

Elektromagnetische Verträglichkeit : eine Wachstumsgrenze der Funktechnik?

Autor(en): **Dvoák, T. J.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **73 (1982)**

Heft 17

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-905008>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Elektromagnetische Verträglichkeit: Eine Wachstumsgrenze der Funktechnik?

T.J. Dvořák

Der akute Frequenzmangel und der unaufhaltsam steigende Störpegel machen die bestmögliche Ausnützung des Frequenzspektrums zu einem zentralen Problem der heutigen Funkübertragung. Als Folge der immer restriktiveren Praxis der Frequenzzuteilungen dürfte sich der Schwerpunkt der drahtlosen Kommunikation unter Ausnützung der GHz-Bereiche auf die beweglichen Dienste verlagern. Trotz Optimierung der Technik und weiteren Massnahmen muss besonders in technisch hochentwickelten Ländern mit einer Grenze des Wachstums der drahtlosen Übertragung gerechnet werden.

La pénurie de fréquences et la croissance continue du niveau de bruit exigent une utilisation optimale du spectre de fréquences et en font un problème primordial des transmissions radio actuelles. Etant donné que l'attribution de fréquences sera de plus en plus restrictive, il est probable que l'accent des communications sans fil soit porté sur les services mobiles, en utilisant les bandes hyperfréquences. Malgré l'optimisation de la technique et d'autres mesures, il faut compter atteindre une limite de croissance, en particulier dans les pays à développement technique avancés.

1. Einleitung

Mit den ersten Morsezeichen, die *Marconi* 1895 im elterlichen Park drahtlos übertrug, hat eine beispiellose Entwicklung begonnen. Innerhalb einer kurzen Zeitspanne von etwa 80 Jahren hat sich eine vollständig neue technische Disziplin herausgebildet, die zu einem nicht mehr wegzudenkenden Bestandteil der modernen Gesellschaft geworden ist. Es gibt kaum eine Erfindung, mit deren Anwendungen jedermann so oft in Kontakt kommt (man denke etwa an Radio und Fernsehen), von der ständigen Präsenz der sie begleitenden elektromagnetischen Felder ganz abgesehen.

Stellt man die Frage, wodurch das aussergewöhnliche Interesse an der Funktechnik angeregt wurde (denn dieses Interesse hat die ganze Entwicklung möglich gemacht), sieht man in erster Linie die Faszination der Entdeckung einer völlig neuen, durch den Menschen noch unberührten natürlichen Ressource. In einem Übertragungsmedium, das jedermann überall zur Verfügung stand, hat man den schnellsten Nachrichtenträger gefunden, der keinen staatlichen Hoheitsansprüchen unterliegt, alle Grenzen überschreitet und der, im Unterschied zu anderen ähnlichen Mitteln, nicht teuer erstellt und unterhalten zu werden braucht.

Es ist daher nicht verwunderlich, dass die Funktechnik jahrzehntelang eine starke Anziehungskraft auf die besten technischen und organisatorischen Talente ausgeübt hat, die ihr zu einer stürmischen Entfaltung verholfen haben. Diese Ausstrahlung war zweifellos noch durch die Überzeugung verstärkt, dass die Belastbarkeit des elektromagnetischen Spektrums und somit auch die Anwendungsmöglichkeiten der drahtlosen Kommunikation unbegrenzt seien.

Die erste diesbezügliche Ernüchterung stellte sich ein, als man in der Schifffahrt die neu installierten Funksender in praktischen Betrieb nahm. Da diese, wie schon der Name besagt, eine Funkenstrecke ohne jegliche Begrenzung des entstehenden Hochfrequenzspektrums benutzten, war es in einer weiten Umgebung eines aktiven Senders unmöglich, andere Verbindungen zu betreiben.

Das von *Lodge* erfundene und patentierte Prinzip der Frequenzselektion mittels eines abstimmbaren Resonanzkreises und die Triode von *de Forest* haben diese Schwierigkeit elegant behoben, und es dauerte beinahe 40 Jahre, bis weitere ernsthafte Komplikationen auftraten. Mit diesen setzt man sich unter der zusammenfassenden Bezeichnung der «Elektromagnetischen Verträglichkeit» (EMV) bis heu-

te auseinander, und zwar ohne jegliche Hoffnung auf eine nur annähernd so effiziente Lösung, wie sie *Lodge* und *de Forest* gelungen ist. Im Gegenteil, die Verträglichkeitsprobleme nehmen trotz steter Bemühungen dauernd zu, und es ist anzunehmen, dass sie in einer nicht allzu fernen Zukunft die Weiterentwicklung der Funktechnik bestimmen werden.

2. Elektromagnetische Verträglichkeit

Die elektromagnetische Umwelt unseres Planeten wurde früher praktisch nur durch die Sonneneinstrahlung bestimmt. In den letzten Jahrzehnten hat sich jedoch das vorhandene, ursprünglich äusserst kurzwellige Leistungsspektrum bis zu den tiefsten Frequenzen ausgedehnt, wobei seine totale Energie wesentlich zugenommen hat. Nicht nur alle Sender und weitere Erzeuger beabsichtigter Strahlung, sondern jeder zeitveränderliche elektrische Vorgang (d.h. alle Wechselströme, das Ein- und Ausschalten eines Gleichstromes inbegriffen), leistet dazu seinen Beitrag. Die dadurch immer aggressiver gewordene elektromagnetische Umwelt wirkt sich auf das Funktionieren von elektrischen und biologischen Systemen aus, seien es nun Funkempfänger oder Rezeptoren, wie Computer, Verstärkeranlagen, zündbare Gasgemische, lebende Zellen usw.

Dieser unerwünschten Beeinflussung kann auf verschiedene Art und Weise begegnet werden. Einmal ist es möglich, die Leistungsbeiträge der verschiedenen Störquellen zum Gesamtspektrum durch geeignete Massnahmen herabzusetzen. Dies ist die sog. *aktive Entstörung* (Fig. 1), die jedoch vorwiegend auf Quellen unbeabsichtigter Strahlung anwendbar ist. Eine andere Möglichkeit besteht in der *passiven Entstörung*, durch welche die Immunität des Störöp-

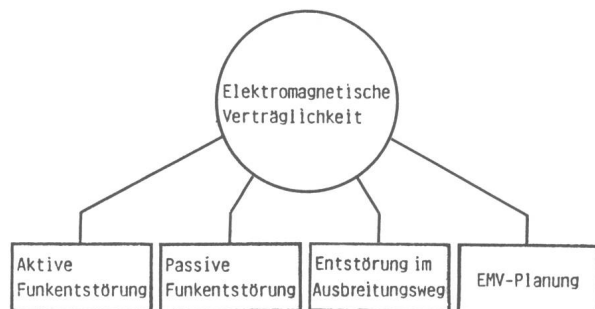


Fig. 1 Elemente der elektromagnetischen Verträglichkeit

fers erhöht wird. Durch Entkopplung von Störer und Störpfer, z. B. durch örtliche Trennung, kann ferner die Dämpfung vergrössert und dadurch eine *Entstörung im Ausbreitungsweg* erreicht werden. Schliesslich ist es möglich, durch gezielte *EMV-Planung* im Zeit-, Frequenz- und Amplituden-Bereich oder durch Übergang auf nichtelektrische Systeme die unerwünschte Wechselwirkung zu mildern beziehungsweise völlig auszuschliessen. Weiterhin umfasst die EMV-Planung auch alle administrativen Massnahmen, wie z. B. die Festlegung der Grenzwerte der Störeinwirkung oder der Mindestwerte der Störfestigkeit.

Der ganze theoretisch-experimentelle, technologische, verwaltungs- und ausbildungstechnische Komplex wird unter dem Sammelbegriff der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV bzw. EMC: Electromagnetic Compatibility) zusammengefasst. Da der Charakter dieser Disziplin ausgesprochen konservativ und auf eine möglichst haushälterische und schonende Nutzung der natürlichen Ressource des elektromagnetischen Spektrums ausgerichtet ist, kann man die EMV als einen Wegbereiter der künftigen sanften Technologien verstehen. Für ihre Entwicklung im letzten Jahrzehnt ist dabei kennzeichnend, dass die frühere Empirik der nachträglichen Funkentstörung durch eine theoretische, computerunterstützte Analyse ersetzt wird, die bereits beim Systementwurf eventuellen EMV-Problemen vorbeugt. Dies ist nicht weiter verwunderlich, wenn man bedenkt, dass bei der heutigen Mikrominiaturisierung der Schaltungen allfällige Modifikationen nicht mehr mit einem Lötkolben zu bewältigen sind, sondern kostspielige Neuentwicklungen erfordern.

3. Das Frequenzspektrum

Mit der Einführung neuer Funkdienste und weiterer Anwendungen der Hochfrequenzenergie hat sich das ursprünglich leere Spektrum bald gefüllt. Gleichzeitig hat die technologische Entwicklung die Benützung immer höherer Frequenzen ermöglicht, so dass heute für die Radiokommunikation ein Bereich von 9 kHz bis 40 GHz offiziell zur Verfügung gestellt wird. Allerdings hat diese technologische Expansion angesichts der rasch wachsenden Anzahl der Benutzer keine spürbare Entlastung des Funkspektrums ge-

bracht, zumal auch viele Funkdienste ausbreitungstechnisch an bestimmte Frequenzbereiche gebunden sind und nicht in die neu erschlossenen Bänder verlegt werden können.

Eine Übersicht über das Kräftespiel um das Spektrum vermittelt Figur 2, das die Spektrum beanspruchenden und entlastenden Faktoren zeigt. Als belastend wirken sich neben verschiedenen Funkdiensten auch atmosphärische sowie industrielle Störungen aus. Ausserdem schränkt die biologische Verträglichkeit und die Störemfindlichkeit elektrischer Systeme die Einsatzmöglichkeiten von Funksendern ein.

Zu den sehr wenigen das Spektrum konservierenden bzw. dessen Kapazität erhöhenden Faktoren gehören vor allem die Fortschritte der Technologie der ultrahohen Frequenzen im GHz-Bereich, die Ökonomie in der Planung der Nutzung des Funkspektrums und konservative Technologien.

Eine Vorstellung über die Geschwindigkeit, mit der die spektrale Belastung in den letzten Jahrzehnten zugenommen hat, vermittelt Figur 3. So ist die Anzahl der Sendegeräte seit 1964 von 10 000 auf 170 000 angestiegen und verdoppelt sich weiter ungefähr alle 4 Jahre. Obwohl die Geräte nicht alle die gleiche Sendeleistung haben und auch nicht gleichzeitig betrieben werden, darf man annehmen, dass die Kurve angenähert die Wachstumsrate der durch Sender erzeugten Strahlungsenergie im Raume Schweiz wiedergibt. Ähnliches gilt für die trotz allen Sparappellen ebenfalls stetig ansteigende Stromverbrauchskurve, welche die Wachstumsrate der als unbeabsichtigtes Nebenprodukt entstehenden Störenergie charakterisiert. Hinzu gesellen sich noch verschiedene netzunabhängige Störquellen, wie z. B. die Zündanlagen von Kraftfahrzeugen. Die zwei Kurven für Rundfunk- und Fernsehempfänger haben ein doppeltes Ge-

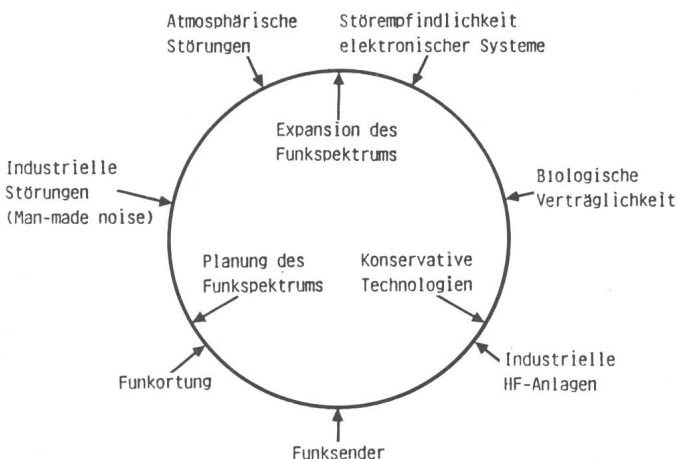


Fig. 2 Faktoren, welche die Kapazität des Frequenzspektrums bestimmen

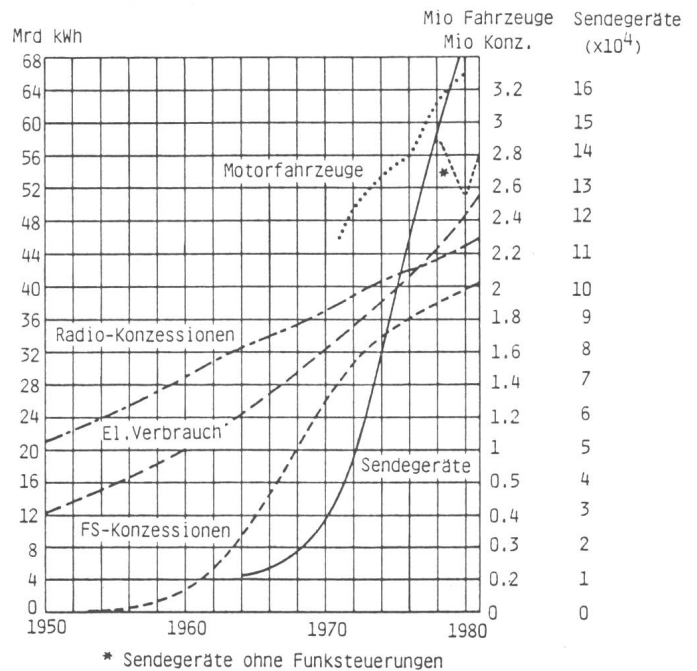


Fig. 3 Wachstum der Störleistung und der Störemfindlichkeit in der Schweiz

wicht, da sie einmal den Störbeitrag der Empfänger wiedergeben (Strahlung der Oszillatoren und Kippengeneratoren), gleichzeitig aber auch als Indikatoren der zunehmenden Störempfindlichkeit interpretiert werden können, die der Nutzung des Funkspektrums Grenzen setzt.

Aus dieser Aufstellung lässt sich schliessen, dass der kumulative Endeffekt mit der Zeit schneller wächst als alle ihn verursachenden Teilerscheinungen. Zurzeit liegt das Schwergewicht seiner Auswirkungen im grössten Teil des verfügbaren Frequenzspektrums offenbar noch unter der Schwelle der allgemeinen Wahrnehmbarkeit; sobald aber diese einmal erreicht wird, werden sich die hochentwickelten Industrieländer mit einer rasch fortschreitenden Erschöpfung der weiteren Belastbarkeit der natürlichen Ressource des elektromagnetischen Übertragungsmediums konfrontiert sehen. Beispiele solcher Entwicklung kann man bereits in den Mittel- und Kurzwellenbändern beobachten, wo das minimale Nutzsignal längst nicht mehr durch die Grenzempfindlichkeit des Empfängers, sondern durch den Störpegel bestimmt wird.

4. Mögliche Gegenmassnahmen

Um der räumlichen und frequenzmässigen Ausweitung solcher Inkompatibilitäten vorzubeugen oder sie zumindest aufzuschieben, sind komplexe technische und organisatorische Massnahmen notwendig. Diese sollten eingeleitet werden, lange bevor die ersten Anzeichen von Schwierigkeiten erkennbar sind, da jede grössere Trendänderung Zeiträume in der Grössenordnung von Jahrzehnten in Anspruch nimmt. Leider neigte man früher dazu, eher umgekehrt zu verfahren: Erst in den letzten Jahren beginnen sich bestimmte, auf Vorbeugung ausgerichtete Tendenzen abzuzeichnen, die sich in der Zukunft auf breiter Basis durchsetzen dürften. Die entsprechenden Mittel wurden bereits im Zusammenhang mit Figur 2 kurz erwähnt. Da sie einen bedeutenden Einfluss auf die künftige Entwicklung des Funkwesens ausüben, soll auf sie etwas näher eingegangen werden.

Die Expansion des Frequenzspektrums kann heute technologisch als praktisch abgeschlossen betrachtet werden. Obwohl in den nächsten Jahren dank kostengünstiger Empfänger in Stripline-Technik mit verstärkter Nutzung der Frequenzen oberhalb etwa 1 GHz zu rechnen ist, wird dies keine spürbare Entlastung der herkömmlichen Bänder bringen. Die Gründe dafür liegen vor allem in der geringen Reichweite, in Problemen mit Mehrwegausbreitung und Niederschlagsempfindlichkeit von Zentimeterwellen, die somit in terrestrischen Anwendungen keinen echten Ersatz für die konventionellen Wellenbereiche bieten können. Sie werden daher vorwiegend für spezielle neue Funkdienste eingesetzt, die den besonderen Ausbreitungseigenschaften angepasst sind.

Als ein etwas wirksameres Mittel erweist sich eine konsequente Überprüfung der Frequenzplanung mit Hilfe moderner Computermethoden. So ist es heute möglich, Optimierungsstudien unter fast realen Bedingungen durchzuführen. Dies war früher wegen der grossen Anzahl von Parametern mit zum Teil fliessenden Werten nur mit einem

Aufwand denkbar, der auch angesichts der ohnehin befristeten Gültigkeit der Ergebnisse nicht zu rechtfertigen war. Heute sind solche Analysen nicht nur problemlos durchführbar, sondern es können zusätzliche Parameter berücksichtigt und alternative Lösungsvarianten durchgespielt werden. So stehen für Berechnungen der Ausbreitungsdämpfung im Meterwellenbereich dreidimensionale Daten des Geländes zur Verfügung; eine automatisierte Messtechnik liefert statistische Parameter der Bandbelegung und der Störpegel; im Mobilfunk können auch komplizierte verkehrstheoretische Modelle berücksichtigt werden usw.

Obwohl die Ergebnisse solcher Analysen bei bereits etablierten Diensten aus wirtschaftlichen Gründen nur langsam zur Anwendung gelangen, führen die neuen Methoden auf längere Sicht dazu, dass in demselben Frequenzband im gleichen geographischen Gebiet wesentlich mehr Sender als bisher betrieben werden können. Einen weiteren Beitrag zur besseren Nutzung des Funkspektrums leistet auch die immer restriktivere Handhabung neuer Senderbewilligungen seitens der nationalen Funkverwaltungen, bei der geprüft wird, ob die gewünschte Nachrichtenübertragung tatsächlich nur auf dem Funkweg möglich ist, und bei der auch bei positivem Ausgang noch bestimmte Prioritäten gesetzt werden. Schliesslich fallen unter den Sammelbegriff der Planung des Funkspektrums auch administrative Massnahmen, wie z. B. Vorschriften für den Betrieb und für die technischen Parameter der Sender, für die Störfestigkeit von Rezeptoren sowie für Grenzwerte der Störstrahlung von elektrischen Geräten und Einrichtungen, die nicht als Funksender eingestuft sind. Durch dieses Instrumentarium kann die Wahrscheinlichkeit einer Störung in bestimmten Grenzen gehalten werden, wobei grössere Reserven vor allem in der Störfestigkeit bestehen, die besonders bei der anteilmässig stark vertretenen Unterhaltungselektronik noch viel zu wünschen übriglässt.

Die bei weitem grössten Möglichkeiten bietet jedoch die bestehende Technologie, die auf den ersten Blick hochentwickelt erscheint, vom Gesichtspunkt der effizienten Nutzung des Spektrums jedoch recht primitiv ist. Wie kann man sonst erklären, dass die Polarisationsselektion mit Ausnahme von einigen wenigen Richtfunkstrecken und vom geplanten direkten Satellitenfernsehen nie auf breiterer Basis und mit richtigen Mitteln genutzt wurde, obwohl sie auch bei beliebig depolarisierenden Strecken eine Verdoppelung der Übertragungskapazität ermöglicht?

Ein anderes Beispiel schlechter Effizienz stellen die UKW-Hörrundfunksender dar, die mit horizontaler Polarisation strahlen und an ungünstigen Orten mit gekürzten vertikalen Stabantennen der Auto- und Kofferradios empfangen werden, wobei ein durchschnittlicher Signalverlust von etwa 14 dB (25mal weniger Leistung) in Kauf genommen wird. Es stimmt, dass die ursprüngliche Planung zu einer Zeit stattgefunden hat, in der noch horizontale Dachantennen der Heimempfänger die Szene dominierten und die Entwicklung einer zirkularpolarisierten Rundstrahl-Sendeantenne, bei der sich für vertikal oder horizontal orientierte Empfangsantennen der gleiche Verlust von 3 dB ergibt, bestimmte Probleme aufgeworfen hätte. Seither hat sich aber die Situation grundsätzlich geändert, und das Argument der unangemessenen Sendeleistung, die lediglich unnötige Störungen verursacht, hat an Gewicht gewonnen.

In den Kinderschuhen steckt auch die Organisation der bestehenden Funknetze, obwohl ein Vorbild derartiger Regelungen im Telefonverkehr seit vielen Jahren besteht. Mit den üblichen, fest zugeteilten Kanalfrequenzen kommt es sehr oft zu Störungen durch gleichzeitigen Betrieb von zwei unmittelbar benachbarten Kanälen, während im Funknetz ungestörte freie Kanäle zur Verfügung stehen. Besonders in Netzen mit einer Leitstation wäre es dabei mit den heutigen Mitteln leicht möglich, eine einfache Steuerlogik in den Teilnehmerstationen vorzusehen, die diese völlig unnötigen Störfälle ausschliessen würde. In Netzen mit Zellenstruktur, in denen der ganze Verkehr über Zentralstationen vermittelt wird, kann man sich intelligente Steuerungen vorstellen, die beispielsweise dafür sorgen, dass alle Sender nur mit der minimal notwendigen Leistung betrieben werden oder dass bei der Zuteilung der Arbeitsfrequenz eine Rückwärts-Analyse des unmittelbar erfolgten Betriebs berücksichtigt wird.

Ohne die Reihe ähnlicher Beispiele fortzusetzen, leuchtet es ein, dass auf dem Gebiet der technischen Entwicklung noch viel getan werden kann, um das Spektrum zu entlasten und dadurch freie Räume für die weitere Entwicklung der Funkübertragung zu gewinnen. Auf wissenschaftlicher Ebene werden zudem interessante Projekte, wie z.B. bandsparende oder besonders störfeste Modulations- und Codierungsverfahren, geprüft und parallel dazu neue Technologien, wie die Lichtfasertechnik, entwickelt, die direkt oder indirekt zu dieser Entlastung beitragen. Die praktische Einführung derartiger konservativer Technologien ist jedoch von dem Druck abhängig, den einerseits das Wachstum des Störpegels, andererseits die rasch zunehmende Anzahl der Benutzer des Funkspektrums auf die massgeblichen Gremien, welche die Kosten der notwendigen Umstellungen zu tragen haben, ausüben werden.

5. Versuch einer Prognose

Vorausgesetzt, dass es in den nächsten Jahrzehnten zu keinen überraschenden Neuentwicklungen auf dem Gebiet der Kommunikation kommen wird, kann man die Perspektiven der Funkübertragung in groben Zügen etwa folgendermassen zusammenfassen:

In erster Linie wird das Gesamtvolumen der drahtlosen Übertragung weiter zunehmen, jedoch etwas langsamer als bisher, da keine grundsätzlich neuen Dienste (wie einst das Fernsehen) eingeführt, sondern eher die bereits bestehenden diversifiziert werden. In diesem Zusammenhang sind unter anderem sowohl bewegliche, hochorganisierte Grossnetze im militärischen Bereich als auch das mobile Telefon, im Auto, tragbar oder als schnurlose Version zu Hause, zu erwähnen. Vom Satellitenfunk werden ausser dem bereits erwähnten Direktfernsehen zahlreiche weitere Dienstleistungen übernommen oder neu angeboten, wie z.B. globale mobile und feste Kommunikation und Datenübertragung, Navigationshilfe und Ortung, genaue Zeit usw. Das Hauptgewicht aller dieser Dienste wird in den GHz-Bereichen liegen, so dass allfällige terrestrische Varianten nur geringe Reichweiten aufweisen werden.

Gleichzeitig werden sich immer häufiger Anzeichen der Sättigung und der spektralen Überlastung bemerkbar machen. Neben den bereits erwähnten Diensten werden dadurch besonders der Flugfunk und die terrestrischen mobi-

len Dienste betroffen. Zu kritischen Entwicklungen wird es vor allem in den Ballungszentren des Funkverkehrs in grossen städtischen und industriellen Agglomerationen, entlang wichtiger Flug-, See- und Autostrassen und in der Umgebung von grossen See- und Flughäfen kommen.

Dem wird man anfangs von Fall zu Fall mit einer Feuerwehrtaktik begegnen, die aber später durch breit angelegte konzertierte Aktionen ersetzt wird, in deren Rahmen vor allem die technischen Forderungen an Funkgeräte aller Art verschärft werden. Dies wird insbesondere die Frequenzstabilität, die Neben- und Oberwellenfreiheit, die Benützung von Richtantennen mit unterdrückten Nebenzipfeln und hohem Kreuzpolarisationsverhältnis über den ganzen Öffnungswinkel sowie die Störfestigkeit von Empfängern betreffen. Funknetze und auch einzelne Funkstationen werden mit einer Logik ausgerüstet, die eine flexible Steuerung und dadurch eine bessere Nutzung der Funkverbindungen ermöglicht. Ausserdem werden häufiger moderne Modulations-, Detektions- und Codierungsverfahren angewandt.

Neben der Steigerung der technischen Anforderungen ist auch eine wesentlich härtere administrative Bewilligungspraxis für neue Funkstationen zu erwarten. Bezüglich der industriellen Störungen werden die Funkverwaltungen versuchen, durch Senkung der Grenzwerte der Störstrahlung von elektrischen Geräten und Einrichtungen den Störpegel in Grenzen zu halten. Wegen der hohen Kosten einer besseren Funkentstörung und der grossen Anzahl von Störquellen wird jedoch auf diesem Gebiet nicht viel zu erreichen sein: Der Störpegel in dicht bewohnten Gebieten wird weiter ansteigen.

Dies wird sich nachteilig auf die Qualität der direkt zu empfangenden Hörrundfunk- und Fernsehprogramme auswirken, so dass immer mehr Hausempfänger an (Lichtfaser-) Kabelnetze angeschlossen werden, die nicht nur eine bessere Qualität, sondern auch eine grössere Auswahl an Programmen und weiteren Diensten (Teletext usw.) anbieten werden. Es ist dabei mit einer Rückwirkung auf die entsprechenden Rundfunksender zu rechnen, deren Anzahl und Leistungen unter Umständen reduziert werden könnten. Vor allem gilt das für die Fernsehsender, die praktisch ausschliesslich mit festen Empfängern arbeiten und mit der fortschreitenden Verkabelung ihre Existenzberechtigung langsam verlieren. Für den FM-Hörrundfunk würde das eine vorrangige Orientierung auf die beweglichen Empfänger bedeuten.

Überhaupt ist in der Zukunft mit einer starken Tendenz zu rechnen, überall dort, wo eine Kommunikation zwischen zwei festen Punkten gefordert wird und wo keine besonderen Gründe dagegensprechen, die Funkübertragung auszuschliessen. Angesichts der ungeheuren Energieverschwendung, die jede Funkverbindung darstellt¹⁾, und der höheren Prioritäten der beweglichen Dienste ist dies als der einzig mögliche Weg zur Bewältigung der zukünftigen Probleme anzusehen.

¹⁾ Um z.B. 300 000 Fernsehempfänger zu versorgen, von denen ein jeder höchstens 50 pW Signalleistung braucht (d.h. alle zusammen eine Nutzleistung von 0,000015 W), verpufft ein Gross-Sender 1000 kW Strahlungsleistung, die in einem Umkreis von Hunderten von Kilometern in einer Bandbreite von einigen MHz stört!

Die Entwicklung eines jeden Fachgebietes wird durch das Reservoir der verfügbaren Fachkräfte massgebend bestimmt. Die Funktechnik, und insbesondere die immer gewichtigere EMV-Problematik, stellen hohe Anforderungen an breite Fachkenntnisse und an ein gutes Verständnis der elektromagnetischen Theorie. Da es sich oft um komplexe interdisziplinäre Probleme handelt, ist auch eine gewisse Übersicht und Erfahrung wünschenswert. Die heutige Ausbildung der jungen Techniker, die einmal mit diesen Problemen konfrontiert werden, bevorzugt indessen eindeutig die digitale Technik, und es besteht nur wenig Interesse an analogen Problemen. Die ältere, vor dem Einzug der Digitaltechnik ausgebildete Generation ist heute bereits nur noch schwach vertreten und wird bald überhaupt nicht mehr zur Verfügung stehen. Es ist also möglich, unsere Prognose mit der logischen Schlussfolgerung abzuschliessen, dass die zukünftige Entwicklung der Funktechnik auch durch einen Mangel an Fachkräften mit entsprechender Qualifikation gekennzeichnet sein wird.

6. Grenzen der Verträglichkeit

In den vorangehenden Kapiteln wurde eine Reihe von Faktoren vorgestellt, die sich auf das Wachstum der drahtlosen Übertragung auswirken. Obwohl die negativen Faktoren zahlenmässig klar überwiegen, bleibt doch die Frage offen, ob ihr Gesamtgewicht gross genug ist, um die Entwicklung aufzuhalten. Gleichzeitig muss man sich fragen, ob es für biologische und eventuell auch elektronische Systeme nicht einen Grenzwert der maximal zumutbaren elektromagnetischen Leistungsdichte gibt, der dann auch automatisch die Grenze des Wachstums bestimmen würde.

Der Mensch und mit ihm der grösste Teil der Biosysteme hat sich optimal einer Umwelt angepasst, in der die elektromagnetische Strahlung der Sonne am Äquator eine maximale Leistungsdichte von 90 mW/cm² erreichen kann. Diese Strahlung ist so kurzweilig, dass ihre Eindringtiefe die Dicke der menschlichen Haut nicht übersteigt, die somit wie eine Art Schirmung die inneren Organe schützt.

Bei dem wesentlich langwelligeren Funkspektrum geht dieser Schirmeffekt grösstenteils verloren, der Körper wird «durchsichtig» und der Einwirkung der Strahlung ausgesetzt. Der ruhende menschliche Körper strahlt die thermische Energie der aufgenommenen Nahrung durch die Hautoberfläche mit etwa 5 mW/cm² ab. Demnach sollte der Körper bei einseitiger Bestrahlung durch Radiowellen etwa 10 mW/cm² ertragen. Dieser Wert wird auch in den meisten westlichen Ländern als die maximal zulässige Strahlungsbelastung angesehen, wobei zu vermerken ist, dass Beeinflussungen von Biosystemen auch bei weit geringeren Leistungsdichten nachweisbar sind. Dies hat offenbar die UdSSR und weitere Ostblockländer dazu veranlasst, den Grenzwert um einen Faktor 1000 niedriger auf 10 µW/cm² festzulegen. Ohne auf eine Diskussion der Begründung der beiden Werte einzutreten, sollen sie als die Grenzen betrachtet werden, zwischen denen sich die maximal zulässige Strahlungsbelastung bewegen kann. Damit lässt sich abschätzen, welche Konsequenzen ihre Anwendung für die drahtlose Nachrichtenübertragung haben würde.

Mit einigen vereinfachenden Annahmen ergibt sich im Abstand d von einer Strahlungsquelle, die in diese Richtung mit der Leistung P strahlt, eine Leistungsdichte

$$S = P/40\pi d^2 = 0,008 \cdot P/d^2 \quad [\text{mW/cm}^2, \text{W, m}].$$

Die Sicherheitsabstände d_{\min} und d'_{\min} von einem Strahler mit der Leistung P , bei denen sich die Leistungsdichten von 10 mW/cm² bzw. 10 µW/cm² ergeben, sind demnach

$$d_{\min} = K \cdot 0,028 \sqrt{P} \quad \text{bzw.} \quad d'_{\min} = K \cdot 0,894 \sqrt{P}.$$

K ist hier ein Faktor, der die Möglichkeit der Erhöhung der Strahlungsdichte durch Reflexion berücksichtigt; er kann Werte zwischen 1 (keine Reflexion) und 2 (Maximum bei einer totalen Reflexion) annehmen.

Wenn diese Formeln z.B. auf den Sender Ütliberg mit 160 kW Strahlungsleistung angewendet werden, erhält man einen minimalen Sicherheitsabstand von der Antenne von

Feldstärken von verschiedenen Sendern in Gebäuden (Aussenwand-Dämpfung von 6 dB, Maximum bei Totalreflexion)

Tabelle I

Funkdienst	Leistung	Typische Entfernung vom Empfänger	Arbeitsfrequenz	Antennengewinn dB	Feldstärke
Amateurdienst	500 W	20 m	unter 7 MHz	1	8 V/m
			7-30 MHz	2	16 V/m
			30-440 MHz	8	64 V/m
Mobildienst	Basis	250 W	30-470 MHz	1	6 V/m
	Beweglich	25 W			30 m
FS- und FM-Rundfunksender in Städten	10 kW ¹⁾	500 m	30-235 MHz	0,3 ²⁾	0,5 V/m
			235-960 MHz		

¹⁾ Leistungen von 2 bis 50 kW. 10 kW typisch.

²⁾ 20 dB Dämpfung infolge Richtwirkung der Antenne in der vertikalen Ebene bei Masthöhe von 200 m.

11 m ohne und etwa 22 m mit Reflexion. Nach der russischen Norm wären diese Werte etwa 360 bzw. 710 m. Wenn also ein Deltasegler um einen Fernsehturm seine Kreise zieht, setzt er sich bestimmten Gefahren aus, ganz abgesehen vom Risiko der möglichen thermischen Beschädigungen seines Flugapparats.

Es muss hier betont werden, dass diese Berechnungen angesichts der benutzten Näherungsformeln besonders für kleine Entfernung mit Reflexion allzu grosse Leistungsdichten ergeben. Ausserdem gelten die beiden Grenzwerte für eine länger dauernde Bestrahlung und dürfen daher kurzzeitig stark überschritten werden. Trotzdem bilden sie eine relativ scharf definierte Grenze für die Gesamtleistung und Auftrittsdichte von Strahlungsquellen in bewohnten Gebieten.

Ähnlich wie biologische Systeme weisen auch elektronische Systeme nur eine begrenzte Störfestigkeit auf, die zudem durch die technologische Entwicklung immer weiter abgesenkt wird. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Halbleiterelemente immer schneller (d.h. breitbandiger) und kleiner werden. Da bei geringen Abmessungen die Verlustwärme nur schlecht abgeleitet werden kann, müssen sie mit sehr kleinen Signalpegeln arbeiten. Die grosse Bandbreite und hohe Empfindlichkeit sowie die rasch zunehmende Benützung solcher Elemente erhöhen die Wahrscheinlichkeit einer Störung.

Die gegenwärtig genormten oder vorgesehenen Mindestwerte der Störfestigkeit liegen zwischen etwa 1 V/m und 10 V/m, wobei der letzte Wert als ein fernes Ziel anzusehen ist. Eine realistische Einschätzung der praktisch zu erwartenden Feldstärken in einem Gebäude mit 6 dB Wanddämpfung ist für verschiedene Funksender in Tabelle I zusammengestellt. Es ist ersichtlich, dass je nach Leistung und weiteren Parametern in einem bestimmten Umkreis des Senders mit Störungen der Funktion elektronischer Systeme gerechnet werden muss.

Beide Überlegungen zeigen deutlich, dass es neben den besprochenen einschränkenden Faktoren auch eine «harte» Grenze der Verbreitung elektromagnetischer Energie in unserer Umwelt gibt. Sie sondert bestimmte Gebiete um die Quellen elektromagnetischer Strahlung aus, in denen ein Daueraufenthalt von Menschen bzw. ein einwandfreies Funktionieren elektronischer Systeme nicht gewährleistet ist. Mit der wachsenden Anzahl solcher Quellen, deren Leistungsdichten sich summieren, dehnen sich solche Schutz-zonen ständig aus. Zusammen mit allen anderen Einflüssen muss dies im Endeffekt zu einer endgültigen Begrenzung der Anwendung elektromagnetischer Energie führen.

Adresse des Verfassers

Dr. T. Dvořák, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich,
Institut für Kommunikationstechnik, ETH Zentrum, 8092 Zürich.