

ELEKTROMAGNETISCHE FELDER UND MOBILFUNK



Juni 2003

**W. PIRARD,
Elektronikingenieur,
Leiter der Abteilung
Angewandte Elektronik**

INHALTSVERZEICHNIS

MESSEINHEITEN UND ABKÜRZUNGEN	3
EINLEITUNG	4
1. ZUSAMMENFASSUNG EINIGER BEGRIFFE ZUM ELEKTROMAGNETISMUS	6
2. NUTZUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN	8
3. MERKMALE VON MOBILFUNKNETZEN (TETRA, GSM 900 UND DCS 1800)	10
4. AUSWIRKUNGEN ELEKTROMAGNETISCHER FELDER	14
4.1. Thermische Effekte	14
4.2. Nichtthermische Effekte	16
5. NORMEN UND EMPFEHLUNGEN	17
6. ELEKTROMAGNETISCHE FELDER IM UMFELD VON BASISSTATIONS-ANTENNEN	23
6.1. Elektromagnetisches Feld im Hauptstrahl einer Sektorantenne	24
6.2. Elektromagnetische Felder hinter, unter und über einer Sektorantenne	27
6.3. Antennen für Mikro- und Picozellen	28
7. VERGLEICH MIT ANDEREN IMMISSIONSQUELLEN	28
7.1. Mobile GSM-Telefone	29
7.2. Schnurloses Telefon	30
7.3. Hochleistungssendeanlagen	31



Institut Scientifique de Service Public

8. EINZELNE FRAGESTELLUNGEN	32
8.1. Herzschrittmacher und andere implantierte Körperhilfen	32
8.2. Nutzungsverbot von Mobiltelefonen in Krankenhäusern	33
8.3. Erhöhung der Antennenanzahl aufgrund konkurrierender Netzbetreiber	33
8.4. Verwechslung von Frequenz und Leistung - Eindringtiefe der Wellen	33
8.5. Gebündelte Aufstellung von Antennen durch mehrere Betreiber am selben Standort	34
8.6. Sicherheitsabstände	36
8.7. Nebenkeulen einer Antennen	38
8.8. Arbeiten im Umfeld einer Mobilfunkantenne	38
8.9. Passiv reflektierende Strahlungsquellen	40
9. SCHLUSSFOLGERUNGEN	42
ANLAGEN	44
BESTIMMUNG DER STÄRKE EINES ELEKTROMAGNETISCHEN FELDES	45
A.1. MESSMETHODEN	45
A.1.1. Breitbandiges Verfahren	45
A.1.2. Frequenzselektives Verfahren	46
A.2. BERECHNUNGSVERFAHREN	48
A.2.1. Bereiche um eine elektromagnetische Emissionsquelle	48
A.2.2. In der Praxis anzuwendende Gleichungen	52
LITERATURVERZEICHNIS	53

MESSEINHEITEN UND ABKÜRZUNGEN

Bezugsgröße	Symbol	Messeinheit	Abkürzung
Elektrische Feldstärke	E	Volt pro Meter	V/m
Magnetische Feldstärke	H	Ampere pro Meter	A/m
Elektromagnetisches Feld	EMF	-	
Leistungsflussdichte	S	Watt pro Quadratmeter Milliwatt pro Quadratmeter Mikrowatt pro Quadratzentimeter	W/m ² mW/m ² μW/cm ²
Frequenz	f	Hertz Kilohertz Megahertz Gigahertz	Hz kHz MHz GHz
Wellenlänge	λ	Meter	m
Spezifische Absorptionsrate (oder „Specific Absorption Rate“)	SAR	Watt pro Kilogramm Milliwatt pro Kilogramm	W/kg mW/kg

Erläuterungen:

$$1 \text{ mW/m}^2 = 0,001 \text{ W/m}^2$$

$$1 \text{ μW/cm}^2 = 10 \text{ mW/m}^2$$

$$1 \text{ kHz} = 1000 \text{ Hz}$$

$$1 \text{ MHz} = 1.000.000 \text{ Hz}$$

$$1 \text{ GHz} = 1.000.000.000 \text{ Hz}$$

EINLEITUNG

Das wissenschaftliche Institut ISSeP (Institut Scientifique de Service Public) hatte im Jahr 2000 Messergebnisse von elektromagnetischen Feldern (EMF) veröffentlicht, die durch Mobilfunkbasisstationen erzeugt wurden ([1] et [2]). Die vorliegende Untersuchung ist im Auftrag des Amtes für natürliche Ressourcen und Umwelt (Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement (DGRNE)) des Ministeriums für das Gebiet Wallonien durchgeführt worden. Dieser Bericht enthält die wichtigsten bereits im Jahr 2000 veröffentlichten Untersuchungsergebnisse und gibt den aktuellen Stand der Vorschriften und Regelungen im Hinblick auf die Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern wieder. Ferner werden für die Leser, die mit dem Begriff Elektromagnetismus wenig verbinden können, kurze Erläuterungen zum besseren Verständnis des Themas besser gegeben. Die Leser, die sich ausschließlich für die Kernaussagen dieses Berichts mit den wichtigsten Ergebnissen interessieren, finden diese in den Abschnitten 6 bis 9.

Die zu elektromagnetischen Feldern immer wieder gestellten Fragen beziehen sich auf technische und biologische Aspekte. Ab welchen Belastungswerten kommt es zu gesundheitlichen Schädigungen und welchen Werten sind wir heute ausgesetzt? Während die erste Frage immer noch nicht endgültig beantwortet werden kann, ist es möglich, auf die zweite Frage klare und unwiderlegbare Antworten zu geben, die sozusagen „vor Ort“ überprüfbar sind, sofern die erforderlichen Kenntnisse über elektromagnetische Wellen und deren Ausbreitung vorhanden sind. Diese zweite Fragestellung steht im Mittelpunkt des vorliegenden Berichts, handelt es sich bei der Beschäftigung mit elektromagnetischen Feldern doch um die Thematik, die das wissenschaftliche Institut ISSeP direkt betrifft.

Die bisher in der Fachliteratur wiedergegebenen Meinungen und Schlussfolgerungen zu den Auswirkungen elektromagnetischer Felder auf die Gesundheit werden dennoch kurz zur Sprache gebracht (Abschnitt 4). Dieser Abschnitt dient ausschließlich der Information, da es nicht Aufgabe unseres Instituts ist, sich zu Fragen zu äußern, die nicht in seine Zuständigkeitsbereich fallen und weiterhin Gegenstand von Untersuchungen sind, bei denen auf kurze Sicht keine endgültigen Ergebnisse vorliegen werden. Dem Leser, der diesen Aspekt zu vertiefen wünscht, stehen beispielsweise im INTERNET zahlreiche Informationsquellen zur Verfügung. In diesem Zusammenhang wird insbesondere auf den Bericht der französischen Umweltgesundheitsbehörde (Agence Française de Sécurité Sanitaire Environnementale = AFSSE) [6] verwiesen, der im März 2000 veröffentlicht worden ist und einen umfassenden Überblick über die zahlreichen Studien gibt, die mit konkreten Ergebnissen abgeschlossen werden konnten.

Dieser Bericht wurde so verfasst, dass er für Personen, die mit der Materie nicht vertraut sind, verständlich ist. Aufgrund der Komplexität des Themas können aber bestimmte Passagen erhöhte Anforderungen an das Verständnis der Leser stellen, die sich zum ersten Mal mit diesen Fragen beschäftigen. In dem Bemühen, diesen



Institut Scientifique de Service Public

Bericht möglichst einfach zu halten, wurden Problemstellungen, die sehr technischer Art und für das Verständnis des Berichts nicht unbedingt erforderlich sind, in der Anlage behandelt.

Zum Schluss sei noch angemerkt, dass es Ziel dieser Veröffentlichung ist, objektiv zu informieren. Dies ist umso notwendiger, da wir oftmals feststellen konnten, dass Unwissenheit auf diesem Gebiet zu Entscheidungen und Verhaltensweisen führt, die zweifelsohne als irrational eingestuft werden können.

1. ZUSAMMENFASSUNG EINIGER BEGRIFFE ZUM ELEKTRO-MAGNETISMUS

Im Folgenden geben wir eine kurze Zusammenfassung von Begriffen zum Elektromagnetismus, die für das Verständnis dieses Berichts unverzichtbar sind. Diese Zusammenfassung richtet sich an die Leser, die über gar keine oder nur über geringe Kenntnisse auf diesem Gebiet verfügen.

Die elektrische Feldstärke (wiedergegeben durch das Formelzeichen E) ist die Kraft, die auf eine elektrische Ladung wirkt (Elektron, Ion oder geladenes Teilchen). Genauer gesagt ist die Intensität der elektrischen Feldstärke, die in V/m (Volt pro Meter) als Maßeinheit angegeben wird, die Kraft, die auf eine bestimmte Elektrizitätsmenge (gleich 1 Coulomb) wirkt.

Ein Beispiel aus dem täglichen Leben hierfür ist die Anziehungskraft eines TV-Bildschirms im eingeschalteten Zustand (oder kurz nach Ausschalten des Geräts). Das erzeugte Feld ist verantwortlich für die Bildung von Staubablagerungen an der Oberfläche des Bildschirms.

Die magnetische Feldstärke (wiedergegeben durch das Formelzeichen H) ist die Kraft, die auf eine magnetische Masse (Magnet, Gegenstand aus ferromagnetischem Material) oder auf eine elektrische Ladung in Bewegung wirkt. Genauer gesagt ist die Intensität des magnetischen Feldes, die in A/m (Ampere pro Meter) als Maßeinheit angegeben wird, die Kraft, die auf eine bestimmte magnetische Masse (gleich 1 Weber) wirkt. Das erdmagnetische Feld sowie das durch einen Magneten erzeugte Feld sind hierfür bekannte Beispiele.

Ein elektromagnetisches Feld (EMF) besteht aus einer magnetischen und einer elektrischen Komponente. Beide Komponenten sind eng miteinander verknüpft.

Die elektrischen und magnetischen Felder sind leicht zu erzeugen. Beide Felder entstehen, wenn elektrischer Strom einen Leiter durchfließt.

Es gibt Gleich- und Wechselfelder. Gleichfelder haben eine feste Richtung und eine konstante (oder annähernd konstante) Stärke im Verlauf der Zeit. Das von einem Dauermagneten erzeugte Feld oder das erdmagnetische Feld sind Beispiele für Gleichfelder. Demgegenüber variiert die Stärke eines Wechselfeldes im Verlauf der Zeit. Beispiele für Wechselfelder sind das Stromnetz oder die Rundfunkantennen.

In der Regel weisen die Feldstärkeänderungen einen periodischen Verlauf auf, wobei die Dauer der Schwingungen konstant ist. Die Frequenz ist die Anzahl der Schwingungen während einer Sekunde. Sie wird in Hertz (Hz) bzw. in einem Vielfachen von Hertz angegeben. So beträgt beispielsweise in der Abbildung 1 die Frequenz 4 Hz, da vier Schwingungen in einer Sekunde gezählt werden.

Die Frequenz der Felder, die vom Stromleitungen erzeugt werden, beträgt 50 Hz (60 Hz in den USA). Die Frequenz der Mobilfunknetze GSM 900 und DCS 1800 beträgt 900 beziehungsweise 1800 MHz.

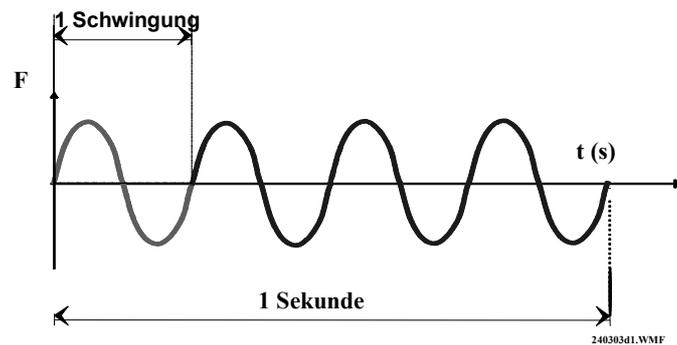


Abbildung 1: Frequenz eines Wechselfeldes

Der Begriff der Ausstrahlung ist verknüpft mit dem Begriff der Ausbreitung. Breitet sich ein Feld aus, kann man sagen, dass eine Ausstrahlung vorliegt, wobei die Ausbreitung in Form von Wellen geschieht. Dieses Phänomen ist vergleichbar mit einem Stein, der in einen Teich geworfen wird. Es entstehen Wellen, die sich vom Punkt des Auftreffens über die Wasseroberfläche ausbreiten.

Ferner ist festzuhalten, dass die Existenz eines elektrischen, magnetischen oder elektromagnetischen Feldes nicht zwangsläufig bedeutet, dass es abgestrahlt wird. Bei praktisch allen elektrischen Geräten wird ein Feld erzeugt, das aber in den meisten Fällen auf die unmittelbare Umgebung des Geräts beschränkt bleibt. Genau genommen kann von einer Ausstrahlung nur dann die Rede sein, wenn das Feld sich mit einer Stärke ausbreitet, die in einem umgekehrt proportionalen Verhältnis zur Entfernung steht.

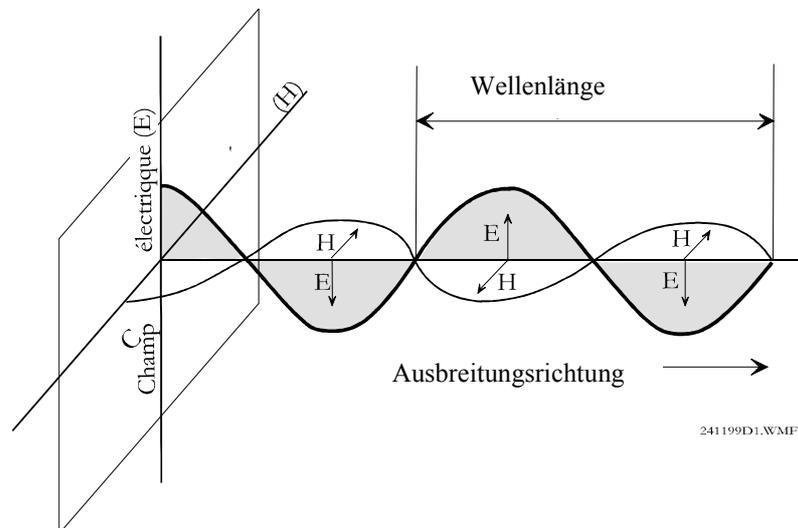


Abbildung 2: Ebene elektromagnetische Welle

In ausreichender Entfernung von der Strahlungsquelle sind die Vektoren der elektrischen und der magnetischen Feldstärke eines EMF sowohl zueinander wie auch bezogen auf ihre Ausbreitungsrichtung rechtwinklig ausgerichtet, wie dies in Abbildung 2 dargestellt ist. In einem solchen Fall spricht man von einer ebenen

Welle. Ihr besonderes Merkmal ist, dass beide Feldanteile des EMF proportional in folgendem Zusammenhang stehen:

$$\frac{E}{H} = Z \quad (1).$$

Z ist hierbei der Wellenwiderstand, der für das Medium charakteristisch ist, in dem sich die Welle ausbreitet. Er beträgt 377 Ω (Ohm) in der Luft.

Stehen die beiden Feldanteile eines EMF in einem proportionalen Verhältnis zueinander, reicht es aus, die Stärke des elektrischen Feldes anzugeben, die in V/m ausgedrückt wird. Unter den gleichen Voraussetzungen kann auch die Leistungsflussdichte S benutzt werden, die in W/m² (Watt pro Quadratmeter) angegeben wird. Das Formelzeichen S drückt die Leistung aus, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der elektromagnetischen Welle auf eine Fläche von 1 m² trifft. Die Leistungsflussdichte berechnet sich durch die Gleichung:

$$S = \frac{E^2}{377} \quad (2)$$

Um den Beitrag zu vereinfachen, wird die Stärke des EMF in V/m angegeben.

2. NUTZUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN

Seit der Entdeckung elektromagnetischer Wellen Ende des 19. Jahrhunderts werden ihre Eigenschaften zur Fernübertragung von Signalen (Töne, Bilder, Daten usw.) genutzt. Im Bereich der Telekommunikation hat sich diese Art der Nutzung besonders nach Ende des Zweiten Weltkriegs fortentwickelt. Aus der Tabelle 1 sind die wichtigsten Bereiche ersichtlich, in denen Frequenzen von unter 10 GHz genutzt werden. Diese Übersicht erhebt allerdings keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Dabei ist festzustellen, dass elektromagnetische Wellen in einigen Bereichen seit mehreren Jahrzehnten genutzt werden. Entgegen manchen Behauptungen ist die ständige Einwirkung von Feldern hochfrequenter Wellen im unteren Bereich auf Menschen, die im Umfeld von Antennen wohnen, somit kein neues Phänomen. Andererseits ist es richtig, dass die Nutzung elektromagnetischer Wellen in großem Umfang, wie dies durch das Mobiltelefon geschieht, dass seinen Nutzer relativ starken EMF aussetzt, ein erst in jüngster Zeit zu verzeichnendes Phänomen, da sich der Mobilfunk erst zu Beginn der neunziger Jahre ausgebreitet hat. Vor dieser Zeit wurden die Netze der so genannten „ersten Generation“ nur durch einen Personenkreis genutzt, der im Vergleich zur Anzahl der Nutzer von GSM-Netzen klein war.¹

¹ Das MOB 2-Netz (Vorläufer des GSM-Netzes in Belgien) zählte nur einige Zehntausend Teilnehmer.

Von der Nutzung tragbarer Sendeanlagen, insbesondere im professionellen Bereich (Streitkräfte, Polizei, Rettungsdienste usw.) ist nur eine kleine Bevölkerungsgruppe betroffen, obwohl diese Geräte bereits über mehrere Jahrzehnte genutzt werden. Vermerkt sei, dass die von diesen Berufsgruppen benutzten Geräte weit höhere Sendeleistungen aufweisen als ein Mobiltelefon im GSM-Standard.

Tabelle 1
Wichtigste Bereiche der Nutzung von Frequenzen unterhalb von 10 GHz

Verwendungsbereich	Frequenzbereich
Rundfunk (Lang- und Mittelwelle)	130 kHz bis 1,6 MHz
Rundfunk (Kurzwellen)	Mehrere Bereiche
Amateurfunk	Mehrere Bereiche
C.B.-Funk	27 MHz
Rundfunk (UKW)	88 → 108 MHz
Hilfs-/Rettungsdienste (Polizei, Feuerwehr, Krankenwagen) und private Netze (Touring Club, Fuhrparks usw.)	70 → 170 MHz
ASTRID-Netz (Polizei auf nationaler und regionaler Ebene, Rettungsdienste usw.)	400 MHz
TV-Sender	50 → 840 MHz
GSM 900	900 MHz
DCS 1800	1800 MHz
Schnurloses Telefon (CT1- und CT2-Norm)	900 MHz
Schnurloses Telefon (DECT-Norm)	1900 MHz
Mikrowellengeräte	2400 MHz
UMTS-Standard	1900 → 2300 MHz
Militärische Nutzung	Mehrere Bereiche

3. MERKMALE VON MOBILFUNKNETZEN (TETRA, GSM 900 UND DCS 1800)

Die Mobilfunknetze GSM 900 und DCS 1800² arbeiten nach dem gleichen Prinzip. Der einzige Unterschied besteht im Frequenzbereich, der für das GSM 900-Netz bei 900 MHz und für das DCS 1800-Netz bei 1800 MHz liegt. Beide Netze bieten die gleichen Funktionen. In den meisten Ländern hat jeder Betreiber eine Genehmigung für beide Frequenzbereiche, wobei das DCS 1800-Netz nur in Gebieten mit vielen Teilnehmern genutzt wird, in denen die Kapazitäten des GSM 900-Netzes bereits ausgeschöpft sind.

Anmerkung: Im Fall von BASE (ehemals KPN-ORANGE) stellt sich die Situation anders dar. Der Betrieb von BASE hat 1999 mit einem DCS 1800-Netz begonnen. Seit 2002 nutzt BASE auch den Frequenzbereich von GSM 900.

Die Netze GSM 900 und DCS 1800 sind vor allem für die Allgemeinbevölkerung bestimmt, selbst wenn diese Netze manchmal von den örtlichen Not- und Rettungsdiensten zur Kommunikation genutzt werden.

Das Mobilfunknetz ASTRID hat die Norm TETRA und arbeitet in einem Frequenzbereich von etwa 400 MHz. Es ist für Not- und Rettungsdienste bestimmt (Polizei auf nationaler und regionaler Ebene, Feuerwehr, Krankenwagen, Zivilschutz usw.).

Beim GSM 900-Netz wird der Frequenzbereich zwischen 880 und 915 MHz für die Übertragung vom Mobilteil zur Mobilfunkbasisstation genutzt, während der Frequenzbereich zwischen 925 und 960 MHz für die Übertragung in die andere Richtung dient. Die Übertragung vom Mobilteil zur Mobilfunkbasisstation wird im Allgemeinen als Aufwärtsverbindung („up-link“), die von der Mobilfunkbasisstation zum Mobilteil als Abwärtsverbindung („down-link“) bezeichnet.

Analog hierzu wird im DCS 1800-Netz für die Aufwärtsverbindungen der Frequenzbereich zwischen 1710 und 1785 MHz und für die Abwärtsverbindungen der Frequenzbereich zwischen 1805 und 1880 MHz genutzt.

Beim ASTRID-Netz wird für die Aufwärtsverbindung der Frequenzbereich zwischen 380 und 385 MHz, für die Abwärtsverbindung der Frequenzbereich zwischen 390 und 395 MHz genutzt.

Die Festlegung der Frequenzbereiche erfolgt auf internationaler Ebene. In Belgien werden die einzelnen Frequenzbereiche durch das IBPT (Institut Belge des Postes et des Télécommunications)³ zugewiesen. Die einzelnen Frequenzbereiche für den Mobilfunk sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

² DCS 1800 wird auch als GSM 1800 bezeichnet.

³ AdÜ : Belgisches Institut für Post- und Fernmeldewesen

Für eine Verbindung zwischen einem Mobilteil und einer Mobilfunkbasisstation werden zwei Kanäle benötigt, und zwar einer für die Aufwärtsverbindung und einer für die Abwärtsverbindung. Ein Kanal wird durch eine elektromagnetische Welle gebildet (als Trägerfrequenz bezeichnet). Bei dem GSM 900- und dem DCS 1800-Netz variiert die Frequenz um 0,2 MHz in der Breite über 1/8 der Zeit.

Tabelle 2
Frequenzbereiche der Netze TETRA (ASTRID), GSM 900 und DCS 1800

Normen	Verbindung	Frequenzbereich (MHz)
TETRA	Aufwärtsverbindung	380 - 385
	Abwärtsverbindung	390 - 395
GSM 900	Aufwärtsverbindung	880 - 915
	Abwärtsverbindung	925 - 960
DCS 1800	Aufwärtsverbindung	1710 - 1785
	Abwärtsverbindung	1805 - 1880

Die Funkabdeckung eines Gebiets geschieht mit Hilfe einer zellularen Netzstruktur bestehend aus sechseckigen Einzelzellen (Abbildung 3). Im Mittelpunkt dieser Netzstruktur befindet sich eine Antenne. Voraussetzung ist, dass es sich hierbei um eine Rundstrahlantenne handelt. Die sechseckige Zelle kann in weitere drei Zellen unterteilt werden, wenn die Rundstrahlantenne durch drei Antennen mit Sektorcharakteristik ersetzt wird (Abbildung 4). Theoretisch nimmt jede Zelle durch diese Unterteilung die Form einer Raute an. Mit dieser Lösung ist es möglich, die Kapazität des Netzes unter gleichzeitiger Beibehaltung der Anzahl der Antennenstandorte zu verdreifachen. Anzumerken ist, dass die in der Abbildung 3 dargestellte sechseckige Netzstruktur nur rein theoretischer Art ist. Wie die Zellen tatsächlich aussehen, hängt letztlich von der Reichweite der einzelnen Antennen in den verschiedenen Richtungen ab, wofür mehrere Faktor ausschlaggebend sind.

Auch der Durchmesser der einzelnen Zellen kann sehr unterschiedlich sein (wie in Abbildung 3 dargestellt). Zu den beiden Parametern, welche die Größe einer Zelle bestimmen gehören:

- die Ausbreitungsbedingungen für die elektromagnetischen Wellen. Elektromagnetische Wellen breiten sich relativ gut aus, wenn die Erdoberfläche eben ist und keine Hindernisse aufweist. So kann die Reichweite einer Antenne im GSM 900-Netz theoretisch 10 km erreichen, wenn die Wellen bei ihrer Ausbreitung auf kein Hindernis stoßen (flaches Gelände und Betrieb des Mobilteils außerhalb von Gebäuden). Demgegenüber kommt es in bebauten oder bewaldeten Gebieten (aufgrund der Vegetation) oder in hügeligem Gelände zu einer erheblichen Dämpfung des Signals.
- die Anzahl der Teilnehmer in einem Gebiet. Die Zahl gleichzeitig geführter Gespräche, die von einer Antenne übertragen werden können, hängt von der Anzahl der Frequenzen ab, in der eine Antenne senden kann. Beispielsweise ist

es möglich, gleichzeitig 47 Gespräche zu übertragen, wenn die Antenne in 6 Frequenzen senden kann.

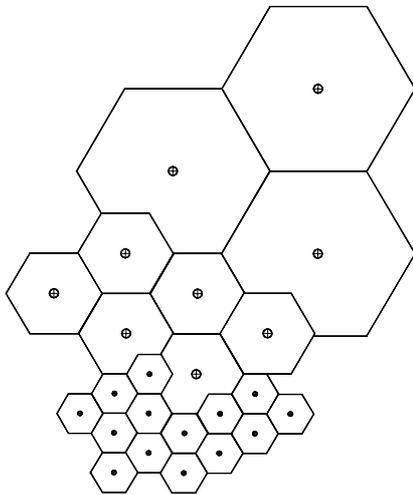


Abbildung 3 : zellulare Netzstruktur

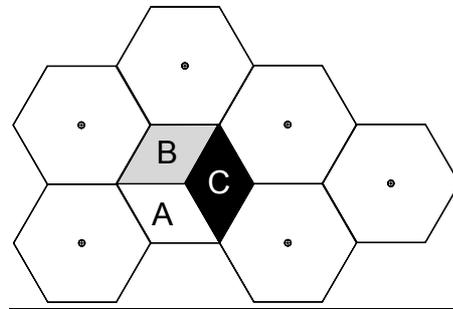


Abbildung 4 : Aufstellplatz von drei Antennen mit Sektorcharakteristik

Der Bereich, den Zellen im GSM 900-Netz und im DCS 1800-Netz abdecken können, schwankt zwischen einigen Hundert Metern in bebauten Gebieten und mehreren Kilometern in dünn besiedelten Regionen. Dieser Bereich wird mit Hilfe von Antennen für Makrozellen abgedeckt. Daneben gibt es Antennen für Mikrozellen und für Picozellen. Antennen für Mikrozellen decken kleine Bereiche ab (einige Dutzend bis einige Hundert Meter), in denen sich eine große Anzahl von Teilnehmern aufhalten kann (Einkaufszentren, Fußgängerbereiche, Bahnhöfe usw.) Antennen für Picozellen sind für die Netzabdeckung innerhalb großer Gebäude (Bürokomplexe, Hotels usw.) bestimmt, in die EMF schwerer eindringen.

Antennen mit Sektorcharakteristik werden für Makrozellen am häufigsten verwendet. Sie haben die Form eines vertikalen Quaders (siehe Aufnahme auf der nächsten Seite) und werden auch als Sektorantennen bezeichnet. Für das GSM 900-Netz beträgt ihre Höhe im Allgemeinen zwischen 1,50 Meter und 3 Meter. Selten sind diese Antennen breiter als 30 Zentimeter und tiefer als 15 Zentimeter.

Die Leistungen derartiger Sektorantennen (unter dem Gesichtspunkt des vertikalen und horizontalen Öffnungswinkels und des Antennengewinns) sind abhängig von ihren Abmessungen und von der jeweiligen Frequenz. Eine Antenne für das DCS 1800-Netz ist halb so groß wie eine Anlage für das GSM 900-Netz bei gleichen Leistungsmerkmalen. Dagegen sind die Antennen für den Betrieb des ASTRID-Netzes praktisch doppelt so groß.



Ansicht eines Mastes mit sechs Sektorantennen

Im ASTRID-Netz sind die Makrozellen größer als im GSM 900-Netz und im DCS 1800-Netz, weil es weniger Nutzer gibt. Der Abdeckungsbereich schwankt zwischen 10 und 20 km.

Obwohl es bei der Netzabdeckung noch einige Funklöcher gibt, rechtfertigt die zunehmende Sättigung bestehender Antennenstandorte zu bestimmten Tageszeiten die Aufstellung weiterer Antennenanlagen, betrachtet man den derzeitigen Stand beim Ausbau des Mobilfunknetzes in Belgien.

4. AUSWIRKUNGEN ELEKTROMAGNETISCHER FELDER

Die Auswirkungen elektromagnetischer Felder werden gewöhnlich in zwei Kategorien unterteilt, und zwar in

- thermische Effekte, die zu einem Anstieg der Körpertemperatur führen, wozu ein relativ starkes elektromagnetisches Feld erforderlich ist;
- nichtthermische Effekte, die sich nach Meinung einiger Wissenschaftler bereits bei elektromagnetischen Feldern einstellen, die wesentlich schwächer sind als die Felder, die eine Erwärmung bewirken.

Der thermische Effekt ist zwar seit vielen Jahren bekannt, zu den nichtthermischen Effekten aber gibt es in wissenschaftlichen Kreisen bei weitem keine einheitliche Meinung.

4.1. Thermischer Effekt

Die Erwärmung von Gewebe unter dem Einfluss elektromagnetischer Felder (insbesondere bei mehr als einigen Hundert kHz) ist seit langem bekannt und wird bei Mikrowellengeräten und bei bestimmten medizinischen Anwendungen genutzt. Das Prinzip, das dieser Wirkung zugrunde liegt, ist in Abbildung 5 dargestellt. Maßgebend für die Wirkung ist der hohe Anteil an Wasser in den meisten Gewebeteilen des menschlichen Körpers. Da das Wassermolekül eine polare Struktur aufweist (das Sauerstoffatom bildet den negativen Pol, die zwei Wasserstoffatome die beiden positiven Pole), hängt die Ausrichtung des Wassermoleküls von dem elektrischen Feld ab, dem es ausgesetzt ist. Beträgt das Kraftfeld null, ist die Ausrichtung der Wassermoleküle ungeordnet. Ist umgekehrt ein Kraftfeld vorhanden, ist die Ausrichtung aller Wassermoleküle gleich. Bei einem Wechselfeld ändert sich ständig die Richtung. Die Ausrichtung der Wassermoleküle folgt jeweils der Richtung des elektrischen Feldes. Hierdurch kommt es zur Reibung zwischen den einzelnen Wassermolekülen, wodurch wiederum ein Anstieg der Temperatur bewirkt wird.

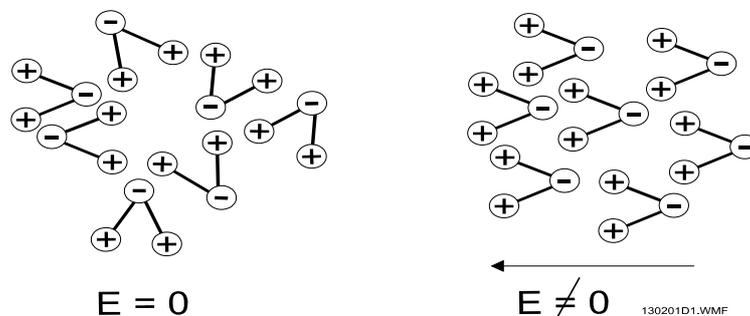


Abbildung 5 : Prinzip des thermischen Effekts

Ist ein lebender Organismus einem elektromagnetischen Feld ausgesetzt, kommt es nur bei relativ starken Kraftfeldern zu einem Anstieg der Temperatur. Der Grund

hierfür ist, dass die Wärmezufuhr bis zu einem gewissen Punkt durch die Wärmeregulation des Körpers (Blutzirkulation) ausgeglichen wird. Versuche zeigen (siehe insbesondere [4]), dass bei einer Totalexposition eines Menschen (d. h. vom Kopf bis zu den Füßen) eine Leistung von 4 W/kg absorbiert werden muss, damit die Temperatur um 1°C ansteigt. Um den Temperaturanstieg zu stabilisieren, muss die Expositionsdauer lang genug sein. Man geht davon aus, dass dies in der Praxis nach 6 Minuten der Fall ist. Angemerkt sei, dass es sich hierbei um einen mittleren Wert bei Personen in gutem Gesundheitszustand handelt, die einer exakt festgelegten Umgebungstemperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftzirkulation ausgesetzt werden.⁴

Das Verhältnis (absorbierte Leistung/Masse) wird in W/kg ausgedrückt und als „spezifische Absorptionsrate“ bezeichnet, die häufig auch durch die Abkürzung SAR⁵ wiedergegeben wird. Diese Größe spielt bei Normen und Empfehlungen, die auf dem thermischen Effekt beruhen, eine ausschlaggebende Rolle.

Anmerkung: Mit einem einfachen Beispiel lässt sich der Begriff der „spezifischen Absorptionsraten“ (SAR) verdeutlichen. Nehmen wir an, dass eine Person 60 kg wiegt und ihr gesamter Körper einem elektromagnetischen Feld ausgesetzt ist. Das oben erwähnte Versuchsergebnis bedeutet, dass diese Person eine Leistung von 240 W (60 kg x 4 W/kg) absorbieren muss, damit ihre Körpertemperatur um 1°C ansteigt. (In diesem Beispiel gehen wir von der Annahme aus, dass der Körper die Leistung überall gleich absorbiert, was in der Praxis nicht der Fall ist.) Analog hierzu müsste eine Person, die nur 30 kg wiegt, 120 W absorbieren.

Erwähnt sei auch, dass die Wärmeregulation des Körpers (und damit die Fähigkeit des Körpers, eine Wärmezufuhr auszugleichen) in ihrer Wirksamkeit eingeschränkt sein kann. Dies trifft insbesondere auf erkrankte Personen und Frauen während der Schwangerschaft zu. Die natürliche Wärmeregulation des Körpers kann auch durch die Einnahme bestimmter Medikamente sowie durch äußere Bedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftzirkulation usw.) beeinflusst werden. Hieraus ergibt sich, dass die spezifische Absorptionsrate von 4 W/kg (bezogen auf einen Temperaturanstieg um 1°C) nur einen durchschnittlichen Wert darstellt. Schwankungen um diesen Durchschnittswert werden jedoch bei den einschlägigen Normen weitestgehend berücksichtigt, wie die Ausführungen in Kapitel 5 zeigen.

Ohne die Schlussfolgerungen am Ende des Beitrag vorwegnehmen zu wollen, ist eindeutig feststellbar, dass die Stärke der von den Mobilfunkantennen erzeugten elektromagnetischen Felder nicht ausreicht, um einen Temperaturanstieg über die festgesetzten Normen hinaus zu bewirken, es sei denn, man befindet sich in unmittelbarer Nähe einer Antenne mit mittlerer oder großer Leistung.

⁴ Das komplette Versuchsergebnis (siehe Literaturverzeichnis [4]) stellt sich wie folgt dar: eine Person im Ruhezustand und bei guter Gesundheit, die leichte Kleidung trägt und sich in einer Umgebungstemperatur zwischen 20 und 22° C bei einer relativer Luftfeuchtigkeit von 50 % mit angemessener Luftzirkulation aufhält, ist in der Lage eine Leistung von 4 W/kg zu absorbieren, ohne dass ihre durchschnittliche Körpertemperatur um mehr als 1°C ansteigt.

⁵ SAR ist die Abkürzung für den englischen Ausdruck « Specific Absorption Rate ».

4.2. Nichtthermische Effekte

Die nichtthermische Effekte elektromagnetischer Felder werden seit vielen Jahren untersucht. Die entsprechenden Versuche lassen sich in drei Kategorien unterteilen, und zwar in

- Versuche mit Freiwilligen, in deren Rahmen insbesondere der Einfluss elektromagnetischer Felder auf die Reaktionszeit, den Schlaf und auf das Profil elektrischer Gehirnströme (Elektroenzephalogramm) untersucht wird. Aufgrund praktischer Umstände ist die Dauer dieser Versuche begrenzt. Eventuelle Auswirkungen einer permanenten Belastung können nicht untersucht werden;
- epidemiologische Untersuchungen bei Personen mit Aufenthalt im Bereich elektromagnetischer Felder. Es handelt sich hierbei vornehmlich um Personen, die im näheren Umfeld leistungsstarker Sendeanlagen (Rundfunk- und TV-Sender) leben, oder um Personen, die im Rahmen ihrer beruflichen Tätigkeit elektromagnetischen Feldern ausgesetzt sind (Rundfunktechniker, Polizei, Streitkräfte, Bedienpersonal von Radaranlagen usw.). Eine Schwachstelle dieser Studien ist die ungenaue Angabe der tatsächlichen Stärke und Dauer der Exposition dieses Personenkreises gegenüber elektromagnetischen Feldern. Diese Angaben werden oft schätzungsweise im Nachhinein auf Grundlage wenig verlässlicher Daten ermittelt. Daneben kann nicht ausgeschlossen werden, dass bestimmte Ergebnisse aufgrund falsch angesetzter Faktoren ein verzerrtes Bild hervorrufen können (zum Beispiel das Vorhandensein einer anderen Immissionsquelle);
- Versuche an Tieren oder Zellkulturen. In diesem Fall sind Schlussfolgerungen auf den Menschen nicht immer einfach, insbesondere aufgrund der unterschiedlichen Größe der Lebewesen, des unterschiedlichen Zellaufbaus und des unterschiedlichen Immunsystems. Darüber hinaus werden in Anbetracht der begrenzten Lebensdauer von Tieren im Labor einige Versuche mit einer weitaus höheren Belastung durchgeführt, als ein Mensch im Normalfall zu ertragen hätte. Ziel der höheren Belastung ist es, das Auftreten bestimmter Phänomene zu beschleunigen. Auch werden bei diesen Versuchen eindeutig die Grenzwerte, wo bereits thermische Effekte auftreten, überschritten, so dass nicht mehr ausschließlich von nichtthermischen Effekten die Rede sein kann.

Nach Meinung einiger Wissenschaftler beruhen nichtthermische Effekte auf einer direkten Wechselwirkung mit dem Gewebe und wirken sich unter anderem auf das Nervensystem aus. Angeführt werden oft subjektiv empfundene Symptome wie Konzentrationsschwierigkeiten, Reizbarkeit, Schlafstörungen, Müdigkeit usw.. Tierversuche sowie epidemiologische Untersuchungen an Bedienpersonal von Radaranlagen haben Auswirkungen auf das Auge gezeigt (Degeneration der Netzhaut, der Hornhaut und der Iris). Mehrere Forscher verweisen auch auf Auswirkungen auf die Fortpflanzungsfähigkeit, das Herz-Kreislaufsystem, das Immun- und Hormonsystem sowie auf die Erbsubstanz (DNS). In manchen Studien wird darauf verwiesen, dass eine Reihe von Auswirkungen sich bereits bei einer

wesentlich geringeren Exposition einstellt als bei einer Belastung, die zu einer signifikanten Erwärmung führt.

Es muss jedoch gesagt werden, dass die Untersuchungen, die sich mit den nicht-thermischen Effekten beschäftigen, zu abweichenden, nicht reproduzierbaren oder statistisch nicht signifikanten Ergebnissen führen. Des Weiteren muss zwischen biologischen und nachteiligen gesundheitlichen Auswirkungen unterschieden werden. Nach Ansicht verschiedener internationaler Gremien, die sich mit diesen Thema beschäftigen, sind biologische Auswirkungen dadurch gekennzeichnet, dass sie zu physiologischen oder biochemischen Veränderungen oder Verhaltensänderungen in einem Organismus, einem Gewebe oder einer Zelle als Reaktion auf einen äußeren Reiz führen. Eine biologische Auswirkung bedeutet aber nicht unbedingt eine Gefährdung der Gesundheit. Sie kann einfach nur die normale Reaktion der Zelle, des Gewebes oder des Organismus auf diesen äußeren Reiz sein. Zu nachteiligen gesundheitlichen Auswirkungen werden biologische Auswirkungen erst, wenn sie die normale Funktionsweise eines Organismus gefährden. Diese Unterscheidung ist wichtig und kann leicht nachvollzogen werden. Das Hören eines Tons ist ein biologischer Vorgang, der auf einem komplexen Ablauf grundlegender biologischer Effekte beruht, wozu u. a. mechanische, biochemische und elektrische Effekte zählen. Demgegenüber ist der Verlust der Hörschärfe aufgrund einer langen Belastung mit starkem Lärm eine schwerwiegende nachteilige gesundheitliche Auswirkung.

Wie zu Beginn des Abschnitts bereits erwähnt, sind nichtthermische Effekte ein äußerst kontrovers diskutiertes Thema. Manche Wissenschaftler, die sich auf das Vorsorgeprinzip berufen, plädieren für die Einführung restriktiverer Normen zur Begrenzung der Exposition. Auf der anderen Seite versichern offizielle Einrichtungen und Organisationen wie das ICNIRP oder die Weltgesundheitsorganisation (WHO), dass es in Anbetracht der vorliegenden Befunde aus Untersuchungen keine abgesicherten wissenschaftlichen Erkenntnisse gibt, die eine Herabsetzung der Grenzwerte derzeit rechtfertigen.

5. NORMEN UND EMPFEHLUNGEN

Obwohl es keine internationalen Normen für die Begrenzung der Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern gibt, sind dennoch Empfehlungen ausgesprochen worden, die jedoch gesetzlich nicht verbindlich sind. Dennoch haben mehrere Staaten in letzter Zeit entsprechende Gesetze erlassen.

Die meisten internationalen Empfehlungen, die den thermischen Effekt zugrunde legen, stützen sich auf die Arbeiten des ICNIRP⁶ ab, dessen letzte Richtlinie aus dem Jahr 1998 ([4]) stammt. Was hochfrequente Felder betrifft, geht die Richtlinie des ICNIRP von dem in Abschnitt 4 dargelegten Ansatz aus, laut dem durchschnittlich 4 W/kg erforderlich sind, um einen Temperaturanstieg von 1°C zu bewirken. Das

⁶ International Committee for Non Ionising Radiation Protection.

ICNIRP legt für die Allgemeinbevölkerung einen Grenzwert von 0,08 W/kg (durchschnittlicher Wert für den gesamten Körper innerhalb einer Zeitspanne von bis zu 6 Minuten) fest (Gesamtexposition). Dieser Grenzwert ist somit um das 50fache niedriger als die spezifische Absorptionsrate (SAR), die einem Temperaturanstieg um 1°C entsprechen würde.

Obschon die spezifische Absorptionsrate (SAR) die gängigste Größe darstellt, um die Menge der effektiv absorbierten Strahlendosis anzugeben, kann ihre Messung vorgenommen werden, wenn man in den Körper eindringt. An einem lebenden Organismus dies somit nicht möglich. Dennoch besteht zwischen der spezifischen Absorptionsrate (SAR) und der Intensität des elektromagnetischen Feldes ein Zusammenhang, der durch den Wert der elektrischen Feldstärke (in V/m) ausgedrückt wird, der leichter messbar ist. Angemerkt sei noch, dass das Verhältnis zwischen spezifischer Absorptionsrate (SAR) und der Intensität des elektromagnetischen Feldes von der jeweiligen Frequenz abhängig ist. Beispielsweise entspricht eine spezifische Absorptionsrate von 0,08 W/kg in den Frequenzbereichen von 400, 900 und 1800 MHz einer elektrischen Feldstärke von jeweils 28, 41,2 und 58 V/m.⁷

Aus der Tabelle 3 sind die wichtigsten Normen oder Empfehlungen zu entnehmen, die im Fall einer kompletten und ständigen Exposition maßgebend sind. Nach der ICNIRP-Richtlinie sowie nach den sich aus ihr abgeleiteten Normen liegt dann eine ständige Exposition vor, wenn ihre Dauer 6 Minuten überschreitet. Hinzuzufügen ist, dass bei einer teilweisen Exposition auch höhere Werte zulässig sind. Als Grenzwert für den Kopfbereich werden 2 W/kg angesetzt (bei Mobiltelefonen).

Die ICNIRP-Richtlinie wurde als wissenschaftliche Grundlage für die Festlegung nationaler Normen in mehreren Ländern herangezogen (u. a. Deutschland, Frankreich, Spanien, Portugal, Niederlande usw.). Sie war ferner Grundlage für die Empfehlungen des Rats der Europäischen Union (1999) und wird auch von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) befürwortet.

⁷ Mit den o. a. Feldstärken (28, 41,2 et 58 V/m) wird gewährleistet, dass die spezifische Absorptionsrate von 0,08 W/kg nicht überschritten wird. Hierbei wurde ein gewisser Sicherheitsspielraum berücksichtigt.

Bei anderen Feldstärken kann die spezifische Absorptionsrate über folgende Formel ermittelt werden:

$$SAR = 0,08 \times \left(\frac{E}{E_{ref}} \right)^2$$

in der E_{ref} gleich 28 zwischen 10 und 400 MHz, 41,2 bei 900 MHz und 58 bei 1800 MHz ist.

Tabelle 3
Normen oder Empfehlungen für die Allgemeinbevölkerung
(bei kompletter und ständiger Exposition)

Normen oder Empfehlungen	SAR (W/kg)	Elek. Feldstärke (V/m)	Elek. Feldstärke (V/m)
	Grenzwert insgesamt		Je Anlage oder Antenne
ICNIRP, WHO, Rat der EU. (1999) ⁸ , DE, FR (2002), NL, SP (2001), PO (2001), Schweiz (1999)	0,08	* 28 - 10 bei 400 MHz * 41,2 bei 900 MHz * 58 bei 1800 MHz	-
Belgien (Verordnung vom 29.04.01 und 21.12.01) 10 MHz → 10 GHz	0,02	* 13,7 - 10 bei 400 MHz * 20,6 bei 900 MHz * 29 bei 1800 MHz	3,1 bei 10 - 400 MHz, 4,6 bei 900 MHz 6,5 bei 1800 MHz (SAR = 1 mW/kg)
Italien, Russland (1978)		6	
Luxemburg (2000)			3 pro Mobilfunkantenne
Wallonien (Juli 2000 → Mai 2001)		3 für Mobilfunkantennen	
Paris Stadt (März 2003)		2 (Mittel über 24 Std.) für Mobilfunkantennen.	
Bezirk Salzburg (Österreich, 1999)		0,6	

* Grenzwerte für Felder ausschließlich eines Frequenzbereiches

Vermerkt sei, dass in der ICNIRP-Richtlinie (sowie bei den aus ihr abgeleiteten Normen) die in V/m angegebenen Grenzwerte nur für eine Exposition innerhalb eines Frequenzbereiches gelten. So beträgt beispielsweise der Grenzwert für den Bereich von 900 MHz nur dann 41,2 V/m, wenn es keinen weiteren Feldanteil einer anderen Frequenz gibt, was immer seltener vorkommt, da wir in zunehmendem Maß Feldern unterschiedlicher Immissionsquellen gleichzeitig ausgesetzt sind.

Anmerkung: So wäre es beispielsweise falsch zu behaupten, dass bei einer gleichzeitigen Exposition mit Feldern im 900 und 1800 MHz-Bereich die ICNIRP-Richtlinie eingehalten wird, selbst wenn die Feldstärken bei 900 et 1800 MHz den Grenzwert von 41,2 V/m bzw. 58 V/m nicht überschreiten.

⁸ Gleiche Grenzwerte wurden im Entwurf einer europäischen Richtlinie (Entwurf ENV 50166) festgelegt, die in den Jahren 1994 bis 1999 gültig war.

Bei einer Exposition mit einem so genannten „zusammengesetzten Feld“ müssen die spezifischen Absorptionsraten (SAR) der einzelnen Felder an den Punkten kumuliert werden, wo sie einen signifikanten Wert aufweisen. So soll sichergestellt werden, dass bei der GesamtabSORPTIONSRATE der Grenzwert von 0,08 W/kg eingehalten wird. Eine solche Überprüfung kann im Fall einer Exposition mit mehreren Antennen schwierig sein, und zwar vor allem dann, wenn alle Antennen nicht ständig in Betrieb sind (Messproblem) oder wenn der zu kontrollierende Bereich großflächig ist.

Die Schweiz hat im Jahr 1999 eine Verordnung⁹ erlassen, die sich hinsichtlich des Gesamtwerts auf die ICNIRP-Richtlinie abstützt, jedoch für die verschiedenen Arten der Sendeanlagen einzelne Anlagegrenzwerte festlegt (beim Mobilfunk wird eine Anlage als die Gesamtheit aller Antennen an einem Standort, z. B. auf einem Gebäude definiert). Der Grenzwert für diese Anlage liegt bei 4 V/m, wenn sie ausschließlich im Frequenzbereich GSM 900 arbeitet, bei 6 V/m, wenn sie ausschließlich im Frequenzbereich GSM 1800 arbeitet, und bei 5 V/m, wenn es sich um eine Anlage handelt, die in beiden Frequenzbereichen arbeitet. Bei Sendeanlagen für Rundfunk und TV oder für die übrigen Funkanwendungen beträgt der Anlagegrenzwert 3 V/m. Hervorzuheben ist, dass es sich bei diesem Werte um einen Anlagegrenzwerte handelt. Die tatsächliche Exposition ist höher, wenn sich Felder überlappen, die von Anlagen mit unterschiedlicher Nutzung abgestrahlt werden.

Anmerkung: Die Festschreibung eines Wertes zur Begrenzung der Immissionen einer Quelle, die für sich allein betrachtet wird, erleichtert Kontrollmaßnahmen durch die zuständige Behörde. Demgegenüber lässt sich die Einhaltung eines Gesamtwerts bei einer Exposition mit verschiedenen Immissionsquellen unterschiedlicher Betreiber schwieriger überprüfen, da es bei einem Überschreiten des Grenzwertes sehr schwierig, ja sogar unmöglich ist, den Verursacher zu ermitteln.

Obwohl internationale Institutionen wie das ICNIRP oder die Weltgesundheitsorganisation (WHO) versichern, dass es in Anbetracht der Ergebnisse bereits durchgeführter Studien zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine wissenschaftlich abgesicherte Grundlage gibt, die eine Herabsetzung der Immissionsgrenzwerte rechtfertigt, haben einige Länder nach dem Vorsorgeprinzip gehandelt und strengere Normen festgesetzt.

Die belgische Regierung hat auf nationaler Ebene in den Verordnungen vom 29.04.2001 und vom 21.12.2001 Immissionsgrenzwerte für den Frequenzbereich von 10 MHz bis 10 GHz erlassen. Im Vergleich zur ICNIRP-Richtlinie werden die Grenzwerte in der belgischen Norm um den Faktor 4 herabgesetzt. Als Grenzwert der spezifischen GesamtabSORPTIONSRATE (SAR insgesamt) werden 0,02 W/kg für Bereiche festgelegt, die der Allgemeinbevölkerung zugänglich sind. Dies entspricht den in der Tabelle 4 (2. Spalte) angegebenen Feldstärken, wobei f die in MHz ausgedrückte jeweilige Frequenz ist. Wie bei der ICNIRP sind diese Grenzwerte nur dann anwendbar, wenn eine Exposition mit einem Frequenzbereich vorliegt. Bei den so genannten „zusammengesetzten Feldern“ , d. h. bei mehreren verschiedenen

⁹ Ordonnance sur la Protection contre le Rayonnement Non Ionisant/Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung

Frequenzanteilen, muss durch Summation der einzelnen Anteile ermittelt werden, ob der Gesamtwert von 0,02 W/kg nicht überschritten wird.

Die Verordnung vom 21.12.2001 gestattet es dem Betreiber, von diesen Werten dennoch abzuweichen, wenn durch jede einzelne Antenne innerhalb des Bereichs für die Allgemeinbevölkerung eine spezifische Absorptionsrate gegeben ist, die 1 mW/kg nicht überschreitet (d. h. ein Zwanzigstel der spezifischen GesamtabSORptionsrate). Ferner ist es möglich, die spezifische Absorptionsrate unter 1 mW/kg zu halten, wenn die Stärke des elektromagnetischen Felds unterhalb der Grenzwerte gemäß Tabelle 4 (3. Spalte) liegt. So entspricht beispielsweise die spezifische Absorptionsrate von 1 mW/kg bei 10 bis 400 MHz einer Feldstärke von 3,1 V/m, bei 900 MHz einer Feldstärke von 4,6 V/m und bei 1800 MHz einer Feldstärke von 6,5 V/m.

Tabelle 4
Belgische Norm - Grenzwerte
zur Einhaltung einer SAR unter 20 mW/kg und 1 mW/kg
(f : Frequenz in MHz)

Frequenzbereiche	Feldstärke für eine SAR ≤ 20 mW/kg (E in V/m)	Feldstärke für eine SAR ≤ 1 mW/kg (E in V/m)
10 MHz bis 400 MHz	13,7	3,1
400 MHz bis 2 GHz	0,686 √f	0,153 √f
2 GHz bis 10 GHz	30,7	6,9

Nach der russischen Norm gilt für Frequenzen zwischen 300 MHz und 300 GHz ein Grenzwert von 6 V/m. Der gleiche Grenzwert wurde auch von Italien festgelegt, wenn auch dort je nach Region manchmal strengere Grenzwerte gelten.

Im Großherzogtum Luxemburg gilt nach einer Vorschrift aus dem Jahr 2000 für Mobilfunkantennen eine maximale Feldstärke von 3 V/m pro Antenne.

Des Weiteren wurden von manchen Wissenschaftlern oder Vereinigungen Empfehlungen herausgegeben. So haben in Belgien Prof. VANDER VORST und Dr STOCKBROECKX (Katholische Universität von Leuven) sowie Prof. GERIN (Polytechnische Universität Mons) 1999 vorgeschlagen, die elektrische Feldstärke auf 3 V/m zu begrenzen. Die Autoren (siehe [3] Seite 53) rechtfertigen ihre Entscheidung damit, dass in der einschlägigen Literatur für derartige Immissionswerte keine oder nur geringe Auswirkungen beschrieben werden. Eine im Gebiet von Wallonien zwischen Juli 2000 und Mai 2001 geltende Verordnung orientierte sich an dieser Empfehlung. Inzwischen wurde dieser Verordnung durch die allgemein in Belgien geltende Norm ersetzt.

Obwohl von Frankreich im Jahr 2002 gleiche Grenzwerte wie die in der ICNIRP-Richtlinie festgesetzt worden sind, hat die Stadt Paris sich mit den Betreibern von Mobilfunknetzen im Rahmen eines Verhaltenskodex darauf verständigt, die Feldstärke auf 2 V/m umgerechnet auf den 900 MHz-Bereich¹⁰ für die Allgemeinbevölkerung als Durchschnittswert über 24 Stunden zu begrenzen. Dieser Durchschnittswert errechnet sich, indem man die theoretisch größtmögliche Feldstärke, die bei maximaler Anlagenauslastung erzeugt wird, mit dem Faktor 0,432 multipliziert. Mit diesem Faktor können auch Schwankungen der abgestrahlten Energie berücksichtigt werden, die von der Anzahl der Gesprächsverbindungen im jeweiligen Abdeckungsbereich der Antenne abhängt. Die mit dem Verhaltenskodex von der Stadt Paris getroffenen Vereinbarungen betreffen ausschließlich Mobilfunkantennen.

Nach unserem Kenntnisstand gibt es die strengste Regelung im Bezirk Salzburg, wo der Grenzwert auf 0,6 V/m festgesetzt worden ist. Dieser Grenzwert beruht auf einer Empfehlung verschiedener Wissenschaftler, von denen die bekanntesten Dr. Neil CHERRY, Leiter der Forschungsabteilung Klimatologie an der University of Christchurch (Neuseeland) und Dr. Roger SANTINI vom „Institut National des Sciences Appliquées“ in Lyon (Laboratorium für Biochemie/Pharmakologie) sind. Sie plädieren für eine Begrenzung der Exposition auf 0,6 V/m (als durchschnittlichen Jahreswert).

Abschließend sei zu diesem Punkt angemerkt, dass der Vergleich zwischen den festgelegten Grenzwerten sich nicht auf die reinen Zahlen in der Tabelle 3 beschränken darf, sondern dass auch das jeweilige Verfahren zur Messung oder zur Berechnung der Feldstärken berücksichtigt werden muss. In Belgien muss beispielsweise der Betreiber bei der Antragstellung zur Errichtung einer Antennenanlage in bewohnten Gebieten die entsprechenden technischen Daten der Anlage mitteilen, damit überprüft werden kann, ob die Grenzwerte eingehalten werden.¹¹ Diese Überprüfung kann selbstverständlich nur durch Berechnung mit Hilfe mathematischer Modelle vorgenommen werden. (Da die Anlage noch nicht aufgebaut ist, kann es keine Messung geben.) Zu diesem Zeitpunkt ist es aber aus praktischen Gründen kaum möglich, eine Absorption der Strahlung durch Hindernisse in Form von Mauern und Dächern zu berücksichtigen. Die Dämpfung hängt in der Tat von vielen Parametern ab (Frequenz, Art der Baumaterialien, Dicke der Mauern, Einfallswinkel der Welle usw.). Wenn in der Norm von Standardwerten für die Dämpfung ausgegangen wird, sind diese Werte oft zu niedrig. Dies hat zur Folge, dass die tatsächlichen Feldstärken im Inneren der Gebäude unter den errechneten Werten liegen, wodurch sicherlich dem Aspekt der Sicherheit Rechnung getragen wird. Fazit dieser Überlegungen ist, dass zwei Normen mit demselben Grenzwert (angegeben in V/m) oft zu einer recht unterschiedlichen tatsächlichen Exposition führen können. Grund hierfür ist die Beachtung bestimmter Regeln je nach den anzuwendenden Berechnungs- oder Messverfahren.

¹⁰ Für den 1800 MHz-Bereich wird die Feldstärke im Verhältnis 41/58 multipliziert, um den entsprechenden Wert bezogen auf den 900 MHz-Bereich zu erhalten.

¹¹ Diese Angaben sind Bestandteil einer durch das IBPT erstellten Unterlage mit der Bezeichnung « Dossier technique d'antenne » (Technische Beschreibung der Antenne).

6. ELEKTROMAGNETISCHE FELDER IM UMFELD VON BASISSTATIONSANTENNEN

Das ISSeP misst insbesondere im Auftrag der für den Mobilfunk zuständigen Behörden regelmäßig die Felder in der näheren Umgebung der Antennen. Die im Folgenden beschriebenen Ergebnisse¹² haben repräsentativen Charakter und entsprechen der typischen Aufstellweise (Anbringung der Anlagen an Masten, auf Wassertürmen, auf Dächern oder an Gebäudefassaden). Um alle Zweifel hinsichtlich der zum Zeitpunkt der Messung abgestrahlten Leistung auszuräumen, werden die Kontrollen stets ohne Kenntnis des Betreibers durchgeführt, es sei denn, er hat diese Messungen in Auftrag gegeben.

Wichtig ist der Hinweis, dass die abgestrahlte Leistung jeder einzelnen GSM-Antenne von der Zahl der in der entsprechenden Zelle geführten Gesprächsverbindungen abhängt. Die Zahl der Verbindungen ist in den Nebenzeiten relativ gering und tendiert in der Nacht gegen null. Zur Information sei vermerkt, dass bei einer Antenne, die 6 Frequenzen mit je 10 W Sendeleistung abstrahlt, die Gesamtleistung je nach Zahl der Gesprächsverbindungen zwischen 10 und 60 W schwanken kann.¹³ Eine Frequenz wird aber ständig abgestrahlt, selbst wenn es keine Gesprächsverbindungen gibt. Sie wird insbesondere zur Übertragung eines Kontrollkanals genutzt.¹⁴

Die anderen Frequenzen¹⁵ werden nur abgestrahlt, wenn die Zahl der gleichzeitig geführten Gesprächsverbindungen zunimmt. Die Ergebnisse oder Schlussfolgerungen, die im Folgenden vorgestellt werden, beziehen sich immer auf den Fall, dass eine Antennenanlage bei höchster betrieblicher Auslastung arbeitet (was in unserem Beispiel einer Gesamtleistung von 60 W entsprechen würde). So ist zwangsläufig der durchschnittliche Wert der Exposition über einen Zeitraum von 24 Stunden geringer. Die Entsprechenden Ergebnisse lassen sich auf andere

¹² Die meisten Ergebnisse sind bereits in den Werken [1] und [2] veröffentlicht worden.

¹³ Der Vollständigkeit halber wird darauf verwiesen, dass die Basisstation die von ihr zum mobilen Telefon abgestrahlte Leistung an die Ausbreitungsbedingungen der Wellen anpasst. Sind gute Bedingungen für die Verbindung vorhanden, wird nur eine geringe Leistung abgestrahlt. Umgekehrt gilt, dass bei schlechten Bedingungen die Maximalleistung abgegeben wird. Die von der Basisstationsantenne abgestrahlte Leistung wird somit während jedes Zeitschlitzes („time slot“) angepasst. Einen ähnlichen Anpassungsmechanismus gibt es auch beim Mobilteil. (siehe Ziffer 7.1)

¹⁴ Ein GSM-Netz (oder DCS 1800-Netz) benutzt je Funkzelle einen Kontrollkanal, der BCCH-Kanal ("Broadcast Control Channel") genannt wird. Es handelt sich dabei um einen Zeitschlitz einer Frequenz zur ständigen Übertragung bestimmter Informationen. Zu diesen Informationen gehören insbesondere der Kennungskode des Betreibers und die Nummer der Funkzelle, wodurch in den Mobilteilen der jeweilige Standort bestimmt werden kann. Mit dem BCCH-Kanal werden auch die Nummern der Mobilteile übertragen, die das Netz für Gesprächsverbindungen nutzen.

¹⁵ Eine Basisstationsantenne strahlt in der Regel im GSM 900-Netz 2 bis 6 Frequenzen ab. Eine Abstrahlung von mehr als 6 Frequenzen in diesem Bereich bereitet technische Probleme. Wenn es aufgrund der Kapazitätsnachfrage erforderlich sein sollte, nutzen die Betreiber die Frequenzen im GSM 900-Bereich und im DCS 1800-Bereich gemeinsam („Dual Band-Betrieb“).

Sendeleistungen extrapolieren, da die Feldstärke sich proportional zur Quadratwurzel der abgestrahlten Leistung verhält.¹⁶

Zunächst gehen wir auf Antennen mit so genannter Sektorcharakteristik ein. Es handelt sich dabei um ein Modell, das zur Abdeckung von Makrozellen am häufigsten genutzt wird. (Antennen mit Rundstrahlcharakteristik werden kaum noch genutzt; eine Ausnahme bildet das ASTRID-Netz).

Unter Abschnitt 6.3 werden Antennen für Mikro- und Picozellen behandelt.

6.1. Elektromagnetisches Feld im Hauptstrahl einer Sektorantenne

Feldstärken von mehr als einigen V/m werden nur im Hauptstrahl der Antenne angetroffen (Abbildung 6 zeigt den vertikalen Schnitt eines Strahls). In der Praxis konzentriert sich die Hauptstrahlung im Allgemeinen innerhalb eines Winkels von 6 bis 10°. Anzumerken ist, dass es auch Antennen gibt, die einen größeren vertikalen Öffnungswinkel haben. Sie sind aber immer seltener anzutreffen. In der horizontalen Ebene deckt der Strahl einer Sektorantenne je nach Bauart einen Bereich im Winkel von 120 bis 180° ab.

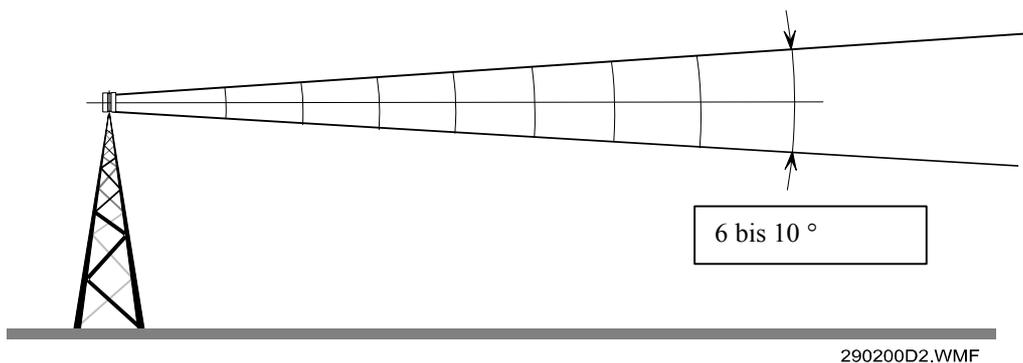


Abbildung 6 : Vertikaler Schnitt eines Antennenstrahls

Der Information halber ist in der Abbildung 7 die Intensität eines elektromagnetischen Feldes dargestellt, das im näheren Umfeld eines Wasserturms gemessen wurde, auf dem drei Antennen in 24 Meter Höhe installiert sind, die jeweils einen Sektor von 120° abdecken. Der Verlauf der Kurve gibt das elektromagnetische Feld in 3 Meter Höhe über dem Boden in einer geradlinigen Achse über eine Entfernung von 550 Meter wieder, wobei der Ausgangspunkt (Abszisse 0 Meter) sich am Fuß des Wasserturms befindet. Die Messstrecke verläuft in der Mitte des Sektors von 120° (d. h. dort, wo das elektromagnetische Feld am stärksten ist). Es besteht direkte Sichtverbindung zu den Antennen. Der Verlauf der Kurve in der Abbildung 7 gibt die kumulierte Feldstärke wieder, wenn alle drei Antennen bei höchster betrieblicher Auslastung arbeiten. Im vorliegenden Fall sind es 8 W pro Antenne.

¹⁶ Dies bedeutet, dass man die Leistung mit dem Faktor 4 multiplizieren muss, um die Feldstärke zu verdoppeln.

Abbildung 7 zeigt, dass das Feld am Fuß des Wasserturms sehr schwach ist und mit zunehmender Entfernung stärker wird. Der größte Wert beträgt etwa 0,4 bis 0,6 V/m und wird in einer Entfernung von 120 bis 280 Meter erreicht. Die aufgezeichneten Werte sind insgesamt sehr schwach verglichen mit den Grenzwerten der Tabelle 3. Sie liegen selbst unterhalb der strengsten Normen oder erreichen gerade einmal deren Grenzwert. Vermerkt sei auch, dass der Bereich mit einer Feldstärke von mehr als 0,4 V/m nur wenige Punkte umfasst und dass dadurch die durchschnittliche Exposition, der eine Person an diesen Punkten ausgesetzt wäre, eindeutig niedriger ist als die Spitzenwerte, die nur punktuell auftreten.

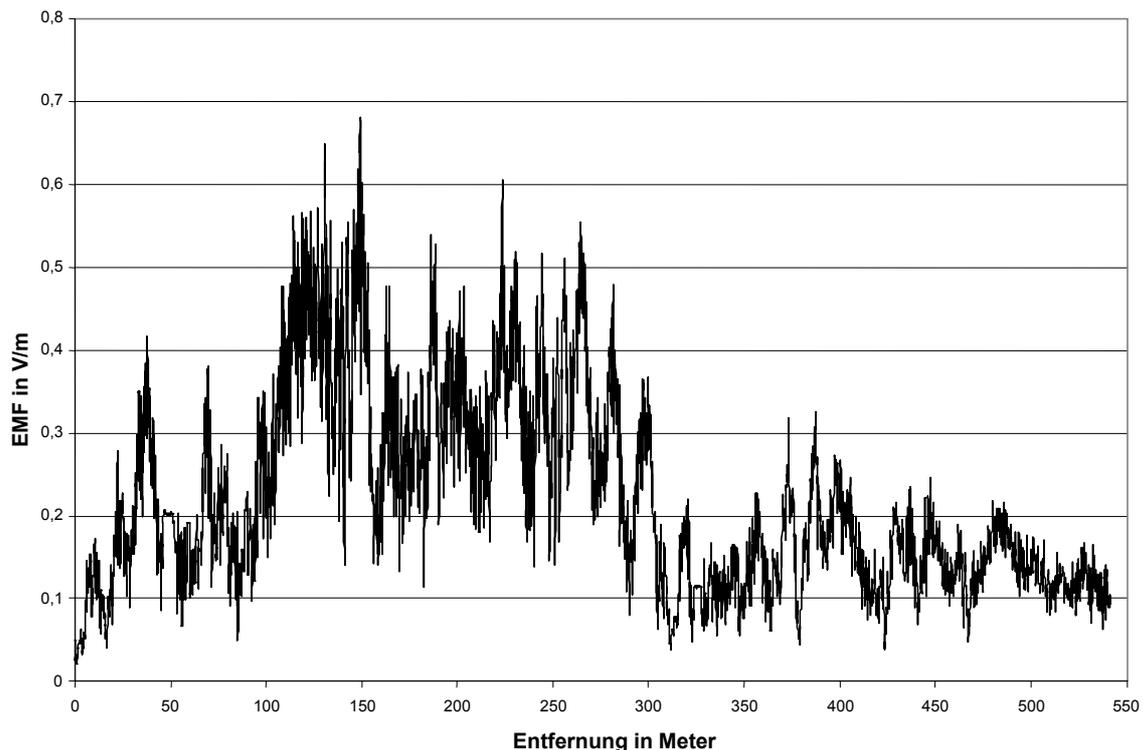


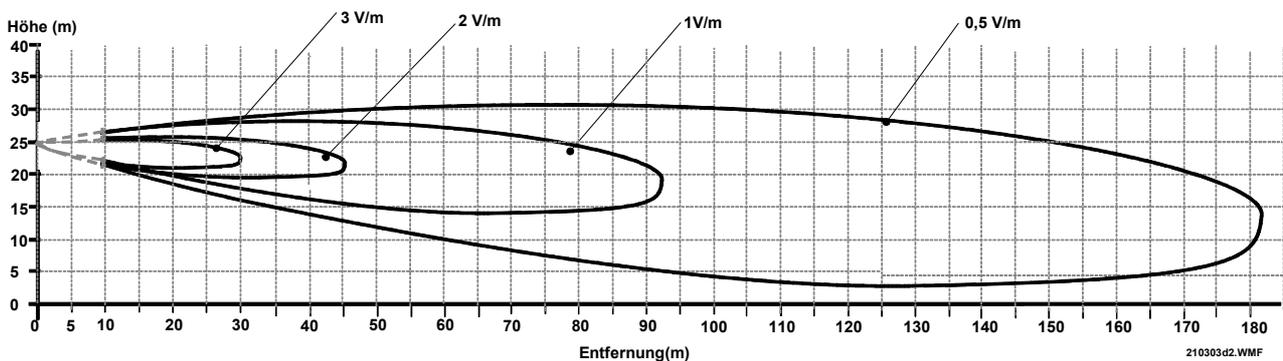
Abbildung 7: Aufzeichnung der Feldstärke (in V/m) in einer Höhe von 3 Meter über dem Boden auf einer Strecke von 550 Meter (Betreiber Nr. 1)

Das in der Abbildung 7 dargestellte Ergebnis lässt sich leicht erklären, betrachtet man die genauen Eigenschaften des Antennenstrahls und insbesondere sein Strahlungsdiagramm. Abbildung 8 zeigt die unterschiedlichen Feldstärken in vertikaler Ebene und die Richtung, in der die Strahlung am stärksten ist. Der Verlauf der Kurven in dieser Abbildung wurde durch Berechnung unter Berücksichtigung der Eigenschaften der entsprechenden Antenne ermittelt (Gesamtleistung 8 W, Antennengewinn 35¹⁷, Neigung des Strahls um 4° bezogen auf die horizontale Ebene). Dargestellt sind vier Kurven (bezeichnet als Isolinien), die den Feldstärken von 3, 2, 1, und 0,5 V/m entsprechen. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die Feldstärke in einer Entfernung von mehr als 30 Meter und in einer Höhe von weniger als 21 Meter unterhalb des Werts von 3 V/m liegt. In gleicher Weise errechnet sich

¹⁷ Der Antennengewinn beträgt 15,5 dBi.

eine Stärke von 0,5 V/m etwa 2 Meter über dem Boden. Aus diesem Beispiel wird klar, welche Bedeutung der Höhe der Antenne, der Form des Antennenstrahls und seiner Neigung zukommt. Auf die Bedeutung dieser verschiedenen Parameter kommen wir noch einmal in unseren Schlussfolgerungen zurück.

Angemerkt sei jedoch, dass die Berechnungen im Bereich von einigen Metern unmittelbar vor der Antenne nicht sehr zuverlässig sind. Dieser Bereich ist in der Abbildung 8 durch gestrichelte Isolinien kenntlich gemacht. Diesem besonderen Aspekt wird durch spezielle Messungen Rechnung getragen. Hierauf wird in Abschnitt 7.2 näher eingegangen.



**Abbildung 8 : Isolinien für 3, 2, 1 und 0,5 V/m
(Gesamtleistung = 8 W - Antennengewinn = 35 – Neigungswinkel des Antennenstrahls = 4°)**

Hinzuzufügen ist, dass die Mauern im Inneren von Gebäuden zu einer erheblichen Dämpfung der Strahlung führen (die Stärke des Feldes verringert sich um das 2,5 bis 5fache oder sogar noch um einen größeren Faktor je nach Mauerbeschaffenheit und Frequenz¹⁸). Folglich sind elektromagnetische Felder in den unteren Etagen von Gebäuden wesentlich schwächer als die der Abbildung 7 zu entnehmenden Werte.

Abbildung 9 gibt das Messergebnis eines Feldes wieder, das von drei Antennen eines zweiten Betreibers erzeugt wird, die auf demselben Wasserturm aufgestellt sind. Die Messstrecke ist dieselbe wie in Abbildung 7. Der Höchstwert, der von diesen drei Antennen erzeugt wird, liegt bei 0,2 V/m. Festzustellen ist, dass die Spitzenwerte der elektromagnetischen Felder, die von den beiden Betreibern erzeugt werden, nicht an denselben Punkten liegen. Erklärbar ist dies dadurch, dass der Antennenstrahl des ersten Betreibers leicht geneigt, der Antennenstrahl des zweiten Betreibers jedoch in horizontaler Ebene ausgerichtet ist.

¹⁸ Die Leistungsflussdichte (proportional zum Quadrat der Feldstärke) wird um den Faktor 6,25 bis 25 verringert.

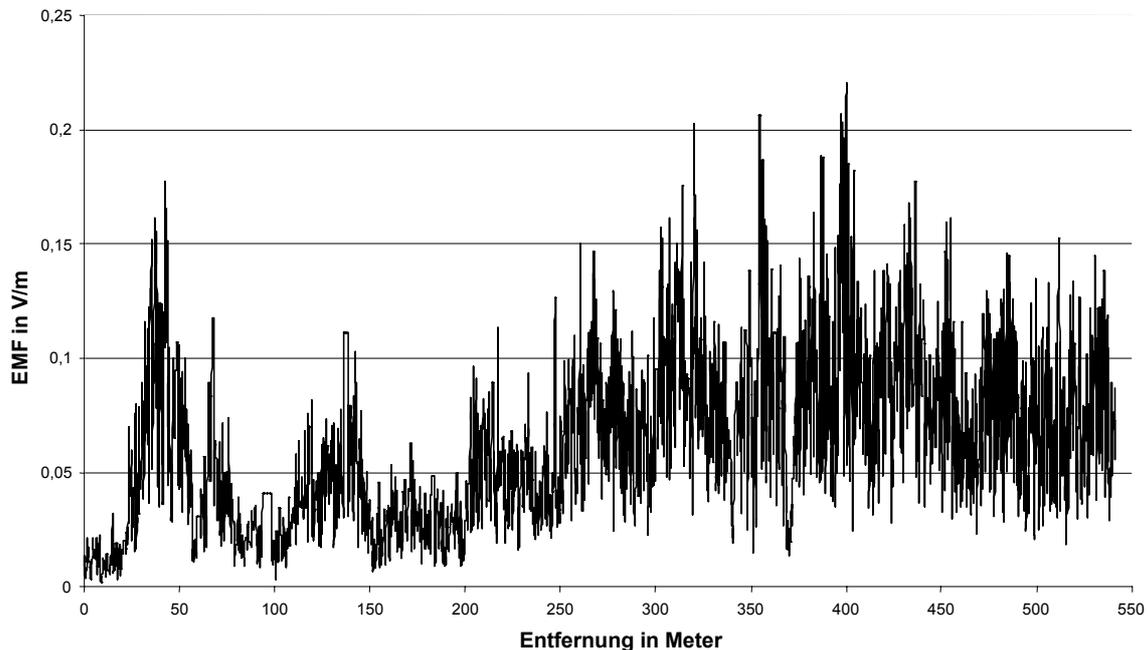


Abbildung 9 : Aufzeichnung der Feldstärke (in V/m) in einer Höhe von 3 Meter über dem Boden auf einer Strecke von 550 Meter (Betreiber Nr. 2)

Anmerkung: Die in den Abbildungen 7 und 9 wiedergegebenen Messungen wurden im Herbst 1999 durchgeführt. Seit dieser Zeit hat die Zahl der Nutzer mobiler Telefone erheblich zugenommen. Es ist daher mit großer Wahrscheinlichkeit davon ausgehen, dass die Feldstärken, die heute gemessen werden, größer sind. Eine Verdoppelung der Leistung (realistische Hypothese) würde bedeuten, dass die Stärke des elektromagnetischen Feldes um 41 % zugenommen hat¹⁹.

6.2. Elektromagnetische Felder hinter, unter und über einer Sektorantenne

Die Feldstärke, die in einer Entfernung von 2 Meter hinter einer Antenne gemessen wird, beträgt fast immer weniger als 3 V/m oder ist sogar noch weitaus geringer. Unterhalb und oberhalb der Antenne ist die Feldstärke in einer Entfernung von 4 bis 5 Meter ebenfalls geringer als 3 V/m, selbst wenn kein Hindernis zwischen Antenne und Messpunkt vorhanden ist. Dies liegt daran, dass die Strahlung außerhalb des Bereichs der Hauptstrahlung gering ist.

Befindet sich eine Antenne auf dem Dach eines Gebäudes, weisen die in den darunter liegenden Etagen gemessenen Feldstärken minimale Werte auf. Die Werte können sogar als unbedeutend betrachtet werden, wenn das Dach aus einer Platte aus Stahlbeton besteht. Diese Erkenntnis ist im Rahmen zahlreicher Messungen bestätigt worden, die das ISSEP an vergleichbaren Orten durchgeführt hat. So zeigten beispielsweise Messungen in der letzten Etage eines Gebäudes mit 18 Antennen auf dem Dach, dass die maximale Feldstärke stets unter 0,1 V/m lag, selbst wenn alle 18 Antennen bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung

¹⁹ Die Feldstärke ist proportional zur Quadratwurzel des EMF und $\sqrt{2} = 1,41$.

arbeiteten. Zum Vergleich hierzu ist eine Feldstärke von 0,1 V/m der Wert, den diese Antennen in einer Entfernung von 3 km von ihrem Standort in der Achse der Hauptstrahlung erzeugen.²⁰ Dies beruht auf der Sektorcharakteristik der Antennen und auf dem Schutz, den ein Dach aus Stahlbeton gewährt.

Sind Antennen an der Fassade eines Gebäudes befestigt, bewirkt das Mauerwerk eine starke Dämpfung der Feldstärke und sorgt für einen effizienten Schutz. Trotzdem ist darauf zu achten, dass die Hauptstrahlung nicht auf Fenster oder auf Balkone gerichtet ist, die sich in zu geringer Entfernung von den Antennen befinden.

6.3. Antennen für Mikro- und Picozellen

Antennen für Mikrozellen strahlen eine relativ schwache Leistung ab (im Allgemeinen weniger als 1 oder 2 W) und haben einen geringen Antennengewinn. Oft bestehen sie nur aus einem einfachen Halbwellendipol an der Fassade eines Gebäudes. Da diese Antennen nur einen begrenzten Bereich abdecken sollen, befinden sie sich meistens in einer Höhe von nur wenigen Metern. Da ihre Richtwirkung darüber hinaus wenig ausgeprägt ist (im Gegensatz zu den Sektorantennen), können diese Antennen eine Feldstärke in Bodennähe erzeugen, welche die Werte der Sektorantennen bei weitem übersteigt, die dennoch eine größere Leistung abstrahlen. Dieses Ergebnis, das zunächst paradox erscheinen mag, erklärt sich aber dadurch, dass die Antennen für Mikrozellen in geringer Höhe angebracht sind und nur über eine geringe Richtwirkung verfügen.

Antennen für Picozellen strahlen eine Leistung von einigen Hundert Milliwatt ab und haben einen schwachen Antennengewinn. Sie werden verwendet, um das Innere großer Gebäude abzudecken (oft sind hierfür mehrere Antennen dieses Typs erforderlich). Sie befinden sich an der Decke oder an den Wänden (manche Modelle sehen aus wie Rauchmelder). Diese Antennen haben eine Strahlung, die vergleichbar ist mit der eines mobilen GSM-Telefons (das Modell mit 2 W strahlt maximal eine mittlere Leistung von 250 mW ab). Die Exposition einer Person, die sich im Umfeld einer solchen Antenne aufhält, hängt demnach von der Entfernung zwischen Person und Antenne ab. So kann beispielsweise die Feldstärke bei einer Antenne, die 200 mW Leistung abgibt, in einer Entfernung von 5 Meter 0,5 V/m erreichen, wenn es kein Hindernis gibt.

7. VERGLEICH MIT ANDEREN IMMISSIONSQUELLEN

In diesem Abschnitt beschäftigen wir uns mit der Stärke elektromagnetischer Felder, die auf andere Immissionsquellen zurückzuführen sind. Es werden Angaben für Vergleichszwecke gemacht, mit denen der Leser die Immissionssituation, wie sie im Umfeld von Mobilfunkbasisstationen angetroffen wird, in ein bestimmtes Größenverhältnis rücken kann.

²⁰ Bei der Berechnung wurde die Gesamtleistung der Anlage zugrunde gelegt.

7.1 Mobiles GSM-Telefon

Das am weitesten verbreitete Modell dieses Mobiltelefons kann eine Spitzenleistung abgeben, die je nach den Bedingungen für die Wellenausbreitung zwischen 20 mW und 2 W schwankt.²¹ Bei einem Mobiltelefon, das nur während des Achtels der Zeit sendet²², schwankt die durchschnittliche Leistung demnach zwischen 2,5 mW und 250 mW.

Berechnungen, die durch Messungen bestätigt worden sind, zeigen, dass im Kopfbereich des Nutzers eines Mobiltelefons sich ein Feld aufbaut, dessen durchschnittliche effektive Stärke (RMS²³) sich zwischen folgenden Werten bewegt:

- 5 bis 10 V/m, wenn die Spitzenleistung 20 mW beträgt;
- 50 bis 100 V/m, wenn die Spitzenleistung 2 W beträgt.

Der genaue Wert hängt jedoch vom Abstand zwischen Kopf und Mobiltelefon sowie von den Eigenschaften der eingebauten Antenne ab.

Durch einfache Berechnung²⁴ lässt sich ermitteln, dass ein GSM-Mobiltelefon bei einer täglichen Nutzung über 15 Sekunden mit einer Spitzenleistung von 2 W im Durchschnitt die gleiche spezifische Absorptionsrate (SAR) erzeugt, wie sie bei einer

²¹ Das GSM-Mobiltelefon passt automatisch seine Leistung an den Minimalwert an, der erforderlich ist, um eine gute Qualität der Gesprächsverbindung zu gewährleisten. So beschränkt sich die Spitzenleistung eines GSM-Mobiltelefons in der Nähe einer Basisstationsantenne auf den unteren Bereich zwischen 20 mW – 2 W. Umgekehrt gibt ein Mobiltelefon eine Spitzenleistung von 2 W ab, wenn es sich in sehr großer Entfernung zu einer Basisstationsantenne befindet oder die Bedingungen für die Gesprächsverbindung schlecht sind (im Untergeschoss eines Gebäudes oder im Inneren eines Wagens ohne Außenantenne, wobei der Wagen in diesem Fall wie ein Faradayscher Käfig wirkt).

²² Das Mobiltelefon sendet während eines Zeitschlitzes von 577 µs alle 4,615 ms.

²³ Die Abkürzung RMS (Root Mean Square) entspricht dem Effektivwert der Feldstärke.

²⁴ Der Effektivwert (RMS) einer durchschnittlichen Feldstärke von 50 V/m eines mobilen GSM-Telefon während 15 Sekunden Gesprächsdauer am Tag erzeugt im Durchschnitt über den Zeitraum von 24 Stunden eine spezifische Absorptionsrate (SAR), die sich mit folgender Formel berechnet:

$$SAR_{\text{Durchschnitt}} = 0,08 \times (50/41,2)^2 \times \frac{15}{24 \times 3600} = 2 \times 10^{-5} \text{ W/kg}$$

Eine ständige Exposition mit 0,6 V/m erzeugt eine spezifische Absorptionsrate (SAR), die sich mit folgender Formel berechnet:

$$SAR_{\text{Durchschnitt}} = 0,08 \times (0,6/41,2)^2 = 1,7 \times 10^{-5} \text{ W/kg}$$

Wenn wir es auch in den beiden Fällen mit zwei vergleichbaren spezifischen Absorptionsraten zu tun haben, so bedeutet dies nicht, dass eventuelle biologische (oder gesundheitliche) Auswirkungen dieselben sind, da es sich in dem einen Fall um eine starke, aber kurzzeitige Exposition, im anderen Fall um eine schwache, aber ständige Exposition handelt.

ständigen Exposition mit einer Feldstärke von 0,6 V/m zustande kommt. Dieser Wert muss den Messergebnissen in Abschnitt 6 gegenübergestellt werden.

Vermerkt sei aber auch, dass ein GSM-Mobiltelefon, das eine Feldstärke von mehr als 41,2 V/m erzeugt, entgegen dem Anschein durchaus den Grenzwerten laut ICNIRP-Richtlinie entspricht. Nach dieser Richtlinie handelt es sich hier um eine partielle Exposition (im vorliegenden Fall um den Kopf). Als zu berücksichtigender Grenzwert gilt eine spezifische Absorptionsrate (SAR) von 2 W/kg (siehe Abschnitt 5) und nicht eine Feldstärke von 41,2 V/m, die herangezogen werden müsste, wenn es sich um eine Totalexposition handeln würde.

Obwohl ein mobiles GSM-Telefon im Bereich des Kopfes eine Feldstärke erzeugt, die mit dem Grenzwert in der ICNIRP-Richtlinie vergleichbar ist (41,2 V/m bei 900 MHz bei totaler und ständiger Exposition), erstaunt das Verhalten mancher Staaten, denn einerseits empfehlen sie, das Mobiltelefon nur in Maßen zu benutzen, weil Unsicherheit im Zusammenhang mit dieser neuen Technologie besteht, die es zur Beurteilung eventueller Langzeitauswirkungen noch nicht lange genug gibt. Andererseits übernehmen sie die ICNIRP-Richtlinie zur Festlegung der Immissionsgrenzwerte, was soviel bedeutet, dass die im Umfeld einer Antenne gleich welchen Typs wohnende Bevölkerung 24 Stunden lang einer Feldstärke von 41,2 V/m (bei 900 MHz) ausgesetzt werden kann. Der derartige Position ist nicht logisch, da ein Mobiltelefon nicht ständig benutzt wird (darüber hinaus geht der Nutzer dabei wissentlich ein eventuelles Risiko ein), wohingegen es sich bei einer Antenne um eine ständige Exposition mit elektromagnetischen Feldern handelt und den Anwohnern oft nichts anderes übrig bleibt, als diese Belastung hinzunehmen.

Angemerkt sei allerdings, dass diese Überlegungen rein prinzipieller Art sind, da es wahrscheinlich kaum Bereiche für die Allgemeinbevölkerung gibt, die ständig einer Belastung in Höhe der Grenzwerte laut ICNIRP-Richtlinie ausgesetzt sind.

7.2. Schnurloses Telefon

Beim schnurlosen Telefon handelt es sich um ein Gerät, das aus einer Basisstation, die mit dem Netzanschluss verbunden ist, und einem Mobilteil, das im Allgemeinen in einem Radius von 100 bis 300 Meter genutzt werden kann, besteht. Die meisten Modelle entsprechen den Normen CT2 und DECT. Sie arbeiten in den Frequenzbereichen von etwa 900 bzw. 1900 MHz. Da zwischen einer Gesprächsverbindung von einem schnurlosen Telefon aus und einer Verbindung von einem Telefon mit Schnur preislich kein Unterschied besteht, muss davon ausgegangen werden, dass ein solches Gerät oftmals genauso lange genutzt wird wie ein Gerät mit Schnur.

Ein schnurloses Telefon gibt eine durchschnittliche Leistung von 10 mW mit gepulster Frequenz ab, die einem mobilen GSM-Telefon sehr ähnlich ist. Die gleichen Berechnungen wie bei dem mobilen GSM-Telefon ergeben, dass im Bereich des Kopfes durchschnittlich eine effektive Feldstärke (RMS) vorhanden ist, die sich zwischen 10 und 20 V/m bewegt.

7.3. Hochleistungssendeanlagen

Zahlreiche Rundfunk- und TV-Sender, militärische Sendeanlagen und Radaranlagen (für zivile und militärische Zwecke), die in manchen Fällen bereits seit Jahrzehnten existieren, strahlen Leistungen ab, welche die der Antennen der Mobilfunknetze um ein Wesentliches übersteigen.

Konkret ausgedrückt, gibt eine Basisstationsantenne im GSM-Netz eine äquivalente isotrope Strahlungsleistung ab (gleich dem Produkt aus Antenneneingangsleistung und Antennengewinn in Hauptsenderichtung, das durch die Abkürzung „EIRP“ wiedergegeben wird), die zwischen 300 W für die schwächsten Anlagen und 3500 W für die stärksten Anlagen schwankt. Die am häufigsten anzutreffenden Strahlungsleistungen sind niedriger als 1000 W.

So geben manche Privatsender (im gängigen Sprachgebrauch „freie Rundfunksender“ genannt) eine äquivalente isotrope Strahlungsleistung (EIRP) zwischen mehreren Hundert und mehreren Tausend Watt im Frequenzbereich von 88 bis 108 MHz ab. Anlagen staatlicher Sender strahlen noch höhere Leistungen ab. Obwohl die Antennen dieser Sendeanlagen sich oft auf sehr hohen Masten befinden, haben sie eine geringere Richtwirkung (in vertikaler Ebene) und die Feldstärken, die sie am Boden erzeugen, können über denen der meisten Basisstationsantennen des GSM-Netzes liegen.

Erwähnt sei, dass in Belgien wie auch in allen anderen Ländern mehrere TV-Sender eine äquivalente isotrope Strahlungsleistung (EIRP) abgeben, die zwischen 500 und 1000 kW und in einem zwei- bis dreistelligen MHz-Frequenzbereich liegt. Jeder dieser Sender strahlt eine Leistung ab, die dem Wert von 500 bis 1000 Basisstationsantennen im GSM-Netz entspricht. Die Stärke der elektromagnetischen Felder am Boden bleibt dabei relativ schwach (aufgrund der Höhe der Sendemasten), übersteigt aber dennoch die Werte, die im näheren Umfeld von Basisstationsantennen des Mobilfunknetzes angetroffen werden.

Der Eiffelturm ist sicherlich ein erwähnenswerter Fall, obwohl er hinlänglich bekannt ist. Nach dem Bericht der AFSSE [6] beträgt die Leistung aller TV- und Rundfunksender im UKW-Band auf dem Eiffelturm etwa 300 kW. Unter Berücksichtigung der üblichen Eigenschaften der dort verwendeten Antennentypen müsste die äquivalente isotrope Strahlungsleistung (EIRP) zirka 5000 kW betragen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Sendeanlagen auf dem Eiffelturm eine Leistung abstrahlen, die dem Wert von 5000 Basisstationsantennen mit durchschnittlicher Kapazität im Mobilfunknetz entspricht.

Tatsache ist, dass die Basisstationsantennen des Mobilfunknetzes mehr Befürchtungen in der Allgemeinbevölkerung auslösen als die Rundfunk- und TV-Antennen, von denen einige seit mehr als vierzig Jahren existieren. Ein solcher Unterschied in der Verhaltensweise kann zweifelsohne als irrational eingestuft werden. Der oft angeführte Unterschied bei den Frequenzen ist kein stichhaltiges Argument. In der Tat liegt der Frequenzbereich, der am besten vom menschlichen

Körper absorbiert wird, zwischen 10 und 400 MHz. Oberhalb von 400 MHz dringt die Strahlung nicht so tief in das Gewebe ein. Ein Großteil der Energie wird durch das Oberflächengewebe (Haut, Fett, Schädeldecke) absorbiert. Im Übrigen werden deshalb die Grenzwerte im Bereich von 10 bis 400 MHz (siehe Tabelle 3) strenger gehandhabt. Bei einer gleichen Leistungsflussdichte werden die inneren Organe (Gehirn, Herz, Leber usw.) bei 900 MHz weniger bestrahlt als beispielsweise bei 100 MHz. Erinnern wir uns in diesem Zusammenhang daran (siehe Tabelle 1), dass der obere Bereich des Frequenzspektrums, der den TV-Sendern zugewiesen ist (840 MHz), in der Nähe des Frequenzbereiches des GSM 900-Netzes liegt.

Ein anderes oft angeführtes Argument betrifft die gepulste Form der Wellen, die von den Basisstationen der Mobilfunknetze ausgehen, wobei die Amplitude dieser Signale mit sehr niedriger Frequenz moduliert wird (0,16 - 4,2 - 216,7 und 1733,1 Hz). Es handelt sich hier zunächst um eine Hypothese, die nach unserem Kenntnisstand noch nicht bestätigt worden ist. Damit biologische Gewebe auf Modulationen im unteren Frequenzbereich anspricht, muss es ein nicht lineares Verhalten aufweisen, was bei den im Mobilfunk verwendeten Frequenzen nicht der Fall zu sein scheint (siehe [6], Seite 16). Des Weiteren muss darauf hingewiesen werden, dass das von einem TV-Sender abgestrahlte Feld aufgrund der Halbbild-, Vertikal- und Horizontalsynchronisierungsimpulse, deren Periodizität jeweils 25, 50 und 15.625 Hz beträgt, auch als gepulst zu betrachten ist.

Als Schlussfolgerung ergibt sich hieraus, dass es nach heutigem Kenntnisstand mit keinem wissenschaftlich abgesicherten Argument gerechtfertigt werden kann, die von einer Basisstationsantenne abgestrahlten Wellen anderes zu betrachten als die von den Antennen der Rundfunk- oder TV-Sender abgegebenen Wellen.

8. EINZELNE FRAGESTELLUNGEN

Im Folgenden wollen wir einige Fragen beantworten, die uns häufig gestellt werden.

8.1. Herzschrittmacher und andere implantierte aktive Körperhilfen

Aktive Implantate wie Herzschrittmacher, Reglerpumpen für Gehirn-Rückenmarksflüssigkeit, Cochlea-Implantate usw. enthalten elektronische Schaltkreise. Daher können sie in ihrer Funktion durch stärkere elektromagnetische Felder gestört werden. Implantate jüngeren Datums sind gegenüber elektromagnetischen Feldern resistenter als ältere Modelle. Die Erfahrung zeigt, dass manche Implantate durch elektromagnetische Felder, die von Mobiltelefonen erzeugt werden, gestört werden können, wenn sich die Geräte in kurzer Entfernung zur Quelle der elektromagnetischen Strahlung befinden. Personen mit Herzschrittmacher wird daher empfohlen, das Mobiltelefon rechts vom Körper zu halten. Bei den Mobilfunkantennen sind die entsprechenden Felder für die Allgemeinbevölkerung zu schwach, um implantierte aktive Körperhilfen zu stören. Bewohner, die solche Implantate eingepflanzt bekommen haben und im Umfeld von Antennen leben, sind somit keinem Risiko ausgesetzt. Dies gilt nicht, wenn man sich in unmittelbarer Nähe zu einer Antenne befindet und sich zudem noch direkt vor ihr aufhält. Trägern von

implantierten aktiven Körperhilfen ist folglich davon abzuraten, sich auf einem Dach in der Nähe von Antennen aufzuhalten oder einen Antennenmast zu besteigen.

8.2. Nutzungsverbot von Mobiltelefonen in Krankenhäusern

Hinter diesem Verbot steht das Risiko, dass medizinische Geräte (für Diagnostik, Überwachung usw.) gestört werden könnten. Es beruht keinesfalls auf medizinisch-gesundheitlichen Erwägungen.

8.3. Erhöhung der Antennenzahl aufgrund konkurrierender Netzbetreiber

Mit der Abschaffung des staatlichen Monopols im Bereich der Telekommunikation wurde es neuen Betreibern ermöglicht, sich auf diesem Sektor zu etablieren. In den meisten europäischen Staaten gibt es zurzeit 3 oder 4 konkurrierende Netzanbieter. Manche Menschen glauben, dass die Vielzahl der Netze zum Teil schuld an der zunehmenden Anzahl der Antennen und der höheren Exposition der Allgemeinbevölkerung mit elektromagnetischen Feldern ist. Dies stimmt so nicht, denn ausschlaggebend für die erforderliche Zahl der Antennen und deren Leistung ist beim heutigen technischen Entwicklungsstand der Netze die Zahl der Nutzer von Mobiltelefonen. Bis heute gibt es Belgien etwa 8 Millionen Besitzer von Mobiltelefonen im GSM-Standard bei einer Gesamtbevölkerung von etwa 10 Millionen. Die Verteilung dieser 8 Millionen Nutzer auf drei Netze bedeutet nicht, dass mehr Antennen benötigt werden, als wenn alle Nutzer Kunden eines einzigen Betreibers wären. Gleiches gilt für die Exposition mit elektromagnetischen Feldern.

8.4. Verwechslung zwischen Frequenz und Leistung – Eindringtiefe der Wellen

Wie in Abschnitt 2 beschrieben, ist die Frequenz eines periodischen Signals gleich der Anzahl der Schwingungen pro Sekunde. Sie wird in Hertz (Hz) bzw. in einem Vielfachen davon (kHz, MHz, GHz usw.) angegeben. Die Leistung, die von einer Antenne abgestrahlt wird, wird dagegen in Watt (W) angegeben. Es handelt sich dabei um die Energiemenge, die innerhalb 1 Sekunde abgegeben wird. Viele verwechseln diese beiden Begriffe und glauben fälschlicherweise, dass mit höherer Frequenz die Risiken größer werden. Dies ist eine völlig irrtümliche Annahme, da das Eindringvermögen der Frequenz umso geringer ist, je höher die Frequenz ist. Der größte Teil der Energie wird nämlich durch das Oberflächengewebe absorbiert (Haut, Fettgewebe, Schädeldecke). Im Übrigen werden aus diesem Grund die Normen für den Bereich oberhalb von 400 MHz nicht so restriktiv gehandhabt wie für den Bereich zwischen 10 und 400 MHz (siehe Tabelle 3). Bei gleicher Leistungsflussdichte werden die inneren Organe (Gehirn, Herz, Leber usw.) bei 900 MHz weniger bestrahlt als beispielsweise bei 100 MHz.

Die Abschwächung einer elektromagnetischen Welle, die ein bestimmtes Material durchdringt, hängt von mehreren Parametern ab und ist proportional zur Quadratwurzel der Frequenz. Diese Abschwächung wird deutlich an der so genannten Eindringtiefe. Es handelt sich dabei um die Dicke, an der die Feldstärke um den Faktor 2,7 verringert wird. Demnach wird die Leistungsflussdichte, die proportional zum Quadrat der Feldstärke ist, um den Faktor 7,3 herabgesetzt.

Bei 100 MHz beträgt die Eindringtiefe einer elektromagnetischen Welle beim menschlichen Körper 3 cm [3]. Bei 900 MHz beträgt sie nur noch 1 cm und bei 1800 MHz dringt eine Welle nur noch 0,7 cm tief ein. Diese Werte sind in der Tabelle 5 zusammengefasst. Ableitbar hieraus ist auch die erforderliche Gewebsdicke, ab der die Feldstärke durch den Faktor 10 und die Leistungsflussdichte durch den Faktor 100 geteilt werden. Diese Entfernung von der Oberfläche ist gleich dem 2,3fachen der Eindringtiefe.

Anzumerken ist, dass ein Anstieg der Dämpfung mit zunehmender Frequenz bei allen Materialien zu verzeichnen ist. Unabhängig davon, ob es sich um eine Mauer oder um ein Dach handelt, wird die Dämpfung bei 1800 MHz immer stärker sein als bei 900 MHz. Hiermit ist auch erklärbar, dass für ein Netz mit dem Standard DCS 1800 (1800 MHz) mehr Antennen benötigt werden als für ein Netz mit dem Standard GSM 900 (900 MHz), um ein Gebiet abzudecken.

Tabelle 5
Eindringtiefe und Dicke der Schicht, ab der die Feldstärke um den Faktor 10 und die Leistungsflussdichte um den Faktor 100 verringert werden

	100 MHz	450 MHz	900 MHz	1800 MHz
Eindringtiefe	3 cm	1,5 cm	1 cm	0,7 cm
Tiefe, ab der E durch 10 und S durch 100 geteilt werden	7 cm	3,5 cm	2,3 cm	1,6 cm

8.5. Gebündelte Aufstellung von Antennen durch mehrere Betreiber am selben Standort

Da das Anbringen weiterer Antennen an einen bereits bestehenden Mast nicht weiter in den Blick fällt, ist es aus ästhetischen Überlegungen vorzuziehen, Antennen verschiedener Betreiber an einem Standort zu gebündelt aufzustellen.

Die Exposition der im Umfeld einer Antennenanlage lebenden Bevölkerung nimmt zwangsläufig zu, da die von den einzelnen Immissionsquellen erzeugten elektromagnetischen Felder kumuliert werden müssen.²⁵

²⁵ Die einzelnen Feldstärken können nicht einfach arithmetisch addiert werden. Die Feldstärke E_{Summe} ist nämlich gleich der Quadratwurzel der Summe der Quadrate der einzelnen Feldanteile, d. h.



Institut Scientifique de Service Public

$$E_{\text{Summe}} = (E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + \dots)^{1/2}$$

Bei Mobilfunkantennen, die sich in größerer Höhe (in einer Höhe im zweistelligen Meterbereich) über den benachbarten Gebäuden befinden, fällt die Zunahme der Exposition oftmals nicht ins Gewicht. Umgekehrt steigt die Belastung erheblich an, wenn die Antennen in niedriger Höhe angebracht sind und sich im Nahbereich benachbarter Gebäude befinden.

Hinzufügen ist, dass die Nutzung der bereits bestehenden Infrastruktur (Masten, Gebäude usw.) sowie die gemeinsame Nutzung von Antennenstandorten in Belgien seit 2001 obligatorisch ist.

8.6. Sicherheitsabstände

In manchen Veröffentlichungen wird die Festlegung eines Sicherheitsabstandes zu den Basisstationsantennen empfohlen (z. B. keine Antennenanlage in einer Entfernung von weniger als 50, 100 und selbst 300 Meter von Wohngebäuden). Derartige Empfehlungen halten aber einer genauen Überprüfung nicht stand. Aus der Abbildung 7 ist klar ersichtlich, dass das elektromagnetische Feld auf den ersten 100 Meter viel schwächer ist als in einer Entfernung von 150 Meter. Auch die Abbildung 9 zeigt, dass das elektromagnetische Feld bis zu einer Entfernung von 300 Meter schwächer ist als der in 400 Meter Entfernung gemessene Wert.

Am häufigsten wird eine Entfernung von 300 Meter empfohlen. Implizit ist mit dieser Empfehlung eine Begrenzung der Exposition auf 0,6 V/m verbunden (siehe letzte Zeile in der Tabelle 3). Dieser Empfehlung liegt folgende Formel zugrunde, mit der sich die Stärke des elektromagnetischen Feldes in der Achse der Hauptstrahlung berechnen lässt:

$$E = \frac{1}{d} \sqrt{30 P \cdot G} \quad (3)$$

In dieser Formel ist d die Entfernung (in m) und das Produkt aus $P \cdot G$ ist die äquivalente isotrope Strahlungsleistung (EIRP) (siehe Ziffer 7.3). Durch Umformung der Gleichung erhält man:

$$d = \frac{1}{E} \sqrt{30 P \cdot G} \quad (4)$$

Unter Zugrundelegung einer äquivalenten isotropen Strahlungsleistung (EIRP) von 1100 W (was einer Antennenleistung von 20 W und einem Antennengewinn von 55, d. h. 17,5 dBi entspricht) und 0,6 V/m als Wert für E par, erhält man 300 Meter.

Eine derartige Vorgehensweise ist sowohl stark vereinfachend und wie auch falsch. Folgende Gründe sind hierfür anzuführen:

- aus der Gleichung (3) ergibt sich die Stärke des elektromagnetischen Feldes in der Achse der Hauptstrahlung. In zahlreichen Fällen hält sich aber niemand in diesem Bereich auf. Für eine zutreffende Berechnung muss aber die Richtwirkung in vertikaler Ebene berücksichtigt werden (ausgehend vom

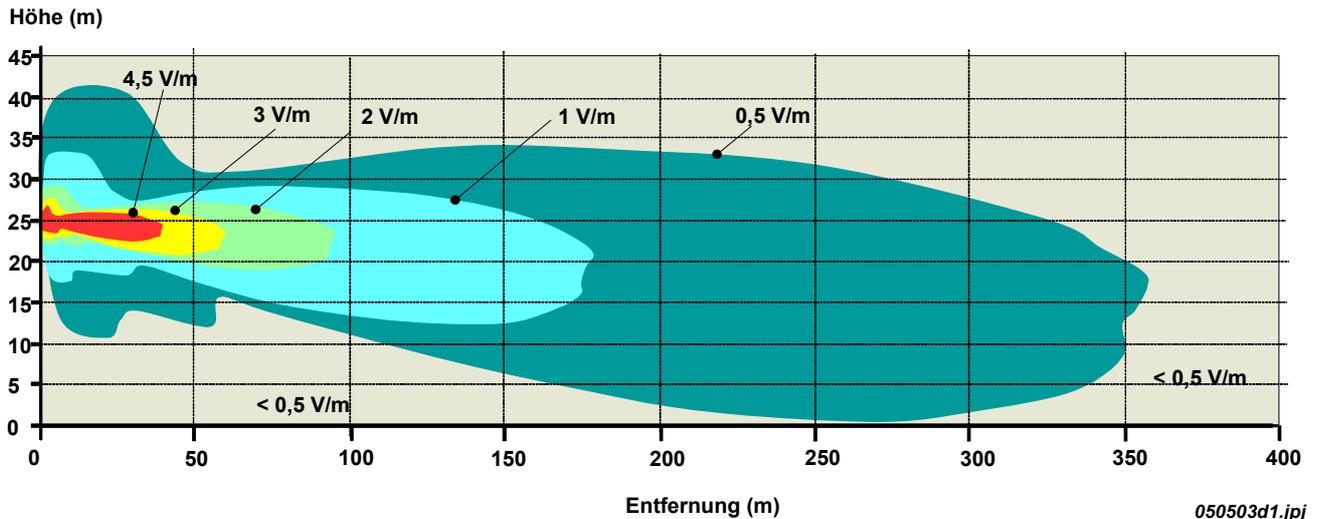
Strahlungsdiagramm), um Isolinien zu erhalten, die mit denen in der Abbildung 8 vergleichbar sind;

- die Berechnungsmethode berücksichtigt nicht die Dämpfung durch Hindernisse, die bei einer Aufstellung der Antennenanlage auf einem Dach aus Stahlbeton jedoch sehr groß ist;
- wie bereits oben erwähnt, liegt die äquivalente isotrope Strahlungsleistung (EIRP) bei den schwächsten Mobilfunkantennen bei 300 W und bei den stärksten Antennen bei 3500 W. Die Abstützung einer Berechnungsmethode auf eine Standardleistung, die im Verhältnis von 1 zu 12 schwanken kann, führt zu keinem ausgewogenen Bild.

Obwohl wir an dieser Stelle nicht darüber zu urteilen haben, inwieweit der empfohlene Wert von 0,6 V/m als angemessen betrachtet werden kann²⁶, ist es zweifelsohne ein grober Fehler, sich auf die Gleichung (3) zu berufen, in der eine Antenne mit Sektorcharakteristik mit einer isotropen Antenne gleichgesetzt wird, was zu abwegigen Entscheidungen führen kann. Um sich hiervon bildlich eine Vorstellung machen zu können, sei angemerkt, dass bei einer Rundfunk- und TV-Antenne mit einer äquivalenten isotropen Strahlungsleistung (EIRP) von 1000 KW das Ergebnis nach Gleichung (3) ein Radius von 9 km wäre. Eine solche Antenne könnte nur im Mittelpunkt eines Kreises mit einem Durchmesser von 18 km stehen, in dem sich kein Wohngebäude befindet. Im Fall des Eiffelturms wäre der Durchmesser dann größer als 40 km !

Dies zeigt, dass man von bisherigen Empfehlungen zu Sicherheitsabständen im Umfeld von Antennen abkommen muss und zutreffendere Berechnungsmethoden gewählt werden müssen, die grundlegenden Erkenntnissen im Funkwesen Rechnung tragen. Abbildung 10 stellt die Ausdehnung der Felder einer Antenne mit einer äquivalenten isotropen Strahlungsleistung (EIRP) von 1000 W dar, die sich in einer Höhe von 25 Meter über dem Boden befindet und deren Abstrahlwinkel um 2° nach unten geneigt ist („mechanical tilt“). Die vertikale Achse (Höhe) ist im Verhältnis zur Entfernung überdimensioniert eingezeichnet, um einen besseren Darstellungseffekt der Kurven zu erzielen.

²⁶ Siehe Einleitung



**Abbildung 10 : Isolines für 3, 2, 1 et 0,5 V/m
(Gesamtleistung = 20 W - Antennengewinn = 52 – Neigungswinkel des Antennenstrahls = 2°)**

8.7. Nebenkeulen einer Antenne

Die Merkmale von Antennen sind durch ihr jeweiliges Strahlungsdiagramm bestimmt, das den Antennengewinn in den verschiedenen Richtungen darstellt. Abbildung 11 gibt beispielsweise das Strahlungsdiagramm in vertikaler Ebene wieder. Erkennbar sind:

- eine Hauptkeule entsprechend der Richtung, in die der größte Teil der Leistung abgestrahlt wird;
- Nebenkeulen, die erkennen lassen, dass ein Bruchteil der Antennenleistung in nicht beabsichtigte Richtungen abgestrahlt wird.

Bei den gängigen Sektorantennen ist das Maximum des Antennengewinns der Nebenkeulen aber mindestens um ein 10 bis 20faches niedriger als der Antennengewinn der Hauptkeule. Dies bedeutet, dass sich die Feldstärke in diesen Richtungen in einem annehmbaren Bereich bewegt, wie die Abbildungen 7 und 9 zeigen, wo die in 40 Meter Entfernung von der Antenne gemessenen Spitzenwerte auf eine Nebenkeule zurückzuführen sind. Eine Vielzahl von Messungen mit anderen Antennen bestätigen dieses Ergebnis.

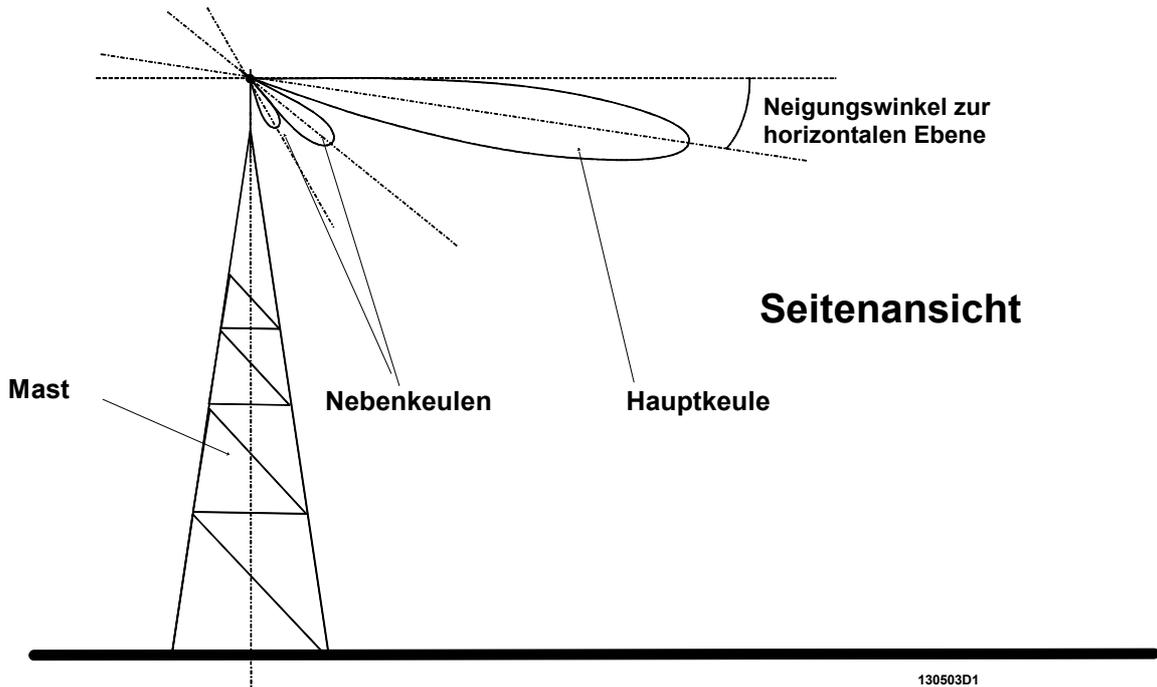


Abbildung 11: Strahlungsdiagramm und Nebenkeulen

8.8. Arbeiten im Umfeld einer Mobilfunkantenne

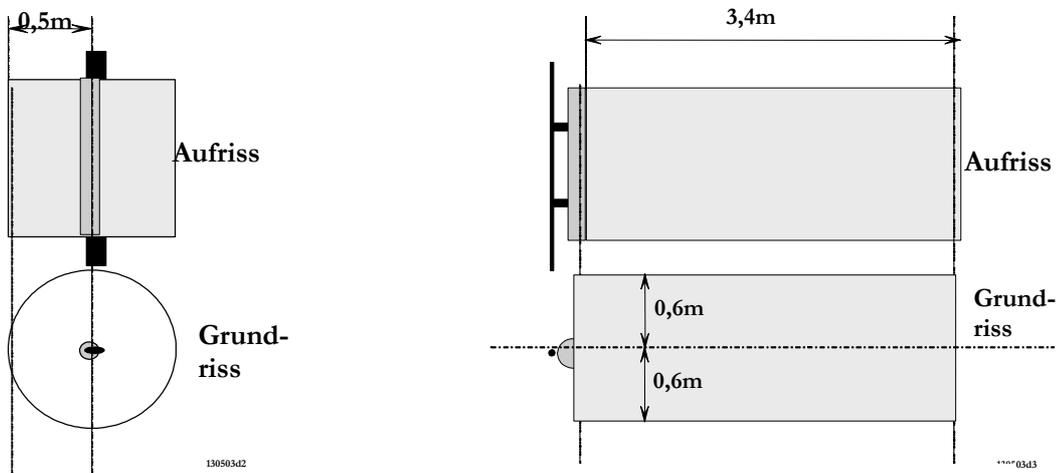


Abbildung 12: Sicherheitsabstände bei Rundstrahl- und Sektorantennen

Die Mobilfunkunternehmen haben in Zusammenarbeit mit der „Inspection Technique et Médicale du Ministère Fédéral de l'Emploi et du Travail“²⁷ ein Handbuch über die Sicherheit bei Arbeiten an GSM-Anlagen oder im unmittelbaren Umfeld davon [8] erstellt. In diesem Handbuch wird der Aufenthalt innerhalb des Gefahrenbereiches von Antennen untersagt, es sei denn, dass die Verweildauer in diesem Bereich nur kurz ist (weniger als 60 Sekunden). Deshalb sollte eine Antenne zur Durchführung von Arbeiten innerhalb des Gefahrenbereiches abgeschaltet werden. Die jeweilige Größe des Gefahrenbereiches bei Rundstrahl- und Sektorantennen ist aus der Abbildung 12 ersichtlich.

8.9. Passiv reflektierende Strahlungsquellen

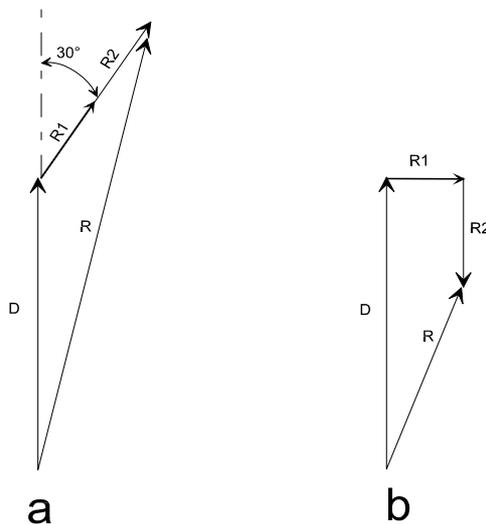
In manchen Veröffentlichungen wird die Behauptung aufgestellt, dass leitfähige Gegenstände (Geländer aus Metall, Moniereisen, Spiegel usw.) zu einer „Verstärkung“ elektromagnetischer Felder führen. In diesen Werken wird ebenfalls empfohlen, Spiegel (oder jeden leitfähigen Gegenstand) aus Wohnräumen zu entfernen. In Wirklichkeit sind reflektierende Gegenstände (nicht nur metallische) Ursache für erhebliche Schwankungen der Feldstärke. Keinesfalls bewirken sie aber einen Anstieg der durchschnittlichen Stärke des Feldes, was den grundlegenden physikalischen Prinzipien zuwiderlaufen würde.

Folgende Erklärung gibt es für dieses Phänomen. Elektromagnetische hochfrequente Wellen werden von den meisten Materialien oder Oberflächen reflektiert, wie dies auch der Fall bei anderen Wellen - z. B. Licht- und Schallwellen - ist. Inwieweit elektromagnetische Wellen reflektiert werden, hängt von der elektrischen Leitfähigkeit des Materials ab. Sie ist bei Metallen größer. Der Fußboden und in gewissem Umfang auch die Wände haben eher gute reflektierende Eigenschaften. Diese Reflexionen führen bei den elektromagnetischen Felder im Raum zu Schwankungen, die relativ erheblich sind. Die von der Antenne abgestrahlte direkte Welle und die von Hindernissen (Fußboden, Wände usw.) reflektierten Wellen treffen nämlich an manchen Stellen etwa phasengleich auf. Dieser sehr einfache Fall ist in Abbildung 13a dargestellt, wo eine direkte Welle D und zwei reflektierte Wellen, R1 und R2, mit geringerer Amplitude auftreffen, die um 30° gebeugt sind. Die resultierende Feldstärke ist am betreffenden Punkt gleich der Vektorsumme aus der direkten Welle und der beiden reflektierten Wellen. Die Resultante R ist in diesem Fall stärker als das direkte Signal. Die beiden reflektierten Wellen bewirken, dass die Feldstärke zunimmt. An anderen Punkten im Raum ist die Resultante R schwächer als die direkte Welle. Dies ist beispielsweise der Fall in der Abbildung 13b, wo zwei reflektierte Wellen jeweils um 90° und 180° gegenüber der direkten Welle gebeugt werden. Es kann auch Punkte geben, an denen die direkte Welle gänzlich neutralisiert wird (was die Physiker als Schwingungsknoten bezeichnen).

Eine Funkwelle wird bei ihrer Ausbreitung oftmals reflektiert und gebeugt. Daher ist in einem Raum an Punkt A eine große Menge von Signalen anzutreffen, deren

²⁷ AdÜ: Technische und medizinische Inspektion des Bundesministeriums für Beschäftigung und Arbeit in Belgien

Amplitude und Phase zufälligen Schwankungen unterworfen ist. An Punkt B (in Nähe zu Punkt A) werden immer noch mehrere Signale empfangen, aber jedes dieser Signale hat eine andere Amplitude und eine andere Phase als an Punkt A. Dies hat zur Folge, dass die Resultante einen anderen Wert annimmt.



181299D2.WMF

Abbildung 13
Einfluss reflektierter Wellen auf Feldstärkeschwankungen

Die Schwankungen elektromagnetischer Felder sind umso stärker, je mehr Wellen reflektiert werden. Beispielsweise lassen sich im Freien Feldstärkeschwankungen messen, bei denen zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Wert ein Verhältnis von bis zu 1 zu 3 erreicht werden kann. Hieraus ergibt sich, dass Schwankungen der Leistungsflussdichte in einem Verhältnis von 1 zu 9 stehen. Der Abstand zwischen einem maximalen und einem minimalen Wert kann auch so kurz sein wie eine Viertel der Wellenlänge, d. h. 7,5 cm bei einer Frequenz von 900 MHz. Die Schwankungen des elektromagnetischen Feldes in den Abbildungen 7 und 9 sind im Übrigen Ausdruck dieses Phänomens.

Im Inneren eines Gebäudes sind die Schwankungen noch größer, da die Reflexionen zahlreicher sind. Immer wieder werden Schwankungen gemessen, bei denen das Verhältnis zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Wert gleich 1 zu 10 ist. Schwankungen der Leistungsflussdichte stehen somit in einem Verhältnis von 1 zu 100.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Reflexionen an Hindernissen erhebliche Schwankungen der Feldstärke bewirken, sie aber bezogen auf den menschlichen Körper zu keinem Anstieg des durchschnittlichen Wertes der Feldstärke führen. Die Wellen werden mit einer konstanten Gesamtenergie reflektiert, d. h. es kommt zu keiner Verstärkung des Signals. Eine Verstärkung beruht auf einem ganz anderen Mechanismus. Hierzu ist erforderlich, dass die aufgenommene Energie größer ist als die abgegebene. Die Beseitigung von Spiegeln (oder aller leitfähigen Gegenstände)

in bewohnten Räumen macht kaum Sinn, da Fußboden und Wände für das Phänomen der Reflexion ausreichen.

9. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Sowohl Berechnungen wie auch Messungen im näheren Umfeld der Standorte von Antennen unterschiedlichen Typs zeigen, dass elektromagnetische Felder mit einer Stärke von einigen V/m nur im Bereich der Hauptstrahlung der Antenne oder direkt darunter anzutreffen sind.

In der Abbildung 14 ist ein Wohngebäude dargestellt, das sich in unmittelbarer Nähe zum Fuß eines Antennenmastes befindet. Eine derartige geographische Nähe weckt Beunruhigungen, die oft nicht gerechtfertigt sind, geht die Antennenstrahlung doch in großer Höhe über die Wohngebäude hinweg. Alle Messungen, die in Situationen vergleichbar mit Abbildung 14 durchgeführt worden sind, belegen, dass etwa 15 Meter unter der Antenne das elektromagnetische Feld im Freien nie mehr als ein paar Zehntel V/m beträgt. Vorausgesetzt wurde dabei der ungünstigste Fall, bei dem es kein Hindernis zur Dämpfung der Strahlung gab.

Im Inneren der Gebäude dämpfen Mauern und Dach die Strahlung erheblich und sorgen für einen zusätzlichen Schutz. Bei den im Mobilfunk üblichen Frequenzen reduziert eine Außenmauer die Stärke des elektromagnetischen Felds um das 2,5 bis 5fache oder sogar um einen noch größeren Faktor je nach ihrer Dicke, Beschaffenheit und der Frequenz der Trägerwelle.

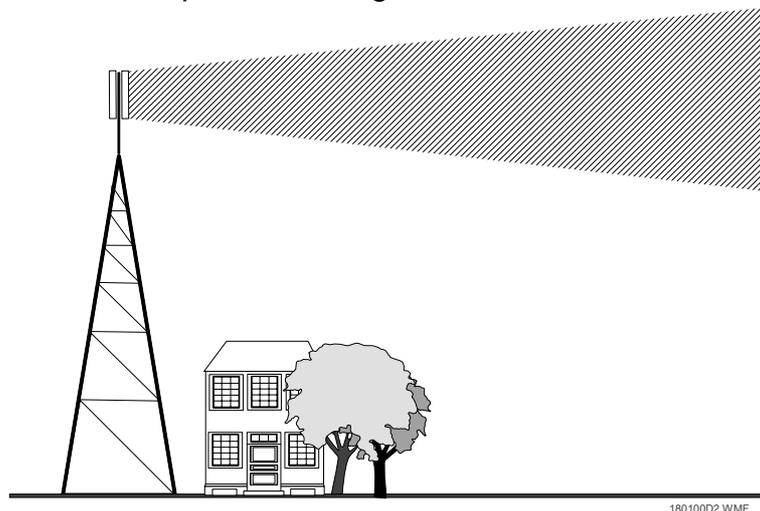


Abbildung 14: Antennenanlage in großer Höhe über Wohngebäude

Das Beispiel in der Abbildung 15 verdient dagegen eine nähere Betrachtung, da es sich hier um ein Gebäude handelt, das in der Hauptstrahlung in relativ kurzer Entfernung zur Antenne steht. In diesem Fall sind die Eigenschaften der Antenne zu berücksichtigen (Leistung, Antennengewinn, Neigungswinkel der Antennenstrahlung, Geländeprofil usw.), um kontrollieren zu können, ob die vorgeschriebenen Grenzwerte eingehalten werden. Anderenfalls müsste ein höherer Antennenmast als Lösung gewählt werden. Tritt eine derartige Situation ein, ist die Isolinie, die dem

festgesetzten Immissionsgrenzwert entspricht, darzustellen (ähnliche Kurve wie in den Abbildungen 8 und 10). Dieser Kurvenverlauf lässt sich mit großer Genauigkeit mit Hilfe von Berechnungsmodellen, die sich auf das Strahlungsdiagramm einer Antenne abstützen, darstellen. Skizziert man die Isolinie von 4,7 V/m (gleich dem Grenzwert pro Antenne bei 925 MHz nach der belgischen Norm), beträgt in der Hauptstrahlungsrichtung die Entfernung vom Antennenstandort je nach Antennentyp und abgestrahlter Leistung zwischen 25 und 70 Meter, ab der das elektromagnetische Feld niedriger ist als der Immissionsgrenzwert.

Die Höhe der Antennenanlage über dem Boden und den benachbarten Gebäuden ist ein weitaus wichtigeres Kriterium als die Entfernung zu ihr. Um sich hiervon zu überzeugen, reicht ein näherer Blick auf die Abbildung 8 aus (errechnet für nur einen Antennentyp und eine relativ schwache Leistung). Befindet sich die Antennenanlage in 24 Meter Höhe, ergibt sich hieraus eine Feldstärke von 0,5 V/m etwa 2,5 Meter über dem Boden. Wenn die Anlage nur noch in 12 Meter Höhe angebracht ist, würde sich ein Wert von 1 V/m in 2,5 Meter Höhe über dem Boden errechnen. Wäre umgekehrt die Antenne in einer Höhe von 36 Meter befestigt, betrüge das elektromagnetische Feld 2,5 Meter über dem Boden nur noch maximal 0,3 V/m. Analoge Schlussfolgerungen lassen sich aus der Abbildung 10 ziehen (Antenne mit mittlerer Leistung in 25 Meter Höhe).



Abbildung 15: Wohngebäude in der Hauptstrahlung

Sind Antennen auf einem Dach mit geringer Absorptionsfähigkeit aufgestellt (Dachziegel, Schiefer usw.), sind die Bewohner des Hauses nur schwachen elektromagnetischen Feldern ausgesetzt (weniger als einige Zehntel V/m unter dem Dach), weil die Antennen ihre Strahlung in horizontaler Richtung konzentrieren. Gleiches gilt, wenn eine Antenne mit Sektorcharakteristik an einer Hauswand befestigt ist, da die von ihr nach hinten abgegebene Strahlung durch die Hauswand gedämpft wird. Es muss selbstverständlich darauf geachtet werden, dass sich keine Gebäude in zu geringer Entfernung direkt gegenüber den Antennen befinden.

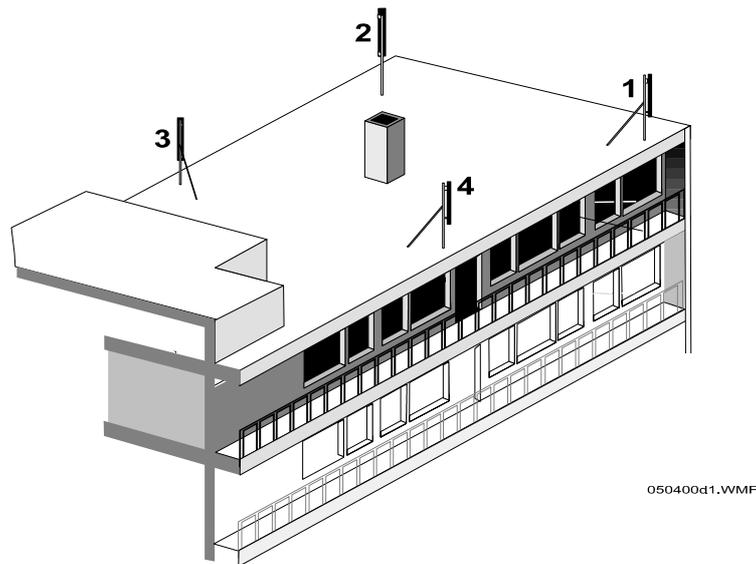


Abbildung 16: Antennen auf einem Gebäude mit einem Dach aus Beton

Sind Antennen auf einem Gebäudedach aus Stahlbeton aufgestellt (Abbildung 16), bietet das Dach einen äußerst wirksamen Schutz. Die Stärke des elektromagnetischen Feldes unter den Antennen ist von unbedeutendem Wert (weniger als 0,1 V/m im letzten Stockwerk). Deshalb sind Ängste bezüglich der Aufstellung von Antennen auf derartigen Dächern (insbesondere Krankenhäuser, Schulen usw.) nicht gerechtfertigt, weil Messungen belegen, dass es in jedem Fall besser ist, Antennenanlagen auf dem Dach des Gebäudes zu errichten, dem Schutz gewährt werden soll, als diese Anlage in größerer Entfernung davon aufzubauen. Auf diese eindeutige Erkenntnis, die durch Messungen anderer Organisationen bestätigt worden ist, haben wir bereits in unseren Veröffentlichungen ([1] et [2]) aus dem Jahre 2000 nachdrücklich hingewiesen. Die weit verbreitete Idee, nach der Personen, die in einem Gebäude unterhalb von Mobilfunkantennen leben, starken elektromagnetischen Feldern ausgesetzt, entbehrt somit jeglicher Grundlage.

Zusammenfassend lässt sich am Ende dieser Ausführungen sicherlich mit gewissem Optimismus feststellen, dass bei allen vom ISSeP durchgeführten Messungen an Antennenanlagen (mehrere Dutzend Anlagen bis heute) keine Situation angetroffen worden ist, die Anlass zur Sorge gegeben hätte. Dies soll nicht bedeuten, dass es derartige Situationen nicht gibt. Sollte sie es dennoch geben, dürften sie nicht sehr häufig sein und hätten in der Regel durch eine überlegtere Wahl des Antennenstandortes ohne bedeutenden finanziellen Mehraufwand für den Betreiber vermieden werden können. Mit dieser Feststellung geht gleichzeitig der Nachweis einher, dass Mobilfunknetze aufgebaut werden können, ohne dass Bewohner im Umfeld von Antennen starken elektromagnetischen Feldern ausgesetzt werden, und zwar auch nicht in Gebieten mit hoher Bevölkerungsdichte, wo in einer Entfernung von weniger als 300 Meter zur Immissionsquelle kein Bereich unbewohnt ist. Nachgewiesen wird hiermit auch, dass die Festsetzung „vernünftiger“ Grenzwerte den weiteren Ausbau des Mobilfunks nicht unmöglich macht.

ANLAGE

BESTIMMUNG DER STÄRKE EINES ELEKTROMAGNETISCHEN FELDES

Die Stärke eines elektromagnetischen Feldes lässt sich entweder durch Messung vor Ort oder durch Berechnung mit Hilfe von Vorhersagemodellen bestimmen. Diese zweite Methode ist die einzige, die in Betracht kommt, wenn die Anlage noch nicht betriebsbereit ist und kontrolliert werden soll, ob die spätere Feldstärke innerhalb der festgesetzten Immissionsgrenzwerte liegt.

A.1. MESSVERFAHREN

Innerhalb des Frequenzbereiches, der dem Mobilfunk zugewiesen ist, wird die Intensität eines elektromagnetischen Feldes mit Hilfe einer Sonde gemessen, die aus einer dem elektrischen Feldanteil gegenüber empfindlichen Empfangsantenne besteht. Da für die Festlegung der Grenzwerte die Intensität des elektrischen Feldanteils maßgebende Größe ist, wird das Ergebnis der Messung in V/m angegeben. Soweit erforderlich und unter der Voraussetzung, dass die Messung nicht im Nahfeld einer Sendeantenne durchgeführt wird (siehe A. 2), kann der magnetische Feldanteil und die Leistungsflussdichte mit Hilfe der Gleichungen (1) und (2) abgeleitet werden.

Zur Bestimmung der Feldstärke existieren zwei Messmethoden. Das erste Verfahren stützt sich auf so genannte Breitbandmessgeräte ab, das zweite wird als frequenzselektives Verfahren bezeichnet.

A.1.1 Breitbandiges Messverfahren

Bei diesem Verfahren werden Messgeräte verwendet, die auf einen sehr breiten Frequenzbereich ansprechen (daher die Bezeichnung), und zwar von einigen Hundert kHz bis zu mehreren GHz. Diese in der Bedienung sehr einfachen Geräte verlangen keine enormen technischen Fachkenntnisse und liefern sofort ein Ergebnis (ohne jede weitere Berechnung). Verschiedene Messgeräte dieses Typs sind auf dem Markt erhältlich. Der Preis der leistungsstärksten Geräte liegt bei 10.000 €. Breitbandmessgeräte haben dennoch einige Nachteile, insbesondere wenn es um die Messung elektromagnetischer Felder von Mobilfunkantennen geht.

- Empfindlichkeit und Genauigkeit: Die leistungsstärksten Geräte haben eine Empfindlichkeit und eine Genauigkeit von zirka 0,5 bis 0,6 V/m. Da aber in den der Allgemeinbevölkerung zugänglichen Gebieten die elektromagnetischen Felder bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung oft diese Werte aufweisen, (siehe Ergebnisse in Abschnitt 6), ergibt sich hieraus, dass ein

Breitbandmessgerät die meiste Zeit null oder ein Messergebnis anzeigt, dass mit einem relativ großen Fehler behaftet ist. (Zeigt ein Messgerät ein Ergebnis von 0,8 V/m mit einer Messgenauigkeit von 0,6 V/m, liegt der tatsächliche Wert zwischen 0,2 V/m und 1,4 V/m).

- Schwankungen der abgestrahlten Antennenleistung: Wie bereits in Abschnitt 7 dargelegt hängt die abgestrahlte Leistung einer Mobilfunkantenne von der Anzahl der Gesprächsverbindungen ab. Ein Breitbandmessgerät liefert demnach ein Ergebnis, dass je nach der zum Zeitpunkt der Messung abgegebenen Leistung schwankt. Wenn die Messung ohne Wissen des Antennenbetreibers durchgeführt wird, ist der anzuwendende Korrekturfaktor nicht bekannt. Wird aber ein aussagekräftiges Ergebnis angestrebt, muss die Messung zu einem Zeitpunkt mit hoher Gesprächsaktivität und über längere Dauer durchgeführt werden.
- Mangelndes Frequenzselektionsvermögen bestimmter Geräte: Da ein Breitbandmessgerät auf einen Frequenzbereich von einigen Hundert kHz bis mehreren GHz anspricht, ermittelt es einen Immissionsgesamtwert innerhalb des durch das Gerät festgelegten Frequenzbereiches. Auf dem Markt aber werden auch Geräte mit mittlerer Qualität angeboten, die vor allem auf die elektrischen und magnetischen Felder von Stromleitungen (50 Hz) oder anderer Quellen wie TV- oder Computerbildschirme ansprechen, obwohl die Frequenz dieser Felder außerhalb des geeichten Frequenzbereichs dieser Geräte liegt. Werden derartige Geräte von Personen mit unzureichender Sachkenntnis benutzt, sind grobe Fehlmessungen nicht auszuschließen.

Zusammenfassend gilt, dass die Verwendung eines Breitbandmessgerätes zur Ermittlung elektromagnetischer Felder von Mobilfunkbasisstationsantennen sich nur dann anbietet, wenn ein ungefährender Messwert für ausreichend betrachtet wird. Diese Ansicht vertritt auch die Arbeitsgruppe, die von der Europäischen Konferenz für Post- und Fernmeldewesen (CEPT²⁸) ins Leben gerufen worden ist, und sich damit beschäftigt, ein Verfahren zur Messung elektromagnetischer Felder im Frequenzbereich von 9 kHz bis 300 GHz festzulegen (siehe [7]).

A.1.2 Frequenzselektives Verfahren

Bei diesem Verfahren wird ein Spektrumsanalysator²⁹ verwendet, der mit einer Messantenne verbunden ist (zum Beispiel kalibrierter Dipol). Da die Verwendung eines Spektrumsanalysators recht kompliziert ist, sind hierfür fundierte Kenntnisse in den Grundlagen des Funkverkehrs erforderlich. Der Preis derartiger Messgeräte ist in den letzten Jahren stark gefallen. Heute sind Spektrumsanalysatoren guter Qualität für etwa 12.000 € erhältlich. Hinzu kommt noch der Preis für die kalibrierten Antennen. Mit einem Spektrumsanalysator, der hoch empfindlich ist (1 mV/m und mehr je nach Typ der Messantenne und der spektralen Auflösung), lassen sich die Immissionsanteile jeder Frequenz bestimmen.

²⁸ Conférence Européenne des Postes et Télécommunications.

²⁹ Als Variante kann auch ein Testempfänger verwendet werden.

Eine Möglichkeit zur Ermittlung der Immissionswerte von Mobilfunkantennen besteht darin, die von der Frequenz des Kontrollkanals erzeugte Feldstärke zu messen. Diese Frequenz wird ständig mit konstanter Leistung abgestrahlt. Die Feldstärke, die der Summenimmission aus den einzelnen Frequenzen entspricht, wird durch Berechnung ermittelt, indem das Messergebnis mit der Quadratwurzel der Anzahl der abgestrahlten Frequenzen multipliziert wird. Die Anzahl der abgestrahlten Frequenzen lässt sich wiederum ermitteln, indem das Spektrum des Frequenzbereiches aufgezeichnet wird, der dem Antennenbetreiber zugewiesen worden ist. Eine Beobachtung des Spektrums über einen Zeitraum von 1 bis 2 Minuten reicht im Allgemeinen aus, um die Anzahl der abgestrahlten Frequenzen zu ermitteln.³⁰

Erwähnenswert ist, dass diese Methode zu einem Ergebnis führt, das unabhängig von der im Moment der Messung von der Antenne effektiv abgestrahlten Leistung ist. Die so ermittelte Feldstärke entspricht derjenigen, die bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung erreicht würde (im Sinne der Anzahl gleichzeitig geführter Gesprächsverbindungen). Das mit dieser Methode erzielte Ergebnis entspricht demnach einem Szenario mit maximaler Anlagenauslastung.

Da das elektrische Feld starken Schwankungen im Raum unterworfen ist (dieses Phänomen wurde in Ziffer 8.7 beschrieben), muss die Stärke des elektromagnetischen Feldes entlang des Verlaufs mehrerer Wellenlängen aufgezeichnet werden, um den Maximal- und den Mittelwert bestimmen zu können.

Die von der Europäischen Konferenz für Post- und Fernmeldewesen eingesetzte Arbeitsgruppe empfiehlt das frequenzselektive Verfahren für die Fälle, in denen Feinmessungen durchgeführt werden sollen.

³⁰ Bei bestimmten Arten des „Frequency Hopping“ ist diese Methode jedoch mühsam.

A.2 BERECHNUNGSVERFAHREN

Bevor das Verfahren zur Berechnung des von einer Antenne abgestrahlten elektromagnetischen Feldes vorgestellt wird, müssen zunächst die Abmessungen des Bereichs bestimmt werden, auf den dieses Verfahren anwendbar ist.

Nähert man sich einer Antenne, müssen reaktive Felder vom abgestrahlten Feld unterschieden werden. Als reaktiv werden elektrische und magnetische Felder bezeichnet, wenn die elektromagnetische Energie lokal begrenzt fließt, ohne sich über größere Entfernung im Raum auszubreiten. Umgekehrt breiten sich als abgestrahlt bezeichnete Felder über größere Entfernungen im Raum durch Wellenbildung aus. Der Transformator, wo Energie nur im Kern fließt, und der Kondensator, wo Energie nur zwischen Flächen fließt, sind Beispiele für so gut wie reine reaktive Felder. In ausreichender Entfernung von einer Antenne allerdings gibt es nur noch ein abgestrahltes Feld.

Jede Antenne erzeugt ein elektromagnetisches Feld bestehend aus einem reaktiven und einem in den Raum abgestrahlten Anteil. Der reaktive Anteil nimmt sehr schnell mit zunehmender Entfernung von der Antenne ab und kann in der Regel in einer Entfernung von einer Wellenlänge vernachlässigt werden.

A.2.1. Bereiche um eine elektromagnetische Emissionsquelle

Der Raum um eine elektromagnetische Emissionsquelle (Quelle für ein elektromagnetisches Feldes) kann in vier Bereiche unterteilt werden, die als Bereich der reaktiven Felder, Rayleigh-Bereich, Transitionsbereich und Bereich des Fernfeldes bezeichnet werden. Abbildung A1 zeigt für eine 2,7 Meter hohe Antenne des GSM 900-Netzes eine vertikale Ansicht der drei Hauptbereiche (der Standort der Antenne deckt sich in der Skizze mit dem Schnittpunkt der Achsen), wobei der Bereich der reaktiven Felder aufgrund seiner geringen Größe nicht dargestellt worden ist.

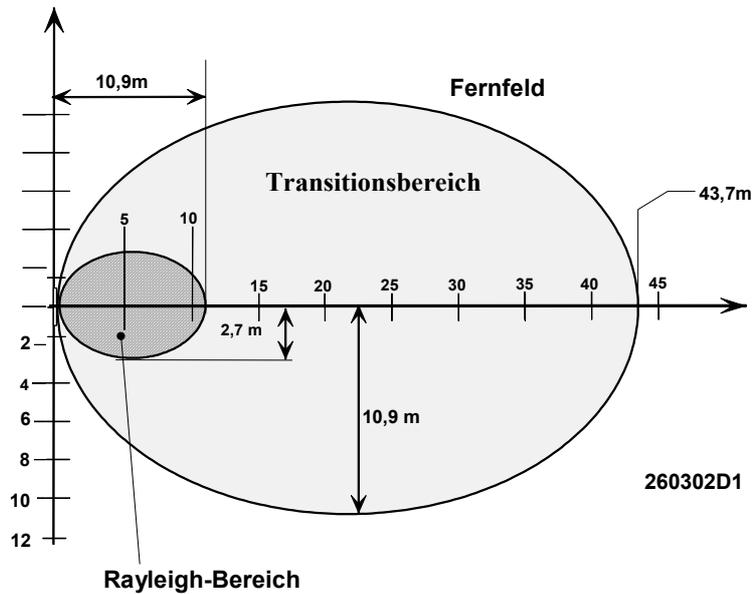


Abbildung A1

Vertikale Ansicht des Rayleigh-Bereichs, des Transitionsbereichs und des Fernfelds bei einer Antenne des GSM 900-Netzes mit 2,7 Meter Höhe

a) Bereich der reaktiven Felder

Der Bereich der reaktiven Felder erstreckt sich über eine Entfernung, die in etwa einer Wellenlänge entspricht. In diesem Bereich nimmt das elektrische und das magnetische Feld im umgekehrten Verhältnis zum Quadrat und zur dritten Potenz der Entfernung ab. Bei den Frequenzen des Mobilfunks ist die Größe der reaktiven Felder sehr begrenzt (cm im zweistelligen Bereich). Unter dem Sicherheitsaspekt ist dieser Bereich nur für Personen interessant, die in unmittelbarer Nähe der Antenne arbeiten müssen.

Bei Monopol- oder Dipolantennen gilt, dass das abgestrahlte Nahfeld ab einer Entfernung von λ/π (λ ist gleich der Wellenlänge) stärker ist als die reaktiven Felder. Diese Entfernung dürfte bei Sektorantennen, die für den Mobilfunk verwendet werden, nicht viel anders aussehen, da sie aus einer oder mehreren Dipol-Reihen bestehen.

b) Fernfeld

Es handelt sich um den Bereich, in dem beim elektromagnetischen Feld ausschließlich eine Strahlung vorliegt (ebene Welle). Die Entfernung (als Fraunhofersche Distanz bezeichnet), über die sich dieser Bereich von der Strahlungsquelle aus betrachtet erstreckt, errechnet sich durch die Formel:

$$d_{FR} = \frac{2 D^2}{\lambda} \tag{A1},$$

in der

D : die maximale Größe der Antenne, die im rechten Winkel zur Strahlungsrichtung (in Meter) gemessen wird. Eigentlich handelt es sich dabei um die maximale Größe der Antenne aus der Blickrichtung des Betrachters. Bei einer Sektorantenne hat D den maximalen Wert, wenn der Betrachter sich direkt gegenüber der Antenne befindet;

λ : die Wellenlänge (in Meter), die in Beziehung zur Frequenz f (in MHz) über folgende Gleichung steht:

$$\lambda = \frac{300}{f} \quad (\text{A2})$$

Der Linienvorlauf zwischen dem Fernfeld und dem Transitionsbereich (Abbildung 1) wird in einem Polardiagramm über folgende Gleichung ermittelt:

$$d_{\text{FR}}(\alpha) = \frac{2 H^2 \cos^2 \alpha}{\lambda} \quad (\text{A3}),$$

in der

α : der Winkel zwischen der horizontalen Achse und der Ausbreitungsrichtung ist,

$d_{\text{FR}}(\alpha)$: die Fraunhofersche Distanz in die Richtung ist, die einen Winkel α mit der horizontalen Achse bildet.

$H \cos \alpha$ im Zähler in der Gleichung (A3) stellt die maximale Größe der Antenne vom Standort des Betrachters dar.

In unserem Beispiel beträgt in der Abbildung 1 (Antenne von 2,7 Meter Höhe für das GSM 900-Netz) die Ausdehnung des Rayleigh-Bereichs 10,9 Meter in horizontaler Richtung. Mit größer werdendem Winkel α wird die Ausdehnung geringer und strebt schließlich gegen den Wert null, wenn α sich einem Winkel von 90° (oder von -90°) nähert. Vermerkt sei, dass unter der Antenne, d. h. bei einem Winkel α von nahezu 90° , die maximale Ausdehnung des Rayleigh-Bereichs im rechten Winkel zur Ausbreitungsrichtung der Welle der Breite der Antenne entspricht (im Allgemeinen weniger als 30 cm). Dem entspricht eine Fraunhofersche Distanz von 60 cm, die im Prinzip durch zwei Kreisbogen dargestellt werden müsste (darüber für $\alpha = -90^\circ$ und darunter für $\alpha = 90^\circ$). Dieser Radius von 60 cm ist insbesondere im Vergleich zur Höhe der Antenne so klein, dass sich in der Abbildung 1 die beiden Kreisbogen praktisch mit dem Schnittpunkt der Achsen decken.

Diese Berechnungen beziehen sich wohlgemerkt auf Sektorantennen. Diese Antennen haben mindestens ein Größe, die der mehrerer Wellenlängen entspricht.

Bei kleineren Antennen (Viertelwellenantenne, Halbwellendipol usw.) beträgt die Fraunhofersche Distanz 10λ , d. h. 3,3 Meter bei 900 MHz.

Im Fernfeld ist die Stärke des elektrischen und des magnetischen Feldes umgekehrt proportional zur Entfernung. Sie wird durch die Formeln (A4) et (A5) berechnet, die allgemein als Fernfeldformeln bezeichnet werden.

$$E = \frac{1}{d} \sqrt{30 P \cdot G / A(\phi, \theta)} \quad (A4)$$

$$H = \frac{1}{d} \sqrt{0,08 P \cdot G / A(\phi, \theta)} \quad (A5)$$

Hierbei sind:

- P : Eingangsleistung an der Antenne (in W)
- G : Antennengewinnfaktor im Verhältnis zu einer kugelförmig sendenden oder empfangenden Antenne in die Richtung, in die die maximale Strahlungsintensität abgegeben wird (Verhältnismaß)
- $A(\phi, \theta)$: Leistungsverlust in einer bestimmten Richtung im Verhältnis zu der Richtung, in die die maximale Strahlungsintensität abgegeben wird (Verhältnismaß)
- θ : Erhöhungswinkel (in Grad)
- ϕ : jeweiliger Azimutwinkel (in Grad)
- d : Entfernung zur Antenne (in Meter)

$A(\phi, \theta)$ wird aus dem horizontalen und dem vertikalen Strahlungsdiagramm der Antenne ermittelt. θ und ϕ werden im Allgemeinen bezogen auf die Richtung gemessen, in der die maximale Strahlungsintensität abgegeben wird (Achse der Hauptstrahlung).

c) Transitionsbereich

Zwischen dem Rayleigh-Bereich und dem Fernfeld liegt der Transitionsbereich. In diesem Bereich weist die Feldstärke je nach Entfernung zur Antenne größere Schwankungen auf. Allgemein gilt, dass mit den Formeln (A4) und (A5), die normalerweise auf das Fernfeld anzuwenden sind, die durchschnittliche Feldstärke im Inneren des Transitionsbereiches (durchschnittlicher Wert auf kurze Entfernung, um Einflüsse räumlich bedingter Schwankungen auszuschalten) mit ziemlich großer Genauigkeit berechnet werden kann. In Wirklichkeit verhält es sich sogar so, dass beide Formeln für den Transitionsbereich ein Ergebnis liefern, das eher über der tatsächlichen durchschnittlichen Feldstärke liegt. Diese Abweichung ist aber hinnehmbar, weil sie dem Aspekt der Sicherheit Rechnung trägt.

d) Rayleigh-Bereich

Der Rayleigh-Bereich liegt zwischen dem Bereich der reaktiven Felder und dem Transitionsbereich. Seine Ausdehnung (Rayleigh-Distanz) errechnet sich mit Hilfe folgender Formel

$$d_R = \frac{D^2}{2\lambda} \quad (A6),$$

in der λ und D genauso definiert sind wie in der Formel (A1). Die Rayleigh-Distanz ist gleich einem Viertel der Fraunhofer-Distanz.

Wie beim Transitionsbereich lässt sich der Linienvorlauf des Rayleigh-Bereichs in einem Polardiagramm mit folgender Gleichung ermitteln:

$$d_R(\alpha) = \frac{H^2 \cos^2 \alpha}{2\lambda} \quad (A7),$$

in der

$d_R(\alpha)$: die Rayleigh-Distanz in die Richtung ist, die einen Winkel α mit der horizontalen Achse bildet.

Für den Rayleigh-Bereich von Sektorantennen kann aufgezeigt werden, dass sich je nach Entfernung der durchschnittliche Wert des elektrischen und des magnetischen Feldes nach dem Gesetz $1/\sqrt{d}$ und die Leistungsflussdichte nach dem Gesetz $1/d$ in etwa verändern. Mit diesem Ergebnis lassen sich das elektrische Feld und das magnetische Feld innerhalb des Bereichs berechnen. Hierzu müssen lediglich die ermittelten Feldstärken oder die Leistungsflussdichte mit Hilfe der Fernfeldformeln für die Rayleigh-Distanz extrapoliert werden.

Um das gesamte Volumen des Rayleigh- und des Transitionsbereichs feststellen zu können, wird die in der Abbildung 1 dargestellte Skizze um einen Winkel von 360° um die vertikale Achse gedreht. Das Gesamtvolumen hat die Form eines abgeflachten Torus.

A.2.2. In der Praxis anzuwendende Gleichungen

Es hat sich gezeigt, dass in der Praxis die Gleichung (A4) auf die Mehrzahl aller Immissionssituationen anwendbar ist, die durch die elektromagnetischen Felder der Mobilfunkantennen für die Allgemeinbevölkerung erzeugt werden, da sich die „normal zugänglichen“ Bereiche entweder im Fernfeld oder im Transitionsbereich befinden. Der Abbildung 1 ist zu entnehmen, dass der Rayleigh-Bereich und der Bereich der reaktiven Felder sich typischerweise direkt gegenüber der Antenne und im unmittelbaren Umfeld von ihr befinden.

Ergänzend sei erwähnt, dass die Gleichung (A4) durch die direkte Welle berücksichtigt, d. h. das Signal, das direkt von der Antenne kommt. Nun sind aber an allen Punkten im Raum in der Regel direkte Wellen und Signale feststellbar, die einmal oder mehrmals an Hindernissen gebeugt worden sind. Die resultierende Feldstärke an einem betreffenden Punkt ist gleich der Vektorsumme aus den verschiedenen Feldstärkeanteilen. Als Folge sind beträchtliche Schwankungen der elektromagnetischen Feldstärke im Raum feststellbar. Die Gleichungen (A4) und (A5) berücksichtigen aber dieses Phänomen nicht. Erfahrungsgemäß entspricht aber das mit Hilfe dieser Gleichungen ermittelte Ergebnis der durchschnittlichen Feldstärke auf kurze Entfernung (einige Wellenlängen).

Zur oben beschriebenen Unterteilung der Feldstärke in Bereiche sei Folgendes angemerkt:

- Die jeweilige Ausdehnung der einzelnen Bereiche hängt ausschließlich von der Größe der Antenne und von der Wellenlänge ab. Keinesfalls wird sie durch die abgestrahlte Leistung bestimmt (die einzelnen Feldstärkebereiche einer Antenne haben die gleiche Ausdehnung bei 1 mW oder bei 10 kW).
- Die Fernfeldformeln (A4) und (A5) sind auf den Bereich der reaktiven Felder und auf den Rayleigh-Bereich nicht anwendbar. Dies bedeutet aber nicht unbedingt, dass die Feldstärke in diesen Bereichen groß sein muss.
- Im Bereich der reaktiven Felder und im Rayleigh-Bereich können das elektrische und das magnetische Feld durch Berechnungen ermittelt werden. Diese Berechnungen sind jedoch sehr aufwendig.
- Im Bereich der reaktiven Felder und im Rayleigh-Bereich können das elektrische und das magnetische Feld durch Messungen ermittelt werden. Hierzu bieten sich insbesondere ein Spektrumanalysator und Antennen an, die sich zur Messung der in Frage kommenden Feldanteile eignen³¹.

³¹ Soweit bekannt existiert auf dem Markt keine Antenne zur Messung des magnetischen Feldes im 900 und im 1800 MHz-Bereich. Das ISSeP hat eine solche Antenne für den eigenen Messbedarf gebaut.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] PIRARD W. - Champs électromagnétiques à proximité des antennes-relais de mobilophonie - Rapport final - Mai 2000 (www.issep.be).
- [2] PIRARD W. - Conclusions de l'étude menée par l'ISSEP concernant les champs électromagnétiques à proximité des antennes-relais de mobilophonie - Mars 2000 (www.issep.be).
- [3] GERIN. A. STOCKBROECKX B. et VANDER VORST A. - Champs micro-ondes et santé - 1999.
- [4] ICNIRP Guidelines - Guidelines for limiting exposure to time varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz) – 1998.
- [5] PIRARD W. - Etude des risques liés à l'exposition aux champs électromagnétiques rayonnés par les faisceaux hertziens utilisés par les opérateurs de téléphonie mobile - Etude réalisée à la demande de la Région de Bruxelles-Capitale - Novembre 2001 (www.issep.be).
- [6] AFSSE - Rapport à l'Agence Française de Sécurité Sanitaire Environnementale : Téléphonie Mobile et Santé - Mars 2003 (www.afsse.fr).
- [7] CEPT - Measuring non-ionising radiation (9 kHz - 300 GHz) – Draft CEPT/ERC/Recommendation – January 2002.
- [8] GOF - Manuel de Sécurité pour les Travaux sur ou à Proximité d'une Infrastructure GSM – avril 2001.