
Mikrowellentechnik

Holger Heuermann

Mikrowellentechnik

Feldsimulation, nichtlineare Schaltungs-
technik, Komponenten und Subsysteme,
Plasmatechnik, Antennen und
Ausbreitung

Holger Heuermann
FH Aachen
Aachen, Deutschland

ISBN 978-3-658-29022-1 ISBN 978-3-658-29023-8 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-29023-8>

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

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2020

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

Vorwort

Die in diesem Buch vorgestellte Mikrowellentechnik fasst die gesamte moderne Technik der elektromagnetischen sowie nichtlinearen Grundlagen, die im ein- und zweistelligen GHz-Bereich für Funk-, Navigations-, Lokalisierungs-, Mess-, Heiz- und sonstige Systeme benötigt werden, zusammen. Am Ende des letzten Jahrhunderts trug kaum jemand Mikrowellenprodukte in der Hosentasche, heutzutage können sich viele ein Leben ohne diese Produkte kaum noch vorstellen. Dieses Buch beruht auf den zwei Vorlesungen *Mikrowellentechnik* und *Antennen und Ausbreitung*, die im Rahmen des Masters der Elektrotechnik an der FH gelesen werden. Zugehörige, im Internet [31] frei verfügbare Klausuraufgaben helfen insbesondere Studierenden, die Inhalte des Buches in der Praxis anzuwenden. Dieses Buch baut auf meinem Buch *Hochfrequenztechnik* auf, das den Lehrstoff des Bachelorstudiums umfasst und in Kombination mit diesem Buch den gesamten Stoff beinhaltet, den eine Absolventin oder ein Absolvent benötigt, um für Tätigkeiten in Entwicklungsabteilungen für GHz-Komponenten und -Systeme bestens gerüstet zu sein.

Politisches Umfeld für die Mikrowellentechnik

Die Politik des 21. Jahrhunderts wird aus bestem Wissen und Gewissen herausgestaltet, schafft aber oft in unerwarteten Bereichen neue Probleme. Den größten und langfristigen Einfluss auf die Ausbildung (insbesondere in den Ingenieurwissenschaften) an allen deutschen Hochschulen hatten die kräftigen Besoldungskürzungen mit der Einführung der W- statt der C-Besoldung. Über der mittleren C3-Stelle wurden früher typisch Fachabteilungsleiter eingestellt. Heute bekommen Hochschulen mit der entsprechenden Besoldung (W2) nur noch Ingenieure, die meist als Sachbearbeiter arbeiteten. Diese Änderung wirkt sich in vielen Belangen nur schleichend, aber zunehmend drastisch aus. Beispielsweise wird in meinem Fachgebiet der Lehrstoff zur Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik an der benachbarten Elitehochschule von zwei W-Kollegen gelesen, von denen keiner in einem produzierenden Unternehmen arbeiteten, was früher auch an Universitäten ein sehr wichtiges Einstellungskriterium darstellte, da Studierende in den Ingenieurwissenschaften praxisorientiert ausgebildet werden sollen.

Die Politik möchte mit zunehmend steigenden Forschungsmitteln die Forschungsarbeit dort hinleiten, wo diese notwendig ist, was im Prinzip richtig ist. Jedoch bestimmt die Politik Ziele, die bereits Technologien vorgeben und nicht rein auf das eigentliche Ziel ausgerichtet sind. CO₂-freie Mobilität ist ein Beispiel hierfür: Der für die Fördermittelvergabe zuständige Projektträger gibt mit der E-Mobilität eine Technologie vor. Alternative Lösungen haben in Deutschland fast keine Chance. Der Wasserstoffmotor (nicht die Brennstoffzelle) ist hier ein Beispiel: er findet im bestehenden System keine Fördertöpfe, wird aber sicherlich einen großen Anteil an der zukünftigen Mobilität (u. a. durch modernster GHz-Technik) beitragen und erhalte dabei noch sehr viele Arbeitsplätze.

Die Politik lässt sich von „den Großen“ beraten, deren Hauptinteresse den eigenen Großunternehmen gilt und welche nur begrenzt am Allgemeinwohl sowohl der Bevölkerung, als auch der KMUs interessiert sind. Wir hätten in Deutschland keine mautfreien Autobahnen, wenn man früher solche Berater gehabt hätte. Jüngst nahm der Staat Milliarden für die 5G-Frequenzen ein und steckt diese in die Digitalisierung. Viel besser wäre es sicherlich gewesen, die Mehrzahl der Funkbänder als frei nutzbare (ISM-) Bänder, in denen aktuell z. B. die WLAN-, Bluetooth-Übertragungen stattfinden, zu vergeben. Die Politik sollte berechnen lassen, welche Datenmengen in den bisher freie verfügbaren ISM-Bändern bei 2,45 und 5,8 GHz im Vergleich zu den Mobilfunkbändern pro km² übertragen werden. Dann würde sie feststellen, dass in den Mobilfunkbändern nur ein Bruchteil der Datenmengen übertragen wird.

Die Politik möchte die Effizienz der Hochschulen (und meint damit die Absolventenzahlen) über die Mittelvergabe anheben. Die Hochschulen verlassen deshalb zunehmend die Spezialisierungen in den Studiengängen und führen umfangreiche Wahlpflichtkataloge ein. Spezialisierte Studiengänge wie die Mikrowellentechnik werden im Zuge dieses Prozesses zunehmend eingestellt. Vorlesungen über die GHz-Elektronik finden an den deutschen Universitäten kaum noch statt, bestenfalls setzen Universitäten auf die Terahertz-Technik. Die neuen Produkte werden aber im zweistelligen GHz-Bereich und für Long-Range-Anwendungen im einstelligen GHz-Bereich entstehen, aufgrund des Fachkräftemangels allerdings zunehmend in Fernost.

Antworten auf die Probleme der Moderne

Es ist rund 20 Jahre her, dass im deutschsprachigen Raum ein Fachbuch zur Mikrowellentechnik neu aufgelegt wurde. Das vorliegende Buch soll nun diese Lücke schließen. Es beruht einerseits auf dem Lehrstoff, der in der fast 20jährigen Lehrtätigkeit in Form von Skripten aufgebaut wurde, und andererseits auf den am Institut für Mikrowellen- und Plasmatechnik (IMP) durchgeführten Forschungstätigkeiten, die insbesondere zwei Basistechnologien mit einem umfangreichen Spektrum an Anwendungen hervorbrachten.

Die Basistechnik zur vektoriellen Mixed-Frequency-Technik lässt sich u. a. in Mess-technik-, Rettungs- und Lokalisierungssystemen einsetzen. Die zweite Basistechnik zur GHz-Plasmatechnik ähnelt der Lasertechnologie und lässt sich für deutlich verbesserte Produkte und Anlagen für Zündkerzen, Lampen, Skalpelle, Plasmajets, Schweißgeräte, 3D-Drucker für Metall und Keramik, Ionenquellen bis hin zur Fusionstechnik einsetzen. Die Zündkerzen ermöglichen u. a. den deutlich effizienteren Betrieb von CNG- und Wasserstoffmotoren, der bei allerhöchsten Kompressionswerten (Verdichtungen) arbeitet und darüber eine extrem hohe Literleistung bei sehr hohem Wirkungsgrad erzielt. Die neuartige Fusionstechnik hat das Potential, mit Kleinstreaktoren ohne Klimabelastungen extrem preiswert gigantische Mengen elektrischen Stroms zu erzeugen.

Danksagung

Den größten Dank möchte ich meinen drei wunderbaren Töchtern Helena, Clara und Emelie aussprechen, denen ich dieses Buch widme und denen ich bei weitem nicht so viel Zeit geben konnte, wie ich es gerne wollte, dem ich aufgrund meiner ehrgeizigen Arbeitsziele (u. a. dieses Buchprojekt, die Welt durch Forschung etwas zu verbessern) aber nicht gerecht werden konnte. Natürlich gilt das auch meiner geliebten Frau, die den Hauptteil dazu beitrug, dass wir heute auf unsere Kinder uneingeschränkt stolz sein können.

Weiterhin möchte ich der FH Aachen, Rektor Prof. Baumann und Prorektorin Prof. Samm sowie der Verwaltung, dem Dekanat und sämtlichen Kolleginnen und Kollegen des Fachbereiches meinen Dank für die große Unterstützung und das hervorragende Umfeld aussprechen.

Ein ganz großer Dank geht an alle aktuellen und ehemaligen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des IMP, die, wie ich auch, mit viel Freude und Engagement an den spannenden und komplexen Forschungsthemen in der GHz-Technik arbeiten/arbeiteten und ebenfalls die Hoffnung hegen, damit die Welt ein Stück sauberer und sicherer zu machen.

Nicht zuletzt möchte ich auch den vielen Studierenden danken, die mir durch ihre Motivation eine große Triebkraft für die Lehre geben und auch selbst durch viele Fragen und Anmerkungen die Kapitel in diesem Buch erst zu dem gemacht haben, was sie, liebe Leser, nun im Weiteren vor sich haben.

Aachen
am 22. November 2019

Holger Heuermann

Inhaltsverzeichnis

1	Hohlleiter	1
1.1	Einleitung	1
1.1.1	Kurzzusammenfassung der TEM-Welle	3
1.1.2	Feldtheorie für Hohlleiter	4
1.2	Grafische Herleitung der H_{10} -Welle	4
1.2.1	Grenzbedingungen am idealen Leiter	4
1.2.2	Reflexion einer HEW an einer metallischen Platte	5
1.2.3	Konstruktion der H_{10} -Welle aus Mehrfachreflexionen	6
1.2.4	Feldbilder der H_{10} -Welle im Rechteckhohlleiter	7
1.3	Hohlleiterwellenlänge	10
1.4	Phasen- und Gruppengeschwindigkeit	11
1.5	Allgemeiner Feldwellenwiderstand und Feldwellenwiderstände der H_{10} -Welle	13
1.6	Ausbreitungskoeffizient und Wellenwiderstand der H_{10} - Welle über der Frequenz	14
1.7	Stromverteilung im Rechteckhohlleiter	15
1.8	Höhere Moden im Rechteckhohlleiter	16
1.9	Rundhohlleiter- und Koaxialleitermoden	19
1.10	Koaxial-Hohlleiterübergang	21
1.11	Transmissionsresonator	21
1.12	Frequenzbänder für Rechteckhohlleitungen	25
2	Grundlagen der Feldsimulation	27
2.1	Freiraumsimulation	27
2.1.1	Sender und Empfänger	28
2.1.2	Reflexion an Objekten	30
2.1.3	Beugung und Durchdringung von Objekten	31
2.1.4	Verfahren und Produkte	34
2.2	Numerische Feldsimulation	37
2.2.1	Allgemeine Lösung der Maxwell'schen Gleichungen	38

2.2.2	Lösungen der Maxwell'schen Gleichungen für quellfreie Geometrien	39
2.2.3	Methode der Finiten Differenzen (FD)	40
2.2.3.1	Eulersche Methode	41
2.2.3.2	Beispiel für allgemeine Potentialfunktion $u_{(x,y)}$	41
2.2.4	Methode der Finiten Elemente (FE)	44
2.2.5	Ablauf einer FE-Simulation	47
2.2.6	Momentenmethode (MM)	52
3	Grundlagen der nichtlinearen HF-Technik	53
3.1	Beschreibungsformen für Bauelemente	55
3.2	Frequenzerzeugung durch Nichtlinearitäten	57
3.3	Nichtlineare Phänomene	59
3.4	Nichtlineare Bauelemente	63
3.4.1	Nichtlineare Leitwerte und Widerstände	63
3.4.2	Nichtlineare Kapazitäten	65
3.5	Übersicht: Nichtlineare Simulationsverfahren	67
3.6	Harmonic Balance für Großsignal-Einzeltöne	69
3.7	Einführung in die Streuparameter für Mixed-Frequency-Messungen	76
3.7.1	S-Parameter für Mixed-Frequency-Netzwerke	82
3.7.2	Vektorielle Intermodulationsmessungen	85
3.7.3	X-Parameter	90
3.7.4	Zusammenhang der X-Parameter und der Mixed- Frequency-S-Parameter	92
3.8	Anwendung der kohärenten Mixed-Frequency-Messtechnik in der Lokalisierung	93
3.8.1	Kooperative Lokalisierung mittels nichtlinearem Backscatter-Tag und Stepped Frequency Harmonic Radar	95
3.8.2	Entfernungsbestimmung bei einem Stepped Frequency Harmonic Radar mit nichtlinearem Backscatter-Tag	96
3.8.3	Kooperative Lokalisierung mittels Harmonic Radar am Beispiel eines Seenotrettungssystems	99
3.9	Kohärente Mixed-Frequency-Messtechnik als Basistechnologie	106
4	Leistungsverstärker	109
4.1	Grundlagen für die Entwicklung von Leistungsverstärkern	111
4.1.1	Transistortechnologie	111
4.1.2	Die Signalflussmethode und deren Anwendung	114

4.1.3	Leistungsbegriffe	116
4.1.4	Weitere Grundbegriffe	118
4.1.5	Stabilität	119
4.1.6	Wahl der Lastimpedanz	120
4.1.7	Aufbau und Anwendung eines manuellen Tuners	125
4.1.8	Wahl der Drain-Spule.	128
4.2	Die klassischen Betriebsarten A, AB, B und C	129
4.3	Schaltungskonzepte von Leistungsverstärkern	135
4.3.1	H-Betrieb	135
4.3.2	F-Betrieb	136
4.3.3	D-Betrieb	139
4.3.4	E-Betrieb	141
4.3.5	Klasse J und weitere Verstärker mit Harmonic-Matching	143
4.3.6	Klasse S	144
4.4	Verschaltung von Leistungsverstärkern	146
4.4.1	0°-Koppler-Leistungs-Combiner	146
4.4.2	Der Doherty-Verstärker	148
4.4.3	Push-Pull-Verstärker	149
4.4.4	Balancierter Verstärker.	150
4.5	Linearisierungstechniken	151
4.5.1	Direkte Rückkopplung	152
4.5.2	Predistortion	153
4.5.3	Feedforward	154
4.5.4	Indirect Feedback	155
4.5.5	Kartesische Schleife	155
4.5.6	Polare Schleife	156
4.6	Frequenzvervielfacher	157
5	Oszillatoren	159
5.1	Zweitoroszillatoren	161
5.1.1	Die Schwingbedingung	161
5.2	Aufbau eines rückläufigen HF-Oszillators.	164
5.2.1	Kreuzgekoppelter und Colpitts-Oszillator	166
5.3	Eintoroszillatoren	169
5.3.1	Schwingbedingung von Eintoroszillatoren	169
5.3.2	Eingesetzter Reflexionsverstärker	170
5.3.3	Aufbauten von differentiellen Oszillatoren	171
5.3.4	Push-Push-Oszillatoren	174
5.3.5	Elektrisch abstimmbare Oszillatoren	176
5.4	Rauschverhalten von Oszillatoren	177

6	Detektoren und Mischer	181
6.1	Detektoren	182
6.2	Das Überlagerungs- bzw. Heterodynprinzip	183
6.3	Grundlagen der Frequenzumsetzung mit Mischern	184
6.4	Parametrische Rechnung	188
6.5	Leitwertelemente von Schottky-Dioden	191
6.6	Abwärtsmischung mit Schottky-Diode	192
6.7	Rauschverhalten des Mischers	194
6.8	Ausführungsformen von Mischern	194
6.9	Realisierung von Mischern mit Schottky-Dioden	198
6.9.1	Einseitenbandumsetzer und IQ-Modulatoren	201
7	Phasenregelkreise und Synthesegeneratoren	207
7.1	Grundlagen der Phasenregelkreise	207
7.2	Das Regelverhalten	209
7.3	Frequenzteiler	212
7.4	Diskriminatoren	213
7.4.1	Phasendiskriminatoren	213
7.4.2	Phasenfrequenzdiskriminatoren	215
7.4.3	Auslegung von Schleifenfiltern	217
7.5	Einschleifiger Regelkreis	217
7.6	Regelschleife mit Mischer	220
7.7	Mehrschleifige Regelkreise	220
7.8	Regelschleifen mit fraktionalen Teilern	222
7.8.1	$\Sigma\Delta$ -Fractional-N Synthesegenerator	224
7.8.2	Direkte Digitale Modulation	225
8	Technisch erzeugte Plasmen	227
8.1	Grundlagen technisch erzeugter Plasmen	227
8.2	Niederdruckplasmen	236
8.2.1	Niederdrucklampen	238
8.3	Hochdruckplasmen	240
8.3.1	Klassische Zündkerze	241
8.4	Koronaplasmen	242
8.5	Mikrowellenplasmen	243
8.5.1	Theorie der dreistufigen Transformation	244
8.5.2	Prozessorbasierte Ansteuerelektroniken für Mikrowellenplasmen	246
8.5.3	Ansteuerelektronik mittels Amplitude-Locked Loop-Schaltung	248
8.5.4	Mikrowellen-Zündkerze	253

8.5.5	Lampentechnik	255
8.5.6	GHz-Plasmajets	258
8.5.7	MW-Chirurgie	264
8.5.8	GHz-Plasmatechnik als Basistechnologie	266
9	Grundbegriffe der Antennentheorie	267
9.1	Einführung in die Antennentechnik	268
9.2	Kurzeinleitung in die Radartechnik	269
9.2.1	Radargleichung	270
9.2.2	Grundprinzip der Radartechnik	271
9.2.3	Radarfrequenzen	273
9.3	Das Feld eines Elementarstrahlers	275
9.3.1	Elektrischer Elementarstrahler	275
9.3.2	Magnetischer Elementarstrahler	281
9.4	Das Fernfeld einer beliebigen Stromverteilung im freien Raum	282
9.5	Das Äquivalenzprinzip (Huygensches Prinzip)	287
9.6	Zusammenhang zwischen Aperturbelegung und Richtcharakteristik bei Flächenantennen	290
9.7	Kenngrößen einer Antenne	303
9.7.1	Polarisation der Freiraumwelle	303
9.7.2	Kenngrößen einer Antenne für den Sendefall	305
9.7.3	Kenngrößen einer Antenne für den Empfangsfall	309
9.7.4	Das Reziprozitätstheorem	311
10	Phasengesteuerte Antennen, Patch-Antennen, Messtechnik	315
10.1	Prinzipielle Vorgehensweise bei phasengesteuerten Antennen	315
10.2	Die Richtcharakteristik einer phasengesteuerten Antenne	316
10.3	Kenngrößen einer phasengesteuerten Antenne	321
10.4	Diskretisierungsfehler bei einer phasengesteuerten Antenne	322
10.5	Patch-Antennen	326
10.5.1	Design der Patch-Antenne	326
10.5.2	Strahlungsfelder der Patch-Antenne	329
10.6	Array aus Patch-Antennen	333
10.6.1	Lineares Patch-Array mit $\lambda/4$ Abständen	334
10.6.2	Lineares Patch-Array mit $\lambda/2$ Abständen	335
10.6.3	Lineares Patch-Array mit $3\lambda/4$ Abständen	335
10.6.4	Getapertes Patch-Array	337
10.7	Phasengesteuerte Empfangsantennen	338
10.8	Antennenmesstechnik	339
10.8.1	Die Messeinrichtung	339

11	Streuung elektromagnetischer Wellen an Radarzielen	343
11.1	Allgemeine Betrachtung der Streuung an einem einzelnen Radarziel	343
11.2	Berechnung des Radarquerschnittes von metallischen Objekten	347
11.2.1	Reflexion bei Einfall einer ebenen homogenen Welle auf eine leitende ebene Platte	352
11.2.2	Reflexion an der Vorderseite einer metallischen Kugel	354
11.3	Streuung an dielektrischen Körpern, die klein gegen die Wellenlänge sind (Rayleigh-Streuung)	356
11.4	Reflexion an einer leitenden Halbebene	359
11.5	Abhängigkeit des Radarquerschnitts von der Frequenz und dem Aspektwinkel	361
11.6	Volumenhafte meteorologische Radarziele	363
	Verzeichnis häufig verwendeter Formelzeichen und Kürzel	367
	Literatur	373
	Stichwortverzeichnis	379