

Systematische Beschreibung der EMF-Emissionen elektrischer Geräte und Anlagen

Im Auftrag des Deutschen Bundestags

Berlin/Darmstadt,
30.11.2017

Autorinnen und Autoren

Jens Gröger
Christian Küppers
Stefanie Wendt

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

info@oeko.de
www.oeko.de

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	8
Zusammenfassung	11
1. Einleitung	12
2. Übersicht potenzieller EMF-Quellen	14
2.1. Mobiltelefon	14
2.2. DECT	15
2.3. WLAN	17
2.4. Bluetooth	19
2.5. Babyphone	21
2.6. Smart-Home Geräte	22
2.7. Mikrowellenherd	24
2.8. Induktionsherd	25
2.9. Induktives Laden Elektrokleingeräte	27
2.10. Induktives Laden E-Fahrzeuge	29
3. Grenzwerte für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder	31
3.1. Empfehlungen der ICNIRP	31
3.2. Basisgrenzwerte der Empfehlung 1999/519/EG des Rats der Europäischen Union	40
3.3. Grenzwerte in Deutschland	42
3.4. Zusammenfassende Bewertung der Grenzwertsetzungen	46
4. Stellungnahmen und Empfehlungen der SSK	47
4.1. Statusbericht zu elektromagnetischen Feldern neuer Technologien (SSK 2013)	47
4.2. Grundsätze bei der Ableitung von Emissionsstandards bei gleichzeitig betriebenen Feldquellen (SSK 2007)	49
5. Untersuchungen zur Abschätzung von HF-Expositionen der Bevölkerung aus verschiedenen Quellen	51
5.1. Untersuchungen im Deutschen Mobilfunk-Forschungsprogramm	51
5.1.1. Bestimmung der Exposition bei Verwendung kabelloser Übermittlungsverfahren in Haushalt und Büro (Schmid et al. 2005)	51
5.1.2. Exposition durch körpernahe Sender im Rumpfbereich (Christ et al. 2006)	55

5.1.3.	Bestimmung der SAR-Werte, die während der alltäglichen Nutzung von Handys auftreten (Georg et al. 2005)	56
5.1.4.	Bestimmung der realen Exposition bei Handynutzung in teilgeschirmten Räumen im Vergleich zur Exposition unter günstigen Bedingungen im Freien (Georg et al. 2006)	57
5.1.5.	Bestimmung der Exposition durch Ultra-Wideband Technologien (Schmid et al. 2008)	58
5.1.6.	Entwicklung eines praktikablen rechentechnischen Verfahrens zur Ermittlung der tatsächlichen Exposition in komplizierten Immissionsszenarien mit mehreren verschiedenartigen HF-Quellen (Hansen et al. 2007a)	59
5.1.7.	Untersuchung des Einflusses von Antennen- und Gerätetopologien von körpernah betriebenen drahtlosen Kommunikationsendgeräten auf die von diesen verursachten SAR-Werte (Hansen et al. 2007b)	59
5.1.8.	Bestimmung der realen Feldverteilung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in der Umgebung von Wireless LAN-Einrichtungen (WLAN) in innerstädtischen Gebieten (Preiner et al. 2006)	62
5.1.9.	Bestimmung der realen Feldverteilung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in der Umgebung von UMTS-Sendeanlagen (Bornkessel et al. 2006b)	62
5.1.10.	Bestimmung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung von digitalen Rundfunk- und Fernsehsendern (Bornkessel et al. 2006a)	63
5.1.11.	Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder in der Umgebung von Mobilfunk Basisstationen (Bornkessel & Schubert 2005)	64
5.2.	Forschungsvorhaben im Anschluss an das Deutsche Mobilfunk-Forschungsprogramm	64
5.2.1.	Bestimmung der Exposition der allgemeinen Bevölkerung durch neue Mobilfunktechniken (Bornkessel et al. 2013)	64
5.2.2.	Entwicklung und Anwendung von Verfahren zur Bestimmung der Exposition gegenüber nichtionisierender Strahlung mit Frequenzen im Terahertzbereich (Spathmann et al. 2014)	66
5.2.3.	Bestimmung von SAR-Werten bei der Verwendung von Headsets für Mobilfunktelefone (Kühn et al. 2008)	66
5.3.	Weitere Untersuchungen zur Exposition	67
6.	Untersuchung ausgewählter Expositionsszenarien	69
6.1.	Expositionsszenarien	69
6.1.1.	Expositionsszenario „Wohnbereich“	70
6.1.2.	Expositionsszenario „häuslicher Arbeitsbereich“	76
6.1.3.	Expositionsszenario „häuslicher Küchenbereich“	83
6.1.4.	Expositionsszenario „öffentlicher Raum mit Datenübertragung und Mobilfunk“	90
6.1.5.	Expositionsszenario „öffentlicher Raum einschließlich induktivem Laden von Elektrofahrzeugen“	96

6.1.6.	Exposition durch einzelne HF-Quellen im Haushalt	98
6.2.	Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse der Expositionsszenarien	100
7.	Handlungsempfehlungen	101
8.	Zusammenfassung	102
	Literaturverzeichnis	103

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Beispielbild eines Mobiltelefons	15
Abbildung 2-2:	Beispielbild eines DECT-Produktes (Schnurlostelefon)	16
Abbildung 2-3:	Beispielbild eines WLAN-Routers	18
Abbildung 2-4:	Beispielbild einer Bluetooth-Tastatur, Maus und USB-Adapter	20
Abbildung 2-5:	Beispielbild für ein Babyphone	21
Abbildung 2-6:	Beispielbild eines Smart-Home Gebäudes mit vernetzten Geräten	23
Abbildung 2-7:	Beispielbild eines Mikrowellenherdes	25
Abbildung 2-8:	Beispielbild eines einzeln stehenden Induktionskochfeldes	26
Abbildung 2-9:	Beispielbild für eine induktive Ladestation	28
Abbildung 2-10:	Beispielbild für E-Bus auf der Induktionsladestation	30
Abbildung 3-1:	Vergleich der Referenzwerte der ICNIRP-Empfehlungen von 1998 und 2010	39
Abbildung 6-1:	Schematische Darstellung der Quellen und ihrer Anordnung im Expositionsszenario „Wohnbereich“	71
Abbildung 6-2:	Prozentuale Grenzwertausschöpfung durch die verschiedenen Quellen im Expositionsszenario „Wohnbereich“	73
Abbildung 6-3:	Schematische Darstellung der Quellen und ihrer Anordnung im Expositionsszenario „Wohnbereich – worst-case“	74
Abbildung 6-4:	Prozentuale Grenzwertausschöpfung durch die verschiedenen Quellen im Expositionsszenario „Wohnbereich – worst-case“	76
Abbildung 6-5:	Schematische Darstellung der Quellen und ihrer Anordnung im Expositionsszenario „häuslicher Arbeitsbereich“	78
Abbildung 6-6:	Prozentuale Grenzwertausschöpfungen durch die verschiedenen Quellen im Expositionsszenario „häuslicher Arbeitsbereich“	80
Abbildung 6-7:	Schematische Darstellung der Quellen und ihrer Anordnung im Expositionsszenario „häuslicher Arbeitsbereich – worst-case“	81
Abbildung 6-8:	Prozentuale Grenzwertausschöpfungen durch die verschiedenen Quellen im Expositionsszenario „häuslicher Arbeitsbereich – worst-case“	83
Abbildung 6-9:	Schematische Darstellung der Quellen und ihrer Anordnung im Expositionsszenario „häuslicher Küchenbereich“	85
Abbildung 6-10:	Prozentuale Grenzwertausschöpfungen durch die verschiedenen Quellen im Expositionsszenario „häuslicher Küchenbereich“	87
Abbildung 6-11:	Schematische Darstellung der Quellen und ihrer Anordnung im Expositionsszenario „häuslicher Küchenbereich – worst-case“	88
Abbildung 6-12:	Prozentuale Grenzwertausschöpfungen durch die verschiedenen Quellen im Expositionsszenario „häuslicher Küchenbereich – worst-case“	90
Abbildung 6-13:	Schematische Darstellung der Quellen und ihrer Anordnung im Expositionsszenario „öffentlicher Raum mit Datenübertragung und Mobilfunk“	91

Abbildung 6-14:	Prozentuale Grenzwertausschöpfungen durch die verschiedenen Quellen im Expositionsszenario „öffentlicher Raum mit Datenübertragung und Mobilfunk“	93
Abbildung 6-15:	Schematische Darstellung der Quellen und ihrer Anordnung im Expositionsszenario „öffentlicher Raum mit Datenübertragung und Mobilfunk – worst-case“	94
Abbildung 6-16:	Prozentuale Grenzwertausschöpfungen durch die verschiedenen Quellen im Expositionsszenario „öffentlicher Raum mit Datenübertragung und Mobilfunk – worst-case“	96

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Technische Daten: Mobiltelefon	15
Tabelle 2-2:	Technische Daten: DECT	17
Tabelle 2-3:	Technische Daten: WLAN	19
Tabelle 2-4:	Technische Daten: Bluetooth	20
Tabelle 2-5:	Technische Daten: Babyphone	22
Tabelle 2-6:	Technische Daten: Smart-Home Geräte	24
Tabelle 2-7:	Technische Daten: Mikrowellenherd	25
Tabelle 2-8:	Technische Daten: Induktionsherd	27
Tabelle 2-9:	Technische Daten: Induktives Laden Elektrokleingeräte	29
Tabelle 2-10:	Technische Daten: Induktives Laden E-Fahrzeuge	30
Tabelle 3-1:	Basisgrenzwerte für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder nach (ICNIRP 1998)	33
Tabelle 3-2:	Referenzwerte (ungestörte Mittelwerte) für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder nach (ICNIRP 1998)	34
Tabelle 3-3:	Referenzwerte für zeitlich variierende Kontaktströme von leitfähigen Objekten nach (ICNIRP 1998)	35
Tabelle 3-4:	Basisgrenzwerte für elektrische und magnetische Wechselfelder nach (ICNIRP 2010)	37
Tabelle 3-5:	Referenzwerte (ungestörte Mittelwerte) für elektrische und magnetische Wechselfelder nach (ICNIRP 2010)	38
Tabelle 3-6:	Basisgrenzwerte für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder (0 Hz — 300 GHz) nach 1999/519/EG	40
Tabelle 3-7:	Grenzwerte der 26. BImSchV für die elektrische Feldstärke und magnetische Flussdichte	43
Tabelle 3-8:	Grenzwerte der 26. BImSchV (quadratisch über 6-Minuten-Intervalle gemittelt)	44
Tabelle 5-1:	Ausschöpfungen des Grenzwerts der Leistungsflussdichte in fünf untersuchten häuslichen Situationen	54
Tabelle 5-2:	Ermittelte maximale Sendeleistungen und SAR-Werte für das GSM-System im Vorhaben (Georg et al. 2005)	57
Tabelle 5-3:	Ermittelte SAR-Werte in verschiedenen Nutzungsszenarien	61
Tabelle 5-4:	Ermittelte magnetische Flussdichten und elektrische Feldstärken bei Lampen und weiteren Geräten	68
Tabelle 6-1:	Magnetische Flussdichten, elektrische Feldstärken und Leistungsflussdichten im Expositionsszenario „Wohnbereich“	72
Tabelle 6-2:	Leistungsflussdichten und SAR-Werte im Expositionsszenario „Wohnbereich – worst-case“	75
Tabelle 6-3:	Leistungsflussdichten und SAR-Werte im Expositionsszenario „häuslicher Arbeitsbereich“	79
Tabelle 6-4:	Leistungsflussdichten und SAR-Werte im Expositionsszenario „häuslicher Arbeitsbereich – worst-case“	82

Tabelle 6-5:	Magnetische Flussdichten, Leistungsflussdichten und SAR-Werte im Expositionsszenario „häuslicher Küchenbereich“	86
Tabelle 6-2:	Leistungsflussdichten und SAR-Werte im Expositionsszenario „Wohnbereich – worst-case“	89
Tabelle 6-7:	Leistungsflussdichten und SAR im Expositionsszenario „öffentlicher Raum mit Datenübertragung und Mobilfunk“	92
Tabelle 6-8:	Leistungsflussdichten und SAR-Werte im Expositionsszenario „öffentlicher Raum mit Datenübertragung und Mobilfunk – worst-case“	95
Tabelle 6-9:	Abschätzung von Mindest- und Vorsorgeabständen für einzelne HF-Quellen	99

Zusammenfassung

Mit der rasanten Digitalisierung nahezu aller Bereiche des gesellschaftlichen Lebens, die gleichzeitig mit einer starken Nutzung mobil einzusetzender Technologien verbunden ist, haben Zahl und Intensität elektromagnetischer Felder in den vergangenen Jahren erheblich zugenommen. Es erfolgt weiterhin ein Ausbau der digitalen Infrastruktur, aber auch ein Ausbau des Stromnetzes und eine Forcierung der Elektromobilität (z. B. drahtlose Übertragung von Strom via Induktionsmagnetfeldern). Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) hat vor diesem Hintergrund das Öko-Institut e.V. mit einer systematischen Beschreibung der EMF-Emissionen elektrischer Geräte und Anlagen beauftragt, wobei für bestimmte Expositionsszenarien Abschätzungen der HF-Exposition vorzunehmen waren.

Aufbauend auf einer Beschreibung der Quellen, der Darlegung von Referenz- und Grenzwerten sowie einer Auswertung bereits vorliegender Untersuchungen zu Expositionsszenarien der Bevölkerung wurden drei Expositionsszenarien im Haushalt (Wohnbereich, Arbeitsbereich und Küchenbereich) sowie zwei Expositionsszenarien im öffentlichen Raum entwickelt und für diese jeweils unter „ungünstigen Annahmen“ sowie im „worst-case“ HF-Expositionen abgeschätzt.

Trotz der sehr ungünstigen Expositionsannahmen wurden in den untersuchten Expositionsszenarien die Grenzwerte der magnetischen Flussdichte, der Leistungsflussdichte oder der SAR im Allgemeinen deutlich unterschritten. Viele der im Haushalt eingesetzten Funkgeräte weisen so niedrige typische Sendeleistungen auf, dass selbst bei direktem Kontakt mit Personen keine Grenzwertüberschreitung möglich ist. Relativ hohe Expositionen sind durch Induktionsherde sowie durch am Körper eingesetzte Endgeräte (Mobiltelefon, Tablet etc.) möglich. Zweitens dominieren auch bei weitem die HF-Exposition im öffentlichen Raum. Dies konnte auch durch eine vergleichende Abschätzung von Mindestabständen (Referenzwert zu 100 % ausgeschöpft) und Vorsorgeabständen (Referenzwert zu 1 % ausgeschöpft) von den einzelnen HF-Quellen gezeigt werden.

Hinsichtlich einer HF-Exposition im öffentlichen Raum durch induktives Laden von Elektrofahrzeugen, lässt sich auf dem derzeitigen Kenntnisstand noch keine Abschätzung machen. Sicher ist aber, dass das induktive Laden von Elektrofahrzeugen mit relativ hohen HF-Expositionen verbunden sein kann, wenn der HF-Problematik bei der weiteren technischen Entwicklung keine besondere Aufmerksamkeit geschenkt wird. Es wird daher empfohlen, hierzu weitere, die Entwicklung der Technik begleitende, Untersuchungen vorzunehmen.

1. Einleitung

Der Themenkomplex elektromagnetische Felder (EMF) umfasst prinzipiell sehr viele unterschiedliche Aspekte – so etwa den gesamten Problembereich der Hochfrequenz-EMF (HF-EMF) und auch die möglichen Auswirkungen der alltäglichen Niederfrequenz-EMF (NF-EMF) der Stromnetze sowie der elektrischen Geräte mit den jeweiligen diversen Funktionen im privaten und öffentlichen Bereich auf die menschliche Gesundheit.

Thermische Effekte von EMF sind bekannt und unstrittig. Die Grenzwerte sind so festgelegt, dass gesundheitliche Auswirkungen durch solche Effekte verhindert werden. Nichtthermische Wirkungen und deren mögliche gesundheitliche Auswirkungen bei niedrigen Intensitäten (unterhalb der Grenzwerte zur Vermeidung thermischer Effekte) von EMF werden dagegen zum Teil kontrovers diskutiert. Nichtthermische Auswirkungen nichtionisierender Strahlung niederer und hoher Frequenzen auf lebende Organismen sind seit Jahren Gegenstand intensiver Forschungen. Die bisherigen Befunde sind nicht eindeutig und konsistent, so dass bisher kein wissenschaftlicher Nachweis von nichtthermischen Auswirkungen erfolgt ist. Die Forschungsergebnisse werden aber unterschiedlich und teils konträr interpretiert.

Zugleich bilden die als gesichert geltenden wissenschaftlichen Befunde zu biologischen Wirkungsschwellen bei technisch erzeugter elektromagnetischer Strahlung, unterhalb derer keine (identifizier- oder messbaren) Wirkungen auftreten, die Grundlage für die Grenzwertempfehlungen der internationalen Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) sowohl für HF-EMF als auch für NF-EMF. Sie bilden seit 1999 auch den Hauptinhalt der EU-Ratsempfehlung über die Begrenzung der Exposition der Öffentlichkeit durch EMF als Schutz- und Vorsorgemaßnahme. Nationale und internationale Expertengruppen und Institutionen – wie die Weltgesundheitsorganisation (WHO) oder die Strahlenschutzkommission (SSK) und das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) in Deutschland – orientieren sich in Grenzwertfragen an diesen Empfehlungen.

Mit der rasanten Digitalisierung nahezu aller Bereiche des gesellschaftlichen Lebens, die gleichzeitig mit einer starken Nutzung mobil einzusetzender Technologien verbunden ist, haben Zahl und Intensität elektromagnetischer Felder in den vergangenen Jahren erheblich zugenommen. Es erfolgt weiterhin ein Ausbau der digitalen Infrastruktur, aber auch ein Ausbau des Stromnetzes und eine Forcierung der Elektromobilität (und dabei z. B. drahtlose Übertragung von Strom via Induktionsmagnetfeldern). HF-EMF sind Grundlage digitaler, kabelloser Kommunikation z. B. zwischen WLAN-Routern und Rechnern, Tablets, Mobiltelefonen etc. im gesamten öffentlichen Raum und in praktisch allen privaten Haushalten. Dabei generieren viele verschiedene WLAN-Netze, Funksendemasten sowie Stromnetze mehrerer Spannungsebenen gleichzeitig diverse EMF im HF- und NF-Bereich.

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) hatte vor diesem Hintergrund Untersuchungen zu Fragen der gesundheitlichen Auswirkung sowie zu EMF-Emissionen ausgeschrieben. Der vorliegende Bericht bezieht sich auf das Themenfeld 3 „Systematische Beschreibung der EMF-Emissionen elektrischer Geräte und Anlagen“ dieser Ausschreibung.

Zielsetzung des Gutachtens war zunächst eine systematische Beschreibung der Quellen elektromagnetischer Felder. Diese Beschreibung erfolgt in Kapitel 2. In Kapitel 3 werden Referenz- und Grenzwerte dargestellt, auf die im Weiteren bei der Bewertung von HF-Expositionen zurückgegriffen wird. Für das Gutachten relevante Inhalte von Stellungnahmen und Empfehlungen der SSK sind in Kapitel 4 dargestellt. In Kapitel 5 werden Studien und deren Ergebnisse aus dem Deutschen Mobilfunk-Forschungsprogramm sowie weiterer Forschungsarbeiten vorgestellt, die mit den hier zu behandelnden Fragestellungen in Zusammenhang stehen. In Kapitel 6 werden Expositionsszenarien abgeleitet und für diese jeweils unter „ungünstigen Annahmen“ sowie im „worst-

case“ HF-Expositionen abgeschätzt. Sich ergebende Handlungsempfehlungen sind in Kapitel 7 aufgeführt.

2. Übersicht potenzieller EMF-Quellen

Im folgenden Kapitel werden verschiedene EMF-Quellen beschrieben. Dabei werden jeweils die Funkstandards, Anwendungen, Verbreitung und Trends sowie technische Daten zusammengestellt.

2.1. Mobiltelefon

Name des Funkstandards

Mobilfunk 2G (GSM), Mobilfunk 3G (UMTS) und Mobilfunk 4G (LTE, IEEE 802.15.4)

Produkte und Anwendungsfälle

Mobiltelefone sind Telefongeräte, die zur drahtlosen Telefonie genutzt werden. Sie übertragen Sprachsignale über eine bidirektionale Funkverbindung zu einer Mobilfunk-Basisstation, wo das Signal umgewandelt und in das allgemeine Telefonnetz (Festnetz) einspeist wird. Mit Mobiltelefonen sind Telefonverbindungen sowohl zwischen Mobiltelefonen und Festnetztelefonen als auch zwischen verschiedenen Mobiltelefonen möglich. Mobiltelefone sind mit einer wechselbaren SIM-Karte zur individuellen Teilnehmererkennung ausgestattet. Klassische Mobiltelefone (sogenannte „Handys“) sind mit einer numerischen Tastatur ausgestattet und haben einen geringeren Funktionsumfang als die moderneren „Smartphones“, die über ein berührungsempfindliches Display verfügen. Mobiltelefone können neben der Telefonfunktion weitere Funktionen unterstützen, wie z. B. das Übertragen von Textnachrichten (SMS), Nutzung des mobilen Internets, Ausführung von Programmen (sogenannten „Apps“) sowie Foto-, Video- und Tonaufnahmen (RAL 2017).

Es gibt derzeit drei digitale Mobilfunkstandards (GSM, UMTS und LTE), die unterschiedliche Frequenzbänder und Methoden der Datenübertragung nutzen. LTE (Long Term Evolution) ist der neueste Standard und nutzt alle Mobilfunkfrequenzbänder von 700 bis 2700 MHz. Der Sendebereich einer Basisstation wird als Funkzelle bezeichnet. Zur Erhöhung ihrer Akkulaufzeit reduzieren Mobiltelefone automatisch ihre Sendeleistung, sobald die Qualität der Verbindung steigt. D. h. in der Nähe einer Basisstation und ungestörter Funkverbindung kommt das Endgerät mit einer deutlich niedrigeren Sendeleistung aus, als am Rand der jeweiligen Funkzelle bzw. bei gestörter Funkverbindung (BAG 2016e; BNetzA 2010c).

Neben den Mobilfunkstandards haben Smartphones in der Regel noch die Funkstandards WLAN und Bluetooth integriert. Die Sendeleistung dieser Funkstandards trägt damit zur gesamten elektromagnetischen Strahlung dieser Geräte bei (BAG 2016d).

Für alle Mobiltelefone ist eine maximale Spezifische Absorptionsrate (SAR) von 2 W/kg vorgeschrieben. Die SAR beschreibt die vom Körper absorbierte Energiemenge durch elektromagnetische Felder und ist abhängig von der Sendeleistung des Gerätes, vom Messabstand zur Körperoberfläche, aber auch von der Ausrichtung und Design der integrierten Antenne (BAG 2016e; BfS 2017b).

Abbildung 2-1: Beispielbild eines Mobiltelefons

Quelle: pixabay / cmart29 (CC0), <https://pixabay.com/de/telefon-iphone-schwarz-handy-mobil-1830479/>

Verbreitung und Trends

Auf 100 Deutsche kommen 95,5 Mobiltelefone (Destatis 2017b). Dabei handelt es sich zu 61 % um Smartphones (GfK 2016a). Der Smartphone-Markt wächst weiter (GfK 2016b). Zukünftig wird sich die Datenübertragungsrate von Mobiltelefonen mit dem neuen Standard LTE-Advanced noch weiter erhöhen (BAG 2016e).

Technische Daten

Tabelle 2-1: Technische Daten: Mobiltelefon

Frequenzbereiche	700, 800, 1.800, 2.100 und 2.600 MHz
Maximal zulässige Sendeleistung (NTP)	0,25 W
Die nominale Sendeleistung (NTP) kann vereinfachend mit der EIRP gleichgesetzt werden	
Typische Strahlungsleistung	0,001 - 0,01 W
Weitere technische Anforderung	SAR ≤ 2 W/kg

Quelle: BfS 2017b, BNetzA 2010c

2.2. DECT

Name des Funkstandards

DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications)

Produkte und Anwendungsfälle

DECT ist ein eingetragenes Warenzeichen des Europäischen Instituts für Telekommunikationsnormen (ETSI). Es bezeichnet einen Funkstandard für die bidirektionale Übertragung von digitalen Signalen über kurze Entfernungen. Der Standard wird insbesondere für die digitale Schnurlostelefonie (DECT-Telefonie) zur Übertragung von Audiodaten innerhalb von Gebäuden eingesetzt, ist aber prinzipiell auch für die Übertragung anderer digitaler Informationen geeignet. Mit seiner maximalen Sendeleistung von 250 mW kann das Funksignal im Freien bis zu 500 Metern überwinden. Die mittlere Sendeleistung im Normalbetrieb beträgt 10 mW (ETSI 2017).

Ein DECT-System besteht aus einer DECT-Basisstation und einem oder mehreren DECT-Endgeräten (z. B. Schnurlostelefonen). Die Endgeräte tauschen ihre Daten jeweils sternförmig mit der Basis-Station aus (Stern-Topologie). Die DECT-Basisstation kann ein eigenständiges Gerät sein oder sie ist in einer Telefonanlage oder beispielsweise einem DSL-Router integriert (BNetzA 2015b).

Typische DECT-Produkte sind Schnurlostelefone, Türsprechanlagen, Babyphone (siehe auch Kapitel 2.5), Konferenztelefone, schnurlose Headsets und Überwachungskameras. Weitere DECT-Produkte sind Produkte zur Heimautomation wie funkgesteuerte Steckdosenleisten, Thermostatventile und Bewegungssensoren. Diese arbeiten mit dem DECT kompatiblen DECT ULE (Ultra Low Energy) Standard, der mit Hilfe kurzzeitiger Sendeimpulse den Energieverbrauch stark reduziert (ETSI 2013, 2013).

Abbildung 2-2: Beispielbild eines DECT-Produktes (Schnurlostelefon)



Quelle: flickr / Justus Blümer (CC BY 2.0), <https://www.flickr.com/justusbluemer/6045497868/>

Verbreitung und Trends

Weltweit arbeitet ein Anteil von 73 % aller Schnurlostelefone mit dem DECT-Standard (ETSI 2017). Durch die ständige Weiterentwicklung des Standards (z. B. Voice-over-IP-Telefonie, CAT-iq) wird er auch zukünftig eine hohe Marktrelevanz haben.

Technische Daten

Tabelle 2-2: Technische Daten: DECT

Frequenzbereiche	1.880 – 1.900 MHz
Maximal zulässige Sendeleistung (NTP)	0,25 W
Die nominale Sendeleistung (NTP) kann vereinfachend mit der EIRP gleichgesetzt werden	
Mittlere Sendeleistung bei Datenübertragung	0,010 W
Mittlere Sendeleistung im Bereitschaftsmodus	0,0025 W
Zeitliches Strahlungsprofil	Solange Telefongespräche geführt werden: Kontinuierliches abwechselndes Senden und Empfangen in Datenpaketen einer Dauer von 10 ms auf der gleichen Frequenz (TDD, time division duplex). Im Bereitschaftsmodus reduziert sich die mittlere Sendeleistung durch kürzere Sendepulse auf rund ein Viertel (2,5 mW).

Quellen: ETSI 2016, ETSI 2017, BNetzA 2015a, BNetzA 2015b

2.3. WLAN

Name des Funkstandards

WLAN 2,4 GHz (IEEE 802.11) und WLAN 5 GHz (IEEE 802.11a)

Produkte und Anwendungsfälle

Wireless Local Area Network (WLAN) ist ein Funkstandard für die Datenübertragung in lokalen Netzwerken. In der Regel besteht solch ein Netzwerk aus einer koordinierenden Einheit, dem Wireless Access Point (WAP) und einem oder mehreren Geräten, die sich sternförmig dem Wireless Access Point verbinden (Stern-Typologie). Typische Gerätekombinationen sind dabei ein Router, der die Rolle des WAP übernimmt und mobile Endgeräte, wie Notebooks, Tablets oder Smartphones. Der Funkstandard WLAN ist weit verbreitet und wird von vielen verschiedenen Geräten unterstützt, wie beispielsweise von Drucken, Überwachungskameras, mobilen Sprachassistenten und Geräten zur Heimautomation (BAG 2016f).

Die maximal zulässige Sendeleistung von WLAN beträgt für den Frequenzbereich um die 2,4 GHz 100 mW (EIRP). Für den Bereich um die 5 GHz sind bis zu 200 mW (EIRP) zulässig (BNetzA 2010a, 2013b). In der Praxis schöpfen Router und WLAN-fähige Geräte diese Maximalleistung nicht aus. Typische Sendeleistungen liegen zwischen 1 und 17 mW (SSK 2013).

Abbildung 2-3: Beispielbild eines WLAN-Routers



Quelle: pixabay / andibreit (CC0), <https://pixabay.com/de/wlan-wifi-netzwerk-modem-online-1494537/>

Verbreitung und Trends

Gemäß einer Umfrage des Marktforschungsinstitutes OnePoll aus dem Jahr 2017 nutzen derzeit etwa 92 % der deutschen Haushalte einen eigenen WLAN-Zugang. Weitere 4 % gehen über ein gemeinsam genutztes WLAN online (OnePoll 2017).

Als Zugangsgerät ins WLAN nutzten laut Statistischem Bundesamt in Deutschland im 1. Quartal 2017 rund 35 Millionen Nutzer das Smartphone und 22 Millionen Nutzer tragbare Computer wie Tablets, Netbooks oder Laptops (Destatis 2017c).

Mit Blick auf die steigende Ausstattung von Haushalten mit Informationstechnik (internetfähige Fernsehgeräte, Internet of Things, Sprachassistenten) muss von einer weiteren Zunahme der WLAN-Nutzung in den nächsten Jahren ausgegangen werden.

Technische Daten

Tabelle 2-3: Technische Daten: WLAN

Frequenzbereiche	(a): 2.400,0 – 2.483,5, (b): 5.150 – 5.725 MHz
Maximal zulässige Strahlungsleistung	(a): 0,1 W, (b): 0,2 W
Info zur Strahlungsleistung	EIRP
Typische Strahlungsleistung	0,001 - 0,017 W
Anmerkung	Ein WLAN-Netzwerk besteht aus einem zentralen Wireless Access Point und mindestens einem WLAN-Client

Quellen: BAG 2016f; BNetzA 2010a, 2013b

2.4. Bluetooth

Name des Funkstandards

Bluetooth (IEEE 802.15.1)

Produkte und Anwendungsfälle

Der Name Bluetooth ist ein eingetragenes Warenzeichen der Bluetooth Special Interest Group (Bluetooth SIG). Der Funkstandard ist durch die internationale Norm IEEE 802.15.1 definiert. Bluetooth dient der Datenübertragung über kurze Distanzen und eignet sich daher dazu, elektronische Geräte kabellos miteinander zu verbinden. Bluetooth-Geräte verbinden sich von Gerät zu Gerät zu sogenannten „Ad hoc“-Netzwerken. Dadurch ist es möglich Bluetooth-Geräte, wie Headsets, mobile Lautsprecher, Eingabegeräte oder Gesundheits- und Fitnesssensoren ohne größeren Konfigurationsaufwand beispielsweise an Computer, Smartphones oder Tablets anzukoppeln.

Bluetooth nutzt das gleiche Frequenzband wie WLAN, weist aber eine begrenzte Reichweite auf. Die Reichweite wird durch die Leistungsklasse des Bluetooth-Gerätes bestimmt. Geräte mit der Leistungsklasse 1 senden mit einer maximalen Leistung (EIRP) von 100 mW und erreichen damit bis zu 100 Meter. Bluetooth-Sender der Leistungsklasse 2 senden mit 2,5 mW (EIRP) und erreichen maximal 40 Meter. Die kleinste Leistungsklasse ist die Klasse 3 mit nur 1 mW und einer Reichweite von maximal 10 Metern (BAG 2016b).

Abbildung 2-4: Beispielbild einer Bluetooth-Tastatur, Maus und USB-Adapter



Quelle: flickr / Zaenani Trianto (CC BY 2.0), <https://www.flickr.com/photos/zzet/8908988934>

Verbreitung und Trends

Bluetooth-Schnittstellen sind derzeit in allen gängigen Notebooks, Tablets und Smartphones integriert und stellen die am weitesten verbreitete Schnittstelle für Kurzstreckenverbindung dar. Nach Angabe der Bluetooth Special Interest Group werden weltweit jährlich 3,4 Milliarden Bluetooth-Geräte produziert, also etwa ein Bluetooth-Gerät pro zwei Weltenbürger und Jahr. Aktuelle Trends sind insbesondere Audioanwendungen, d. h. Kopfhörer und tragbare Lautsprecher. Außerdem wird in dem wachsenden Markt an vernetzten Haushaltsgeräten (Smart-Home) ein weiterer Wachstumsmarkt gesehen (Bluetooth SIG 2017b).

Technische Daten

Tabelle 2-4: Technische Daten: Bluetooth

Frequenzbereiche	2.400 – 2.483,5
Maximal zulässige Strahlungsleistung	1: 0,1 W, 2: 0,025 W, 3: 0,001 W
Info zur Strahlungsleistung	EIRP
Zeitliches Strahlungsprofil	Fast Frequency Hopping, 1600 Frequenzwechsel pro Sekunde
Typische Strahlungsleistung	0,001 W

Quellen: BAG 2016b; BNetzA 2010b

2.5. Babyphone

Produkte und Anwendungsfälle

Ein Babyphone dient der akustischen Raumüberwachung für Babyschlafzimmer. Dem Babyphone zugeordnet ist eine Empfangseinheit, das auf Elternseite das Sendesignal empfängt. Sobald das Baby schreit, geht die Sendeeinheit des Babyphones in den kontinuierlichen Sendemodus über und überträgt das Audiosignal. Hierzu ist es mit einem sprachgesteuerten Einschalter (VOX–Voice Operated Exchange) ausgestattet. Solange das Baby schläft bzw. nicht schreit, sendet das Babyphone im Abstand von wenigen Sekunden Testsignale, die dem Empfangsgerät anzeigen, dass sich das Gerät noch innerhalb des Empfangsbereichs befindet bzw. noch betriebsbereit ist (BAG 2016a; BNetzA 2013a).

Für Babyphone wird von der Bundesnetzagentur das Frequenzband 27 – 27,2 MHz bereitgestellt. Die maximal zulässige Sendeleistung (ERP) beträgt in diesem Frequenzband 50 mW (BNetzA 2013a). Um daraus eine Strahlungsleistung zu berechnen muss zusätzlich noch der Antennengewinn berücksichtigt werden, der durch die Bündelung der Energie zustande kommt. Geht man von einem Antennengewinn von 2,15 dBi (Faktor 1,64) aus, ergibt sich eine Strahlungsleistung von 82 mW. Prinzipiell können Babyphones aber auch andere Frequenzbereiche nutzen, die als lizenzfreie ISM-Bänder (siehe nachfolgendes Kapitel) zur Verfügung gestellt werden (BAG 2016a). In dieser Untersuchung wird davon ausgegangen, dass für Babyphones die von der Bundesnetzagentur vorgesehenen Frequenzbereiche genutzt werden.

Abbildung 2-5: Beispielbild für ein Babyphone



Quelle: flickr / Kai Schreiber (CC BY-SA 2.0), <https://www.flickr.com/photos/genista/488532642>

Verbreitung und Trends

Die Verbreitung der Produktgruppe Babyphones in deutschen Haushalten konnte im Rahmen dieser Studie nicht ermittelt werden. Die Produktgruppe ist in Online-Kaufhäusern aber immer noch stark vertreten (z. B. 342 Treffer für „babyfone“ bei www.idealo.de, Zugriff am 1.12.2017). Der

Markt verändert sich jedoch dahingehend, dass Babyphones zusehends auch eine Übertragung von Videosignalen aus dem Kinderzimmer ermöglichen. Damit verbunden ist eine kontinuierliche Bildübertragung, die nicht mehr sprachgesteuert gestartet wird. Als Funkstandards kommen für die Videoübertragung auch WLAN, DECT und Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) Sendeverfahren im 2,45 GHz-Bereich zum Einsatz. Außerdem werden Smartphone-Apps genutzt, die ein Babyphone durch ein Mobilfunkgerät ersetzen (Stiftung Warentest 2015).

Technische Daten

Tabelle 2-5: Technische Daten: Babyphone

Frequenzbereiche	27 - 27,2 MHz
Maximal zulässige Sendeleistung (ERP)	0,05 W
Durch den Antennengewinn kann die Strahlungsleistung (EIRP) um einen Faktor von 1,64 höher als die Sendeleistung (ERP) liegen.	
Typische Strahlungsleistung	0,082 W
Anmerkung	VOX: Das Gerät sendet nur bei Tonsignal

Quellen: BNetzA 2013a

2.6. Smart-Home Geräte

Name des Funkstandards

ZigBee, XBee (IEEE 802.15.4), Z-Wave (ITU-T Standard G.9959), HomeMatic, EnOcean (ISO/IEC 14543-3-10), KNX-RF u. a.

Produkte und Anwendungsfälle

Smart-Home ist eine übergeordnete Bezeichnung für verschiedene Ausprägungen der Heimvernetzung und Gebäudeautomation. Smart-Home Anwendungen ermöglichen die Fernsteuerung und Überwachung der Gebäudetechnik (z. B. Licht, Klimaanlage, Heizung, Jalousien, Kameras, Türöffner) und verschiedener Haushaltsgeräte (z. B. Fernsehgerät, Kaffeemaschine, Waschmaschine, Kühlschrank) sowie die Kombination mit weiteren Sensoren und Messeinrichtungen (z. B. Energiemessgeräten, Temperatur, Feuchtigkeit, Fenster- und Türkontakte). Smart-Home Geräte können einen Beitrag zur Energieeffizienz, Komfortsteigerung und Sicherheit in Haushalten leisten (DG Energy 2017).

Für Smart-Home Geräte gibt es eine Vielzahl an Funkstandards, die sich derzeit dynamisch entwickeln. Gemeinsam ist diesen Funkstandards, dass sie als Frequenzband die ISM-Frequenzen nutzen, die für Industrie, Wissenschaft und Medizin (Industrial, Scientific and Medical – ISM) eingerichtet wurden (BNetzA 2015c). Gemäß den Spezifikationen von IEEE 802.15.4 wird in Europa für ZigBee, XBee und vergleichbare Smart-Home Funkstandards der Frequenzbereich 868–868,6 MHz genutzt (Salman et al. 2010). Stellvertretend für alle Smart-Home Funkstandards wurde dieses Frequenzband für die nachfolgenden Untersuchungen ausgewählt.

Die Smart-Home Sender haben eine maximal zulässige Sendeleistung von 25 mW. Da sie in der Regel batteriebetrieben sind, oft nur mit Knopfzellen, gibt es für die Entwickler und Hersteller der Geräte eine starke Motivation, die Sendeleistung so gering wie möglich zu halten. Typische Sendeleistungen von Smart-Home Geräten liegen bei 1 mW.

Abbildung 2-6: Beispielbild eines Smart-Home Gebäudes mit vernetzten Geräten



Quelle: pixabay / Pixaline (CC0), <https://pixabay.com/de/smart-home-haus-technik-multimedia-2005993/>

Verbreitung und Trends

Nach einer Umfrage des Connected Living e.V. im Jahr 2017 bei 970 Personen in Deutschland war der Begriff „Smart-Home“ 80 % der Befragten bekannt, 60 % besaßen ein oder mehrere Smart-Home Geräte. Als solche Geräte wurden bei der Marktstudie auch Fernseher, Musikanlagen, Digitale Assistenten und Spielekonsolen verstanden, die mit dem Internet verbunden sind. Geräte, die mit der Energietechnik der Gebäude (Beleuchtung, Elektrik, Temperatur, Beschattung) verbunden sind, sind dagegen nur zu 25 % vertreten. Weitere Anwendungsfälle der Smart-Home Nutzer stellen Sicherheitstechnik mit 21 %, Hausgeräte mit 19 % und Sonstige (Gartengeräte, Badprodukte, Schlafprodukte) mit 14 % dar. Bezogen auf alle Befragten ist jeder Haushalt im Durchschnitt mit 2,5 smarten Geräten ausgestattet. Die Autoren der Marktstudie bewerten die Verbreitung von smarten Geräten in deutschen Haushalten als relativ niedrig, erwarten jedoch eine steigende Verbreitung durch Technologieverbesserungen und leichtere Bedienbarkeit der Geräte (Connected Living 2017).

Technische Daten

Tabelle 2-6: Technische Daten: Smart-Home Geräte

Frequenzbereiche	868 - 868,6 MHz
Maximal zulässige Sendeleistung (ERP)	0,025 W
Durch den Antennengewinn kann die Strahlungsleistung (EIRP) um einen Faktor von 1,64 höher als die Sendeleistung (ERP) liegen.	
Typische Strahlungsleistung	0,001 W
Anmerkung	Smart-Home Geräte werden in der Regel zu mehreren mit einer gemeinsamen Steuereinheit eingesetzt.

Quellen: BNetzA 2014

2.7. Mikrowellenherd

Produkte und Anwendungsfälle

Mikrowellenherde werden zum schnellen Erhitzen von Speisen, aber auch für andere Zwecke wie der industriellen Verschweißung von Polymeren oder der Anregung von Plasmen eingesetzt. Elektrisch schwach leitende Stoffe, z. B. Wasser in Lebensmitteln, nehmen die Strahlung auf und wandeln sie in Wärmeenergie um. Die polarisierten Ionen und Dipole werden in stetige Bewegung versetzt und erhitzen sich und das Gargut (BAG 2016d; Fraunhofer ICT 2017).

In Mikrowellenherden erzeugt ein Hochfrequenzgenerator, das Magnetron, die Mikrowellenstrahlung. Als Frequenzen eignen sich prinzipiell alle Hochfrequenzen, in Europa hat sich jedoch eine Frequenz von 2,45 GHz durchgesetzt. Über einen Hohlleiter (Metallrohr) wird die Mikrowellenstrahlung gebündelt vom Magnetron in den Garraum des Ofens geleitet. Dort reflektieren die Metallwände des Gehäuses und ein Drahtgitter in der Tür die Strahlen. Um zu verhindern, dass es zu Überlagerungen (Interferenzeffekten) kommt, wird die Strahlung über einen rotierenden Reflektorflügel (Rührer) im Gerät verteilt. Alternativ wendet ein Drehteller das Gargut und sorgt für gleichmäßige Erwärmung (BAG 2016d).

Haushaltsübliche Mikrowellengeräte haben eine Leistung von 300 bis 1.300 Watt. Der überwiegende Teil dieser Energie wird innerhalb des Faraday'schen Käfigs des Mikrowellenherdes gehalten und dringt nicht nach außen. Die Leckstrahlung des Mikrowellenherdes darf in einem Abstand von 5 cm max. 5 mW/cm² betragen, dies entspricht einem SAR-Wert von 2 W/kg. Als Leckstrahlung wird hochfrequente Strahlung bezeichnet, die durch mangelhafte Türdichtungen, Abnutzungen an Tür und Schloss oder anderen Defekten austritt (BAG 2016d; BfS 2012).

Abbildung 2-7: Beispielbild eines Mikrowellenherdes

Quelle: Samsung, <http://www.samsung.com/de/cooking-appliances/microwave-oven-grill-mg28f303tjs/>

Verbreitung und Trends

Mikrowellenherde sind in Deutschland heute in etwa 74 % aller Haushalte zu finden (Destatis 2017a). Das Küchengerät wird von den Herstellern immer wieder mit neuen Funktionen und Programmen bedacht. So übernimmt es mittlerweile Funktionen von Dampfgarern, Umluftherden oder Grills. In Zukunft werden Mikrowellenöfen noch mit mehr digitaler Funktionalität und interaktiver Vernetzung mit anderen Geräten ausgestattet sein (RP Online 2017).

Technische Daten

Tabelle 2-7: Technische Daten: Mikrowellenherd

Frequenzbereich	2.450 MHz
Heizleistung	300 bis 1.300 Watt
Maximal zulässige Leckstrahlung (Abstand 5 cm)	5 mW/cm ² (entspricht SAR = 2 W/kg)
Durchschnittliche Leckstrahlung (gebrauchtes Gerät, Abstand 5 cm)	0,41 mW/cm ²

Quellen: BAG 2016d

2.8. Induktionsherd

Produkte und Anwendungsfälle

Induktionsherde dienen der Zubereitung von Speisen, mit gleicher Funktionalität wie klassische Herde bzw. Kochfelder. Statt die Wärme der Heizplatte mit einem ohmschen Widerstand zu erzeugen, erzeugen Induktionskochfelder ein mittelfrequentes Magnetfeld (20–100 kHz). Dieses Mag-

netfeld durchdringt das Glaskeramikkochfeld ungehindert und trifft auf den elektrisch leitenden Topf- oder Pfannenboden. Im Kochgeschirr treten Wirbelströme auf, die bei geeigneten ferromagnetischen Materialien zu einer Erhitzung des Topfbodens führen. Da keine Heizplatte erwärmt werden muss, können Induktionskochfelder die Kochtöpfe vergleichbar schnell einem Gasherd erhitzen, was den Kochkomfort steigert (BAG 2016c).

Abbildung 2-8: Beispielbild eines einzeln stehenden Induktionskochfeldes



Quelle: flickr / Didriks (CC BY 2.0), <https://www.flickr.com/photos/dinnerseries/8556666861>

Verbreitung und Trends

In etwa 31 % aller deutschen Haushalte steht aktuell ein Induktionsherd (GfK 2017; gfu 2016). Besonders die flexible Induktion gewinnt bei Verbrauchern sukzessive an Bedeutung (GfK 2017). Neueste Trends offerieren Induktionsherde, deren Kochfelder sich über Bluetooth Low Energy (BLE) mit einem Tablet oder Smartphone verbinden und bedienen lassen (Bluetooth SIG 2017a; gfu 2017b). Eigens dafür entwickelte Apps bieten interaktive Unterstützung beim Kochen, indem sie bspw. Temperatur und Garzeit rezeptspezifisch am Herd anpassen (gfu 2017b). Mit Sensoren ausgestattete Herde sollen den Kochvorgang dabei überwachen oder die Füllmenge im Kochgeschirr ermitteln (gfu 2017a). Für den Dunstabzug werden ebenso neue Lösungen angeboten. Dieser ist z. B. als Muldenlüfter direkt in das Kochfeld integriert (MHK 2017). Insgesamt geht der Trend hin zu smarteren, großvolumigeren und effizienteren Geräten.

Technische Daten

Tabelle 2-8: Technische Daten: Induktionsherd

Frequenzbereiche	0,020 – 0,100 MHz
Heizleistung	pro Platte 1.200 bis 3.600 Watt
Maximal zulässige Strahlungsleistung (Abstand 30 cm)	6,25 µT

Quellen: BAG 2016c

2.9. Induktives Laden Elektrokleingeräte

Name des Funkstandards

Qi und AirFuel

Produkte und Anwendungsfälle

Mit induktiven Ladegeräten können mobile Elektrokleingeräte, die diesen Ladestandard unterstützen, wie Smartphones, Tablets oder elektrische Zahnbürsten, drahtlos geladen werden. Dafür wird das Gerät auf eine Ladestation gelegt oder gesteckt. Die Ladestation als Sender enthält eine Primärspule, die ein elektromagnetisches Wechselfeld im Frequenzbereich von 110 – 275 kHz ausstrahlt. Das Elektrokleingerät besitzt eine Empfängerspule (Sekundärspule), in der ein elektrischer Strom induziert wird und über eine Ladeelektronik den Akku im Kleingerät auflädt. Die beiden Spulen sind durch einen Luftspalt voneinander getrennt. Das Wirkprinzip entspricht dem eines Transformators. Die typische Entfernung zwischen Ladestation und mobilem Gerät beträgt 5 mm. Die Effizienz der Energieübertragung nimmt mit der Entfernung zwischen Primär- und Sekundärspule ab (FfE 2012; Zahner et al. 2017).

Es existieren derzeit zwei Industriestandards zur drahtlosen Energieübertragung für Kleingeräte: der Qi-Standard des „Wireless Power Consortium“ (WPC) und AirFuel der „AirFuel Alliance“. Die AirFuel Alliance ging im Jahr 2015 aus einem Zusammenschluss der „Alliance for Wireless Power“ (A4WP) und der „Power Matters Alliance“ (PMA) hervor. AirFuel verbindet zwei Ladestandards. *Rezence* auf Basis resonanter Kopplung und *Powermat*, das induktiv gekoppelt wird. Qi nutzt derzeit allein eine induktive Kopplung, ist aber deutlich weiter verbreitet und dominiert derzeit den Markt (QInside 2018a; Zahner et al. 2017).

Induktives Laden von Geräten ist weniger energieeffizient als das Aufladen über Kabel, da Verluste im Bereich der Spulen und deren Elektronik auftreten. Typische Wirkungsgrade des Energieübergangs vom Netzstrom (230 Volt Wechselstrom) zum Ladeeingang des Elektrokleingerätes liegen zwischen 46 % und 58 %. Kabelgebundenes Laden (USB-Ladegerät) weist dagegen Wirkungsgrade von 61 % bis 77 % auf (Siddabattula 2015 zitiert in Zahner et al. 2017). Weitere Verluste treten nach Abschluss der Batterieladung im Standby-Betrieb auf. Hier verbrauchen induktive Ladestationen im Vergleich zu kabel- bzw. steckergebundenen, konduktiven Ladesystemen rund doppelt so viel Energie. Liegt ein Gerät auf dem Lademodul auf, erhöht sich der Standby-Verlust sogar bis um das Dreifache (Zahner et al. 2017).

Induktive Ladestationen können nahezu unsichtbar in Möbel integriert oder als extra Geräte verwendet werden. Sie senden kontinuierlich ein Signal und prüfen, ob sich auf ihnen ein zu ladendes Gerät befindet, dessen Standard kompatibel ist und ob es geladen werden muss (QInside 2018a) (Zahner et al. 2017).

Abbildung 2-9: Beispielbild für eine induktive Ladestation



Quelle: IKEA, http://www.ikea.com/de/de/catalog/categories/departments/wireless_charging/30613/

Verbreitung und Trends

Das Wireless Power Consortium weist derzeit (Dezember 2017) 380 Mitglieder auf. Darunter sind namhafte Firmen wie Google, Apple, Canon, Asus, Nokia oder Toshiba (QInside 2018b). Die AirFuel Alliance hat mit derzeit 85 Mitgliedern deutlich weniger Zulauf (AirFuel Alliance 2018). Aber auch hier finden sich einflussreiche Namen wie Starbucks, 3M, Hewlett Packard, Sony oder Motorola. Etliche Firmen sind Teil beider Vereinigungen, so z. B. TDK, Samsung, Infineon, Dell, LG oder HTC.

Einige große Smartphone-Hersteller haben den Qi-Standard bereits heute in ihren Geräten integriert. So bieten Nokia seit dem Modell Lumia 930 (Mai 2014), Samsung seit dem Modell Galaxy S6 (April 2015) und Apple seit dem iPhone 8 (September 2017) integrierte Qi-Ladmodule (eigene Recherchen).

Nach den Vorstellungen von Disney Research soll induktives Laden zukünftig noch einfacher werden. Hierzu sollen ganze Räume mit einem Magnetfeld ausgestattet werden, um kleinere Geräte wie Smartphone und Ventilatoren induktiv zu laden. Im Verfahren, das die Forscher „Quasistatic Cavity Resonance (QSCR)“ nennen, wird in einem abgeschirmten Raum mit einer Kupfersäule in der Raummitte ein elektromagnetisches Feld aufgespannt. Dieses kann auf Sekundärspulen, die sich irgendwo im Raum befinden, kabellos eine elektrische Leistung von bis zu 1,9 kW übertragen. Nach Plänen der Forscher soll langfristig statt eines Metallraumes mit derzeit Aluminiumwänden eine leitfähige Wandfarbe zum Einsatz kommen (Chabalko et al. 2017; Reszel 2017).

Technische Daten

Tabelle 2-9: Technische Daten: Induktives Laden Elektrokleingeräte

Frequenzbereich	110 – 275 kHz
Ladeleistung	Typ. 5 – 15 W, in Einzelfällen bis zu 120 W
Maximal zulässige Strahlungsleistung (Abstand 30 cm)	6,25 µT

Quellen: BAG 2016c; Zahner et al. 2017

2.10. Induktives Laden E-Fahrzeuge

Produkte und Anwendungsfälle

Das Funktionsprinzip für induktives Laden von Elektrofahrzeugen ist ähnlich dem in Kapitel 2.9 beschriebenen für Elektrokleingeräte. Die elektromagnetische Primärspule befindet sich hier in der Fahrbahn, der Leitplanke oder unter dem Bodenbelag. Die Sekundärspule wird in den Fahrzeugboden oder das Nummernschild verbaut oder dort nachträglich integriert. Sie wandelt das erzeugte Magnetfeld wieder in elektrische Energie um und lädt damit den Akku des Elektrofahrzeugs. Als Ladeverfahren wird zwischen Normalladung mit regulärer Ladezeit und Schnellladung mit verkürzter Ladezeit und höherem Ladestrom unterschieden. Der Energieverlust beim Laden beträgt bestenfalls 5 bis 15 %. Wie beim Induktionsladen von Kleingeräten hängt auch hier die Energieeffizienz vom Abstand der beiden Spulen bzw. dem Luftspalt zwischen ihnen ab. Ebenso ist eine exakte Positionierung des Fahrzeugs über der Primärspule nötig, um Streuverluste zu vermeiden (DKE 2016; Großmann 2015; Stocker 2015; Vezzini 2014).

E-Fahrzeuge können mittels Induktionstechnik dynamisch während der Fahrt oder statisch z. B. am Parkplatz, an der Haltestelle oder beim Warten an der Ampel geladen werden (Großmann 2015). Die Ladezeiten für E-Gelenkbusse der Braunschweiger Verkehrs-GmbH liegen bspw. zwischen 11 Minuten bei einer Schnellladung mit einer Ladeleistung von 200 kW (Gelenkbus „emil“ mit 60 kWh-Akku) (Braunschweiger Verkehrs-GmbH o. J.) oder ca. 2 ½ Stunden bei einer Normalladung mit einer Ladeleistung von 22 kW. In Deutschland setzen die Städte Augsburg, Braunschweig, Mannheim und Berlin bereits Induktionsfahrzeuge für ihren ÖPNV ein (Großmann 2015).

Systeme für induktives Laden von E-Fahrzeugen bieten aktuell die Firmen Bombardier (*Primo*), Qualcomm (*Halo*) und Audi (*AWS – Audi Wireless Charging*) an. Zukünftig sollen auch Straßen und Autobahnen dynamisches induktives Laden von E-Fahrzeugen ermöglichen. Einige Pilotprojekte wie das von Qualcomm in Versailles sind hierzu bereits entstanden (Greis 2017; Großmann 2015).

Abbildung 2-10: Beispielbild für E-Bus auf der Induktionsladestation



Quelle: Wikipedia / Lord Alpha (CC BY-SA 3.0), <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=33491064>

Verbreitung und Trends

Insgesamt befindet sich die induktive Ladetechnik für E-Fahrzeuge noch in einer Entwicklungsphase, nicht zuletzt weil die nötige Infrastruktur im Moment noch mit hohen Kosten verbunden ist und diese Ladetechnik im Vergleich zum konduktiven (kabelgebundenem) Laden mit niedrigeren Wirkungsgraden verbunden ist. Auch müssen verbindliche Standards für das induktive Laden vereinbart sowie Normen weiterentwickelt werden. Vorerst findet demnach noch kein verbreiteter Einsatz der induktiven Ladetechnik für E-Fahrzeuge statt (DKE 2016; Stocker 2015).

Technische Daten

Tabelle 2-10: Technische Daten: Induktives Laden E-Fahrzeuge

Frequenzbereiche	20 – 150 kHz
Ladeleistung (pro Ladestation)	3,6 – 350 kW
Maximal zulässige Strahlungsleistung (Abstand 30 cm)	6,25 μ T

Quellen: BAG 2016c; Braunschweiger Verkehrs-GmbH o. J.; DKE 2016; Schraven et al. 2010

3. Grenzwerte für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder

Ziel der Grenzwertsetzung bei elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern ist der Schutz vor den wissenschaftlich nachgewiesenen gesundheitlichen Risiken. Die Grenzwerte zielen daher darauf ab, gesundheitsrelevante Wärmebelastungen des Körpers, sogenannte thermische Wirkungen, zu verhindern, denn nur für die thermischen Wirkungen gibt es bisher den wissenschaftlichen Nachweis gesundheitlicher Risiken. Die Frage, ob auch nichtthermische Wirkungen mit gesundheitlichen Nachteilen auftreten können, ist dagegen noch Gegenstand umfangreicher Forschung.

Vor diesem Hintergrund hat das Öko-Institut bereits in (Öko-Institut 2001) eine Minimierung der HF-Exposition von Personen der Bevölkerung empfohlen. Eine solche Minimierung basiert dabei sowohl auf technischen Maßnahmen, ohne dass diese der Verfügbarkeit von Diensten entgegenstehen, als auch auf dem individuellen Verhalten von Personen, woraus sich die Notwendigkeit entsprechender Verbraucherinformationen ergibt. Eine ähnliche Empfehlung, bezogen auf niederfrequente elektrische und magnetische Felder hat das Öko-Institut in (Öko-Institut 2009), S. 2, formuliert: *„Auf der Basis des bisherigen Kenntnisstands zu möglichen gesundheitlichen Auswirkungen niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder der Versorgung mit Strom sowie der Stromanwendung lassen sich Effekte auch unterhalb der bestehenden Grenzwerte bislang nicht ausschließen. Unnötige Expositionen sollten daher vermieden werden und nicht vermeidbare möglichst gering gehalten werden. Dies gilt insbesondere dort, wo sich Personen längere Zeit aufhalten.“* Auch seitens der SSK bestehen entsprechend dem Vorsorgeprinzip Empfehlungen, die Grenzwerte nicht auszuschöpfen (SSK 2001).

Im Folgenden wird auf die Grenzwertsetzung für Personen der Bevölkerung eingegangen, da deren Exposition Gegenstand der Untersuchungen im vorliegenden Gutachten ist. Neben Grenzwerten für die Bevölkerung gibt es auch Begrenzungen im beruflichen Bereich. In den Fällen, in denen die Begrenzungen in den entsprechenden Empfehlungen und Vorschriften in gemeinsamen Tabellen für nieder- und hochfrequente Felder angegeben sind, werden diese vollständig wiedergegeben. Ansonsten beschränkt sich die Darstellung auf die hier einschlägigen hochfrequenten Felder.

Die in Deutschland gültigen Grenzwerte gehen auf Empfehlungen der Internationalen Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) zurück, die ebenfalls in europäische Richtlinien übernommen wurden. In Kapitel 0 werden daher zunächst wesentliche Inhalte der ICNIRP-Guidelines genannt. Regelungen auf europäischer Ebene sind in Kapitel 0 genannt. Die in Deutschland auf Verordnungsebene geltenden Grenzwerte finden sich in Kapitel 3.3. In Kapitel 3.4 werden die Grenzwertsetzungen zusammenfassend bewertet.

3.1. Empfehlungen der ICNIRP

Die Begrenzungen der Exposition durch elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder dienen der Begrenzung der Temperaturerhöhung im Körpergewebe. Ein in dieser Hinsicht geeignetes Maß ist die spezifische Absorptionsrate (SAR), die in W/kg angegeben wird. Dabei wird zwischen einer Ganzkörperexposition und Teilkörperexpositionen unterschieden. SAR-Werte, beispielsweise durch am Körper getragene Feldquellen, können an Phantomen, die das menschliche Körpergewebe repräsentieren, bestimmt werden. Da dies sehr aufwändig ist, werden darüber hinaus Begrenzungen von leichter mess- und/oder simulierbaren Feldgrößen festgelegt (elektrische und magnetische Feldstärke, magnetische Flussdichte etc.). Aus der Einhaltung dieser Feldgrößen an einem bestimmten Ort kann darauf geschlossen werden, dass bei einer sich dort befindlichen Person die SAR-Werte eingehalten wären.

Für statische magnetische Felder hat die ICNIRP in (ICNIRP 1994) eine Begrenzung der kontinuierlichen Exposition auf eine magnetische Flussdichte von 40 mT empfohlen. Die ICNIRP wies dabei darauf hin, dass Personen mit Herzschrittmachern, anderen elektronischen Geräten oder mit ferromagnetischen Implantaten durch diese Begrenzung nicht ausreichend geschützt sein können. Die Mehrheit der Herzschrittmacher würde bei einer Exposition unterhalb 0,5 mT nicht beeinträchtigt, Personen mit ferromagnetischen Implantaten oder anderen elektronischen Geräten außer Herzschrittmachern könnten bei Expositionen oberhalb von wenigen mT beeinträchtigt werden.

Im Jahr 1998 hat die ICNIRP eine Empfehlung zur Begrenzung von elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Wechselfeldern im Frequenzbereich bis 300 GHz abgegeben (ICNIRP 1998). Die ICNIRP unterscheidet dabei zwischen Basisgrenzwerten („basic restrictions“) und Referenzwerten („reference levels“), die sie wie folgt definiert:

- Basisgrenzwerte sind Begrenzungen, die sich unmittelbar auf gesundheitliche Auswirkungen beziehen. Abhängig von der Frequenz beziehen sich diese Begrenzung auf die physikalischen Größen Stromdichte (J), spezifische Absorptionsrate (SAR) und Leistungsdichte (S). Nur die Leistungsflussdichte in Luft, außerhalb des Körpers kann wirklich gemessen werden.
- Referenzwerte dienen der praktischen Kontrolle, ob die Basisgrenzwerte eingehalten sind. Einige Referenzwerte sind aus Basisgrenzwerten durch Messungen und/oder Berechnungen abgeleitet, andere beziehen sich auf die Wahrnehmung und nachteilige indirekte Effekte einer EMF-Exposition. Die abgeleiteten Größen sind die elektrische Feldstärke (E), die magnetische Feldstärke (H), die magnetische Flussdichte (B), Leistungsflussdichte (S) und durch Gliedmaßen fließende Ströme (IL). Größen, die sich auf die Wahrnehmung und nachteilige indirekte Effekte beziehen, sind Kontaktströme (IC) und für gepulste Felder die spezifische Energieabsorption (SA). Für jede Expositionssituation können gemessene oder berechnete Werte dieser Größen mit den entsprechenden Referenzwerten verglichen werden. Die Einhaltung des Referenzwerts stellt die Einhaltung der relevanten Basisgrenzwerte sicher. Falls gemessene oder berechnete Werte einen Referenzwert überschreiten, heißt dies nicht notwendigerweise, dass die Basisgrenzwerte nicht eingehalten sind. Bei Überschreiten eines Referenzwerts ist es jedoch erforderlich, die Einhaltung der einschlägigen Basisgrenzwerte zu überprüfen und festzustellen, ob zusätzliche Schutzmaßnahmen erforderlich sind.

Die Basisgrenzwerte nach (ICNIRP 1998) sind in Tabelle 3-1 aufgeführt, die Referenzwerte in Tabelle 3-2.

Tabelle 3-1: Basisgrenzwerte für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder nach (ICNIRP 1998)

Frequenzbereich	Stromdichte (Kopf und Rumpf) (mA/m²) (Effektivwerte)	Mittlere Ganzkörper- SAR (W/kg)	Lokale SAR (Kopf und Rumpf) (W/kg)	Lokale SAR (Gliederma- ßen) (W/kg)	Leistungs- flussdichte (W/m²)
bis 1 Hz	8	-	-	-	-
1 Hz – 4 Hz	8/f				
4 Hz – 1.000 Hz	2				
1.000 Hz – 100 kHz	f/500	0,08	2	4	
100 kHz – 10 MHz					
10 MHz – 10 GHz	-	-	-	-	
10 GHz – 300 GHz					-

f: Frequenz in der jeweils für das Frequenzintervall angegebenen Einheit

Quellen: (ICNIRP 1998)

Tabelle 3-2: Referenzwerte (ungestörte Mittelwerte) für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder nach (ICNIRP 1998)

Frequenzbereich	Elektrische Feldstärke (V/m)	Magnetische Feldstärke (A/m)	Magnetische Flussdichte (μT)	Leistungsflussdichte ebener Wellen (W/m²)
bis 1 Hz	-	32.000	40.000	-
1 Hz – 8 Hz	10.000	32.000/f²	40.000/f²	
8 Hz – 25 Hz		4.000/f	5.000/f	
0,025 kHz – 0,8 kHz	250/f	4/f	5/f	
0,8 kHz – 3 kHz		5	6,25	
3 kHz – 150 kHz	87			
0,15 MHz – 1 MHz		0,73/f	0,92/f	
1 MHz – 10 MHz	87/f ^{1/2}			
10 MHz – 400 MHz	28	0,073	0,092	2
400 MHz – 2.000 MHz	1,375·f ^{1/2}	0,0037·f ^{1/2}	0,0046·f ^{1/2}	f/200
2 GHz – 300 GHz	61	0,16	0,20	10

f: Frequenz in der jeweils für das Frequenzintervall angegebenen Einheit

Quellen: (ICNIRP 1998)

Für Frequenzen von 100 kHz bis 10 GHz sieht die ICNIRP die Mittelung der Größen der Referenzwerte über 6 Minuten vor.

Für zeitlich variierende Kontaktströme von leitfähigen Objekten empfiehlt die ICRP in (ICNIRP 1998) die in Tabelle 3-3 genannten Begrenzungen der Exposition von Personen der Bevölkerung.

Tabelle 3-3: Referenzwerte für zeitlich variierende Kontaktströme von leitfähigen Objekten nach (ICNIRP 1998)

Frequenzbereich	maximaler Kontaktstrom (mA)
bis 2,5 kHz	0,5
2,5 kHz – 100 kHz	0,2·f
100 kHz – 110 MHz	20

f: Frequenz in kHz

Quellen: (ICNIRP 1998)

Als Begrenzung für den in Gliedmaßen induzierten Strom empfiehlt die ICNIRP in (ICNIRP 1998) darüber hinaus den Wert von 45 mA für Personen der Bevölkerung im Frequenzbereich von 10 MHz bis 110 MHz.

Für die Begrenzung der Summe von Expositionen durch Felder unterschiedlicher Frequenz empfiehlt die ICNIRP in (ICNIRP 1998) die folgenden Bedingungen:

$$\sum_{i=1 \text{ Hz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{J_i}{J_{L,i}} \leq 1 \quad \text{für die Begrenzung der elektrischen Stimulation}$$

$$\sum_{i=100 \text{ kHz}}^{10 \text{ GHz}} \frac{SAR_i}{SAR_L} + \sum_{i>10 \text{ GHz}}^{300 \text{ GHz}} \frac{S_i}{S_L} \leq 1 \quad \text{für die Begrenzung thermischer Wirkungen}$$

Hier bedeuten:

J_i : Stromdichte bei der Frequenz i

$J_{L,i}$: Basisgrenzwert der Stromdichte bei der Frequenz i

SAR_i : spezifische Absorptionsrate bei Exposition mit der Frequenz i

SAR_L : Basisgrenzwert der spezifischen Absorptionsrate

S_i : Leistungsflussdichte bei der Frequenz i

S_L : Basisgrenzwert der Leistungsflussdichte

$$\sum_{i=1 \text{ Hz}}^{1 \text{ MHz}} \frac{E_i}{E_{L,i}} + \sum_{i>1 \text{ MHz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{E_i}{a} \leq 1 \quad \text{und} \quad \sum_{j=1 \text{ Hz}}^{65 \text{ kHz}} \frac{H_j}{H_{L,j}} + \sum_{j>65 \text{ kHz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{H_j}{b} \leq 1 \quad \text{für die Begrenzung der induzierten Stromdichte und elektrischer Stimulationseffekte}$$

Hier bedeuten:

E_i : elektrische Feldstärke bei der Frequenz i

$E_{L,i}$: Referenzwert der elektrischen Feldstärke bei der Frequenz i

H_j : magnetische Feldstärke bei der Frequenz j

$H_{L,j}$: Referenzwert der magnetischen Feldstärke bei der Frequenz j

a : 87 V/m

b : 5 A/m (6,25 µT)

$$\sum_{i=100 \text{ kHz}}^{1 \text{ MHz}} \left(\frac{E_i}{c} \right)^2 + \sum_{i>1 \text{ MHz}}^{300 \text{ GHz}} \left(\frac{E_i}{E_{L,i}} \right)^2 \leq 1 \text{ und } \sum_{i=100 \text{ kHz}}^{1 \text{ MHz}} \left(\frac{H_j}{d} \right)^2 + \sum_{i>1 \text{ MHz}}^{300 \text{ GHz}} \left(\frac{H_j}{H_{L,j}} \right)^2 \leq 1 \text{ für die Begrenzung thermischer Wirkungen}$$

Hier bedeuten:

E_i : elektrische Feldstärke bei der Frequenz i

$E_{L,i}$: Referenzwert der elektrischen Feldstärke bei der Frequenz i

H_j : magnetische Feldstärke bei der Frequenz j

$H_{L,j}$: Referenzwert der magnetischen Feldstärke bei der Frequenz j

c : $87/f^{1/2}$ V/m (f: Frequenz in MHz)

d : $0,73/f$ (f: Frequenz in MHz)

$$\sum_{k=10 \text{ MHz}}^{110 \text{ MHz}} \left(\frac{I_k}{I_{L,k}} \right)^2 \leq 1 \text{ und } \sum_{n=1 \text{ Hz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{I_n}{I_{C,n}} \leq 1 \text{ und } \sum_{n=100 \text{ kHz}}^{110 \text{ MHz}} \left(\frac{I_n}{I_{C,n}} \right)^2 \leq 1 \text{ für die Begrenzung von Strömen durch}$$

Gliedmaßen und von Kontaktströmen

hier bedeuten

I_k : Komponente des Stroms durch die Gliedmaßen bei der Frequenz k

$I_{L,k}$: Referenzwert für den Strom durch die Gliedmaßen bei der Frequenz k

I_n : Komponente des Kontaktstroms bei der Frequenz n

$I_{C,n}$: Referenzwert des Kontaktstroms bei der Frequenz n

Im Jahr 2009 hat die ICNIRP in (ICNIRP 2009) für statische magnetische Felder als Begrenzung der Exposition eines Körperteils bei Personen der Bevölkerung auf einen Wert der magnetischen Flussdichte von 400 mT empfohlen. Wegen indirekter nachteiliger Effekte bei Personen, die elekt-

ronische medizinische Geräte oder Implantate mit ferromagnetischem Material tragen, sowie zur Verhinderung umherfliegender Objekte, wies die ICNIRP aber zugleich darauf hin, dass zur Vermeidung dieser Effekte weit niedrigere Grenzwerte anzusetzen sind, die bei 0,5 mT liegen können. In Deutschland ist dem entsprechend in der 26. BImSchV für statische magnetische Felder ein Grenzwert von 0,5 mT festgelegt (siehe Kapitel 3.3, Tabelle 3-7).

Im Jahr 2010 hat die ICNIRP in (ICNIRP 2010) neue Empfehlungen für den Schutz vor Wechselfeldern im Frequenzbereich von 1 Hz bis 100 kHz veröffentlicht. Die ICNIRP hat sich dabei mit dem besonderen Schutz des zentralen Nervensystems, im Bereich des Kopfes z. B. Gehirn und Netzhaut, befasst. Die für Personen der Bevölkerung empfohlenen Basisgrenzwerte sind in Tabelle 3-4, die Referenzwerte in Tabelle 3-5 aufgeführt. Dabei ist zu beachten, dass im Frequenzbereich ab 100 kHz zusätzlich die Grenzwerte für die SAR und für die im Gewebe induzierte elektrische Feldstärke die Empfehlung (ICNIRP 1998) einzuhalten sind.

Tabelle 3-4: Basisgrenzwerte für elektrische und magnetische Wechselfelder nach (ICNIRP 2010)

Frequenzbereich	Gewebe des zentralen Nervensystems am Kopf	alle Gewebe von Kopf und Körper
	interne elektrische Feldstärke (V/m)	
1 Hz – 10 Hz	$0,1/f$	0,4
10 Hz – 25 Hz	0,01	
25 Hz – 1.000 Hz	$0,0004 \cdot f$	
1.000 Hz – 3 kHz	0,4	
3 kHz – 10 MHz	$0,000135 \cdot f$	$0,000135 \cdot f$

f: Frequenz in kHz

Quellen: (ICNIRP 2010)

Tabelle 3-5: Referenzwerte (ungestörte Mittelwerte) für elektrische und magnetische Wechselfelder nach (ICNIRP 2010)

Frequenzbereich	Elektrische Feldstärke (kV/m)	Magnetische Feldstärke (A/m)	Magnetische Flussdichte (T)
1 Hz – 8 Hz	5	32.000/f²	0,04/f²
8 Hz – 25 Hz		4.000/f	0,005/f
25 Hz - 50 Hz		160	0,0002
50 Hz – 400 Hz	250/f		
400 Hz – 3 kHz		64.000/f	0,08/f
3 kHz – 10 MHz	0,083	21	0,000027

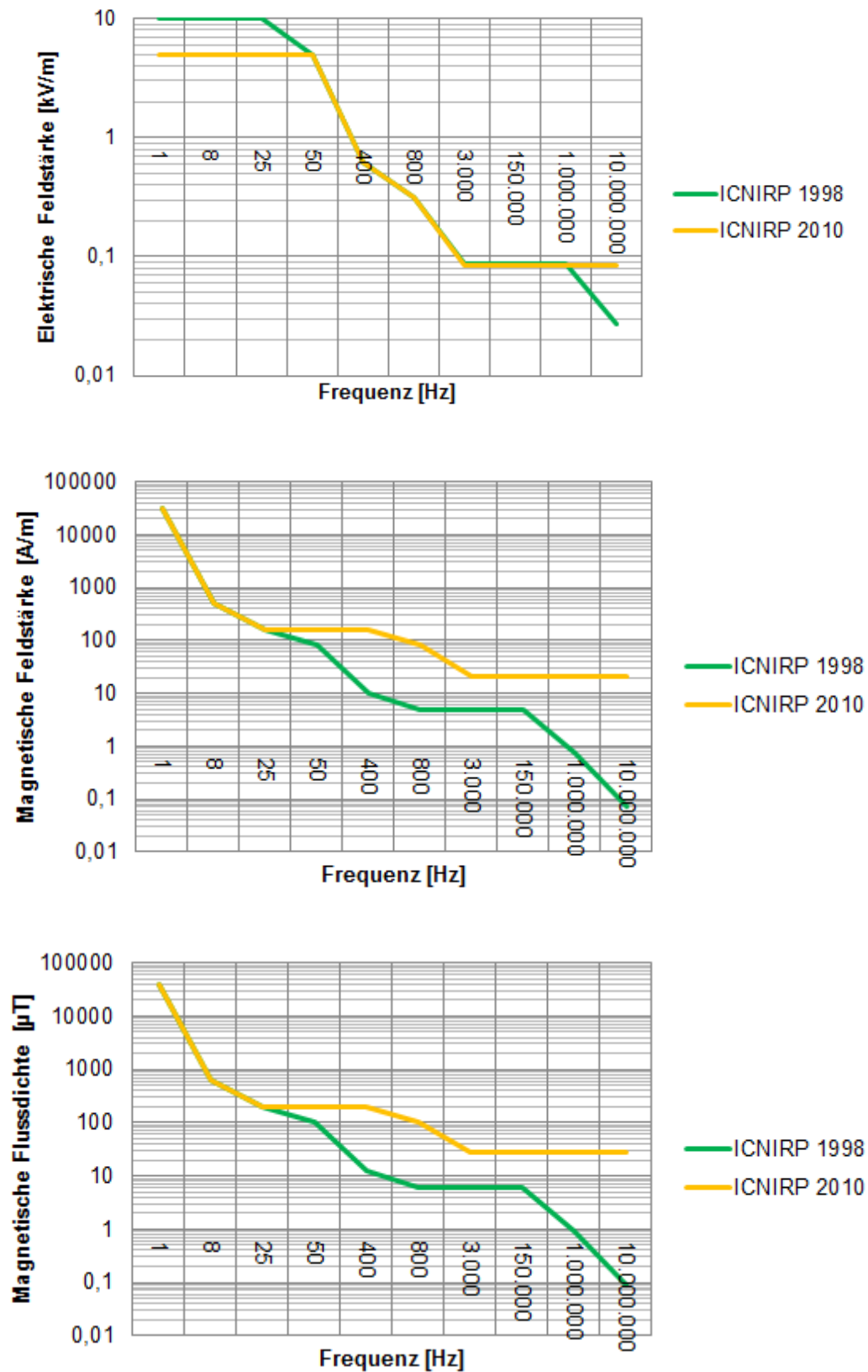
f: Frequenz in Hz

Quellen: (ICNIRP 2010)

Die Referenzwerte der Empfehlung (ICNIRP 2010) weichen zum Teil erheblich von denen der Empfehlung (ICNIRP 1998) ab. Dies verdeutlicht die Gegenüberstellung der Referenzwerte für die Elektrische Feldstärke, die magnetische Feldstärke und die magnetische Flussdichte der beiden ICNIRP-Empfehlungen in Abbildung 3-1.

In (ICNIRP 2010) hat die ICNIPR die Basisgrenzwerte nicht mehr, wie noch 1998, auf die im Körper induzierte Stromdichte bezogen, sondern auf die im Körper induzierte elektrische Feldstärke. Im Jahr 1998 hatten sich noch viele der Versuche zu gesundheitlichen Wirkungen auf die induzierte Stromdichte bezogen, obwohl die elektrische Feldstärke im Hinblick auf die Beurteilung der Wirkungen relevanter ist. Für die Empfehlung aus dem Jahr 2010 standen genügend Untersuchungen mit Bezug auf die induzierte elektrische Feldstärke zur Verfügung, so dass diese als Bezug genommen wurde. Für die Ableitung der Referenzwerte aus den Basisgrenzwerten wurden 2010 Computersimulationen auf der Basis detaillierter Körpermodelle verwendet und nicht mehr die einfachen geometrischen Modelle, die der Ableitung im Jahr 1998 zugrunde lagen. Bei den Referenzwerten für die magnetische Feldstärke und die magnetische Flussdichte konnten auf diese Weise Konservativitäten verringert werden, was sich in deutlich höheren Referenzwerten ab 25 Hz zeigt. Auch mit diesen höheren Referenzwerten werden die wissenschaftlich nachgewiesenen adversen gesundheitlichen Effekte beim Menschen verhindert.

Abbildung 3-1: Vergleich der Referenzwerte der ICNIRP-Empfehlungen von 1998 und 2010



Quelle: eigene Darstellung

3.2. Basisgrenzwerte der Empfehlung 1999/519/EG des Rats der Europäischen Union

Der Rat der Europäischen Union hat 1999 eine Empfehlung zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz gegeben. Die Basisgrenzwerte nach 1999/519/EG (1999/519/EG 1999) sind in Tabelle 3-6 angegeben. Sie entsprechen den Empfehlungen der ICNIRP bis zum Jahr 1998 (ICNIRP 1994, 1998).

Tabelle 3-6: Basisgrenzwerte für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder (0 Hz — 300 GHz) nach 1999/519/EG

Frequenzbereich	Magnetische Flussdichte (mT)	Stromdichte (mA/m) ^a	Mittlere Ganzkörper-SAR ^b (W/kg)	Lokale ^c SAR (Kopf und Rumpf) ^b (W/kg)	Lokale ^c SAR (Gliedmaßen) ^b (W/kg)	Leistungs- flussdichte (W/m²)
0 Hz	40	-	-	-	-	-
>0 Hz – 1 Hz	-	8				
1 Hz – 4 Hz		8/f				
4 Hz – 1 kHz		2				
1 kHz – 100 kHz		f/500				
100 kHz – 10 MHz			0,08	2	4	
10 MHz – 10 GHz		-	-	-	-	
10 GHz – 300 GHz						-

f: Frequenz in Hz

^a: gemittelt über einen Querschnitt von 1 cm² senkrecht zur Stromrichtung

^b: gemittelt über Intervalle von 6 Minuten

^c: gemittelt über 10 g Gewebemasse

Quellen: (1999/519/EG 1999)

Die Referenzwerte der Empfehlung des Rats der Europäischen Union sind identisch mit denen der Empfehlung der ICNIRP aus dem Jahr 1998 (ICNIRP 1998), die in Tabelle 3-2 und Tabelle 3-3 aufgeführt sind. Auch die von der ICNIRP empfohlene Begrenzung des in Gliedmaßen induzierten Stroms im Frequenzbereich von 10 MHz bis 110 MHz wird vom Rat der Europäischen Union übernommen.

Für die Begrenzung der Summe von Expositionen durch Felder unterschiedlicher Frequenz empfiehlt der Rat der Europäischen Union die folgenden Bedingungen:

$$\sum_{i=1 \text{ Hz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{J_i}{J_{L,i}} \leq 1 \quad \text{für die Begrenzung der elektrischen Stimulation}$$

$$\sum_{i=100 \text{ kHz}}^{10 \text{ GHz}} \frac{SAR_i}{SAR_L} + \sum_{i>10 \text{ GHz}}^{300 \text{ GHz}} \frac{S_i}{S_L} \leq 1 \quad \text{für die Begrenzung thermischer Wirkungen}$$

Hier bedeuten:

J_i : Stromdichte bei der Frequenz i

$J_{L,i}$: Basisgrenzwert der Stromdichte bei der Frequenz i

SAR_i : spezifische Absorptionsrate bei Exposition mit der Frequenz i

SAR_L : Basisgrenzwert der spezifischen Absorptionsrate

S_i : Leistungsflussdichte bei der Frequenz i

S_L : Basisgrenzwert der Leistungsflussdichte

$$\sum_{i=1 \text{ Hz}}^{1 \text{ MHz}} \frac{E_i}{E_{L,i}} + \sum_{i>1 \text{ MHz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{E_i}{a} \leq 1 \quad \text{und} \quad \sum_{j=1 \text{ Hz}}^{150 \text{ kHz}} \frac{H_j}{H_{L,j}} + \sum_{j>150 \text{ kHz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{H_j}{b} \leq 1 \quad \text{für die Begrenzung der induzierten Strom-}$$

dichte und elektrischer Stimulationenwirkungen

Hier bedeuten:

E_i : elektrische Feldstärke bei der Frequenz i

$E_{L,i}$: Referenzwert der elektrischen Feldstärke bei der Frequenz i

H_j : magnetische Feldstärke bei der Frequenz j

$H_{L,j}$: Referenzwert der magnetischen Feldstärke bei der Frequenz j

a : 87 V/m

b : 5 A/m (6,25 μ T)

$$\sum_{i=100 \text{ kHz}}^{1 \text{ MHz}} \left(\frac{E_i}{c} \right)^2 + \sum_{i>1 \text{ MHz}}^{300 \text{ GHz}} \left(\frac{E_i}{E_{L,i}} \right)^2 \leq 1 \quad \text{und} \quad \sum_{i=100 \text{ kHz}}^{150 \text{ kHz}} \left(\frac{H_j}{d} \right)^2 + \sum_{i>150 \text{ kHz}}^{300 \text{ GHz}} \left(\frac{H_j}{H_{L,j}} \right)^2 \leq 1 \quad \text{für die Begrenzung ther-}$$

mischer Wirkungen

Hier bedeuten:

E_i : elektrische Feldstärke bei der Frequenz i

$E_{L,i}$: Referenzwert der elektrischen Feldstärke bei der Frequenz i

H_j : magnetische Feldstärke bei der Frequenz j

$H_{L,j}$: Referenzwert der magnetischen Feldstärke bei der Frequenz j

c : $87/f^{1/2}$ V/m (f: Frequenz in MHz)

d : $0,73/f$ (f: Frequenz in MHz)

$$\sum_{k=10 \text{ MHz}}^{110 \text{ MHz}} \left(\frac{I_k}{I_{L,k}} \right)^2 \leq 1 \quad \text{und} \quad \sum_{n=1 \text{ Hz}}^{110 \text{ MHz}} \left(\frac{I_n}{I_{C,n}} \right)^2 \leq 1 \quad \text{für die Begrenzung von Strömen durch Gliedmaßen und von Kontaktströmen}$$

hier bedeuten

I_k : Komponente des Stroms durch die Gliedmaßen bei der Frequenz k

$I_{L,k}$: Referenzwert für den Strom durch die Gliedmaßen bei der Frequenz k

I_n : Komponente des Kontaktstroms bei der Frequenz n

$I_{C,n}$: Referenzwert des Kontaktstroms bei der Frequenz n

Gegenüber den Empfehlungen der ICNIRP in (ICNIRP 1998) sind die Frequenzbereiche, in denen jeweils eine Summation vorgenommen werden soll, in den obigen Formeln aus der Empfehlung des Rats der Europäischen Union teils abweichend, da sich die Empfehlung des Rats der Europäischen Union auf die Exposition von Personen der Bevölkerung beschränkt.

3.3. Grenzwerte in Deutschland

Grenzwerte für hochfrequente Felder sind in Deutschland seit 1997 durch die Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV) (26. BImSchV 2013) festgelegt. Von der Verordnung erfasst waren ursprünglich nur ortsfeste Funkanlagen einschließlich Radaranlagen und sonstige ortsfeste Anlagen, die elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 9 kHz bis 300 GHz erzeugen. Durch eine Novellierung der 26. BImSchV gilt diese auch für Sendeanlagen der öffentlichen Rundfunkanstalten und entsprechend wird auch der Frequenzbereich zwischen 0,1 MHz und 10 MHz explizit geregelt.

Als Anwendungsbereich der 26. BImSchV ist in § 1 dieser Verordnung festgelegt:

„(1) Diese Verordnung gilt für die Errichtung und den Betrieb von Hochfrequenzanlagen, Niederfrequenzanlagen und Gleichstromanlagen nach Absatz 2. Sie enthält Anforderungen zum Schutz der Allgemeinheit und der Nachbarschaft vor schädlichen Umwelteinwirkungen und zur Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen durch elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder. Die Verordnung berücksichtigt nicht die Wirkungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder auf elektrisch oder elektronisch betriebene Implantate.“

(2) Im Sinne dieser Verordnung sind:

1. Hochfrequenzanlagen:

ortsfixe Anlagen, die elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 9 Kilohertz bis 300 Gigahertz erzeugen, ausgenommen sind Anlagen, die breitbandige elektromagnetische Impulse erzeugen und der Landesverteidigung dienen,

2. Niederfrequenzanlagen:

ortsfixe Anlagen zur Umspannung und Fortleitung von Elektrizität mit einer Nennspannung von 1.000 Volt oder mehr, einschließlich Bahnstromfern- und Bahnstromoberleitungen und sonstiger vergleichbarer Anlagen im Frequenzbereich von 1 Hertz bis 9 Kilohertz,

3. Gleichstromanlagen:

ortsfixe Anlagen zur Fortleitung, Umspannung und Umrichtung, einschließlich der Schaltfelder, von Gleichstrom mit einer Nennspannung von 2.000 Volt oder mehr.“

Die Grenzwerte für die elektrische Feldstärke und die magnetische Flussdichte der 26. BImSchV sind in Tabelle 3-7 und Tabelle 3-8 aufgeführt. Die Grenzwerte der Tabelle 3-7 berücksichtigen die Stimulationswirkungen auf menschliche Nerven- und Muskelzellen, die im Bereich von 1 Hz bis 10 MHz verursacht werden können. Diese Werte entsprechen den Referenzwerten (ungestörte Mittelwerte) der ICNIRP-Empfehlung (ICNIRP 2010). Die Grenzwerte der Tabelle 3-8 schützen vor thermischen Wirkungen durch Felder mit Frequenzen ab 100 kHz. Diese Werte entsprechen den Referenzwerten (ungestörte Mittelwerte) der ICNIRP-Empfehlung (ICNIRP 1998). Bei Frequenzen zwischen 100 kHz und 10 MHz müssen die Grenzwerte beider Tabellen eingehalten sein.

Tabelle 3-7: Grenzwerte der 26. BImSchV für die elektrische Feldstärke und magnetische Flussdichte

Frequenz	Elektrische Feldstärke (effektiv) (kV/m)	Magnetische Flussdichte (effektiv) (µT)
0 Hz	-	500
1 Hz – 8 Hz	5	40.000/f ²
8 Hz – 25 Hz		5.000/f
25 Hz – 50 Hz		200
50 Hz – 400 Hz	250/f	80.000/f
400 Hz – 3 kHz		
3 kHz – 10 MHz	0,083	27

f: Frequenz in Hz

Quellen: (26. BImSchV 2013)

Tabelle 3-8: Grenzwerte der 26. BImSchV (quadratisch über 6-Minuten-Intervalle gemittelt)

Frequenz	Elektrische Feldstärke (effektiv) (V/m)	Magnetische Flussdichte (effektiv) (µT)
0,1 MHz – 1 MHz	87	0,73/f
1 MHz – 10 MHz	$87 \cdot f^{1/2}$	
10 MHz – 400 MHz	28	0,073
400 MHz – 2 GHz	$1,375 \cdot f^{1/2}$	$0,0037 \cdot f^{1/2}$
2 GHz – 300 GHz	61	0,16

f: Frequenz in MHz

Quellen: (26. BImSchV 2013)

Für die Summe der Immissionsbeiträge der elektrischen und magnetischen Felder aller Niederfrequenzanlagen und von Hochfrequenzanlagen mit Frequenzen zwischen 9 kHz und 10 MHz müssen die folgenden Bedingungen erfüllt sein:

$$\sum_{i=1 \text{ Hz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{I_{E,i}}{G_{E,i}} \leq 1 \text{ und } \sum_{i=1 \text{ Hz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{I_{M,i}}{G_{M,i}} \leq 1$$

Hier bedeuten:

$I_{E,i}$: Immissionsbeitrag des elektrischen Feldes bei der Frequenz i

$G_{E,i}$: Grenzwert der elektrischen Feldstärke bei der Frequenz i

$I_{M,i}$: Immissionsbeitrag der magnetischen Feldstärke bei der Frequenz i

$G_{M,i}$: Grenzwert der magnetischen Feldstärke bei der Frequenz i

Immissionsbeiträge der elektrischen und magnetischen Felder von Hochfrequenzanlagen mit Frequenzen oberhalb 100 kHz müssen zusätzlich die folgenden Bedingungen erfüllen:

$$\sum_{k=100 \text{ kHz}}^{300 \text{ GHz}} \left(\frac{I_{E,j}}{G_{E,j}} \right)^2 \leq 1 \text{ und } \sum_{k=100 \text{ kHz}}^{300 \text{ GHz}} \left(\frac{I_{M,j}}{G_{M,j}} \right)^2 \leq 1$$

Hier bedeuten:

- $I_{E,i}$: Immissionsbeitrag des elektrischen Feldes bei der Frequenz j (quadratisch gemittelt über 6 Minuten-Intervalle)
- $G_{E,i}$: Grenzwert der elektrischen Feldstärke bei der Frequenz j (quadratisch gemittelt über 6 Minuten-Intervalle)
- $I_{M,i}$: Immissionsbeitrag der magnetischen Feldstärke bei der Frequenz j (quadratisch gemittelt über 6 Minuten-Intervalle)
- $G_{M,i}$: Grenzwert der magnetischen Feldstärke bei der Frequenz j (quadratisch gemittelt über 6 Minuten-Intervalle)

Darüber hinaus legt die 26. BImSchV für gepulste Felder von Hochfrequenzanlagen fest:

- Bei gepulsten elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich von 9 kHz bis 100 kHz darf der Spitzenwert für die elektrische und die magnetische Feldstärke das 1,5-fache der Werte der Tabelle 3-7 nicht überschreiten.
- Bei gepulsten elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich über 100 kHz bis 10 MHz darf der Spitzenwert für die elektrische und die magnetische Feldstärke das $6,93 \cdot f^{0,664}$ -fache der Werte der Tabelle 3-8 (f in MHz) nicht überschreiten.
- Bei gepulsten elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich über 10 MHz bis 300 GHz darf der Spitzenwert für die elektrische und die magnetische Feldstärke das 32-fache der Werte der Tabelle 3-8 nicht überschreiten.

Niederfrequente elektrische und magnetische Felder werden auch durch Haushaltsgeräte und Elektroinstallationen im Haus erzeugt. Vom Geltungsbereich der 26. BImSchV sind diese nicht erfasst, sondern die Sicherheit von Geräten wird in Deutschland in Produktnormen auf der Basis des Produktsicherheitsgesetzes geregelt. Dies gilt ebenfalls für hochfrequente elektrische und magnetische Felder von (nicht ortsfesten) Endgeräten und kleinen Sendern, wie sie im häuslichen Bereich in Gebrauch sind. Soweit in diesen Normen auch eine Beurteilung der möglichen gesundheitlichen Wirkungen der elektrischen und magnetischen Felder erfolgt, wird dafür meist die EU-Ratsempfehlung (1999/519/EG 1999) herangezogen (siehe auch (BfS 2017a)). Zur Bewertung der Höhe von HF-Expositionen werden hier herangezogen:

- für die elektrische Feldstärke und die magnetische Flussdichte, unabhängig vom eingeschränkten Geltungsbereich dieser Verordnung, die Grenzwerte der 26. BImSchV,
- für die Leistungsflussdichte der Basisgrenzwert und die Referenzwerte der EU-Ratsempfehlung (1999/519/EG 1999),
- für die SAR die Basisgrenzwerte der EU-Ratsempfehlung (1999/519/EG 1999).

3.4. Zusammenfassende Bewertung der Grenzwertsetzungen

Die Grenzwertsetzungen zielen darauf ab, wissenschaftlich nachgewiesene nachteilige gesundheitliche Effekte, die von HF-Expositionen ausgehen, zuverlässig zu vermeiden. Als wissenschaftlich nachgewiesen sind thermische Wirkungen sowie Stimulationswirkungen auf menschliche Nerven- und Muskelzellen im Bereich bis 10 MHz anzusehen. Bei Einhaltung der Grenzwerte keine Risiken ausgehen.

Bezogen auf die - auch in der Öffentlichkeit intensiv diskutierten - über die oben genannten Wirkungen hinausgehenden Wirkungen elektromagnetischer Felder ist festzustellen, dass bislang kein theoretisches Modell existiert, das die Existenz solcher nachteiligen Effekte wissenschaftlich fundiert nahe legen könnte. Auch die in großer Zahl durchgeführten Experimente konnten bisher keinen Nachweis erbringen, dass solche Effekte existieren. Bei der Bewertung der Ergebnisse der Experimente ist zu beachten, dass sie wissenschaftlichen Standards entsprechen müssen sowie reproduzierbar sein müssen.

Nachteiligen gesundheitlichen Auswirkungen, die bisher einerseits nicht wissenschaftlich nachgewiesen sind, andererseits nach derzeitigem Wissen aber auch nicht vollkommen auszuschließen sind, wird im allgemeinen nicht durch Grenzwertsetzungen begegnet, sondern durch Vorsorge. Insofern ist bei der weiteren Bewertung von auftretenden oder in Zukunft zu erwartenden HF-Expositionen der Bevölkerung neben der Frage der Einhaltung der Grenzwerte auch der Vorsorgegedanke zu beachten.

4. Stellungnahmen und Empfehlungen der SSK

Die deutsche Strahlenschutzkommission (SSK) hat sich in einigen Stellungnahmen und Empfehlungen mit Expositionen der Bevölkerung durch HF-Strahlung befasst, die hier von Interesse sind.

In (SSK 2001) hat die SSK Empfehlungen zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern gegeben. Bezogen auf den Schutz vor nachgewiesenen Gesundheitsbeeinträchtigungen hat die SSK erklärt, dass auch unter Berücksichtigung neuerer wissenschaftlicher Literatur die Empfehlungen der ICNIRP (ICNIRP 1998) und der EU (1999/519/EG 1999) angemessen sind. Die SSK hat insbesondere empfohlen, Grenzwerte nicht vollständig auszuschöpfen, um Spielraum für die Nutzung neuer Technologien auch in Zukunft zu behalten. Ausgehend vom Vorsorgegedanken hat die SSK weiterhin empfohlen, Expositionen durch elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder im Rahmen der technischen und wirtschaftlich sinnvollen Möglichkeiten zu minimieren, insbesondere in Bereichen, in denen sich Personen regelmäßig über längere Zeit aufhalten.

Die SSK verfolgt die technische Entwicklung und hat Stellungnahmen zu neuen Technologien abgegeben, zuletzt im Jahr 2013 (SSK 2013), siehe Kapitel 0. Im Dezember 2003 hat die SSK auch eine Klausurtagung zum Thema des Schutzes der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern bei neuen Technologien durchgeführt (SSK 2005). Mit der Ableitung von Emissionsstandards bei gleichzeitig betriebenen Feldquellen hat sich die SSK 2007 befasst (siehe Kapitel 4.2).

4.1. Statusbericht zu elektromagnetischen Feldern neuer Technologien (SSK 2013)

Als neue Technologien hat die SSK in (SSK 2013) verschiedene Anwendungen betrachtet, die zum Teil für die hier durchzuführenden Untersuchungen nicht einschlägig sind. Der Vollständigkeit halber sind diese aber nachfolgend ebenfalls genannt. Im Einzelnen hat die SSK betrachtet:

- im Bereich Telekommunikation:
 - Long Term Evolution (LTE) als Weiterentwicklung von UMTS,
 - digitaler Behördenfunk (TETRA-BOS),
 - Ultra-Wideband (UWB)-Technologien,
 - Femtozellen, beispielsweise als integraler Bestandteil von WLAN- oder DSL-Routern,
 - lokale Funknetze (WLAN),
 - digitaler Rundfunk (DAB+) und digitales Fernsehen (DVB-T2),
 - Smart-home,
 - Funkanwendungen in Flugzeugen,
 - geändertes Mobilfunknutzungsverhalten, z. B. Verschiebung hin zur Internetnutzung,
 - neue Nutzung von Frequenzbereichen und hierdurch veränderte Immissionen, z. B. durch Ersatz von DVB-T durch LTE,
- im Bereich Verkehrswesen:
 - Funkanwendungen im Fahrzeugbereich, z. B. Car2Car, Car2I,
 - Elektro- und Hybridfahrzeuge,

- im Bereich Energieübertragung:
 - berührungslose Energieübertragung zur kontakt- und damit kabellosen Aufladung ortsveränderlicher elektrischer Verbraucher,
 - Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ),
- im Bereich Gesundheitswesen:
 - Funkanwendungen im Gesundheitswesen, z. B. Bedsidemonitoring,
 - medizinische Anwendungen, z. B. MRT,
- als sonstige Anwendungen:
 - Terahertz, z. B. Körperscanner für die Personenkontrolle,
 - LED und Kompaktleuchtstofflampen,
 - funktionelle Kleidung, z. B. zur Erfassung von Biosignalen oder zur aktiven Regulation,
 - drahtlose Identifikationssysteme zur Erkennung von Produkten, Gegenständen und Personen (RFID).

Für die einzelnen Anwendungen wird in (SSK 2013) unter anderem auf zugehörige Frequenz- und Leistungsbereiche eingegangen. Soweit möglich, wird auch die Exposition, beispielsweise als Angabe des möglichen Ausschöpfungsgrades von Grenzwerten, genannt. Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchung von möglichen HF-Expositionen sind die folgenden Angaben von Interesse:

- Durch LTE-Basisstationen ist mit einer maximalen Ausschöpfung der Leistungsflussdichte-Grenzwerte im einstelligen Prozentbereich, häufig im oder unterhalb des Promillebereichs zu rechnen.
- Aufgrund der durch die Regulierung festgelegten äußerst geringen Sendeleistungen der UWB-Technologien ist davon auszugehen, dass diese von untergeordneter Relevanz für eine Exposition der Allgemeinbevölkerung ist.
- Hinsichtlich der Immissionen durch WLAN-Access Points und Endgeräte wird auf Untersuchungen verwiesen, denen zufolge an einem Laptop in 0,5 m Abstand maximal 0,2 % des Leistungsflussdichte-Grenzwerts erreicht werden, in 1 m Abstand weniger als 0,05 %. Bei direktem Kontakt zum Endgerät kann der Basisgrenzwert lokal (SAR gemittelt über 10 g) bis zu 22 % ausgeschöpft werden. Die maximale Sendeleistung der Access Points ist mit 3 mW bis 29 mW gering, beispielsweise deutlich niedriger als bei Mobiltelefonen. In typischen Aufenthaltsbereichen um Access Points treten Immissionen von weniger als 0,01 % des Leistungsflussdichte-Referenzwerts der EU-Ratsempfehlung (1999/519/EG 1999) auf.
- In Hybrid-PKWs lagen Untersuchungen in (Schmid et al. 2009) zufolge die lokal auftretenden Maximalimmissionen zwischen 29 % und 35 % der Referenzwerte der EU-Ratsempfehlung (1999/519/EG 1999). In den untersuchten Elektrofahrzeugen wurden Werte zwischen 3 % und 25 % ermittelt. Diese Maximalwerte traten in den meisten Fällen lokal stark begrenzt am Fahrer- und Beifahrerplatz typischerweise im Fuß- und Unterschenkelbereich primär während des Bremsens und Beschleunigens auf. Während annähernd stationärer Fahrverhältnisse lagen die Immissionswerte teilweise deutlich unter den genannten Maximalwerten. In einem untersuchten elektrisch angetriebenen Nahverkehrsbus wurden am exponiertesten Fahrgastplatz bis zu 19 % des Referenzwertes der EU-Ratsempfehlung (1999/519/EG 1999) erreicht. Die erhobenen Maximalwerte liegen in ähnlicher Größenordnung wie die Immissionen im Fahrgastbereich von Eisenbahnzügen.

- Zu HF-Emissionen durch LED und Kompaktleuchten hat die SSK auf ihre frühere Stellungnahme (SSK 2010) verwiesen. Dort hat die SSK festgestellt, dass die Grenzwerte für optische Strahlung sowie elektrische und magnetische Felder bei allen untersuchten Quellen schon in sehr kurzen Abständen von wenigen Zentimetern eingehalten werden, so dass bei üblichen Nutzungsabständen keine Gefährdung besteht. In einer Untersuchung an 11 verschiedenen Modellen von Kompaktleuchtstofflampen (Dürrenberger & Klaus 2004) ergab sich eine maximale Ausschöpfung von 1,4 % des Grenzwerts in 30 cm Abstand. Eine weitere angeführte Untersuchung an 37 verschiedenen Modellen von Kompaktleuchtstofflampen (Eder et al. 2009) ermittelte im Extremfall eine Grenzwertausschöpfung der elektrischen Feldstärke von 68 % in 30 cm Abstand. Bezüglich der magnetischen Wechselfelder waren die Expositionen im Verhältnis zum Grenzwert deutlich geringer, sie betrugen in den drei vorangehend angesprochenen Untersuchungen in 30 cm Abstand maximal 1,3 %, 0,5 % und 0,9 %. Zu HF-Immissionen durch LED-Leuchten enthält (SSK 2010) Messergebnisse des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), die eine deutlich geringere Exposition durch LED-Leuchten als durch Kompaktleuchten ausweisen. Dies hatte auch die Untersuchung (Nadakuduti et al. 2010) ergeben.

4.2. Grundsätze bei der Ableitung von Emissionsstandards bei gleichzeitig betriebenen Feldquellen (SSK 2007)

Mit Fragen der Exposition bei mehreren Feldquellen hat sich die SSK in (SSK 2007) befasst.

Nach Auffassung der SSK ist die Beurteilung der möglichen Gesamtexpositionssituation bei der Einwirkung von gleichzeitig betriebenen Feldquellen für den Hersteller bzw. den Inverkehrbringer einer einzelnen Feldquelle im Rahmen der allgemeinen Produkthaftungs- sowie Betriebssicherheitsbestimmungen verpflichtend. Angaben über daraus abzuleitende Benutzungseinschränkungen sind in der Bedienungsanleitung anzugeben. Allerdings sieht die SSK die Erfassung der Expositionssituation beim Kunden aufgrund der Vielzahl möglicher benutzter Feldquellen anderer Hersteller sehr variabel und messtechnisch aufgrund der Parametervielfalt oft nicht vollständig durchführbar. Zur Gewährleistung der Einhaltung der ICNIRP-Empfehlungen bei gleichzeitiger Exposition gegenüber mehreren Feldquellen im Frequenzbereich 0 bis 300 GHz hat die SSK die folgenden Praxisregeln abgeleitet:

„Regel 1: Schöpfen die zu erwartenden Feldstärkewerte einer Feldquelle die nach ICNIRP gegebenen Referenzwerte nach Aufschlag aller Mess- und/oder theoretischen Bestimmungungenauigkeiten (erweiterte Gesamtmessunsicherheit mit einem Erweiterungsfaktor von 2) maximal zu einem Drittel aus, so kann die Einhaltung der Basisgrenzwerte auch im Alltag beim Auftreten multipler Expositionen durch weitere Feldquellen vermutet werden, und es sind keine zusätzlichen Maßnahmen seitens des Herstellers notwendig. Zu dieser Aussage sind vom Hersteller nicht die typischen, sondern die im Sinne von Sicherheitsbetrachtungen erforderlichen Kriterien von ungünstigsten Betriebszuständen und Bediengeometrien heranzuziehen. In der Regel wird der geringste Körperabstand zu einer Feldquelle bei bestimmungsgemäßem Gebrauch betrachtet, auch der ungünstigste Fall von Körpergeometrien muss berücksichtigt werden. Weiteres Kriterium ist, dass diese Aussagen für alle produzierten Feldquellen, z. B. für alle Geräte einer Serie, gelten.“

Regel 2: Liegen die zu erwartenden Feldstärkewerte einer Feldquelle oberhalb der nach Regel 1 gegebenen Drittel-Schranke der Referenzwerte und kann der Hersteller durch zusätzliche Analysen/Messungen nach anerkanntem Stand der Technik und Wissenschaft unter den

in Regel 1 aufgeführten Kriterien nachweisen, dass die Basisgrenzwerte zu nicht mehr als einem Drittel ausgeschöpft werden, so kann die Einhaltung der Basisgrenzwerte im Alltag auch beim Auftreten multipler Expositionen durch weitere Quellen vermutet werden, und es sind keine weiteren zusätzlichen Maßnahmen seitens des Herstellers notwendig.

Regel 3: Führt die Exposition durch eine Feldquelle bei den Basisgrenzwerten zur Überschreitung der nach Regel 2 gegebenen Drittel-Schranke, muss der Hersteller nicht nur typische, sondern mit der gebotenen Sorgfalt und unter den in Regel 1 aufgeführten Kriterien in der Praxis mögliche ungünstigste Szenarien multipler Expositionen identifizieren. Die Gesamtexposition in Bezug auf die Basisgrenzwerte ist nach den in den ICNIRP-Leitlinien gegebenen Additionsregeln zu ermitteln. Warnhinweise auf mögliche Szenarien mit dem Risiko einer Überschreitung der Basisgrenzwerte sind in den Bedienungsanleitungen anzugeben und mit entsprechenden Anweisungen zu ergänzen, wie diese zu vermeiden sind.“

Obwohl die Beachtung dieser Empfehlung der SSK wichtig ist, wenn im Alltag die HF-Expositionsgrenzwerte auch bei gleichzeitigem Betrieb mehrerer Feldquellen eingehalten werden sollen, wird sie bisher beispielsweise bei der Zulassung von Geräten nicht beachtet. Es wurden auch keine Regelungen getroffen, die die Anwendung der Grundsätze für Hersteller oder Inverkehrbringer verpflichtend machen würden.

5. Untersuchungen zur Abschätzung von HF-Expositionen der Bevölkerung aus verschiedenen Quellen

Im nachfolgenden Kapitel werden Ergebnisse aus Untersuchungen aus dem Deutschen Mobilfunk-Forschungsprogramm (Kapitel 5.1), aus im Anschluss daran durchgeführten Untersuchungen (Kapitel 5.2) sowie aus weiteren Untersuchungen zur Exposition (Kapitel 5.3) dargestellt, soweit sie die Ermittlung von Expositionen zum Inhalt haben.

5.1. Untersuchungen im Deutschen Mobilfunk-Forschungsprogramm

Wegen des Verdachts gesundheitlicher Auswirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder z. B. in der Umgebung von Sendeanlagen oder beim Gebrauch von mobilen Endgeräten wurde durch das BfS das Deutsche Mobilfunk-Forschungsprogramm (DMF) konzipiert, das in den Jahren 2002 bis 2008 mit einem Finanzvolumen von 17 Millionen € durchgeführt wurde. Mit diesem Programm sollte die Forschung intensiviert und koordiniert werden. Einige der Forschungsvorhaben des DMF haben sich mit der Frage der Exposition von Personen der Bevölkerung befasst. Deren Ergebnisse werden nachfolgend kurz beschrieben, soweit sie für die hier zu untersuchenden Fragestellungen von Interesse sind.

5.1.1. Bestimmung der Exposition bei Verwendung kabelloser Übermittlungsverfahren in Haushalt und Büro (Schmid et al. 2005)

Ziel des Forschungsvorhabens war die Erarbeitung einer detaillierten Übersicht über gegenwärtig bereits verwendete und in naher Zukunft am Markt zu erwartende drahtlose Kommunikationseinrichtungen für Heim- und Büroanwendungen. Neben einer Beschreibung und Gegenüberstellung hinsichtlich für den Strahlenschutz relevanter Parameter der verschiedenen Technologien sollten auch die damit verknüpften messtechnischen Anforderungen für eine adäquate und zuverlässige Expositionserfassung erarbeitet und dokumentiert werden. Schließlich sollten für typische, ausgewählte Szenarien die resultierenden Expositionen durch die betrachteten Technologien erfasst werden.

Im Forschungsvorhaben wurden neben Schnurlostelefonen (u. a. DECT) und lokalen Funknetzwerken (WLAN/WPAN) auch nicht-standardisierte Geräte wie z. B. Babyphones berücksichtigt. Darüber hinaus wurden Ausblicke auf kommende Gerätestandards erarbeitet. Es wurden umfangreiche Computersimulationen sowohl für körpernah betriebene Geräte (SAR-Berechnungen in homogenen und anatomischen FDTD-Körpermodellen) als auch für großräumige und komplexe Expositionsszenarien (z. B. mit parallelen DECT- und WLAN-Installationen in Büroumgebungen) sowie für kombinierte Szenarien (Exposition durch körpernah betriebene Geräte und gleichzeitige Exposition durch entferntere Quellen) durchgeführt. Einzelne Geräte und typische Büroumgebungen wurden messtechnisch untersucht. Bei Geräten, bei denen ein Betrieb mit Kontakt zum Körper anzunehmen bzw. nicht ausgeschlossen ist, wurden Messungen der SAR vorgenommen.

Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Messungen und Berechnungen haben ergeben, dass die von DECT-, WLAN- und Bluetooth-Geräten in typischen Anwendungsszenarien verursachten Immissionen unter 0,1 % der Referenzwerte der EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG liegen. Hinsichtlich der Basisgrenzwerte haben Messungen der über 10 g gemittelten SAR-Werte in einem homogen mit gewebesimulierender Flüssigkeit gefüllten, flachen Phantom bei extremer Nahfeldexposition durch WLAN- oder Bluetooth-Geräte zu maximalen Werten von unter 0,1 W/kg geführt. Numerische Simulationen unter Verwendung eines anatomischen Körpermodells ergaben ebenfalls maximale Werte von etwa 0,1 W/kg bei Kontakt zwischen Gerät und Körper. Zu berücksichtigen ist, dass die SAR-Werte in der EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG für die Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 100 kHz bis 300 GHz festgelegt sind. Die SAR-Werte in der EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG sind für die Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 100 kHz bis 300 GHz festgelegt.

sichtigen ist bei der exemplarisch untersuchten WLAN-PCMCIA-Karte allerdings, dass diese die maximal erlaubte Sendeleistung von 100 mW EIRP nur etwa zur Hälfte ausnutzte. Der maximale SAR für ein in typischer Position am Kopf betriebenes generisches Modell eines DECT-Mobiltelefons wurde in einem anatomischen Kopfmodell berechnet (Mittelung über 10 g). Der so ermittelte SAR-Wert lag unter 0,05 W/kg. Die insgesamt höchsten Immissionen wurden in der Umgebung des leistungsstärksten der untersuchten Geräte (Babyphone, Sendeleistung 500 mW) gefunden. Messungen der SAR in zwei unterschiedlichen Positionierungen (jeweils mit Kontakt des Geräts zum Phantom) ergaben 0,07 W/kg bzw. 0,13 W/kg. Auch in diesem speziellen Fall wurde keine Überschreitung des Grenzwertes von 2 W/kg beobachtet.

Auch eine gleichzeitige Exposition durch mehrere körperfern betriebene Geräte zur kabellosen Informationsübermittlung in Haushalt und Büro führt nach den in (Schmid et al. 2005) dokumentierten Untersuchungen offensichtlich zu Gesamtexpositionen deutlich unterhalb der geltenden Grenzwerte. Eine Überschreitung der Grenzwerte war demnach durch die untersuchten Geräte selbst bei Betrieb mit Kontakt zum Körper und unter ungünstigsten Bedingungen - z. B. hinsichtlich des vom Datenverkehr abhängigen Duty-Cycles - sehr unwahrscheinlich. Expositionen körperfern betriebener Geräte werden durch zusätzlich köpernah betriebene Geräte in der Regel dominiert.

Hinsichtlich der untersuchten Babyphones wurde in (Schmid et al. 2005) festgestellt, dass Geräte mit sehr unterschiedlichen maximalen Sendeleistungen und Reichweiten am Markt sind und dies bei der Auswahl geeigneter Geräte beachtet werden sollte.

In (Schmid et al. 2005) wurden auch Abschätzungen der Gesamtexposition durch verschiedene Quellen, die im Haushalt und am Arbeitsplatz vorliegen können, vorgenommen. Es wurde ein Haushaltsszenario mit WLAN, DECT und Babyphone modelliert und die HF-Exposition numerisch abgeschätzt. Dazu wurde folgendes Expositionsszenario gewählt: Ein unmittelbar an ein Kinderzimmer angrenzender Arbeitsplatz ist mit WLAN (Client Computer am Schreibtisch, Access Point an der Wand zum Kinderzimmer), einem DECT-Schnurlostelefon (Basisstation und Mobilteil) und einer drahtlosen WebCam (auf dem Monitor platziert) ausgestattet. Weiterhin befindet sich die Sendestation eines drahtlosen Kopfhörer-Systems auf dem Schreibtisch (zwischen Computer und Monitor). Im benachbarten Kinderzimmer (Kinderbett unmittelbar an der Trennwand zum Arbeitsplatz) wird ein Babyphone (im Kinderbett liegend) betrieben. Die Außenwände wurden als Ziegelwände, die Innenwände als Trockenbaukonstruktion (maximale HF-Durchlässigkeit) modelliert. Hinsichtlich der Position des Babyphones wird in (Schmid et al. 2005) darauf hingewiesen, dass das Platzieren im Kinderbett unüblich und gemäß der Herstellerangaben der meisten Geräte zu vermeiden sei, dies aber als worst-case dennoch angenommen wurde. Die Positionierung des WLAN-Access Points wurde an der Wand angenommen, an der im Nebenraum das Kinderbett steht

Als Frequenzen und Sendeleistungen wurden zugrunde gelegt:

- WLAN-Client Computer: 2.462 MHz, 16 mW,
- WLAN-Access Point: 2.462 MHz, 50 mW,
- DECT-Basisstation: 1.890 MHz, 250 mW,
- DECT-Mobilteil: 1.890 MHz, 250 mW,
- WebCam: 2.450 MHz, 10 mW,
- Funkkopfhörer: 860 MHz, 10 mW,

- Babyphone: 446 MHz, 20 mW/500 mW (für ein Babyphone dieser Frequenz wurde in (Schmid et al. 2005) die höchste Ausschöpfung des Grenzwerts für die elektrische Feldstärke gemessen, die untersuchten Babyphones hatten Sendefrequenzen von 40,68 MHz bis 2450 MHz).

Für fünf verschiedene Situationen wurde in (Schmid et al. 2005) die Grenzwertausschöpfung, bezogen auf die Leistungsflussdichte, für den Arbeitsplatz und das Kinderbett ermittelt. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Situation 1: WLAN im upload-Betrieb, DECT-Gespräch aktiv, Babyphone aktiv/500 mW, WebCam aktiv, Funkkopfhörer aktiv,
- Situation 2: WLAN im upload-Betrieb, DECT-Gespräch aktiv, Babyphone aktiv/20 mW, WebCam aktiv, Funkkopfhörer aktiv,
- Situation 3: WLAN im download-Betrieb, DECT-Gespräch aktiv, Babyphone aktiv/20 mW, WebCam aktiv, Funkkopfhörer aktiv,
- Situation 4: WLAN im upload-Betrieb, kein DECT-Gespräch, Babyphone nicht aktiv, WebCam aktiv, Funkkopfhörer aktiv,
- Situation 5: WLAN im download-Betrieb, DECT-Gespräch aktiv, Babyphone nicht aktiv, WebCam aktiv, Funkkopfhörer aktiv.

Die in (Schmid et al. 2005) für die fünf Situationen ermittelten relativen Ausschöpfungen des Grenzwerts der Leistungsflussdichte am Arbeitsplatz und im Kinderbett sind in Tabelle 5-1 aufgeführt. Dabei ist für die Quellen, die insgesamt mindestens 95 % zur prozentualen Grenzwertausschöpfung beitragen, ihr jeweiliger Anteil aufgeschlüsselt.

Tabelle 5-1: Ausschöpfungen des Grenzwerts der Leistungsflussdichte in fünf untersuchten häuslichen Situationen

Situati- on	Arbeitsplatz		Kinderbett	
	Grenzwert- ausschöp- fung	relativer Anteil der Quellen	Grenzwert- ausschöp- fung	relativer Anteil der Quellen
1	0,377 %	Babyphone:	5,86 %	Babyphone:
		WebCam:		99,5 %
		DECT Basisstation:		
		Funkkopfhörer:		
2	0,041 %	Babyphone:	0,263 %	Babyphone:
		WebCam:		88,8 %
		Funkkopfhörer:		DECT Mobilteil:
		DECT Basisstation:		6,5 %
		DECT Mobilteil:		
		WLAN Access Point:		
3	0,056 %	WLAN Access Point:	0,267 %	Babyphone:
		Babyphone:		87,3 %
		WebCam:		DECT Mobilteil:
		Funkkopfhörer:		6,4 %
		DECT Basisstation:		Funkkopfhörer:
		DECT Mobilteil:		2,4 %
4	0,017 %	WebCam:	0,012 %	Funkkopfhörer:
		Funkkopfhörer:		51,8 %
		WLAN Access Point:		WebCam:
		DECT Basisstation:		41,1 %
5	0,033 %	WLAN Access Point:	0,017 %	WLAN Access Point:
		WebCam:		4,9 %
		Funkkopfhörer:		Funkkopfhörer:
				38,3 %
				WLAN Access Point:
				30,7 %
				WebCam:
				30,4 %

Quellen: (Schmid et al. 2005)

Aus Tabelle 5-1 wird die große Bedeutung des Babyphones deutlich, nicht nur im Zimmer des Babys, sondern auch in einem angrenzenden Raum, selbst beim geringeren Wert der Sendeleistung (20 mW). Nicht wesentlich zur Gesamtexposition trägt in allen Situationen der WLAN-Client Computer bei.

5.1.2. Exposition durch körpernahe Sender im Rumpfbereich (Christ et al. 2006)

Anlass des Forschungsvorhabens war, das im Hinblick auf die Verwendung neuer Technologien (UMTS, WLAN) verstärkt mit der Plazierung der mobilen Sender im Bereich des Unterbauchs (Gürteltasche) oder Brustbereichs (Hemdtasche) zu rechnen ist. Über die zu erwartenden spezifischen Absorptionsraten in den betreffenden Geweben lagen aber keine belastbaren Daten für eine Risikoabschätzung vor. Das Forschungsvorhaben sollte daher die Frage beantworten, ob es im Rumpfbereich sensible, lokale Bereiche gibt, die unter den angesprochenen Randbedingungen stärker exponiert sind und denen im Rahmen eines wirksamen Strahlenschutzkonzeptes besonders Rechnung zu tragen ist. Im Rahmen des Projektes sollte die Exposition von oberflächennahen Organen (insbesondere Leber, Niere, Milz, Gonaden, Brust) durch körpernahe Sender ermittelt und bewertet werden. Dazu waren rechentechnisch die entsprechenden SAR-Werte und Temperaturverteilungen für unterschiedliche Expositionsgeometrien, verschiedene Standard-Sender und Standard-Körperabmessungen zu ermitteln. Die Untersuchung umfasste den Frequenzbereich von 0,4 GHz bis 10 GHz.

Die durchgeführten Berechnungen in einem geschichteten Modell haben ergeben, dass bei einer Gewebeschicht, die geringe Permittivität (Dielektrizitätskonstante, ein physikalischer Gewebeparameter für die dielektrische Leitfähigkeit) für elektrische Felder aufweist (z. B. Fett, Knochen) und von zwei Schichten mit hoher Permittivität (Haut, Muskel, innere Organe) umgeben ist, unter Fernfeldbedingungen und bei bestimmten Schichtdicken in dieser Gewebeschicht Stehwellen entstehen können, die zu einer Erhöhung der SAR-Werte in den benachbarten Schichten, vor allem in der Haut, führen können. Im Vergleich zu homogenem Geweben unter ansonsten gleichen Bedingungen wurde ein Anstieg der SAR-Werte um bis zu etwa einen Faktor 3 ermittelt. Da dies nur ab einer Entfernung der Feldquelle von einigen cm vom Körper passiert, werden Grenzwerte nicht überschritten. Unter Nahfeldbedingungen treten Stehwellen nicht auf.

Die Resultate des generischen Modells wurden an anatomischen Modellen unter Belastung mit den folgende Geräten simuliert: Walkie Talkie bei 450 MHz, Mobiltelefon bei 900 (GSM) und 1950 MHz (UMTS) und ein Computer mit WLAN-Karte bei 2450 MHz. Im Vergleich zum Flachphantom zeigte sich, dass dieser überwiegend konservative Werte gegenüber der Exposition durch Geräte im Rumpfbereich liefert. Nur in einigen Ausnahmefällen unterschätzte das Phantom die Exposition um max. 5 %. Die maximale Exposition trat durchgehend an der Körperoberfläche auf, die Exposition der inneren Organe selber war deutlich geringer. Bei der Benutzung eines Laptops mit WLAN trat die maximale Exposition in den Oberschenkeln auf, die Exposition der Geschlechtsorgane war deutlich geringer. Die im generischen Modell beobachteten Stehwelleneffekte konnten am anatomischen Modell bestätigt werden, waren aber weniger ausgeprägt.

Der Temperaturanstieg durch eine HF-Exposition wurde am geschichteten Modell im Frequenzbereich von 30 MHz bis 5,8 GHz berechnet. Der maximale Temperaturanstieg trat durchwegs in den oberflächennahen Schichten auf, überwiegend in der Haut. Bei freier Konvektion wurde ein Temperaturanstieg bis zu 0,8 °C nach 30 Minuten erreicht, unter adiabatischen Bedingungen (keine Wärmeabgabe an die Umgebung) ein Temperaturanstieg bis zu 2,5 °C nach 6 Minuten und bis zu 3,5 °C nach 30 Minuten. Die am generischen Modell erzielten Ergebnisse wurden an anatomischen Modellen überprüft. Für diese Überprüfung wurde die Frequenz 450 MHz gewählt, da infolge der höheren Eindringtiefe hier mit der stärksten Erwärmung der inneren Organe zu rechnen ist. Der maximale Temperaturanstieg lag auch hier in den oberflächennahen Gewebeschichten, etwa 7 mm bis 22 mm unter der Körperoberfläche, und betrug 0,16 °C bis 0,23 °C (freie Konvektion) bzw. 0,23 °C bis 0,31 °C (adiabatische Bedingungen). Die Erwärmung der inneren Organe erreichte dabei maximal 0,11 °C, die der Geschlechtsorgane maximal 0,04 °C.

Die Untersuchungen zeigten demnach, dass durch die Schichtung des Körpergewebes Effekte auftreten können, durch die es im Vergleich zu homogenem Gewebe oder Gewebe simulierenden Flüssigkeiten zur erhöhten Absorption elektromagnetischer Felder im Körper kommt. Da sie nur im Fernfeldbereich auftreten, kommt es nach (Christ et al. 2006) aber nicht zu einer Überschreitung der Grenzwerte. Die durch die Exposition induzierte Temperaturerhöhung im geschichteten Gewebe kann unter Extrembedingungen (maximale Absorption, keine Thermoregulation, keine Wärmeabgabe durch die Haut) über 3,5 °C betragen und kann damit deutlich höher sein als zuvor angenommen wurde. Ein solches Szenario wird allerdings von (Christ et al. 2006) als sehr unrealistisch angesehen. Es wurde konstatiert, dass bei freier Konvektion maximal 0,8 °C erreicht werden und der für die inneren Organe ermittelte Temperaturanstieg wurde als vernachlässigbar angesehen, sofern die SAR-Grenzwerte eingehalten werden.

5.1.3. Bestimmung der SAR-Werte, die während der alltäglichen Nutzung von Handys auftreten (Georg et al. 2005)

Ziel der Untersuchungen im Vorhaben „Bestimmung der SAR-Werte, die während der alltäglichen Nutzung von Handys auftreten“ (Georg et al. 2005) war die Bestimmung tatsächlich auftretender SAR-Werte, da für die Vergabe des "Blauen Engels" für Handys u. a. eine Begrenzung des SAR-Wertes vorgeschrieben ist, die sich aber nur an dem standardisierten maximalen SAR-Wert der Geräte orientiert. Daher sollte für die Bewertung der Geräte unter Strahlenschutzvorsorgeaspekten der bei Gebrauch tatsächlich auftretende SAR-Wert ermittelt werden. Das Vorhaben sollte auch an einer Reihe konkreter Beispiele die zeitliche Variabilität sowie die Abhängigkeit der Belastung des Nutzers vom Gerät, von der Netzstruktur und von Umgebungseinflüssen zeigen.

Im Rahmen des Vorhabens (Georg et al. 2005) wurden verschiedene Nutzerszenarien untersucht. Beim GSM-System erfolgt mit jedem Zellwechsel ein Hochregeln der Sendeleistung des Mobilfunkgerätes auf den im jeweiligen Netz maximalen Wert. Es wurden daher Messungen während der Fahrt mit dem PKW und im Zug sowie bei einem Gang durch ein Gebäude und im Freien durchgeführt, außerdem halbstündige stationäre Telefonate in einem Raum ohne Zellwechsel und mit mehreren Versuchspersonen. Die jeweiligen funktechnischen Größen wurden direkt aus dem Handy ausgelesen, der zugehörige SAR-Wert mit dem Feldberechnungsprogramm FEKO ermittelt. Typische Handhaltungspositionen beim Telefonieren wurden aus gleichzeitig durchgeführten Videoaufzeichnungen abgeleitet. In Tabelle 5-2 sind Ergebnisse der Untersuchungen zusammengefasst.

Tabelle 5-2: Ermittelte maximale Sendeleistungen und SAR-Werte für das GSM-System im Vorhaben (Georg et al. 2005)

Szenario	Mittelwert der Sendeleistung (bezogen auf die maximale Sendeleistung des Geräts)	SAR (bezogen auf den Grenzwert von 2 W/kg)
PKW-Fahrten mit vielen Zellwechseln und unterschiedlicher Netzversorgung	25 %	13 %
Zugfahrten mit vielen Zellwechseln und schlechter Netzversorgung	50 %	nicht berechnet
stationär in einem Raum ohne Zell- wechsel bei guter Netzversorgung	10 %	5 %
stationär in einem Raum ohne Zell- wechsel bei nicht so guter Netzversorgung	20 %	10 %
Gehen in einem Raum ohne Zell- wechsel bei sehr guter Netzversorgung	13 %	5 %
Gehen im Freien bei einer mittleren bis schlechten Netzversorgung	70 %	25 %

Quellen: (Georg et al. 2005)

Anders als bei GSM erfolgt bei UMTS bei einem Zellwechsel keine Regelung auf einen Maximalwert, sondern es wird ausgehend von niedriger Sendeleistung so weit hoch regelt wie erforderlich. Erwartungsgemäß ergaben sich bei den durchgeführten UMTS-Messungen niedrigere SAR-Werte. Diese lagen je nach untersuchtem Szenario ca. 1.000-fach bis 10.000-fach unter dem zulässigen Grenzwert von 2 W/kg.

Die Untersuchung (Georg et al. 2005) ergab, dass bei GSM die maximale Sendeleistung von Mobiltelefonen häufig, nämlich zwischen 5 % und 30 % der gesamten Gesprächsdauer, erreicht wird. Während dieser Zeiträume wird ein SAR-Wert erreicht, der dem maximalen vom Hersteller angegebenen SAR-Wert nahe kommt. Die SAR-Werte sind deutlich geringer, wenn eine gute Versorgung vorliegt und keine häufigen Zellwechsel erfolgen. Der Vergleich zwischen GSM und UMTS zeigte, dass UMTS infolge eines unterschiedlichen Regelverhaltens eine wesentlich geringere Exposition als GSM verursacht und der Grenzwert von 2 W/kg bei UMTS auch nicht annähernd erreicht wird.

5.1.4. Bestimmung der realen Exposition bei Handynutzung in teilgeschirmten Räumen im Vergleich zur Exposition unter günstigen Bedingungen im Freien (Georg et al. 2006)

Die Zielsetzung des Vorhabens „Bestimmung der realen Exposition bei Handynutzung in teilgeschirmten Räumen im Vergleich zur Exposition unter günstigen Bedingungen im Freien“ (Georg et

al. 2006) war ähnlich wie im Vorhaben „Bestimmung der SAR-Werte, die während der alltäglichen Nutzung von Handys auftreten“ (Georg et al. 2005), legte den Schwerpunkt aber auf den Vergleich der Handynutzung in teilabgeschirmten Fahrzeugen (PKW, Zug, Bus) mit günstigeren Sende- und Empfangsbedingungen im Freien.

Numerische Modellrechnungen des Vorhabens zeigten, dass auch bei Betrieb mehrerer Handys in metallisch begrenzten bzw. teilgeschirmten Räumen die SAR-Grenzwerte bei Personen, die selbst nicht mobil telefonieren, nicht überschritten werden. Durch die reflektierende Umgebung und durch Signalüberlagerung wurden lokal begrenzt Feldstärken in der Größenordnung einiger 10 V/m ermittelt. Für die Berechnungen war von einer maximalen Sendeleistung der Mobiltelefone für GSM 900, GSM 1800 und UMTS ausgegangen worden. Weiterhin wurde gezeigt, dass für den Handynutzer selbst unter der Voraussetzung maximaler Leistung bei allen ihn umgebenden Mobiltelefonen, das eigene Handy – bezogen auf eine Mittelungsmasse von 10 g Körpergewebe - die fast ausschließliche Ursache seiner Exposition darstellt. Nur die über den gesamten Kopf gemittelte SAR wäre auch von der Anzahl und der Entfernung weiterer sendender Mobiltelefone in der Umgebung abhängig.

Im Verhältnis zu den Grenzwerten ergab sich auch bei sehr vielen gleichzeitigen Telefonaten immer eine Unterschreitung der über 10 g gemittelten Werte. Für Nicht-Nutzer lagen die über den Kopf gemittelten SAR-Werte um mehr als einen Faktor 10 unter dem SAR-Grenzwerten der EU-Ratsempfehlung (1999/519/EG 1999) für Ganzkörper-Exposition.

Für den Nicht-Nutzer stellten die sendenden Mobiltelefone in der Umgebung die relevante Expositionsquelle dar, so dass für dessen Exposition entscheidend ist, ob ein Szenario in einem teilgeschirmten Raum oder eine vergleichbare Situation im Freien betrachtet wird. Die SAR-Werte in dem teilgeschirmten Raum können für einen Nicht-Nutzer um etwa einen Faktor 10 über den Werten im Freien liegen. Allerdings sind die absoluten Werte um mindestens etwa einen Faktor 100 geringer als die des Handy-Nutzers. Für den Handy-Nutzer ist die Frage, ob ein Szenario (Leistungsregelung vernachlässigt) in einem teilabgeschirmten Raum oder ein vergleichbares Szenario im Freien betrachtet wird, weniger entscheidend. Die Erhöhung der über 10 g gemittelten SAR-Werte im Kopf aufgrund der reflektierenden Umgebung in einem teilabgeschirmten Raum betrug gemäß den Berechnungen maximal 15 %.

5.1.5. Bestimmung der Exposition durch Ultra-Wideband Technologien (Schmid et al. 2008)

Die Ultra-Wideband (UWB)-Technik dient der Datenübertragung in weiten Frequenzbereichen. Mit dem Vorhaben „Bestimmung der Exposition durch Ultra-Wideband Technologien“ (Schmid et al. 2008) sollte eine belastbare Datenbasis für die bei verschiedenen Ultra-Wideband-Funkanwendungen maximal möglichen und durchschnittlich zu erwartenden Expositionen geschaffen werden.

Die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Immissionsmessungen von bereits am Markt erhältlichen UWB-Geräten ergaben in 15 cm Abstand zeitlich gemittelte Werte der äquivalenten Leistungsflussdichte von maximal ca. 0,32 mW/m². Die Spitzenwerte lagen in diesem Abstand stets unter 2,4 mW/m². Die messtechnische Bestimmung der bei körpernahe Betrieb von UWB-Quellen hervorgerufenen SAR-Werte erwies sich als mit den zur Verfügung stehenden Techniken nicht möglich, so dass die SAR-Werte rechnerisch abgeschätzt werden mussten.

Die numerischen Simulationen unterschiedlicher Expositionsszenarien mit einer UWB-Quelle in unmittelbarer Nähe zu verschiedenen Körperregionen (Oberschenkel, Hinterkopf, Brust, Auge) ergaben über 10 g Gewebe gemittelte SAR-Werte von maximal 13 mW/kg. Dabei wurde von einer

vollständigen Ausnutzung des in Europa zulässigen Sendespektrums ausgegangen. Geräte für den US-amerikanischen Markt können den Untersuchungen zufolge etwas höhere SAR-Werte verursachen, in den untersuchten Szenarien maximal etwa 22 mW/kg. In (Schmid et al. 2008) wurde eingeschätzt, dass SAR-Werte in der Praxis geringer sind, da nicht von einer vollständigen Ausnutzung des erlaubten Sendespektrums und einem ständigen Senden oder Empfangen auszugehen ist. Bezogen auf mit ausgeprägten Pulsen arbeitende Geräte wurden in (Schmid et al. 2008) ebenfalls Expositionen deutlich unterhalb der empfohlenen Expositionsgrenzwerte erwartet.

5.1.6. Entwicklung eines praktikablen rechentechnischen Verfahrens zur Ermittlung der tatsächlichen Exposition in komplizierten Immissionsszenarien mit mehreren verschiedenartigen HF-Quellen (Hansen et al. 2007a)

Ziel des Forschungsvorhabens „Entwicklung eines praktikablen rechentechnischen Verfahrens zur Ermittlung der tatsächlichen Exposition in komplizierten Immissionsszenarien mit mehreren verschiedenartigen HF-Quellen“ (Hansen et al. 2007a) war es, in Anbetracht der zunehmenden mobilen Kommunikation im beruflichen und privaten Umfeld ein praktikables rechentechnisches Verfahren zur Ermittlung der tatsächlichen Exposition in komplizierten Immissionsszenarien mit mehreren verschiedenartigen HF-Quellen zu entwickeln.

In (Hansen et al. 2007a) wurde ein Verfahren beschrieben und entwickelt, mit dem die Exposition einer Person beim gleichzeitigen Einwirken von Feldern unterschiedlicher hochfrequenter Quellen auf der Basis der SAR abgeschätzt werden kann, ohne eine zeitaufwändige feldtheoretische Analyse des Gesamtszenarios durchzuführen. Die in dem Katalog zusammengefassten Einzelszenarien berücksichtigen sowohl Teilkörper- wie auch Ganzkörperexpositionen, hervorgerufen durch körpernahe, mit Kontakt zum Körper betriebene und körperferne Quellen. Als Ergebnis werden der Ganzkörper-SAR-Wert sowie die maximalen lokalen über 10 g gemittelten SAR-Werte, getrennt nach Kopf/Rumpf und Extremitäten ausgegeben.

5.1.7. Untersuchung des Einflusses von Antennen- und Gerätetopologien von körpernah betriebenen drahtlosen Kommunikationsendgeräten auf die von diesen verursachten SAR-Werte (Hansen et al. 2007b)

Ziel des Forschungsvorhabens „Untersuchung des Einflusses von Antennen- und Gerätetopologien von körpernah betriebenen drahtlosen Kommunikationsendgeräten auf die von diesen verursachten SAR-Werte“ (Hansen et al. 2007b) war zu untersuchen, welche Einflüsse z. B. von den Antennen- und Gerätetopologien sowie von der Wahl der Sendefrequenz auf die resultierenden SAR-Werte von körpernah betriebenen Endgeräten drahtloser Kommunikationsdienste ausgehen und Hinweise zum Erreichen von technisch möglichen Minimalwerten aufzuzeigen. Der Einfluss auf die Kommunikationseigenschaften der Geräte sollte dabei ebenfalls berücksichtigt werden. Das Forschungsvorhaben sollte sich auf körpernah betriebene Geräte beschränken.

Untersucht wurden in (Hansen et al. 2007b) Endgeräte mobiler bzw. portabler Kommunikationssysteme, die weder in unmittelbarem Kontakt (wie z. B. das Handy am Ohr) noch weit entfernt (wie z. B. eine Basisstation eines Mobilfunk-Netzwerks) sondern typischerweise in Abständen von Zentimetern bis Dezimetern zum menschlichen Körper betrieben werden. Die Auswahl der Geräte erfolgte anhand der Kriterien „weite Verbreitung“, „lange Nutzungsdauer“ und vergleichsweise „hohe Ausgangsleistung“. Bei den untersuchten Endgeräten handelte es sich um

- ein Notebook mit PCMCIA-Einsteckkarte (mit GPRS-, UMTS- und W-LAN-Funktionalität) sowie mit einsteckbarem Bluetooth-USB-Adapter (Frequenzen 900 MHz, 1950 MHz, 2450 MHz),
- eine DECT-Basisstation (Frequenz 1900 MHz) und

- einen WLAN-Router (Frequenz 2450 MHz).

Der innere Aufbau der ausgewählten Geräte wurde analysiert und in Computermodelle überführt. Als Personen wurden ein Erwachsener (105 kg Körpergewicht, 1,88 m Körpergröße) und ein Jugendlicher (42 kg Körpergewicht, 1,36 m Körpergröße) betrachtet. Die Umgebung (Fenster, Wände) wurde variiert.

Die folgenden Nutzungsszenarien der Geräte wurden untersucht:

- Notebook auf dem Schreibtisch, Person sitzt davor,
- Notebook auf den Oberschenkeln,
- WLAN-Router auf dem Schreibtisch, Person sitzt davor,
- WLAN-Router auf dem Boden unter dem Schreibtisch (Boden), Person sitzt/steht davor,
- WLAN-Router an der Wand, Person steht davor,
- DECT-Basisstation auf dem Schreibtisch, Person sitzt/steht davor.

In Tabelle 5-3 sind Ergebnisse der Untersuchungen zusammengefasst.

Tabelle 5-3: Ermittelte SAR-Werte in verschiedenen Nutzungsszenarien

Szenario	weitere Annahmen	maximale SAR (mW/kg)		
		Ganzkörper	Kopf/Rumpf	Gliedmaßen
Notebook auf dem Schreibtisch, Erwachsener sitzt davor	WLAN (Sendeleistung 100 mW)	0,12	5,4	14,6
	Bluetooth (Sendeleistung 100 mW)	0,15	5,7	6,7
Notebook auf den Oberschenkeln	GPRS-Betrieb, Erwachsener	8,8	46,4	1500
	GPRS-Betrieb, Jugendlicher	8,8	46,4	640
	UMTS-Betrieb, Erwachsener	1,1	12,3	553
	UMTS-Betrieb, Jugendlicher	1,1	12,3	120
WLAN-Router auf dem Schreibtisch, Jugendlicher sitzt davor	Sendeleistung 100 mW	0,09	1,6	2,4
WLAN-Router auf dem Boden unter dem Schreibtisch (Boden), Jugendlicher sitzt davor	Sendeleistung 100 mW	0,04	0,13	5,9
WLAN-Router an der Wand, Erwachsener steht davor	Sendeleistung 100 mW	0,09	17,6	0,22
DECT-Basisstation auf dem Schreibtisch, Person sitzt davor	maximale Auslastung der Station	0,42	15,7	47,5
	Auslastung mit einem Telefongespräch	0,02	0,73	2,20
	Standby-Betrieb	0,004	0,15	0,46

Quellen: (Hansen et al. 2007b)

In (Hansen et al. 2007b) wird festgestellt, dass in vielen Fällen die prozentuale Ausschöpfung des Teilkörper-SAR-Basiswertes im Vergleich zu der des Ganzkörper-SAR-Basiswerts größer ist. Die höchsten Werte der Teilkörper-SAR traten in der Regel in den Gliedmaßen auf (bei den sitzenden Modellen insbesondere in den Händen). Da die Hände aber üblicherweise in Bewegung sind und der SAR-Wert über 6 Minuten zu mitteln ist, stellt der Ganzkörper-SAR-Wert laut (Hansen et al. 2007b) für die Bewertung vieler Szenarien die besser geeignete Größe dar. Dies gilt jedoch nicht für die Fälle, in denen der Teilkörper-SAR-Wert besonders groß ist oder in den Beinen auftritt (Szenarien mit Notebook auf den Oberschenkeln).

Der Vergleich der Ergebnisse für das Modell des Jugendlichen (skaliertes Modell) und für das des Erwachsenen ergibt kein einheitliches Bild. Während die Ganzkörper-SAR-Werte bei dem Jugendlichen immer größer waren (ca. 45 % bis 127 %), waren die Teilkörper-SAR-Werte in einigen Szenarien mal größer und in anderen kleiner.

Der Einfluss der Umgebung (Wand, Fenster) stellte sich in (Hansen et al. 2007b) als vernachlässigbar heraus. Positionsveränderungen der Geräte um ± 5 cm können dagegen Änderungen der Ganzkörper-SAR-Werte um ± 30 % bewirken.

In (Hansen et al. 2007b) wurden auch Optimierungsmöglichkeiten untersucht, mit denen sich in den einzelnen Szenarien SAR-Werte verringern lassen, beispielsweise durch die Art der Anbringung der PCMCIA-Karte am Notebook oder durch die Wahl der Antenne.

5.1.8. Bestimmung der realen Feldverteilung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in der Umgebung von Wireless LAN-Einrichtungen (WLAN) in innerstädtischen Gebieten (Preiner et al. 2006)

Ziel des Vorhabens „Bestimmung der realen Feldverteilung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in der Umgebung von Wireless LAN-Einrichtungen (WLAN) in innerstädtischen Gebieten“ (Preiner et al. 2006) war die Erfassung der Verteilung elektromagnetischer Felder im Umfeld von WLAN-Sendeantennen öffentlicher "Hot-Spots" mittels Rechnersimulationen und Messkampagnen.

Es wurden in (Preiner et al. 2006) Untersuchungen in einem Café, in einem Flughafenterminal, auf einem Universitätscampus, auf einem Platz im Innenstadtbereich, in Wohnvierteln, in denen ein drahtloser Internetzugang per WLAN für die Anwohner angeboten wird, sowie auf der Computermesse CeBit in Hannover durchgeführt. An allen Orten wurde als Technik der Standard IEEE 802.11 b oder g eingesetzt. Die an den unterschiedlichen WLAN Hot-Spots erhobenen Immissionsen lagen gemäß (Preiner et al. 2006) überall deutlich unterhalb von 10 W/m^2 . Die höchsten gefundenen Spitzenmesswerte lagen im Bereich von 100 mW/m^2 bis 200 mW/m^2 . Über typische menschliche Körperdimensionen und zeitlich über 6 Minuten gemittelte Messwerte lagen um etwa einen Faktor 10 bis 100 unter den Spitzenmesswerten.

Der Bericht (Preiner et al. 2006) zog den Schluss, dass die allgemeine Bevölkerung durch die WLAN-Sendeanlagen sowie durch die Sender der WLAN-Nutzer an „Hot-Spots“ nur einer geringen zusätzlichen HF-Exposition ausgesetzt ist. Es wurde darauf hingewiesen, dass Reduzierung der Exposition erreicht werden kann, wenn insbesondere die Access-Point-Antennen so platziert werden, dass eine unmittelbare Annäherung von Personen an die Sendeantennen verhindert wird.

5.1.9. Bestimmung der realen Feldverteilung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in der Umgebung von UMTS-Sendeanlagen (Bornkessel et al. 2006b)

Ziel des Forschungsvorhabens „Bestimmung der realen Feldverteilung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in der Umgebung von UMTS-Sendeanlagen“ (Bornkessel et al. 2006b) war es, Mess- und Berechnungsverfahren zu entwickeln, mit denen die örtliche und zeitliche Verteilung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in der Umgebung von UMTS-Sendeanlagen ermittelt und so die tatsächliche Exposition von Personen im Umfeld dieser Anlagen bestimmt werden kann.

In (Bornkessel et al. 2006b) wurden elf Szenarien mit zusammen 163 Messpunkten untersucht. Es wurden auf maximale Anlagenlast extrapolierte Expositionswerte ermittelt, die maximal bei $5,1 \text{ V/m}$ bzw. $69,3 \text{ mW/m}^2$ lagen, entsprechend 8,4 % des Feldstärkegrenzwertes bzw. 0,7 % des Leis-

tungsflussdichtegrenzwertes nach 26. BImSchV. Die kleinsten gemessenen Werte waren bezogen auf die Leistungsflussdichte etwa um den Faktor 700.000 und bezogen auf die Feldstärke etwa um den Faktor 830 niedriger.

Es wurde in (Bornkessel et al. 2006b) festgestellt, dass die größten Messwerte eher in kleinzelligen Szenarien auftraten, da dort aufgrund der meist niedrig montierten Antennen eine größere Annäherung an den Sender möglich ist, was trotz der in der Regel geringeren Sendeleistung zu vergleichsweise höheren Expositionswerten führte. Hingegen wurden bei hoch montierten Antennen, beispielsweise bei den sogenannten Ultra High Sites (UHS), die niedrigsten Expositionen festgestellt. Allerdings muss dabei berücksichtigt werden, dass im Rahmen dieses Projektes keine Bewertung der unterschiedlichen Versorgungskonzepte bezüglich der jeweiligen Versorgungsgüte durchgeführt wurde. Ähnlich wie bei den GSM-Basisstationen zeigt sich besonders im unmittelbaren Umfeld der Sender, bis etwa 100 m, dass der bloße Abstand zur Anlage ein schlechtes Maß für eine Expositionseinschätzung ist. Sichtbedingungen sowie die Lage des jeweiligen Messpunktes zur Ausrichtung der Hauptkeule der Sendeantenne haben dagegen einen deutlichen Einfluss auf die Exposition.

An identischen Orten wurden ebenfalls GSM-Immissionen gemessen und mit den UMTS-Immissionen verglichen. In 85 % der Fälle waren die GSM-Immissionen bezogen auf die frequenzabhängigen Grenzwerte höher als die UMTS-Immissionen. Als Gründe werden in (Bornkessel et al. 2006b) die häufig höhere Sendeleistung der GSM-Stationen, der gegenüber UMTS niedrigere Grenzwert insbesondere für GSM 900 und die bei den GSM-Stationen höhere Wahrscheinlichkeit, in die Hauptkeule einer Antenne, zu geraten, genannt. Während der höchste gemessene UMTS-Messwert 8,4 % des Feldstärkegrenzwertes ausschöpfte, wurden bei GSM bis zu 12,8 % Ausschöpfung gemessen. Die Medianwerte lagen bei 0,72 % für UMTS und 1,75 % bei GSM.

5.1.10. Bestimmung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung von digitalen Rundfunk- und Fernsehsendern (Bornkessel et al. 2006a)

Ziel des Vorhabens „Bestimmung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung von digitalen Rundfunk- und Fernsehsendern“ (Bornkessel et al. 2006a) war es, mittels Rechnersimulationen und Messkampagnen die von Sendeanlagen des digitalen Rundfunk (DAB) und digitalen Fernsehens (DVB-T) verursachte Exposition der Bevölkerung zu quantifizieren.

In (Bornkessel et al. 2006a) konnte festgestellt werden, dass sich in den beiden untersuchten Gebieten um München und Nürnberg die über 198 Messpunkte gemittelte Gesamtexposition durch analoges und digitales TV sowie Radio (hier aber nur UKW und DAB) durch die Umstellung auf DVB-T deutlich erhöht hat. Auch an der überwiegenden Zahl der einzelnen Messpunkte konnte eine entsprechende Erhöhung der Exposition festgestellt werden. Insbesondere in den städtisch geprägten Gebieten der Versorgungsklasse "portable indoor", bei der mit tragbaren Geräten ein Empfang auch in Innenräumen möglich ist, hat sich die Exposition deutlich erhöht. Der Median der Leistungsflussdichte lag bei dieser Versorgungsklasse bei 6,7 $\mu\text{W}/\text{m}^2$. In den Gebieten der Versorgungsklasse „fixed antenna“ können dagegen die analogen TV-Signale der umliegenden Sender die Immissionen der DVB-T-Sender noch dominieren. Die maximalen Messwerte lagen in der Größenordnung von 100 $\mu\text{W}/\text{m}^2$.

Für den Bereich des Rundfunks wurde in (Bornkessel et al. 2006a) festgestellt, dass noch die von der analogen UKW-Technologie herrührenden Expositionen gegenüber den durch die digitalen DAB-Signale verursachten Expositionen überwiegen. An der weit überwiegenden Zahl der Messpunkte wurden Leistungsflussdichten von weniger als 1 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ gemessen, maximal bis etwa 30 $\mu\text{W}/\text{m}^2$.

Die höchsten und die niedrigsten Messwerte an insgesamt 300 Messpunkten unterschieden sich um mehr als einen Faktor 100.000. Selbst am Punkt mit dem höchsten Messwert wurden die Grenzwerte aber auch nach der Umstellung auf DVB-T um mehr als einen Faktor 400 unterschritten.

5.1.11. Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder in der Umgebung von Mobilfunk Basisstationen (Bornkessel & Schubert 2005)

Ziel des Forschungsvorhabens „Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder in der Umgebung von Mobilfunk Basisstationen“ (Bornkessel & Schubert 2005) war es, Mess- und Berechnungsverfahren zu entwickeln, die geeignet sind, die Exposition von Personen im Umfeld von Mobilfunksendeanlagen, außerhalb des durch die RegTP festgelegten Sicherheitsabstandes bis etwa 200 m Entfernung von der Sendeanlage.

Es wurden Werte der Leistungsflussdichte im Bereich von unter 1 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ bis zu einigen 100 mW/m^2 gefunden. Das Zusammenwirken von anlagenbezogenen und immissionsortbezogenen Faktoren, die Einfluss auf die Immissionswerte haben, wurde als sehr komplex bezeichnet und konstatiert, dass eine isolierte Betrachtung einzelner Faktoren in der Regel zu nicht gültigen Pauschalierungen führt. Aus diesem Grund konnte auch kein signifikanter Unterschied der maximalen Immission an Innen- und Außenmesspunkten gefunden werden.

5.2. Forschungsvorhaben im Anschluss an das Deutsche Mobilfunk-Forschungsprogramm

Nach Abschluss des Deutschen Mobilfunk-Forschungsprogramms wurden in Deutschland weitere Forschungsvorhaben durchgeführt, die – soweit sie für die hier relevanten Fragestellungen von Interesse sind – nachfolgend vorgestellt werden.

5.2.1. Bestimmung der Exposition der allgemeinen Bevölkerung durch neue Mobilfunk-techniken (Bornkessel et al. 2013)

Ziel des Forschungsvorhabens „Bestimmung der Exposition der allgemeinen Bevölkerung durch neue Mobilfunktechniken“ (Bornkessel et al. 2013) war es, die Datenlage zur Exposition der allgemeinen Bevölkerung gegenüber hochfrequenten elektromagnetischen Feldern um Informationen über die Beiträge neuer Funkdienste - z. B. 3.x/4G (LTE), digitaler BOS-Funk - zu verbessern. Aus den Ergebnissen des Vorhabens sollte abgeleitet werden, wie sich die tatsächliche Exposition der allgemeinen Bevölkerung in Deutschland durch den weiteren Ausbau der Telekommunikationsinfrastruktur ändert.

Es wurden in (Bornkessel et al. 2013) elf Szenarien von LTE-Anlagen betrachtet und verglichen:

1. Niedrig montierte LTE-Anlage im städtischen Umfeld
2. Hoch montierte LTE-Anlage im städtischen Umfeld
3. LTE-Anlage auf einem Gebäudedach und Ermittlung der Immission im selben Gebäude (Dämpfungsverlauf)
4. LTE-Anlage auf einem Gebäudedach und Ermittlung der Immission im gegenüberliegenden Gebäude (Höhenabhängigkeit)

5. LTE-Anlage zur Indoor-Versorgung
6. Niedrig montierte LTE-Anlage im ländlichen Umfeld (Dachstandort am Ortsrand)
7. Niedrig montierte LTE-Anlage im ländlichen Umfeld (Dachstandort in Ortsmitte)
8. Sehr niedrig montierte LTE-Anlage im ländlichen Umfeld (Dachstandort im Wohngebiet)
9. Hoch montierte LTE-Anlage im ländlichen Umfeld (Maststandort in Ortsmitte)
10. Hoch montierte LTE-Anlage im ländlichen Umfeld (Maststandort am Ortsrand)
11. Hoch montierte LTE-Anlage im ländlichen Umfeld (Freistehender Maststandort)

Die in der Umgebung von Standorten mit LTE-Basisstationen an 177 Messpunkten gemessenen und auf maximale Anlagenauslastungen hochgerechneten LTE-Immissionen betrugen gemäß (Bornkessel et al. 2013) zwischen 0,002 % und 7,28 % (Medianwert 0,70 %) der Feldstärkegrenzwerte der 26. BImSchV. Die tatsächlich gemessenen Werte waren um einen Faktor 3,1 bis 17,2 niedriger als die auf maximale Anlagenauslastungen hochgerechneten Werte. Die maximal gemessene Leistungsflussdichte betrug 30,436 mW/m² und trat im Szenario „sehr niedrig montierte LTE-Anlage im ländlichen Umfeld (Dachstandort im Wohngebiet)“ im Abstand 107 m von der LTE-Anlage auf.

Die in der Umgebung von Standorten mit TETRA-BOS-Basisstationen an 80 Messpunkten gemessenen und auf eine maximale Anlageauslastung hochgerechneten TETRA-BOS-Immissionen betrugen zwischen 0,03 % und 4,63 % (Medianwert 0,46 %) der Feldstärkegrenzwerte der 26. BImSchV. Die tatsächlich gemessenen Werte waren um einen Faktor 2,1 bis 4,4 niedriger als die auf maximale Anlagenauslastungen hochgerechneten Werte.

An allen untersuchten LTE- und an einigen der TETRA-BOS-Standorte waren auch GSM- und UMTS-Mobilfunksendeanlagen installiert. Sowohl Größenordnung als auch örtliche Verteilungsmuster der LTE- und TETRA-BOS-Immissionen haben sich gemäß (Bornkessel et al. 2013) als vergleichbar mit den entsprechenden Daten für GSM und UMTS herausgestellt. Die Ertüchtigung der untersuchten Standorte mit LTE führte im Mittel zu einem Anstieg der Immissionen um 37 %, die Ertüchtigung mit TETRA-BOS zu einem Anstieg um 47 %. Für TETRA-BOS-Standorte in Städten wurden höhere Zuwächse festgestellt als für Standorte in ländlichen Gebieten, was in (Bornkessel et al. 2013) unter anderem auf die in Städten größere Zahl installierter TETRA-BOS-Funkkanäle zurückgeführt wird.

An mehreren Messpunkten wurde zusätzlich zur LTE- oder TETRA-BOS-Immission die gesamte Hochfrequenzimmission im Frequenzbereich von 100 kHz bis 3 GHz bestimmt. Danach trugen die LTE-Immissionen im Mittel 22 % und die TETRA-BOS-Immissionen im Mittel 30 % zur gesamten Leistungsflussdichte bei. Diese Angaben sind laut (Bornkessel et al. 2013) vor allem für die unmittelbare Umgebung der untersuchten Anlagen repräsentativ und sollten nicht als eine flächen- oder bevölkerungsgemittelte Immissionszunahme interpretiert werden.

Die Umwidmung vormals für die terrestrische Ausstrahlung von Hörfunk- und Fernsehprogrammen reservierter Bereiche des Funkspektrums für Mobilfunkanwendungen ("Digitale Dividende") kann in dem betroffenen Frequenzbereich den Ergebnissen in (Bornkessel et al. 2013) zufolge zu leicht erhöhten Immissionen führen. Im Mittel ergab sich bei angenommener Vollausslastung der Mobilfunksender ein Anstieg der Immissionen von etwa 40% bezogen auf die Leistungsflussdichte. Besonders bei geringer Auslastung der Mobilfunkzellen zu Zeiten mit niedrigem Datenverkehrsaufkommen kann sich nach (Bornkessel et al. 2013) aber auch eine Verringerung der Immissionen bezogen auf den Zustand vor der Umwidmung ergeben.

Für den Betrieb eines LTE-Surfsticks im Abstand von 25 mm und eines LTE-Routers (kein Abstand) wurden SAR-Werte von 0,28 W/kg bzw. 0,75 W/kg ermittelt. Im Vergleich dazu lagen Surfsticks bei den Betriebsarten GSM-900 (GPRS-900), GSM-1800 (GPRS-1800) und UMTS (WCDMA) mit maximal 0,27 W/kg in vergleichbarer Größenordnung.

Femtozellen mit auf einen oder wenige Räume innerhalb eines Gebäudes beschränkten Versorgungsbereichen sollen die Mobilfunkversorgung in Gebäuden verbessern und Kapazitätsengpässe in den Mobilfunknetzen vermeiden helfen. Untersuchungen in vier UMTS-Femtozellen ergaben nur geringe Unterschiede zu den Immissionen der im Umfeld ebenfalls betriebenen WLAN- und DECT-Systeme.

Als Fazit ergaben die Untersuchungen in (Bornkessel et al. 2013), dass mit den Basisstationen der neuen Mobilfunktechniken LTE und TETRA-BOS eine Immissionszunahme verbunden ist, die Gesamtmission durch ortsfeste Mobilfunksendeanlagen sich in den für die Bevölkerung zugänglichen Bereichen aber auch im näheren Umfeld von Basisstationsstandorten nach wie vor auf niedrigem Niveau bewegt und an keinem der untersuchten Messpunkte die Grenzwerte der 26. BImSchV erreicht wurden. Die Exposition gegenüber hochfrequenten elektromagnetischen Feldern wird gemäß (Bornkessel et al. 2013) weiterhin hauptsächlich durch körpernah betriebene Sender wie Handy und Smartphone bestimmt.

5.2.2. Entwicklung und Anwendung von Verfahren zur Bestimmung der Exposition gegenüber nichtionisierender Strahlung mit Frequenzen im Terahertzbereich (Spathmann et al. 2014)

Mögliche Anwendungen von Geräten mit Strahlung im Terahertz-Bereich sind zum Beispiel Körperscanner für Sicherheitskontrollen, bildgebende diagnostische Verfahren in der Medizin, zerstörungsfreie Materialprüfungen und drahtlose Datenübertragungen im Nahbereich. Das Forschungsvorhaben (Spathmann et al. 2014) sollte zur Entwicklung von Verfahren zur Bestimmung der Exposition von Personen gegenüber THz-Strahlung beitragen.

Im Forschungsvorhaben wurden für die Expositionsbestimmung mittels numerischer Dosimetrie detaillierte Modelle der menschlichen Haut und des Auges sowie Feld-Anregungsmodelle erstellt. Zur Expositionsbewertung wurden - ausgehend von der SAR als Quelle - die expositionsbedingten Temperaturanstiege ermittelt. Als Ergebnisse liegen für einfallende Leistungsflussdichten zwischen 0,1 W/m² und 100 W/m² und für einen Frequenzbereich von 0,1 THz bis 10 THz Daten über in der Haut und im Auge zu erwartende Feldstärken und SAR-Werte sowie über die mit der Wärmetransportgleichung davon abgeleiteten zu erwartenden Temperaturerhöhungen in den oberflächennahen Körpergeweben vor.

5.2.3. Bestimmung von SAR-Werten bei der Verwendung von Headsets für Mobilfunktelefone (Kühn et al. 2008)

Im Forschungsvorhaben (Kühn et al. 2008) sollten kabelgebundene und draht- bzw. kabellose Headsets insbesondere hinsichtlich der im Kopf eines Nutzers hervorgerufenen maximalen über 10 g gemittelten SAR-Werte verglichen werden. Auch der Einfluss, den das Kabel eines kabelgebundenen Headsets auf die SAR-Werte im Rumpf des Nutzers hat, sollte analysiert werden.

Im Forschungsvorhaben (Kühn et al. 2008) wurden SAR-Werte in verschiedenen Konfigurationen messtechnisch in homogenen Körperphantomen (SAM-Kopf-, Flach-, Unterdruckphantom, iSAR-Messsystem) sowie rechentechnisch in zwei verschiedenen hochaufgelösten, anatomischen Ganzkörpermodellen bestimmt. Messtechnisch wurden zwei unterschiedliche Mobiltelefone

(„Klapphandy“ mit externer Stummelantenne und „Barrenhandy“ mit integrierter Antenne), drei kabelgebundene Headsets und drei kabellose Headsets untersucht. Numerisch wurde ein Mobiltelefon und ein kabelgebundenes Headset analysiert. Am Rumpf wurden dabei unterschiedliche Abstände der Telefone von der Körperoberfläche sowie verschiedene Orientierungen zum Körper (Vorder-/Rückseite des Telefons zum Körper ausgerichtet) berücksichtigt, während am Kopf die aus den Typprüfungen bekannten Standardpositionen „touch“ und „tilt“ gewählt wurden. Alle Untersuchungen wurden für Sprachtelefonie (keine Datenübertragungsmodi) in den Systemen GSM 900, GSM 1800 und UMTS 1950 durchgeführt.

Das Forschungsvorhaben (Kühn et al. 2008) kam zum Ergebnis, dass die SAR-Werte bei der Nutzung der kabellosen Headsets sehr gering sind. Beinahe alle Einzelmesswerte lagen unter der Empfindlichkeitsgrenze des Messsystems, gemittelt über 10 g lagen sie bei $< 0,005 \text{ W/kg}$.

Bei kabelgebundenen Headsets werden messbare SAR-Werte entlang des Kabels im Rumpf und Kopf des Nutzers hervorgerufen. Die über 10 g gemittelten SAR-Werte im Kopf sind dabei bei Headsets mit zwei Ohrhörern im Vergleich zu einem Gerät mit nur einem Ohrhörer geringer. In keinem der untersuchten GSM 900-Szenarien ergab sich im Kopfbereich für den Gebrauch eines kabelgebundenen Headsets ein höherer über 10 g gemittelter SAR-Wert als beim direkten Betrieb des Telefons am Kopf bzw. Ohr eines Nutzers. Bei UMTS- und besonders im GSM 1800-Band traten hingegen in Fällen, in denen das Headset-Kabel nicht in einem geringen Abstand entlang des Körperrumpfes geführt wurde, Erhöhungen der maximalen über 10 g gemittelten SAR-Werte im Kopfbereich um bis zu einem Faktor 2,5 auf, verglichen mit dem Betrieb direkt am Ohr bzw. Kopf. Bei einem nahe am Körperrumpf entlang geführten Kabel ergaben sich Reduktionen der maximalen über 10 g gemittelten SAR-Werte im Kopfbereich. Je nach Kombination Handy/Headset und je nach konkretem Kabelverlauf wurden Reduktionsfaktoren zwischen 1,2 und 372 gemessen. Für das GSM 900-Band lagen die Werte zwischen 2,8 und 251.

Der insgesamt höchste in (Kühn et al. 2008) gemessene über 10 g gemittelte SAR-Wert im Bereich der Ohrhörer betrug $0,33 \text{ W/kg}$. Die numerischen Untersuchungen, mit denen maximal $0,37 \text{ W/kg}$ ermittelt wurden, bestätigten die Größenordnung.

Des Weiteren wurde der Betrieb eines Mobiltelefons am Körperrumpf simuliert. In Abhängigkeit von der Orientierung des Telefons zur Körper- bzw. Phantomoberfläche ergaben sich deutliche Unterschiede in den SAR-Werten. Der insgesamt höchste über 10 g gemittelte SAR-Wert betrug $3,2 \text{ W/kg}$ und wurde für den simulierten Betrieb eines Mobiltelefons mit der Rückseite zum Körper bestimmt. Durch den Anschluss eines Headsets an ein am Rumpf betriebenes Mobiltelefon veränderten sich die maximalen über 10 g gemittelten SAR-Werte im Rumpf verglichen mit der Nutzung ohne Headset in den meisten Fällen nur wenig. Wenn die Telefone mit der Rückseite zum Körper betrieben wurden, verringerten sich die maximalen über 10 g gemittelten SAR-Werte durch den Anschluss des Headsets tendenziell etwas, ansonsten erhöhten sie sich durch den Anschluss eher leicht.

5.3. Weitere Untersuchungen zur Exposition

In (Dürrenberger & Klaus 2004) wurden die elektromagnetischen Felder von Energiesparlampen mit einigen weiteren Quellen im Alltag verglichen. Daten aus diesem Vergleich sind in Tabelle 5-4 zusammengestellt. Auf Messungen im Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 10 kHz wurde in (Dürrenberger & Klaus 2004) verzichtet, da eine genauere frequenzselektive Analyse gezeigt hatte, dass die in diesem Frequenzbereich vorhandenen Signale gegenüber den ausgewerteten Signalen bei 50 Hz bzw. bei der Betriebsfrequenz (einschließlich der Oberwellen) vernachlässigt werden können.

Tabelle 5-4: Ermittelte magnetische Flussdichten und elektrische Feldstärken bei Lampen und weiteren Geräten

Gerät	Abstand	magnetische Flussdichte (nT)		elektrische Feldstärke (V/m)	
		50 Hz	10 kHz – 500 kHz	50 Hz	10 kHz – 500 kHz
Glühlampe	30 cm	ca. 10	0	ca. 6,5	0
Energiesparlampe	30 cm	ca. 10	ca. 14	ca. 8,5	ca. 0,2
Halogenlampe mit elektronischem Trafo	30 cm	ca. 10	ca. 11	ca. 0,5	ca. 0,15
Halogenlampe mit konventionellem Trafo	30 cm	ca. 25	0	ca. 6	0
Fernseher (konventionell)	1 m	ca. 45	ca. 10	ca. 3	ca. 0,4
Fernseher (Flachbildschirm)	1 m	ca. 30	ca. 1	ca. 3	ca. 0,05
Radiowecker	30 cm	ca. 75	0	ca. 7,5	0
Kaffeemaschine (standby)	30 cm	ca. 160	0	ca. 0,5	0
Kaffeemaschine (Betrieb)	30 cm	ca. 3.500	0	keine Angabe	0

Quellen: (Dürrenberger & Klaus 2004)

6. Untersuchung ausgewählter Expositionsszenarien

Auf der Basis der Ergebnisse der Untersuchungen zu möglichen Feldquellen in Kapitel 2 werden in Kapitel 6.1 typische Expositionsszenarien definiert, die verschiedene räumliche Bereiche und verschiedene Stufen der Intensität der Nutzung EMF-emittierender Quellen abdecken sollen. Verschiedene räumliche Bereiche sollen dabei auftragsgemäß sein:

- Wohnbereich, insbesondere mit EMF von Geräten, die der Unterhaltung und Kommunikation dienen (Kapitel 6.1.1),
- häuslicher Arbeitsbereich, insbesondere mit EMF von Geräten, die der Kommunikation, Datenübertragung und Datenverarbeitung etc. dienen (Kapitel 6.1.2),
- häuslicher Küchenbereich, insbesondere mit EMF durch Mikrowellenherd, verschiedene Elektrokleingeräte etc. (Kapitel 6.1.3),
- öffentlicher Raum, insbesondere mit EMF der Datenübertragung und des Mobilfunks (Kapitel 6.1.4),
- öffentlicher Raum im Bereich der Anwendung von induktivem Laden für die E-Mobilität, auch bei Überlagerung mit EMF-Quellen der Datenübertragung und des Mobilfunks (Kapitel 6.1.5).

Hinsichtlich der Intensität der Nutzung EMF-emittierender Quellen werden jeweils zwei Fälle unterschieden:

- a) Es stehen alle Geräte und Techniken zur Verfügung, die für eine Funktionalität auf hohem Niveau erforderlich sind. Bei der Wahl der angenommenen elektrischen Feldstärken, magnetischen Flussdichten, Leistungsflussdichten und SAR-Werte wird von ungünstigen Eigenschaften der HF-Quellen ausgegangen. Dieser Fall soll für eine relativ hoch exponierte Gruppe repräsentativ sein.
- b) Es werden über den Fall a) hinaus Geräte und Techniken mehrfach genutzt bzw. es sind verschiedene Geräte und Techniken mit gleicher Funktionalität in Gebrauch. Dieses Szenario soll den „Worst case“ repräsentieren.

Bei der Bewertung der Expositionen als Summe der verschiedenen Quellen wird mit den Grenzwerten der 26. BImSchV, erforderlichenfalls ergänzt durch die Referenzwerte der EU-Ratsempfehlung (1999/519/EG 1999) verglichen. Es soll auf diese Weise beurteilt werden, ob ein ausreichend sicherer Abstand zu diesen Grenzwerten besteht. Soweit möglich, werden für diesen Vergleich SAR-Werte herangezogen, wo dies nach derzeitigem Kenntnisstand nicht möglich ist, die Leistungsflussdichte, die elektrische Feldstärke oder die magnetische Flussdichte.

6.1. Expositionsszenarien

Bei den nachfolgenden Expositionsabschätzungen wird auf die in Kapitel 5 dargestellte Literatur zurückgegriffen. Die dort genannten Ergebnisse werden erforderlichenfalls auf der Basis der hier in Kapitel 2 erhobenen Daten von Feldquellen angepasst. Für die entsprechenden Umrechnungen kann aufgrund der betrachteten Abstände und der Frequenzbereiche in der Regel von Fernfeld Eigenschaften ausgegangen werden. Als einheitlicher Maßstab zur Bewertung der Expositionen werden die Leistungsflussdichte für entfernte Quellen und die SAR für sehr körpernahe Quellen herangezogen.

6.1.1. Expositionsszenario „Wohnbereich“

Für das Szenario einer intensiven Nutzung von Geräten im Expositionsszenario „Wohnbereich“ mit Abstrahlung hochfrequenter elektromagnetischer Felder wird eine Person betrachtet, die sich im Wohnbereich aufhält, beispielsweise fernsieht oder Radio hört, und dabei einen Funkkopfhörer benutzt. Im gleichen Raum befinden sich eine DECT-Basisstation, über die eine andere Person telefoniert, sowie zwei Smart-home-Sender. Im Nebenraum befindet sich ein Kinderbett mit Babyphone.

Im gleichen Raum könnten auch induktive Ladegeräte in Betrieb sein. Untersuchungen in (Zahner et al. 2017) haben aber ergeben, dass solche Geräte nur in unmittelbarer Nähe (Größenordnung bis 1 cm Abstand) wesentlich zur Exposition beitragen können. In unmittelbarer Nähe ist auch die Überschreitung von Referenzwerten für die magnetische Flussdichte möglich, so dass in (Zahner et al. 2017) auch Simulationen vorgenommen wurden, um zu überprüfen ob die Grenzwerte (SAR und im Gewebe induzierte Feldstärke) eingehalten sind. Diese Überprüfung ergab, dass diese Grenzwerte schon in wenigen mm Abstand deutlich unterschritten sind (SAR-Werte im Bereich von 0,1 mW/kg). Solche Geräte werden daher nicht eigens in das Expositionsszenario einbezogen.

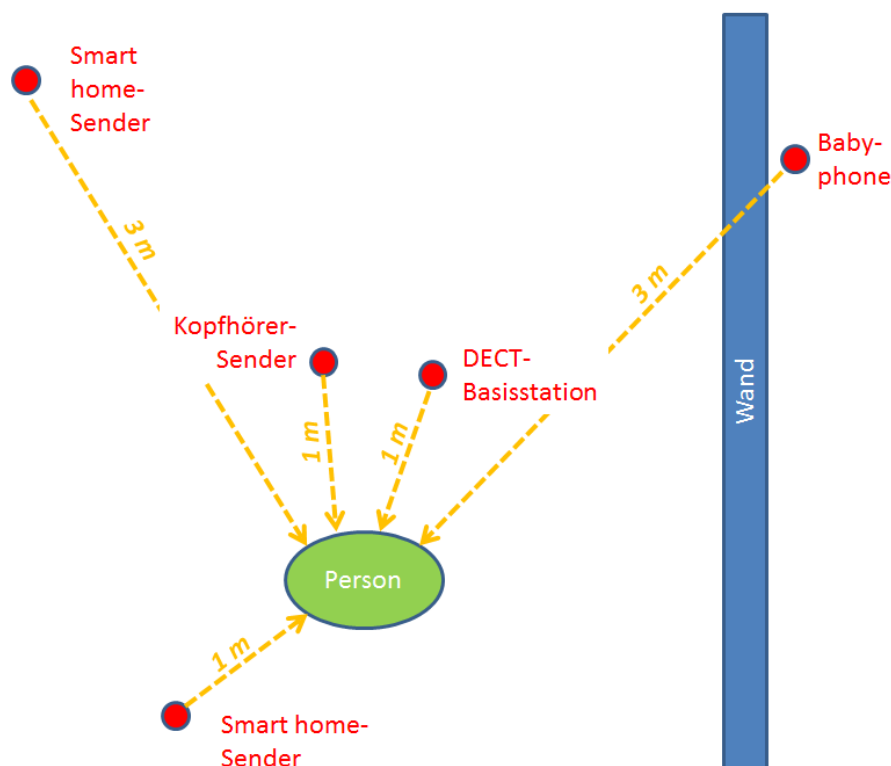
Für das Expositionsszenario „Wohnbereich“ werden die folgenden Geräte, Abstände und Eigenschaften angenommen:

- Ein Funkkopfhörer befindet sich in Betrieb, wobei die Sendestation einen Abstand von 1 m von der exponierten Person haben soll. In (Schmid et al. 2005) wird über Messungen in 1 m und 3 m Abstand der Sendestationen berichtet. Die Sendeleistungen betrugen bis zu 10 mW, der Kopfhörer selbst ist nur Empfangsgerät. Gemessen wurden maximal 0,35 V/m in 1 m Abstand. Die Frequenz der Geräte beträgt üblicherweise 864 MHz. Die Simulation in (Schmid et al. 2005) ergab für diesen Fall eine Leistungsflussdichte von 2,5 $\mu\text{W}/\text{m}^2$.
- Eine DECT-Basisstation befindet sich in 1 m Abstand von der exponierten Person und wird für ein Telefonat einer anderen Person genutzt. In (Schmid et al. 2005) wird über Messungen in 1 m und 3 m Abstand von DECT-Basisstationen berichtet. Die maximalen Sendeleistungen der Geräte betrugen 250 mW, die mittleren Sendeleistungen 20 mW. Gemessen wurde in 1 m Abstand bei maximaler Sendeleistung (Frequenz 1880 MHz bis 1900 MHz) eine elektrische Feldstärke von bis zu 3,6 V/m. Rechnerisch wurde in (Schmid et al. 2005) eine Leistungsflussdichte für einen Aufenthalt in einer Entfernung von etwa 1 m von 540 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ simuliert. Aktuelle Geräte weisen bei einer maximalen Sendeleistung von 250 mW während Gesprächen eine mittlere Sendeleistung von 10 mW auf (siehe Kapitel 2.2). Wir gehen daher in 1 m Abstand von einer elektrischen Feldstärke von 0,15 V/m und einer Leistungsflussdichte von 20 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ aus.
- In 1 m Abstand und in 3 m Abstand befindet sich je ein Smart-home-Sender, der bei einer Frequenz von 868 MHz mit einer maximalen Sendeleistung von 25 mW und einer mittleren Sendeleistung von 1 mW arbeitet. Wegen der annähernd gleichen Frequenz kann hier auf die oben dargestellten Messergebnisse an Sendestationen von Funkkopfhörern Bezug genommen werden. Bei gleichem Abstrahlverhalten ergeben sich dann in 1 m Abstand eine elektrische Feldstärke von 0,88 V/m und eine Leistungsflussdichte von 6,3 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ bei maximaler Sendeleistung. Bei mittlerer Sendeleistung beträgt die elektrische Feldstärke 0,035 V/m und die Leistungsflussdichte 0,25 $\mu\text{W}/\text{m}^2$. Im Abstand 3 m ergeben sich 0,25 V/m und 1,8 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ (maximale Sendeleistung) bzw. 0,01 V/m und 0,07 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ (mittlere Sendeleistung).
- Im Nebenraum wird im Abstand von etwa 3 m ein Babyphone der Frequenz 27 MHz mit einer Sendeleistung von 50 mW betrieben (siehe Kapitel 2.5). In dem von (Schmid et al. 2005) untersuchten Szenario einer Exposition durch ein Babyphone befanden sich das Kinderbett unmittelbar an der Wand des Nebenraums und das Babyphone im Bett auf der Wandseite. Als Wand

war eine Trockenbaukonstruktion mit maximaler HF-Durchlässigkeit angenommen worden. Die Simulation in (Schmid et al. 2005) ergab für diesen Fall bei einer dort angenommenen Frequenz von 446 MHz und einer Leistung von 20 mW eine Leistungsflussdichte von $0,32 \text{ mW/m}^2$. Wir gehen hier für das Expositionsszenario „Wohnbereich“ von einer Leistungsflussdichte von $0,8 \text{ mW/m}^2$ aus.

In Abbildung 6-1 ist das Expositionsszenario „Wohnbereich“ mit seinen Quellen von HF-Strahlung schematisch dargestellt.

Abbildung 6-1: Schematische Darstellung der Quellen und ihrer Anordnung im Expositionsszenario „Wohnbereich“



Quelle: eigene Darstellung

In Tabelle 6-1 sind die Leistungsflussdichten, die sich aus den vorliegenden Untersuchungen ableiten lassen, für die Quellen des Expositionsszenarios „Wohnbereich“ zusammengefasst. Die angegebenen „Grenzwerte“ sind die Referenzwerte aus der EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG, die mit denen der ICNIRP (ICNIRP 1998, 1998) übereinstimmen.

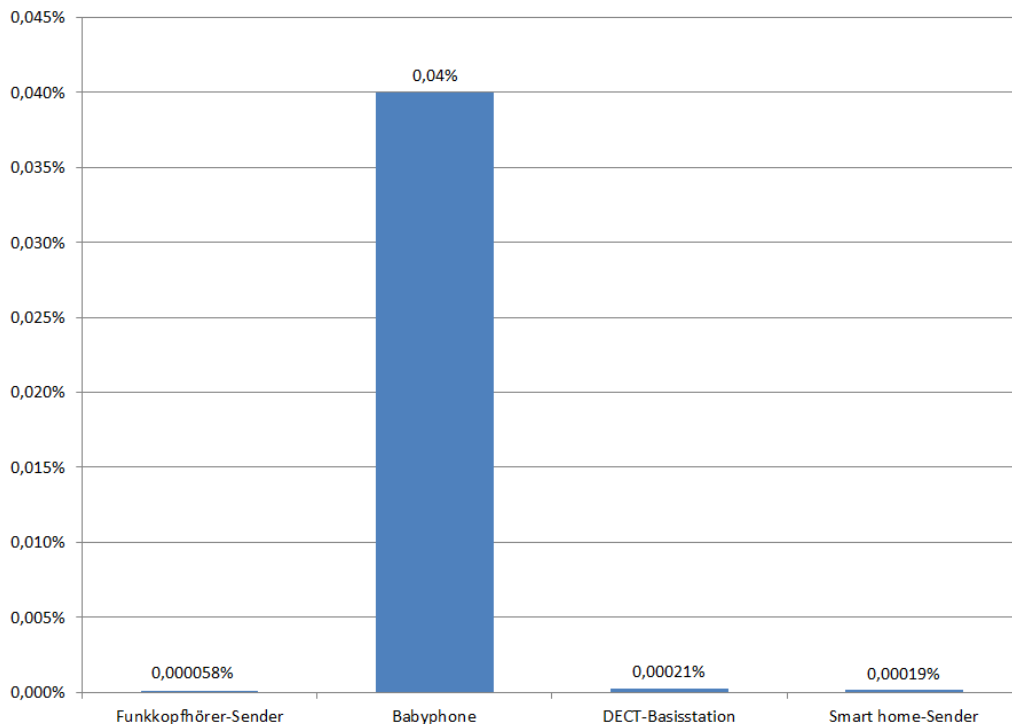
Tabelle 6-1: Magnetische Flussdichten, elektrische Feldstärken und Leistungsflussdichten im Expositionsszenario „Wohnbereich“

Quelle	Leistungsflussdichte (W/m ²)	
	Wert im Szenario	Grenzwert
Funkkopfhörer	2,5	$4,32 \cdot 10^6$
Babyphone	800	$2 \cdot 10^6$
DECT-Basisstation	20	$9,45 \cdot 10^6$
Smart home	8,1	$4,34 \cdot 10^6$
Grenzwertausschöpfung durch die Quellen insgesamt	0,036 %	

Quellen: eigene Ermittlung

In der Summe der in Tabelle 6-1 angegebenen Expositionen der verschiedenen Quellen ergibt sich eine Grenzwertausschöpfung von 0,036 % für die Leistungsflussdichte, wenn die in Kapitel 3.1 angegebenen Summenformeln für die Berücksichtigung unterschiedlicher Frequenzbereiche angewendet werden. Die Daten der Tabelle 6-1 sind in Abbildung 6-2 grafisch dargestellt. Die prozentuale Grenzwertausschöpfung wird deutlich durch das Babyphone dominiert.

Abbildung 6-2: Prozentuale Grenzwertausschöpfung durch die verschiedenen Quellen im Expositionsszenario „Wohnbereich“



Quelle: eigene Darstellung

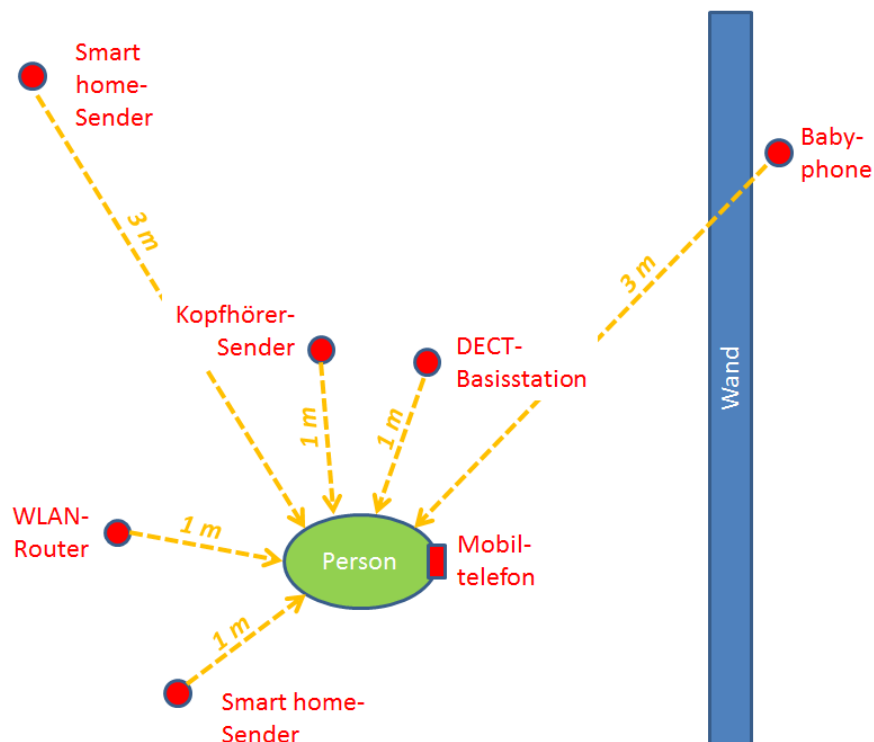
Für das worst-case-Szenario des Expositionsszenarios „Wohnbereich“ wird zusätzlich zum vorangehend dargestellten Expositionsszenario unterstellt, dass die betrachtete Person zeitgleich ein Gespräch über ein Mobiltelefon führt. Außerdem soll sich im gleichen Raum ein WLAN-Access Point befinden.

Für das worst-case-Szenario werden daher zusätzlich die folgenden Quellen einbezogen bzw. die folgenden höheren Leistungen angenommen:

- Die exponierte Person führt ein Gespräch über ein Mobiltelefon. Das BfS stellt auf seiner Homepage die maximalen SAR-Werte (Herstellerangaben) bei der Nutzung am Ohr von 2694 Mobiltelefon-Modellen zur Verfügung (BfS 2017c). Der Maximalwert beträgt 1,94 W/kg. Als 95. Perzentil des SAR-Werts lässt sich für die Geräte, für die der SAR-Wert angegeben ist, ein Wert von 1,28 W/kg ableiten, als 50. Perzentil ein SAR-Wert von 0,54 W/kg. Dem Szenario wird der Wert des 95. Perzentils zugrunde gelegt. Bei der Nutzung eines DECT-Telefons wäre von einer geringeren Exposition auszugehen, so dass dessen Nutzung durch das Szenario abgedeckt ist.
- Ein WLAN-Router ist in 1 m Abstand im download-Betrieb. Für diese Quelle werden die berechneten Werte aus (Schmid et al. 2005) verwendet (Situationen 3 und 5, siehe Tabelle 5-1), aber umgerechnet auf die maximale mittlere Sendeleistung von 17 mW (siehe Kapitel 2.3).

In Abbildung 6-3 ist das Expositionsszenario „Wohnbereich – worst-case“ mit seinen Quellen von HF-Strahlung schematisch dargestellt.

Abbildung 6-3: Schematische Darstellung der Quellen und ihrer Anordnung im Expositionsszenario „Wohnbereich – worst-case“



Quelle: eigene Darstellung

Die Leistungsflussdichten sowie im Fall des Mobiltelefons die SAR, die sich aus den vorliegenden Untersuchungen ableiten lassen, sind für die Quellen des Expositionsszenarios „Wohnbereich worst-case“ in Tabelle 6-2 zusammengefasst. Die angegebenen „Grenzwerte“ sind die Referenzwerte aus der EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG, die identisch sind mit den Empfehlungen der ICNIRP (ICNIRP 1998).

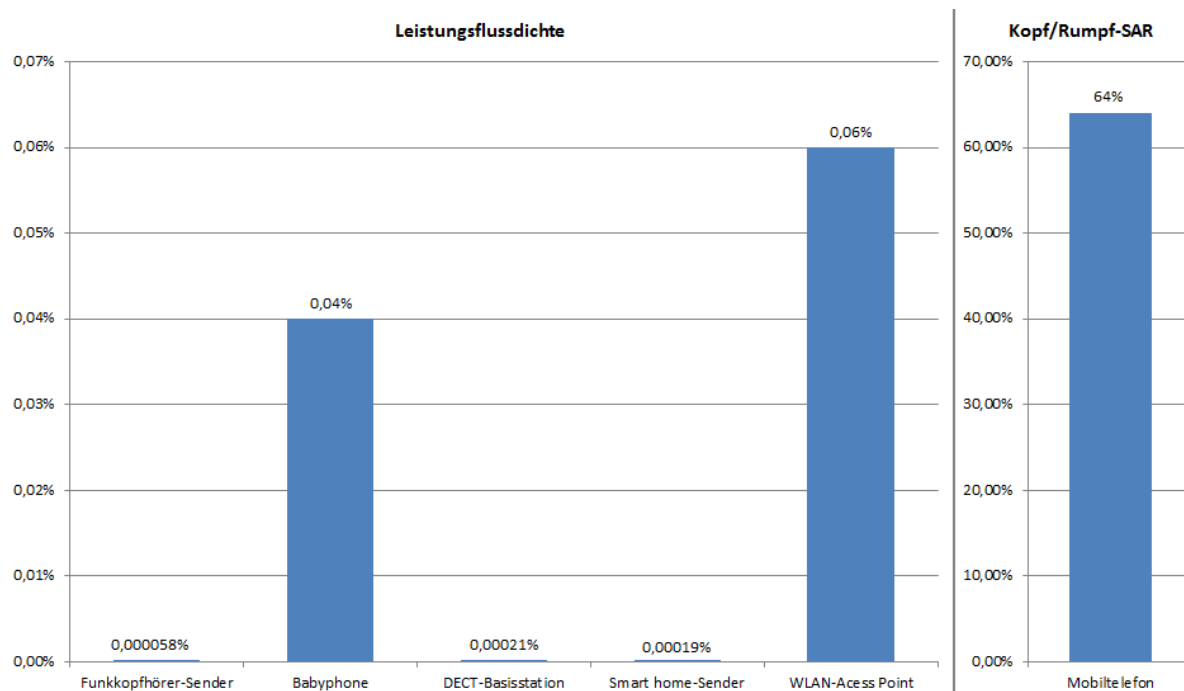
Tabelle 6-2: Leistungsflussdichten und SAR-Werte im Expositionsszenario „Wohnbereich – worst-case“

Quelle	Leistungsflussdichte ($\mu\text{W}/\text{m}^2$)		Spezifische Absorptionsrate (Kopf/Rumpf) (W/kg)	
	Wert im Szenario	Grenzwert	Wert im Szenario	Grenzwert
Funkkopfhörer	2,5	$4,32 \cdot 10^6$	-	-
Babyphone	800	$2 \cdot 10^6$	-	-
DECT-Basisstation	20	$9,45 \cdot 10^6$	-	-
Smart home	8,1	$4,34 \cdot 10^6$	-	-
WLAN-Router	6.000	$10 \cdot 10^6$	-	-
Mobiltelefon	-	-	1,28	2
Grenzwertausschöpfung durch die Quellen insgesamt	0,01 %		64 %	

Quellen: eigene Ermittlung

In der Summe der in Tabelle 6-2 angegebenen Expositionen der verschiedenen Quellen ergibt sich eine Grenzwertausschöpfung von 0,10 % für die Leistungsflussdichte und von 64 % für die SAR im Kopf. Die in Tabelle 6-2 aufgeführten Daten sind in Abbildung 6-4 als prozentuale Grenzwertausschöpfung, getrennt für die Leistungsflussdichte und die Kopf/Rumpf-SAR, grafisch darstellt. Die prozentuale Grenzwertausschöpfung wird in diesem Expositionsszenario deutlich durch das am Ohr genutzte Mobiltelefon dominiert.

Abbildung 6-4: Prozentuale Grenzwertausschöpfung durch die verschiedenen Quellen im Expositionsszenario „Wohnbereich – worst-case“



Quelle: eigene Darstellung

6.1.2. Expositionsszenario „häuslicher Arbeitsbereich“

Für das Szenario einer intensiven Nutzung von Geräten mit Abstrahlung hochfrequenter elektromagnetischer Felder im Expositionsszenario „häuslicher Arbeitsbereich“ wird eine Person betrachtet, die an einem Notebook arbeitet und dabei WLAN nutzt. Das Notebook soll dabei mit einer drahtlosen Maus und einer drahtlosen Tastatur bedient werden. Im häuslichen Arbeitszimmer befindet sich eine DECT-Basisstation, über die eine andere Person telefoniert. Es befinden sich zwei Smart-home-Sender im gleichen Raum. Ebenfalls im gleichen Raum könnten auch induktive Ladegeräte in Betrieb sein, die aber aus den weiter oben in Kapitel 6.1.1 genannten Gründen nicht eigens in das Expositionsszenario einbezogen werden.

Für das Expositionsszenario „häuslicher Arbeitsbereich“ werden die folgenden Geräte, Abstände und Eigenschaften angenommen:

- Für das Notebook und den WLAN-Zugang werden Ergebnisse der Untersuchung der Leistungsflussdichte von (Schmid et al. 2005) herangezogen. Für den WLAN-Router mit einer Leistung von 50 mW wurde dort im download-Betrieb bei einer Frequenz von 2.462 MHz eine Leistungsflussdichte von 1,79 mW/m² simuliert, für das Notebook mit Leistung von 16 mW im download-Betrieb eine Leistungsflussdichte von 4 µW/m². Wir gehen für das Szenario von einer Leistung des WLAN-Routers von 17 mW aus, woraus sich eine Leistungsflussdichte von 600 µW/m² ergibt.

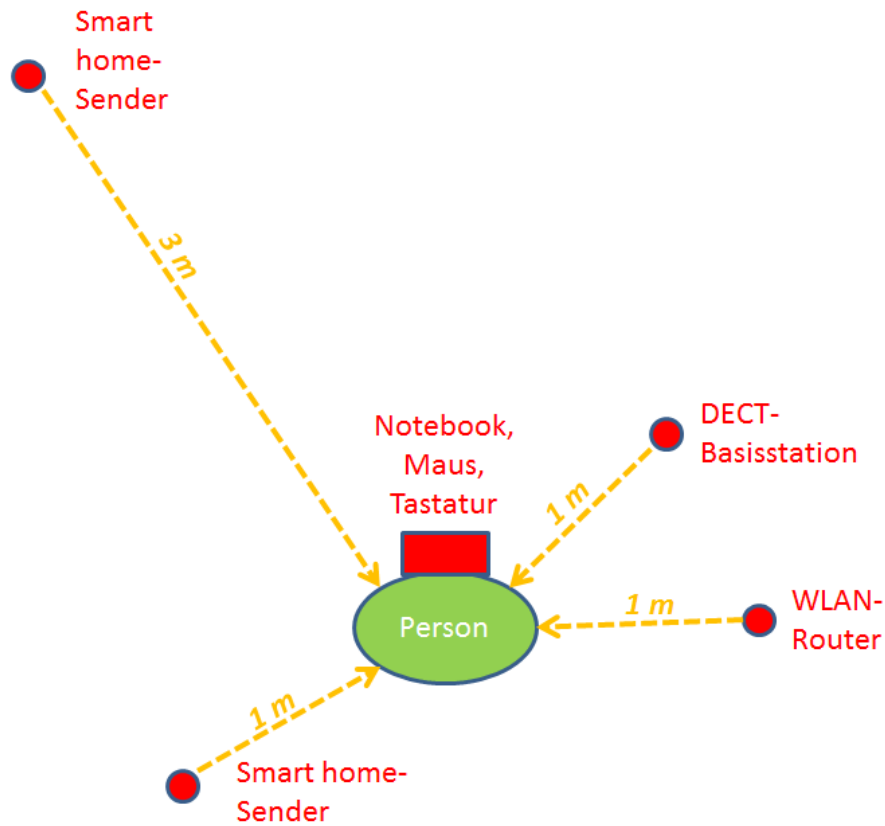
SAR-Werte wurden in (Hansen et al. 2007b) für verschiedene Arten der Nutzung eines Notebooks und verschiedene Positionen des WLAN-Routers bestimmt (siehe Tabelle 5-3). Die höchsten SAR-Werte für die sitzende erwachsene Person am Schreibtisch betrugen, hier umge-

rechnet auf eine Leistung von 16 mW, 19 $\mu\text{W/kg}$ (Ganzkörper), 860 $\mu\text{W/kg}$ (Kopf/Rumpf) und 2.300 $\mu\text{W/kg}$ (Gliedermaßen). Für einen an der Wand neben der exponierten Person in Höhe des Kopfes angebrachten WLAN-Router betrugen die SAR-Werte, hier umgerechnet auf eine Leistung von 17 mW, 1,5 $\mu\text{W/kg}$ (Ganzkörper), 3.000 $\mu\text{W/kg}$ (Kopf/Rumpf) und 37 $\mu\text{W/kg}$ (Gliedermaßen).

- Für die Nutzung einer drahtlosen Maus und einer drahtlosen Tastatur im Frequenzbereich von 27 MHz bis 40 MHz wurden in (Kühn et al. 2005) elektrische Feldstärken gemessen und SAR-Werte bestimmt. Die elektrische Feldstärke betrug sowohl bei der Maus als auch bei der Tastatur in 10 cm Abstand 1,5 V/m, an den Fingern der exponierten Person, maximal 6,5 V/m (Daumen). Der maximale SAR-Wert betrug für beide Arten von Geräten $< 5 \text{ mW/kg}$ (Grenze des Messbereichs).
- Eine DECT-Basisstation befindet sich in 1 m Abstand von der exponierten Person und wird für ein Telefonat einer anderen Person genutzt. Wie im Expositionsszenario „Wohnbereich“ wird von einer Leistungsflussdichte von 210 $\mu\text{W/m}^2$ ausgegangen.
- In 1 m Abstand und in 3 m Abstand befindet sich je ein Smart-home-Sender, der bei einer Frequenz von 868 MHz mit einer maximalen Sendeleistung von 25 mW und einer mittleren Sendeleistung von 1 mW arbeitet. Wie im Expositionsszenario „Wohnbereich“ wird von einer Leistungsflussdichte von zusammen 8,1 $\mu\text{W/m}^2$ ausgegangen.

In Abbildung 6-5 ist das Expositionsszenario „häuslicher Arbeitsbereich“ mit seinen Quellen von HF-Strahlung schematisch dargestellt.

Abbildung 6-5: Schematische Darstellung der Quellen und ihrer Anordnung im Expositionsszenario „häuslicher Arbeitsbereich“



Quelle: eigene Darstellung

In Tabelle 6-3 sind die Leistungsflussdichten und SAR-Werte, die sich aus den vorliegenden Untersuchungen ableiten lassen, für die Quellen des Expositionsszenarios „häuslicher Arbeitsbereich“ zusammengefasst. Die angegebenen „Grenzwerte“ sind dabei die der EU-Ratsempfehlung (1999/519/EG 1999), die mit den Empfehlungen der ICNIRP (ICNIRP 1998) übereinstimmen.

Tabelle 6-3: Leistungsflussdichten und SAR-Werte im Expositionsszenario „häuslicher Arbeitsbereich“

Quelle	Leistungsflussdichte ($\mu\text{W}/\text{m}^2$)		SAR ($\mu\text{W}/\text{kg}$)	
	Wert im Szenario	Grenzwert	Wert im Szenario	Grenzwert
WLAN-Router	600	$10 \cdot 10^6$	1,5 (Gk)	$0,08 \cdot 10^6$
			3.0000 (KR)	$2 \cdot 10^6$
			37 (GI)	$4 \cdot 10^6$
Notebook	4	$10 \cdot 10^6$	19 (Gk)	$0,08 \cdot 10^6$
			860 (KR)	$2 \cdot 10^6$
			2.300 (GI)	$4 \cdot 10^6$
Maus	-	-	< 5.000 (GI)	$4 \cdot 10^6$
Tastatur	-	-	< 5.000 (GI)	$4 \cdot 10^6$
DECT-Basisstation	540	$9,45 \cdot 10^6$	-	-
Smart home	8,1	$4,34 \cdot 10^6$	-	-
Grenzwertausschöpfung durch die Quellen insgesamt			0,026 % (Gk)	
			0,19 % (KR)	
			0,31 % (GI)	

Gk: Ganzkörper KR: Kopf/Rumpf GI: Gliedmaßen

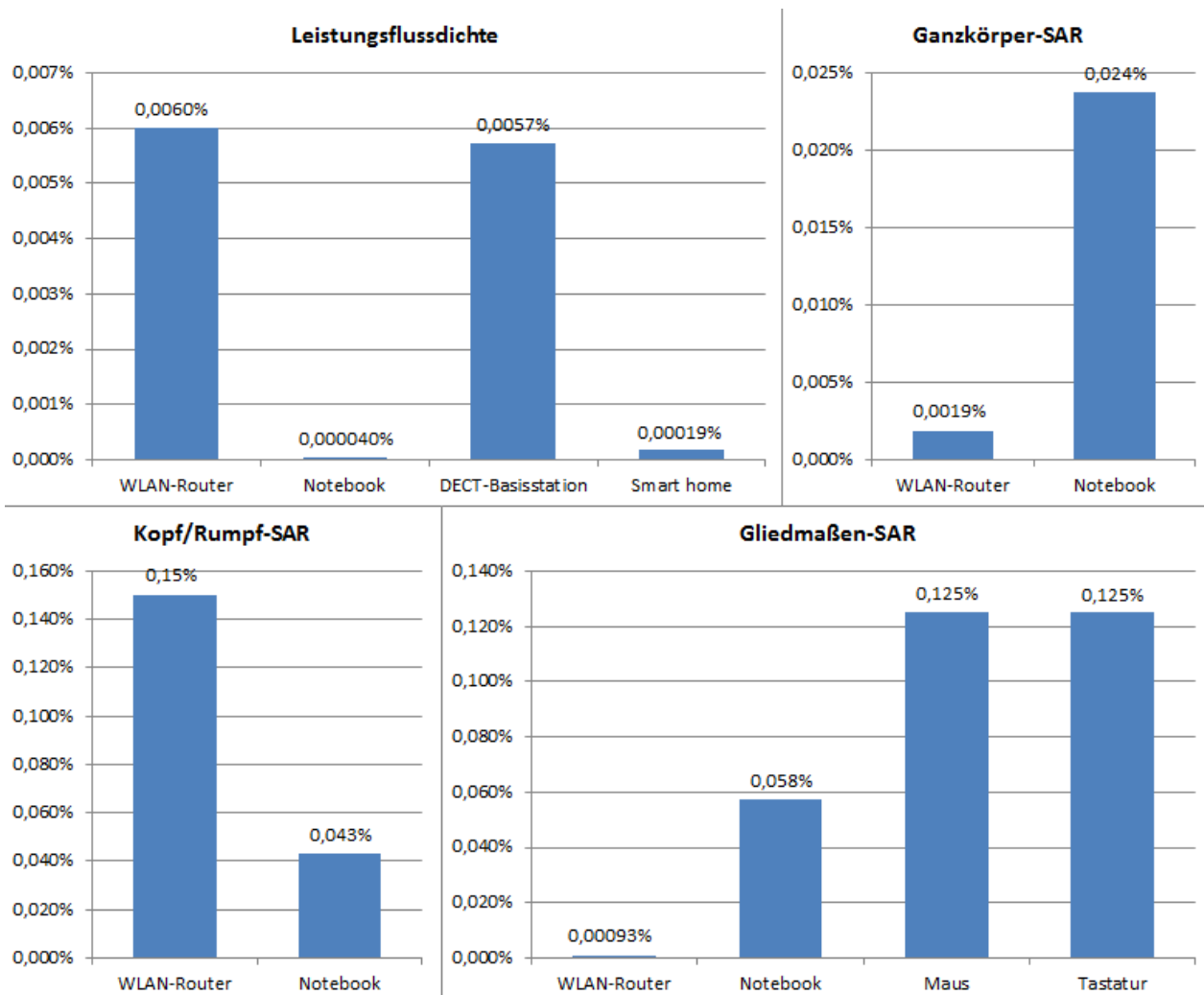
Quellen: eigene Ermittlung

In der Summe der in Tabelle 6-3 angegebenen Expositionen der verschiedenen Quellen ergeben sich die folgenden prozentualen Grenzwertausschöpfungen:

- 0,012 % für die Leistungsflussdichte,
- 0,026 % für die Ganzkörper-SAR,
- 0,19 % für die Kopf/Rumpf-SAR und
- 0,31 % für die Gliedmaßen-SAR.

Die prozentuale Grenzwertausschöpfung ist für die einzelnen Quellen in Abbildung 6-6 grafisch darstellt. Die prozentuale Grenzwertausschöpfung rührt bei der Leistungsflussdichte vor allem vom WLAN-Router und der DECT-Basisstation her. Bei der Kopf/Rumpf-SAR dominiert der WLAN-Router.

Abbildung 6-6: Prozentuale Grenzwertausschöpfungen durch die verschiedenen Quellen im Expositionsszenario „häuslicher Arbeitsbereich“



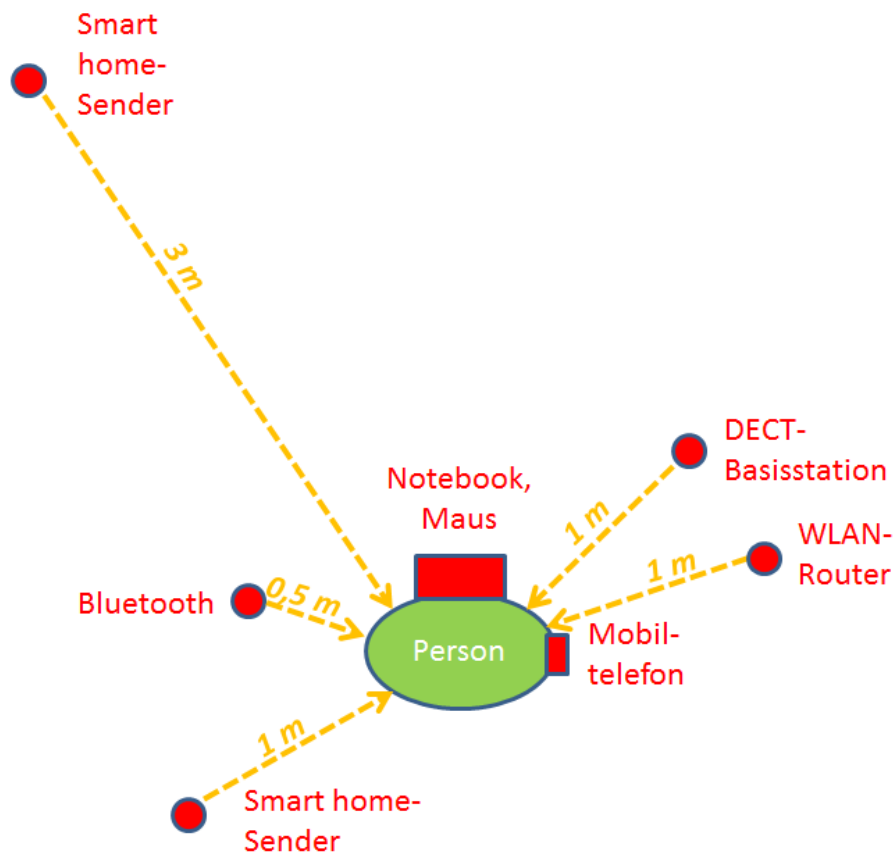
Quelle: eigene Darstellung

Im Expositionsszenario „häuslicher Arbeitsbereich – worst-case“ wird hier zusätzlich von folgenden Quellen hochfrequenter Felder ausgegangen:

- Nutzung von Bluetooth (Frequenz 2.400 MHz, mittlere Sendeleistung 1 mW, siehe Kapitel 2.4), wobei sich der Sender in 0,5 m Abstand von der exponierten Person befinden soll. Die Expositionsdaten werden hier, angepasst auf Leistung und Abstand, aus denen des WLAN abgeleitet.
- Die exponierte Person führt ein Telefonat über ein Mobiltelefon (Exposition wie im Expositionsszenario „Wohnbereich – worst-case“). Da sie dies am Ohr halten soll, benutzt sie zeitgleich nur die Maus.

In Abbildung 6-7 ist das Expositionsszenario „häuslicher Arbeitsbereich – worst-case“ mit seinen Quellen von HF-Strahlung schematisch dargestellt.

Abbildung 6-7: Schematische Darstellung der Quellen und ihrer Anordnung im Expositionsszenario „häuslicher Arbeitsbereich – worst-case“



Quelle: eigene Darstellung

In Tabelle 6-4 sind die Leistungsflussdichten und SAR-Werte, die sich aus den vorliegenden Untersuchungen ableiten lassen, für die Quellen des Expositionsszenarios „häuslicher Arbeitsbereich – worst-case“ zusammengefasst. Die angegebenen „Grenzwerte“ sind dabei die der EU-Ratsempfehlung (1999/519/EG 1999), die mit den Empfehlungen der ICNIRP (ICNIRP 1998) übereinstimmen.

Tabelle 6-4: Leistungsflussdichten und SAR-Werte im Expositionsszenario „häuslicher Arbeitsbereich – worst-case“

Quelle	Leistungsflussdichte ($\mu\text{W}/\text{m}^2$)		SAR ($\mu\text{W}/\text{kg}$)	
	Wert im Szenario	Grenzwert	Wert im Szenario	Grenzwert
WLAN-Router	600	$10 \cdot 10^6$	1,5 (Gk)	$0,08 \cdot 10^6$
			3.000 (KR)	$2 \cdot 10^6$
			37 (Gl)	$4 \cdot 10^6$
Notebook	4	$10 \cdot 10^6$	19 (Gk)	$0,08 \cdot 10^6$
			860 (KR)	$2 \cdot 10^6$
			2.300 (Gl)	$4 \cdot 10^6$
Maus	-	-	< 5.000 (Gl)	$4 \cdot 10^6$
Bluetooth	7,1	$10 \cdot 10^6$	0,18 (Gk)	$0,08 \cdot 10^6$
			350 (KR)	$2 \cdot 10^6$
			4,4 (Gl)	$4 \cdot 10^6$
Mobiltelefon	-	-	$1,28 \cdot 10^6$ (KR)	$2 \cdot 10^6$
DECT-Basisstation	540	$9,45 \cdot 10^6$	-	-
Smart home	8,1	$4,34 \cdot 10^6$	-	-
Grenzwertausschöpfung durch die Quellen insgesamt			0,026 % (Gk)	
			64,2 % (KR)	
			0,31 % (Gl)	
Gk: Ganzkörper	KR: Kopf/Rumpf		Gl: Gliedmaßen	

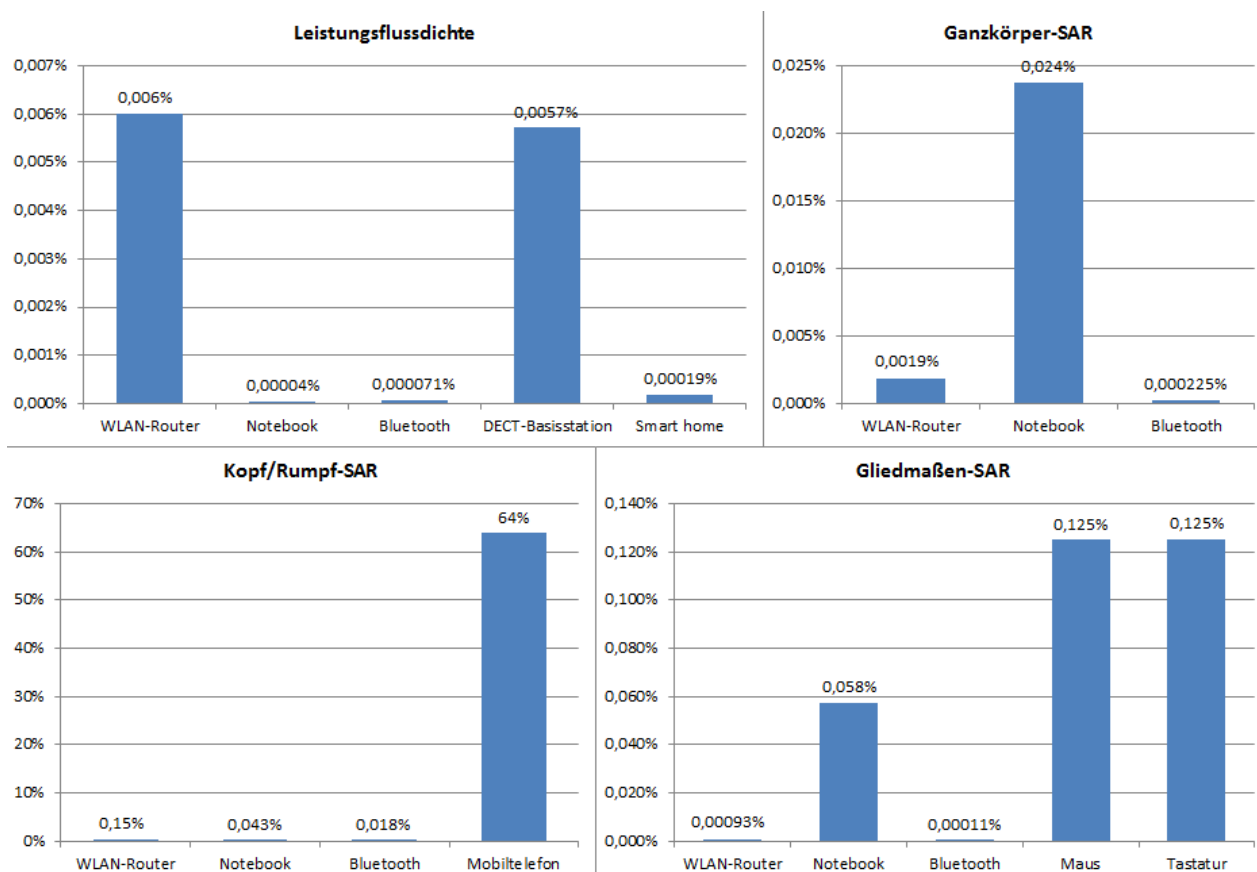
Quellen: eigene Ermittlung

In der Summe der in Tabelle 6-4 angegebenen Expositionen der verschiedenen Quellen ergeben sich die folgenden prozentualen Grenzwertausschöpfungen:

- 0,012 % für die Leistungsflussdichte,
- 0,026 % für die Ganzkörper-SAR,
- 64,2 % für die Kopf/Rumpf-SAR und
- 0,31 % für die Gliedmaßen-SAR.

Die prozentuale Grenzwertausschöpfung ist für die einzelnen Quellen in Abbildung 6-8 grafisch dargestellt. Bei der Leistungsflussdichte dominieren der WLAN-Router und die DECT-Basisstation, bei der Kopf/Rumpf-SAR das Mobiltelefon.

Abbildung 6-8: Prozentuale Grenzwertausschöpfungen durch die verschiedenen Quellen im Expositionsszenario „häuslicher Arbeitsbereich – worst-case“



Quelle: eigene Darstellung

6.1.3. Expositionsszenario „häuslicher Küchenbereich“

Im Expositionsszenario „häuslicher Küchenbereich“ wird eine Person betrachtet, die an einem Induktionsherd Gerichte zubereitet und dabei auf einem Tablet Kochrezepte im Internet ansieht. Die Person soll außerdem durch zwei Smart-home-Sender exponiert sein. Für das Expositionsszenario werden die folgenden Eigenschaften und Abstände der Geräte angenommen:

- Induktionsherde arbeiten mit Frequenzen im Bereich von 20 kHz bis 100 kHz und bei Gesamtleistungen für alle vorhandenen Kochfelder bis 7.500 W. Es muss gemäß (BAG 2016c) der Referenzwert der magnetischen Flussdichte von $6,25 \mu\text{T}^1$ beim Betrieb einer Kochzone mit einer

¹ In (ICNIRP 1998) wird der Referenzwert von $6,25 \mu\text{T}$ für diesen Frequenzbereich empfohlen, in (ICNIRP 2010) der Referenzwert $27 \mu\text{T}$. In der 26. BImSchV ist für deren Regelungsbereich seit 2013 ein Grenzwert von $27 \mu\text{T}$ festgelegt, zuvor betrug er $6,25 \mu\text{T}$.

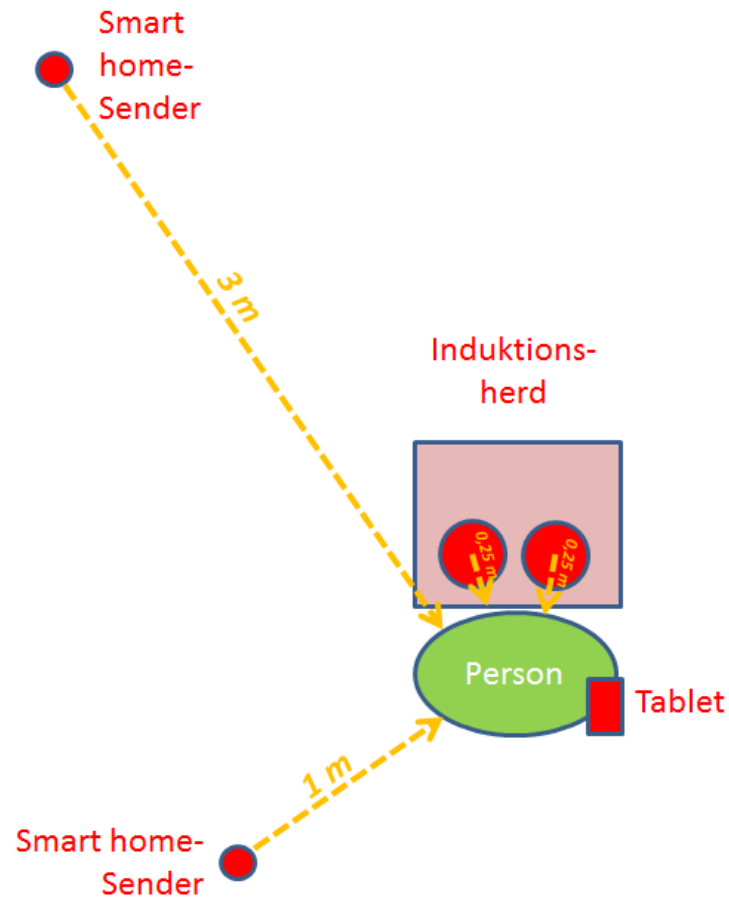
geeigneten, genügend großen und zentriert platzierten Pfanne in einem Abstand von 30 cm zum Kochfeld eingehalten werden. Messungen haben gezeigt, dass das gleichzeitige Betreiben von mehreren Kochzonen nicht wesentlich größere Streufelder vor dem Herd erzeugt als der Betrieb einer einzelnen Kochzone (BAG 2016c).

Der Mindestabstand von 30 cm wird beim Kochen nicht immer eingehalten. Daher wurden in (BAG 2016c) abstandsabhängige Streufelder bei maximaler Heizleistung untersucht. Erwartungsgemäß sind die Streufelder umso grösser, je näher beim Kochfeld gemessen wird. Im Abstand von 30 cm wurde bei allen untersuchten Modellen der Referenzwert von 6,25 μT eingehalten. Das Streufeld 1 cm vor der Kante des Kochfeldes übersteigt den Referenzwert in den meisten Fällen. Bei unzentrierter Platzierung der Pfannen wurde der Referenzwert mit für Induktionsherde geeigneten Pfannen im Abstand von < 1 cm bis 12 cm, mit ungünstigen Pfannen im Abstand von < 1 cm bis 20 cm erreicht. Alle Messungen wurden mit der größten Heizleistung durchgeführt. In (BAG 2016c) wurde schließlich festgestellt, dass bei einem in der Praxis wohl üblichen Abstand von mindestens 5 cm bis 10 cm und einer sachgemäßen Handhabung der Pfanne (günstig, zentriert platziert) der Referenzwert in allen Messungen eingehalten wird. Es wird hier für das Expositionsszenario „häuslicher Küchenbereich“ angenommen, dass die exponierte Person einer magnetischen Flussdichte von 8 μT ausgesetzt ist.

- Das BfS stellt auf seiner Homepage SAR-Werte von Tablets zur Verfügung (BfS 2017b). Darin sind u. a. die maximalen SAR-Werte (Herstellerangaben) in verschiedenen Abständen aufgeführt. Für den Abstand 1,5 cm sind SAR-Werte am Körper von 0,10 W/kg und 0,91 W/kg genannt. Für das Expositionsszenario „häuslicher Küchenbereich“ wird hier angenommen, dass die exponierte Person einer Kopf/Rumpf-SAR von 0,9 W/kg ausgesetzt ist.
- Bezüglich der Expositionen durch Smart-home-Sender werden die gleichen Annahmen getroffen wie in den vorangehend beschriebenen Expositionsszenarien (zwei Sender in Abständen von 1 m und 3 m).

In Abbildung 6-9 ist das Expositionsszenario „häuslicher Küchenbereich“ mit seinen Quellen von HF-Strahlung schematisch dargestellt.

Abbildung 6-9: Schematische Darstellung der Quellen und ihrer Anordnung im Expositionsszenario „häuslicher Küchenbereich“



Quelle: eigene Darstellung

In Tabelle 6-5 sind die Leistungsflussdichten und SAR-Werte, die sich aus den vorliegenden Untersuchungen ableiten lassen, für die Quellen des Expositionsszenarios „häuslicher Küchenbereich“ zusammengefasst. Die angegebenen „Grenzwerte“ sind dabei die der EU-Ratsempfehlung (1999/519/EG 1999), die mit den Empfehlungen der ICNIRP (ICNIRP 1998) bzw. (ICNIRP 2009, 2010) übereinstimmen.

Tabelle 6-5: Magnetische Flussdichten, Leistungsflussdichten und SAR-Werte im Expositionsszenario „häuslicher Küchenbereich“

Quelle	Magnetische Flussdichte (µT)		Leistungsflussdichte (µW/m²)		Kopf/Rumpf-SAR (µW/kg)	
	Wert im Szenario	Grenzwert	Wert im Szenario	Grenzwert	Wert im Szenario	Grenzwert
Induktionsherd	8	27	-	-	-	-
Tablet	-	-	-	-	$0,9 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$
Smart home	-	-	8,1	$4,34 \cdot 10^6$	-	-
Grenzwertausschöpfung	29,6 %		0,00019 %		45,0 %	

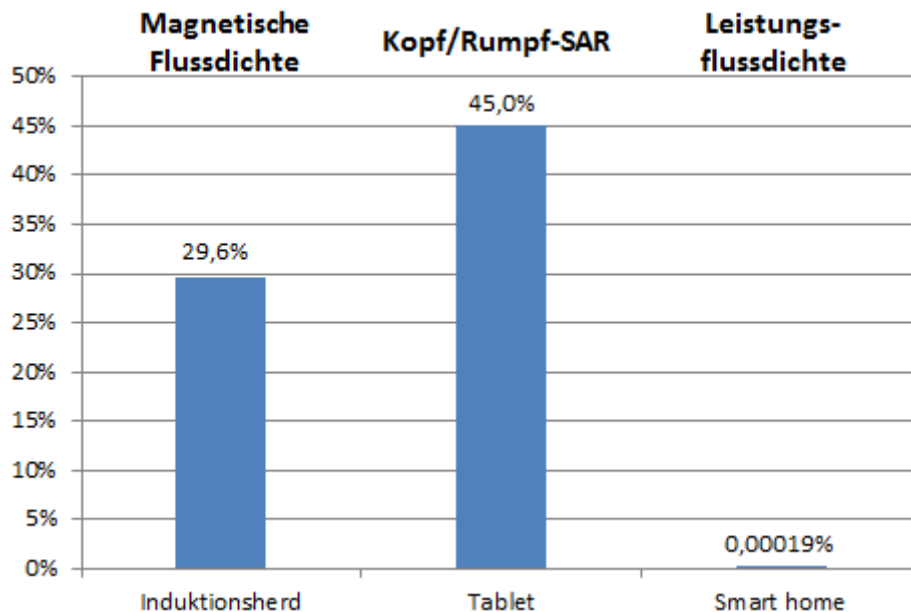
Quellen: eigene Ermittlung

Im Expositionsszenario „häuslicher Küchenbereich“ ergeben sich die folgenden prozentualen Grenzwertausschöpfungen:

- 29,6 % für die magnetische Flussdichte,
- 0,00019 % für die Leistungsflussdichte und
- 45,0 % für die Kopf/Rumpf-SAR.

Die prozentuale Grenzwertausschöpfung ist für die einzelnen Quellen in Abbildung 6-10 grafisch darstellt.

Abbildung 6-10: Prozentuale Grenzwertausschöpfungen durch die verschiedenen Quellen im Expositionsszenario „häuslicher Küchenbereich“



Quelle: eigene Darstellung

Für das Expositionsszenario „häuslicher Küchenbereich - worst-case“ wird zusätzlich davon ausgegangen, dass in der Küche ein Mikrowellenherd mit Leckstrahlung betrieben wird. Außerdem soll die exponierte Person statt das Tablet zu nutzen mit einem Mobiltelefon telefonieren. Dem Expositionsszenario werden die folgenden Randbedingungen zugrunde gelegt:

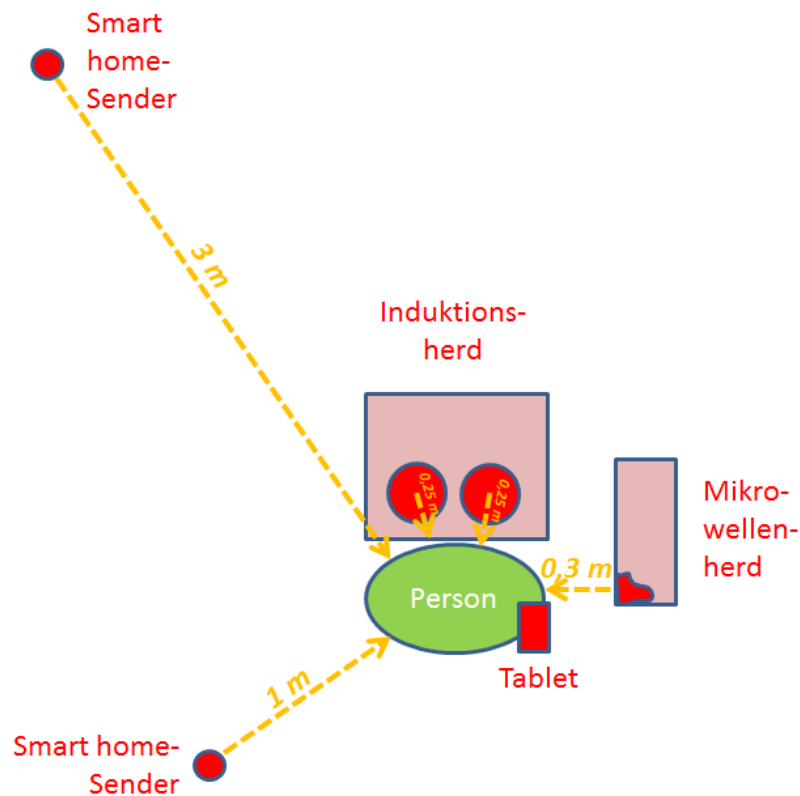
- Mikrowellenherde weisen eine Frequenz von 2.450 MHz auf und werden in Leistungsbereichen zwischen 500 W und 2.000 W betrieben. Die durchschnittliche Leckstrahlung (als Leistungsflussdichte) gebrauchter Geräte wird in (BAG 2016d) mit bis zu 0,41 mW/cm², als höchster Mittelwert aus Untersuchungen verschiedener Autoren, angegeben. Für neue Geräte wird in (BAG 2016d) eine Leistungsflussdichte von 0,08 mW/cm² genannt. Außerdem werden in (BAG 2016d) SAR-Werte bei maximal zulässiger Leckstrahlung für verschiedene Abstände genannt:
 - in 5 cm Abstand 0,256 W/kg (Kopf/Rumpf) und
 - in 30 cm Abstand 0,0056 W/kg (Ganzkörper).

Im Expositionsszenario wird hier davon ausgegangen, dass die exponierte Person am Induktionsherd tätig ist und vom gleichzeitig betriebenen Mikrowellenherd dabei 30 cm entfernt ist.

- Für das Mobiltelefon werden die gleichen Strahlungseigenschaften wie in den vorangegangenen Expositionsszenarien angenommen.

In Abbildung 6-11 ist das Expositionsszenario „häuslicher Küchenbereich – worst-case“ mit seinen Quellen von HF-Strahlung schematisch dargestellt.

Abbildung 6-11: Schematische Darstellung der Quellen und ihrer Anordnung im Expositionsszenario „häuslicher Küchenbereich – worst-case“



Quelle: eigene Darstellung

In Tabelle 6-6 sind die magnetischen Flussdichten, Leistungsflussdichten und SAR-Werte, die sich aus den vorliegenden Untersuchungen ableiten lassen, für die Quellen des Expositionsszenarios „häuslicher Küchenbereich – worst-case“ zusammengefasst. Die angegebenen „Grenzwerte“ sind dabei die der EU-Ratsempfehlung (1999/519/EG 1999), die mit den Empfehlungen der ICNIRP (ICNIRP 1998) bzw. (ICNIRP 2010) übereinstimmen.

Tabelle 6-6: Leistungsflussdichten und SAR-Werte im Expositionsszenario „Wohnbereich – worst-case“

Quelle	Magnetische Flussdichte (µT)		Leistungsflussdichte (µW/m²)		SAR (µW/kg)	
	Wert im Szenario	Grenzwert	Wert im Szenario	Grenzwert	Wert im Szenario	Grenzwert
Induktionsherd	8	27	-	-	-	-
Mikrowellenherd	-	-	-	-	5.600 (Gk)	80.000
Mobiltelefon	-	-	-	-	1,28·10 ⁶ (KR)	2·10 ⁶
Smart home	-	-	8,1	4,34·10 ⁶	-	-
Grenzwertausschöpfung	29,6 %		0,00019 %		7,0 % (Gk) 64 % (KR)	

Gk: Ganzkörper KR: Kopf/Rumpf

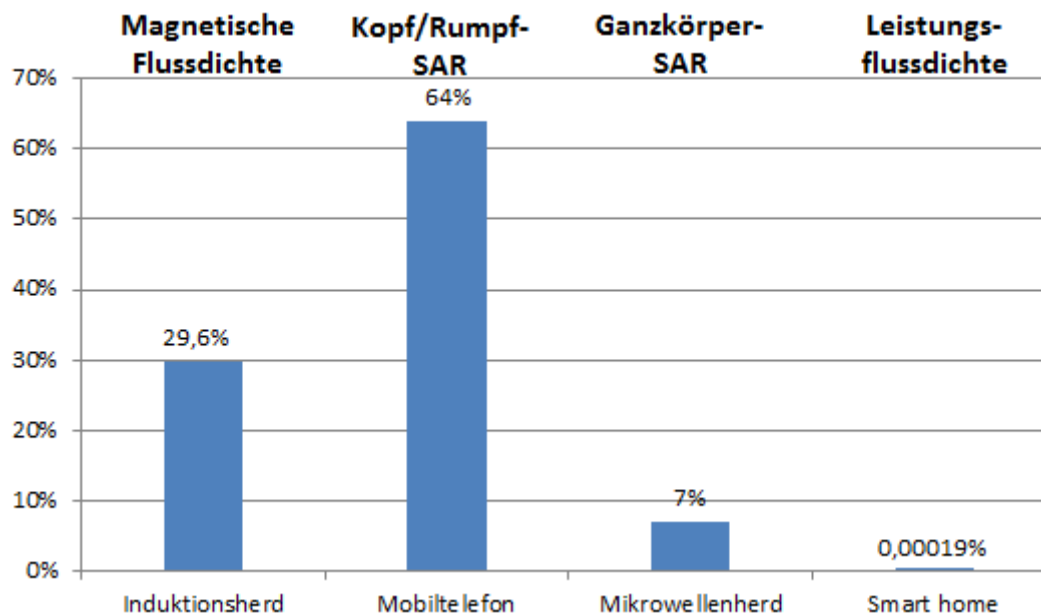
Quellen: eigene Ermittlung

Im Expositionsszenario „häuslicher Küchenbereich – worst-case“ ergeben sich damit die folgenden prozentualen Grenzwertausschöpfungen:

- 29,6 % für die magnetische Flussdichte,
- 0,00019 % für die Leistungsflussdichte,
- 7,0 % für die Ganzkörper-SAR und
- 64 % für die Kopf/Rumpf-SAR.

Die prozentuale Grenzwertausschöpfung ist für die einzelnen Quellen in Abbildung 6-12 grafisch darstellt.

Abbildung 6-12: Prozentuale Grenzwertausschöpfungen durch die verschiedenen Quellen im Expositionsszenario „häuslicher Küchenbereich – worst-case“



Quelle: eigene Darstellung

6.1.4. Expositionsszenario „öffentlicher Raum mit Datenübertragung und Mobilfunk“

Im Expositionsszenario „öffentlicher Raum mit Datenübertragung und Mobilfunk“ wird eine Person betrachtet, die gemäß den Messungen der tatsächlichen HF-Exposition im öffentlichen Raum einer besonders hohen Exposition durch Basisstationen (GSM, UMTS, LTE), durch einen WLAN-hot-spot sowie durch digitale Rundfunk- und Fernsehsender ausgesetzt ist. Zusätzlich wird angenommen, dass die Person ein Gespräch über ein Mobiltelefon führt. Im Einzelnen werden die folgenden Expositionen angesetzt:

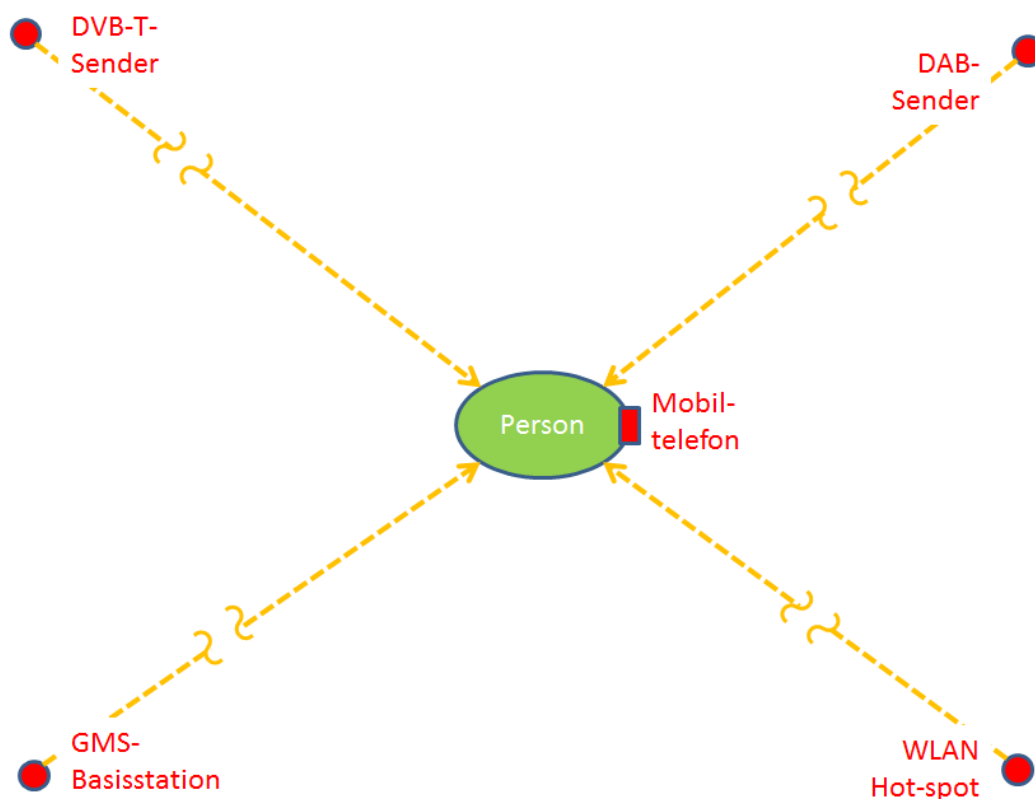
- Die in Deutschland durchgeführten Untersuchungen lassen den Schluss zu, dass die höchsten Leistungsflussdichten in der Nähe von GSM-Basisstationen (Sendefrequenz 900 MHz oder 1.800 MHz) auftreten. Als Gründe werden in (Bornkessel et al. 2006b) die häufig höhere Sendeleistung der GSM-Basisstationen, der gegenüber UMTS niedrigere Grenzwert insbesondere für GSM 900 und die bei den GSM-Basisstationen höhere Wahrscheinlichkeit, in die Hauptkeule einer Antenne, zu geraten, genannt. Auf der Basis von (Bornkessel et al. 2006b) wird hier eine Leistungsflussdichte von 100 mW/m² für das Expositionsszenario angesetzt.
- Die Messungen in der Nähe von WLAN-hot-spots von (Preiner et al. 2006) haben Spitzenwerte der Leistungsflussdichten von 100 mW/m² bis 200 mW/m² ergeben, als 6-Minuten-Mittelwerte um den Faktor 10 bis 100 geringere Leistungsflussdichten. Im Hinblick auf die Einhaltung der Grenzwerte sind die 6-Minuten-Mittelwerte maßgeblich. Für das Expositionsszenario gehen wir konservativ von 20 mW/m² aus (ein Zehntel des maximalen Spitzenwerts).
- Für den Bereich des Rundfunks wurde in (Bornkessel et al. 2006a) festgestellt, dass noch die von der analogen UKW-Technologie herrührenden Expositionen gegenüber den durch die DAB-Signale des digitalen Hörfunks verursachten Expositionen überwiegen. An der weit überwiegenden Zahl der Messpunkte (Frequenzbereich: 174 MHz – 230 MHz und 1.452 MHz – 1.492 MHz)

wurden Leistungsflussdichten von weniger als $1 \mu\text{W}/\text{m}^2$ gemessen, maximal bis etwa $30 \mu\text{W}/\text{m}^2$. Insbesondere in den städtisch geprägten Gebieten der Versorgungsklasse "portable indoor" des digitalen Fernsehens (DVB-T, Frequenzbereich terrestrischer Sender: 174 MHz – 223 MHz und 470 MHz – 862 MHz), hat sich die Exposition gemäß (Bornkessel et al. 2006a) deutlich erhöht. Der Median der Leistungsflussdichte lag bei dieser Versorgungsklasse bei $6,7 \mu\text{W}/\text{m}^2$. In den Gebieten der Versorgungsklasse „fixed antenna“ können dagegen die analogen TV-Signale der umliegenden Sender die Immissionen der DVB-T-Sender noch dominieren. Die maximalen Messwerte lagen in der Größenordnung von $100 \mu\text{W}/\text{m}^2$. Für das Expositionsszenario gehen wir konservativ von einer Leistungsflussdichte von $100 \mu\text{W}/\text{m}^2$ durch DVB-T aus.

- Für das Mobiltelefon werden die gleichen Strahlungseigenschaften wie in den vorangegangenen Expositionsszenarien angenommen.

In Abbildung 6-13 ist das Expositionsszenario „öffentlicher Raum mit Datenübertragung und Mobilfunk“ mit seinen Quellen von HF-Strahlung schematisch dargestellt.

Abbildung 6-13: Schematische Darstellung der Quellen und ihrer Anordnung im Expositionsszenario „öffentlicher Raum mit Datenübertragung und Mobilfunk“



Quelle: eigene Darstellung

In Tabelle 6-7 sind die Leistungsflussdichten und die SAR, die sich aus den vorliegenden Untersuchungen ableiten lassen, für die Quellen des Expositionsszenarios „öffentlicher Raum mit Datenübertragung und Mobilfunk“ zusammengefasst. Die angegebenen „Grenzwerte“ sind dabei die der

EU-Ratsempfehlung (1999/519/EG 1999), die mit denen der Empfehlungen der ICNIRP (ICNIRP 1998) übereinstimmen.

Tabelle 6-7: Leistungsflussdichten und SAR im Expositionsszenario „öffentlicher Raum mit Datenübertragung und Mobilfunk“

Quelle	Leistungsflussdichte (W/m ²)		Kopf/Rumpf-SAR (W/kg)	
	Wert im Szenario	Grenzwert	Wert im Szenario	Grenzwert
GMS-Basisstation	0,1	4,5*	-	-
WLAN-hot-spot	0,02	10	-	-
DAB/DVB-T-Sender	0,0001	2*	-	-
Mobiltelefon	-	-	1,28	2
Grenzwertausschöpfung durch die Quellen insgesamt	2,4 %		64 %	

* bezogen auf den ungünstigeren Fall der Frequenz (900 MHz bei GSM, bis 400 MHz bei DAB/DVB-T)

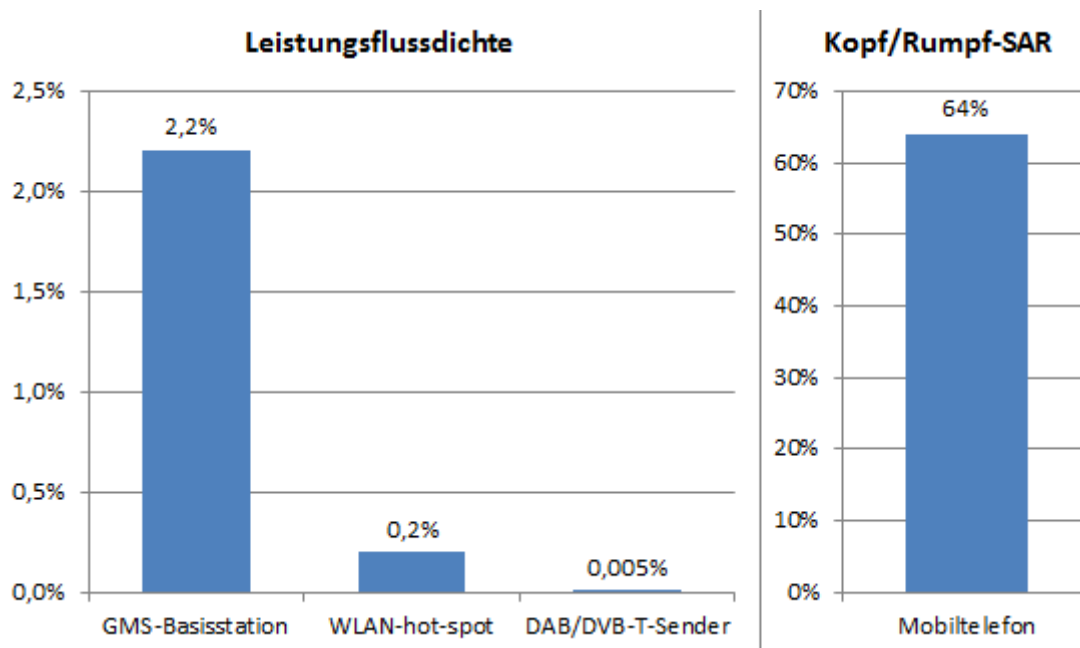
Quellen: eigene Ermittlung

Im Expositionsszenario „öffentlicher Raum mit Datenübertragung und Mobilfunk“ ergeben sich die folgenden prozentualen Grenzwertausschöpfungen:

- 2,4 % für die Leistungsflussdichte und
- 64 % für die Kopf/Rumpf-SAR.

Die prozentuale Grenzwertausschöpfung ist für die einzelnen Quellen in Abbildung 6-14 grafisch dargestellt. Bei der prozentualen Ausschöpfung der Grenzwerte der Leistungsflussdichte dominiert die GSM-Basisstation. Die höchste relative Ausschöpfung ergibt sich bei der Kopf/Rumpf-SAR für das Mobiltelefon.

Abbildung 6-14: Prozentuale Grenzwertausschöpfungen durch die verschiedenen Quellen im Expositionsszenario „öffentlicher Raum mit Datenübertragung und Mobilfunk“



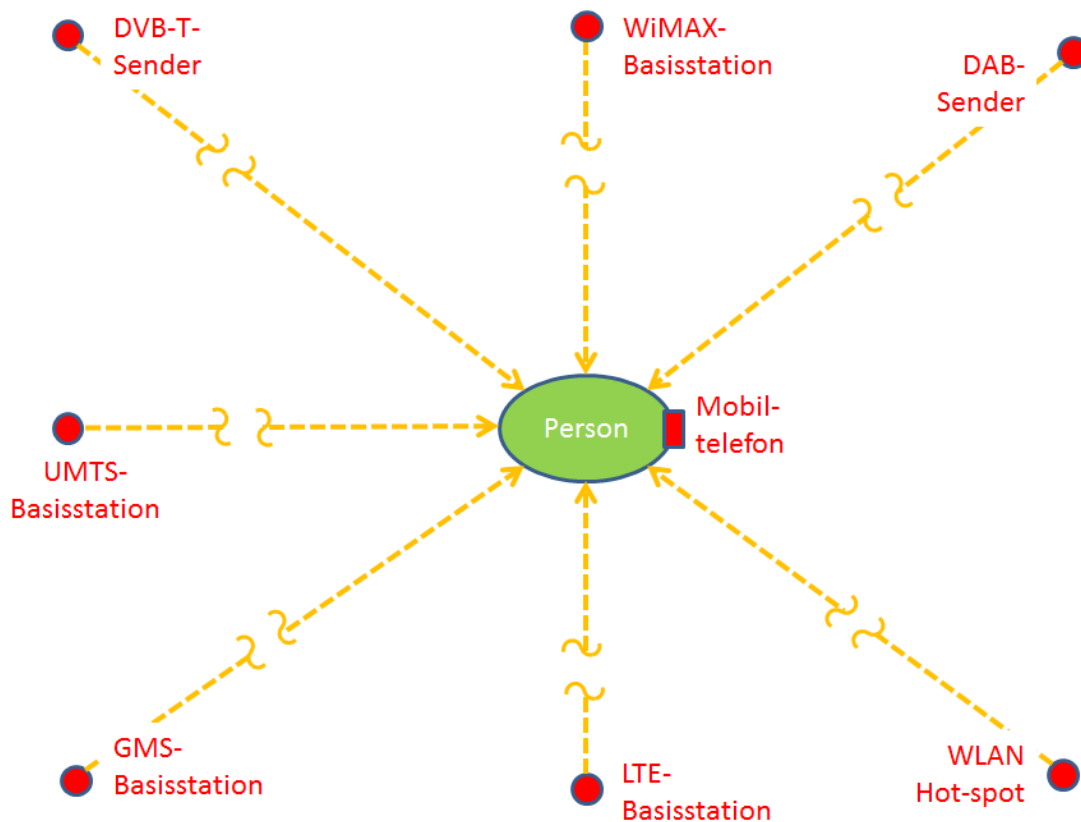
Quelle: eigene Darstellung

Im Expositionsszenario „öffentlicher Raum mit Datenübertragung und Mobilfunk – worst-case“ werden die folgenden weiteren Feldquellen einbezogen:

- Die exponierte Person befindet sich nicht nur im Bereich einer GSM-Basisstation, sondern wird gleichzeitig durch eine UMTS- und eine LTE-Basisstation exponiert. Bei den Messungen von (Bornkessel et al. 2006b) ergab sich durch UMTS-Sender im öffentlichen Raum eine Leistungsflussdichte von maximal etwa 70 mW/m². Bei LTE-Basisstationen ist gemäß der Messungen im öffentlichen Raum gemäß (Bornkessel et al. 2013) von maximal etwa 30 mW/m² auszugehen.
- Mit der Funktechnologie WiMAX sollen Bereiche bis 50 km abgedeckt werden, um ein flächendeckendes Datenübertragungsnetz zu erreichen. Die Frequenz der Sender in Deutschland beträgt 3,6 GHz, die maximale Leistung 40 W. Die Leistung ist daher vergleichbar mit der von UMTS-Basisstationen. Da WiMAX-Sendeanlagen hohe Datenflüsse über definierte Strecken gewährleisten sollen, strahlen sie mit schmalen Keulen nur in eine Richtung ab. Aufgrund dieser schmalen Keulen gehen wir für das Expositionsszenario davon aus, dass die exponierte Person durch WiMAX einer zehnfach höheren Leistungsflussdichte ausgesetzt ist als durch eine in der Nähe befindliche UMTS-Basisstation.

In Abbildung 6-15 ist das Expositionsszenario „öffentlicher Raum mit Datenübertragung und Mobilfunk – worst-case“ mit seinen Quellen von HF-Strahlung schematisch dargestellt.

Abbildung 6-15: Schematische Darstellung der Quellen und ihrer Anordnung im Expositionsszenario „öffentlicher Raum mit Datenübertragung und Mobilfunk – worst-case“



Quelle: eigene Darstellung

In Tabelle 6-8 sind die Leistungsflussdichten und die SAR, die sich aus den vorliegenden Untersuchungen ableiten lassen, für die Quellen des Expositionsszenarios „öffentlicher Raum mit Datenübertragung und Mobilfunk – worst-case“ zusammengefasst. Die angegebenen „Grenzwerte“ sind dabei die der EU-Ratsempfehlung (1999/519/EG 1999), die mit denen der Empfehlungen der ICNIRP (ICNIRP 1998) übereinstimmen.

Tabelle 6-8: Leistungsflussdichten und SAR-Werte im Expositionsszenario „öffentlicher Raum mit Datenübertragung und Mobilfunk – worst-case“

Quelle	Leistungsflussdichte (W/m ²)		Kopf-Sumpf-SAR (W/kg)	
	Wert im Szenario	Grenzwert	Wert im Szenario	Grenzwert
GMS-Basisstation	0,1	4,5*	-	-
UMTS-Basisstation	0,07	10	-	-
LTE-Basisstation	0,03	4*	-	-
WLAN-hot-spot	0,02	10	-	-
DAB/DVB-T-Sender	0,0001	2*	-	-
WiMAX-Basisstation	0,7	10	-	-
Mobiltelefon	-	-	1,28	2
Grenzwertausschöpfung durch die Quellen insgesamt	10,9 %		64 %	

* bezogen auf den ungünstigeren Fall der Frequenz (900 MHz bei GSM, 1.800 MHz bei LTE, bis 400 MHz bei DAB/DVB-T)

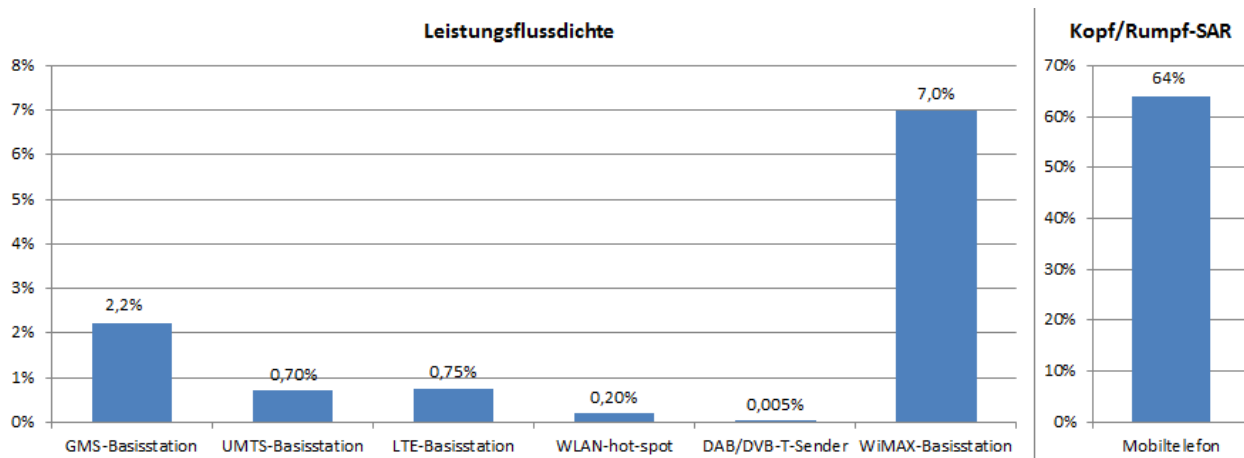
Quellen: eigene Ermittlung

Im Expositionsszenario „öffentlicher Raum mit Datenübertragung und Mobilfunk – worst-case“ ergeben sich die folgenden prozentualen Grenzwertausschöpfungen:

- 10,9 % für die Leistungsflussdichte und
- 64 % für die Kopf/Rumpf-SAR.

Die prozentuale Grenzwertausschöpfung ist für die einzelnen Quellen in Abbildung 6-16 grafisch dargestellt. Bei der Leistungsflussdichte dominiert die GSM-Basisstation, bei der Kopf/Rumpf-SAR das Mobiltelefon.

Abbildung 6-16: Prozentuale Grenzwertausschöpfungen durch die verschiedenen Quellen im Expositionsszenario „öffentlicher Raum mit Datenübertragung und Mobilfunk – worst-case“



Quelle: eigene Darstellung

6.1.5. Expositionsszenario „öffentlicher Raum einschließlich induktivem Laden von Elektrofahrzeugen“

Das induktive, also kabellose, Laden ist in einigen Bereichen weit verbreitet, insbesondere bei elektrischen Kleingeräten. Aber auch andere Verbraucher, wie Förderbänder oder autarke Transportsysteme werden inzwischen zum Teil induktiv geladen. Bei Straßenfahrzeugen gibt es einige Versuche mit dieser Technik, allerdings weniger im öffentlichen Raum.

Für das hier zu entwickelnde theoretisch denkbare Expositionsszenario „öffentlicher Raum einschließlich induktivem Laden von Elektrofahrzeugen“ ist ein Fall relevant, in dem auf Verkehrswegen durch eingebaute Induktionsschleifen darüber befindliche Fahrzeuge in einem Bereich geladen werden, in dem sich auch Fußgänger in der Nähe der Fahrzeuge befinden. Dies kann beispielsweise auf einem Parkplatz oder an einer Ampel der Fall sein, an der Fahrzeuge beim Halt aufgeladen werden und gleichzeitig Fußgänger neben einem solchen Fahrzeug auf ihre Grünphase warten.

Technische Details eines möglicherweise zukünftig sich etablierenden Systems zum induktiven Laden im Straßenverkehr sind noch nicht bekannt. Die Schaffung einer breiten Anwendungsmöglichkeit setzt eine gewisse Normung voraus. Die Literatur zu diesem Thema ist insbesondere mit den technischen Fragen befasst, während im Hinblick auf die HF-Exposition oft nur auf die Notwendigkeit der Einhaltung der entsprechenden Grenzwerte hingewiesen wird. Nachfolgend wird daher anhand verfügbarer Literatur darauf eingegangen, ob das induktive Laden von Fahrzeugen im Straßenverkehr eine relevante Quelle von HF-Expositionen darstellen kann.

In (FfE 2012) wurde die Alltagstauglichkeit von induktiven Ladesystemen untersucht. Ein Aspekt war die technische Tauglichkeit, zu deren Überprüfung Probanden diese Technik über einen gewissen Zeitraum nutzten und einer Befragung zu ihren Erfahrungen unterzogen wurden. Daneben wurden technische Daten erhoben. Schließlich wurden auch Messungen der magnetischen Feldstärke in den Fahrzeugen und außen neben den Fahrzeugen durchgeführt. Dabei wurden zwei Fälle unterschieden: Im ersten Fall befand sich das Fahrzeug in optimaler Position (Sekundärplatte vollständig über der Primärplatte, „best case“), im zweiten Fall in einer sehr ungünstigen Position

(nur Teilüberdeckung von Sekundär- und Primärplatte, „worst case“), bei der das Laden gerade noch möglich war. Im zweiten Fall kommt es zu einer deutlich größeren Streuung des elektromagnetischen Feldes.

Im „best case“ betrug die gemessene magnetische Feldstärke in 60 cm Höhe über dem Boden maximal etwa 10 μT und im Mittel etwa 5,5 μT . In 50 cm Abstand vom Fahrzeug betrugen die Werte noch maximal etwa 3 μT , die Mittelwerte weniger als 2 μT . Die Mittelwerte in 1 m Abstand lagen bereits unterhalb von 1 μT . Innerhalb der Fahrerkabine wurden maximal 0,18 μT und im Mittel 0,06 μT gemessen.

Im „worst case“ wurden mit etwa 22 μT (Maximum) und 13 μT (Mittelwert) etwa doppelt so hohe magnetische Flussdichten in 60 cm Höhe über dem Boden gemessen wie im „best case“. In 50 cm Abstand vom Fahrzeug wurden magnetische Flussdichten von weniger als 10 μT (Maximum) und 4 μT (Mittelwert) gemessen, in 1 m Abstand magnetische Flussdichten von weniger als 6 μT (Maximum) und weniger als 2 μT (Mittelwert). Innerhalb der Fahrerkabine wurden maximal 0,24 μT und im Mittel 0,086 μT gemessen.

Schließlich wurde die Höhe über dem Boden bei einem konstanten Abstand von 15 cm vom Fahrzeug bei den Messungen variiert. Im „best case“ wurden magnetische Flussdichten bis etwa 33 μT (Maximum) und etwa 20 μT (Mittelwert) in der Höhe von 15 cm gemessen. Bis in 120 cm Höhe wurden Werte von etwa 2 μT (Maximum) und etwa 1 μT (Mittelwert) erreicht. Der Grenzwert der 26. BImSchV in 27 μT wurde in 15 cm Höhe noch überschritten, nicht aber ab der nächsten ausgemessenen Höhe von 30 cm. Für den „worst case“ wurde die Höhenabhängigkeit der magnetischen Flussdichte in (FfE 2012) nicht untersucht.

Die SSK hat in ihrem Statusbericht (SSK 2013) hinsichtlich des induktiven Ladens von Elektrofahrzeugen festgestellt, dass mögliche Expositionsszenarien aufgrund der derzeit fehlenden Daten noch nicht endgültig beurteilbar sind. Sie hat dabei grundsätzlich konstatiert, dass im eigentlichen Bereich der Übertragung, d. h. im Luftspalt zwischen den beiden Spulen, die Referenzfeldstärken für die Personenexposition bei der jeweiligen Betriebsfrequenz überschritten werden können. Dementsprechend hat die SSK das Streufeld des Luftspaltes um die Spulenanordnung grundsätzlich als expositionsrelevant beurteilt, so dass sich für die SSK die Frage nach der Zugänglichkeit dieser Bereiche, d. h. zumindest in der Praxis konkret möglicher Teilkörperexpositionen, gestellt hat. Weiterhin hat die SSK in (SSK 2013) festgestellt, dass den zugänglichen technischen Spezifikationen der Hersteller zwar Detektions- und Sicherheitsmaßnahmen zu entnehmen sind, es aber praktisch noch keine von unabhängigen Stellen in realen Versuchen ermittelten Expositionsdaten für vorstellbare worst case-Fälle gibt. Die SSK kam daher zum Schluss: *„Die Entwicklung der induktiven Ladetechnologien wird deshalb in Bezug auf die Personenexposition kritisch zu begleiten sein.“*

Im Expositionsszenario „öffentlicher Raum einschließlich induktivem Laden von Elektrofahrzeugen“ sind demnach die im Expositionsszenario „öffentlicher Raum mit Datenübertragung und Mobilfunk“ genannten Expositionen anzunehmen, zuzüglich einer Komponente durch das induktive Laden von Elektrofahrzeugen, die aber bisher nicht ausreichend quantifiziert werden kann. Sicher ist aber, dass das induktive Laden von Elektrofahrzeugen mit relativ hohen HF-Expositionen verbunden sein kann, wenn der HF-Problematik bei der weiteren technischen Entwicklung keine besondere Aufmerksamkeit geschenkt wird (siehe auch Kapitel 7).

6.1.6. Exposition durch einzelne HF-Quellen im Haushalt

In den vorangehenden Expositionsszenarien wurde dargestellt, dass die Beiträge der verschiedenen HF-Quellen zur Gesamtexposition im Haushalt bzw. im häuslichen Arbeitsbereich sehr unterschiedlich sind. Die Ursache hierfür ist die sehr unterschiedliche Strahlungsleistung der jeweiligen Geräte und die unterschiedlichen Abstände der exponierten Person zum jeweiligen Gerät.

Damit die Geräte auch individuell und in abweichenden Zusammenstellungen bewertet werden können, wird nachfolgend die Exposition durch einzelne HF-Quellen dargestellt. Dies erfolgt anhand einer einfachen Berechnung, die sich aus den geometrischen Eigenschaften der Wellenausbreitung im Raum ergibt. Als Berechnungsmodell wird hier Abstrahlung der Hochfrequenz durch einen isotropen Kugelstrahler angenommen (Petermann 2013). Die Sendeleistung verteilt sich bei diesem Modell auf der Oberfläche einer Kugel mit dem Radius r . Für die Leistungsdichte S in Abhängigkeit der Entfernung r ergibt sich dadurch folgende Berechnungsvorschrift:

$$S_{iso} = \frac{P}{2\pi * r^2} \quad [W/m^2]$$

Hier bedeuten:

S_{iso} : Leistungsdichte der elektromagnetischen Strahlung bei isotropem Kugelstrahler

P : Sendeleistung (EIRP) in Watt

r : Kugelradius in Metern = Entfernung zur Sendeantenne

Geht man zusätzlich davon aus, dass die Antenne eine Richtcharakteristik aufweist, so erhöht sich die Leistungsdichte um den jeweiligen Faktor des Antennengewinns G :

$$S = \frac{G * P}{2\pi * r^2} \quad [W/m^2]$$

Hier bedeuten:

S : Leistungsdichte der elektromagnetischen Strahlung

G : Antennengewinnfaktor (ohne Einheit)

P : Sendeleistung (EIRP) in Watt

r : Entfernung zur Sendeantenne

Für die Expositionsabschätzung wurde unterstellt, dass die Antenne horizontal in allen Richtungen abstrahlt und einen Antennengewinn 3 dBi aufweist, woraus sich ein Antennengewinnfaktor G von 2 ergibt. Die so berechnete Leistungsdichte gilt nur für die ungestörte HF-Ausbreitung im Raum im sogenannten „Fernfeld“. Das Fernfeld beginnt ab einem Abstand, der größer als die jeweilige Antennenlänge ist. Bei den hier untersuchten, sehr hohen Frequenzen, sind die Antennen sehr klein, weshalb bereits nach wenigen Zentimetern von einem Fernfeld ausgegangen werden kann.

Jeder Frequenz ist ein Referenzwert zugeordnet (vgl. Tabelle 6-9), dessen Unterschreitung sicherstellt, dass die jeweiligen Grenzwerte für die elektromagnetische Strahlung eingehalten werden. Unter Berücksichtigung der typischen Sendeleistung der jeweiligen HF-Quelle ergibt sich daraus ein Mindestabstand zur Antenne, bei dem der Referenzwert gerade (zu 100 %) erreicht wird. Dieser Abstand zur Antenne sollte nach Möglichkeit nicht oder nicht über einen längeren Zeitraum unterschritten werden.

Um einen Eindruck davon zu gewinnen, welche Mindestabstände auch bei einer Mehrfachexposition unbedenklich sind, wurde im Rahmen der vorliegenden Untersuchung ein sogenannter „Vorsorgeabstand“ definiert. Beim Vorsorgeabstand wird der Referenzwert zu 1 % ausgeschöpft. Das heißt, selbst bei Exposition durch eine Vielzahl von HF-Quellen, sofern deren Anzahl 100 Stück nicht überschreitet, die weiter als der Vorsorgeabstand entfernt sind, wird der Referenzwert nicht überschritten. Der Vorsorgeabstand ist dabei gerade um den Faktor 10 größer als der Mindestabstand, da die Leistungsdichte mit der Entfernung quadratisch abnimmt (S proportional zu $1/r^2$).

Tabelle 6-9: Abschätzung von Mindest- und Vorsorgeabständen für einzelne HF-Quellen

HF-Quelle	Typische Sendefrequenz	Typische Sendeleistung	Referenzwert	Mindestabstand (100 % Referenzwert)	Vorsorgeabstand (1 % Referenzwert)
Mobiltelefon	1.920 MHz	0,010 W	9,60 W/m ²	1,3 cm	13 cm
DECT	1.880 MHz	0,010 W	9,40 W/m ²	1,3 cm	13 cm
WLAN	2.400 MHz	0,010 W	10,00 W/m ²	1,3 cm	13 cm
Bluetooth	2.400 MHz	0,001 W	10,00 W/m ²	0,4 cm	4 cm
Babyphones	27 MHz	0,082 W	2,00 W/m ²	8,1 cm	81 cm
Smart-Home	868 MHz	0,001 W	4,34 W/m ²	0,6 cm	6 cm
Mikrowellenherde	2.450 MHz	-	2 W/kg	5,0 cm	50 cm
Induktionsherd	0,1 MHz	-	6,25 µT	30 cm	300 cm
Induktives Laden	0,1 MHz	-	6,25 µT	40 cm*	400 cm*

* Diese Werte gelten bei nicht optimaler Überdeckung von Primär- und Sekundärspule bei KFZ gemäß FfE 2012

Quelle: Eigene Berechnung

Die Abschätzung der Mindestabstände und der Vorsorgeabstände kann wie folgt interpretiert werden. Die geringsten Mindestabstände weisen die Bluetooth-Geräte (0,4 cm) sowie die Smart-Home Geräte (0,6 cm) auf. Die Geräte Mobiltelefon, DECT-Telefon und WLAN weisen einen Mindestabstand der Antenne von 1,3 cm auf. Bei den Telefonen ist die Antenne in der Regel in die Rückseite der jeweiligen Geräte integriert. Das Gerät schirmt die Strahlung zum Ohr hin ab und die Antenne befindet sich trotz des Körperkontaktes des Telefons außerhalb dieses Mindestabstandes. Überschritten kann der Referenzwert jedoch, wenn die Telefonrückseite direkt auf den Körper gelegt wird. Größere Mindestabstände weisen Mikrowellenherde (5 cm) und Babyphones (8,1 cm) auf. Die jeweiligen Vorsorgeabstände liegen hier bei 50 und 81 cm. Insbesondere bei Babyphones sollte daher auf einen entsprechenden Abstand zum überwachten Baby geachtet werden. Um eine weitere Größenordnung höher ist der Mindestabstand, der sich für Induktionsherde (30 cm) und induktive Laden von Fahrzeugen (40 cm) ergibt. Diese Abstände wurden nicht mit der oben aufgeführten Expositionsformel berechnet, sondern ergeben sich beim Induktionsherd aus dessen technischen Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 2.8) und den Messergebnissen eines Forschungsprojektes bei nicht optimaler Überdeckung von Primär- und Sekundärspule beim Fahrzeugladen (FfE 2012).

6.2. Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse der Expositionsszenarien

Trotz der sehr ungünstigen Expositionsannahmen wurden in den untersuchten Expositionsszenarien die Grenzwerte der magnetischen Flussdichte, der Leistungsflussdichte oder der spezifischen Absorptionsrate (SAR) im Allgemeinen deutlich unterschritten.

Geräte mit einer Sendeleistung (ERP) von kleiner als 20 mW können den SAR-Grenzwert von 2 W/kg (gemittelt über 10 g Körpergewebe) aus physikalischen Gründen nicht erreichen. Eine Vielzahl der Funkgeräte, die in Haushalten verwendet werden, wie WLAN, Bluetooth, DECT und Smart-Home-Sender liegen mit ihren typischen Sendeleistungen unterhalb des Wertes von 20 mW. Solche Geräte können daher, selbst bei direktem Kontakt mit Personen, nicht zu einer Grenzwertüberschreitung führen.

Darüber hinaus nehmen Leistungsflussdichten mit der Entfernung sehr schnell ab (Abnahme proportional zum Quadrat der Entfernung). Dadurch treten die höchsten Expositionen durch solche Sendeeinrichtungen auf, die unmittelbar an den Körper gehalten werden (z. B. Mobiltelefon, Laptop, Tablet) bzw. denen die exponierte Person sich sehr stark nähert (z. B. Induktionsherd, Fahrersitz beim induktiven Fahrzeugladen). Ferne Quellen (z. B. Basisstationen von GSM, UMTS, LTE und WiMAX) führen demgegenüber zu sehr viel niedrigeren Expositionen, auch wenn sie eine deutlich höhere Leistung aufweisen.

Grenzwerte der Leistungsflussdichte werden in den Expositionsszenarien zu maximal 2,4 % (ungünstige Annahmen) bzw. 10,6 % (worst-case) ausgeschöpft. Verantwortlich sind dafür die Expositionen durch Basisstationen vor allem von GSM und WiMAX im Expositionsszenario „öffentlicher Raum mit Datenübertragung und Mobilfunk“, während Expositionen durch digitalen Hörfunk und digitales Fernsehen von untergeordneter Bedeutung sind.

Im Expositionsszenario „häuslicher Küchenbereich“ wird der Grenzwert der magnetischen Flussdichte durch die Nutzung eines Induktionsherds zu etwa 30 % ausgeschöpft. Ein im „worst-case“ eingeschalteter Mikrowellenherd mit Leckstrahlung führt zusätzlich zu einer Grenzwertausschöpfung der Ganzkörper-SAR von 7 %.

Die höchste Ausschöpfung von Grenzwerten ergab sich für die Kopf/Rumpf-SAR, wenn die Nutzung eines Mobiltelefons oder Tablets mit relativ ungünstigen Strahlungseigenschaften angenommen wird (Ausschöpfung bis 64 %). Dies bestätigt, dass die höchsten individuellen Expositionen aus der Nutzung solcher Endgeräte resultieren, wenn beim Kauf nicht auf besonders günstige Strahlungseigenschaften geachtet wird. Auch andere Untersuchungen kommen zum Ergebnis, dass ein eigenes Endgerät am Kopf stets die Immission dominiert, beispielsweise (IZMF 2015).

Hinsichtlich einer HF-Exposition im öffentlichen Raum durch induktives Laden von Elektrofahrzeugen, lässt sich auf dem derzeitigen Kenntnisstand noch keine Abschätzung machen. Sicher ist aber, dass das induktive Laden von Elektrofahrzeugen mit relativ hohen HF-Expositionen verbunden sein kann, wenn der HF-Problematik bei der weiteren technischen Entwicklung keine besondere Aufmerksamkeit geschenkt wird.

7. Handlungsempfehlungen

Einzelne HF-Quellen können zu einer Exposition führen, die Grenzwerte um mehr als zu einem Drittel ausschöpft. Um gesundheitliche Auswirkungen zu verhindern, müssen die Grenzwerte unter Berücksichtigung aller HF-Quellen eingehalten werden. Die Einhaltung der Grenzwerte ist aber nicht gewährleistet, wenn Hersteller sich bei ihren HF-Quellen nur an der Einhaltung der Grenzwerte durch diese Quellen allein orientieren. Eine entsprechende Empfehlung der SSK aus dem Jahr 2007 (siehe Kapitel 4.2), die dem entgegen wirken sollte, wird in der Praxis bislang nicht ausreichend beachtet. Notwendig zur Gewährleistung der Einhaltung der Grenzwerte sind daher verbindliche Vorgaben an die Hersteller von HF-Quellen, die eine zu weitgehende Ausschöpfung von Grenzwerten durch einzelne Quellen nicht zulassen.

Die Elektromobilität soll eine zunehmend wichtige Rolle im Verkehrssektor übernehmen. Um bestehende Nachteile, die die Akzeptanz des Umstiegs auf Elektrofahrzeuge beeinträchtigen, zu reduzieren werden Konzepte zum induktiven Laden der Elektrofahrzeuge entwickelt. Gemäß dem derzeitigen Kenntnisstand kann das induktive Laden von Elektrofahrzeugen mit relativ hohen HF-Expositionen von Personen neben Fahrzeugen, die gerade geladen werden, verbunden sein. Um hohe HF-Expositionen im öffentlichen Raum zu vermeiden, muss dieser Aspekt bei der weiteren technischen Entwicklung der Ladesysteme besonders beachtet werden. Hierbei sind die folgenden Aspekte von Relevanz:

- Bei Versuchen sind die relevanten Feldgrößen am Fahrersitz während des Ladevorgangs bei unterschiedlichen Positionen der Spulen im Fahrzeug und darunter zu erheben.
- Diese Feldgrößen sind auch im Bereich neben dem Fahrzeug in verschiedenen Höhen zu bestimmen.
- Eine Ausschöpfung von Grenzwerten sollte nach Möglichkeit unterhalb von 30 % bleiben. Die Grundsätze bei der Ableitung von Emissionsstandards bei gleichzeitig betriebenen Feldquellen nach (SSK 2007) sind zu beachten.
- Einrichtungen zum induktiven Laden sollten räumlich so angelegt werden, dass sich Personen nicht in unmittelbarer Nähe aufhalten. Andernfalls sind Absperrungen und Informationshinweise zur Wahrung von Sicherheitsabständen erforderlich.

8. Zusammenfassung

Mit der rasanten Digitalisierung nahezu aller Bereiche des gesellschaftlichen Lebens, die gleichzeitig mit einer starken Nutzung mobil einzusetzender Technologien verbunden ist, haben Zahl und Intensität elektromagnetischer Felder in den vergangenen Jahren erheblich zugenommen. Es erfolgt weiterhin ein Ausbau der digitalen Infrastruktur, aber auch ein Ausbau des Stromnetzes und eine Forcierung der Elektromobilität (z. B. drahtlose Übertragung von Strom via Induktionsmagnetfeldern). Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) hat vor diesem Hintergrund das Öko-Institut e.V. mit einer systematischen Beschreibung der EMF-Emissionen elektrischer Geräte und Anlagen beauftragt, wobei für bestimmte Expositionsszenarien Abschätzungen der HF-Exposition vorzunehmen waren.

Aufbauend auf einer Beschreibung der Quellen, der Darlegung von Referenz- und Grenzwerten sowie einer Auswertung bereits vorliegender Untersuchungen zu Expositionsszenarien der Bevölkerung wurden drei Expositionsszenarien im Haushalt (Wohnbereich, Arbeitsbereich und Küchenbereich) sowie zwei Expositionsszenarien im öffentlichen Raum entwickelt und für diese jeweils unter „ungünstigen Annahmen“ sowie im „worst-case“ HF-Expositionen abgeschätzt.

Trotz der sehr ungünstigen Expositionsannahmen wurden in den untersuchten Expositionsszenarien die Grenzwerte der magnetischen Flussdichte, der Leistungsflussdichte oder der SAR im Allgemeinen deutlich unterschritten. Viele der im Haushalt eingesetzten Funkgeräte weisen so niedrige typische Sendeleistungen auf, dass selbst bei direktem Kontakt mit Personen keine Grenzwertüberschreitung möglich ist. Relativ hohe Expositionen durch Induktionsherde sowie durch am Körper eingesetzte Endgeräte (Mobiltelefon, Tablet etc.) möglich. Diese dominieren auch bei weitem die HF-Exposition im öffentlichen Raum. Dies konnte auch durch eine vergleichende Abschätzung von Mindestabständen (Referenzwert zu 100 % ausgeschöpft) und Vorsorgeabständen (Referenzwert zu 1 % ausgeschöpft) von den einzelnen HF-Quellen gezeigt werden.

Hinsichtlich einer HF-Exposition im öffentlichen Raum durch induktives Laden von Elektrofahrzeugen, lässt sich auf dem derzeitigen Kenntnisstand noch keine Abschätzung machen. Sicher ist aber, dass das induktive Laden von Elektrofahrzeugen mit relativ hohen HF-Expositionen verbunden sein kann, wenn der HF-Problematik bei der weiteren technischen Entwicklung keine besondere Aufmerksamkeit geschenkt wird. Es wurde daher empfohlen, hierzu weitere, die Entwicklung der Technik begleitende, Untersuchungen vorzunehmen.

Literaturverzeichnis

- 1999/519/EG (1999): Empfehlung des Rates zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz — 300 GHz) (1999/519/EG) vom 12.07.1999, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L 199/59, 30.07.1999. Online verfügbar: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31999H0519>; letzter Abruf am 18.10.2017.
26. BImSchV (2013): Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, Verordnung über elektromagnetische Felder (26. BImSchV) vom 14.08.2013, BGBl. I S. 3266. Online verfügbar: https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_26/; letzter Abruf am 18.10.2017.
- AirFuel Alliance (2018): Our Members – AirFuel Alliance. Online verfügbar: <http://www.airfuel.org/membership/our-members/>; letzter Abruf am 09.01.2018.
- BAG (2016a): Faktenblatt Babyfon. Bern: Bundesamt für Gesundheit, Schweizerische Eidgenossenschaft. Online verfügbar: <https://www.bag.admin.ch/dam/bag/de/dokumente/str/nis/faktenblaetter-emf/faktenblatt-babyfon.pdf.download.pdf/faktenblatt%20babyfon%20d.pdf>; letzter Abruf am 28.11.2017.
- BAG (2016b): Faktenblatt Bluetooth. Bern: Bundesamt für Gesundheit, Schweizerische Eidgenossenschaft. Online verfügbar: <https://www.bag.admin.ch/dam/bag/de/dokumente/str/nis/faktenblaetter-emf/faktenblatt-bluetooth.pdf.download.pdf/faktenblatt%20bluetooth%20d.pdf>; letzter Abruf am 01.12.2017.
- BAG (2016c): Faktenblatt Induktionskochherd. Bern: Bundesamt für Gesundheit, Schweizerische Eidgenossenschaft. Online verfügbar: <https://www.bag.admin.ch/dam/bag/de/dokumente/str/nis/faktenblaetter-emf/faktenblatt-induktionskochherd.pdf>; letzter Abruf am 06.11.2017.
- BAG (2016d): Faktenblatt Mikrowellenofen. Bern: Bundesamt für Gesundheit, Schweizerische Eidgenossenschaft. Online verfügbar: <http://www.bag.admin.ch/dam/bag/de/dokumente/str/nis/faktenblaetter-emf/faktenblatt-mikrowellenofen.pdf>; letzter Abruf am 06.11.2017.
- BAG (2016e): Faktenblatt Smartphone. Bern: Bundesamt für Gesundheit, Schweizerische Eidgenossenschaft. Online verfügbar: <https://www.bag.admin.ch/dam/bag/de/dokumente/str/nis/faktenblaetter-emf/faktenblatt-smartphone.pdf.download.pdf/faktenblatt%20smartphone%20d.pdf>; letzter Abruf am 28.11.2017.
- BAG (2016f): Faktenblatt WLAN. Bern: Bundesamt für Gesundheit, Schweizerische Eidgenossenschaft. Online verfügbar: <https://www.bag.admin.ch/dam/bag/de/dokumente/str/nis/faktenblaetter-emf/faktenblatt-wlan.pdf.download.pdf/faktenblatt%20wlan%20d.pdf>; letzter Abruf am 30.11.2017.
- BfS (2012): Hochfrequente elektromagnetische Felder im Haushalt – Mikrowellengeräte. Salzgitter: Bundesamt für Strahlenschutz. Online verfügbar: https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/broschueren/emf/info-mikrowellengerate.pdf?__blob=publicationFile&v=3; letzter Abruf am 17.11.2017.
- BfS (2017a): Elektromagnetische Felder, Bundesamt für Strahlenschutz. Online verfügbar: http://www.bfs.de/DE/themen/emf/einfuehrung/einfuehrung_node.html;jsessionid=B0B97EFC39C08CC264E76133F1D759B7.1_cid382; letzter Abruf am 13.11.2017.
- BfS (2017b): LTE – Long Term Evolution, Bundesamt für Strahlenschutz. Online verfügbar: https://www.bfs.de/DE/themen/emf/mobilfunk/basiswissen/lte/lte_node.html; letzter Abruf am 04.11.2017.

- BfS (2017c): Zusammenstellung von SAR-Werten von Handys, Bundesamt für Strahlenschutz. Online verfügbar: http://www.bfs.de/SiteGlobals/Forms/Suche/BfS/DE/SARsuche_Formular.html; letzter Abruf am 10.11.2017.
- Bluetooth SIG (2017a): Bluetooth LE: Point-to-Point, Bluetooth Special Interest Group. Online verfügbar: <https://www.bluetooth.com/what-is-bluetooth-technology/how-it-works/le-p2p>; letzter Abruf am 12.12.2017.
- Bluetooth SIG (2017b): Why build with Bluetooth. Online verfügbar: <https://www.bluetooth.com/what-is-bluetooth-technology/why-build-with-bluetooth>; letzter Abruf am 01.12.2017.
- BNetzA (2010a): Allgemeinzuteilung von Frequenzen in den Bereichen 5150 MHz – 5350 MHz und 5470 MHz – 5725 MHz für Funkanwendungen zur breitbandigen Datenübertragung, WAS/WLAN („Wireless Access Systems including Wireless Local Area Networks“). Bundesnetzagentur. Online verfügbar: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Allgemeinzuteilungen/2010_07_WLAN_5GHz_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3; letzter Abruf am 02.11.2017.
- BNetzA (2010b): Bluetooth – die Funkalternative zur Verkabelung, Bundesnetzagentur. Online verfügbar: <http://emf2.bundesnetzagentur.de/pdf/Bluetooth-BNetzA.pdf>; letzter Abruf am 02.11.2017.
- BNetzA (2010c): UMTS – der Multimedia-Mobilfunk. Bundesnetzagentur. Online verfügbar: <http://emf2.bundesnetzagentur.de/pdf/Mobilfunk-BNetzA.pdf>; letzter Abruf am 04.11.2017.
- BNetzA (2013a): Allgemeinzuteilung von Frequenzen für Babyüberwachungsanlagen. Bundesnetzagentur. Online verfügbar: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Allgemeinzuteilungen/2013_04_Babyueberwachungsanlagen_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=2; letzter Abruf am 06.11.2017.
- BNetzA (2013b): Allgemeinzuteilung von Frequenzen für die Nutzung in lokalen Netzwerken. Wireless Local Area Networks (WLAN) bei 2,4 GHz. Bundesnetzagentur. Online verfügbar: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Allgemeinzuteilungen/2013_10_WLAN_2,4GHz_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=4; letzter Abruf am 02.11.2017.
- BNetzA (2014): Allgemeinzuteilung von Frequenzen zur Nutzung durch Funkanwendungen mit geringer Reichweite für nicht näher spezifizierte Anwendungen. Non-specific Short Range Devices (SRD). Bundesnetzagentur. Online verfügbar: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Allgemeinzuteilungen/2014_69_SRD_pdf; letzter Abruf am 06.11.2017.
- BNetzA (2015a): Allgemeinzuteilung von Frequenzen für die Nutzung durch schnurlose Telekommunikationsanlagen des Systems DECT. Bundesnetzagentur. Online verfügbar: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Allgemeinzuteilungen/DECT_Vfg_25_2015.pdf; letzter Abruf am 17.11.2017.
- BNetzA (2015b): DECT – Schnurlos-Telefonie. Bundesnetzagentur. Online verfügbar: <http://emf2.bundesnetzagentur.de/pdf/DECT-BNetzA.pdf>; letzter Abruf am 17.11.2017.
- BNetzA (2015c): Funkanwendungen auf den ISM-Bändern. Bundesnetzagentur. Online verfügbar: <http://emf3.bundesnetzagentur.de/pdf/ISM-BNetzA.pdf>; letzter Abruf am 01.12.2017.
- Bornkessel, C. & Schubert, M. (2005): Entwicklung und Anwendung von Verfahren zur Bestimmung der Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder in der Umgebung von Mobilfunk Basisstationen. Abschlussbericht "Entwicklung geeigneter Mess- und Berechnungsverfahren". Kamp-Lintfort:

- Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik (IMST) GmbH. Online verfügbar: http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_015_AB.pdf; letzter Abruf am 18.10.2017.
- Bornkessel, C., Schubert, M. & Wuschek, M. (2013): Bestimmung der Exposition der allgemeinen Bevölkerung durch neue Mobilfunktechniken - Vorhaben 3611S80002 (BfS - Bundesamt für Strahlenschutz, Hrsg.) (BfS-RESFOR-79/13). Salzgitter: Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik (IMST) GmbH. Online verfügbar: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-2013041610546>; letzter Abruf am 18.10.2017.
- Bornkessel, C., Schubert, M., Wuschek, M. & Schmidt, P. (2006a): Bestimmung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung von digitalen Rundfunk- und Fernsehsendern. Abschlussbericht vom 15.07.2006. Kamp-Lintfort: IMST. Online verfügbar: http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_085_AB_Teil1.pdf, http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_085_AB_Teil2.pdf, http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_085_AB_Teil3.pdf; letzter Abruf am 18.10.2017.
- Bornkessel, C., Schubert, M., Wuschek, M. & Schmidt, P. (2006b): Bestimmung der realen Feldverteilung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in der Umgebung von UMTS-Sendeanlagen. Abschlussbericht vom 15.08.2006. Kamp-Lintfort: Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik (IMST) GmbH. Online verfügbar: http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_025_AB_01.pdf, http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_025_AB_02.pdf, http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_025_AB_03.pdf; letzter Abruf am 18.10.2017.
- Braunschweiger Verkehrs-GmbH (o. J.): Braunschweig fährt jetzt induktiv! Der erste emil-Elektrobus ist auf der M19 unterwegs. Online verfügbar: https://www.verkehr-bs.de/fileadmin/user_upload/downloads/Emil/A5_emil_Flyer_WEB.pdf; letzter Abruf am 11.01.2018.
- Chabalko, M. J.; Shahmohammadi, M. & Sample, A. P. (2017): Quasistatic Cavity Resonance for Ubiquitous Wireless Power Transfer. PLoS ONE 12 (2): e0169045. Online verfügbar: doi://[10.1371/journal.pone.0169045](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169045); letzter Abruf am 09.01.2018.
- Christ, A., Klingenböck, A., Samaras, T., Neufeld, E. & Kuster, N. (2006): Exposition durch körpernahe Sender im Rumpfbereich. Abschlussbericht vom Juli 2006. Zürich: ITIS Foundation. Online verfügbar: http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_055_AB.pdf; letzter Abruf am 18.10.2017.
- Connected Living (2017): Smart Home Index 2017. Berlin: Connected Living in Kooperation mit Mücke, Sturm & Company. Online verfügbar: <http://www.muecke-sturm.de/wp-content/uploads/Smart-Home-Index-2017-Smart-Home-MSc.pdf>; letzter Abruf am 01.12.2017.
- Destatis (2017a): Ausstattung mit Gebrauchsgütern, Statistisches Bundesamt. Online verfügbar: https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/EinkommenKonsumLebensbedingungen/AusstattungGebrauchsgueter/Tabellen/A_Haushaltsgeraete_D_LWR.html; letzter Abruf am 17.11.2017.
- Destatis (2017b): Ausstattung privater Haushalte mit Informations- und Kommunikationstechnik – Deutschland, Statistisches Bundesamt. Online verfügbar: https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/EinkommenKonsumLebensbedingungen/AusstattungGebrauchsgueter/Tabellen/Infotechnik_D.html; letzter Abruf am 28.11.2017.
- Destatis (2017c): Wirtschaftsrechnungen: Private Haushalte in der Informationsgesellschaft. Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien (Fachserie 15, Reihe 4). Statistisches Bundesamt. Online verfügbar: <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/>

- EinkommenKonsumLebensbedingungen/PrivateHaushalte/PrivateHaushalteIKT2150400177004.pdf; letzter Abruf am 09.01.2018.
- DG Energy (2017): Ecodesign Preparatory study on Smart Appliances (Lot 33). MEErP Tasks 1–6. Brüssel: European Commission Directorate-General for Energy. Online verfügbar: <http://www.eco-smartappliances.eu/Documents/Ecodesign%20Preparatory%20Study%20on%20Smart%20Appliances%20Tasks%201%20to%206.pdf>; letzter Abruf am 01.12.2017.
- DKE (2016): Der Technische Leitfaden. Ladeinfrastruktur Elektromobilität (Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e. V., Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, Zentralverband der Deutschen Elektro- und Informationstechnischen Handwerke & Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V., Hrsg.). DKE / AK EMOBILITY.60. Online verfügbar: <https://www.dke.de/resource/blob/988408/750e290498bf9f75f50bb86d520caba7/leitfaden-elektromobilitaet-2016--data.pdf>; letzter Abruf am 11.01.2018.
- Dürrenberger, G. & Klaus, G. (2004): EMF von Energiesparlampen: Feldmessungen und Expositionsabschätzungen im Vergleich zu anderen Quellen im Alltag. Schlussbericht DIS Projekt 100898. Zürich: Forschungsstiftung Mobilkommunikation. Online verfügbar: <https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/478.pdf>; letzter Abruf am 06.11.2017.
- Eder, H., Geschwendtner, D., Hofmann, P., Liesenkötter, B. & Matthes, R. (2009): Elektrische und magnetische Felder von Kompaktleuchtstofflampen (Strahlenschutzpraxis, 59–67).
- ETSI (2013): TS 102 939-1, V1.1.1 – Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); Ultra Low Energy (ULE); Machine to Machine Communications; Part 1: Home Automation Network (phase 1). Sophia Antipolis Cedex, France: European Telecommunications Standards Institute. Online verfügbar: http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102900_102999/10293901/01.01.01_60/ts_10293901v010101p.pdf; letzter Abruf am 17.11.2017.
- ETSI (2016): EN 301 406, V2.2.2 – Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of the Directive 2014/53/EU. Sophia Antipolis Cedex, France: European Telecommunications Standards Institute. Online verfügbar: http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301400_301499/301406/02.02.02_60/en_301406v020202p.pdf; letzter Abruf am 17.11.2017.
- ETSI (2017): DECT, European Telecommunications Standards Institute. Online verfügbar: <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/dect>; letzter Abruf am 17.11.2017.
- FfE (2012): Alltagstauglichkeit des induktiven Ladens. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. Online verfügbar: https://www.ffe.de/download/article/411/20120221_Bericht_Alltagstauglichkeit_Induktives_Laden.pdf; letzter Abruf am 06.12.2017.
- Fraunhofer ICT (2017): Mikrowellen- und Plasmatechnologie. Online verfügbar: <https://www.ict.fraunhofer.de/de/komp/pe/mp.html>; letzter Abruf am 17.11.2017.
- Georg, R., Landstorfer, F. M. & Jakobus, U. (2005): Bestimmung der SAR-Werte, die während der alltäglichen Nutzung von Handys auftreten. Schlussbericht Projektlaufzeit 01.12.2003 bis 31.05.2005. Kronberg / Böblingen / Stuttgart.
- Georg, R., Landstorfer, F. M. & Schmid, G. (2006): Bestimmung der realen Exposition bei Handynutzung in teilgeschirmten Räumen im Vergleich zur Exposition unter günstigen Bedingungen im Freien. Schlussbericht Projektlaufzeit 01.12.2004 bis 31.10.2006. Kronberg / Stuttgart / Seibersdorf. Online verfügbar: http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_035_AB_01.pdf,%20http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_035_AB_02.pdf,%20http://www.emf-

- forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_035_AB_03.pdf; letzter Abruf am 18.10.2017.
- GfK (2016a): Das mobile Internet setzt sich durch. Ergebnisse der Studie „Mobile Kommunikation 2016“. Online verfügbar: <http://www.gfk.com/de/insights/press-release/gfk-verein-das-mobile-internet-setzt-sich-durch/>; letzter Abruf am 28.11.2017.
- GfK (2016b): Smartphone-Markt wächst weiter im dritten Quartal – sinkende Nachfrage in China für 2017 erwartet. Online verfügbar: <http://www.gfk.com/de/insights/press-release/smartphone-markt-waechst-weiter-im-dritten-quartal-sinkende-nachfrage-in-china-fuer-2017-erwartet/>; letzter Abruf am 28.11.2017.
- GfK (2017): AMK-Jahreswirtschafts-Pressekonferenz 2017. "Wirtschaftsfaktor Küche". Online verfügbar: <http://www.amk.de/wp-content/uploads/2017/05/4-GfK-Praesentation-AMK-Wirtschafts-PK-2017-0805.pdf>; letzter Abruf am 12.12.2017.
- gfu (2016): Smartes Genießen – welche Technikprodukte beim Kunden im Fokus stehen. Aus dem Presseraum, gfu Consumer & Home Electronics GmbH. Online verfügbar: <http://www.gfu.de/presseraum/uebersicht/smartes-geniessen-welche-technikprodukte-beim-kunden-im-fokus-stehen/>; letzter Abruf am 12.12.2017.
- gfu (2017a): Die Hausgeräte-Trends der IFA 2017. Nachhaltigkeit, Mehrwert, Erlebnis und Spaß mit smarten Hausgeräten, gfu Consumer & Home Electronics GmbH. Online verfügbar: <http://www.gfu.de/home-electronics/trends-2017/>; letzter Abruf am 12.12.2017.
- gfu (2017b): IFA Produktneuheiten 2017 zu Haushalts-Großgeräte, gfu Consumer & Home Electronics GmbH. Online verfügbar: <http://www.gfu.de/home-electronics/ifa-highlights-home-electronics-2017/grossgeraete/>; letzter Abruf am 12.12.2017.
- Greis, F. (2017): Elektromobilität: Qualcomm lädt E-Autos während der Fahrt auf, Golem.de. Online verfügbar: <https://www.golem.de/news/elektromobilitaet-qualcomm-laedt-e-autos-waehrend-der-fahrt-auf-1705-128011.html>; letzter Abruf am 11.01.2018.
- Großmann, D. (2015): Induktives Laden für E-Fahrzeuge. ISO / IEC-15118-Standardisierung. e-mobility.tec (04), S. 26–29. Online verfügbar: https://vector.com/portal/medien/cmc/press/Vector/EV_Inductive_Charging_EmobilityTec_201510_PressArticle_DE.pdf; letzter Abruf am 11.01.2018.
- Hansen, V., Mbonjo, H., Streckert, J. & Zhou, Y. (2007a): Entwicklung eines praktikablen rechen-technischen Verfahrens zur Ermittlung der tatsächlichen Exposition in komplizierten Immissionsszenarien mit mehreren verschiedenartigen HF-Quellen. Abschlussbericht 31. August 2007. Wuppertal: Bergische Universität Wuppertal. Online verfügbar: http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_090_AB.pdf; letzter Abruf am 18.10.2017.
- Hansen, V., Mbonjo, H., Streckert, J. & Zhou, Y. (2007b): Untersuchung des Einflusses von Antennen- und Gerätetopologien von körpernah betriebenen drahtlosen Kommunikationsendgeräten auf die von diesen verursachten SAR-Werte. Abschlussbericht zum 31. Oktober 2007. Wuppertal: Bergische Universität Wuppertal. Online verfügbar: http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_091_AB.pdf; letzter Abruf am 18.10.2017.
- ICNIRP (1994): ICNIRP Guidelines on Limits of Exposure to Static Magnetic Fields (Health Physics 66 (1): 100–106; 1994). International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Online verfügbar: <http://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPstatic.pdf>; letzter Abruf am 06.12.2017.
- ICNIRP (1998): ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz) (Health Physics 74 (4): 494–522; 1998). International

- Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Online verfügbar: <http://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPemfgdl.pdf>; letzter Abruf am 18.10.2017.
- ICNIRP (2009): ICNIRP Guidelines on Limits of Exposure to Static Magnetic Fields (Health Physics 96 (4): 504–514; 2009). International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Online verfügbar: <http://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPstatgdl.pdf>; letzter Abruf am 06.12.2017.
- ICNIRP (2010): ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz - 100 kHz) (Health Physics 99 (6): 818–836; 2010). International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Online verfügbar: <http://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPLFgdl.pdf>; letzter Abruf am 05.12.2017.
- IZMF (2015): Systematische Erfassung der Hochfrequenz-Exposition im Alltag. Messstudie im Auftrag des Informationszentrums Mobilfunk e.V. mit Unterstützung des Referats für Gesundheit und Umwelt der Landeshauptstadt München. Berlin: Informationszentrum Mobilfunk e.V.
- Kühn, S., Cabot, E., Christ, A., Capstick, M., Leubler, C., Kuster, N., Slamezka, M., Balzano, Q. & Balzano, P. (2008): Bestimmung von SAR-Werten bei der Verwendung von Headsets für Mobilfunktelefone. Abschlussbericht StSch4526 vom Juli 2008. Zürich: ITIS Foundation.
- Kühn, S., Lott, U., Kramer, A. & Kuster, N. (2005): Assessment of Human Exposure to Electromagnetic Radiation from Wireless Devices in Home and Office Environments. ITIS Foundation. Online verfügbar: http://www.who.int/peh-emf/meetings/archive/bsw_kuster.pdf; letzter Abruf am 13.11.2017.
- MHK (2017): Kochfeld-Trends auf der IFA 2017, MHK Kueche.de GmbH. Online verfügbar: <https://kueche.de/de-DE/inspiration/trends-im-ueberblick/ifa-2017-kochfelder>; letzter Abruf am 12.12.2017.
- Nadakuduti, J., Douglas, M., Capstick, M., Kühn, S., Benkler, S. & Kuster, N. (2010): Assessment of EM Exposure of Energy-Saving Bulbs & Possible Migration Strategies. Final Report Project BAG/08.004316/434.0001/-13 & BFE/15350. ITIS Foundation. Online verfügbar: www.news-service.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/18707.pdf; letzter Abruf am 06.11.2017.
- Öko-Institut (2001): Gutachten zum Erkenntnisstand zu möglichen gesundheitlichen Auswirkungen des Mobilfunks. Darmstadt.
- Öko-Institut (2009): Risikowahrnehmung und Risikokommunikation im Bereich der Niederfrequenten Felder. Vorhaben 3608S03015 (BfS - Bundesamt für Strahlenschutz, Hrsg.) (Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz ; 22/09). Darmstadt.
- OnePoll (Reichelt Elektronik, Hrsg.) (2017): Welche Form von WLAN nutzen Sie zuhause? [Umfrage], In: Statista – Das Statistik-Portal. Online verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/733835/umfrage/umfrage-zur-form-der-wlan-nutzung/>; letzter Abruf am 09.01.2018.
- Petermann, K. (2013): Hochfrequenztechnik 1 – Lineare Antennen. Technische Universität Berlin. Online verfügbar: <https://www.hft.tu-berlin.de/fileadmin/fg154/HFT/Skript/HFTI/LA.pdf>; letzter Abruf am 01.12.2017.
- Preiner, P., Schmid, G., Lager, D. & Georg, R. (2006): Bestimmung der realen Feldverteilung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in der Umgebung von Wireless LAN-Einrichtungen (WLAN) in innerstädtischen Gebieten. Abschlussbericht November 2006. Seibersdorf: ARC Seibersdorf research GmbH. Online verfügbar: http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_017_AB.pdf; letzter Abruf am 18.10.2017.

- QInside (Nitz engineering GmbH, Hrsg.) (2018a): Wie funktioniert kabelloses Laden? Die Basis bildet das Induktionsprinzip. Online verfügbar: <http://www.qinside.biz/de/support/wie-funktioniert-kabelloses-laden>; letzter Abruf am 04.01.2018.
- QInside (Nitz engineering GmbH, Hrsg.) (2018b): Wireless Power Consortium. Ziel der Einführung eines internationalen Standards für Wireless Charging. Online verfügbar: <http://www.qinside.biz/de/support/wireless-power-consortium>; letzter Abruf am 09.01.2018.
- RAL (2017): Vergabegrundlage für Umweltzeichen. Mobiltelefone – RAL-UZ 106 (RAL gGmbH, Hrsg.). Bonn. Online verfügbar: https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/raluz_uz/UZ-106-2017-10-09.zip; letzter Abruf am 30.11.2017.
- Reszel, W. (2017): Disneys Magnetfeld-Raum soll Geräte drahtlos mit Strom versorgen, Heise Medien. Online verfügbar: <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Disneys-Magnetfeld-Raum-soll-Geraete-drahtlos-mit-Strom-versorgen-3630509.html>; letzter Abruf am 09.01.2018.
- RP Online (2017): IFA 2017 – Trends bei Hausgeräten immer schöner, immer schlauer, Rheinische Post. Online verfügbar: <http://www.rp-online.de/digitales/neuheiten/ifa/ifa-2017-trends-bei-hausgeraeten-immer-schoener-immer-schlauer-aid-1.7041011>; letzter Abruf am 17.11.2017.
- Salman, N.; Rasool, I. & Kemp, A. H. (2010): Overview of the IEEE 802.15.4 standards family for Low Rate Wireless Personal Area Networks. In: R. C. de Lamare (Hg.), *ISWCS '10. Proceedings of the 2010 7th International Symposium on Wireless Communications Systems* (S. 701–705). [Piscataway, N.J.]: IEEE. Online verfügbar: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5624516>; letzter Abruf am 05.12.2017, zuletzt abgerufen am 05.12.2017.
- Schmid, G., Cecil, S., Petric, B., Neubauer, G. & Pérez L.A. (2008): Bestimmung der Exposition durch Ultra-Wideband Technologien. Abschlussbericht Juni 2008. Seibersdorf: Austrian Research Centers GmbH – ARC.
- Schmid, G., Lager, D., Preiner, P., Überbacher, R., Neubauer, G. & Cecil, S. (2005): Bestimmung der Exposition bei Verwendung kabelloser Übermittlungsverfahren in Haushalt und Büro. Abschlussbericht Juli 2005. Seibersdorf: ARC Seibersdorf research GmbH. Online verfügbar: http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_030_AB.pdf; letzter Abruf am 18.10.2017.
- Schmid, G., Überbacher, R., Cecil, S., Petric, B. & Göth, P. (2009): Bestimmung der Exposition durch Magnetfelder alternativer Antriebskonzepte. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben; Vorhaben 3608S04574; SL-LE-0004/09 (Bundesamt für Strahlenschutz, Hrsg.) (BfS-RESFOR-21/09). Seibersdorf: Seibersdorf Labor, Geschäftsfeld EMC & Optics, Fachbereich Elektromagnetische Verträglichkeit. Online verfügbar: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-2009082182>; letzter Abruf am 06.11.2017.
- Schraven, S., Kley, F. & Wietschel, M. (2010): Working Paper Sustainability and Innovation. No. S 8/2010: Induktives Laden von Elektromobilen – Eine techno-ökonomische Bewertung. Karlsruhe: Fraunhofer ISI. Online verfügbar: http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/e-x/working-papers-sustainability-and-innovation/WP8-2010_Induktive-Ladung-EV.pdf; letzter Abruf am 11.01.2018.
- Spathmann, O., Statnikov, K., Zang, M., Saviz, M., Fiedler, T., Hansen, V. & Streckert, J. (2014): Entwicklung und Anwendung von Verfahren zur Bestimmung der Exposition gegenüber nichtionisierender Strahlung mit Frequenzen im Terahertzbereich – Vorhaben 3610S80001 (BfS - Bundesamt für Strahlenschutz, Hrsg.) (BfS-RESFOR-98/14). Salzgitter. Online verfügbar: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-2014111011856>; letzter Abruf am 18.10.2017.
- SSK (2001): Grenzwerte und Vorsorgemaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern. Empfehlung der SSK. Strahlenschutzkommission.

- SSK (2005): Neue Technologien: Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern. Klausurtagung der SSK am 1./2. Dezember 2003 (Veröffentlichungen der SSK Band 54). München / Jena: Strahlenschutzkommission.
- SSK (2007): Grundsätze bei der Ableitung von Emissionsstandards bei gleichzeitig betriebenen Feldquellen. Empfehlung der Strahlenschutzkommission (BANz Nr. 127 vom 12.07.2007 in Band 64 der Veröffentlichung der Strahlenschutzkommission Band 64). Strahlenschutzkommission. Online verfügbar: https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2007/Emissionsstandards_Feldquellen.pdf?__blob=publicationFile; letzter Abruf am 06.11.2017.
- SSK (2010): Moderne Lichtquellen. Stellungnahme der Strahlenschutzkommission (BANz Nr. 171 vom 15. November 2011). Strahlenschutzkommission. Online verfügbar: https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2010/2010_06.pdf?__blob=publicationFile; letzter Abruf am 06.11.2017.
- SSK (2013): Elektromagnetische Felder neuer Technologien. Statusbericht der Strahlenschutzkommission (BANz AT 02.05.2014 B5). Strahlenschutzkommission. Online verfügbar: https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2013/Statusbericht_EMF.pdf?__blob=publicationFile; letzter Abruf am 06.11.2017.
- Stiftung Warentest (2015): Die Nachtwache. Babyfone aller Art. test (05/2015), S. 52–59.
- Stocker, Y. (Luzerner Stiftung für Umweltinformation, Hrsg.) (2015): Akkus mit Induktion kabellos laden, umweltnetz-schweiz.ch. Online verfügbar: <https://www.umweltnetz-schweiz.ch/themen/energie/2035-akkus-mit-induktion-kabellos-laden.html>; letzter Abruf am 13.12.2017.
- Vezzini, A. (2014): Batterie- und Ladetechnik – Heute und 2020, Berner Fachhochschule – Institut für Energie- und Mobilitätsforschung. Online verfügbar: <https://www.voev.ch/fr/index.php?section=downloads&download=6796>; letzter Abruf am 11.01.2018.
- Zahner, M., Fröhlich, J. & Dürrenberger, G. (2017): Energieeffizienz und EMF-Immissionen von integrierten Induktionsladestationen. Schlussbericht, 10.10.2017 / update. Zürich: FSM – Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation. Online verfügbar: https://www.emf.ethz.ch/fileadmin/redaktion/public/downloads/3_angebot/wissensvermittlung/studien_fachartikel/Wireless_Charging.pdf; letzter Abruf am 13.11.2017.