

Magnetische Felder bei der Elektromobilität

Magnetic fields in Electromobility

Dirk Geschwentner, Dr. Martin Zang

Kontakt

Dirk Geschwentner | Kompetenzzentrum EMF | Bundesamt für Strahlenschutz |
Willy-Brandt-Str. 5 | 38226 Salzgitter | E-Mail: dgeschwentner@bfs.de

Zusammenfassung

In konventionell und (hybrid-)elektrisch angetriebenen Fahrzeugen treten Magnetfelder auf. Wenn Menschen nieder- und zwischenfrequenten Magnetfeldern ausgesetzt sind (Magnetfeldexposition), können Stimulations- und Reizwirkungen von Nerven- und Muskelgewebe auftreten. Das kann durch die Einhaltung empfohlener Expositionshöchstwerte vermieden werden. In einer vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) in Auftrag gegebenen Studie aus 2025 traten bei keiner der untersuchten Fahr- und Ladesituationen gesundheitlich bedenkliche Magnetfeldexpositionen auf. Allerdings wurden in einigen Fällen – lokal und zeitlich begrenzt – vergleichsweise starke Magnetfelder festgestellt. Die Felder sind räumlich ungleichmäßig verteilt und werden hauptsächlich durch den Betriebszustand und das Design des Fahrzeugs beeinflusst. Durch konstruktive Maßnahmen an Fahrzeugen und Ladeeinrichtungen lassen sich Magnetfeldexpositionen reduzieren. Bewertungsverfahren in technischen Normen müssen weiter optimiert werden.

Abstract

Magnetic fields occur in conventional and (hybrid) electric vehicles. When humans are exposed to low-frequency and intermediate-frequency magnetic fields (magnetic field exposure), stimulation and irritation of nerve and muscle tissue may occur. This can be avoided by adhering to recommended exposure restrictions. In a study commissioned by the German Federal Office for Radiation Protection (BfS) from 2025, no health-threatening magnetic field exposures were observed in any of the driving and charging situations examined. However, in some cases – locally and temporarily limited – comparatively strong magnetic fields were detected. The field distributions are non-uniform and are mainly determined by the operating condition and the design of the vehicle. Magnetic field exposures can be reduced through design measures on vehicles and charging equipment. Assessment procedures in technical standardisation documents should be further improved.





Quelle: vladim_ka/stock.adobe.com

Hintergrund

Die Elektromobilität gilt als Schlüssel für eine klimafreundliche Mobilität. In Verbindung mit regenerativ erzeugtem Strom können Elektrofahrzeuge maßgeblich zur Reduktion der CO₂-Emissionen des Verkehrssektors beitragen. Während Verbrennungsmotoren neben CO₂ weitere Schadstoffe wie zum Beispiel Stickoxide emittieren, arbeiten Elektromotoren lokal weitgehend schadstoffemissionsfrei und leise. Dadurch können sie zum Beispiel in Städten zur Verbesserung der Luftqualität und zur Verringerung verkehrsbedingter Lärmbelastungen beitragen. Emissionen entstehen bei der Elektromobilität vor allem in Form von Magnetfeldern, die von dem elektrifizierten Antriebsstrang eines Fahrzeugs ausgehen und denen die Insassinnen und Insassen ausgesetzt sein können (Magnetfeldexposition). Wegen des geringen Abstands der Fahrzeugsitze zu den Magnetfelder erzeugenden Komponenten des Antriebssystems und wegen der erwartbar hohen Stromstärken vor allem in leistungsstarken Fahrzeugen sind Expositionen in einer für den Gesundheitsschutz relevanten Größenordnung nicht von vornherein auszuschließen. Darüber hinaus können Magnetfeldexpositionen bei rein batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) und bei Plug-In-Hybriden (PHEV) auch im Fahrzeugstillstand während des Ladevorgangs auftreten. In jenem Fall sind hohe Ströme in den elektrischen Komponenten der Ladeinfrastruktur und zum Beispiel die Hochvoltleitungen der Fahrzeuge Ausgangspunkte der Magnetfelder. Perspektivisch sind auch Verfahren für berührungslose Ladevorgänge zu erwarten, die mit Magnetfeldexpositionen verbunden sein können.

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hat die Exposition von Personen gegenüber nieder- und zwischenfrequenten Magnetfeldern bereits im Jahr 2008 in einem Forschungsvorhaben untersuchen lassen (BfS, 2009). Untersuchungsgegenstand waren damals auf dem deutschen Markt verfügbare Elektro- und Hybridfahrzeuge. In der Zwischenzeit hat sich die Fahrzeugtechnik weiterentwickelt. Um einen aktuellen und repräsentativen Überblick über die Magnetfeldexposition der Allgemeinbevölkerung durch Fahrzeuge mit elektrischen Antriebssystemen sowie durch die Ladeinfrastruktur zu erlangen, wurden in einem 2025 abgeschlossenen Forschungsvorhaben (BfS, 2025) umfangreiche systematische Magnetfeldmessungen an einer Auswahl von aktuellen ein- und zweispurigen Personenkraftfahrzeugen mit Elektroantrieb während des Fahrens sowie während des Ladens an unterschiedlichen Ladepunkten durchgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieses Vorhabens vorgestellt und eingeordnet.


Grundlagen

Magnetfelder entstehen überall dort, wo elektrische Ströme fließen. Die Stärke eines Magnetfeldes wird üblicherweise in Tesla angegeben (Maßeinheit der magnetischen Flussdichte). In diesem Beitrag betrachten wir magnetische Wechselfelder, deren Momentanwerte mit Frequenzen von bis zu etwa 100 Kilohertz zeitlich variieren. Hertz (Hz) ist die Maßeinheit der Frequenz, also die Zahl der Schwingungen pro Sekunde. Zeitlich veränderliche Felder mit Frequenzen bis etwa 100 kHz werden im Strahlenschutz dem Nieder- und Zwischenfrequenzbereich zugeordnet. Hochfrequente elektromagnetische Felder mit Frequenzen von zum Teil deutlich mehr als 100 kHz, die im Automobilsektor und in anderen Bereichen für Anwendungen wie Radar oder Funkkommunikation genutzt werden, sind ebenso nicht Gegenstand dieses Artikels wie von Fahrzeugkomponenten ausgehende und auf den menschlichen Körper einwirkende elektrische Felder.

Magnetfeldexposition bezeichnet den Umstand, dass eine Person einem Magnetfeld ausgesetzt ist. Nieder- und zwischenfrequente Magnetfelder dringen nahezu ungehindert in biologisches Gewebe und somit in den menschlichen Körper ein. Dem physikalischen Phänomen der elektromagnetischen Induktion gehorchend, rufen sie dort elektrische Felder und Ströme hervor, die sich den körpereigenen Feldern und Strömen überlagern. Die körpereigenen Felder und Ströme rühren her von natürlichen biologischen Prozessen wie zum Beispiel der Reizweiterleitung in Nervenfasern. Überschreiten die im Körper zusätzlich hervorgerufenen elektrischen Feldstärken und Stromdichten bestimmte frequenzabhängige Schwellen, können Nerven- und Muskelgewebszellen stimuliert werden. Dieser Wirkmechanismus ist wissenschaftlich gut belegt (Reilly, 1998; 2002). Die Einhaltung von zum Schutz der Gesundheit empfohlenen Höchstwerten für die im Körper induzierten Felder und Stromdichten verhindert, dass die Schwellen erreicht werden und es zu unerwünschten Stimulationswirkungen kommt. Die empfohlenen Höchstwerte werden Basiswerte genannt (ICNIRP, 1998; 2010; EU-Rat, 1999). Bei der Herleitung der Basiswerte wurden Reduktionsfaktoren berücksichtigt, damit die Schwellen auch unter Berücksichtigung von Unsicherheiten in der wissenschaftlichen Datenlage sowie von anzunehmenden inter-individuellen Empfindlichkeitsunterschieden in den verschiedenen Bevölkerungsgruppen, aus denen sich die Gesamtbevölkerung zusammensetzt, nicht erreicht werden, solange die Basiswerte eingehalten sind.

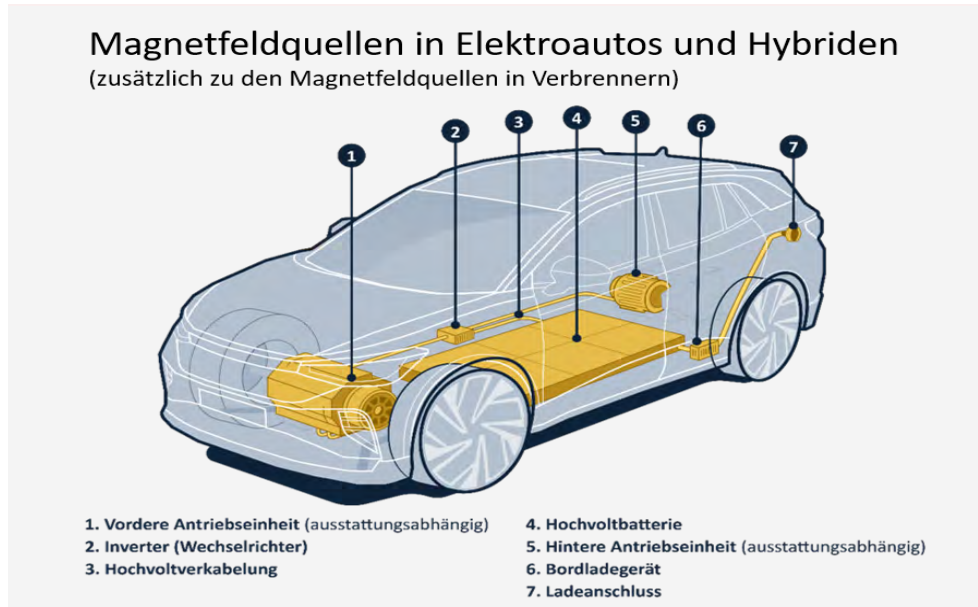
Für die Bewertung der Strahlenschutzrelevanz einer Magnetfeldexpositionssituation wird üblicherweise zunächst die vergleichsweise einfach außerhalb des Körpers messbare magnetische Flussdichte mit sogenannten Referenzwerten verglichen. Wenn die Referenzwerte außerhalb des Körpers eingehalten sind, kann von der Einhaltung der Basiswerte im Körper ausgegangen werden. Die Referenzwerte wurden konservativ aus den Basiswerten für im Körper induzierte elektrische Stromdichten (ICNIRP, 1998) oder Feldstärken (ICNIRP, 2010) abgeleitet. Zugrunde gelegt wurde dabei eine maximale Kopplung zwischen Magnetfeld und Körper. In Fällen, in denen ein von den Basiswerten abgeleiteter Referenzwert überschritten ist, bedeutet dies daher nicht unbedingt eine gesundheitliche Gefährdung. Ein Vergleich der im Körper hervorgerufenen elektrischen Felder und Stromdichten mit den unmittelbar auf den Erkenntnissen zu gesundheitsrelevanten Wirkungen beruhenden und zum Schutz der Gesundheit empfohlenen Basiswerten ist in solchen Fällen jedoch in der Regel erforderlich, um eine Situation verlässlich zu bewerten. Da Felder und Stromdichten im menschlichen Körper nicht gemessen werden können, kommen in solchen Fällen zumeist Computersimulationen mit Modellen des menschlichen Körpers zum Einsatz. Werden die Basiswerte eingehalten, sind nach aktuellem wissenschaftlichem Kenntnisstand keine gesundheitsrelevanten Wirkungen zu erwarten. Vereinzelt Hinweise auf mögliche Langzeitwirkungen von niederfrequenten Magnetfeldern bei niedrigen Expositionen sind für das BfS und andere mit dem Strahlenschutz befasste Stellen Anlass für Maßnahmen, zu denen die Initiierung und Förderung weiterer Wirkungsforschung ebenso zählt wie zum Beispiel die Empfehlung, Expositionen grundsätzlich gering zu halten. Die Empfehlungen des BfS zu niederfrequenten Feldern sind auf <https://www.bfs.de/DE/themen/emf/nff/schutz/vorsorge/vorsorge.html> veröffentlicht.

Magnetfeldquellen in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen

Zu den relevanten Magnetfeldquellen zählen der elektrische Antriebsstrang mit der zugehörigen Leistungselektronik, die Hochvoltleitungen sowie die Fahrzeugbatterie; beim Laden kommen Ladeeinrichtung und Ladekabel hinzu. Typische Positionen dieser Magnetfeldquellen in einem (hybrid-)elektrischen Fahrzeug sind in  **Abbildung 1** dargestellt. Welche Quellen in einer konkreten Expositionssituation den größten Beitrag zur Exposition leisten, hängt vom technischen Design des Fahrzeugs und/oder der Ladeeinrichtung ab – zum Beispiel von der Position relevanter Bauteile im Fahrzeug – sowie vom jeweiligen Betriebszustand. Insbesondere beim Ladevorgang können Personen Magnetfeldern auch außerhalb des Fahrzeugs ausgesetzt sein.

Unabhängig vom Antriebssystem eines Fahrzeugs gibt es in modernen Automobilen weitere Quellen magnetischer Felder. Dazu zählen Aggregate des Bordnetzes oder für Komfortfunktionen wie Klimaanlage und Lüfter, Sitzheizungen und Fensterheber. Quellen dieser Art können auch bei Fahrzeugstillstand Felder erzeugen und zur Exposition beitragen. Sie sind in Fahrzeugen mit Elektroantrieb ebenso zu finden wie in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor.

Abbildung 1: Typische Anordnung von Magnetfeldquellen in (hybrid-)elektrischen Fahrzeugen (zusätzlich zu den Quellen in Verbrennern).



Quelle: https://www.bfs.de/DE/themen/emf/e-mobilitaet/e-mobilitaet_node.html

Wie stark sind Menschen den Feldern ausgesetzt?

Die in diesem Abschnitt dargestellten Ergebnisse beruhen auf einer vom BfS in Auftrag gegebenen Studie, die federführend von der Seibersdorf Labor GmbH (Österreich) durchgeführt und 2025 abgeschlossen wurde. In dieser Studie wurden die in den Fahrzeuginnenräumen sowie beim Laden zusätzlich auch im unmittelbaren Umfeld der Fahrzeuge auftretenden Magnetfelder systematisch vermessen und bewertet. Die Untersuchung wurde unabhängig durchgeführt, Fahrzeughersteller waren nicht beteiligt. Für die Untersuchung wurden Elektrofahrzeuge verschiedener deutscher und ausländischer Hersteller ausgewählt, die in Deutschland gemessen an den Zulassungszahlen (Stand: Ende 2021) besonders verbreitet sind, sowie zusätzlich leistungsstarke Modelle. Erstmals wurden auch einspurige Fahrzeuge wie Elektromotorräder und -roller miteinbezogen, jedoch keine als Fahrräder eingestuftene Fahrzeuge. Zum Vergleich wurde ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor untersucht. Insgesamt wurden vierzehn Pkw sowie vier Zweiräder, allesamt aus den Baujahren 2019 bis 2022, in die Untersuchung einbezogen.

Messmethodik

Die Messungen erfolgten sowohl auf Rollenprüfständen als auch auf einer abgesperrten Versuchsstrecke und unter realen Bedingungen im Straßenverkehr. Auf der Versuchsstrecke und den Rollenprüfständen wurden definierte Betriebszustände untersucht, das heißt Beschleunigen, Bremsen und Fahren mit gleichbleibender Geschwindigkeit. Der Moment der Fahrzeugeinschaltung oder die Aktivierung von Komfortfunktionen wie zum Beispiel Sitzheizungen wurde gesondert erfasst. Im Innenraum wurde an ausgewählten vorderen und hinteren Sitzplätzen gemessen, wobei bis zu zehn Messsonden vom Fußraum bis zur Höhe der Kopfstützen verteilt wurden, um die räumliche Variation der Felder über den typischen Dimensionen eines menschlichen Körpers in einem Messdurchgang erfassen zu können. Beim Laden wurde Wechselstrom(AC)-Normalladen und

Gleichstrom(DC)-Schnellladen einbezogen; gemessen wurde an Positionen innerhalb und außerhalb der Fahrzeuge sowie im unmittelbaren Umfeld der Ladepunkte und an den Ladekabeln.

Messergebnisse

Die magnetischen Feldstärken im Fahrzeuginnenraum sind räumlich ungleichmäßig verteilt. Häufig traten im Fußraum vor den Vordersitzen die höchsten magnetischen Flussdichten auf, während auf Kopf- und Oberkörperhöhe oder an anderen Sitzplätzen geringere Werte gemessen wurden. Entsprechend variiert die Exposition der Fahrzeuginsassinnen und Fahrzeuginsassen je nach Sitzplatz im Fahrzeug und lokal über die verschiedenen Körperregionen.

Die Höhe der magnetischen Flussdichte hängt zudem deutlich vom Betriebszustand der Fahrzeuge ab: Im Fahrbetrieb treten beim Beschleunigen und Bremsen in der Regel höhere Werte auf als während des Fahrens mit gleichbleibender Geschwindigkeit. Beim Laden variiert die magnetische Flussdichte sowohl im Fahrzeuginnenraum als auch im unmittelbaren Umfeld des Ladepunkts je nach Ladesituation und Betriebszustand der Ladeeinrichtung sowie in Abhängigkeit von der Position im und am Fahrzeug. Kurzzeitige Expositionsspitzenwerte können im Moment der Fahrzeugeinschaltung und bei Lastwechseln, zum Beispiel beim Übergang von Beschleunigen zum Bremsen oder umgekehrt beobachtet werden.

Expositionsbewertung und Ergebnisse

Für die Expositionsbewertung wurden die Messwerte den entsprechenden Referenzwerten für die Allgemeinbevölkerung gegenübergestellt. Mit lediglich einer Ausnahme wurden die Referenzwerte der EU-Ratsempfehlung (EU-Rat, 1999) in allen Fahrzeugen lokal und/oder kurzzeitig in mindestens einem Betriebszustand überschritten. Die Referenzwerte der in Europa für den Gesundheitsschutz der Allgemeinbevölkerung relevanten EU-Ratsempfehlung entsprechen den von der ICNIRP im Jahr 1998 veröffentlichten Referenzwerten (ICNIRP, 1998). Auch in dem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor wurden die Referenzwerte überschritten. Die 2010 veröffentlichten, auf aktuelleren Erkenntnissen beruhenden Referenzwerte (ICNIRP, 2010) wurden seltener überschritten. In Fällen, in denen die Referenzwerte besonders weit überschritten waren, wurden in der Studie zusätzlich die durch die Magnetfelder in einem exponierten Körper hervorgerufenen elektrischen Felder und Stromdichten mittels Computersimulationen bestimmt und den jeweiligen Basiswerten gegenübergestellt. Die Basiswerte waren in keinem Fall überschritten, so dass nach aktuellem wissenschaftlichem Kenntnisstand nicht mit gesundheitsrelevanten Wirkungen zu rechnen ist.

Wie stark Personen in Fahrzeugen mit rein elektrischem oder hybrid-elektrischem Antrieb den magnetischen Feldern des jeweiligen Antriebssystems ausgesetzt sind, hängt mehr vom persönlichen Fahrstil als von der maximalen Motorleistung eines Fahrzeugs ab. So wurden die Referenzwerte bei moderater Fahrweise in der Regel nur im niedrigen zweistelligen Prozentbereich ausgeschöpft, während bei „sportlicher“ Fahrweise höhere Werte und kurzzeitig und räumlich begrenzt auch Überschreitungen der Referenzwerte in mehreren der untersuchten Elektrofahrzeuge auftraten. Die angegebene maximale Motorleistung eines Fahrzeugs erwies sich hingegen als schlechter Prädiktor für die zu erwartenden Expositionen. Während des Ein- oder Ausschaltens wurden in vielen Fahrzeugen,

einschließlich in dem zu Vergleichszwecken untersuchten Fahrzeug mit Verbrennungsmotor, die insgesamt jeweils höchsten Expositionswerte ermittelt.

Der Umstand, dass die Messwerte der magnetischen Flussdichte zwischen den untersuchten Fahrzeugmodellen erheblich variierten, deutet darauf hin, dass einige Hersteller bestehende Minimierungspotenziale offenbar noch nicht konsequent ausnutzen. Beobachtete Differenzen in den Messwerten zwischen den verschiedenen Modellen können zumindest teilweise auf technische Konstruktionsdetails zurückgeführt werden, zum Beispiel auf die Positionen der relevanten elektrischen Komponenten im Fahrzeug und den Verlauf der Kabel.

Empfehlungen für die Weiterentwicklung des Strahlenschutzes

Die Höhe der Magnetfeldexposition lässt sich durch das technische Design von Fahrzeug und Ladeeinrichtung beeinflussen. Lokale Spitzen der magnetischen Flussdichte können durch die Positionierung relevanter Bauteile (Batterie, Leitungen, Leistungselektronik) und eine geeignete Führung der Leitungen begrenzt werden. Weniger steile Stromspitzen bei Lastwechseln im Fahrbetrieb sowie bei Ein- und Ausschaltvorgängen verringern kurzzeitige Expositionsspitzen in den Fahrzeugen.

Die derzeit im Automobilssektor angewandten Verfahren zur Expositionsbewertung sollten so weiterentwickelt werden, dass kurzzeitige und räumlich begrenzte Magnetfeldspitzen sowie kombinierte Einwirkungen mehrerer Quellen (Antriebsstrang, Bordnetz-/Komfortfunktionen, Laden) zuverlässig erfasst und bewertet werden. Im Rahmen eines einheitlichen Prüfprogramms sollten Messungen an typischen Sitzplätzen und weiteren Innenraumpositionen bei definierten Fahrzuständen (Beschleunigen, Bremsen, gleichbleibende Geschwindigkeit) sowie während des Ladevorgangs – im Fahrzeuginnenraum und im unmittelbaren Umfeld des Ladepunkts – durchgeführt werden. Die getesteten Szenarien müssen sich an den vernünftigerweise erwartbaren Gebrauchsbedingungen der Fahrzeuge und Ladeeinrichtungen orientieren und vor allem solche Situationen berücksichtigen, in denen hohe Expositionen zu erwarten sind, wie zum Beispiel starke Beschleunigungsphasen. Bei lokalen oder kurzzeitigen Überschreitungen von Referenzwerten ist ergänzend eine dosimetrische Nachprüfung in geeigneten Körperrückbildungen vorzunehmen. Maßgeblich sind dabei die empfohlenen Expositionshöchstwerte (Basiswerte). Regelmäßige Überprüfungen der Verfahren stellen sicher, dass technische Entwicklungen angemessen berücksichtigt werden. [BfS] ●

Literatur

- [1] BfS – Bundesamt für Strahlenschutz. (2025). Bestimmung von Expositionen gegenüber elektromagnetischen Feldern der Elektromobilität. Vorhaben 3620S82473. Ergebnisbericht – Teil 1: Elektromagnetische Felder beim Fahren. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0221-2025031250843>; Ergebnisbericht – Teil 2: Elektromagnetische Felder beim Laden. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-2025112157059>.
- [2] BfS – Bundesamt für Strahlenschutz. (2009). Bestimmung der Exposition durch Magnetfelder alternativer Antriebskonzepte – Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben. Vorhaben 3608S04574; SL-LE-0004/09. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-2009082182>

- [3] EU-Rat – Rat der Europäischen Union. (1999). Empfehlung des Rates zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz – 300 GHz) (1999/519/EG). In: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L 199 vom 30.07.1999.
- [4] ICNIRP – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (2010). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Physics*, 99(6), 818–836.
- [5] ICNIRP – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (1998). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics* 74 (4): 494–522.
- [6] Reilly, J. P. (2002). Neuroelectric mechanisms applied to low frequency electric and magnetic field exposure guidelines—part I: sinusoidal waveforms. *Health Physics*, 83(3), 341–355.
- [7] Reilly, J. P. (1998). *Applied bioelectricity: from electrical stimulation to electropathology*. Springer.