Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn

http://www.ssk.de

Elektromagnetische Felder im Automobil durch Funkanwendungen, induktives Laden und elektrisches Fahren

Empfehlung der Strahlenschutzkommission
mit wissenschaftlicher Begründung

Verabschiedet in der 300. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 27./28. Juni 2019

Vorwort

Die Einführung technologischer Innovationen, die in verschiedenen Bereichen des Automobils nichtionisierende Strahlung nutzen, und die deutliche Zunahme der Elektromobilität stellen neue Quellen für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder (EMF) dar, durch die sowohl die Fahrzeuginsassen als auch andere Verkehrsteilnehmer und Personen an öffentlichen Orten exponiert werden können.

Vor diesem Hintergrund hat das Bundesumweltministerium die Strahlenschutzkommission (SSK) im April 2017 um eine Bewertung der Exposition der Allgemeinbevölkerung gegenüber EMF im Hinblick auf die technischen Innovationen und den Ausbau der Elektromobilität im Bereich des Automobils und der damit verbundenen Risiken gebeten.

Zur Erfüllung dieses Beratungsauftrages bildete die Strahlenschutzkommission eine dem Ausschuss „Nichtionisierende Strahlen“ zuarbeitende Arbeitsgruppe, der folgende Mitglieder angehörten:

- Herr Dr. Ing. Christian Bornkessel, Technische Universität Ilmenau,
- Herr Prof. Dr. Achim Enders, Technische Universität Braunschweig,
- Herr Dipl.-Ing. Rüdiger Matthes, Bundesamt für Strahlenschutz, Neuherberg (i. R.),
- Herr Prof. Dr.-Ing. Matthias Wuschek, Technische Hochschule Deggendorf.

Dr. Christian Bornkessel	*Prof. Dr. Achim Enders*	*Prof. Dr. Joachim Breckow*
Vorsitzender der Arbeitsgruppe „EMF und Auto“	Vorsitzender des Ausschusses „Nichtionisierende Strahlen“	Vorsitzender der Strahlenschutzkommission

Inhalt

Elektromagnetische Felder im Automobil durch Funkanwendungen, induktives Laden und elektrisches Fahren – Empfehlung der Strahlenschutzkommission 1

Elektromagnetische Felder im Automobil durch Funkanwendungen, induktives Laden und elektrisches Fahren – Wissenschaftliche Begründung der Empfehlung der Strahlenschutzkommission 7

Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn

http://www.ssk.de

Elektromagnetische Felder im Automobil durch Funkanwendungen, induktives Laden und elektrisches Fahren

Empfehlung der Strahlenschutzkommission

Verabschiedet in der 300. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 27./ 28. Juni 2019

INHALT

1 Einleitung 3

2 Empfehlungen 3

3 Literatur 5

1 Einleitung

Seit einiger Zeit rücken technologische Innovationen, die in verschiedenen Bereichen des Automobils nichtionisierende Strahlung nutzen, verstärkt in den Fokus des allgemeinen Interesses. Bei diesen neuen Technologien handelt es sich um funkbasierte Assistenz-, Komfort- und Unterhaltungssysteme, die zu einer Exposition der Insassen und der Umgebung führen.

Zudem ist in den letzten Jahren eine deutliche Zunahme der Elektromobilität zu beobachten. Hierbei werden fokussiert Elektroantriebe und Akkumulatoren weiterentwickelt, die technisch bedingt während der Fahrt elektrische und magnetische Felder erzeugen. Die Akkumulatoren dieser Elektroautos werden überwiegend kabelgebunden aufgeladen, allerdings entwickeln die Hersteller derzeit verstärkt kabellose Ladesysteme. Letztere übertragen mithilfe von elektrischen und magnetischen Feldern Leistungen im Bereich von mehreren Kilowatt an den Akkumulator. Kabellose Ladestationen stellen somit eine neue Quelle für elektrische und magnetische Felder dar, die insbesondere im Hinblick auf die voraussichtlich flächendeckende Installation in Städten und an öffentlichen Orten an Bedeutung gewinnen wird.

Vor diesem Hintergrund hat das Bundesumweltministerium die Strahlenschutzkommission (SSK) im April 2017 um eine Bewertung der Exposition der Allgemeinbevölkerung gegenüber elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern (EMF) im Hinblick auf die technischen Innovationen im Bereich des Automobils und der damit verbundenen Risiken gebeten. Die vorliegende Empfehlung thematisiert die folgenden drei Technologiebereiche:

- Funkanwendungen (insbesondere Assistenz-, Komfort- und Unterhaltungssysteme),
- induktives Laden von Elektrofahrzeugen,
- elektrisches Fahren.

Wirkungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder im Bereich des Automobils auf elektrisch oder elektronisch betriebene Implantate sind nicht Gegenstand der vorliegenden Bewertung. Die Strahlenschutzkommission ist jedoch der Ansicht, dass eine Betrachtung dieser komplexen Thematik unter dem Blickwinkel der elektromagnetischen Verträglichkeit auch für die besonderen Randbedingungen des Automobils durchgeführt werden sollte.

2 Empfehlungen

Angesichts des zu erwartenden Auftretens (Immission) elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder bei der Einführung neuer Technologien beim Automobil in den Technologiebereichen Funkanwendungen, induktives Laden und elektrisches Fahren und des daraus folgenden Ausgesetztseins von Personen (Exposition) sowie der Tatsache, dass in einigen Bereichen aktuell keine verbindlichen Regelungen hinsichtlich EMF-Immissionen existieren, empfiehlt die Strahlenschutzkommission (SSK) dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) darauf hinzuwirken, dass folgende Aspekte umgesetzt werden:

- Es sollen verbindliche Strahlenschutzvorgaben und technische Normen bezüglich der Feldimmission im Automobil entwickelt und etabliert werden, die als Grundlage für die Berücksichtigung dieses Themas im Rahmen der Typgenehmigung dienen können. Solange keine rechtlich verbindlichen Regelungen zum Strahlenschutz zu nichtionisierender Strahlung bestehen, sollte das von der Internationalen Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) (ICNIRP 1998, ICNIRP 2010) empfohlene Konzept zur Begrenzung elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder herangezogen

werden. Dieses Konzept schlägt als vereinfachtes Verfahren die Begrenzung der elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Felder an Orten vor, die für Personen zugänglich sind (auf sog. Referenzwerte, die z. B. in der 26. BImSchV als Grenzwerte verwendet werden). In bestimmten Expositionsszenarien, z. B. sehr nahe an einer Quelle hochfrequenter Felder, führt diese Vereinfachung zu einer Überschätzung der Wirkung im Gewebe. In diesen Fällen sind die im Köper induzierten Ströme und die absorbierten elektrischen Leistungen zu ermitteln und anhand der sog. Basisgrenzwerte zu begrenzen.

– Damit die neuen Technologien konform mit den Strahlenschutzzielen, nämlich dem Schutz des Menschen vor schädlichen Wirkungen nichtionisierender Strahlen, betrieben werden können, soll der Strahlenschutz schon beim Entwurf der Technik berücksichtigt werden. Unter dem Entwurf der Technik versteht die SSK den gesamten Prozess von der Konzeptionierung und der Standardisierung einer neuen Technik bis zu der Entwicklung von konkreten Produkten. Die Hersteller sollten ihre Systeme im Hinblick auf mögliche Feldexpositionen so entwerfen, dass die Referenzwerte sicher unterschritten werden, so dass eine Einhaltung der Basisgrenzwerte nicht überprüft werden muss. Bereits bei der Entwicklung von Geräten ist eine Minimierung der Emission und der Exposition der Nutzer anzustreben, insbesondere wenn technisch und wirtschaftlich gleichwertige Alternativen bestehen.

– Angesichts der Kumulation von Immissionen durch Quellen aus verschiedenen Technologiegebieten ist es eine Kernaufgabe des Strahlenschutzes, die Gesamtexpositionssituation kritisch zu beobachten. Die SSK macht darauf aufmerksam, dass die Referenzwerte von einer technischen Quelle möglichst nicht mehr als zu einem Drittel ausgeschöpft werden sollten (SSK 2007) und mögliche Kumulationswirkungen bei der Ableitung von technischen Regeln zu berücksichtigen sind. Die technischen Regeln sollten dabei die Gesamtheit der in einem Automobil verbauten Emittenten als Ganzes betrachten und die mögliche Kumulation mit weiteren Quellen im Automobil und außerhalb des Automobils berücksichtigen.

– Da belastbare Daten zu den mit den neuen Technologien verbundenen Immissionen oftmals fehlen, soll die Einführung der genannten neuen Technologien unbedingt strahlenschutztechnisch und strahlenbiologisch durch Forschungsprojekte begleitet und mit wissenschaftlich hochwertigen Expositionsuntersuchungen unter standardisierten und reproduzierbaren Bedingungen begleitet werden. Forschungsbedarf wird insbesondere hinsichtlich der Entwicklung von geeigneten Mess- und Berechnungsverfahren zur Erfassung und Bewertung der Exposition gesehen. Die Expositionsuntersuchungen sollen alle diesbezüglichen Expositionsszenarien berücksichtigen, die insbesondere auch den Daueraufenthalt von Personen in Worst-Case-Situationen und nicht nur in typischen Situationen einschließen.

– Die hohen zu erwartenden Immissionen der induktiven Ladetechnologien sollen in der 26. BImSchV (BImSchV 2013) explizite Berücksichtigung finden. Die Feldexposition durch induktive Ladesysteme ist diejenige, die bzgl. möglicher Überschreitungen von Basisgrenzwerten bei der zukünftigen Automobilnutzung am kritischsten ausfällt und deshalb sehr aufmerksam zu begleiten sein wird.

– Die u. a. im Zusammenhang mit dem vernetzten Fahren geplanten Kleinzellen-Basisstationsstandorte sollen erfasst und die Strahlenschutzaspekte aufgrund der potenziellen Immissionskumulation, der Nähe zu Personen und ihrer großen Verbreitung geregelt werden.

3 Literatur

ICNIRP 1998 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Phys. 1998 Apr;74(4):494-522, doi: 10.1097/HP.0b013e3181aff9db

ICNIRP 2010 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). Health Phys. 2010 Dec;99(6):818-36, doi: 10.1097/HP.0b013e3181f06c86

SSK 2007 Strahlenschutzkommission (SSK). Grundsätze bei der Ableitung von Emissionsstandards bei gleichzeitig betriebenen Feldquellen. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 214. Sitzung der SSK am 23.02.2007. Bekanntmachung im BAnz Nr. 127 vom 12.07.2007

BImSchV 2013 Sechsundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV). Verordnung über elektromagnetische Felder in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. August 2013 (BGBl. I S. 3266)

Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn

http://www.ssk.de

Elektromagnetische Felder im Automobil durch Funkanwendungen, induktives Laden und elektrisches Fahren

Wissenschaftliche Begründung der Empfehlung der Strahlenschutzkommission

Verabschiedet in der 300. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 27./ 28. Juni 2019

INHALT

1 Gliederung 10

2 Funkanwendungen 10

2.1 Vernetzte Fahrzeuge 10

2.1.1 Beschreibung der Technik und Auftreten der Felder 10

2.1.2 Wichtige immissionsrelevante Parameter und Abschätzung der Immission und der Exposition 12

2.1.2.1 Frequenzen 12

2.1.2.2 Sende- und Strahlungsleistungen 12

2.1.2.3 Abstand zu Personen 13

2.1.2.4 Verbreitung der Geräte 13

2.1.2.5 Zeitliches Emissionsprofil 13

2.1.2.6 Abschätzung der Immission und der Exposition 14

2.1.3 Gesetzliche Regelungen 14

2.1.4 Bewertung und Identifizierung von offenen Fragen 15

2.2 Weitere Hochfrequenzquellen am bzw. im Fahrzeug 16

2.2.1 Beschreibung der Technik und Auftreten der Felder 16

2.2.2 Wichtige immissionsrelevante Parameter und Abschätzung der Immission und Exposition 17

2.2.2.1 Frequenzen, Sende- und Strahlungsleistungen 17

2.2.2.2 Abstand zu Personen 18

2.2.2.3 Verbreitung der Geräte 18

2.2.2.4 Abschätzung der Immission und der Exposition 18

2.2.3 Gesetzliche Regelungen 19

2.2.4 Bewertung und Identifizierung von offenen Fragen 19

3 Induktives Laden von Elektrofahrzeugen 20

3.1 Beschreibung der Technik und Auftreten der Felder 20

3.2 Wichtige immissionsrelevante Parameter und Abschätzung der Immission und der Exposition 22

3.3 Gesetzliche Regelungen 25

3.4 Bewertung und Identifizierung von offenen Fragen 26

4 Elektrisches Fahren 27

4.1 Beschreibung der Technik und Auftreten der Felder 27

4.2 Wichtige immissionsrelevante Parameter und Abschätzung der Immission und der Exposition 28

4.2.1 Erhebungen niederfrequenter Expositionen, die nicht auf den Antriebsstrang zurückzuführen sind 28

4.2.1.1 Reifen 28

4.2.1.2 Sonstige Quellen 29
4.2.2 Niederfrequente Expositionen aufgrund der Komponenten des Antriebsstranges 29
4.3 Gesetzliche Regelungen 30
4.4 Bewertung und Identifizierung von offenen Fragen 30
5 Literatur 32
6 Glossar 38
Anhang 44

1 Gliederung

Die vorliegende wissenschaftliche Begründung thematisiert die folgenden drei Schwerpunkte:

- Funkanwendungen (Assistenz-, Komfort- und Unterhaltungssysteme),
- induktives Laden von Elektrofahrzeugen,
- elektrisches Fahren.

Ausgehend von einer Beschreibung der Technik und der technischen Ausführungsformen wird für jeden der drei Schwerpunkte identifiziert, wo und wie elektrische, magnetische und/oder elektromagnetische Felder auftreten (siehe auch Tabelle A1). Nachfolgend werden wichtige technische Parameter und deren Einfluss auf Emission und Immission zusammengestellt, so dass daraus die Größe der zu erwartenden Immissionen und Expositionen innerhalb und außerhalb des Fahrzeugs abgeleitet werden kann. Sofern bereits verbindliche Regelungen für den Immissionsschutz existieren, werden diese aufgeführt. Abschließend erfolgen eine Bewertung der Immissionen und Expositionen sowie eine Identifizierung von noch offenen Fragen.

2 Funkanwendungen

2.1 Vernetzte Fahrzeuge

2.1.1 Beschreibung der Technik und Auftreten der Felder

Automobile werden zukünftig per Funk miteinander (Vehicle-to-Vehicle, V2V), mit der Verkehrsinfrastruktur (Vehicle-to-Infrastructure, V2I), mit Fußgängern (Vehicle-to-Pedestrian, V2P) sowie mit Datenzentren (Vehicle-to-Network, V2N) verbunden sein. Die Gesamtheit dieser Funkverknüpfungsmöglichkeiten wird auch als Vehicle-to-Everything (V2X) oder Car-to-Everything (C2X) bezeichnet.

Die Ziele der funkbasierten Fahrzeugvernetzung sind vielfältig. Auf der einen Seite werden Sicherheitsaspekte adressiert: So können sich Fahrzeuge gegenseitig vor Gefahrensituationen warnen (z. B. Glatteiswarnung, Pannenfahrzeuge, Stauende) oder an unübersichtlichen bzw. schlecht einsehbaren Kreuzungen aufeinander aufmerksam machen. Hierbei werden die Sensordaten des Fahrzeugs als „Crowd Source“ allen anderen Fahrzeugen innerhalb der Funkreichweite zugänglich gemacht. Weitere Beispiele sind rechtzeitige Einfädelungsinformationen vor Baustellen oder das Freimachen einer Gasse für Rettungsfahrzeuge.

Auf der anderen Seite kann z. B. durch intelligente Ampelsteuerung der Verkehrsfluss optimiert werden. Ein oft zitiertes Beispiel ist das „LKW Platooning“, bei dem durch dichtes Auffahren von LKWs mit der Ausnutzung des Windschatteneffektes Treibstoff eingespart werden kann. Die Fahrzeugkommunikation dient dann zur automatischen Abbremsung der nachfolgenden Fahrzeuge, sobald das erste Fahrzeug bremst. Die Gesamtheit dieser verkehrsrelevanten Anwendungen gehört zum Bereich der Intelligenten Transportsysteme (Intelligent Transportation Systems, ITS).

Neben diesen primär unter Sicherheitsaspekten entwickelten Anwendungen soll die Fahrzeugvernetzung jedoch zunehmend auch einer Komfortverbesserung dienen: Die Funkvernetzung ist wichtige Voraussetzung in Hinblick auf das teil- und vollautomatisierte Fahren, bei dem der Fahrer zunehmend von der Fahrzeugsteuerung entlastet wird.

Weitere Anwendungen der funkbasierten Fahrzeugkommunikation, die teilweise auch schon heute eingesetzt werden, betreffen die Aktualisierung von Navigationsdaten oder der Steuersoftware des Fahrzeugs.

Die Funkverbindung bei der Fahrzeugvernetzung kann prinzipiell sowohl über den Aufbau von Ad-hoc-Netzen direkt zwischen Fahrzeugen oder zwischen Fahrzeug und Infrastruktur realisiert werden als auch ein vorhandenes Mobilfunknetz einbeziehen.

Hinsichtlich der Funkübertragungstechnik konkurrieren die folgenden zwei unterschiedlichen technischen Systeme: ITS-G5 und C-V2X.

ITS-G5 ist vom European Telecommunications Standards Institute (ETSI) standardisiert. Es nutzt das 5,9-GHz-Band und basiert auf dem Wireless LAN Standard IEEE 802.11p, der für den Datenaustausch zwischen Fahrzeugen optimiert wurde. Die Frequenz von 5,9 GHz wurde gewählt, um mit den eingesetzten Übertragungstechniken die Reichweite auf wenige hundert Meter begrenzen zu können und mögliche Interferenzen mit weiter entfernten Fahrzeugen zu minimieren. ITS-G5 adressiert im Unterschied zu C-V2X primär die Aspekte V2V und V2I. Derzeit sind erste Anwendungen dieser Technik im Einsatz. Die Firma Volkswagen hat angekündigt, ab 2019 diese Technik als Standardequipment in ihren Modellen einzusetzen (Polchow 2017, Ritter 2017).

C-V2X („C“ für „cellular“, alternativ wird die Bezeichnung LTE-V2X verwendet) ist eine derzeit entstehende Alternative zu ITS-G5 und wird vor allem von der 5G Automotive Association (5GAA) vorangetrieben. Im Gegensatz zu ITS-G5 beinhaltet C-V2X zwei Betriebsmodi: Der erste Modus ist die direkte Kommunikation zwischen Endgeräten mit geringer Latenzzeit im 5,9 GHz Band (sogenannte PC5-Schnittstelle) für Sicherheitsmitteilungen (d. h. V2V, V2I und V2P). Dieser Modus beinhaltet eine ähnliche Funktionalität wie ITS-G5. Der zweite Modus ist eine V2N-Kommunikation über das reguläre Mobilfunknetzwerk (sogenannte Uu-Schnittstelle). Dieser Modus soll z. B. für Infotainment-Anwendungen, Kartenupdates und Latenzzeit-unabhängige Sicherheitsmitteilungen (wie z. B. Verkehrsmitteilungen) benutzt werden. Hinsichtlich des V2N-Mobilfunknetzes werden die Mobilfunkstandards LTE (4G) und zukünftig auch 5G eingesetzt werden, wobei vor allem in das zukünftige 5G-Mobilfunknetz bezüglich der Datenübertragungsgeschwindigkeiten und der für verschiedene Anwendungsfälle flexibel anpassbaren Netzwerkkonfigurationen mit unterschiedlichen Qualitätsanforderungen (Network Slicing) hohe Erwartungen gesetzt werden. Viele der Mobilfunk-Basisstationen werden als Kleinzellen (Small Cells) errichtet, um ein engmaschiges Funknetz zur lückenlosen Versorgung der Straßen zu realisieren.

Die Mobilfunksysteme der vierten (4G) bzw. fünften (5G) Generation werden im Rahmen des „3rd Generation Partnership Project“ (3GPP) standardisiert. Zwar sind in den bisherigen Standardversionen (3GPP Releases 14 und 15) bereits wesentliche Voraussetzungen wie z. B. Ultra Reliable Low Latency Communications (URLCC), also eine hochzuverlässige Kommunikation mit kurzer Latenzzeit, adressiert; die Standardisierung der C-V2X-Technik wird aber erst mit Release 16 und damit nicht vor Ende 2019 abgeschlossen sein. Erst Release 16 wird Anwendungsfälle wie automatisiertes Fahren, Teleoperator assistiertes Parken und 3D HD Kartenupdates unterstützen. Release 16 konforme Funkkomponenten wird es somit erst ab dem Jahr 2020 geben. Damit ist festzustellen, dass vor allem bezüglich der Funktechnologie C-V2X – im Unterschied zu ITS-G5 – noch vieles nicht endgültig standardisiert ist. Trotzdem verläuft die Entwicklung der C-V2X-Technik wesentlich dynamischer als die der bereits einige Jahre bestehenden Technik ITS-G5. Welche Technik sich aber letztlich durchsetzen wird, ist derzeit noch nicht absehbar, jedoch für den Strahlenschutz von untergeordneter Bedeutung.

Damit die Fahrzeuge untereinander, mit der Verkehrsinfrastruktur und im Fall von C-V2X mit dem Mobilfunknetz Informationen austauschen können, sind folgende Funkkomponenten nötig:

- Ein oder mehrere Funkkomponenten im Fahrzeug, auch als On-Board Units (OBU) bezeichnet. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass zukünftig die Funktionalität von Mobiltelefonen mit Hilfe einer eingebetteten SIM-Karte („embedded SIM“, eSIM) in die OBU integriert werden kann, so dass dann die Mobilfunkkommunikation nicht mehr über das Mobiltelefon direkt, sondern über die OBU stattfindet.
- Funkbasierte Roadside Units (RSU), die z. B. in Ampeln oder Verkehrsleitsystemen installiert sein können.
- Mobilfunk-Basisstationen, die als zentrale Sammel- und Verteilstelle für Daten und Informationen dienen.

Durch diese Funkkomponenten werden folgende elektromagnetische Felder erzeugt:

- On-Board Units erzeugen eine Exposition der Fahrzeuginsassen sowie anderer Verkehrsteilnehmer im unmittelbaren Umfeld der OBU.
- Roadside Units erzeugen Immissionen, die nicht nur auf die Verkehrsteilnehmer, sondern auf die Allgemeinbevölkerung einwirken.
- Mobilfunk-Basisstationen erzeugen Immissionen, die nicht nur auf die Verkehrsteilnehmer, sondern auf die Allgemeinbevölkerung einwirken.

2.1.2 Wichtige immissionsrelevante Parameter und Abschätzung der Immission und der Exposition

Wichtige immissionsrelevante Parameter sind die Frequenz, die Sendeleistung bzw. die äquivalente isotrope Strahlungsleistung (EIRP), die Antennencharakteristik sowie der Abstand und die Ausrichtung zu Personen. Weiterhin relevant sind die stückzahlmäßige Verbreitung der Funkgeräte sowie das zeitliche Profil der Emission.

2.1.2.1 Frequenzen

Alle IST-Funkanwendungen mit Ausnahme von V2N arbeiten im 3GPP-Band 47, das den Bereich von 5 855 MHz bis 5 925 MHz umfasst. Die Bundesnetzagentur hat den Frequenzbereich von 5 855 MHz bis 5 905 MHz für „Funkanwendungen für intelligente Verkehrssysteme“ zugeteilt, wobei der Bereich von 5 905 MHz bis 5 925 MHz für geplante, also am zukünftigen Bedarf orientierte Anwendungen ausgewiesen wird (BNetzA 2009). Der Teilbereich von 5 875 MHz bis 5 905 MHz ist für Safety-Anwendungen reserviert. Die Frequenzzuteilung ist zunächst bis zum 31. Dezember 2020 befristet.

Für die Kommunikation von Fahrzeugen mit den Mobilfunk-Basisstationen (V2N) sind prinzipiell die derzeit vorhandenen Frequenzen des 4G und 5G Mobilfunks möglich, d. h. der Frequenzbereich von etwa 700 MHz bis 3,8 GHz für Deutschland.

Bei diesen Frequenzangaben ist zu berücksichtigen, dass von 700 MHz bis 2 GHz die Grenzwerte (BImSchV 2013) bzw. Grenzwertempfehlungen (ICNIRP 1998) frequenzabhängig sind.

2.1.2.2 Sende- und Strahlungsleistungen

3GPP legt für das Band 47 (5,9 GHz) für Endgeräte eine maximale Sendeleistung von 26 dBm (400 mW) RMS fest. Diese Leistung ist etwa doppelt so hoch wie die Endgeräteleistung für andere Endgeräte, die die 4G- und 5G-Frequenzbänder nutzen.

Die Bundesnetzagentur hat in ihrer Allgemeinverfügung für intelligente Verkehrssysteme eine Strahlungsleistung (EIRP) von maximal 33 dBm (2 W) RMS festgelegt (BNetzA 2009). Die EIRP bezieht neben der Sendeleistung auch den Antennengewinn ein.

Klassische 4G-Basisstationen (auf Dächern oder Masten) haben typische Kanalsendeleistungen von 20 W bis 50 W (entsprechend etwa 600 W bis 3000 W EIRP), wobei pro Standort mehrere Betreiber und Kanäle gebündelt werden können. Für 5G wird die Kanalsendeleistung voraussichtlich in vergleichbarer Größenordnung liegen, die EIRP aufgrund des höheren Antennengewinns jedoch bis zu etwa 10mal größer werden als bei 4G-Basisstationen. Kleinzelleninstallationen werden pro Standort hingegen mit einer EIRP von kleiner als 10 W betrieben.

2.1.2.3 Abstand zu Personen

Die im Fahrzeug installierten Funkmodule sind körpernah zu den Insassen und körperfern zu Passanten installiert. Unter körpernaher Installation sind Hochfrequenzquellen (HF-Quellen) zu verstehen, die bei den hier vorliegenden Frequenzen typischerweise in Abständen von Zentimetern bis Dezimetern zum menschlichen Körper betrieben werden. Körperferne Quellen sind Quellen, die in Abständen betrieben werden, bei denen Fernfeld-Näherungen für die Berechnungen der auf den Körper wirkenden Felder zum Einsatz kommen können (SSK 2013).

Fußgänger werden im Rahmen von V2P mit „wearable devices“ oder Smartphones ausgestattet sein; hier ist die Exposition körpernah oder mit Körperkontakt (je nach Tragebereich Ohr, Brust, Hüftbereich).

Die Exposition durch Roadside Units und Mobilfunk-Basisstationen ist in der Regel als körperfern einzustufen; bei Kleinzellen-Basisstation kann die Exposition auch körpernah sein.

2.1.2.4 Verbreitung der Geräte

Es ist zu erwarten, dass langfristig alle Fahrzeuge mit V2X-Technik ausgestattet werden, wobei derzeit nicht bekannt ist, wie viele On-Board Units in ein einzelnes Fahrzeug integriert werden.

Die Installation der Roadside Units soll flächendeckend an Hotspots, wie z. B. Ampeln, Verkehrsleitsystemen usw., erfolgen.

Hinsichtlich der Anzahl der Sender für die Funk-Vernetzung im Verkehr (ohne On-Board Units) gehen Schätzungen von einer Gesamtzahl von etwa 100 000 Sendern in Deutschland über die nächsten 10 Jahre aus[1]. Diese Zahl beinhaltet Mobilfunk-Basisstationen und Roadside Units. Eine weitere Unterteilung in die verschiedenen Sendertypen ist derzeit nicht möglich.

2.1.2.5 Zeitliches Emissionsprofil

Die im vernetzten Fahrzeug integrierten On-Board Units senden bei sicherheitsrelevanten Anwendungen (V2V, V2I, V2P) nur dann Funksignale, wenn sich das Fahrzeug in Betrieb befindet. Bei netzwerkbezogenen Anwendungen (V2N), wie etwa dem Aktualisieren von Kartendaten oder der Steuersoftware, können Funksignale auch vom abgestellten Fahrzeug gesendet werden. Der zeitliche Verlauf der Funksignale ist diskontinuierlich (gepulst) und auch vom Betriebszustand des Fahrzeugs abhängig.

Die Roadside Units sowie die Mobilfunk-Basisstationen senden ihre Funksignale permanent. Die Feinstruktur der Signale ist ebenfalls diskontinuierlich (gepulst).

[1] persönliche Kommunikation mit Herrn Springer (Telekom), 2018

2.1.2.6 Abschätzung der Immission und der Exposition

Über die mit den On-Board Units und den Roadside Units verbundenen Immissionen liegen derzeit keine Informationen vor.

Die Immission durch On-Board Units hängt im Wesentlichen davon ab, wo die Geräte im Fahrzeug installiert sind und ob sie über eine Außenantenne angebunden sind. Die Exposition durch Mobiltelefone im Körperkontakt kann hier nicht als Maßstab herangezogen werden, da im unmittelbaren Nahbereich die Immission vom Mobilgerät bei zunehmendem Abstand sehr schnell abnimmt (IZMF 2015). Messungen in einigen 10 cm Abstand wurden z. B. bei Feldmessungen im Umfeld von LTE-Mobilfunksendeanlagen durchgeführt (Bornkessel und Schubert 2013); hier wurden in 50 cm Abstand von einem Mobiltelefon und einem Surfstick maximale Feldstärken bis etwa 5,5 V/m festgestellt, was weit unterhalb der Referenzwerte der EU-Ratsempfehlung (EG 1999) liegt. Durch andere Abstände, Antennenpositionen und die metallische Einbauumgebung im Fahrzeug können sich jedoch hiervon abweichende Werte ergeben.

Ähnliche Abschätzungen zu den durch Roadside Units verursachten Expositionen liegen derzeit nicht vor, sollten aber für verschiedene Aufbauvarianten im Rahmen von technologiebegleitenden Untersuchungen erhoben werden.

Über die Immission durch Mobilfunk-Basisstationen liegen für die Mobilfunktechniken 2G, 3G und 4G z. B. aus dem Deutschen Mobilfunk-Forschungsprogramm umfangreiche Daten vor (DMF 2018). So wird in (SSK 2011) festgestellt, dass bei Maximalauslastung der Station die leistungsbezogene Grenzwertausschöpfung durch ortsfeste Sendeanlagen maximal im einstelligen Prozentbereich und häufig im Promillebereich liegt. Dies entspricht maximalen elektrischen Feldstärken von wenigen Volt pro Meter.

Die letztgenannten Werte gelten jedoch primär für die bislang überwiegend verwendeten Mast- und Dachstandorte. Im Zuge des 4G-Ausbaus und des zukünftigen 5G-Aufbaus werden verstärkt Kleinzellen-Basisstationen eingesetzt. Obwohl diese eine Strahlungsleistung von nur einigen Watt aufweisen, befinden sie sich aufgrund ihrer geringeren Installationshöhe (typische Integration in „Stadtmöbel“ wie Bushäuschen und Werbetafeln, darüber hinaus an Laternenmasten oder Hauswänden, in Telefonsäulen, Kanaldeckeln, Parkscheinautomaten, E-Ladesäulen oder Schaltschränken) näher an Personen. Erste systematische Untersuchungen (Kopacz et al. 2018, Menzel und Wuschek 2018) zeigen, dass die Immissionen durch Kleinzellen zwar grundsätzlich unterhalb der Grenzwerte (BImSchV 2013) bleiben, in allgemein zugänglichen Bereichen bei Kleinzellen aber durchaus größer sein können als bei typischen Dach- oder Maststandorten.

Über Immissionen durch 5G-Mobilfunk-Basisstationen liegen derzeit keine Informationen vor. Die messtechnischen Herausforderungen liegen in der Entwicklung eines Messverfahrens, das eine Extrapolation der gemessenen Momentanimmission auf den Zustand bei maximaler Anlagenauslastung ermöglicht. Hierbei stellen die bei 5G geplanten Strahlschwenk-mechanismen durch „Massive-MIMO-Antennen“ (Beamforming), bei denen die Antennen-abstrahlcharakteristik nicht mehr statisch ist, sondern flexibel auf einzelne Nutzer ausgerichtet werden kann, eine durchgreifende technische Neuerung dar, die im Messverfahren geeignet zu berücksichtigen ist.

2.1.3 Gesetzliche Regelungen

On-Board Units, Roadside Units, Kleinzellen-Sendeanlagen und Mobilfunk-Basisstationen unterliegen dem Funkanlagengesetz (FuAG 2017) als deutscher Umsetzung der europäischen Richtlinie über die Bereitstellung von Funkanlagen auf dem Markt (EU 2014a).

Der Betrieb einer Mobilfunk-Basisstation mit mehr als 10 W EIRP pro Standort unterliegt zusätzlich den Grenzwertvorschriften der 26. BImSchV (BImSchV 2013) bzw. dem Standortbescheinigungsverfahren der Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder (BEMFV 2002).

Im Geltungsbereich des Funkanlagengesetzes wird hinsichtlich des Schutzes der Allgemeinbevölkerung über harmonisierte Normen auf die Grenzwerte der Empfehlung 1999/519/EG „Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz bis 300 GHz)“ verwiesen (EG 1999); diese enthält Basisgrenzwerte und Referenzwerte. Die Referenzwerte sind im hochfrequenten Bereich identisch zu den Grenzwerten der 26. BImSchV. Die harmonisierten Normen erlauben jedoch eine Ausschöpfung des Grenzwertes zu 100 % durch eine einzelne Quelle, so dass mögliche Kumulationseffekte durch die Emissionen von mehreren gleichzeitig vorhandenen Quellen nicht berücksichtigt werden. Die Strahlenschutzkommission hat hierzu in ihrer Empfehlung „Grundsätze bei der Ableitung von Emissionsstandards bei gleichzeitig betriebenen Feldquellen“ (SSK 2007) Regeln vorgeschlagen, nach denen die Referenzwerte von einer technischen Quelle alleine möglichst nicht mehr als zu einem Drittel ausgeschöpft werden sollten, damit auch bei einer Kumulation der Immissionen von mehreren Quellen in der Summe die Grenzwerteinhaltung gewährleistet ist. Die Anwendung dieser Regel wird auch im Kontext des vernetzten Fahrens empfohlen.

2.1.4 Bewertung und Identifizierung von offenen Fragen

Eine Bewertung der Exposition der Allgemeinbevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern im Bereich der vernetzten Fahrzeuge und der damit verbundenen Risiken ist derzeit nur bedingt möglich, da zu wenig Informationen und nahezu keine relevanten Untersuchungen zu dieser Thematik vorliegen. Auf Basis der derzeit vorliegenden Informationen kann abgeschätzt werden, dass die Fahrzeugvernetzung so betrieben werden kann, dass sie konform mit den Strahlenschutzzielen, nämlich dem Schutz des Menschen vor schädlichen Wirkungen nichtionisierender Strahlen, ist. Dazu ist es allerdings nötig, dass der Strahlenschutz schon beim Entwurf der Technik berücksichtigt wird. Unter dem Entwurf der Technik versteht die SSK den gesamten Prozess von der Konzeptionierung und der Standardisierung einer neuen Technik bis zu der Entwicklung von konkreten Produkten. Die SSK hat schon mehrfach darauf hingewiesen, dass bereits bei der Entwicklung von Geräten eine Minimierung der Emissionen und der Exposition der Nutzer anzustreben ist, insbesondere wenn technisch und wirtschaftlich gleichwertige Alternativen bestehen (SSK 2013, SSK 2003, SSK 2001).

Angesichts der zu erwartenden Expositionen durch elektromagnetische Felder im Bereich der vernetzten Fahrzeuge empfiehlt die SSK dem BMU darauf hinzuwirken, dass folgende Aspekte umgesetzt werden:

– Damit die Fahrzeugvernetzung konform mit den Strahlenschutzzielen betrieben werden kann, ist es nötig, dass der Strahlenschutz schon beim Entwurf der Technik berücksichtigt wird.

  Dies kann z. B. dadurch erfolgen, dass On-Board Units mit einer Außenantenne betrieben werden und dass eigene Mobilfunkgeräte mit Hilfe einer eingebetteten SIM-Karte in die On-Board Units integriert werden können.

– Die Einführung der V2X-Technik ist strahlenschutztechnisch mit geeigneten Expositionsuntersuchungen zu begleiten. Diese sollen alle diesbezüglichen Immissionsquellen wie On-Board Units, Roadside Units und Mobilfunk-Basisstationen einschließlich Kleinzellen einbeziehen. Geeignete Bewertungsverfahren (Messung, Berechnung) sind zu entwickeln.

– Kleinzellen-Basisstationsstandorte sollen erfasst und die Strahlenschutzaspekte aufgrund der Nähe zu Personen, ihrer großen Verbreitung und der potenziellen Immissionskumulation geregelt werden. Kleinzellenstationen sollten, sofern möglich, personenfern angebracht werden. Überlagerungsaspekte mehrerer benachbarter Stationen sind zu untersuchen. Da die Expositions-Metriken von typischen Mobilfunk-Basisstationen auf Kleinzellen-Basisstationen nicht übertragbar sind, sollen eigene Methoden zur Expositionsbestimmung entwickelt werden, welche die örtliche und zeitliche Immissionsverteilung berücksichtigen.

– Hinsichtlich des geplanten Einsatzes von 5G-Mobilfunk-Basisstationen sind geeignete Mess- und Hochrechnungsverfahren für die momentane und die maximal mögliche Immission zu entwickeln. Hierbei sind insbesondere auch Beamforming-Aspekte, d. h. die zielgerichtete Ausrichtung einzelner Antennenstrahlungsrichtungen auf die Mobilfunknutzer, zu beachten und geeignet sowohl in Messverfahren als auch im berechnungstechnischen Standortbescheinigungsverfahren zu berücksichtigen.

2.2 Weitere Hochfrequenzquellen am bzw. im Fahrzeug

2.2.1 Beschreibung der Technik und Auftreten der Felder

Neben der zukünftig zu erwartenden Vernetzung von Automobilen untereinander bzw. mit anderen Verkehrsteilnehmern und externen Datennetzwerken finden sich innerhalb des Fahrzeugs bzw. am Fahrzeug noch andere Quellen hochfrequenter Signale, die bereits seit einigen Jahren zunehmende Verbreitung finden und hier nochmals im Überblick aufgelistet sind:

– Am Fahrzeug werden Radarmodule als aktive Sensoren zur Steigerung der Verkehrssicherheit bzw. des Fahrkomforts immer häufiger auch schon in Fahrzeugen der Mittelklasse eingesetzt.

– Funkbasiert sind auch die Systeme des „Keyless Access“ sowie elektronische Wegfahrsperren.

– Ebenfalls funkbasiert arbeiten einfache Einrichtungen zur Kurzstreckendatenübertragung, wie z. B. Reifendrucksensoren oder die bereits seit vielen Jahren bekannten Funkschlüssel zum ferngesteuerten Öffnen der Fahrzeugtürverriegelung sowie Garagentoröffner oder Standheizungsfernsteuerungen.

– Schließlich finden sich innerhalb der Fahrgastzelle noch verschiedene funkbasierte Systeme für den Bereich der Telekommunikation und des Infotainment, wie z. B. Bluetooth-Freisprecheinrichtungen oder andere Kurzstreckenkommunikationssysteme sowie WLAN-Router, um den Fahrgästen einen drahtlosen Zugang zum Internet zu ermöglichen. Die eigentliche Anbindung an das Internet erfolgt hierbei über im Fahrzeug verbaute Mobilfunkendgeräte (4G, 5G).

– Auch das kabellose Laden von Smartphones wird zukünftig in immer mehr Fahrzeugen möglich sein, meist durch eine entsprechende Ladeeinrichtung z. B. im vorderen Bereich der Mittelkonsole.

All diese oben aufgelisteten Kommunikations- und Sensorsysteme sind nicht neu, sondern sie werden bereits seit längerem in Kraftfahrzeugen (insbesondere der Ober- und oberen Mittelklasse) eingesetzt. Jedoch ist zu beobachten, dass die Zahl der mit derartigen Systemen ausgestatteten Fahrzeuge zunimmt sowie pro Fahrzeug eine immer größere Anzahl an funkbasierten Systemen verbaut wird.

2.2.2 Wichtige immissionsrelevante Parameter und Abschätzung der Immission und Exposition

Wichtige immissionsrelevante Parameter sind die Frequenz, die Sendeleistung bzw. die äquivalente isotrope Strahlungsleistung (EIRP), das zeitliche Profil der Leistungsabgabe (z. B. Dauerabstrahlung oder nur sporadisches kurzzeitiges Senden), der Abstand und die Ausrichtung zu Personen sowie die stückzahlmäßige Verbreitung der Funkmodule.

2.2.2.1 Frequenzen, Sende- und Strahlungsleistungen

Kfz-Radarmodule arbeiten im Frequenzbereich um 77 GHz bzw. bei 24 GHz oder 96 GHz. Unterschieden werden können hierbei zwei Hauptgruppen von Systemen:

– Long Range Radar (LRR) mit größerer Reichweite (typisch bis zu etwa 150 m) z. B. zur Überwachung der Straße vor dem Fahrzeug („anti collision system“, ACS) oder zur adaptiven Distanz- und Geschwindigkeitsregelung („adaptive cruise control“, ACC). Derartige Systeme besitzen Strahlungsleistungen von z. B. typisch 0,1 W bis 1 W EIRP (RMS) und werden im vorderen Teil des Fahrzeugs, beispielsweise in der Stoßstange oder im Bereich des Kühlergrills, verbaut.

– Systeme mit geringerer Reichweite (Short Range Radar, SRR) z. B. zur Überwachung des toten Winkels rechts und links neben dem Fahrzeug oder des Bereichs hinter dem Fahrzeug (Einparkhilfe). Montiert sind derartige Systeme (Side Radar, SR bzw. Rear Radar, RR) z. B. im Seitenspiegel oder in der Heckklappe. Hier sind meist etwas geringere EIRP-Werte von 0,01 W bis 0,2 W (RMS) typisch.

Maximal zulässige EIRP-Werte ergeben sich bei Radarmodulen aus der Frequenzzuteilung der Bundesnetzagentur, die jedoch ausschließlich dem Zweck der störungsminimierten Koexistenz verschiedener Funksysteme dienen und nicht auf Überlegungen zur Exposition von Personen basieren. Beispielsweise lässt die Bundesnetzagentur für den Frequenzbereich 77 GHz bis 81 GHz nach (BNetzA 2014) für ein FM-CW-Radar mit einer Bandbreite des Hochfrequenzsignals von 500 MHz außerhalb des Fahrzeugs eine im Mittel abgestrahlte EIRP von maximal 0,063 W zu.

Systeme des „Keyless Access“ sowie elektronische Wegfahrsperren verwenden fahrzeugseitig Sendefrequenzen im Langwellenbereich (125 kHz) bzw. meist 434 MHz im Schlüssel. Über genaue Sendeleistungen liegen aktuell wenig verlässliche Informationen vor. Wegen der geringen Reichweite sollten jedoch Werte von einigen 10 mW ausreichend sein.

Im Gegensatz zum einfachen Funkschlüssel als ältestes System, der bei Betätigung ein kurzes Datentelegramm (Dauer weniger als eine Sekunde) an das Kfz sendet, bauen moderne Systeme (z. B. elektronische Wegfahrsperren) eine bidirektionale Verbindung zwischen Fahrzeugelektronik und dem Schlüssel auf. Welche Länge die ausgetauschten Datenpakete besitzen und wie häufig diese abgegeben werden, ist nicht bekannt.

Es existieren jedoch auch Systeme, bei denen der Schlüssel ohne eigene Batterie auskommt. Er entnimmt dem vom Kfz abgegebenen Langwellensignal die für das eigene Senden notwendige Energie („energy harvesting“). Ob bei derartigen Systemen fahrzeugseitig andere Sendeleistungen verwendet werden als bei Systemen mit batteriebetriebenem Schlüssel, ist nicht bekannt.

Andere typisch im Kfz-Umfeld eingesetzte ältere Systeme zur Kurzstreckendatenübertragung (z. B. Garagentoröffner, Standheizungsfernsteuerungen) senden bei Betätigung einmalig ein

kurzes Datentelegramm an die Gegenstelle, die Kommunikation ist üblicherweise unidirektional. Bei der Kommunikation von Reifendrucksensoren mit der Fahrzeugelektronik ist hingegen von Telegrammen in regelmäßigem Abstand auszugehen.

Für alle im 434-MHz-Band eingesetzten Funksysteme kleiner Reichweite („Short Range Devices“, SRD) gestattet die Bundesnetzagentur eine maximale Strahlungsleistung von 16,4 mW EIRP, bei 27 MHz sind es 164 mW EIRP, bei 868 MHz 41 mW (BNetzA 2018).

Für die im Fahrzeuginneren vorhandenen WLAN-Module (IEEE 802.11p, entsprechend ITS-G5) wurden bereits in Abschnitt 2.1.2.2 Leistungswerte angegeben. Wegen der notwendigen Kompatibilität mit kommerziellen Endgeräten der Fahrzeuginsassen müssen im Kfz zusätzlich auch WLAN-Module der „klassischen“ Standardversionen IEEE 802.11.b/g/h/n im Frequenzbereich zwischen 2,4 GHz und 2,5 GHz sowie im 5-GHz-Band eingesetzt werden. Die Strahlungsleistungen liegen hierbei in der Größenordnung von 100 mW EIRP.

Für Bluetooth-Übertragungen im Frequenzbereich zwischen 2 400 MHz und 2 483,5 MHz sind nach (BNetzA 2018) Strahlungsleistungen von maximal 10 mW EIRP zulässig.

Für das kabellose, induktive Laden von Smartphones im Fahrzeug stellt der „Qi“-Standard die derzeit am weitesten verbreitete einheitliche Spezifikation dar. Die für die Energieübertragung verwendete Frequenz befindet sich im Langwellenbereich (110 kHz bis 205 kHz). Spezifiziert ist eine Leistungsübertragung von 5 W bis 15 W (Low Power). Details zum zeitlichen Profil der Sendeleistungsabgabe sind nicht verfügbar. Erwähnenswert ist allerdings noch, dass vom Sender ein regelmäßiges Überprüfungssignal ausgesendet wird, das durch Kapazitäts- oder Resonanzänderung erkennt, ob ein zu ladendes Gerät auf die Qi-Ladestation gelegt wurde. Somit emittiert eine derartige Ladestation auch im Leerlauf zumindest sporadisch elektromagnetische Signale, allerdings mit deutlich geringerer Leistung als im Lademodus.

Tiefergehende Informationen zum induktiven Laden finden sich in Kapitel 3.

2.2.2.2 Abstand zu Personen

Die meisten im Fahrzeug installierten Funkmodule sind körpernah zu den Insassen und körperfern zu Passanten außerhalb des Fahrzeugs installiert. Eine Ausnahme bilden Radarmodule: Hier ist ein direkter Körperkontakt von Personen außerhalb des Kfz zu z. B. im Seitenspiegel oder im Heckbereich installierten Radarmodulen denkbar. Dies ist insbesondere deshalb zu berücksichtigen, da in manchen Betriebsarten die Radarmodule auch bei stillstehendem Fahrzeug (z. B. im Stau oder an der Ampel) senden.

2.2.2.3 Verbreitung der Geräte

Wie bereits erwähnt, ist zukünftig mit einer deutlich zunehmenden Verbreitung von am Fahrzeug betriebenen Radar- und im Kfz-Inneren installierten sonstigen Funkmodulen zu rechnen. Sowohl die Zahl der Fahrzeuge, bei denen derartige HF-Quellen eingesetzt werden, als auch die Anzahl der Quellen pro Fahrzeug wird in Zukunft vermutlich deutlich zunehmen.

2.2.2.4 Abschätzung der Immission und der Exposition

– Bei den Radarmodulen ist aufgrund der Montageposition und der Antennencharakteristik anzunehmen, dass die Exposition der Fahrzeuginsassen gegenüber derjenigen von in der Nähe des Fahrzeugs befindlichen Personen (Fußgänger) deutlich geringer ausgeprägt ist. Andererseits ist bei Fahrzeuginsassen von einer längeren Zeitdauer der Exposition auszugehen (typisch mehr als sechs Minuten) als bei Passanten, die sich meist nur kurzfristig im Nahbereich des Fahrzeugs aufhalten.

- Die Hersteller von Radarmodulen versichern in ihren Produktunterlagen die Konformität ihrer Produkte mit den entsprechenden harmonisierten europäischen Sicherheitsnormen, darunter fallen auch entsprechende EMF-Produktstandards. Detaillierte Messergebnisse (Angaben zur Ausschöpfung empfohlener Basisgrenzwerte oder Referenzwerte bei verschiedenen Randbedingungen) werden jedoch nicht publiziert. Verlässliche Abschätzungen der Immission bzw. Exposition können auf Basis der publizierten Produktunterlagen also nicht vorgenommen werden.
- Untersuchungsergebnisse zur möglichen Kumulation der Emissionen mehrerer Radarmodule bzw. zur Exposition bei direktem Körperkontakt liegen nicht vor.
- Zum Thema Kumulation von im Privatbereich bzw. im Büroumfeld eingesetzten Funksystemen existieren bereits Untersuchungsergebnisse (Schmid et al. 2005). Allerdings bleibt zu prüfen, ob die dort gefundenen Erkenntnisse auf die Situation im Kfz (eine größere Anzahl an Sendemodulen wird in geringem Abstand zueinander und zu den Insassen in einem teilgeschirmten Volumen betrieben) ohne weiteres übertragbar sind. Bezüglich der Feldausprägung im Fahrzeuginneren ist außerdem zu berücksichtigen, dass die Abschirmwirkung der Karosserie durch die immer häufigere Verwendung von metallbedampften Fensterscheiben tendenziell noch verstärkt wird, so dass die Gesamtschirmung der Fahrzeughülle zukünftig vermutlich noch zunehmen wird. Dies kann beispielsweise Auswirkungen auf die Leistungsabgabe von Funksystemen haben, die vom Kfz-Inneren nach außen senden.
- Über die Größe von Streufeldern bei kabellosen Ladeeinrichtungen von Mobiltelefonen im Automobil und die sich daraus ergebende Exposition der Insassen liegen keine Untersuchungsergebnisse vor.

2.2.3 Gesetzliche Regelungen

Da es sich bei in oder am Fahrzeug betriebenen Hochfrequenzmodulen nicht um ortsfeste Anlagen handelt und ihre Strahlungsleistung zudem 10 W EIRP nicht überschreitet, fallen sie nicht unter die Regelungen der 26. BImSchV.

Allerdings unterliegen sie den Regelungen des deutschen Funkanlagengesetzes (FuAG 2017), das die europäische Richtlinie über die Bereitstellung von Funkanlagen auf dem Markt (EU 2014a) in deutsches Recht umsetzt. Über harmonisierte Normen wird hinsichtlich des Schutzes der Allgemeinbevölkerung auf die Grenzwerte der Empfehlung 1999/519/EG „Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz bis 300 GHz)“ verwiesen (EG 1999); die dort angegebenen Referenzwerte sind im hochfrequenten Bereich identisch zu denen der 26. BImSchV.

Bezüglich möglicher Kumulationseffekte und der sich daraus ergebenden Konsequenzen für die Ausschöpfung der Grenzwerte durch einzelne Geräte sei auf die Hinweise in Abschnitt 2.1.3 verwiesen.

2.2.4 Bewertung und Identifizierung von offenen Fragen

Eine Bewertung der Exposition der Allgemeinbevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern, verursacht durch sonstige im Fahrzeug verbaute Hochfrequenzquellen und der damit verbundenen Risiken, ist derzeit nicht abschließend möglich, da zum Teil keine ausreichenden Informationen und nahezu keine relevanten Untersuchungen zu diesen Quellen vorliegen. Auf Basis der derzeit vorliegenden Informationen kann aber abgeschätzt werden, dass die Quellen so betreibbar sind, dass die Konformität mit den Strahlenschutzzielen gegeben ist. Dazu ist es grundsätzlich empfehlenswert, dass der Strahlenschutz schon beim Entwurf der Technik

berücksichtigt wird. Die SSK hat schon mehrfach darauf hingewiesen, dass bereits bei der Entwicklung von Geräten eine Minimierung der Emissionen und der Exposition der Nutzer anzustreben ist, insbesondere wenn technisch und wirtschaftlich gleichwertige Alternativen bestehen (SSK 2013, SSK 2003, SSK 2001). Angesichts der zu erwartenden Expositionen durch elektromagnetische Felder von im bzw. am Fahrzeug betriebenen sonstigen Hochfrequenzquellen empfiehlt die SSK dem BMU darauf hinzuwirken, dass folgende Aspekte umgesetzt werden:

– Der Strahlenschutz soll schon beim Entwurf von derartigen Hochfrequenzquellen berücksichtigt werden.
– Im Bereich der Kfz-Radarsysteme soll die Exposition von Personen, die sich im Umfeld der Antennen aufhalten, quantitativ untersucht werden. Besonderes Augenmerk ist hierbei auf mögliche Kumulationseffekte durch mehrere gleichzeitig betriebene Systeme zu legen. Weiterhin ist die bei direktem Körperkontakt mit den abstrahlenden Oberflächen entstehende Exposition zu ermitteln.
– Weiterhin bestehen offene Fragen zur Exposition von Insassen durch die Vielzahl möglicher Hochfrequenzquellen, die im Fahrzeuginneren in relativ geringem Abstand zu den Personen betrieben werden. Daher werden eingehende Untersuchungen zur Kumulation der Einzelimmissionen in Verbindung mit dem Kfz als teilgeschirmten Raum empfohlen.
– Bezüglich des kabellosen Ladens von elektronischen Kleingeräten im Fahrzeuginneren wird auf die Empfehlungen in Kapitel 3 verwiesen.

3 Induktives Laden von Elektrofahrzeugen

3.1 Beschreibung der Technik und Auftreten der Felder

Mit Hilfe der induktiven, kabellosen Energieübertragung können ortsveränderliche elektrische Verbraucher kontakt- und damit kabellos aufgeladen werden. Mögliche Anwendungsbereiche dieser Technologie im Automobil sind Ladeschnittstellen für portable, kommerzielle Endgeräte der Fahrzeuginsassen (z. B. Handys, Smartphones, Tablets oder Kameras). Am verbreitetsten hierfür ist das weltweit als Standard eingeführte „Qi“-System. Die für die Energieübertragung verwendete Frequenz befindet sich im Langwellenbereich (110 kHz bis 205 kHz). Spezifiziert sind Übertragungsleistungen in drei Bereichen von 5 W bis 15 W (Low Power) über 60 W (für Laptops) und (geplant) 120 W.

Das mit Abstand größte Anwendungspotenzial der induktiven Lade- bzw. Übertragungstechnologie bei zukünftigen Kfz-Anwendungen ist aber die kabellose elektrische Energieversorgung für Elektroantriebe jedweder Art von außen zum Fahrzeug. Genutzt wird hierfür insbesondere der Frequenzbereich zwischen 20 kHz und 150 kHz für Übertragungsleistungen im Bereich von 3 kW bis 22 kW; für Busse gibt es Systeme bis zu 200 kW. In den allermeisten Fällen handelt es sich um eine drahtlose Ladeschnittstelle für das Laden von Antriebsbatterien bei stehendem Fahrzeug z. B. in der Garage oder auf einem Parkdeck. Es gibt aber auch Modellsysteme zur drahtlosen Energieversorgung aus der Fahrbahn/Straße heraus zum fahrenden Automobil; hier liegen aber für eine Abschätzung der Expositionen zu wenige Informationen vor, eine Beobachtung der weiteren Entwicklung wird jedoch empfohlen. Der beabsichtigte Komfortgewinn für den Verbraucher und damit der wirtschaftliche Erfolg und die Marktdurchdringung dieser Systeme wird in jedem Fall als erheblich eingeschätzt, weil nicht nur auf die Kabel zum Nachladen verzichtet werden kann, sondern sich auch die Frage der Kompatibilität zwischen verschiedenen Steckern nicht mehr

stellt. Allerdings muss für die kabellosen Systeme die Interoperabilität möglichst vieler Systeme sichergestellt werden.

Die kabellose Ladetechnik funktioniert nach dem Prinzip des Transformators und beruht damit auf der magnetischen Induktion: Ein in einer Sendespule (Transmitter) fließender Wechselstrom erzeugt ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld, das in einer Empfängerspule (Receiver) eine Wechselspannung induziert.

Der Wirkungsgrad für diese kabellose, induktive Übertragungstechnik ist grundsätzlich schlechter als bei einer kontaktbasierten Steckverbindung, da das für die Übertragung erforderliche Magnetfeld im Zeittakt auf- und abgebaut werden muss. Physikalisch erfordert dies einen zusätzlichen Stromanteil in den Übertragungsspulen, den sogenannten „Magnetisierungsstrom". Transformatoren dienen in der Energietechnik normalerweise für die benötigte Übertragung zwischen verschiedenen Spannungsebenen, so dass die Übertragungsverluste in Kauf genommen werden müssen. Dennoch sind hier bei größeren Transformatoren Verluste im Bereich deutlich unter 1 % Stand der Technik, was insbesondere durch einen sogenannten „geschlossenen" magnetischen Kreis ermöglicht wird.

Bei den induktiven Ladesystemen für Antriebsanwendungen im Kfz handelt es sich um Planarspulen, die über einen Abstand („Luftspalt") parallel zueinander angeordnet sind. Hier steht nicht die Spannungswandlung im Fokus, sondern der Bedienkomfort in Form eines einfachen Platzierens der beiden Spulen parallel übereinander ohne jedes mechanische Stecken. Ein einfaches Einparken des Fahrzeuges über einer Bodenspule, ggf. sogar automatisiert, genügt für den Ladeprozess.

Dies macht im Gegensatz zum geschlossenen magnetischen Kreis herkömmlicher Transformatoren das Vorhandensein eines mehr oder weniger großen Luftspaltes erforderlich. Bei fest im Boden und an der Fahrzeugunterseite montierten Spulen entspricht der Luftspalt also in etwa der gewünschten Bodenfreiheit des Kfz. Der Luftspalt führt nicht nur zu einem schon gegenüber klassischen Transformatoren schlechteren Wirkungsgrad, da im Luftspalt zusätzliche magnetische Feldenergie für die Übertragung auf- und abgebaut werden muss, sondern auch zu einem größeren magnetischen Streufeld, das sich aus dem Luftspalt seitlich heraus erstreckt, überproportional mit der Luftspaltabmessung skaliert und auch noch neben dem Fahrzeug bzgl. seiner Immission zu überprüfen ist (siehe Abschnitt 3.3).

Für kleinere Leistungen bei Verbraucherprodukten bis ca. 30 W ist für aktuell etablierte Systeme ein schlechter Wirkungsgrad belegt, den o. a. Qi-Standard eingeschlossen. Die Energieeffizienz für die induktive Übertragung wurde mit 50 % bis 60 % bestimmt, während die vergleichbaren kabelgebundenen Systeme bei 75 % lagen (Zahner et al. 2017).

Für hohe Leistungen zum Laden von Antriebsbatterien im Automobil sind hierzu keine entsprechenden Vergleichsuntersuchungen aus der Literatur bekannt, insbesondere auch nicht in Abhängigkeit von der Höhe des Luftspaltes. Die induktiven Ladesysteme für das Kfz werden durch größere Spulenflächen und sonstige Maßnahmen zu höherer Effizienz hin optimiert. Eine „Stecker"-Übertragung wird hier dennoch aus den besagten physikalischen Gründen mindestens einige Prozentpunkte besser ausfallen.

Das nicht nur umweltpolitisch, sondern auch wirtschaftlich wichtige Thema der Effizienz beim induktiven Laden von Fahrzeugbatterien verdient deshalb immer eine genaue Analyse. Beispielsweise ist häufig nicht transparent, ob bei einer Wirkungsgrad-Angabe das gesamte Übertragungssystem für den induktiven Ladevorgang spezifiziert ist oder nur ein Teil des Systems. Es sind nur relativ selten explizite Angaben für Gesamtsysteme veröffentlicht, diese liegen bei maximal 90 %. In einer Pressemitteilung von Kia Motors America (04/2018) ist z. B. ein Systemwirkungsgrad von 85 % genannt (KIA 2018). Das mittlerweile in Deutschland

erhältliche System „Qualcomm Halo“ wirbt mit 90 % Systemwirkungsgrad (Qualcomm 2011). Höhere Wirkungsgrad-Angaben gehen einher mit einer Beschränkung auf Teilsysteme, z. B. findet sich eine spezifische Wirkungsgradanforderung für den reinen Transmitter- bzw. Versorgungsteil am Boden mit gefordert besser als 92 % bei der deutschen Standardisierungsinitiative CharIN e. V. (CharIN 2018).

3.2 Wichtige immissionsrelevante Parameter und Abschätzung der Immission und der Exposition

Erst langsam auf den Markt kommende Produkte, eine noch in der nationalen wie internationalen Abstimmung befindliche Produktstandardisierung sowie teils spärliche Informationen der Hersteller machen es verständlich, dass es nur wenig belastbare Informationen und Untersuchungen zu den induktiven Ladesystemen gibt. Dies betrifft insbesondere die beiden zusammenhängenden Gesichtspunkte des Systemwirkungsgrades und der Immission der Systeme. Im Vergleich mit der heutigen Gesamtsituation bei der drahtlosen Funkübertragung, d. h. der Erfassung der Expositionssituation und der entsprechenden Aufklärung bzw. Information der Bevölkerung, steht man hier erst am Anfang. Es ist eine interessante Frage, ob mit dem Aufkommen dieser Technologie eine ähnliche gesellschaftliche Verunsicherung eintreten wird wie beim Einführen der Mobilfunk-, DECT- und WLAN-Systeme. Die Vertrautheit mit dem und das Angewiesensein auf den Kfz-Verkehr könnte beim induktiven Kfz-Laden für eine höhere gesellschaftliche Akzeptanz sprechen, es könnte aber wegen der im Folgenden abgeschätzten, erheblichen Immission sogar zu einer noch stärkeren Hinterfragung als beim Mobilfunk führen.

Für die hier zu beurteilende Immission ist es zunächst sinnvoll, mittels elementarer physikalischer Zusammenhänge auf die Größenordnungen der von den Systemen erzeugten magnetischen Felder zu schließen. Elementar kann aus dem Ampereschen Durchflutungssatz die Formel $B = \mu_o I/(2\pi r)$ mit B als magnetischer Flussdichte bestimmt werden, die bei einem Strom I im Abstand r zu einem längeren geraden Leitungsstück erzeugt wird mit $\mu_o = 4\pi 10^{-7}$ (Vs/Am) als magnetischer Permeabilität des freien Raumes. Für einen Abstand von r = 0,25 m erhält man eine einfache Beziehung für B: B/µT = 0,8 I/A. D. h. für einen Strom von 10 A folgt in 0,25 m Abstand ein Feld von 8 µT, bei 100 A folgt 80 µT usw. Bei einer runden Drahtschleife als Modellspule mit einer Windung ist diese Rechnung über das Biot-Savart-Gesetz etwas aufwändiger. Hier ergibt sich z. B. bei einem Durchmesser von 0,5 m, also einem Radius von r = 0,25 m, für die magnetische Flussdichte in Kreismitte B/µT = 2,5 I/A, d. h. bei 10 A liegt hier das Maximalfeld bei 25 µT und bei 100 A bei 250 µT.

Obwohl der Aufbau der induktiven Übertragungsstrecke in Form von zwei Spulen mit entgegengesetzten Strömen eine Teilkompensation beider Spulenfelder mit dem Resultat eines geringeren Gesamtfeldes bewirkt, ist die Kompensation bei größeren Luftspaltabmessungen nicht vollständig. Neben der angesprochenen Kompensation im Spulen-Mittenbereich kommt es darüber hinaus in der Regel zu einer Verstärkung des Streufeldes beider Spulen zur Seite hin durch dortige konstruktive Feldüberlagerung. Darüber hinaus bestehen die Spulen aus mehreren Windungen, was die Feldstärken proportional zur Windungsanzahl erhöht. Ein folgerichtiger nächster analytischer Berechnungsschritt ist in einer aktuellen Veröffentlichung gegeben (Zhang et al. 2018). Für zwei parallel und zentrisch angeordnete Flachspulen kreisförmiger Geometrie, also einer prototypischen Anordnung, wird eine analytische Feldberechnung durchgeführt. Mittels geeigneter Parametrisierung, d. h. der Skalierung von Strömen, Frequenzen und Abmessungen, kann auf die erzeugten Felder geschlossen werden. Dies gilt einerseits nur für die Spulenanordnung im freien Raum ohne zusätzliche Randbedingungen wie Schirmen, gibt andererseits aber doch Auskunft über die Größenordnungen zu erwartender

Feldstärken. Derartige Rechnungen sind hiermit auch „hochskalierbar“ für die hohen Leistungen und typischen Geometrien beim kabellosen Laden von Elektrofahrzeugen.

All dies zeigt, dass die einfachen oben angeführten Feldstärkewerte des einzelnen Drahtes und der Drahtschleife zumindest als Anhaltspunkt für die erzeugten magnetischen Flussdichten dienen können. Ein Übertragungssystem mit z. B. typischer 3,3 kW Leistung und einem Strom von 11 A bei 300 V Spannung kann also in der Mitte der Übertragungsstrecke, d. h. im zentralen Bereich des Luftspaltes, eine Feldstärke aufweisen, die im Bereich des Referenzwertes der ICNIRP 2010 (es handelt sich zugleich um den Grenzwert der 26. BImSchV) für die allgemeine Bevölkerung von 27 µT (von 3 kHz bis 10 MHz) liegt. Diese Abschätzung macht deutlich, warum die explizite Überprüfung der Einhaltung der Basisgrenzwerte in Form des internen E-Feldes für Reizwirkungen und des SAR-Wertes (oberhalb 100 kHz) für Erwärmungseffekte bei diesen Systemen häufig erforderlich ist.

Beim realen induktiven Ladesystem gibt es eine Vielzahl weiterer immissionsrelevanter Parameter, die sich teilweise auch gegenseitig beeinflussen können. Insgesamt sind insbesondere zu nennen:

- zu übertragende Leistung,
- Abmessungen,
- Aufbau und Wicklungsanzahl der Spulen sowie Überlappung und Abstand (Luftspalt) zwischen den beiden Spulen,
- Übertragungsfrequenz,
- Positionierung der Spulen am/unterhalb des Fahrzeuges,
- Relevanz von leitfähigen (Karosserie-)Blechen zur Schirmung, ggf. Verwendung ferromagnetischer Materialien zur Formung des magnetischen Übertragungskreises,
- Zugänglichkeit im Streufeldbereich des Luftspaltes beim Laden, zusätzliche Detektion von leitenden Fremdkörpern und Tieren/Menschen in geringem Abstand mit anschließender Sicherheitsabschaltung, etc.

Bei realen Systemen kleinerer Übertragungsleistung wie dem in Abschnitt 3.1 erwähnten Qi-Standard für das Laden von Verbraucherprodukten im Hausbereich sind die Immissionen bzgl. der Referenzwerte ebenfalls relevant (Zahner et al. 2017). Trotz kleinerer Ströme von typisch 1 A konnten hier im Frequenzbereich von 150 Hz bis 200 kHz sowohl messtechnisch wie durch Simulation des realen Systems RMS-Feldstärkewerte von bis zu 200 µT festgestellt werden, die allerdings nur in Abständen bis zu einigen Zentimetern zur Primärspule auftraten. Schon hier wird deshalb die Untersuchung der Einhaltung der Basisgrenzwerte erforderlich. Aufgrund der kleinen Volumenbereiche lag aber die induzierte Spannung bzw. elektrische Feldstärke im Gewebe wie auch die SAR-Exposition nicht nur deutlich, sondern um zwei bis drei Größenordnungen unterhalb der Basisgrenzwerte.

Die induktiven Ladesysteme am Kfz sind im Vergleich zu den erwähnten Verbraucherprodukt-Anwendungen räumlich wesentlich ausgedehnter, die typischen Spulenabmessungen liegen im Bereich einiger Dezimeter anstatt Zentimeter, und die Betriebsströme sind ebenfalls mindestens eine Größenordnung höher.

Die übertragbaren Leistungen derzeit realisierter, typischer Systeme fangen bei ca. 3 kW an und gehen für PKW bis 22 kW, für Busse auch bis 200 kW bei Frequenzen im Bereich von 20 kHz bis 150 kHz. Bei Betriebsspannungen im Bereich einiger 100 V bis maximal 800 V ergeben sich dann typische Betriebsströme von 10 A bis 300 A. Die Abstände zwischen stationärer Primär- und im Fahrzeugboden befindlicher Sekundärplatte betragen bis zu 30 cm (typische

Bodenfreiheit eines SUV). Deshalb liegen die resultierenden Feldstärken plausibel in einem Bereich, bei dem Referenzfeldstärken überschritten werden, und der die explizite Überprüfung der Einhaltung der Basisgrenzwerte notwendig macht. Dies gilt fast immer für das Feld zwischen den Platten, aber häufig auch noch für das Streufeld neben den Türschwellen, d. h. im Sinne des Personenschutzes unkontrollierten Daueraufenthaltsbereichen. Zu dieser offensichtlichen Problematik gibt es entsprechend umfangreiches Datenmaterial zu Immissionen und Expositionen, das von den Herstellerfirmen zur Verfügung gestellt wird (siehe als nur ein Beispiel Qualcomm 2013). Häufig sind aber nicht alle denkbaren (insbesondere Worst-Case-) Szenarien berücksichtigt und angesichts der Parametervielfalt gibt es auch noch keinen anerkannten Stand der Technik bzw. es gibt keine validierte Expositionsmetrik, wie die Einhaltung der ICNIRP-Referenz- und Basisgrenzwerte zu überprüfen ist. Dazu sind auch messtechnische Probleme zu zählen. Beispielsweise werden in der Praxis vielfach handelsübliche Magnetfeldsonden mit einer Integrationsfläche von 100 cm^2 verwendet, mit denen ein stark inhomogenes Streufeld in Türschwellernähe nur grob gemittelt vermessen werden kann. Eine Aussage zu möglichen internen E-Feldstärken in Körpergewebe über Integrations-Volumina von $2 \times 2 \times 2\ mm^3$, entsprechend der Bewertungsmetrik von ICNIRP, ist mit derartigen Sonden dann nicht möglich („*ICNIRP recommends determining the induced electric field as a vector average of the electric field in a small contiguous tissue volume of* $2 \times 2 \times 2\ mm^3$. *For a specific tissue, the* 99^{th} *percentile value of the electric field is the relevant value to be compared with the basic restriction.*" ICNIRP 2010). Die Entwicklung einer adäquaten und praxistauglichen Expositionsmetrik für induktive Ladesysteme ist daher eine vordringliche Aufgabe.

Herstellerunabhängige Literatur ist kaum vorhanden. In einer Arbeit aus dem Jahr 2017 wird unter dem Aspekt „Human exposure assessment" die Überschreitung der ICNIRP-Referenzwerte aus 2010 in Höhe von 27 µT bei einer Übertragungsfrequenz von 85 kHz um einen Faktor 2,5 in einer konkreten praxisrelevanten Situation demonstriert, die durch eine alternative Platzierung der Empfangsspule vermeidbar ist (Cirimele 2017).

Eine weitere Arbeit im Rahmen eines DFG-geförderten Projektes an der Bergischen Universität Wuppertal hat zur Entwicklung eines hybriden numerischen Simulationsmodells geführt, mit dem die Überprüfung der Einhaltung von Basisgrenzwerten im Körper für verschiedene realistische Szenarien in hoher Auflösung möglich ist (Clemens et al. 2018). Hier wird ebenfalls deutlich, dass bei den untersuchten Systemen Referenzwerte im zugänglichen Bereich um das Automobil herum überschritten werden und die Einhaltung der Basisgrenzwerte explizit überprüft werden muss, wozu ein neues und praktikables, zweistufiges Hybridverfahren vorgeschlagen wird. Mit einer derartigen Methodik könnte auch in der Praxis die Einhaltung der Basisgrenzwerte dokumentiert werden, da die neu entwickelte bzw. optimierte Simulationstechnik auf handelsüblichen PCs lauffähig ist und keine Spezialrechner mehr notwendig sind. Gegen eine solche Vorgehensweise spricht, dass für ihre Standardisierung und Verifizierung der entsprechende Konsens unter den zahlreichen beteiligten Fachdisziplinen herbeigeführt werden muss. Bisher ist die explizite Überprüfung von Basisgrenzwerten bei Massenprodukten auch nur für die SAR-Messung beim Mobiltelefon als Ausnahme etabliert. Obwohl für das analysierte Modell-Übertragungssystem die klare Einhaltung der Basisgrenzwerte demonstriert wird, könnte durch Skalierung der gewählten Systemparameter, insbesondere eine höhere Übertragungsleistung bzw. einen höheren Spulenstrom, eine größere Spulenfläche sowie Vergrößerung des Luftspaltes und maximale Annäherung der exponierten Person auf eine dann gegebene, nennenswerte Ausschöpfung der Basisgrenzwerte bis hin zur Überschreitung geschlossen werden.

Im Sinne des Strahlenschutzes ist es sinnvoll, wenn an jeder Stelle im zugänglichen Bereich um die Ladeeinrichtung herum von vornherein die Referenzwerte für alle relevanten Praxissituationen eingehalten werden, d. h. unter Berücksichtigung von Mehrfachexpositionen im Sinne der Empfehlung der SSK (SSK 2007). Angesichts der Vielzahl der o. a. immissionsrelevanten Parameter und der damit möglichen Variabilität im Entwurf erscheint die technische Realisierung dieser Anforderung in der Praxis möglich, wobei der Minimierung des Luftspaltes eine primäre Bedeutung zukommt. Dieser Punkt ist direkt mit dem Übertragungswirkungsgrad und damit der gesamten Verlustenergie im System im Rahmen seiner Lebensdauer verknüpft und sollte demzufolge ebenso in Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen einbezogen werden (Mehraufwand bei der Systemherstellung gegen Einsparungen über die Benutzungszeit).

3.3 Gesetzliche Regelungen

Im Sinne des Immissionsschutzrechts wäre die zum induktiven Laden genutzte Bodenplatte als ortsfeste Anlage zu werten. In der Regel arbeitet das induktive Laden aber bei Übertragungsfrequenzen oberhalb von 9 kHz und Spannungspegeln unterhalb von 1 000 Volt und stellt dann keine „Niederfrequenzanlage“ nach 26. BImSchV (BImSchV 2013) dar.

Für Hochfrequenzanlagen gilt die jetzige Fassung der 26. BImSchV nur, sofern diese eine „äquivalente isotrope Strahlungsleistung (EIRP) von 10 W oder mehr“ aufweisen. Gemeint waren hier Anlagen, die zum Zwecke einer signaltechnischen Funkübertragung eine nennenswerte physikalische Leistung in den Raum abstrahlen (physikalisch charakterisiert durch ein invers-proportionales Abklingen der Feldstärken mit zunehmendem Abstand). Ein derartiges physikalisches Feldverhalten trifft auf das induktive Laden nicht zu, die ausgesandte „äquivalente isotrope Strahlungsleistung“ (EIRP) ist für den Personenschutz immer vernachlässigbar, da diese begriffsmäßig nicht der induktiv übertragenen Leistung gleichzusetzen ist, sondern der Leistung der in den Raum abgestrahlten elektromagnetischen Welle. Letztere ist beim induktiven Laden im Sinne des Personenschutzes vernachlässigbar, da aufgrund der sehr großen Wellenlänge (bei 100 kHz z. B. 3 000 m) im Verhältnis zu den geometrischen Systemabmessungen quantitativ kaum Abstrahlung auftritt. Für die zwischen den Spulen übertragene Energie ist der Begriff der Strahlungsleistung unpassend.

Die jetzigen Begrifflichkeiten der 26. BImSchV sind also auf diese technologisch neueren, induktiven Ladesysteme nicht ohne Weiteres anwendbar (Bemerkung: Für die technische Funkentstörung ist die ausgesandte EIRP beim induktiven Laden dagegen sehr wohl relevant, da hier auch noch Leistungen im Bereich von 10^{-8} W oder darunter zu Störungen von Funkdiensten in den benutzten Frequenzbereichen führen können.).

Es wird empfohlen, dass induktive Ladesysteme explizit unter den Anwendungsbereich der 26. BImSchV fallen sollen. Sie erzeugen starke magnetische Nahfelder, die zwar physikalisch schneller mit wachsendem Abstand abklingen als Strahlungsfelder (mindestens mit der dritten Potenz des inversen Abstandes), aber im möglichen Aufenthaltsbereich von 1 m bis 2 m Abstand in der direkten Umgebung der Ladeeinrichtung sehr stark ausfallen können. Nach den in Abschnitt 3.2 gegebenen Daten sind magnetische Flussdichten abschätzbar, die sowohl zu Überschreitungen der Referenzwerte als auch der Basisgrenzwerte der ICNIRP-Leitlinien (ICNIRP 2010) für die Allgemeinbevölkerung führen können und damit Schutzmaßnahmen einfordern. Ein möglicher Lösungsvorschlag besteht darin, den Anwendungsbereich der 26. BImSchV um Hochfrequenzanlagen mit einer kontaktlos übertragbaren Hochfrequenz-Leistung zwischen separaten Sende- und Empfangsgeräten zu erweitern, wenn die Sendeanlage eine übertragbare Leistung von ≥ 10 W erzeugt.

Es bleibt abzuwarten, inwieweit auch andere für den Automobilbau zuständige Normungsorganisationen die oben aufgeführten Erfordernisse des EMF-Personenschutzes aufgreifen werden (SAE, ISO etc.). Derzeit werden die Bodenspule bzw. die fahrzeuggebundenen Einrichtungen separat von verschiedenen Normungsgremien behandelt. Bereits in anderen einschlägigen Studien wurde auf die unklaren Zuständigkeiten bezüglich der EMF-Harmonisierung hingewiesen, z. B. (Dürrenberger et al. 2014).

3.4 Bewertung und Identifizierung von offenen Fragen

Angesichts der zu erwartenden Expositionen durch magnetische Felder im Bereich des induktiven Ladens von Kfz empfiehlt die SSK dem BMU darauf hinzuwirken, dass folgende Aspekte umgesetzt werden:

- Damit induktives Laden konform mit den Strahlenschutzzielen betrieben werden kann, soll der Strahlenschutz schon beim Entwurf der Technik berücksichtigt werden. Dies kann zum Beispiel dadurch erfolgen, dass Maßnahmen zur Minimierung des Luftspaltes getroffen werden. Die Feldexposition durch induktive Ladesysteme wird voraussichtlich diejenige sein, die bzgl. möglicher Überschreitungen von Referenz- und Basisgrenzwerten bei der zukünftigen Automobilnutzung am kritischsten ausfällt und deshalb sehr aufmerksam zu begleiten sein wird.
- Die Einführung von induktiven Kfz-Ladesystemen soll unbedingt strahlenschutztechnisch mit geeigneten Expositionsuntersuchungen begleitet werden. Diese sollen alle diesbezüglichen Expositionsszenarien berücksichtigen, die insbesondere auch den Daueraufenthalt von Personen in Worst-Case-Situationen und nicht nur in typischen Situationen einschließen.
- Die Hersteller induktiver Ladesysteme sollten die Systeme im Hinblick auf mögliche Feldexpositionen möglichst so entwerfen, dass die Einhaltung der Basisgrenzwerte nicht explizit für die möglichen Aufenthaltsbereiche um die Ladesysteme herum überprüft werden müssen, sondern dass die Referenzwerte sicher unterschritten werden. Die SSK macht an dieser Stelle auch darauf aufmerksam, dass diese Referenzwerte von einer technischen Quelle alleine möglichst nicht mehr als zu einem Drittel ausgeschöpft werden sollten (SSK 2007). In der Praxis sind auch beim induktiven Laden Mehrfachexpositionen vorstellbar, z. B. wenn mehrere Ladeeinrichtungen in einem Parkhaus nebeneinander gleichzeitig in Betrieb sind und sich im engen Abstand zwischen zwei Automobilen Personen aufhalten. Hier ist sogar realistisch, dass sich beide Streufelder kohärent überlagern, wenn sie aus einer gemeinsamen Quelle oder zwei baugleichen Quellen gespeist werden, so dass die addierten Werte beider Quell-Feldstärken für den Personenschutz relevant wären.
- Es wurde und wird in der technischen Standardisierung und Normung sehr kontrovers diskutiert, ob und wie man einen mechanisch einstellbaren Übertragungs-Luftspalt etablieren könnte. Die einfache Vorstellung ist die, dass eine der beiden Spulenplatten verstellbar ausgeführt wird, d. h. entweder wird die stationäre Bodenplatte an die Sekundärspule im Fahrzeug für den Ladevorgang herangefahren oder umgekehrt. Alle Fachleute sind sich aufgrund der zugrundeliegenden Physik einig, dass bei Annäherung in den Zentimeterbereich oder darunter die Streufeldproblematik so gut wie eliminiert wird und der Wirkungsgrad sich spürbar verbessert. Bei den hohen Leistungen von 200 kW im schon erwähnten induktiven Ladesystem eines Stadtbusses konnte man hierauf auch nicht verzichten. Natürlich bedeutet dies einen höheren mechanischen Realisierungsaufwand und damit höhere Produktkosten, die einen breiten Konsens für diese Lösung zumindest bis

heute verhindert haben. Dem gegenüber stehen geringere Energieverluste über die gesamte Betriebslebensdauer aufgrund des höheren Übertragungs-Wirkungsgrades. Die Strahlenschutzkommission hat schon in der Vergangenheit darauf hingewiesen, dass bereits bei der Entwicklung von Geräten eine Minimierung der Emissionen und der Exposition der Nutzer anzustreben ist, insbesondere wenn technisch und wirtschaftlich gleichwertige Alternativen bestehen (SSK 2001, SSK 2003).

– Induktive Ladesysteme sollen in den Anwendungsbereich der 26. BImSchV aufgenommen werden und ihre hohen zu erwartenden Immissionen dadurch im Schutzgedanken der 26. BImSchV explizite Berücksichtigung finden.

– Die Standards für die – in der Regel ortsfesten – bodengebundenen Systeme (Bodenspule) einerseits und die fahrzeuggebundenen Einrichtungen andererseits sollen von einem gemeinsamen Verständnis von Schutzzielen, zu betrachtenden Bereichen, Grenzwerten usw. für das gesamte induktive Ladesystem ausgehen und inhaltlich aufeinander abgestimmt sein, auch wenn sie von verschiedenen Normungsorganisationen erarbeitet werden.

4 Elektrisches Fahren

4.1 Beschreibung der Technik und Auftreten der Felder

Neben den bisher beschriebenen Systemen führen auch die für den Antriebsstrang elektrisch betriebener Fahrzeuge spezifischen elektrischen und elektronischen Komponenten zu einer Exposition der Insassen. Insbesondere sind dies die Batterie, der Elektromotor, die Elektronik zum Betrieb des Motors und die Verkabelung.

Derzeit werden für den Antrieb elektrisch betriebener Fahrzeuge vor allem Asynchronmotoren oder permanent erregte Synchronmotoren eingesetzt. Künftig könnten wegen der Rohstoffproblematik (seltene Erden) aber auch fremderregte Synchronmotoren zum Einsatz kommen. Die elektrische Leistung variiert in den verfügbaren Modellen zwischen etwa 1 kW und knapp 300 kW.

Als Energiespeicher werden hauptsächlich Lithium-Ionen-Batterien eingesetzt. Vor allem in den Modellen mit geringer elektrischer Motorleistung (Hybridantriebe) sind aber auch andere Batterietypen zu finden. Die Kapazität der Batterien variiert je nach PKW-Modell zwischen etwa 0,8 kWh und 100 kWh. Die Batteriespannung kann einige 100 V erreichen. Die Batterien bestehen aus einer Vielzahl von Einzelzellen. Manche Bordnetze werden mit bis zu 800 V betrieben, dazu werden entsprechende Konverter eingesetzt. Die Spitzenströme im Antriebsstrang können bis zu 300 A betragen.

Der für den Betrieb der Motoren erforderliche frequenz- und spannungsvariable Drehstrom wird durch einen Umrichter erzeugt, der mit Frequenzen bis in den kHz-Bereich arbeitet und Spektralanteile bis in den MHz-Bereich verursachen kann. Während der Rekuperation (der Elektromotor arbeitet als Generator) dient der Umrichter auch als Gleichrichter zum Laden der Batterie. Die dabei auftretenden Ströme sind u. a. abhängig vom aktuellen Ladezustand der Batterie.

Quellen magnetischer Felder im Antriebsstrang von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen sind die Batterien, die Leitungen, der Konverter und die Motoren. Daneben spielen aber auch Quellen eine Rolle, die in allen Fahrzeugen unabhängig vom Antriebskonzept vorhanden sein können. Besondere Aufmerksamkeit haben in der Literatur EMF-Emissionen aufgrund der Magnetisierung von Stahlgürteln in den Reifen gefunden. Bei Messungen vor allem im

Fahrbetrieb können zudem von außen niederfrequente Felder einwirken, die zuverlässig zu berücksichtigen sind.

Statische und niederfrequente elektrische Felder spielen in Kraftfahrzeugen aufgrund der guten Leitfähigkeit der derzeit für die Karosserie eingesetzten Materialien keine Rolle, deswegen werden sie im Folgenden auch nicht weiter betrachtet.

4.2 Wichtige immissionsrelevante Parameter und Abschätzung der Immission und der Exposition

In mehr oder minder komplexen Simulationsmodellen (Low und Ruddle 2013, Ruddle et al. 2013, Ruddle und Low 2013, Moreno-Torres Concha et al. 2016, Moreno-Torres Concha et al. 2013) wurden Systemkomponenten, wie z. B. Elektromotoren, Konverter, Kabelkonfigurationen, Batteriesysteme oder Fahrzeugchassis und Fahrgastzellen, nachgebildet.

An diesen vereinfachten Modellen können vor allem die Einflüsse unterschiedlicher Parameter, Strukturen und Materialien auf die Felder im Fahrzeuginneren untersucht werden. Die wenigen vorliegenden Ergebnisse legen nahe, dass z. B. die beim Aufbau der Batterie aus zahlreichen Einzelzellen entstehenden Stromschleifen maßgebend für die Emission sind und je nach Ausführung Unterschiede bis zu etwa dem Faktor 20 auftreten können. Die Abschirmung der Batterie durch unterschiedliche Materialien führt im Frequenzbereich unter 10 Hz zu einer vergleichsweise geringen Abschwächung der Felder in der Größenordnung von einigen zehn Prozent. Unterschiedliche Verdrahtungen der Batterie können hingegen Feldunterschiede bis zu einem Faktor 20 verursachen. Teile von Chassis und Karosserie können neben einer generellen Abschirmwirkung von einigen zehn Prozent lokal zu einer Felderhöhung führen. Feldreduzierende Maßnahmen an den Leitungen des Antriebsstranges (z. B. Verdrillung) werden oft erst in größeren Abständen zum Kabel wirksam.

Insgesamt zeigt sich, dass vor allem das technische Design und die verwendeten Materialien die Immissionen im Fahrzeuginneren bestimmen und weniger die elektrischen Parameter der Komponenten.

Für die gesundheitliche Bewertung im Bereich niederfrequenter Felder sind die zeitlichen Spitzenwerte der Immissionen relevant. Für diese Bewertung werden meist die Empfehlungen der ICNIRP herangezogen (ICNIRP 1998, ICNIRP 2010). Bei nicht sinusförmigen Signalen, wie sie für die Exposition in Elektrofahrzeugen typisch sind, schlägt ICNIRP die Bewertung nach der Methode der gewichteten Spitzenwerte (weighted peak) vor (ICNIRP 2010). Neben analytischen Verfahren auf der Basis spektraler Messungen steht mittlerweile auch ein direktes messtechnisches Verfahren zur Verfügung (Keller 2017). Breitbandige Messungen sind aufgrund der Signalcharakteristik für die gesundheitliche Bewertung der Exposition nicht geeignet.

4.2.1 Erhebungen niederfrequenter Expositionen, die nicht auf den Antriebsstrang zurückzuführen sind

4.2.1.1 Reifen

Einige Studien haben sich speziell mit den durch die Bereifung verursachten Expositionen befasst (Stankowski et al. 2006, Milham et al. 1999, Schmid et al. 2009). Aufgrund unterschiedlicher Messverfahren sind die Ergebnisse aber nur bedingt vergleichbar. Die dominierenden Frequenzkomponenten liegen im Bereich weniger Hz bis einiger 10 Hz und sind von der Reifendrehzahl abhängig. Die Magnetfeldexpositionen, die unter Anwendung des sog. weighted peak-Verfahrens ermittelt wurden, variieren zwischen < 1 % bis etwa 21 % des

ICNIRP-Referenzwertes für die allgemeine Bevölkerung (ICNIRP 1998). Die hohen Werte treten meist in unmittelbarer Nähe zum Reifen (im Fußbereich) auf und können durch entsprechende Materialien der Karosserie stark abgeschwächt werden. In einem Fall dämpfte die Karosserie die magnetische Exposition durch die Bereifung um den Faktor 5 (Stankowski et al. 2006).

4.2.1.2 Sonstige Quellen

Feldquellen, wie beispielsweise die elektrische Sitzheizung, das Gebläse oder die Klimaanlage, können in allen Fahrzeugen unabhängig vom Antriebskonzept lokal erhebliche Expositionen bis weit über die ICNIRP-Referenzwerte verursachen (Schmid et al. 2009). Werden diese Komponenten bei Messungen nicht berücksichtigt (kontrolliert), so kann dies den Vergleich zwischen den unterschiedlichen Antriebskonzepten verfälschen. Grundsätzlich sehen die ICNIRP-Leitlinien bei Überschreiten der Referenzwerte eine Überprüfung der Basiswerte vor. Entsprechende Untersuchungen der von ICNIRP empfohlenen Basiswerte dieser Kraftfahrzeug-Komponenten sind nicht bekannt.

4.2.2 Niederfrequente Expositionen aufgrund der Komponenten des Antriebsstranges

Durch die Komponenten des Antriebsstranges werden vor allem Expositionen im Frequenzbereich von etwa 0 kHz bis zu einigen 100 kHz erzeugt. Allerdings können die Umrichter Oberwellen bis weit in den MHz-Bereich verursachen. Da die Bewertungskurven nach ICNIRP (ICNIRP 1998, ICNIRP 2010) frequenzabhängig sind, gehen höhere Spektralanteile stärker in die Bewertung ein.

Zur Ermittlung der Exposition durch Komponenten des Antriebsstranges elektrisch angetriebener Fahrzeuge werden in den vorliegenden Studien die unterschiedlichsten Verfahren angewandt. So finden sich in der Literatur Simulationsrechnungen, breitbandige Messungen mit unterschiedlichen Bandbreiten, spektrale Messungen unterschiedlicher Auflösung, in unterschiedlichen Frequenzbereichen und unterschiedlicher Verdichtung der Ergebnisse. Aufgrund dieser methodischen Unterschiede sind die verschiedenen Studien nur bedingt vergleichbar. Außerdem sind nicht alle Verfahren für eine gesundheitliche Bewertung der Exposition anhand der ICNIRP-Leitlinien geeignet.

Nur wenige Studien haben die gewichteten Spitzenwerte der EMF-Immissionen in Fahrzeugen ermittelt und mit den ICNIRP-Leitlinien verglichen (Vassilev et al. 2015, Karabetsos et al. 2014, Paniagua et al. 2017, Schmid et al. 2009). In den Studien wurden kaum technische Daten der untersuchten Fahrzeuge angegeben. Aus einzelnen Studien, die Motorleistungen und Batteriekapazitäten spezifizieren, kann aber geschlossen werden, dass diese Parameter kein verlässliches Indiz für die Höhe der Exposition in elektrisch betriebenen Fahrzeugen darstellen. In den zitierten Studien wurden Spitzenwerte von 20 % der ICNIRP-Referenzwerte (ICNIRP 2010) lokal im Fußbereich und über den Batterien beim Starten der Fahrzeuge gefunden. In einer Studie (Karabetsos et al. 2014) wurde ein Spitzenwert von etwa 80 % der ICNIRP-Referenzwerte (ICNIRP 1998) beim Abbremsen mittels Rekuperation gefunden. Die Exposition aufgrund der Rekuperation ist stark abhängig vom Batteriemanagement. Beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit traten meist nur geringe Expositionen von einigen Prozent des ICNIRP-Referenzwertes (ICNIRP 1998) auf. In einzelnen Studien wurden aber auch hier Expositionen bis etwa 20 % erreicht. Beim Fahren verschiebt sich das Spektrum geschwindigkeitsabhängig, was aufgrund der Frequenzabhängigkeit der Grenzwertempfehlungen bei einer spektralen Bewertung zu geschwindigkeitsabhängigen Expositionen führt. Bei einer Verdoppelung der Geschwindigkeit von 60 km/h auf 120 km/h steigt die Exposition

typischerweise um 50 %. Es ist zu berücksichtigen, dass die Unterschiede in den Grenzwertempfehlungen bei den hier typischen Spektren zu etwa 50 % niedrigeren Werten nach (ICNIRP 2010) im Vergleich zu (ICNIRP 1998) führen. Oftmals wird in den Studien nicht angegeben, nach welcher Empfehlung bewertet wurde.

Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren betrugen die Spitzenwerte in Studien, die die gleichen Testbedingungen für die Untersuchungen der unterschiedlichen Antriebskonzepte sichergestellt haben, etwa 10 % des ICNIRP-Referenzwertes (ICNIRP 1998) für die magnetische Feldstärke.

Anmerkung:

In einer Studie betrugen die lokalen Spitzenwerte in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ein Vielfaches der ICNIRP-Referenzwerte (Schmid et al. 2009), was nicht auf Komponenten des Antriebsstranges, sondern auf sonstige Quellen zurückzuführen war.

4.3 Gesetzliche Regelungen

Ob Automobile mit Elektroantrieb, die zur Aufladung am öffentlichen Stromnetz bestimmt sind, der Niederspannungsrichtlinie (EU 2014b) bzw. der 1. Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz (Verordnung über elektrische Betriebsmittel – 1. ProdSV) (ProdSV 2016) unterliegen, ist nicht eindeutig geklärt. Man muss derzeit davon ausgehen, dass in der Realität eine Anwendung nicht erfolgt. Die in der Niederspannungsrichtlinie bzw. der 1. ProdSV referenzierten EMF-Anforderungen finden damit hinsichtlich dieses Regelungsrahmens in der Realität keine Anwendung.

Automobile und ihre Komponenten unterliegen, jedenfalls grundsätzlich, der allgemeinen Produktsicherheit. Demnach könnten sich daraus abstrakte Anforderungen an die Sicherheit bzw. den Gesundheitsschutz ergeben. Diese sind jedoch nicht durch grundlegende Anforderungen untersetzt und werden nach Auskunft der zuständigen Behörden (z. B. Kraftfahrtbundesamt) in der Praxis nicht angewendet. In der Liste der harmonisierten Normen zur „Richtlinie über die allgemeine Produktsicherheit“ (EG 2001) finden sich keine Einträge zu Automobile oder EMF-Anforderungen; damit bleibt eine mögliche Ableitung von EMF-Anforderungen abstrakt.

Ungeklärt ist in diesem Zusammenhang auch, ob die Anwendung der allgemeinen Produktsicherheit in Bezug auf EMF bei Automobilen nicht durch das vermeintlich speziellere Typgenehmigungsverfahren verdrängt wird. Dieses ist grundsätzlich mit dem Anspruch gedacht, Gefährdungen für Sicherheit und Gesundheit abzudecken. Das Typgenehmigungsverfahren enthält aber weder eine abstrakte Anforderung an Sicherheit und Gesundheit, aus der EMF-Anforderungen abgeleitet werden könnten, noch ergeben sich aus den in Bezug genommenen Regelungen der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UNECE) materielle Anforderungen im EMF-Bereich.

Damit existieren aktuell keine verbindlichen Regelungen, die den Fahrzeugherstellern die Einhaltung bestimmter Vorgaben bezüglich EMF-Immissionen bei Kraftfahrzeugen vorschreiben. Die Strahlenschutzkommission empfiehlt dem BMU darauf hinzuwirken, solche Regelungen zu erstellen und zu etablieren.

4.4 Bewertung und Identifizierung von offenen Fragen

Aufgrund fehlender Standardisierung der Mess- und Bewertungsverfahren in den unterschiedlichen Studien sind die wenigen vorliegenden Daten nur bedingt vergleichbar. Trotzdem weisen sie darauf hin, dass die Gesamtbewertung der niederfrequenten Exposition in PKWs anhand

der frequenzabhängigen ICNIRP-Leitlinien, unabhängig vom Antriebskonzept, vergleichbar ist mit der Expositionsbewertung im Nahbereich von elektrischen Geräten im Alltag.

Es kann festgestellt werden, dass das technische Design der Fahrzeuge eine dominierende Rolle bezüglich der Exposition von Personen spielt. Neben den Komponenten des Antriebsstranges können auch Feldquellen außerhalb des eigentlichen Antriebsstranges zu lokal erheblichen Expositionen führen. Bezüglich der Feldimmission ist besonderes Augenmerk auf den Aufbau und die Platzierung der Batterie und der Hochspannungsverkabelung zu legen. Daneben sind aber auch Platzierung und Aufbau von anderen leistungsstarken Aggregaten (Klimaanlage, Lüftung, etc.) zu überprüfen. Bei entsprechender technischer Ausführung können Expositionswerte in PKWs (sowohl mit elektrischem Antrieb als auch mit Verbrennungsmotoren) weit unter den Referenzwerten der ICNIRP-Leitlinien erreicht werden.

Angesichts der zu erwartenden Expositionen durch magnetische Felder im Bereich des elektrischen Fahrens sowie der Tatsache, dass aktuell keine verbindlichen Regelungen hinsichtlich EMF-Immissionen zu existieren scheinen, empfiehlt die SSK dem BMU darauf hinzuwirken, dass folgende Aspekte umgesetzt werden:

– Es sollen verbindliche Strahlenschutzvorgaben etabliert werden, um die Einhaltung der Referenzwerte im für Personen zugänglichen Bereich von Kraftfahrzeugen sicherzustellen. Es sollen technische Normen bezüglich der Feldimmission im Kfz entwickelt werden, die als Grundlage für die Berücksichtigung dieses Themas im Rahmen der Typgenehmigung dienen können.

– Es sollen die Expositionen in den derzeit am Markt verfügbaren elektrisch betriebenen Fahrzeugmodellen in weiteren wissenschaftlich hochwertigen Studien unter standardisierten und reproduzierbaren Bedingungen ermittelt werden, um eine aktuelle, verlässliche gesundheitliche Bewertung der Expositionen in Zusammenhang mit dem elektrischen Fahren zu ermöglichen.

Obwohl hier nicht im Detail ausgeführt, sind diese Empfehlungen auf alle Fahrzeugtypen der Elektromobilität (z. B. E-Bikes, Roller, Motorräder, Transporter, LKW …) übertragbar.

5 Literatur

BEMFV 2002 — Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder vom 20. August 2002 (BGBl. I S. 3366), die zuletzt durch Artikel 3 Absatz 3 des Gesetzes vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1947) geändert worden ist

BImSchV 2013 — Sechsundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV). Verordnung über elektromagnetische Felder in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. August 2013 (BGBl. I S. 3266)

BNetzA 2009 — Bundesnetzagentur. Allgemeinzuteilung von Frequenzen für Funkanwendungen für intelligente Verkehrssysteme („Intelligent Transport Systems“, ITS). Verfügung 69/2009

BNetzA 2014 — Bundesnetzagentur. Allgemeinzuteilung von Frequenzen für Kraftfahrzeug - Kurzstreckenradare im Frequenzbereich 77 - 81 GHz. Verfügung 66/2014

BNetzA 2018 — Bundesnetzagentur. Allgemeinzuteilung von Frequenzen zur Nutzung durch Funkanwendungen mit geringer Reichweite für nicht näher spezifizierte Anwendungen; Non-specific Short Range Devices (SRD). Verfügung 5/2018

Bornkessel und Schubert 2013 — Bornkessel C, Schubert M. Elektromagnetische Felder in NRW, Feldmessungen im Umfeld von LTE-Mobilfunksendeanlagen. Abschlussbericht im Auftrag des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV). LANUV-Fachbericht 47, 2013. https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/30047.pdf, zuletzt aufgerufen am 21.05.2019

CharIN 2018 — Charging Interface Initiative e.V. (CharIN). Interoperable wireless power transfer (WPT). Industry Statement of Charging Interface Initiative e.V., 2018. https://www.charinev.org/fileadmin/Downloads/Papers_and_Regulations/CharIN_Industry_Statement_-_Wireless_Interoperable_Power_Transfer_v02.pdf, zuletzt aufgerufen am 21.05.2019

Clemens et al. 2018 — Clemens M, Zang M, Streckert J, Schmülling B, Alsayegh M. Simulation der Exposition des menschlichen Körpers durch magneto-quasistatische Felder von induktiven Ladesystemen in Automobilen. In: Garbe H (Hrsg.). Elektromagnetische Verträglichkeit emv: Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit: Düsseldorf, 20.-22.02.2018. Verlag Wissenschaftliche Scripten, ISBN 978-3957350770, S. 295-302

Cirimele 2017	Cirimele V. Design and integration of a dynamic IPT system for automotive applications. Doctoral Dissertation Politecnico di Torino. 2017, https://doi.org/10.6092/polito/porto/2666564
DMF 2018	Deutsches Mobilfunk-Forschungsprogramm (DMF), http://emf-forschungsprogramm.de, zuletzt aufgerufen am 06.11.2018
Dürrenberger et al. 2014	Dürrenberger G, Fröhlich J, Leuchtmann P. Wireless Power Transfer für Elektrofahrzeuge: Eine Literaturstudie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), 2014. https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/elektrosmog/fachinformationen/elektrosmog-quellen/weitere-anlagen-als-elektrosmog-quellen.html, zuletzt aufgerufen am 21.05.2019
EG 1999	Rat der Europäischen Union. Empfehlung 1999/519/EG des Rates der europäischen Union vom 12. Juni 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz bis 300 GHz), Amtsblatt der Europäischen Union, L 199/59, 30.07.1999
EG 2001	Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union. Richtlinie 2001/95/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 3. Dezember 2001 über die allgemeine Produktsicherheit. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L 11/4, 15.01.2002
EU 2014a	Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union. Richtlinie 2014/53/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. April 2014 über die Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Funkanlagen auf dem Markt und zur Aufhebung der Richtlinie 1999/5/EG. Amtsblatt der Europäischen Union, L 153/62, 22.05.2014
EU 2014b	Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union. Richtlinie 2014/35/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung elektrischer Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen auf dem Markt. Amtsblatt der Europäischen Union, L 96/357, 29.03.2014
FuAG 2017	Gesetz über die Bereitstellung von Funkanlagen auf dem Markt (Funkanlagengesetz - FuAG) vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1947)
ICNIRP 1998	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Phys. 1998 Apr;74(4):494-522, doi: 10.1097/HP.0b013e3181aff9db

ICNIRP 2010 — International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). Health Phys. 2010 Dec;99(6):818-36, doi: 10.1097/HP.0b013e3181f06c86

IZMF 2015 — Informationszentrum Mobilfunk e. V. (IZMF). 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, 2015. http://www.informationszentrum-mobilfunk.de/sites/default/files/medien/izmf_messbroschuere_2015_screen.pdf, zuletzt aufgerufen am 21.05.2019

Karabetsos et al. 2014 — Karabetsos E, Kalampaliki E, Koutounidis D. Testing Hybrid Technology Cars: Static and Extremely Low-Frequency Magnetic Field Measurements. IEEE Vehicular Technology Magazine. 2014;9(4):34-9, doi: 10.1109/MVT.2014.2360651

Keller 2017 — Keller H. The Weighted Peak Method in the Time Domain Compared With Alternative Methods for Assessing LF Electric and Magnetic Fields. Health Phys. 2017 Jul;113(1):54-65. doi: 10.1097/HP.0000000000000667

KIA 2018 — Kia Motors America. Wireless charging system developed on KIA SOUL EV. Oktober 2018. https://www.kiamedia.com/us/en/media/pressreleases/13849/wireless-charging-system-developed-on-kia-soul-ev, zuletzt aufgerufen am 21.05.2019

Kopacz et al. 2018 — Kopacz T, Schiessl S, Bornkessel C, Hein M, Heberling D. RF exposure in the vicinity of small cell base stations. Abstract in: The Joint Annual Meeting of the Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Association. BIOEM 2018:69. https://www.bems.org/sites/default/files/docs/meetings/BioEM2018_ProgramWebsite_20180917_0.pdf, zuletzt aufgerufen am 21.05.2019

Low und Ruddle 2013 — Low L, Ruddle AR. Investigation of human exposure due to unintended electromagnetic emissions in electric vehicles. 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). IEEE Conferences. 2013;1285-9 ISBN 978-1-4673-2187-7

Menzel und Wuschek 2018 — Menzel K, Wuschek M. Einfache Antennenmodelle zur Berechnung von Sicherheitsabständen an Small Cells im 5G-Netz. In: Garbe H (Hrsg.). Elektromagnetische Verträglichkeit emv: Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit: Düsseldorf, 20.-22.02.2018. Verlag Wissenschaftliche Scripten, ISBN 978-3957350770, S. 497-504

Milham et al. 1999	Milham S, Hatfield JB, Tell R. Magnetic fields from steel-belted radial tires: implications for epidemiologic studies. Bioelectromagnetics. 1999;20(7):440-5, doi:10.1002/(sici)1521-186x(199910)20:7<440::aid-bem5>3.0.co;2-x
Moreno-Torres Concha et al. 2013	Moreno-Torres Concha P, Lourd J, Lafoz M, Arribas JR. Evaluation of the Magnetic Field Generated by the Inverter of an Electric Vehicle. IEEE Transactions on Magnetics. 2013;49(2):837-44, doi: 10.1109/TMAG.2012.2214787
Moreno-Torres Concha et al. 2016	Moreno-Torres Concha P, Velez P, Lafoz M, Arribas JR. Passenger Exposure to Magnetic Fields due to the Batteries of an Electric Vehicle. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2016;65(6): 4564-71, doi:10.1109/tvt.2015.2490105
Paniagua et al. 2017	Paniagua JM, Rufo M, Jiménez A, Antolín A, Barberá J. Spectral analysis to assess exposure to extremely low frequency magnetic fields in cars. Sci Total Environ. 2017 Apr 15;584-585:875-81, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.134
Polchow 2017	Polchow Y. VW vernetzt Fahrzeuge ab 2019 serienmäßig. In: Media-Manufaktur GmbH. Website CarIT. Beitrag vom 29. Juni 2017. https://www.car-it.com/vw-vernetzt-fahrzeuge-ab-2019-serienmaessig/id-0051328, zuletzt aufgerufen am 21.05.2019
ProdSV 2016	Erste Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz (Verordnung über elektrische Betriebsmittel - 1. ProdSV). Verordnung über elektrische Betriebsmittel vom 17. März 2016 (BGBl. I S. 502)
Qualcomm 2011	Qualcomm Technologies Incorporated. Frequently Asked Questions – No fuss, just wireless. Wireless Charging for Electric Vehicles. https://www.qualcomm.com/media/documents/files/wireless-charging-for-electric-vehicles-faq.pdf, zuletzt aufgerufen am 21.05.2019
Qualcomm 2013	Qualcomm Technologies Incorporated. Compliance Assessment of Human Exposure from Wireless Electric Vehicle Charging (WEVC) System, 2013. www.qualcomm.com/media/documents/files/compliance-assessment-of-human-exposure-from-wireless-electric-vehicle-charging-wevc-system.pdf, zuletzt aufgerufen am 21.05.2019
Ritter 2017	Ritter HS. VW: Golf VIII erhält serienmäßig Car-to-X-Kommunikation. Autokiste.de. Beitrag vom 29.06.2017, http://www.autokiste.de/psg/1706/12203.htm, zuletzt aufgerufen am 21.05.2019

Ruddle et al. 2013 — Ruddle AR, Low L, Vassilev A. Evaluating low frequency magnetic field exposure from traction current transients in electric vehicles. International Symposium on Electromagnetic Compatibility. IEEE Conferences. 2013;78-83, ISBN 978-1-4673-4980-2

Ruddle und Low 2013 — Ruddle AR, Low L. Analysis of twisted cable options for reducing low frequency magnetic fields due to traction currents in vehicles with electric powertrains. International Symposium on Electromagnetic Compatibility. IEEE Conferences. 2013;449-54, ISBN 978-1-4673-4980-2

Schmid et al. 2005 — Schmid G, Lager D, Preiner P, Überbacher R, Neubauer G, Cecil S. Bestimmung der Exposition bei Verwendung kabelloser Übermittlungsverfahren in Haushalt und Büro. In: Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz. BMU-2005-669, 2005

Schmid et al. 2009 — Schmid G, Überbacher R, Cecil S, Petric B, Göth P. Bestimmung der Exposition durch Magnetfelder alternativer Antriebskonzepte: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 3608S04574. BfS-RESFOR-21/09, urn:nbn:de:0221-2009082182

SSK 2001 — Strahlenschutzkommission (SSK). Grenzwerte und Vorsorgemaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 173. Sitzung der SSK am 04.07.2001. Bekanntmachung im BAnz Nr. 224 vom 30.10.2001

SSK 2003 — Strahlenschutzkommission (SSK). Elektromagnetische Felder neuer Technologien - Statusbericht. Stellungnahme der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 188. Sitzung der SSK am 02./03.12.2003. Berichte der Strahlenschutzkommission, Heft 41, Elsevier Urban & Fischer, München, 2004, ISBN 3-437-22188-4

SSK 2007 — Strahlenschutzkommission (SSK). Grundsätze bei der Ableitung von Emissionsstandards bei gleichzeitig betriebenen Feldquellen. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 214. Sitzung der SSK am 23.02.2007. Bekanntmachung im BAnz Nr. 127 vom 12.07.2007

SSK 2011 — Strahlenschutzkommission (SSK). Biologische Auswirkungen des Mobilfunks – Gesamtschau –. Stellungnahme der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 250. Sitzung der SSK am 29./30.09.2011. Bekanntmachung im BAnz AT 12.06.2012 B5

SSK 2013 Strahlenschutzkommission (SSK). Elektromagnetische Felder neuer Technologien. Statusbericht der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 262. Sitzung der SSK am 11./12.07.2013. urn:nbn:de:101:1-20131111304. Bekanntmachung im BAnz AT 02.05.2014 B5

Stankowski et al. 2006 Stankowski S, Kessi A, Bécheiraz O, Meier-Engel K, Meier M. Low frequency magnetic fields induced by car tire magnetization. Health Phys. 2006;90(2):148-53, doi: 10.1097/01.hp.0000174526.10639.ff

Vassilev et al. 2015 Vassilev A, Ferber A, Wehrmann C, Pinaud O, Schilling M, Ruddle AR. Magnetic Field Exposure Assessment in Electric Vehicles. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2015;57(1):35-43, doi: 10.1109/TEMC.2014.2359687

Zahner et al. 2017 Zahner M, Fröhlich J, Dürrenberger G. Energieeffizienz und EMF-Immissionen von integrierten Induktionsladestationen. Schlussbericht. Bundesamt für Energie BFE, 2017. https://www.emf.ethz.ch/fileadmin/redaktion/public/downloads/3_angebot/wissensvermittlung/studien_fachartikel/Wireless_Charging.pdf, zuletzt aufgerufen am 21.05.2019

Zhang et al. 2018 Zhang K, Du L, Zhu Z, Song B, Xu D. A Normalization Method of Delimiting the Electromagnetic Hazard Region of a Wireless Power Transfer System. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2018;60(4):829-39, doi: 10.1109/TEMC.2017.2752300

6 Glossar

3GPP	**3rd Generation Partnership Project** 3GPP ist eine weltweite Kooperation von Standardisierungsgremien für die Standardisierung im Mobilfunk.
4G	**Vierte Generation der Mobilfunkkommunikation** Zu 4G zählt der Mobilfunkstandard Long-Term-Evolution-Advanced (LTE-A) mit Downlink-Datenraten bis etwa 1 Gbit/s.
5G	**Fünfte Generation der Mobilfunkkommunikation** mit geplanten Download-Datenraten bis zu 20 Gbit/s
5GAA	**5G Automotive Association** 5GAA ist eine internationale, globale, industrieübergreifende Organisation von Unternehmen aus den Bereichen Kraftfahrzeug- und Kommunikationsindustrie. Kernaufgabe der 5GAA ist die Arbeit an einer Standardisierung, wie sie für die Verwirklichung eines fahrerlosen Verkehrs erforderlich ist.
ACC	**Adaptive Cruise Control (Adaptive Geschwindigkeitsregelung).** ACC basiert auf einem Radarsystem und einer Geschwindigkeitsregelanlage. Sie passt die vom Fahrer gewählte Geschwindigkeit durch automatisches Bremsen und Beschleunigen dem vorausfahrenden Fahrzeug an.
ACS	**Anti Collision System (Kollisionsschutzsystem).** ACS basiert auf einem Radarsystem und einem automatischen Bremssystem. Es verhindert die Kollision mit einem vorausfahrenden Fahrzeug, z. B. am Stauende.
BEMFV	**Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder (BEMFV)**
26. BImSchV	**Sechsundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV)**
BNetzA	**Die Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen** Die BNetzA ist eine obere deutsche Bundesbehörde im Geschäftsbereich des Bundeswirtschaftsministeriums. Sie nimmt als Regulierungsbehörde im Bereich der Telekommunikation u. a. Aufgaben der Frequenzverwaltung wahr. Dabei fördert sie den Wettbewerb und stellt die Leistungsfähigkeit der Infrastrukturen sicher. Sie ist aber auch für Marktaufsicht bei Funkanlagen und im Hinblick auf die elektromagnetische Verträglichkeit sowie das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder von Funkanlagen (Erteilung der Standortbescheinigungen) zuständig.

C2X	**Car-to-Everything** C2X bezeichnet die Nachrichten- und Datenübermittlung von Fahrzeugen zu beliebigen damit vernetzten Objekten.
C-V2X	**Cellular-Vehicle to Everything** C-V2X bezeichnet ein Telematiksystem für das autonome und vernetzte Fahren auf Basis der Nutzung von Mobilfunknetzen.
Crowd Source	Datenbereitstellung durch eine Gruppe von Nutzern. Hier: Bereitstellung von Sensordaten eines Fahrzeugs, die allen anderen Fahrzeugen innerhalb der Funkreichweite zugänglich gemacht werden.
DMF	**Deutsches Mobilfunk-Forschungsprogramm** Das DMF wurde durch das Bundesumweltministerium (BMU) und das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) initiiert und umfasste 54 Forschungsvorhaben im Zeitraum von 2002 bis 2008 zum Thema "Mobilfunk".
EIRP	**Equivalent Isotropically Radiated Power (äquivalente isotrope Strahlungsleistung)** Die EIRP ist eine Rechengröße im Bereich der Antennentechnik, welche das Produkt aus der in eine Sendeantenne eingespeisten Leistung und dem Antennengewinn ausdrückt. Mit dem Antennengewinn werden die Richtwirkung und der Wirkungsgrad einer Antenne zusammengefasst.
eSIM	**embedded Subscriber Identity Module (eingebettetes Teilnehmer-Identitätsmodul)** Das eSIM ersetzt die klassische physische SIM-Karte für mobile Funkanwendungen. Es ist kleiner als SIM-Karten, direkt im Gerät verbaut und physisch nicht auswechselbar.
FM-CW-Radar	**Frequency-Modulated Continuous Wave-Radar (frequenzmoduliertes Dauerstrichradar)** FM-CW-Radar ist ein spezieller Typ von Radarsensor, der wie ein einfaches Dauerstrichradar (CW-Radar) ein kontinuierliches Sendesignal abstrahlt. Im Gegensatz zu diesem CW-Radar kann ein FM-CW-Radar seine Arbeitsfrequenz während der Messung ändern, das heißt, das Sendesignal wird in der Frequenz moduliert. Durch diese Änderungen in der Frequenz werden zusätzliche Messmöglichkeiten durch Laufzeitmessungen technisch ermöglicht.
FuAG	**Gesetz über die Bereitstellung von Funkanlagen auf dem Markt. (Funkanlagengesetz – FuAG)**

ICNIRP	**International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (Internationale Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung)** Die ICNIRP ist eine internationale Vereinigung von Wissenschaftlern, die durch die Analyse und Bewertung des Kenntnisstands zur gesundheitlichen Wirkung von elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern, optischer Strahlung und Laser sowie Infra- und Ultraschall zum Schutz des Menschen vor nichtionisierender Strahlung beiträgt. Als Ergebnisse ihrer Arbeit werden Grenzwertempfehlungen und Leitlinien veröffentlicht, die u. a. von der WHO anerkannt und der EU bei der Erstellung von Empfehlungen und Rechtsakten berücksichtigt werden.
ITS	**Intelligent Transportation Systems** ITS bezeichnet das Erfassen, Übermitteln, Verarbeiten und Nutzen verkehrsbezogener Daten mit dem Ziel der Organisation, Information und Lenkung des Verkehrs unter Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien.
ITS-G5	**Intelligent Transport Systems G5** ITS-G5 ist ein durch die europäische Norm ETSI EN 302 663 standardisiertes Telematiksystem für das autonome und vernetzte Fahren. Die Technologie arbeitet im 5 GHz-Funkband.
LRR	**Long Range Radar (Fernbereichsradar)** Mit LRR wird ein Radarsystem bezeichnet, das bis zu 200 m reicht und Geschwindigkeiten von 30 km/h bis 250 km/h erfassen kann.
LTE	**Long Term Evolution** LTE ist die Bezeichnung für einen Mobilfunkstandard der dritten Generation (3.9 G) mit Download-Datenraten bis zu mehreren Hundert Mbit/s. LTE wird aus Marketinggründen meist mit dem Label „4G“ versehen, was technisch nicht korrekt ist (vgl. entsprechenden Glossareintrag für „4G“).
Massive-MIMO	**Massive-Multiple Input Multiple Output** Massive-MIMO bezeichnet in mehreren Bereichen drahtloser Funktechnik ein Verfahren bzw. ein Übertragungs-System für die Nutzung mehrerer Sende- und Empfangsantennen zur drahtlosen Kommunikation. Massive-MIMO setzt ebenso wie das bereits verbreitet eingesetzte MIMO die Mehrwegeausbreitung von Signalen voraus (multipath propagation).
Network Slicing	Network Slicing ist eine Form der virtuellen Architektur von Kommunikationsnetzwerken, bei welchen der individuelle Bedarf an Datenraten, Geschwindigkeiten und Kapazitäten an die jeweiligen Anforderungen angepasst wird.

OBU	**On-Board Unit („Bordgerät“)** Englischer Begriff für elektronische Fahrzeugeinrichtungen, die meistens computerbasiert sind und wichtige interne Steuerfunktionen haben. Häufig wird eine funkbasierte Kommunikation mit anderen mobilen oder stationären Gegenstellen unterhalten.
PC5-Schnittstelle	Virtuelle Schnittstelle im LTE-Übertragungsprotokoll, welche im Verkehr die direkte Kommunikation zwischen vernetzten Endgeräten ermöglicht (z. B. zwischen Endgeräten in verschiedenen Fahrzeugen oder auch LTE-fähigen Smartphones von Fußgängern und Radfahrern). Die Migration zu 5G-Mobilfunkstandards ist bereits spezifiziert (vgl. Glossareintrag „Uu Schnittstelle“).
Platooning	Unter Platooning (von engl. Platoon für einen militärischen Zug), im Deutschen auch als „elektronische Deichsel“ bezeichnet, versteht man ein in der Entwicklung befindliches System für den Straßenverkehr, bei dem mehrere Fahrzeuge mit Hilfe eines technischen Steuerungssystems in sehr geringem Abstand hintereinander fahren können, ohne dass die Verkehrssicherheit beeinträchtigt wird.
Qi	Qi ist ein technischer Standard zur drahtlosen Energieübertragung mittels elektromagnetischer Induktion über kurze Distanzen. Der Standard gewährleistet die Interoperabilität bei induktiven Ladegeräten.
RMS	**Root Mean Square (quadratischer Mittelwert)** In der Elektrotechnik der quadratische Mittelwert einer zeitlich veränderlichen physikalischen Größe (= Effektivwert).
RSU	**Roadside Unit** Ein am Straßenrand installiertes lokales Kommunikationszentrum für den Datenaustausch zwischen der Verkehrsinfrastruktur und den Fahrzeugen.
SRD	**Short Range Device** Gerät mit geringer Funkreichweite für die Kurzstrecken-Sprach- oder Datenübertragung.
SRR	**Short Range Radar** Seitlich und nach hinten ausgerichtetes Radar am Fahrzeug zur Unterstützung der Fahrzeugsteuerung und als Kollisionsschutz.
SUV	**Sport Utility Vehicle („Geländelimousine“)** Ein SUV ist ein Personenkraftwagen mit viel Bodenfreiheit und meist Allradantrieb, dadurch mit erhöhter Geländegängigkeit. Die Karosserie ist an das Erscheinungsbild von Geländewagen angelehnt, der Fahrkomfort ähnelt jedoch dem einer Limousine.

Typgenehmigung Behördliche Bestätigung, dass ein serienmäßig in größerer Stückzahl hergestellter Typ gleichartiger Fahrzeuge oder Fahrzeugteile den jeweils zutreffenden technischen Vorschriften entspricht. Zuständig ist in Deutschland das Kraftfahrt-Bundesamt, gleichwertig sind jedoch auch EG-Typgenehmigungen aus anderen EU-Mitgliedsstaaten. Die technische Prüfung erfolgt dabei durch einen technischen Dienst. Die technischen Vorschriften sind in einzelnen EU-Verordnungen niedergelegt und entsprechen im Wesentlichen den sog. UNECE-Regelungen. Daher werden auch sog. ECE-Zulassungen von Staaten außerhalb der EU anerkannt, sofern sie dem UNECE-System beigetreten sind und daher auf vergleichbarer Grundlage prüfen (sog. ECE-Homologation).

UNECE **United Nations Economic Commission for Europe (Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen)**

URLCC **Ultra Reliable Low Latency Communication („hoch zuverlässige Kommunikation mit geringer Latenzzeit“)**
URLLC ist eine Dienstkategorie bei der 5G-Mobilfunk-kommunikation (vgl. Glossareintrag „5G“) mit geringer Latenzzeit. Es handelt sich um Dienste, die kürzeste Antwortzeiten (ca. 1 ms) und praktisch keinen Ausfall haben dürfen, wie z. B. bei Fahrassistenzsystemen, die automatisch Kraftfahrzeuge steuern.

Uu-Schnittstelle Die Uu-Schnittstelle ist die sogenannte „Luftschnittstelle“ in einem Mobilfunknetzwerk, die als einzige im Netzwerk immer drahtlos ist. Im hier verwendeten Sinn handelt es sich um die virtuelle Schnittstelle im LTE-Übertragungsprotokoll, welche im Verkehr die reguläre Kommunikation zwischen vernetzten Endgeräten und Basisstationen des Mobilfunknetzes ermöglicht (z. B. für Endgeräte in Fahrzeugen oder LTE-fähige Smartphones von Fußgängern und Radfahrern). Die Migration zu 5G-Mobilfunkstandards ist bereits spezifiziert (vgl. Glossareintrag „PC5-Schnittstelle“).

V2I **Vehicle-to-Infrastructure**
Kommunikation von Komponenten in Fahrzeugen zu Infrastrukturkomponeneten

V2N **Vehicle-to-Network:**
Kommunikation zwischen Komponenten in Fahrzeugen und dem Mobilfunknetz

V2P **Vehicle-to-Pedestrian**
Kommunikation zwischen Komponenten in Fahrzeugen und mobilen Endgeräten von Fußgängern

V2V **Vehicle-to-Vehicle**
Kommunikation zwischen Komponenten in verschiedenen Fahrzeugen

V2X	**Vehicle-to-Everything** Kommunikation zwischen Komponenten in Fahrzeugen mit allen mobilen und stationären Komponenten, die unter „V2V“, „V2I“, „V2N“ und „V2P“ erwähnt sind (vgl. entsprechende Glossareinträge)
Wearable Device	Kleiner, vernetzter Computer, der am Körper getragen wird und den Alltag des Trägers unterstützen soll
Weighted peak	Gewichteter Spitzenwert: Z. B. wird in der EU-Richtlinie 2013/35/EU die „Methode der gewichteten Spitzenwerte“ (weighted peak method) zur Beurteilung nicht sinusförmiger Felder im Niederfrequenzbereich empfohlen.
Wireless LAN	**Wireless Local Area Network (Drahtloses lokales Funknetz)** WLAN arbeitet in den Funkfrequenzbändern 2,4 GHz, 5 GHz und 60 GHz (geplant).

Anhang

Tab. A1: Zusammenfassung der wichtigsten technischen Parameter der in diesen Empfehlungen diskutierten Technologien Funkanwendungen, induktives Laden und elektrisches Fahren

Technologiebereich	Emissionsquelle	Frequenzbereich	Sendeleistung / EIRP / übertragene Leistung	Entfernung zu Personen
Funkanwendungen, vernetzte Fahrzeuge	ITS On-Board Units	5 855 MHz – 5 925 MHz	max. 26 dBm (400 mW) Sendeleistung max. 33 dBm (2 W) EIRP	körpernah zu Insassen, körperfern zu Passanten, Körperkontakt bei „wearable devices“ (V2P)
	ITS Roadside Units	5 855 MHz – 5 925 MHz	max. 26 dBm (400 mW) Sendeleistung max. 33 dBm (2 W) EIRP	i.d.R. körperfern
	4G, 5G Mobilfunk-Basisstationen inkl. Kleinzellen	700 MHz – 3,8 GHz	typ. 20-50 W Kanalsendeleistung für Dach- und Mastinstallation, < 10 W EIRP für Kleinzellen	körperfern, bei Kleinzellen auch körpernah
Funkanwendungen, weitere HF-Quellen am/im Fahrzeug	Kfz-Radarmodule	77 GHz, 24 GHz, 96 GHz	typ. 0,1 W – 1 W EIRP für Long Range Radar (LRR), 0,01 W – 0,2 W EIRP für Side Rear Radar (SRR)	körpernah zu Insassen, körperfern, körpernah und Körperkontakt zu Passanten
	Keyless Access	125 kHz im Fahrzeug, 434 MHz im Schlüssel	max. einige 10 mW Sendeleistung	körpernah zu Insassen, körperfern zu Passanten
	Bluetooth-Freisprecheinrichtungen	2 400 MHz – 2 483,5 MHz	max. 10 mW EIRP	körpernah zu Insassen, körperfern zu Passanten
	WLAN-Router	2,4 GHz – 2,5 GHz, 5 GHz	100 / 200 mW EIRP	körpernah zu Insassen, körperfern zu Passanten
	kabelloses Laden von Smartphones	110 kHz – 205 kHz	5 W – 15 W übertragene Leistung	körpernah zu Insassen, körperfern zu Passanten

Technologiebereich	Emissionsquelle	Frequenzbereich	Sendeleistung / EIRP / übertragene Leistung	Entfernung zu Personen
Induktives Laden von Elektrofahrzeugen	induktive Ladeeinrichtungen von außen zum Fahrzeug	20 kHz – 150 kHz	3 kW – 22 kW übertragene Leistung, bei Bussen bis 200 kW	körpernah zu Anwender, körperfern zu Passanten
Elektrisches Fahren	Batterie	überwiegend 0 Hz, bei Schaltprozessen bis einige Hz	1 kW – 30 kW übertragene Leistung	körpernah zu Insassen, körperfern zu Passanten
	Motor inkl. Konverter und Verkabelung	Frequenzen bis einige 100 kHz, Oberwellen bis MHz	1 kW – 30 kW übertragene Leistung	körpernah zu Insassen, körperfern zu Passanten

Die *Sendeleistung* kennzeichnet die von einer Funkanlage insgesamt abgestrahlte Leistung.

Die *EIRP* kennzeichnet die äquivalente isotrope Strahlungsleistung und bezieht neben der Sendeleistung auch den Antennengewinn ein.

Die *übertragene* Leistung kennzeichnet die in einem induktiven Ladensystem von der Primärspule zur Sekundärspule übertragene Leistung.

Körperfern: Hierunter sind HF-Quellen zu verstehen, die körperfern in Abständen betrieben werden, bei denen Fernfeld-Näherungen für die Berechnungen der auf den Körper wirkenden Felder zum Einsatz kommen können, wie z. B. Mobilfunk-Basisstationen oder Rundfunk- und Fernsehsendeanlagen.

Körpernah: Hierunter sind HF-Quellen zu verstehen, die typischerweise in Abständen von Zentimetern bis Dezimetern zum menschlichen Körper betrieben werden, wie z. B. ein Notebook auf dem Schreibtisch mit Funkschnittstelle, ein WLAN-Router auf oder unter dem Schreibtisch oder eine Basisstation für ein DECT-Schnurlostelefon in Griffweite.