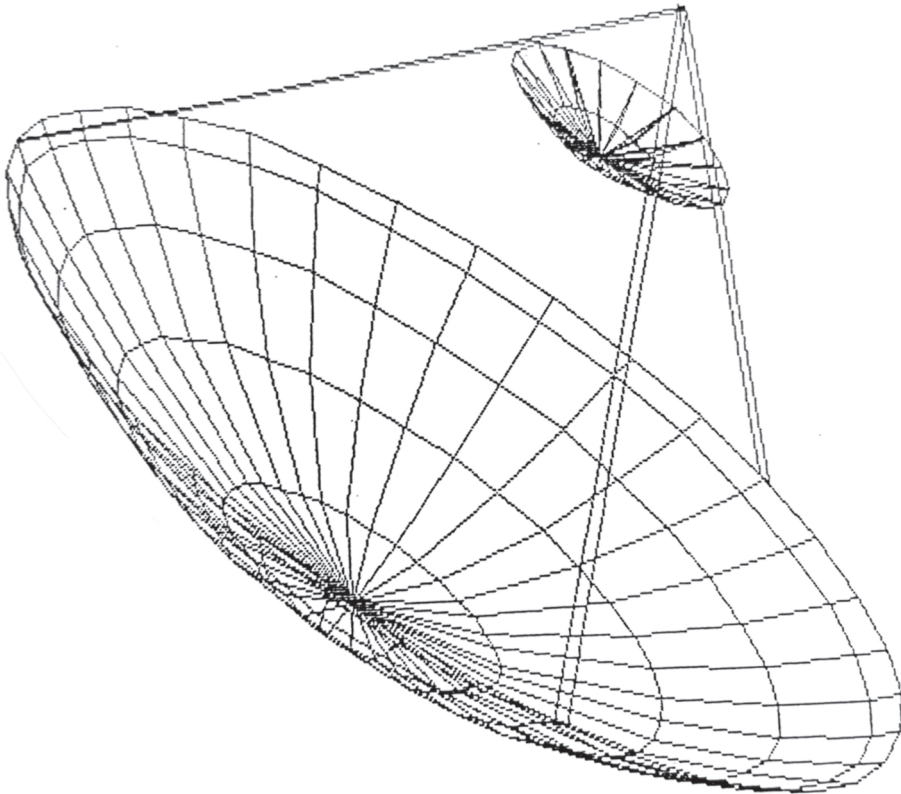


Elektromagnetische Wellen

in Raum und Zeit, Hobby und Beruf

Dipl.-Ing. Thomas Kaczmarek



HF-Wellenausbreitung, Antennen und Frequenzen,
analoge und digitale Verfahren,
digitale Systeme und Netze

Über den Autor

Thomas Kaczmarek ist Diplom-Ingenieur der Elektrotechnik. Er studierte Hochfrequenztechnik und Nachrichtentechnik an der Universität Bochum. Er arbeitete zunächst als Entwicklungsingenieur in der Mikrowellentechnik, später als Fachgruppenleiter in einem Expertenteam für Funksysteme in Telekommunikationsnetzen.

Im Automotive-Bereich leitete er eine Reihe von Softwareprojekten wie z.B. für Fahrberechtigungssysteme und war als Lead Systems Engineer für die Spezifikation von Steuergeräten für das autonome Fahren in einem internationalen Team verantwortlich.

© **Copyright 2022 Thomas Kaczmarek**

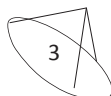
Alle Rechte vorbehalten!

ISBN-Nr. 978-3-946775-83-6

Sämtliche Rechte, besonders das Übersetzungsrecht, an Text und Bildern bleiben vorbehalten. Fotomechanische Vervielfältigung nur mit Genehmigung des Autors. Jeder Nachdruck, auch auszugsweise, und jede Wiedergabe der Bilder, sind verboten.

Impressum

Herausgeber:	Thomas Kaczmarek
Verantwortlich:	Thomas Kaczmarek
Layout:	Klaus-Georg Rump
Gesamtherstellung:	Blömeke Druck SRS GmbH, www.bloemeke-media.de

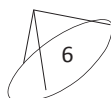


Inhaltsverzeichnis

VORWORT	13
EINLEITUNG	18
KAPITEL 1: HF- UND FUNKWELLEN	21
Große Entdeckungen und Entdecker	21
Wellen in der Übertragungstechnik	27
Ursprünge elektromagnetischer Wellen	27
Lineare Polarisierung	29
Zirkulare Polarisierung	32
Die Wege elektromagnetischer Wellen	33
Geführte Wellen in Wellenleitern	34
Koaxialkabel	35
Zweidrahtleitungen	38
Lichtwellenleiter	38
Streifenleiter	39
Hohlleiter	41
Elektromagnetische Wellen an Grenzschichten	44
Wellenablösung bei einer Linearantenne	47
Ausbreitung im freien Raum	52
Spezielle Effekte bei der Ausbreitung	54
Ausbreitung über die Bodenwelle	61
Überlagerung von elektromagnetischen Wellen	65
Analoge und digitale Sendungen	67
Digitale Signale und digitale Übertragung	69
Sprache und Musik in digitaler Form	69

Inhaltsverzeichnis

Modulationsarten	73
AM und FM	75
CW	81
FSK	82
PSK	84
BPSK	85
QPSK	85
PAM	86
PCM	86
ASK und QAM	87
Spezielle Modulationsarten	88
Bits und Symbole	89
Multiplexing, Organisation und Zugriff auf Signale	89
FDMA	90
TDMA	91
CDMA	92
OFDM und OFDMA	93
Laufzeiten	94
Die Menschen hinter der Technik	96
Anwender	97
Funkamateure	97
Analoger und digitaler Sprechfunk	100
Digitale Betriebsarten für Datenfunk	102
Professionelle und kommerzielle Nutzer	104
Beispiel: Luftfahrt	105
Beispiel: BOS	106
Beispiel: Personennahverkehr	108
Entwickler und Ingenieure	109
SWL	111
Hobbyfunk	113
Selbstbauprojekte	118



Inhaltsverzeichnis

Praxisbeispiel aus Forschung und Entwicklung	121
Maxwells Gleichungen	124
Struktur einer frequenzselektiven Oberfläche	125
Einfallende TEM-Welle.	127
Reflektierte und transmittierte Welle	127
Integralgleichungsmethode im Ortsbereich.	128
Darstellung im Frequenzbereich	129
Einfluss des Trägermaterials	132
Berücksichtigung der Polarisaton	133
Lineares Gleichungssystem.	134
Algorithmus und Berechnung	135
Ausgewählte Ergebnisse	135

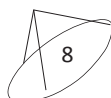
KAPITEL 2: ÜBERTRAGUNG VON RADIOWELLEN 140

Sender und Empfänger	140
Sender mit großer und kleiner Leistung.	141
Guter Empfang als Schlüssel für gute Verbindungen	143
Rauschen: Wenn man die Rechnung ohne den Wirt macht.	144
Rauschen minimieren	146
Ausbreitungsdämpfung	148
Frequenzbereiche	149
Erdkrümmung	156
Atmosphäre	157
Sonne.	160
Das Magnetfeld der Erde	164
Unser Wetter	165
Funkwetter und Vorhersagen	166
Zeitzeichen	168



Inhaltsverzeichnis

Antennen, Wellenleiter und Gefahren	169
Antennen	170
Grundformen von Antennen	172
Linearantennen	173
Flächenantennen	176
Magnetische Antennen	182
Aktive Antennen	183
Gruppenantennen und Antennenarrays	184
Antennen in Mobilfunknetzen	184
Sonderformen	186
Polarisation	189
Bandbreite und Resonanz	189
Anpassung und Rückflussdämpfung	191
Kabel und Wellenleiter	193
Stecker und Adapter	195
Praxisbeispiel Planarantenne	196
Strahlerelemente für den GHz-Bereich (X-Band)	196
Speisesystem und Einkopplung	198
Lineare Polarisation	199
Zirkulare Polarisation	199
Antenne, Konverter und Receiver	201
Modelle für Simulationen	203
KAPITEL 3: ANWENDER UND SYSTEME	204
Anwendungsbereiche	204
Rundfunk und Fernsehen	206
Mobilfunknetze	207
Betriebsfunk	209
Digitalfunk	211



Inhaltsverzeichnis

Verkehr	213
Schifffahrt	213
Luftfahrt.	215
Bahn	216
Straßenverkehr	217
Signale aus dem All	218
Galaktische Strahlungsquellen	220
Wissenschaftliche Missionen im All	223
Übertragungen über Nachrichtensatelliten.	225
Giotto und der Halleysche Komet.	227
Remote sensing	229
Wetterdaten weltweit	232
Militärische Anwendungen	234
Spionage	241
Systeme und Komponenten	244
Verfahren	245
Protokolle	246
Regulierung.	247
Duplexbetrieb - Beispiel Repeater im Amateurfunk.	248
ARQ Semiduplex - Beispiel Seefunk.	249
Weitere ARQ-Verfahren	252
Fehlererkennung und Fehlerkorrektur	252
Codierung	259
Verschlüsselung - von ENIGMA bis TETRA.	259
ALE-Verfahren und Verschlüsselung	262
Frequenzsprungverfahren.	262
Lokalisierung.	263
GPS.	263
Radar	264
Triangulation	266
Peilverfahren	267
Lokalisierung im Amateurfunk.	269

Inhaltsverzeichnis

Bewegung im Weltraum – Beispiel Dopplereffekt	269
Sensoren und Systeme im Flugverkehr.	270
Antennen an Bord	271
Fliegen und Sicherheit.	273
Repeater für den Mobilfunk	274
Antennenvorverstärker.	275
Konverter	276
Erfahrungen aus der Praxis	276
Einige grundlegende Eigenschaften	277
Linkbilanz und Linkbalance	277
Antennendiversity	280
Frequenzsprungverfahren	282
Robustheit	283
Schaltung und Aufbau	283
Modulation und Betriebsart	284
Böse Buben und Spielverderber	284
Blitze und Überspannungen	286
Gute Geister	288
Gute Anpassung.	288
Symmetrierung	298
Mantelwellensperre.	298
Zweite Antenne zum Ausphasen von Störungen	299
Ein guter Antennenstandort	300
Sprachqualität	301
Reichweiten	304
Quantifizierung und hilfreiche Größen	308
Consumerprodukte im Laufe der Zeit	310
Radio und Fernsehen	310
Mobile Endgeräte	312
Historische und moderne Empfängertechnologien	313
Kenngrößen von Empfängern	314

Inhaltsverzeichnis

Frühe Konzepte	316
Bewährte Konzepte.	319
Digitalisierung der HF-Ebene	322
Professionelle Systeme.	329
Algorithms meet Electromagnetics.	332
Simulation in der Funknetzplanung	332
Numerische Berechnung elektromagnetischer Felder . . .	333
Dekodierung von Signalen	334
KAPITEL 4: Netze	337
Terrestrische Netze und Satellitennetze	337
Telefon	338
Netze für Rundfunk und Fernsehen.	339
Transportnetze im Mobilfunk.	339
Netze im Amateurfunk	341
Satellitengestützte Netze für Navigation.	347
Satellitennetze für Telefonie und Internet	348
VSAT	349
Mobilfunknetze und Festnetz	350
Internet.	354
Gesellschaftliche Auswirkungen	355
Nutzen	356
Visionen, Bedenken und Ängste	356
Soziale Netzwerke	357
Gesundheitliche Aspekte	360

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	369
TABELLENVERZEICHNIS	386
LITERATURVERZEICHNIS	388
GLOSSAR	389

Vorwort

Dieses Buch richtet sich an alle Leser, die sich für elektromagnetische Wellen in der Kommunikationstechnik interessieren und die ambitioniert sind, das eine oder andere Geheimnis darüber zu lüften. Es geht um elektromagnetische Wellen in Naturwissenschaft und Technik, und das mit wenig Mathematik. Dazu gibt es zahlreiche Beispiele aus der Praxis. Einer der Schwerpunkte ist die Bedeutung elektromagnetischer Wellen in der Systementwicklung und was Ingenieure der Hochfrequenztechnik und Nachrichtentechnik damit zu tun haben. Auch CB-Funker, Funkamateure und Elektronikbastler werden Interessantes und Bekanntes finden.

Es gibt drei Startmöglichkeiten für einen praktischen Einstieg in die Lektüre dieses Buches:

1. den klassischen Weg über das Inhaltsverzeichnis oder 2. den Weg über das Stichwortverzeichnis (Glossar) am Ende des Buches oder 3. das Durcharbeiten einzelner ausgewählter Kapitel, ganz nach Belieben des Lesers. Derjenige, der seinen Zugang eher über Stichworte oder Suchworte findet, bekommt hier einen praktischen Einstieg in seine Themen. Der Leser, dem die Tiefe nicht genügt und der gern mehr davon hätte, der sei eingeladen, die Literaturquellen im angehängten Verzeichnis zur Hand zu nehmen oder sich auf vertiefende Lektüre im Internet oder in passenden Fachbüchern zu stützen. Besonders geeignet ist der Buchtipp unter [1] im Literaturverzeichnis.

„The air is literally full of radio signals.“ Dieser Satz bildet die Klammer für die Kapitel dieses Buches, das sich eingehend mit elektromagnetischen Wellen, ihren Eigenschaften, ihrem Verhalten und ihrer Nutzung mit Hilfe von Kommunikationssystemen befasst. Solche Systeme werden schon seit mehr als 120 Jahren von Menschen in vielen tollen Berufen entwickelt, gebaut und eingesetzt. Man kann sich elektromagnetischen Wellen von vielen Seiten nähern, wenn man sich genauer mit ihnen befasst und sie besser verstehen will.

Einige Aspekte müssen hier aus Platzgründen ausgeklammert werden, denn sie eröffnen Themenfelder, die ganz eigene Disziplinen begründen und durch bestehende Literatur bereits sehr genau erforscht und beschrieben sind, und zwar in vielen Büchern und anderen Veröffentlichungen. Erwähnt werden sie dennoch. Tatsächlich gehören nämlich Licht und Röntgenstrahlung ebenso wie ultraviolette Strahlung und weitere Arten ebenso in den Bereich der elektromagnetischen Wellen. Doch hier in diesem Buch schauen wir mehr auf die Hochfrequenzbereiche für die klassischen Kommunikationsanwendungen (LW, MW, KW also Lang-, Mittel- und Kurzwelle bzw. HF, VHF, UHF, SHF, Mikrowellen) von etwa 10 Kilohertz bis in die Mikrowellenbereiche oberhalb von 1 GHz bis 30 GHz oder mehr. Allein die Kategorien Röntgenstrahlung und UV-Strahlung lassen erahnen, wie weit man zu diesem Thema wirklich ausholen müsste, um es einigermaßen umfassend abzudecken, zu beschreiben und zu vertiefen.

Das Geschenk – Eine kleine Wintergeschichte

Ein kalter ungemütlicher Weihnachtsabend... Irgendwann in den 70er Jahren des Zwanzigsten Jahrhunderts in einer Großstadt in einer der größten Industrieregionen Europas.

„The air is literally full of radio signals.“ Diesen Satz las ich mit 14 Jahren und er sollte erheblichen Einfluss auf mein Leben nehmen. Er stammt aus der englischsprachigen Anleitung für den Bau eines kleinen Kurzwellenempfängers der Firma Radio Shack bzw. Tandy von etwa 3 bis 30 MHz. Mit dieser Vorstellung, dass es in der Luft offenbar unzählige Radiosignale gibt, erlebte ich eine gewaltige Initialzündung für meine Begeisterung, deren Auswirkungen ich mir damals nicht im Ansatz vorstellen konnte. So baute ich den Bausatz, ein kleines Radio und ein Geschenk meiner Großeltern, noch am Heiligen Abend dieses Weihnachtsfestes in den 70er Jahren zusammen. Damit begann mein Interesse für elektromagnetische Wellen am Beispiel des weltweiten Empfangs von Kurzwellensendern und allerlei anderer sonderbarer Signale.

Manche davon klangen lebendig melodisch und kamen fast tanzend durch die Atmosphäre bis zum Ohrbörer, andere Signale schienen eher tikernd, rauschend oder brummend und störten. Je nachdem, wohin man den kleinen Drehkondensator drehte, gab es Musik- oder Nachrichtensendungen in verschiedenen Sprachen. Also wirklich Signale aus aller Welt? Jetzt war meine Neugier erst recht geweckt.

In der Bedienungsanleitung meines kleinen Bausatzes stand außerdem noch, dass man für nächtlichen Radioempfang besser eine längere Wicklung mit 20-30 Windungen verwenden sollte. Der Grund: nachts breiten sich die Signale mit niedrigeren Frequenzen besser aus. Am Tage sollte man eher Wicklungen mit 2-20 Windungen verwenden. Gesagt, getan. Und tatsächlich... wie sich später herausstellte, der Tipp war sehr wertvoll. Denn ohne diesen wichtigen Hinweis hätte ich Sender dort gesucht, wo gar keine waren und schlimmer noch, ich hätte den Fehler gesucht, warum es plötzlich keinen Empfang mehr gibt. Eine überflüssige Suche. Heute wissen wir, dass es an unserer Atmosphäre liegt, was diesen Unterschied ausmacht. In der Nacht ist das Dämpfungs- und Reflexionsverhalten unserer atmosphärischen Schichten, vor allem der E-Schicht und der Ionosphäre, spürbar anders als am Tage.

Diese kleine Einleitung liefert den Rahmen für viele Themen dieses Buches. Es geht um die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen und den daraus resultierenden Möglichkeiten und Anwendungen im täglichen Leben insbesondere in der Kommunikationstechnik. Allein der Themenbereich „Kommunikationssysteme“ ist so vielfältig, dass andere wichtige Bereiche, in denen elektromagnetische Wellen eine Rolle spielen, hier jeweils nur kurz erwähnt werden können. Beispiele: Medizintechnik, Weltraumforschung, biologische Wechselwirkungen.

Elektromagnetische Wellen kann oftmals man nicht sehen und in der Regel auch nicht fühlen. So mussten sie zunächst entdeckt werden und mathematisch beschrieben werden von wirklich großen Wis-

senschaftlern wie Maxwell, Tesla, Hertz, Marconi und anderen. Schnell gab es in der Geschichte schon frühzeitig Anwendungen in der Seefahrt, z.B. um Notsignale zur Küstenfunkstation oder zu anderen Schiffen zu übermitteln.

Prominentestes Beispiel ist wohl die Titanic, die im April 1912 vor ihrem Untergang noch einen Funkspruch in Morsetelegrafie absetzen konnte, was einige Menschenleben während dieser verheerenden Katastrophe rettete.

Die Nutzung elektromagnetischer Wellen und der Einsatz von Funksystemen gehören in der Kommunikationstechnik eng zusammen. Wissenschaftliche Tiefe liefert dieses Buch nur an einer Stelle. Dort wird an einem Beispiel gezeigt wie Ingenieure arbeiten und wie sie mit wissenschaftlichen Methoden und dem Einsatz schneller Rechner das Design von Antennenstrukturen erstellen. In diesem Buch geht es zumeist um den Bereich der Funktechnik und das aus praktischer Sicht. Gerade die Physik und die beteiligten Elemente wie Antennen, Wellenleiter und Ausbreitungsmedien bekommen erhöhte Aufmerksamkeit.

Statt wissenschaftlicher Gründlichkeit werden hier diejenigen Felder und Aspekte zusammengebracht und im Verbund vorgestellt, die ansonsten meist unabhängig voneinander behandelt werden. Endgeräte, Antennen, Satelliten, Funkgeräte, Frequenztabelle, das Sonnensystem usw., das alles wird in einer Vielzahl von Büchern diverser Fachbereiche publiziert. Elektromagnetische Wellen bilden sozusagen die Verbindung zwischen all diesen Themenbereichen.

Am Ende des Buches werden auch gesellschaftliche Bezüge und soziale Medien angesprochen. Gerade heute gibt es immer wieder neue unerklärliche medizinische Angelegenheiten. Das Thema, wie weit die Feldstärke von Sendern negative Auswirkungen auf den menschlichen Organismus hat, wird bereits seit langem und mit wissenschaftlicher Tiefe von zahlreichen Wissenschaftlern und Autoren be-

handelt. Das rief natürlich auch einige Pseudowissenschaftler auf den Plan, die mit zum Teil üblen Methoden den Menschen Angst gemacht haben vor Dingen, die vom klaren Verstand nicht nachvollzogen werden konnten.

Seitdem die Digitalisierung und die drahtlose Telefonie in den 90er Jahren deutlich Fahrt aufnahm und auch die Digitalisierung der drahtgebundenen Übertragungstechnik seitdem in vollem Gange ist, gibt es heute ganz neue Perspektiven: Auswirkungen, die moderne Netze mit 24/7-Verfügbarkeit und all ihren Apps auf uns haben, sind heute noch gar nicht absehbar. Auch die Ingenieure, die jene Netze erschufen, z.B. Handynetze, konnten seinerzeit nicht ansatzweise ahnen, welchen immensen Nutzen diese Technologie einmal bringen würde, Leben retten würde usw. Aber sie ahnten auch nicht die negativen Erscheinungen, z.B. welche menschlichen Abgründe ihre Nutzer einmal offenbaren würden, einfach nur, weil man sich hinter anonymen Schreiben und Accounts nur allzu gut verstecken kann und damit andere Menschen jederzeit belästigen oder gar bedrohen kann.

Einleitung

Elektromagnetische Wellen belegen ein riesiges Spektrum von Frequenzen und Wellenlängen. Es geht los mit sehr niedrigen Frequenzen im ELF- und VLF-Bereich (extremely low frequencies, very low frequencies) mit hunderten Metern Wellenlänge. Am anderen Ende mit sehr hohen Frequenzen, spricht man von Millimeterwellen. Mittendrin liegen die Bereiche, welche in diesem Buch etwas näher betrachtet werden. Es geht um Wellenlängen von etwa 10-100 m (KW) sowie VHF, UHF, SHF, bis zu wenigen Zentimetern oder gar Millimetern (microwave), die für die Übertragung von Kommunikationssignalen verwendet werden. Dieser Bereich des elektromagnetischen Spektrums interessiert in diesem Buch ganz besonders. Auch unterhalb der besonders langwelligen VLF-Signale gibt es noch Anwendungen für wissenschaftliche Zwecke, ebenso wie oberhalb der Frequenzen von mm-Wellen, wo es bereits um sichtbares Licht, Ultraviolett- und Röntgenstrahlung geht.

In der drahtlosen Kommunikationstechnik spielen elektromagnetische Wellen im wahrsten Sinn des Wortes eine tragende Rolle. Sie transportieren Energie und sie transportieren Nachrichten von A nach B. Diese können von ortsfesten Stationen ausgesendet und empfangen werden. Aber nicht nur ortsfeste, sondern auch beweg-

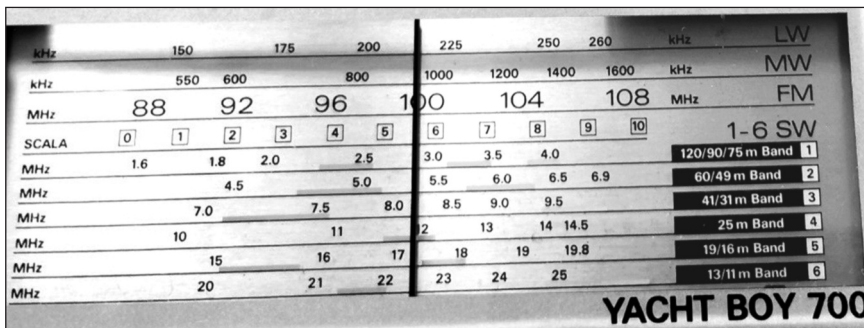


Abbildung 1: Radioskala mit Lang, Mittel- und Kurzwellenbereich sowie UKW. Fernempfang von Programmen anderer Kontinente war zunächst nur über Kurzwelle möglich.

liche Stationen auf der Erde, in der Luft, zur See oder gar im All können am Austausch von drahtlos übermittelten Nachrichten beteiligt sein.

In den folgenden Kapiteln werden verschiedene Perspektiven angeboten, mit denen der Einblick in die Physik und die Technik beteiligter Komponenten gelingt. Ziel ist es, drahtlose Kommunikation über elektromagnetische Wellen besser kennen zu lernen und zu verstehen. Dazu gehören Themen wie Funktionsweise, Komponenten, Reichweite, Störungen, Aspekte des Designs von Funknetzen, usw. Doch es geht auch um die Menschen, die sich mit all dem beschäftigen und es geht auch um Risiken und soziale Auswirkungen einiger Anwendungen.

Eine große Portion praktischer Erfahrung aus verschiedenen Bereichen wie Messtechnik, Design, Industrie, Elektronik, sowie aus eigenen Experimenten fließen in dieses Buch ein. Es wird u.a. gezeigt, dass landläufige Aussagen wie „HF geht seltsame Wege“ entmystifizierbar sind. Dabei wird auf ein Übermaß an Mathematik verzichtet, weil sie ab einer gewissen Grenze schnell eine abschreckende Wirkung entfacht.

Es ist dafür beabsichtigt, bei denjenigen Lesern Motivation zu erzeugen, die sich für Themen rund um elektromagnetische Wellen bereits interessieren. Das können junge Tüftler oder leidenschaftliche Hobbyisten sein. Es gibt aber auch viele Berufe, in denen man das eine oder andere Kapitel verwerten kann.

Anstelle einer wissenschaftlichen Ausarbeitung geht es in diesem Buch darum, grundsätzliches Theorie- und viel Praxiswissen bereitzustellen in einem Themenbereich, der eigentlich kein eigener Bereich ist. Vielmehr fließen Aspekte aus Elektronik und Naturwissenschaften, der Digitalisierung, der Bedeutung von Netzen und Medien usw. ein. Erfreulich, wenn beim Lesen sogar Motivation für Aktivitäten und Interesse an Technik und Naturwissenschaften entsteht.

Schließlich finden sich hier noch weitere betroffene Themenfelder wie Automobilelektronik, Mobilfunknetze, Astronomie, Biologie etc., in denen manch ein Leser zu Hause ist. Hier erhält auch er oder sie neue Perspektiven und Einblicke.

Neben allen technischen Aspekten ist die Nutzung von Systemen, die mit elektromagnetischen Wellen arbeiten, überaus wichtig für die Menschen in aller Welt. In vielen Ländern und auch hierzulande ist das Radio, vor allem das Kurzwellenradio, eine Art Fenster in die Welt. Wir können damit hinausschauen und das Geschehen dort draußen mit eigenen Augen und Ohren verfolgen.

Für Menschen in totalitären Staaten ist es vielleicht die einzige Möglichkeit, sich ein eigenes ausgewogenes Bild von der Welt dort draußen zu machen. Dort wo Menschen eingesperrt sind und das Internet kontrolliert wird, ist das Radio ein Weg zu einem kleinen Stückchen Freiheit.

