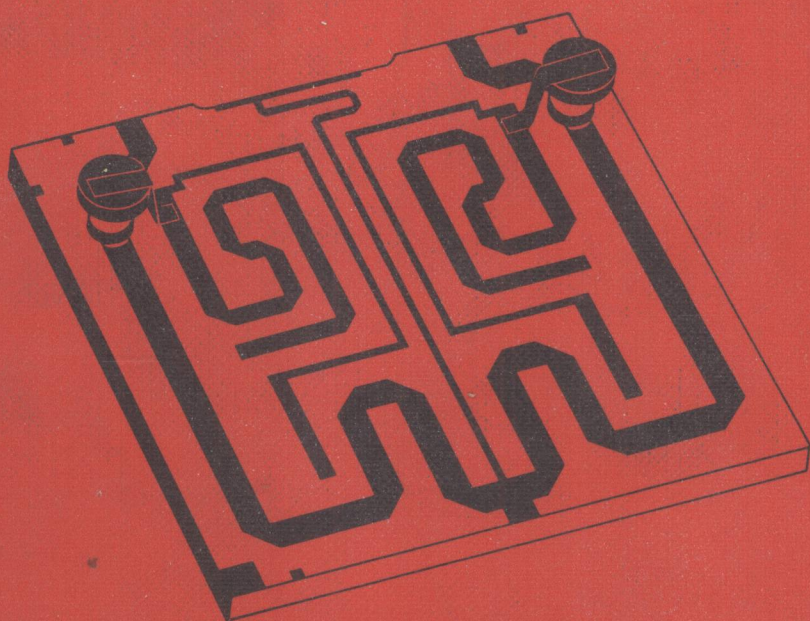


Reinmut K. Hoffmann

Integrierte Mikrowellen- schaltungen

Elektrische Grundlagen, Dimensionierung,
technische Ausführung, Technologien



Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York Tokyo

TN 454

14 711

8064230

5

Reinmut K. Hoffmann



Integrierte Mikrowellenschaltungen

Elektrische Grundlagen, Dimensionierung,
technische Ausführung, Technologien

Mit 176 Abbildungen



E8054230

Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York Tokyo 1983

335+306

Dipl.-Ing. Reinmut K. Hoffmann
Siemens AG, Bereich Kommunikationstechnik, München

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek:

Hoffmann, Reinmut: Integrierte Mikrowellenschaltungen : Elektrische Grundlagen, Dimensionierung, techn. Ausführung, Technologien / R. Hoffmann. – Berlin ; Heidelberg ; New York : Springer, 1983.

ISBN 3-540-12352-0 Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York

ISBN 3-387-12352-0 Springer-Verlag New York, Heidelberg, Berlin

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Die Vergütungsansprüche des § 54, UrhG werden durch die »Verwertungsgesellschaft Wort«, München, wahrgenommen.

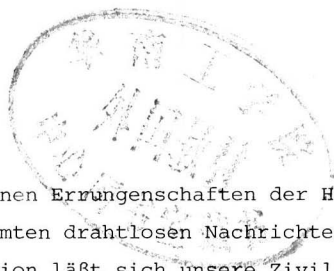
©by Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 1983

Printed in Germany

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Drucker Weichert Druck GmbH, Darmstadt; Binder: K. Triltsch, Würzburg
2362/3020-543210

Vorwort



Ohne die hauptsächlich in diesem Jahrhundert gewonnenen Errungenschaften der Hochfrequenztechnik z.B. auf dem breiten Gebiet der gesamten drahtlosen Nachrichtenübertragung, auf den Gebieten der Ortung und Navigation läßt sich unsere Zivilisation kaum mehr vorstellen. Vorliegendes Buch befaßt sich mit einem jungen Zweig der Hochfrequenztechnik, nämlich der Mikrowellentechnik bei Frequenzen zwischen etwa 0,5 GHz und 20 GHz, und hier wiederum mit deren jüngstem Sproß, den integrierten Mikrowellenschaltungen.

Die klassischen Anwendungen der Mikrowellen in der terrestrischen Richtfunktechnik und der Radartechnik haben sich in den letzten Jahrzehnten stark erweitert, und es sind - durch technologische Fortschritte ermöglicht - viele neue Anwendungsgebiete hinzugekommen. Dazu gehören die Kommunikation und Navigation über Satelliten, die industrielle Meßtechnik, Luftverkehrssicherungssysteme, Radiometrie, industrielle Fertigungsprozeßüberwachung und medizinische Anwendungen sowie die das breite Publikum unmittelbar betreffenden Anwendungen beim Satellitenfernsehen, Polizeiradar, bei Diebstahl- und Einbruchalarmsystemen und den evtl. zu erwartenden automatischen Brems- und Steuersystemen für Kraftfahrzeuge. Außerdem dringt bei superschnellen Impulsschaltungen (Gigabit-Logik) für Breitbandkommunikation und schnelle Rechner die Mikrowellentechnik in das weite Gebiet der Digitaltechnik ein.

Diese starke Ausweitung der Mikrowellenanwendungen ist durch große Fortschritte auf zwei Gebieten, nämlich der Mikrowellen-Halbleitertechnologie und der Technik integrierter Mikrowellenschaltungen ermöglicht worden. In den Anfangszeiten der Mikrowellentechnik in den dreißiger und vierziger Jahren beschränkten sich die Mikrowellenschaltungen auf wenige Komponenten, hauptsächlich auf Röhrensender und einfache Eindioden-Empfangsmischer in sperriger Koaxialleitungs- und Hohlleiter-technik ("Wasserleitungstechnik"). In den letzten drei Jahrzehnten wurde eine Fülle neuer Mikrowellen-Halbleiterbauelemente erfunden und technisch ausgereift wie z.B. Schottkydioden, PIN-Dioden, Varaktordioden, Gunndioden, Lawinenlaufzeitdioden, bipolare Transistoren und Feldeffekttransistoren. Diese Halbleiter ermöglichten wiederum die Entwicklung vieler neuer Mikrowellenkomponenten wie Gegentakt- und

Einseitenbandmischer, Sende-Modulatoren, elektronisch gesteuerte Schalter, Dämpfungsregler und Phasenschieber, Oszillatoren, rauscharme Verstärker und Leistungsverstärker.

Zur Realisierung dieser Komponenten war eine umfangreiche komplexe Mikrowellen-Schaltkreistechnik notwendig, welche bald den Kinderschuhen der Koaxial- und Hohlleitertechnik entwuchs. Neuere, schaltungstechnisch flexiblere wellenleitende Medien wurden benötigt und in den Streifenleitungen gefunden. Es konnte damit eine komplette Schaltung, bestehend aus vielen Streifenleitern, zusammen mit allen weiteren Bauelementen wie Dioden und Transistoren auf einer einzigen gemeinsamen dielektrischen Platte, dem sog. Substrat, in planarer Technik aufgebaut werden. Dabei waren alle Bauelemente fest miteinander verbunden. Somit war die integrierte Mikrowellenschaltung (abgekürzt MIC für microwave integrated circuit) als jüngerer Bruder der bereits existierenden integrierten Digitalschaltungen geboren. Die gesamte Schaltung wird dabei gemeinsam nach dem für kostengünstige Massenproduktion geeigneten fotolithografischen Verfahren hergestellt. Neben der hohen schaltungstechnischen Flexibilität schlagen hoher Miniaturisierungsgrad, geringes Gewicht, große Zuverlässigkeit wegen des Wegfalls löslicher Teile und hohe mechanische Belastbarkeit gegenüber Stoß und Vibration (z.B. bei Fluggeräten, Satelliten) als Vorteile zu Buch.

Die Technologie der integrierten Mikrowellenschaltungen begann in den fünfziger Jahren mit aus kupferkaschierten Kunststoffplatten (glasfaserverstärktes Teflon, Polyolefin) herausgeätzten Schaltungen und eingelöteten Bauteilen. Sie verfeinerte sich in den sechziger und siebziger Jahren in erster Linie mit der Dünnschicht-, aber auch mit der Dickschichttechnik und den damit verbundenen vielfältigen Einbauverfahren (Hybridierungsverfahren) für Zusatzbauelemente. Diese Techniken benützen hauptsächlich Aluminiumoxid-Keramikssubstrate. Am Anfang der achtziger Jahre stehen wir an der Schwelle zum technischen Einsatz der monolithischen integrierten Mikrowellenschaltungen, bei denen Streifenleitungen und Halbleiterbauelemente (Dioden, Transistoren) gemeinsam auf demselben Halbleitersubstrat (Silizium, Gallium-Arsenid) hergestellt werden.

Vorliegendes Buch liefert die Grundkenntnisse zum Entwurf integrierter Mikrowellenschaltungen. Dabei liegt der Schwerpunkt auf den elektrischen Eigenschaften der bei diesen Schaltungen verwendeten mannigfaltigen Streifenleitungs-Bauformen, welche die Grundbausteine für alle integrierten Mikrowellenschaltungen bilden. Weitere Hauptthemen bilden eine Einführung in die Technik dieser Schaltungen sowie die Behandlung der beim Schaltungsaufbau und Gehäuseeinbau auftretenden zusätzlichen elektrischen Effekte wie Feldverzerrungen an Diskontinuitäten, Strahlung, Oberflächenwellen und Gehäuseresonanzen.

Zunächst wird in Kap. 1 eine Einführung in die Technik der integrierten Mikrowellenschaltungen gegeben (Schaltungsbeispiele, Substrate, Technologien, Gehäuseeinbau, Bauelemente-Übersicht). Die für alle Streifenleitungstypen gemeinsam gültigen elektrischen Phänomene, Analyseverfahren und Näherungsbetrachtungen werden in Kap. 2 zusammengefaßt dargestellt. Das Hauptgewicht bezüglich der verschiedenen Streifenleitungs-Bauformen liegt auf der Mikrostreifenleitung (microstrip), welche sich weltweit als die Standardleitungsform für integrierte Mikrowellenschaltungen durchgesetzt hat. Ihr sind die Kap. 3 bis 11 gewidmet.

Die statischen und dynamischen Leitungsparameter der Mikrostreifenleitung werden in Kap. 3 berechnet. Die das Schaltungsverhalten bei hohen Frequenzen beeinflussenden Oberwellen werden in Kap. 4 nach einem Näherungsverfahren analysiert. Oft sollen im Interesse starker Miniaturisierung die Gehäuseabmessungen sehr klein gehalten werden. Hierfür sind in Kap. 5 die Einflüsse von Seitenwand und Deckel des Gehäuses auf die Leitungsparameter angegeben. Eine Analyse der verschiedenen Verlustquellen der Leitung (Kap. 6) liefert wichtige Auswahlkriterien für Substrate und Leitungsabmessungen. Wegen ihrer Bedeutung zur Verifikation theoretischer Ergebnisse und zur Beurteilung technologischer Verfahren werden in Kap. 7 Meßverfahren für die Streifenleitungsparameter angegeben. Während die meisten technisch üblichen Substrate isotrope Dielektrika sind, kommen für Speziialschaltungen (z.B. mit geringer Exemplarstreuung oder mit speziellen Richtkopplern) dielektrisch anisotrope Substrate wie Saphir in Frage. Einfache Methoden zur Berechnung der Leitungsparameter mit anisotropen Substraten zeigt Kap. 8. Gekoppelte Leitungen zur Anwendung bei Richtkopplern und Filtern beschreibt Kap. 9. In allen Schaltungen kommen Verbindungen und Abschlüsse von Leitungen vor. Diese Diskontinuitäten müssen aufgrund der ihnen innewohnenden Feldverzerrungen als eigene Bauelemente betrachtet werden. In Kap. 10 werden die Ersatzschaltbildelemente und Übertragungseigenschaften der wichtigsten Diskontinuitäten angegeben. Die ersten Schaltungsentwürfe von Anfängern funktionieren oftmals nicht, da Verkoppelungen durch Strahlungseffekte an Diskontinuitäten und Resonatoren unberücksichtigt blieben. Diese Effekte werden in Kap. 11 abgeschätzt.

Die Kapitel 12, 13 und 14 sind den neben der Mikrostreifenleitung wichtigen weiteren Leitungsvarianten gewidmet. Hier gibt es eine Gruppe von Leitungen, mit denen i.allg. - wie bei der Mikrostreifenleitung - eine eigene Schaltkreistechnik aufgebaut wird, die aber nicht die starke Verbreitung der Mikrostreifenleitung erlangt haben. Dazu gehören die Kammerleitung, die Suspended-Substrate-Leitung, die Triplateleitung und die symmetrisch geschirmte Mikrostreifenleitung (alle in Kap. 12). Für eine zweite Gruppe von Leitungen hat sich i.allg. keine eigene Schaltkreistechnik herausgebildet. Sie werden meist als Hilfsleitungen in Mikrostreifenleitungs-Schaltungen zur Realisierung spezieller Schaltungsfunktionen (z.B. Erzeu-

gung einer entkoppelten Viertorverzweigung bei Doppelgegentaktmischern) verwendet. Zu dieser Gruppe gehören die Mikrostreifenleitung mit Masseschlitz, die Bandleitung (beide noch in Kap. 12), die Koplanarleitungsvarianten (Kap. 13) und die Schlitzleitung (Kap. 14). Die beim Schaltungsaufbau und Gehäuseeinbau oft die Schaltungsfunktion störenden Oberflächenwellen und Gehäuseresonanzen werden in Kap. 15 nach einfachen Modellen analysiert.

Bei den Kurvendarstellungen für die Leitungsparameter werden hauptsächlich die technisch bedeutenden Substrate Aluminiumoxid-Keramik für die Dünnschicht- und Dick-schichttechnik und glasfaserverstärktes Teflon für die einfache Ätztechnik kupferkaschierter Platten berücksichtigt. Die angegebenen Formeln gelten jedoch meist für beliebige Substratmaterialien.

Eine Gewähr für die Patentfreiheit der wiedergegebenen Anordnungen kann nicht übernommen werden.

Bei der Behandlung der einzelnen Themen wird im wesentlichen nach einem einheitlichen Schema verfahren: Zunächst wird das physikalische Verhalten anschaulich ohne die Zuhilfenahme komplizierter mathematischer Formalismen beschrieben. Anwendungsbeispiele und typische Daten technischer Ausführungen runden das Bild ab. Feldtheoretische Analyseverfahren werden überblicksmäßig beschrieben. Der hieran tiefer interessierte Leser wird durch umfangreiche kommentierte Literaturhinweise auf detailliertere Darstellungen hingewiesen. Größeren Umfang nehmen unmittelbar anwendbare handliche Formeln und umfassende Kurvendarstellungen, welche auf die in der Praxis auftretenden Fälle zugeschnitten sind, ein. Die Formeln sind mit Angaben der Fehlergrenzen versehen und in kurzer Zeit auf Taschenrechnern zu programmieren: Sie sind auch für rechnergestützten Schaltungsentwurf (Computer-Aided-Design) zu verwenden. Die Kurven sind größtenteils mit genauen numerischen Verfahren auf Digitalrechnern berechnet worden. Schließlich wird eine Übersicht über weitere technisch bedeutende Varianten der jeweils beschriebenen Anordnung, ebenfalls mit kommentierten Literaturhinweisen versehen, gegeben.

Das Buch entstand aus einer fünfzehnjährigen Industrietätigkeit auf den Gebieten der Entwicklung integrierter Mikrowellenschaltungen, der Erstellung rechnergestützter Analyse- und Meßverfahren für diese Schaltungen und der schaltungstechnischen Beratung beim Aufbau von Technologien. Es wendet sich damit auch in erster Linie als Arbeitsbuch an den breiten Kreis der Ingenieure in der Industrie. Der heutige Entwicklungsingenieur ist eingespannt in ein terminlich enges Netz verschiedenster Aufgaben auf den Gebieten der Schaltungsentwicklung, des Projektmanagements und der Fertigungsbetreuung, und er besitzt normalerweise nicht die Zeit und die Spezialkenntnisse, sich mit der feldtheoretischen Analyse von Streifenleitungsstruk-

turen detailliert zu befassen. Er ist daher auf unmittelbar verwendbare Kurvendarstellungen und Formeln angewiesen. Darauf wird in vorliegendem Buch Rücksicht genommen. Da das Buch auch als Einführung konzipiert ist, wendet es sich zudem sowohl an den fachfremden Spezialisten, der sich in dieses Gebiet neu einarbeiten will, als auch an den gegenüber der späteren Berufspraxis aufgeschlossenen Studenten der Fachhochschulen und technischen Universitäten. Für Hochschul- und Forschungsinstitute liefert das Buch zusätzlich Informationen über die in der Praxis auftretenden Probleme sowie eine umfassende Bibliografie als Ausgangspunkt für weitere wissenschaftliche Arbeiten.

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen denjenigen, die am Zustandekommen des Buches beteiligt waren, herzlich bedanken: Frau Chr. Maier besorgte mit großem Sachverstand und Zuverlässigkeit die Berechnungen für viele Kurvendarstellungen. Die Reinzeichnung der Bilder wurde mit großer Sorgfalt von Frl. Brancik, Hrn. Hengmuth und Hrn. Lutz vorgenommen. Das erste Konzept schrieben mit viel Geduld Frau Bitzinger, Frau Dellaert und Frau Kahr in Reinschrift. Den gesamten endgültigen Schreibsatz erstellte Frau B. Schmitz mit viel Sachverstand und Einfühlungsvermögen. Mein besonderer Dank gilt ferner der Firma Siemens, bei der ich meine fachliche Erfahrung sammeln konnte, für die Erlaubnis zur Veröffentlichung des Buches und dem Springer-Verlag für sein verständnisvolles Entgegenkommen und die große Sorgfalt beim Druck sowie - last not least - meiner Frau, welche mich in den vielen Jahren der Ausarbeitung des Manuskripts während meiner Freizeit von vielen häuslichen Problemen entlastete.

München, im Februar 1983

R.K. Hoffmann

Verzeichnis der wichtigsten Symbole und Konstanten, Formelschreibweise

Formelzeichen mit Angabe gebräuchlicher Einheiten

a	Dämpfung	dB
a_i	in Tor i ($i = 1, 2, \dots$) von Mehrtoren einlaufende Welle	$\sqrt{W}$
a_{Km}	Mittenfrequenzkoppeldämpfung bei Richtkoppler	dB
a_R	Richtschärfe (Directivity) bei Richtkoppler	dB
a_{21}	Dämpfung eines Zweitorts	dB
	Durchgangsdämpfung bei Richtkoppler	dB
a_{31}	Koppeldämpfung bei Richtkoppler	dB
a_{41}	Isolationsdämpfung bei Richtkoppler	dB
A_ρ	Geometriefaktor für Leiterdämpfung	dB
B	Blindleitwert	S
b_i	am Tor i ($i = 1, 2, \dots$) von Mehrtoren reflektierte Welle	$\sqrt{W}$
C	Kapazität	pF
C'	Kapazitätsbelag von Leitungen	pF/cm
C'_{even}	Gleichtakt-Kapazitätsbelag gekoppelter Leitungen	pF/cm
$C'_{\text{even},0}$	Gleichtakt-Kapazitätsbelag gekoppelter Leitungen im leeren Raum ($\epsilon_r = \mu_r = 1$)	pF/cm
C_F	Flächenkapazität	pF/cm ²
C'_f	Randstreukapazitätsbelag bei Streifenleitungen	pF/cm
C_L	Leerlauf-Endkapazität	pF
C'_m	Koppelkapazitätsbelag	pF/cm
C'_{odd}	Gegentakt-Kapazitätsbelag gekoppelter Leitungen	pF/cm
$C'_{\text{odd},0}$	Gegentakt-Kapazitätsbelag gekoppelter Leitungen im leeren Raum ($\epsilon_r = \mu_r = 1$)	pF/cm
C'_p	Plattenkapazitätsbelags-Anteil bei Streifenleitungen	pF/cm
C'_0	Kapazitätsbelag von Leitungen im leeren Raum ($\epsilon_r = \mu_r = 1$)	pF/cm

C'_{ϵ}^*	Kapazitätsbelag der Ersatzleitung bei dem Verfahren der Überlagerung von Teilkapazitäten (Abschn. 2.5.3)	pF/cm
d, D	Durchmesser	mm
$\vec{D}$	elektrische Verschiebungsdichte (Flußdichte), komplexer Ortsvektor	As/cm ²
$\vec{E}$	elektrische Feldstärke (komplexer Ortsvektor)	V/cm
$\underline{E}$	komplexe elektrische Feldstärke (Betrag des Ortsvektors)	V/cm
E	elektrische Feldstärke (Betrag des Ortsvektors und des komplexen Zeigers)	V/cm
$E_{\text{längs}}$	Längskomponente der elektrischen Feldstärke auf einer Leitung (in Wellenausbreitungsrichtung)	V/cm
E_{quer}	Querkomponente der elektrischen Feldstärke auf einer Leitung (senkrecht zur Wellenausbreitungsrichtung)	V/cm
E_S	elektrische Feldstärke im Schlitz bei der Schlitzleitung	V/cm
E_x, E_y, E_z	Komponenten der elektrischen Feldstärke $\vec{E}$	V/cm
f	Frequenz	Hz, GHz
F	Fläche	cm ²
$f_{g, \text{HE}m}$	untere Grenzfrequenz der HE_m -Oberwellen auf der Mikrostreifenleitung ($m = 1, 2, 3, \dots$)	GHz
$f_{g, \text{H}m0}$	untere Grenzfrequenz der H_{m0} -Oberwelle des Bandleitungsmodells ($m = 1, 2, 3, \dots$)	GHz
$f_{g, \text{LSM}mn}, f_{g, \text{LSE}mn}$	Grenzfrequenz der LSM_{mn} - bzw. LSE_{mn} -Längsschnittwelle im Gehäuse mit Substrat	GHz
$f_{g, \text{stat}}$	(empirische) obere Grenzfrequenz für die statische Näherung bei Quasi-TEM-Leitungen	GHz
$f_{g, \text{TE}10}$	Grenzfrequenz der TE_{10} -Welle im leeren Gehäuse (Bezugsgröße)	GHz
$f_{g, \text{TM}n}, f_{g, \text{TE}n}$	Grenzfrequenz der TM_n - bzw. TE_n -Oberflächenwelle	GHz
F_i	Strahlungsfaktor einer Diskontinuität i ($i = 1, 2, 3, \dots$)	1
f_m, f_{m1}, f_{m2}	Mittenfrequenzen von Richtkopplern	GHz
$f_{m, \text{even}}$	Gleichtakt-Mittenfrequenz bei Richtkoppler	GHz
$f_{m, \text{odd}}$	Gegentakt-Mittenfrequenz bei Richtkoppler	GHz
f_{mK}	Richtkoppler-Mittenfrequenz bei Koppeldämpfungs-Minimum	GHz
f_R	Resonanzfrequenz	Hz, GHz
$f_{R, \text{mnp}}$	Resonanzfrequenz eines quaderförmigen Hohlraumresonators	GHz

f_{Rn}	Resonanzfrequenz eines Leitungsresonators ($n = 1, 2, 3, \dots$)	GHz
$f_{Rn}^{(m)}$	gemessene Resonanzfrequenz eines verlust- behafteten Leitungsresonators ($n = 1, 2, 3, \dots$)	GHz
$f_{R,LSMmnq},$ $f_{R,LSEmnq}$	Resonanzfrequenz der LSM_{mnq} - bzw. LSE_{mnq} -Reso- nanz im Gehäuse mit Substrat	GHz
$f_{S,TMn},$ f_{S,TE_n}	synchrone Koppelfrequenz zwischen Mikrostreifen- leitungswelle und TM_n - bzw. TE_n -Oberflächenwelle	GHz
g	Stromdichte	A/cm ²
	Strombelag (elektrische Stromstärke durch Länge quer zur Stromrichtung)	A/cm
G	Wirkleitwert	S
G'	Ableitungsbelag (Querleitwertsbelag) einer Leitung	S/cm
$g_{längs}$	Längsstrombelag auf einer Leitungselektrode (in Wellenausbreitungsrichtung)	A/cm
g_{Li}	Längsstrombelag auf der Streifenleiterober- seite ($i = 1$), Streifenleiterunterseite ($i = 2$) und auf dem Masseleiter ($i = 3$) bei der Mikro- streifenleitung	A/cm
g_{Qi}	Querstrombelag auf der Streifenleiterober- seite ($i = 1$), Streifenleiterunterseite ($i = 2$) und dem Masseleiter ($i = 3$) bei der Mikro- streifenleitung	A/cm
g_{quer}	Querstrombelag auf einer Leitungselektrode (senkrecht zur Wellenausbreitungsrichtung)	A/cm
$G_{Rad,i}$	Strahlungsleitwert einer Diskontinuität i ($i = 1, 2, 3, \dots$)	S
g_0	Stromdichte an der Leiteroberfläche (bei Skineffekt)	A/cm ²
G'_ϵ	Ableitungsbelag durch dielektrische Verluste (Umladeverluste $\tan\delta_\epsilon > 0$)	S/cm
G'_κ	Ableitungsbelag durch Ableitungsverluste (endliche spezifische Leitfähigkeit des Sub- strats $\kappa > 0$)	S/cm
h	Substratdicke	mm
h^*	transformierte Substratdicke (Leitung auf anisotropem Substrat)	mm
$\vec{H}$	magnetische Feldstärke (komplexer Ortsvektor)	A/cm
$\underline{H}$	komplexe magnetische Feldstärke (Betrag des Ortsvektors)	A/cm
H	magnetische Feldstärke (Betrag des Orts- vektors und des komplexen Zeigers)	A/cm
H_x, H_y, H_z	Komponenten der magnetischen Feldstärke $\vec{H}$	A/cm
I	Strom (Scheitelwert)	A

I_z	in Wellenausbreitungsrichtung fließender Strom auf einer Leitungselektrode (Scheitelwert)	A
I_{zL}	I_z auf Streifenleiter einer Mikrostreifenleitung	A
I_{zM}	I_z auf Masseleiter einer Mikrostreifenleitung	A
k	Koppelfaktor zwischen Resonatoren	1
	Koppelfaktor bei Richtkopplern	1
k_e	elektrischer Koppelfaktor bei Richtkopplern	1
k_m	magnetischer Koppelfaktor bei Richtkopplern	1
l	Leitungslänge, Streifenleiterlänge	cm, mm
L	Induktivität	nH
L'	Induktivitätsbelag von Leitungen	nH/cm
L'_{even}	Gleichtakt-Induktivitätsbelag gekoppelter Leitungen	nH/cm
$L_{F,i}$	spezifische innere Induktivität eines verlustbehafteten Leiters (Skineffekt)	nH
L_K	Ersatzinduktivität für Kurzschluß am Leitungsende	nH
L'_{odd}	Gegentakt-Induktivitätsbelag gekoppelter Leitungen	nH/cm
M'	Gegeninduktivitätsbelag gekoppelter Leitungen	nH/cm
n_n	Konzentration frei beweglicher Elektronen im Halbleiter	$1/\text{cm}^3$
n_p	Konzentration frei beweglicher Löcher im Halbleiter	$1/\text{cm}^3$
n_1, n_2, n_2^*	Übersetzungsverhältnisse idealer Transformatoren bei T-Verzweigungs-Ersatzschaltbild	1
p	Dichte (i.allg. von Substraten)	g/cm^3
P	Leistung	W, mW
	Porösität von Substraten	1
P_{Hin}	Leistung der auf eine Diskontinuität hinlaufenden Welle (bei Strahlungsberechnung)	W
P_{Rad}	gesamte Strahlungsleistung einer Diskontinuität	W
$P_{\text{Rad,ges}}$		
$P_{\text{Rad,OW},i}$	Oberflächenwellen-Strahlungsleistung einer Diskontinuität i ($i = 1, 2, 3, \dots$)	W
$P_{\text{Rad,RW},i}$	Raumwellen-Strahlungsleistung einer Diskontinuität i ($i = 1, 2, 3, \dots$)	W
P'_V	Verlustleistung pro Längeneinheit bei einer Leitung	W/cm
P_z	auf einer Leitung in Wellenausbreitungsrichtung transportierte Leistung	W

P_0	theoretische Dichte von Keramiksubstraten	g/cm^3
Q	Güte eines i.allg. unbelasteten Resonators	1
Q_L	belastete Resonatorgüte	1
$Q_{\text{längs}}$	Leitungsgüte durch Längsverluste R'	1
Q_{quer}	Leitungsgüte durch Querverluste G'	1
$Q_{\text{Rad}},$ $Q_{\text{Rad},i}$	Leitungsgüte durch Abstrahlungsverluste, Strahlungsgüte ($i = 1, 2, 3 \dots$)	1
$q_{\tan \delta, \epsilon}$	Füllfaktor für dielektrische Verluste bei Leitungen in inhomogenem Dielektrikum	1
Q_α	Leitungsgüte durch Gesamtdämpfungsbelag (ohne Abstrahlungsverluste)	1
q_ϵ	dielektrischer Füllfaktor bei Leitung in inhomogenem Dielektrikum	1
Q_ϵ	Leitungsgüte durch dielektrische Verluste	1
Q_K	Leitungsgüte durch Ableitungsverluste	1
Q_μ	Leitungsgüte durch magnetische Verluste	1
Q_ρ	Leitungsgüte durch Leiterverluste	1
r	Betrag eines komplexen Reflexionsfaktors	1 oder %
$\underline{r}$	komplexer Reflexionsfaktor	1 oder %
R	Wirkwiderstand	Ω
R'	Widerstandsbelag einer Leitung	Ω/cm
R_F	(reeller) spezifischer Oberflächenwiderstand beim Skineffekt	Ω
$R_{F,\text{eff}}$	effektiver spezifischer Oberflächenwiderstand (bei Mehrschichtleitern und rauher Oberfläche)	Ω
$R_{\text{Rad},i}$	Strahlungswiderstand einer Diskontinuität i ($i = 1, 2, 3 \dots$)	Ω
R'_μ	R' aufgrund magnetischer Verluste im Substrat	Ω/cm
R'_ρ	R' aufgrund von Leiterverlusten ($\rho > 0$)	Ω/cm
s	Spaltbreite zwischen zwei Streifenleitern	mm
S^*	relative Eckanschragung bei Leitungsknicken	%
$\underline{S}_{ij}$	Streuparameter (Element der Streumatrix) eines n-Tors ($i, j = 1, 2, 3 \dots n$)	1
$\underline{S}_{ij,\text{id}}$	ideale Streuparameter von Diskontinuitäten ohne Feldverzerrung	1
S^*_{opt}	optimale relative Eckanschragung für Kompensation bei Leitungsknicken	%
$\underline{S}_{11}$	Eingangs-Reflexionsfaktor bei Richtkoppler	1
$\underline{S}_{21}$	Durchgangs-Übertragungsfaktor bei Richtkoppler	1
$\underline{S}_{31}$	Koppelübertragungsfaktor bei Richtkoppler	1

S_{41}	Überkoppelfaktor (Isolation) bei Richtkoppler	1
t	Dicke von Streifenleitern, Metallfilmen auf Substraten	μm
T	Temperatur	K, °C
$\tan\delta$	Verlustfaktor	1
$\tan\delta_{\text{l\"angs}}$	Verlustfaktor einer Leitung durch L\"angs-verluste R'	1
$\tan\delta_{\text{quer}}$	Verlustfaktor einer Leitung durch Quer-verluste G'	1
$\tan\delta_{\epsilon}$	dielektrischer Verlustfaktor (Umladever-luste im Substrat, Materialeigenschaft)	1
$\tan\delta_{\epsilon,\text{eff}}$	effektiver dielektrischer Verlustfaktor bei Leitung in inhomogenem Dielektrikum	1
$\tan\delta_{\kappa}$	Ableitungsverlustfaktor (endliche spezifi-sche Leitfähigkeit $\kappa > 0$ im Substrat, Material-eigenschaft)	1
$\tan\delta_{\mu}$	magnetischer Verlustfaktor (Materialeigen-schaft)	1
t_H	Haftschichtdicke	μm
t_L	Leitschichtdicke	μm
$\underline{U}$	komplexe Spannung (Scheitelwert)	V
U_i	Klemmenspannung bei Mehrtoren ($i = 1, 2, 3 \dots$)	V
U_S	Schlitzeleitungsspannung	V
U_{S0}	Schlitzeleitungsspannung zwischen Schlitz-kanten l\"angs Substratgrenze	V
U_0	Quellspannung	V
v_P	Phasengeschwindigkeit auf einer Leitung ($v_P = \omega/\beta$)	cm/s
$v_{P,\text{even}}$	Gleichtakt-Phasengeschwindigkeit gekoppelter Leitungen	cm/s
$v_{P,Hm0}$	Phasengeschwindigkeit der H_{m0} - Oberwelle des Bandleitungsmodells ($m = 1, 2, 3 \dots$)	cm/s
$v_{P,HEm}$	Phasengeschwindigkeit der HE_m -Oberwelle der Mikrostreifenleitung ($m = 1, 2, 3 \dots$)	cm/s
$v_{P,LSMmn}'$ $v_{P,LSEmn}$	Phasengeschwindigkeit der LSM_{mn} - bzw. der LSE_{mn} -L\"angsschnittwelle im Geh\"ause mit Sub-strat	cm/s
$v_{P,\text{odd}}$	Gegentakt-Phasengeschwindigkeit gekoppelter Leitungen	cm/s
$v_{P,\text{stat}}$	statische (f\"ur niedrige Frequenzen wirksame) Phasengeschwindigkeit von Quasi-TEM-Wellen	cm/s
$v_{P,TMn}'$ $v_{P,TEn}$	Phasengeschwindigkeit der TM_n - bzw. der TE_n -Oberfl\"achenwelle	cm/s
w	Streifenleiterbreite	mm

w^*	transformierte Leiterbreite (Leitung auf anisotropem Substrat)	mm
w_e'	auf einer Leitung pro Längeneinheit gespeicherte elektrische Feldenergie	Ws/cm
$w_{e,\epsilon}'$	im Substrat allein pro Längeneinheit gespeicherte elektrische Feldenergie bei einer Leitung in quereinhomogenem Dielektrikum	Ws/cm
w_{eff}	effektive Streifenleiterbreite (i.allg. frequenzabhängig)	mm
$w_{eff,stat}$	statische (frequenzunabhängige) effektive Leiterbreite	mm
$w_{eq,i}$	äquivalente Streifenleiterbreite (bei endlicher Streifenleiterdicke) bzgl. des Leitungsparameters i , z.B. $w_{eq,C0}'$, $w_{eq,C}'$, $w_{eq,L}'$, $w_{eq,ZL0}'$, $w_{eq,ZL}'$, $w_{eq,\epsilon}$	mm
$w_{eq,0}$	äquivalente Streifenleiterbreite bzgl. des Kapazitätsbelags C_0'	mm
X	Blindwiderstand	Ω
X_{ij}	Imaginärteile der Elemente der Widerstandsmatrix ($i, j = 1, 2, \dots$)	Ω
z	Längskoordinate einer Leitung (in Wellenausbreitungsrichtung)	cm
$\underline{Z}$	komplexer Widerstand	Ω
Z_F	Feldwellenwiderstand (aus Feldstärken E, H definiert)	Ω
$Z_{F,i}$	komplexer spezifischer innerer Oberflächenwiderstand (Skineffekt)	Ω
Z_{ij}	Elemente der Widerstandsmatrix	Ω
Z_L	(reeller) Wellenwiderstand verlustfreier oder verlustarmer Leitungen und Richtkoppler	Ω
$\underline{Z}_L$	komplexer Wellenwiderstand von stark verlustbehafteten Leitungen	Ω
$Z_L^{(UI)}$	Wellenwiderstand Z_L nach der Strom-Spannungsdefinition	Ω
$Z_L^{(PI)}$	Wellenwiderstand Z_L nach der Leistungs-Stromdefinition	Ω
$Z_L^{(PU)}$	Wellenwiderstand Z_L nach der Leistungs-Spannungsdefinition	Ω
$Z_L^{(\epsilon-eff)}$	Wellenwiderstand Z_L nach der $\epsilon_{r,eff}$ -Definition	Ω
$Z_L^{(r)}$	Wellenwiderstand Z_L nach der Reflexionsfaktordefinition	Ω
$Z_{L,even}$	Gleichtakt-Wellenwiderstand gekoppelter Leitungen	Ω
$Z_{L,even}^{(PI)}$	Gleichtakt-Wellenwiderstand nach der Leistungs-Stromdefinition	Ω

$Z_{L,even,stat}$	statischer (bei niedrigen Frequenzen wirksamer) Gleichtakt-Wellenwiderstand	Ω
$Z_{L,even,0}$	Gleichtakt-Wellenwiderstand gekoppelter Leitungen im leeren Raum ($\epsilon_r = \mu_r = 1$)	Ω
Z_{LN}	Wellenwiderstand einer querhomogenen Normleitung zur Definition von $Z_L^{(r)}$	Ω
$Z_{L,odd}$	Gegentakt-Wellenwiderstand gekoppelter Leitungen	Ω
$Z_{L,odd}^{(PI)}$	Gegentakt-Wellenwiderstand nach der Leistungs-Stromdefinition	Ω
$Z_{L,odd,stat}$	statischer (bei niedrigen Frequenzen wirksamer) Gegenteil-Wellenwiderstand gekoppelter Leitungen	Ω
$Z_{L,odd,0}$	Gegentakt-Wellenwiderstand gekoppelter Leitungen im leeren Raum ($\epsilon_r = \mu_r = 1$)	Ω
$Z_{L,stat}$	statischer (bei niedrigen Frequenzen wirksamer) Wellenwiderstand von Quasi-TEM-Leitungen	Ω
Z_{LO}	Wellenwiderstand verlustfreier oder verlustarmer Leitungen im leeren Raum ($\epsilon_r = \mu_r = 1$)	Ω
Z_T	Tor-Bezugswiderstand eines Vierpols oder Mehrtors	Ω
Z_0	Torbeschaltung (reeller Widerstand) bei Richtkopplern, Mehrtoren	Ω
α	Dämpfungsbelag einer Leitung in dB/Längeneinheit	dB/cm
$\alpha_{l\ddot{a}ngs}$	Längsdämpfungsbelag (durch Längsverluste R') einer Leitung	dB/cm
$\alpha_{(N)}$	Dämpfungsbelag einer Leitung in Np/Längeneinheit	Np/cm
α_{quer}	Querdämpfungsbelag (durch Querverluste G') einer Leitung	dB/cm
α_0	Dämpfungsbelag einer Leitung im leeren Raum in dB/Längeneinheit	dB/cm
α_ϵ	Dämpfungsbelag durch dielektrische Verluste (Umladeverluste)	dB/cm
α_κ	Dämpfungsbelag durch Ableitungsverluste (spezifische Substratleitfähigkeit $\kappa > 0$)	dB/cm
α_μ	Dämpfungsbelag durch magnetische Verluste	dB/cm
α_ρ	Dämpfungsbelag durch Leiterverluste (spez. Widerstand ρ)	dB/cm
$\alpha_{\rho,eff}$	effektiver Leiterdämpfungsbelag (bei Mehrschichtleitern und rauhem Substrat)	dB/cm
$\alpha_{\rho 0}$	Leiterdämpfungsbelag einer Leitung im leeren Raum ($\epsilon_r = \mu_r = 1$)	dB/cm
β	Phasenbelag einer Leitung	1/cm
β_{quer}	seitliche Abklingkonstante der Schlitzleitungsfelder	1/cm

Symbolverzeichnis

β_0	Phasenbelag einer Leitung im leeren Raum	1/cm
γ	Ausbreitungskoeffizient einer Leitung	1/cm
δ	äquivalente Leitschichtdicke, Eindringtiefe beim Skineffekt	μm
δ_H	Eindringtiefe bei der Haftschrift	μm
δ_L	Eindringtiefe bei der Leitschicht	μm
Δl_K	äquivalente Leitungsverlängerung bei Kurzschluß am Leitungsende	mm
Δl_L	äquivalente Leitungsverlängerung bei Leerlauf	mm
$\Delta w_{t,i}$	äquivalente Streifenleiterverbreiterung bei endlicher Leiterdicke bzgl. des Leitungsparameters i , z.B. $\Delta w_{t,L}$, $\Delta w_{t,CO}$, $\Delta w_{t,ZL}$, $\Delta w_{t,ZLO}$, $\Delta w_{t,\epsilon}$	mm
$\Delta w_{t,0}$	äquivalente Streifenleiterverbreiterung bzgl. gleichen Kapazitätsbelags C'_0	mm
$\Delta y_{10\text{dB}}$, $\Delta y_{20\text{dB}}$	seitliche 10-dB- bzw. 20-dB-Feldabklingweite bei der Schlitzleitung	mm
ϵ_r	relative Permittivität (Dielektrizitätszahl) i.allg. von Substraten	1
ϵ_r^*	transformierte relative Permittivität (Leitung auf anisotropem Substrat)	1
	relative Substratpermittivität der Ersatzleitung bei dem Verfahren der Überlagerung von Teilkapazitäten (Abschn. 2.5.3)	1
$\leftrightarrow$ ϵ_r	relativer Permittivitätstensor bei anisotropen Dielektrika	1
$\epsilon_{r,\text{eff}}$	effektive (relative) Permittivität von Leitungen in inhomogenem Dielektrikum (s. Abschn. 2.3.2)	1
$\epsilon_{r,\text{eff},\text{even}}$	effektive Gleichtaktpermittivität gekoppelter Leitungen	1
$\epsilon_{r,\text{eff},\text{even},\text{stat}}$	statische effektive Gleichtaktpermittivität gekoppelter Leitungen	1
$\epsilon_{r,\text{eff},\text{HE}m}$	effektive Permittivität der HE_m -Oberwellen der Mikrostrielenleitung ($m = 1, 2, 3, \dots$)	1
$\epsilon_{r,\text{eff},\text{H}m0}$	effektive Permittivität der H_{m0} -Oberwelle des Bandleitungsmodells ($m = 1, 2, 3, \dots$)	1
$\epsilon_{r,\text{eff},\text{LSM}mn}$, $\epsilon_{r,\text{eff},\text{LSE}mn}$	effektive Permittivität der LSM_{mn} - bzw. LSE_{mn} -Längsschnittwelle im Gehäuse mit Substrat	1
$\epsilon_{r,\text{eff},m}$	mittlere effektive Permittivität gekoppelter Leitungen	1
$\epsilon_{r,\text{eff},\text{odd}}$	effektive Gegentaktpermittivität gekoppelter Leitungen	1
$\epsilon_{r,\text{eff},\text{odd},\text{stat}}$	statische effektive Gegentaktpermittivität gekoppelter Leitungen	1