gleicht einem Betriebssystem in dem der Ingenieur jonglieren kann, um die Realität mit diesen Programmen abzubilden. Bis heute ist die Entstehung bzw. der Entwurf einer neuen Schaltung immer noch und wird es auch bleiben die kreative Leistung des Ingenieurs. So etwas können die Programme (noch?) nicht.

Den in der Praxis tätigen Ingenieur möchte ich ein Buch zum Nachschlagen und zur Anregung in die Hand geben. Allen die sich für die Hochfrequenztechnik interessieren soll es die Welt der Beschreibung des linearen Verhaltens von Netzwerken mit dem Wellenformalismus und deren Möglichkeiten vorstellen.

Im ersten Abschnitt wird die Entwicklung der Netzwerkbeschreibung mit den Strom-/Spannungsmatrizen nachgezeichnet. Insbesondere werden deren Unzulänglichkeit bezüglich des Betriebsverhaltens zwischen der realen Quelle und der Last genannt. Damit verbunden ist der für hohe Frequenzen ($\lambda < 0.1 \text{ max. Geometrie}$) notwendige Übergang vom Vierpol zum Zwei-/Mehrtor und von Strom, Spannung zur Wellendefinition. Diese ergibt sich in Analogie zur Wellenbeschreibung des elektrischen

Verhaltens homogener Leitungen aus dem Zusammenspiel von Quelle und Last bezüglich der Leistungsübertragung.

Es ist bemerkenswert, dass zwischen der Definition der Streumatrix 1945 bis zu praktikablen Geräten für deren Messung 20 Jahre vergingen. Erst dadurch war es möglich, diese Art der Netzwerkbeschreibung umfassend in der Praxis zu nutzen. Die Vorteile der Streumatrix S mit der Definition durch zulaufende a und ablaufende Wellen b überwiegen weit die der Strom-/Spannungsmatrizen.

Für Schaltungen mit konzentrierten Bauelementen gelingt die Berechnung der Elemente von S durch die Anwendung KIRCHHOFF'schen Regeln. Symmetrieeigenschaften der Anordnungen reduzieren den Aufwand. Besonders übersichtlich wird die Schaltungsanalyse mit Hilfe der Signalfluss-Graphen. Von grundlegender Bedeutung für die Normierung der Wellen sowie Spannungen und Ströme ist die Definition des Wellenwiderstandes bei den unterschiedlichen Wellenleitern.

Symmetrien, Reziprozität, Leistungsbilanz sowie Eigenwerte mit deren Eigenvektoren spielen eine große Rolle für das tiefere Verständnis der Strukturen der verschiedenen Streumatrizen. Um das Ziel der maximalen Leistungsverstärkung zu erreichen, ist es unbedingt notwendig, die Stabilität des Zweitors zu untersuchen.

Historisch betrachtet war die Analyse der Verschaltung von Hohlleiterbauteilen der Grund, von R. H. Dicke 1945 die Streumatrix einzuführen. Heute lassen sich mit dem Apparat der Matrizen-Algebra und Rechnern Torverbindungen wie Kettenschaltungen, periodische Strukturen (z. B. Bragg-Gitter), Mehrtore im Ein- und Mehrmodenbetrieb in kurzer Zeit berechnen.

Die Welt von heute benutzt privat und kommerziell elektronische Geräte mit einer großen Packungsdichte. Dabei müssen diese Geräte intern funktionieren und alle Bestimmungen der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) erfüllen. Die differenzielle Leitungsführung ist dafür sehr gut geeignet. Fast alle Messgeräte haben aber nur erdbezogene Anschlüsse. Deshalb muss eine geeignete Beschreibung und Messtechnik der differenziellen Mehrtore gefunden werden.

Das Gerät zur Messung der Elemente der Streumatrix S ist der Netzwerkanalysator. In Abhängigkeit von der Frequenz sind verschiedene Strukturen im Einsatz. In der Praxis kann deren Annäherung an den idealen Netzwerkanalysator nur endlich gut sein. Aus diesem Grund ist die Kalibrierung unerlässlich und dazu sind geeignete Kalibriernormale erforderlich.

Je nach Größe und erforderlicher Genauigkeit erfolgt die Kalibrierung mit verschiedenem Aufwand. Dank der Geschwindigkeit heutiger Prozessoren und Speicher ist dennoch selbst bei der 16-Term Kalibrierung die zeitnahe Darstellung der fehlerkorrigierten Messwerte in relativ kurzer Zeit möglich.

Neben der eigentlichen Signalübertragung ist das Verhältnis der Signal- zur Rauschleistung von großer Bedeutung. Auch das Kleinsignal Rauschen ist der Matrixbeschreibung mit dem Wellenalgorithmus zugänglich. Der Formalismus der Rauschwellen-Korrelationsmatrix ermöglicht die umfassende Analyse einer Schaltung und daraus abgeleitet Vorgaben für deren rauscharme Dimensionierung. Damit

schließt sich der Kreis für die konsistente Wellenbeschreibung des linearen Verhaltens elektrischer Netzwerke.

Elektronisches Zusatzmaterial ist für die Themen

- Mehrtor-Verbindungen (Kap. 5)
- Differenzielle Leitungen (Kap. 6)
- NWA-Fehler (Kap. 8)
- Rauschparameter-Messung (Kap. 9)
- S-Parameter Programme Taschenrechner HP 48GX (Kap. 10)

verfügbar. Außer einer Beschreibung gibt es kleine Programme (HP 48GX) und größere, zu deren Ausführung das Mathematikprogramm MATLAB® und das Schaltungsprogramm ADVANCED DESIGN SYSTEM (ADS®) erforderlich sind. Der Hinweis auf dieses Material erfolgt mit einem Link zu Beginn der entsprechenden Kapitel.

Viele Darstellungen in dem Buch sind das Ergebnis der Diskussionen/Anregungen mit/von Studenten und Kollegen am Institut für Mikrowellentechnik und Wellenausbreitung der Technischen Hochschule Ilmenau/Thür. und am Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Allen danke ich dafür sehr.

In der Abgeschiedenheit des Thüringer Schiefergebirges konnte ich dieses Buch dank der Unterstützung meiner Frau schreiben. Ihr möchte ich besonders danken.

Heinersdorf/Bad Lobenstein 2022

Siegfried Martius

Inhaltsverzeichnis

1	Quelle und Last	1
1.1	Vierpol, Spannung, Strom	2
1.2	Homogene Leitung, Welle	10
1.3	Quelle – Last, Normierung R_0, G_0	20
1.4	Quelle – Last, Normierung R_Q, G_Q	29
	Literatur.	36
2	Die Streumatrix S	37
2.1	Geschichte der Streumatrix S	37
2.2	Definition der Streumatrix S	42
2.3	Umrechnungen der Streumatrix S , Normierung R_0, G_0	47
2.4	Umrechnungen der Streumatrix S , Normierung R_i, G_i	53
	Literatur.	60
3	Berechnung der Elemente der Streumatrix	63
3.1	Konzentrierte Bauelemente, Zweitore	64
3.2	Symmetrische Mehrtere.	73
3.3	Signalfluss-Graphen.	86
3.4	Verbindungen von Wellenleitern	95
3.5	Wellenwiderstand.	105
	Literatur.	114
4	Eigenschaften der Streumatrix S	117
4.1	Symmetrien, Reziprozität	117
4.2	Leistungsbilanz	119
4.3	Eigenwerte, Eigenvektoren	130
4.4	Stabilität.	138
4.5	Leistungsverstärkung	147
	Literatur.	162

5	Torverbindungen	165
5.1	Kettenschaltung von Zweitoren	166
5.1.1	Periodische Strukturen	168
5.1.2	Kettenschaltung Mehrmoden	177
5.2	Verschaltung von Mehrtoren	179
5.3	Rückrechnung	183
5.4	Dreitor	185
	Literatur	193
6	Differenzielle Leitungen	195
6.1	Analyse Dreileitersystem	197
6.2	Struktur der modalen Streumatrix \mathbf{S}_m , Beispiele	203
6.3	Symmetrierglied	216
6.4	Symmetrierglied, Beispiele	219
	Literatur	224
7	Netzwerkanalysator	225
7.1	Wellentrennung	227
7.1.1	Richtkoppler, Eintormessung	227
7.1.2	Allgemeines Viertor, Eintormessung	231
7.1.3	Brücke, Eintormessung	237
7.1.4	Zweitormessung	239
7.2	Kalibriernormale	245
7.2.1	Luftleitung	245
7.2.2	Kurzschluss	255
7.2.3	Leerlauf	260
7.2.4	Abschlusswiderstand	264
7.2.5	Spalt am Innenleiter	268
	Literatur	273
8	Netzwerkanalysator – Kalibrierung	275
8.1	Kalibrierung – Eintor	276
8.2	Kalibrierung – Zweitore	281
8.2.1	16-(15)-Term Fehlermodell	283
8.2.2	8-(7)-Term Fehlermodell	290
8.2.3	12-(10)-Term Fehlermodell	302
8.2.4	Verifikation der Kalibrierung	308
	Literatur	313
9	Rauschen	315
9.1	Rauschursachen	319
9.1.1	Thermisches Rauschen	319
9.1.2	Schrot-Rauschen	321
9.2	Definition der Rauschzahl	324

9.3	Rauschzahl des Zweitorts	328
9.4	Korrelationsmatrizen, Mehrtore	336
9.5	Rauschwellen	344
9.5.1	Streumatrix \mathbf{S}	344
9.5.1.1	Streumatrix, Empfängertemperatur	344
9.5.1.2	Streumatrix, passives Mehrtor	346
9.5.1.3	Rauschwellen und Dreitor	354
9.5.1.4	Rauschwellen und Torverbindungen	361
9.5.1.5	Rauschwellen und Rückrechnung	365
9.5.2	Wellen-Kettenmatrix \mathbf{T}	370
9.5.2.1	Wellen-Kettenmatrix \mathbf{T} , Empfängertemperatur	370
9.5.2.2	Messung der Rauschparameter mittels der Wellen-Kettenmatrix \mathbf{T}	374
	Literatur	380
10	Anhang	383
10.1	MATLAB®-Programme, Torverbindungen	383
10.2	WEISSFLOCH-Methode	392
10.3	Bildimpedanzen/-admittanzen	397
10.4	Rauschzweitor	401
10.5	Streumatrizen n-Tore	404
	Literatur	428
	Stichwortverzeichnis	429

Formelzeichen und Symbole

Alle im Buch benutzten Amplituden sind **Effektivwerte**. Für alle Amplituden gilt die harmonische Zeitabhängigkeit, z. B. für die Spannung

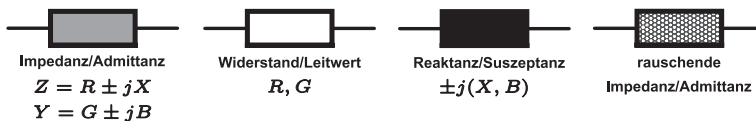
$$\begin{aligned}u(t) &= \sqrt{2} |U| \cos(\omega t + \varphi) = \frac{1}{2} \left(\sqrt{2} |U| e^{j(\omega t + \varphi)} + \sqrt{2} |U| e^{-j(\omega t + \varphi)} \right) \\&= \frac{\sqrt{2}}{2} \left(U e^{j\omega t} + (U e^{j\omega t})^* \right)\end{aligned}$$

mit $u(t)$ als Zeitfunktion und $U = |U| e^{j\varphi}$ als Effektivwertphasor. Alle Amplituden mit kleinen Buchstaben u , i , a und b sind normierte Effektivwertphasoren (s.a. Tab. 1.1).

Bei der Anwendung der Matrizen-Algebra gilt folgende Notation:

\mathbf{M}	Matrix, im allgemeinen komplex
\mathbf{M}^T	transponierte Matrix
$\overline{\mathbf{M}}$	konjugiert komplexe Matrix
\mathbf{M}^*	transjugierte komplexe Matrix
$\Delta \mathbf{M}$	Determinante der Matrix
\mathbf{E}	Einheitsmatrix
\mathbf{O}	Nullmatrix

verwendete Schaltzeichen:



In dem Buch wird die Abhängigkeit von der Frequenz vieler definierter Größen nicht extra gekennzeichnet. Sie ergibt sich automatisch aus dem gegenseitigen Zusammenhang.

Formelzeichen

a	$[\sqrt{W}]$	Matrix der zulaufenden Wellen, a_i zulaufende Welle zum Tor i
a	[-]	normierte Kettenmatrix ¹
a_ℓ	$[\sqrt{W}]$	vorlaufende Welle an der Stelle ℓ
a_T	[-,dB]	Betriebsdämpfung
A	$[\Omega, S]$	Kettenmatrix ¹
A	[-]	Matrix der Koeffizienten A_{ij} eines linearen Gleichungssystems
A	$[m^2]$	Flächenvektor ¹
b	$[\sqrt{W}]$	Matrix der ablaufenden Wellen, b_i ablaufende Welle vom Tor i
b_ℓ	$[\sqrt{W}]$	rücklaufende Welle an der Stelle ℓ
B	[-]	Matrix der rechten Seite B_i eines linearen Gleichungssystems
B_W	[S]	Wellensuseptanz
b	[-]	normierte Suszeptanz
C'	[F/m]	Kapazitätsbelag
C_g	[-]	Stromverstärkung
C_{cor}	[-]	komplexer Korrelationsfaktor
$C^{y,a,S,T}$	[-]	Rauschkorrelationsmatrix der Darstellungen y, a, S, T
c_0	[m/s]	Lichtgeschwindigkeit
E	[V/m]	Vektor der elektrischen Feldstärke ¹ , E_i Komponente in i-Richtung
F	[-]	Fehlertorstrommatrix
$F(T_0)$	[-,dB]	Rauschzahl bezogen auf $T = T_0$
f	[1/s]	Frequenz
G_{av}	[-,dB]	verfügbare Leistungsverstärkung
G_T	[-,dB]	Betriebsleistungsverstärkung
G'	[S/m]	Leitwertbelag
G_0	[S]	Normierungsleitwert, fast immer $1/(50\Omega)$, weniger $1/(75\Omega)$
G_W	[S]	Wellenleitwert
$G_{D,0}$	[S]	differenzieller Diodenleitwert bei $T = T_0$
g	[-]	normierter Leitwert
H	[A/m]	Vektor der magnetischen Feldstärke, H_i Komponente in i-Richtung
I	[A]	Strom
I_ℓ^\pm	[A]	Strom an der Stelle ℓ , $+$ vorlaufend, $-$ rücklaufend
L'	[H/m]	Induktivitätsbelag

¹ die Bedeutung ergibt sich aus der entsprechenden Gleichung

L, ℓ	[m]	Länge
$\mathbf{M}^{S,D}$	[-]	Summen- S , Differenzmatrix D
\mathbf{P}	[-]	Formmatrix
P_L	[W]	Wirkleistung in der Last
$P_{L,c}$	[VA]	Leistung in der Last, komplex
$P_{Q,av}$	[W]	verfügbare Wirkleistung der Quelle
P_ℓ^\pm	[W]	Wirkleistung an der Stelle ℓ , $^+$ vorlaufend, $^-$ rückklaufend
$p_r = P_r / (4kT_0 \Delta f)$	[-]	normierte Rauschleistung, $\Delta f = 1\text{Hz}$
R'	[Ω/m]	Widerstandsbelag
R_0	[Ω]	Normierungswiderstand, fast immer 50Ω , weniger 75Ω
R_W	[Ω]	Wellenwiderstand
r	[-]	normierter Widerstand
\mathbf{S}	[-]	Streumatrix, Elemente s_{ij}
$\mathbf{S}_n, \mathbf{S}_m$	[-]	$_n$ nodale Streumatrix, $_m$ modale Streumatrix
S_r	[Ws]	spektrale Rauschleistungsdichte
S_{ij}	[-]	j. Schleife i. Ordnung
\mathbf{T}	[-]	Wellen-Kettenmatrix (Transmissionsmatrix), Elemente t_{ij}
T	[K]	Temperatur
$t_e(T_0)$	[-]	auf $T = T_0$ normierte Empfängertemperatur
U	[V,-]	Spannung, MASON Invariante ¹
U_ℓ^\pm	[V]	Spannung an der Stelle ℓ , $^+$ vorlaufend, $^-$ rückklaufend
\mathbf{V}	[-]	Eigenvektor, Eigenvektormatrix
V_g	[-]	Spannungsverstärkung
v_{Ph}	[m/s]	Phasengeschwindigkeit
\mathbf{W}	[-]	Speichermatrix
X_W	[Ω]	Wellenreaktanz
x	[-]	normierte Reaktanz
\mathbf{Y}	[S]	Admittanzmatrix
\mathbf{y}	[-]	normierte Admittanzmatrix
Y	[S]	Admittanz $Y = G \pm jB$
y	[-]	normierte Admittanz $y = g \pm jb$
Y_t	[S]	Transferadmittanz
Y_W	[S]	Wellenadmittanz
\mathbf{Z}	[Ω]	Impedanzmatrix
\mathbf{z}	[-]	normierte Impedanzmatrix
Z	[Ω]	Impedanz $Z = R \pm jX$
z	[-]	normierte Impedanz $z = r \pm jx$

Z_t	[Ω]	Transferimpedanz
Z_W	[Ω]	Wellenimpedanz
Z_{FH}	[Ω]	Feldwellenimpedanz H_{10} – Mode
α	[1/m]	Dämpfungskonstante
β	[1/m]	Phasenkonstante
γ	[1/m]	Ausbreitungskonstante
Γ	[-]	Reflexionsfaktor
Γ_{ij}	[-]	Reflexionsfaktor an den Stellen $i = \ell, L$ für $j = U, I$
Δ	[-]	Determinante, Nenner Schleifenregel ¹
ϵ_0	[F/m]	elektrische Feldkonstante
η	[-]	Wirkungsgrad
κ	[-]	Koppelfaktor
$\mathbf{\Lambda}$	[-]	Eigenwertmatrix
λ	[m,-]	Wellenlänge, Eigenwert ¹
φ	[rad, °]	Phasenwinkel
μ_0	[H/m]	magnetische Feldkonstante
$\mu_{1,2}$	[-]	Stabilitätsparameter
ρ	[-]	Reflexionsfaktor
σ	[-, S/m]	Isolation, Leitfähigkeit ¹
τ	[-]	Transmissionsfaktor
ω	[1/s]	Kreisfrequenz

Schutzmarken

ADS [®]	Advanced Design System, KEYSIGHT Technologies, INC.
MWO [®]	Microwave Office, CADENCE Design Systems, INC.
MATLAB [®]	The MathWorks, INC.
HFSS [®]	ANSYS, INC.
Maxwell 2D [®] , Studentenversion	ANSYS, INC.
OCTAVE [®]	GPL, Free Software Foundation, INC.
CST Microwave Studio [®]	Dassault Systemes, 3DEXperience
μ Wave [®]	Mician GmbH
Quickfield [®] , Studentenversion	Tera Analysis, Ltd.