



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Energieforschung

Schlussbericht

Energieeffizienz und EMF-Immissionen von integrierten Induktionsladestationen



FSM – Forschungsstiftung
Strom und Mobilkommunikation
FSM – Swiss Research Foundation for
Electricity and Mobile Communication

Datum: 04.01.2017

Ort: Zürich

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien & -anwendungen
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

Bundesamt für Umwelt BAFU
Sektion Nichtionisierende Strahlung NIS
CH-3003 Bern

Auftragnehmer/in:

FSM – Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation
c/o ETH Zürich
Gloriastr. 35
CH-8092 Zürich
www.emf.ethz.ch

Autoren:

Marco Zahner, Fields at Work GmbH, marco.zahner@fieldsatwork.ch
Dr. Jürg Fröhlich, Fields at Work GmbH, juerg.froehlich@fieldsatwork.ch
Dr. Gregor Dürrenberger, FSM, gregor@emf.ethz.ch

BFE-Bereichsleitung:	Dr. Michael Moser, michael.moser@bfe.admin.ch
BFE-Programmleitung:	Roland Brüniger, roland.brueeniger@r-brueniger-ag.ch
BFE-Vertragsnummer:	SI/501312-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Zusammenfassung

Für den vorliegenden Bericht wurden drahtlose, induktive Ladestationen für elektronische Kleingeräte auf ihren Energieverbrauch und ihre EMF-Emissionen hin untersucht. Zwei technische Standards existieren, Qi und AirFuel. Der erste ist marktbeherrschend. Drahtloses Aufladen benötigt mehr Energie als vergleichbares kabelgebundenes Laden. Während des aktiven Ladebetriebs liegt die Energieeffizienz von der Steckdose bis zum Lademodul des Endgerätes im Bereich von 50-60 %, bei kabelgebundenem Laden bei ca. 75 %. Im Stand-by Betrieb konsumieren drahtlose Ladestationen mehr Energie als steckengelassene Netzadapter. Besonders hoch ist der Verbrauch, wenn das Endgerät nach erfolgter Aufladung auf der Konsole liegen gelassen wird. Im worst-case wird mehr für den Stand-by Betrieb als für das Aufladen der Batterie benötigt. Bei angenommener 100 %iger Durchdringung der Technologie im Haushaltsbereich belief sich der jährliche Strommehrverbrauch von drahtlosem im Vergleich zu konventionellem Laden auf etwa 30 GWh. Das entspricht einem oder einigen wenigen Promille des jährlichen Stromverbrauchs der Schweizer Haushalte. Betreffend EMF-Emissionen wurden Messungen und Simulationen durchgeführt. Die Spitzen- und rms Feldstärken an der Oberfläche des Ladegeräts können im Qi-Standard im Stand-by Betrieb einige 100 μT betragen. Zur gesundheitlichen Beurteilung dieser Magnetfeldexpositionen müssen die Basisgrenzwerte konsultiert werden. Dazu wurden die im Gewebe induzierten Ströme numerisch modelliert. Die Resultate zeigen, dass die Basisgrenzwerte bei weitem nicht überschritten werden: betreffend Energieabsorption (SAR) liegen sie einen Faktor 1'000, betreffend elektrischer Feldstärke im Gewebe einen Faktor 500 darunter. Aus gesundheitlicher Sicht sind die Anlagen deshalb unbedenklich.

Résumé

Ce rapport présente des résultats d'une étude sur la consommation d'énergie et les émissions électromagnétiques des systèmes de charge sans fil pour les appareils électroniques comme les téléphones mobiles. Deux normes techniques existent pour le transfert d'énergie sans fil (WPT): Qi et AirFuel, Qi est le leader actuel du marché. La charge par WPT consomme plus d'électricité que la charge par fil. L'efficacité énergétique de la charge inductive s'élève à 50-60 % contre 75 % pour la charge conventionnelle. En mode veille, les systèmes WPT consomment plus d'électricité que les adaptateurs de téléphone cellulaire branchés. Dans la situation la plus défavorable, la consommation en veille « 24 heures sur 24 » dépasse l'énergie requise pour charger complètement une batterie; La manipulation est donc un facteur clé: si le téléphone est laissé sur l'émetteur après la charge, la consommation en attente est sensiblement plus élevée que si le téléphone est enlevé. Supposé que tous les ménages Suisses utilisent un chargeur WPT à la place d'un chargeur filaire, la demande excédentaire d'électricité serait de l'ordre de 30 GWh par an, ce qui représente environ un ou quelques pour mille de la consommation annuelle d'électricité des ménages. En ce qui concerne les émissions électromagnétiques, le rapport présente des résultats de mesure et de simulation. Les niveaux de valeur de crête et de rms sur la surface des émetteurs Qi en mode veille s'élèvent à plusieurs 100 μT . Pour évaluer les effets potentiels sur la santé, les courants induits dans les tissus humains par une telle exposition sont simulés. Les normes sont définies en termes d'absorption d'énergie (SAR) et de niveaux de champ électrique. Les résultats montrent que les normes ne sont de loin pas dépassées: en ce qui concerne l'absorption d'énergie (SAR), ils sont un facteur de 1000 inférieur à la norme, relative à l'intensité du champ électrique dans le tissu d'un facteur de 500 inférieur à la norme. Du point de vue de la santé, les systèmes WPT sont donc inoffensifs.



Summary

This report presents data about energy consumption and electromagnetic emissions of wireless charging systems for electronic devices like mobile phones. Two technical standards for wireless power transfer (WPT) exist: Qi and AirFuel, with Qi as the current market leader. WPT charging consumes more electricity than comparable charging by wire. The energy efficiency of inductive charging amounts to 50-60 % compared to 75 % for conventional charging. Also in stand-by mode WPT systems consume more electricity than cell-phone adapters left plugged in. In a worst-case configuration the 24h stand-by consumption may exceed the energy required to fully charge a battery; a key factor relates to the handling: if the phone is left on the transmitter after charging, the stand-by consumption is substantially higher compared with a configuration where the device is removed. Supposed that all Swiss households use WPT instead of wire, the excess demand for electricity is in the order 30 GWh per year, which is roughly one-tenth or a few tenths of a per cent of (the current) yearly household electricity consumption. Concerning electromagnetic (EMF) emissions, the report presents measurement and simulation data. The peak and rms field levels on the surface of Qi transmitters in stand-by mode amount to a few 100 μT . To assess potential health impacts, the currents induced in human tissues by such exposure have to be simulated. The relevant basic restrictions are defined in terms of energy absorption (SAR) and electric field levels. The simulation results showed that the basic restrictions were met with very large safety margins (30 dB for SAR, 27 dB for V/m). From a health point of view, WPT systems for small electronic devices like cell phones are uncritical.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé	3
Summary.....	4
Inhaltsverzeichnis	5
1. Prinzipien des drahtlosen Ladens.....	8
1.1 Überblick	8
1.2 Induktives Laden	10
1.3 Resonantes Laden.....	10
1.4 Weitere Prinzipien	11
2. Energieeffizienz und Strahlung	13
2.1 Energieeffizienz	13
2.2 Strahlung.....	14
2.2.1 EMV	14
2.2.2 Gesundheit	15
3. Technische Standards zum drahtlosen Laden.....	18
3.1 Industrielle Initiativen	18
3.2 Standards des Wireless Power Consortiums.....	18
3.2.1 Das Konsortium	18
3.2.2 Der Qi-Standard für induktives laden	18
3.2.3 Weitere Qi- Standards	20
3.3 Standards der AirFuel Alliance	20
3.3.1 Die Allianz.....	20
3.3.2 AirFuel Inductive.....	21
3.3.3 AirFuel Resonant.....	21
3.3.4 AirFuel Uncoupled	22



4. Auswahl der Produkte	23
4.1 Marktsituation	23
4.2 Ausgewählte DUT	24
4.2.1 Qi kompatible Geräte.....	24
4.2.2 PMA kompatible Geräte	25
5. Energieeffizienz	26
5.1 Messaufbau.....	26
5.2 Mess-Szenarien	27
5.3 Orientierungsmessungen.....	28
5.3.1 Leerlaufverbrauch.....	28
5.3.2 Effizienz und Ladestrom	28
5.3.3 Effizienz mit verschiedenen Sendespulen.....	28
5.3.4 Einfluss Position und Metallflächen.....	29
5.3.5 Erstes Fazit.....	29
5.4 Systematische Messungen	30
5.4.1 Leerlaufverbrauch.....	30
5.4.2 Effizienz und Ladestrom	31
5.4.3 Einfluss der Empfängerposition auf die Effizienz	32
5.5 Fazit der Verbrauchsmessungen.....	33
5.6 Relevanz von WPT hinsichtlich Energieverbrauch.....	34
5.7 Schlussfolgerungen	36
6. EMF-Messungen	38
6.1 Messaufbau.....	38
6.1.1 Messausrüstung	38
6.1.2 Messprotokoll	39
6.1.3 Messunsicherheit.....	39
6.2 Ergebnisse	40
6.2.1 Stand-by Aktivität.....	40
6.2.2 Signalform	41
6.2.3 Feldstärke zwischen den Spulen.....	41
6.2.4 Feldstärke bei aufgelegter Empfangsspule	42
6.2.5 Streufelder im Ladebetrieb	43
6.2.6 Streufelder im Stand-by Betrieb	44
6.3 Diskussion	45



7. EMF-Simulationen.....	46
7.1 Simulationssoftware	46
7.2 Ergebnisse	46
7.2.1 Modellierung und Simulation der Sendeeinheit.....	46
7.2.2 Modellierung von Sende und Empfangseinheit.....	48
7.2.3 Feldsimulationen	49
7.2.4 Simulation von SAR und induzierten elektrischen Feldstärken.....	52
7.3 Diskussion	54
Schlussfolgerungen	55
Referenzen	57

1. Prinzipien des drahtlosen Ladens

1.1 Überblick

Elektrische Energie kann mit unterschiedlichen Methoden transportiert werden. Üblicherweise kommen metallische Leiter zum Einsatz, welche den Strom effizient vom Erzeuger zum Verbraucher führen. Sind diese metallischen Leiter aus irgendeinem Grunde nicht erwünscht, kann die elektrische Energie auch drahtlos (mit elektrischen und magnetischen Feldern) übermittelt werden (Wireless Power Transfer, WPT). Dann ist ein hoher Wirkungsgrad der Übertragung jedoch nur über relativ kleine Strecken realisierbar, denn elektrische und magnetische Felder breiten sich im Raum aus.

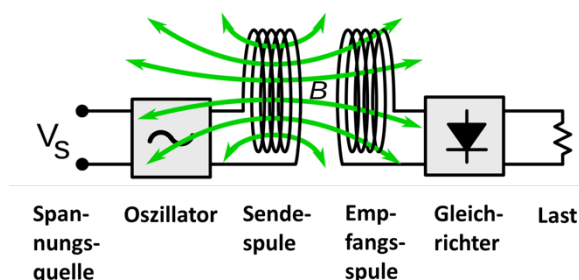
Dabei gilt es die Frequenz zu berücksichtigen. Bei tieferen Frequenzen ist das Feldverhalten hauptsächlich durch die Geometrie der Leiter gegeben. Maximalwerte der Feldstärken treten grundsätzlich auf den Leiteroberflächen auf und die Felder klingen im freien Raum relativ rasch ab. Es gibt keine eigentliche Abstrahlung im Sinne einer vollständigen Loslösung des Feldes von den Quellen. Bei höheren Frequenzen hingegen kann sich das Feld vollständig von den Quellen lösen und sich im Raum frei ausbreiten. In diesem Fall klingen die Feldstärken viel langsamer ab.

Solange die Wellenlänge gross ist verglichen zu den Abmessungen der Komponenten, wird praktisch keine Energie frei abgestrahlt. Ob die Frequenz „hoch“ oder „tief“ ist, hängt also auch von den Abmessungen der elektrischen und elektronischen Bauteile ab. Zum Vergleich: Die Wellenlänge bei 6 MHz beträgt 50 m. Sind die für den Sender verwendeten Bauteile wesentlich kleiner als 50 m, dann ist das räumliche Feldverhalten wie bei niedrigen Frequenzen: die maximalen Felder treten nahe beim Sender auf und der gesamte Raum rund um Sender ist felderfüllt.

WPT-Anwendungen operieren im kHz- oder im tiefen MHz-Bereich, wo wenig Energie in den freien Raum abgestrahlt wird. Einmal abgestrahlte Energie lässt sich nur noch zu einem kleinen Teil über Empfangsantennen oder Empfangsspulen nutzen.

Bei einem WPT-System können drei Teilsysteme unterschieden werden: (i) der „Sender“ bzw. die „Quelle“, (ii) die „Übertragungsstrecke“, (iii) der „Empfänger“ bzw. der „Verbraucher“. Das Gesamtsystem ist dadurch ausgezeichnet, dass Sender und Empfänger galvanisch vollkommen getrennt sind.

Die Energieübertragung ist nur mit zeitlich variablen Feldern möglich. Somit muss bei WPT-Anwendungen als erstes die Frequenz der übertragenden Felder gewählt werden. In aller Regel ist die Übertragungsfrequenz höher als jene der Quelle, die z.B. Gleichstrom (DC) oder Netzfrequenz (AC, 50 Hz) aufweist. Auch der Verbraucher ist meist nicht für die Übertragungsfrequenz ausgelegt. Daher enthalten Sender und Empfänger üblicherweise je ein entsprechendes AC-DC-Modul bzw. ein frequenzkonvertierendes AC-AC-Modul.



Figur 1: Energieübertragung mittels Induktionsspulen (Quelle: wikimedia commons). In Grün: Feldlinien des Magnetfeldes (B) der Sendespule.



Praktisch eingesetzt werden v.a. zwei Verfahren: der induktive Leistungstransfer (induktive Kopplung, IK) und der resonante Leistungstransfer (resonante Kopplung, RK). Beide Verfahren basieren auf magnetischer Induktion: die primäre Spule („Sender“) erzeugt ein magnetisches Wechselfeld, das in der sekundären Spule („Empfänger“) eine Spannung induziert (Figur 1). Diese erzeugt im Sekundärstromkreis einen Strom, der nach Umwandlung in einen Gleichstrom zum Aufladen eines Akku genutzt werden kann.

Nach demselben Prinzip (aber ohne Gleichrichtung des Empfangsstroms) funktioniert der klassische Transformator. Anders als beim Transformator sind bei WPT aber die primäre und die sekundäre Spule räumlich durch die Übertragungsstrecke getrennt, wodurch die magnetische Kopplung zwischen den Spulen geringer wird. Das vermindert die in der Sekundärspule induzierte Spannung und senkt somit im Vergleich zum Transformator den Leistungstransfer. Mit zunehmendem Abstand der zwei Spulen sinkt der Wirkungsgrad der drahtlosen Energieübertragung. Resonante Kopplung (RK) kann denselben Wirkungsgrad bei grösserem Abstand der Spulen erreichen als IK, oder erweitert ausgedrückt: RK ist hinsichtlich der Lage der zwei Spulen positionstoleranter als IK (siehe 1.3).

Energie kann aber auch mit höheren Frequenzen, insbesondere mit Mikrowellen (also im GHz-Bereich) drahtlos übertragen werden (siehe Tabelle 1). Bei diesen Systemen wird die Energie zu einem Strahl gebündelt oder mittels eines Linsensystems auf das Ziel fokussiert.

Tabelle 1 zeigt einen Vergleich der Übertragungsprinzipien mit IK, RK und Mikrowellen in Bezug auf Wirkungsgrad, Feldstärken und weiterer Parameter.

Eigenschaften	Induktiv	Resonant	Mikrowellen
Wirkungsgrad Sender	hoch (>90 %)	hoch (>90 %)	gering (<70 %)
Wirkungsgrad Übertragungsstrecke	sehr hoch (>98 %)	sehr hoch (>98 %)	hoch (>95 %)
Wirkungsgrad Empfänger	hoch (>90 %)	hoch (>90 %)	gering (<70 %)
Wirkungsgrad über alles	hoch (>80 % bei sehr kurzen Distanzen)	Hoch (>80 % bei kurzen Distanzen)	gering (<60 %)
Streufelder beim Sender	mittel bis hoch	mittel bis hoch	gering bis mittel
Feldstärken in der Übertragungsstrecke	mittel bis hoch	hoch	hoch
Streufelder beim Empfänger	mittel bis hoch	mittel bis hoch	gering bis mittel
Erreichbare Übertragungsdistanz	klein im Vergleich zu Spulendurchmesser	vergleichbar mit Spulendurchmesser	gross (Bereich von Metern)
Positionierungstoleranz horizontal	gering	gut	gering
... bei Mehrfachspulen	mittel	gut	--
Positionierungstoleranz vertikal	gering	gut	gross
... bei Mehrfachspulen	gering	gut	--
Hardware Kosten	gering bis mittel	mittel	hoch

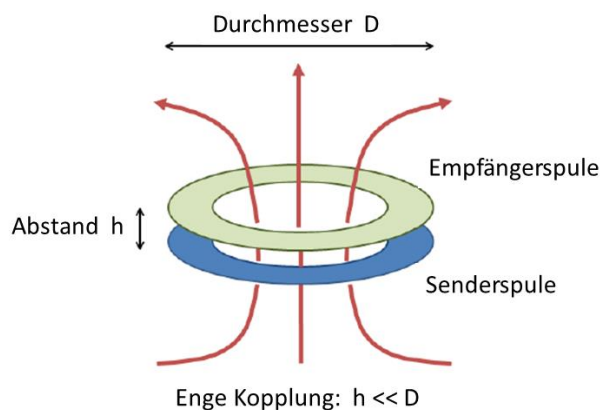
Tabelle 1: Vergleich der Übertragungsprinzipien

1.2 Induktives Laden

Das induktive Laden kann man mit den Verhältnissen in einem Transformator vergleichen. Dort sind die Ströme des Primär- und des Sekundärstromkreises im Normalbetrieb, d.h., bei relativ kleinen Lastimpedanzen, wegen der sehr starken magnetischen Kopplung, fast in Antiphasen (180° Phasenverschiebung). Da beide Spulen praktisch am selben Ort sind, kompensieren sich die zwei Magnetfelder beinahe: ausserhalb der Wicklungen treten vergleichsweise geringe Streufelder auf.

Bei induktivem Leistungstransfer sind die primäre und die sekundäre Spule räumlich durch die Übertragungsstrecke getrennt, wodurch die magnetische Kopplung zwischen den Spulen geringer wird. Das reduziert den Wirkungsgrad der Stromübertragung und vergrössert die elektromagnetischen Streufelder in der Umgebung der Spulen. Die Kopplung wird aber immer noch als „eng“ bezeichnet (siehe Figur 2)

Die zwei Ströme sind wie beim Transformator näherungsweise in Antiphasen. Dadurch ergibt sich eine teilweise Kompensation der Magnetfelder. Wegen der räumlichen Trennung der Spulen ist aber das Magnetfeld des Primärstromes vor allem bei der Primärspule, jenes des Sekundärstromes bei der Sekundärspule gross. Die Überlagerung beider Felder ergibt einen Feldverlauf mit grösseren Werten im direkten Umfeld jeder Spule und einem Abfall in der Mitte der Übertragungsstrecke. Je weiter die zwei Spulen voneinander entfernt sind, desto schwächer wird die magnetische Kopplung zwischen den zwei Feldern. Das gilt auch bei seitlicher Verschiebung (Dezentrierung) von Sende- und Empfangsspule.



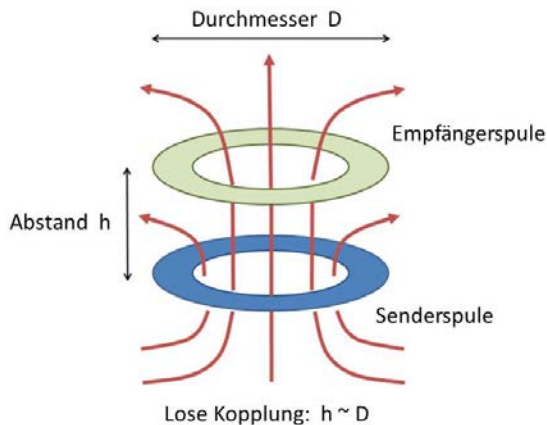
Figur 2: Enge Kopplung bei induktivem Leistungstransfer. Quelle: WPC (leicht angepasst).

1.3 Resonantes Laden

Der wesentliche Unterschied zwischen induktivem und resonantem Leistungstransfer ist, dass bei der Resonanz der Spannungsverlust geringer gehalten werden kann. Realisiert wird das durch Einfügen von Kapazitäten im Sekundärkreis, so dass dieser zu einem resonanten Schwingkreis wird. Ein resonanter Schwingkreis besitzt einen höheren Stromfluss, was bei einer gegebenen Last (Widerstand) eine höhere Spannung zur Folge hat. Der Wirkungsgrad eines resonanten Systems steigt damit gegenüber der rein induktiven Übertragung, so dass für einen gegebenen Leistungstransfer eine schwächere magnetische Kopplung in Kauf genommen werden kann, z.B. eine grössere Übertragungsstrecke (Figur 3) oder eine kleinere Empfangsspule (das entschärft die Positionierungsfrage etwas, denn die kleinere Spule kann irgendwo innerhalb des Perimeters der Senderspule platziert werden; oder aber es können mehrere Empfangsspulen – aufzuladende Geräte – gleichzeitig eingesetzt werden).

Bei RK wird nicht nur der Sekundärstrom grösser, sondern es ändert sich zusätzlich die Phasenlage

der beiden Ströme. Sie stehen in Quadratur (90° Phasenverschiebung zwischen Primär- und Sekundärstrom). Bei separierten Spulen hat der Feldverlauf in der Überlagerung damit einen kleineren Abfall in der Mitte der Übertragungsstrecke zur Folge, was letztlich einen grösseren Leistungstransfer ermöglicht. Eine Resonanz kann auch im Primärkreis vorgesehen sein. Diese vermag insbesondere die Leistungseinspeisung in das ganze System zu verbessern, ändert aber nichts an der erwähnten 90°-Phasenverschiebung.



Figur 3: Lose Kopplung bei resonantem Leistungstransfer; Quelle: WPC (leicht angepasst).

Eine Schwierigkeit von resonanter Kopplung ist, dass die Resonanzen nicht nur vom genauen Wert der Betriebsfrequenz und der geometrischen Gestaltung der Spulen abhängen, sondern zusätzlich auch vom Mass der Kopplung, d. h., von der gegenseitigen Lage beider Spulen. Die Resonanz kann daher bei beweglichen Spulen verloren gehen, z.B. durch blosse geometrische Verschiebung einer Spule. Deshalb werden in resonanten Systemen Sender und Empfänger laufend – den momentanen Bedingungen entsprechend (Position der Spulen, metallische Gegenstände im Einflussbereich der Spulen, Temperatur etc.) – elektronisch auf die gewünschte Resonanzfrequenz abgestimmt.

Schliesslich ist zu beachten, dass die Resonanz den erreichbaren Wirkungsgrad nicht beliebig hoch treiben kann, weil die Verluste in den Spulen bei zunehmendem Strom steigen. Eine möglichst hohe Frequenz begünstigt den Leistungstransfer. Trotzdem beschränkt das bei vergrössertem Spulenabstand rasche Absinken der Gegeninduktivität den maximal möglichen Wirkungsgrad; siehe dazu den Anhang in (Dürrenberger, Fröhlich et al. 2014). Die Übertragungsdistanzen praktischer (kommerzieller) Systeme bewegen sich im Bereich von wenigen Millimetern bis – für das Aufladen mobiler elektronischer Geräte – wenigen cm.

1.4 Weitere Prinzipien

Energie kann auch mit Ladetechnologien drahtlos übertragen werden, die nicht mit Induktion arbeiten. Dazu zählt gehören Mikrowellen, Ultraschall und Laser. Die Effizienz dieser Verfahren ist allerdings gering und es ist unklar, ob sie in näherer Zukunft oder überhaupt je im Konsumgüterbereich kommerziell eingesetzt werden. Bei Mikrowellen-basierten Systemen (Wellenlänge im 10-cm-Bereich, Frequenz grösser als 1 GHz) wird die Energie abgestrahlt und meist zu einem Strahl gebündelt oder mittels eines Linsensystems auf das Ziel fokussiert, sodass ein möglichst grosser Anteil der Energie konzentriert zum Empfänger gelangt.



Mikrowellenbasierte Systeme sind zwar auf der Übertragungsstrecke selbst verlustarm, dafür treten sowohl beim Sender als auch beim Empfänger in den Frequenzkonversions-Modulen und den Antennen vergleichsweise hohe Verluste auf. Ein Grund dafür ist die durch die Geometrie von Antennen nicht vermeidbare unerwünschte Abstrahlung in andere als der Hauptstrahlrichtung. Dies senkt den Wirkungsgrad des Gesamtsystems. Ist die Übertragungsstrecke sehr lange, steigen auch die Verluste auf der Übertragungsstrecke, denn jeder „Strahl“ hat einen Randbereich von der Dicke einiger Wellenlängen, wo die Felder allmählich abklingen. Dieser Effekt reduziert den Wirkungsgrad bei steigender Distanz.

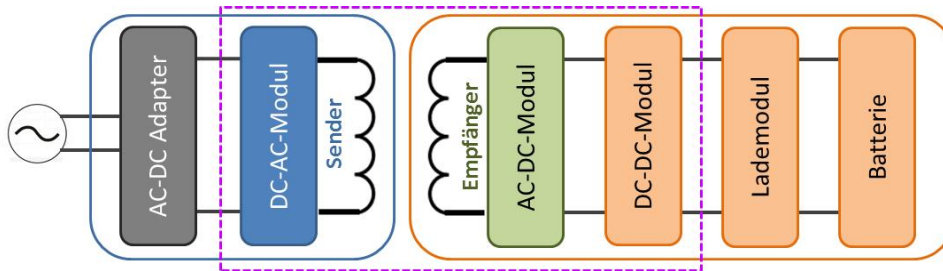
Bei einem Mikrowellen-basierten System müssen die Abmessungen der Anlagenteile gewisse Bedingungen einhalten. Erstens hat der „Strahl“ in jedem Fall die Dicke von einigen Wellenlängen, zweitens muss die Anlage zum Bilden des Strahles bzw. die Linse viele Wellenlängen gross sein und drittens muss die empfangende Anlage mindestens in der Grössenordnung der Wellenlänge sein.

Im vorliegenden Bericht werden mikrowellenbasierte (oder schall- und laserbasierte) Systeme nicht thematisiert. Es geht ausschliesslich um die induktive und die resonante magnetische Energieübertragung.

2. Energieeffizienz und Strahlung

2.1 Energieeffizienz

In Sachen Energieeffizienz ist kabelloses Aufladen der kabelgebundenen Variante unterlegen. Das ist insofern trivial, als viele WPT Senderspulen mit denselben 5 V DC gespeist werden, die auch fürs direkte Aufladen via Kabel benutzt werden. Auch bei optimierten Ladegeräten bleiben die Verluste durch die zu überbrückende Distanz zwischen den Spulen bestehen. Im Schema unten (Figur 4) ist die Situation dargestellt. Der Adapter für die 5 V Gleichspannung ist grau eingezeichnet, die für das kabellose Laden zusätzlichen notwendigen Module befinden sich innerhalb der pink gestrichelten Box. Der Sender (inklusive Adapter) ist blau umrahmt und in der linken Hälfte der Figur sichtbar, das Endgerät (inklusive Batterie) ist ocker/orange umrahmt und befindet sich in der rechten Hälfte der Grafik.



Figur 4: Schematische Darstellung des kabellosen Ladens. Erklärungen siehe Text.

In Tabelle 2 sind die Verluste bzw. die Energieeffizienzen quantifiziert. Die Daten sind einer Präsentation von Texas Instruments entnommen und repräsentieren Werte von TI-Evaluationsmodulen sowie allgemeine Erfahrungswerte der heute erhältlichen Adapter-Technologien (Siddabattula 2015).

Element	Kabel	Wireless heute	Wireless optimiert
AC-DC Adapter 5V	61-77 %	61-77 %	
AC-DC Adapter 19V			80 %
DC-AC Modul		95 %	95 %
Kopplung		89 %	89 %
AC-DC Modul		95 %	97 %
DC-DC Modul		94 %	97 %
Total (AC -> Telefon)	61 – 77 %	46 – 58 %	65 %
Lademodul (im Telefon integriert)	85 %	85 %	85 %
Total (AC -> Batterie)	52 – 65 %	39 – 49 %	55 %

Tabelle 2: Vergleich der Energieeffizienz zwischen kabelgebundenem und kabellosem induktivem Laden. Quelle: (Siddabattula 2015).

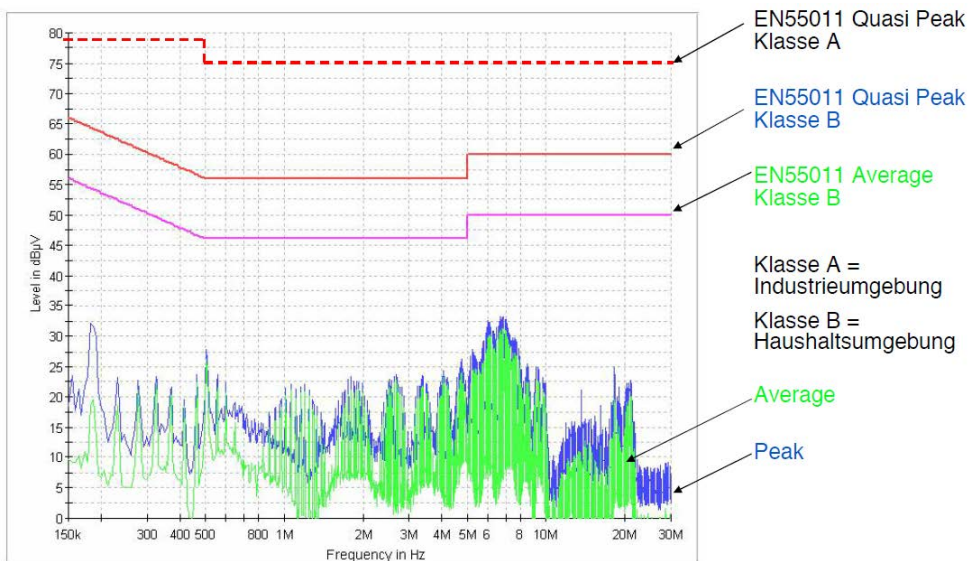
Bei resonanten Systemen wird wegen der losen Kopplung ein Teil der übertragenen Energie in den beiden Resonatoren zwischengespeichert. Dabei geht Energie in den Spulen selbst sowie durch Streufelder in nahegelegenen Objekten in Form von Wärme verloren. Zudem fallen wegen der 25-60 Mal

höheren Arbeitsfrequenz Skin-Effekt und Schaltverluste in der Elektronik höher ins Gewicht als bei IK. Aus diesen Gründen sind hocheffiziente resonante Ladesysteme grundsätzlich schwieriger zu realisieren als induktive. Aktuell beträgt der Unterschied in der Effizienz zwischen eng gekoppelten und resonanten Systemen etwa 20-50 % (Dubal 2015). Da die Technologie aber noch vergleichsweise neu ist, kann man erwarten, dass künftige Optimierungen diese Lücke zumindest verkleinern werden.

2.2 Strahlung

2.2.1 EMV

Grundsätzlich sind die grundlegenden Anforderungen der Normen IEC 61000-6-1 für Immunität im Wohn und Gewerbebereich, sowie IEC 61000-6-3 für Emissionen im Wohn- und Gewerbebereich gültig. Weil die Produktnorm EN 55011:2009 für kabellose Ladegeräte gültig ist, wird diese zur Prüfung von Störfestigkeit (Immunität) und Störabstrahlung (Emission) eingesetzt.¹ Die Norm entspricht der internationalen Norm CISPR11 bzw. der deutschen Norm VDE 0875-11. Für Ladegeräte zuständig sind darin die Grenzwerte für die Haushaltsumgebung (Klasse B). Es werden Grenzwerte für den Mittelwert und für den Quasi-Spitzenwert (CISPR-Norm) des abgestrahlten Signals im Frequenzbereich 150 kHz bis 400 GHz definiert (siehe das Messbeispiel in Figur 5; ersichtlich sind darin die Grenzwerte als Linien und beispielhafte Messwerte für Spitzen, in blau, und für Mittelwerte, in grün).



Figur 5: Messwerte und Grenzwerte nach EN 55011. Quelle: Schurter²

Die Norm betrifft Geräte im industriellen, wissenschaftlichen, medizinischen und häuslichen Anwendungsbereich sowie ISM-Hochfrequenz-Anwendungen (ISM: nichtlizenziertes Band für „Industrial Scientific and Medical“ Applications). Die Grenzwerte gelten für Störspannung und Störfeldstärke. Die Verfahren für Messungen auf einem Messplatz oder am Standort des Geräts sind in der Norm definiert.

¹ http://www.tuv.com/en/corporate/business_customers/product_testing_3/smart_home_smart_grid/wireless_charging/wireless-charging.html

² <http://www.schurter.ch/content/download/96744/2651665/Fachvortrag+Schurter+2011+DE.pdf>



Zur Ergänzung: Für die elektrische Sicherheit gilt die Norm EN 60335-2-29 (IEC 60335-2-29:2002 + A1:2004 + A2:2009; VDE 0700-29:2010-11). Sie definiert die Anforderungen für Batterieladegeräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke. Die Begrenzung der leitungsgebundenen Störströme und Spannungsschwankungen wird in den Normen EN 61000-3-2 und -3-3 geregelt.

2.2.2 Gesundheit

Die ICNIRP Guidelines von 1998 (0 Hz - 300 GHz) und von 2010 (0 Hz - 100 kHz) werden von den Herstellern als Basis genommen (ICNIRP 1998), (ICNIRP 2010). Die in diesen Empfehlungen quantifizierten Basisgrenzwerte für die Strahlenabsorption im Körper müssen von den Ladestationen eingehalten werden. Eine grosse Zahl von nationalen Richtlinien und Gesetzen zur Begrenzung von nichtionisierender, elektromagnetischer Strahlung stützen sich auf diese Empfehlungen. Auch die schweizerische Strahlenschutzverordnung NISV stützt sich auf die Empfehlungen der ICNIRP. Die Anpassungen von 2010, welche den Frequenzbereich bis 100 kHz betreffen, sind in der NISV allerdings nicht berücksichtigt.

Im vorliegenden Zusammenhang wichtig ist die Tatsache, dass sich die Gültigkeit der NISV auf Anlagen beschränkt und nicht auf Konsumgüter bezieht. Als Prüfnorm für kabellose Ladestationen können deshalb die aktuell gültigen Empfehlungen der ICNIRP genommen werden.

Begrenzt wird die durch externe elektromagnetische Felder im Gewebe induzierte elektrische Feldstärke. Dabei differenziert ICNIRP zwischen Nervengewebe des Kopfs (im Wesentlichen das Gehirn) und allen anderen Geweben (Kopf, „Restkörper“). Für diese zwei Gewebekategorien sind unterschiedliche Begrenzungen festgelegt worden (restriktiver für das Gehirn), wobei die Begrenzungen frequenzspezifisch definiert sind. Figur 6 zeigt die entsprechenden Werte.

Exposure characteristic	Frequency range	Internal electric field (V m ⁻¹)
Occupational exposure		
CNS tissue of the head	1–10 Hz	0.5/f
	10 Hz–25 Hz	0.05
	25 Hz–400 Hz	$2 \times 10^{-3}f$
	400 Hz–3 kHz	0.8
	3 kHz–10 MHz	$2.7 \times 10^{-4}f$
All tissues of head and body	1 Hz–3 kHz	0.8
	3 kHz–10 MHz	$2.7 \times 10^{-4}f$
General public exposure		
CNS tissue of the head	1–10 Hz	0.1/f
	10 Hz–25 Hz	0.01
	25 Hz–1000 Hz	$4 \times 10^{-4}f$
	1000 Hz–3 kHz	0.4
	3 kHz–10 MHz	$1.35 \times 10^{-4}f$
All tissues of head and body	1 Hz–3 kHz	0.4
	3 kHz–10 MHz	$1.35 \times 10^{-4}f$

Notes:

- f is the frequency in Hz.

- All values are rms.

- In the frequency range above 100 kHz, RF specific basic restrictions need to be considered additionally.

Figur 6: Basisgrenzwerte für die elektrische Feldstärke im Gewebe. Quelle: (ICNIRP 2010), p.825.



Zusätzlich zu diesen Restriktionen müssen für elektromagnetische Felder oberhalb von 100 kHz auch noch die Basisgrenzwerte für die Energieabsorption eingehalten werden. Diese sind in der Empfehlung von 1998 definiert und betragen für die allgemeine Bevölkerung 0.08 W/kg für die Gesamtkörperabsorption sowie 2 W/kg für die lokale Absorption in Kopf und Rumpf, 4 W/kg für die Absorption in Gliedmassen.

Weil gewebespezifische Grössen nicht direkt gemessen werden können, hat die ICNIRP die auf den Körper einstrahlenden Felder begrenzt. Wird diese empfohlene Begrenzung (maximale Feldstärke) eingehalten, werden mit sehr grosser Wahrscheinlichkeit die Basisgrenzwerte nicht überschritten. Im Zweifelsfall, etwa bei gewissen Nahkörperanwendungen, müssen die Basisgrenzwerte mit Simulationsprogrammen berechnet werden. Die von der ICNIRP festgelegten maximalen Feldstärken von Feldern werden als Referenzwerte (in der NISV: Immissionsgrenzwerte) bezeichneten. Je nach Frequenzbereich sind die Basisgrenzwerte für gewebeinterne elektrische Feldstärken oder für Energieabsorption restriktiver.

In Tabelle 3 sind die verschiedenen Referenzwerte für die relevanten Betriebsfrequenzen von drahtlosen Ladestationen dargestellt. Die erste Zahl bezieht sich jeweils auf die Gesamtkörper-SAR als Basisgrenzwert (Empfehlung von 1998), die zweite Zahl (kursiv) auf die elektrische Feldstärke im Gewebe (Empfehlung von 2010), gemittelt über ein Gewebevolumen-Würfel von 8 mm³. Die Geräte müssen den niedrigeren der jeweils empfohlenen Grenzwerte einhalten.

	ICNIRP Referenzwerte für die Bevölkerung (NISV Immissionsgrenzwerte)	
	E-Feld [V/m] Basis: SAR, <i>E-Feld</i>	B-Feld [μT] Basis: SAR, <i>E-Feld</i>
110 kHz – 150 kHz	87; 83	6.25; 27
150 kHz – 275 kHz	87; 83	6.1-3.35; 27
6.78 MHz	33; 83	0.14; 27

Tabelle 3: ICNIRP Referenzwerte für die relevanten Betriebsfrequenzen. Erklärungen im Text.

Die in Tabelle 3 dargestellten Zahlen beziehen sich auf Expositionen der allgemeinen Bevölkerung. Berufstätige, welche professionell mit elektromagnetischen Feldern zu tun haben, dürfen höheren Feldstärken ausgesetzt sein (in der Regel etwa doppelt so starke Felder; in der Schweiz entsprechen diese den SUVA-Grenzwerten). Für die hier relevanten Ladestationen gelten die Grenzwertempfehlungen für die Bevölkerung.

In der NISV wird für Anlagen auch ein vorsorglicher Grenzwert (sog. Anlagegrenzwert) definiert, der für Frequenzen im kHz-Bereich und höher einen Faktor 10 (Feldstärke) unterhalb der Immissionsgrenzwerte (Referenzwerte bei der ICNIRP) liegt. Für Geräte gilt dieser Grenzwert nicht. Er kann jedoch für die Beurteilung von Immissionsniveaus einen gewissen Orientierungscharakter (für vorsorgliche Grenzwertniveaus) haben. Der Anlagegrenzwert in den hier relevanten Frequenzbereichen bezieht sich auf die elektrische Feldstärke. Er beträgt für den Bereich der induktiven Kopplung 8.5 V/m, für den Frequenzbereich der resonanten Kopplung 3 V/m. Würde man diese Werte für Vergleichszwecke auf magnetische Flussdichten umrechnen, lägen sie in der Region von 0.5 μT für die induktive, im Bereich von 0.02 μT für die resonante Leistungsübertragung. Der vergleichsweise sehr niedrige Wert bei resonanten Systemen schuldet sich der höheren Frequenz (nicht-lineares Einkoppelungsverhalten externer Felder unterschiedlicher Frequenzen).



Auf europäischer Ebene existiert die Norm EN 62233 (IEC 62233:2005, modifiziert; VDE 0700-366:2008-11). Die Norm definiert Verfahren zur Messung der elektromagnetischen Felder von Haushaltsgeräten und ähnlichen Elektrogeräten im Hinblick auf die Sicherheit von Personen in elektromagnetischen Feldern (bis 300 GHz). Sie ersetzt die alte Norm EN 50366.

Die Norm enthält eine Liste mit Geräten wie sie im Haushalt vorkommen. Für diese Geräte ist eine "gerätetypische" Entfernung als Messentfernung vorgegeben. Diese variiert zwischen 0 cm und 30 cm (z.B. 0 cm bei einem Rasierapparat, 10 cm bei einem Föhn, und 30 cm bei einem Staubsauger; in der Regel werden 30 cm Messdistanz vorgeschrieben). Weiter werden die Betriebsbedingungen und die Messpositionen (rundum, Vorderseite, Oberfläche etc.) vorgegeben. In Annex B werden als Grenzwerte die ICNIRP Empfehlungen (Basisgrenzwerte, Referenzwerte) aufgelistet.

Da die ICNIRP Referenzwerte für Ganzkörperbelastung und Fernfeldsituation gelten, die Immissionen bzw. die Expositionsmaxima von körpernah benutzten elektrischen Geräten jedoch primär lokal auf den Körper einwirken bzw. lokale Spitzenbelastungen darstellen, dürfen die Geräteemissionen (gemessene Feldstärken) mit einem Koppelungsfaktor gewichtet werden, welcher für die meisten Anwendungen zwischen ca. 0.1 und 0.2 liegt. Drahtlose Ladestationen sind nicht explizit gelistet, so dass man sich sinnvollerweise auf den restriktivsten Wert einstellt (0.2), was faktisch einer Erhöhung des Grenzwerts um den Faktor 5 für die "lokal" im Nahfeld eines Gerätes gemessene magnetische Feldstärke entspricht. Um die Konformität mit dem Standard *genau* abzuklären, und nicht bloss in Form einer Näherung (Immission und Koppelungsfaktor), müssen mit Computersimulationen die Basisgrenzwerte aus der lokalen Feldverteilung berechnet werden.

Zur Beurteilung werden die magnetischen Feldstärken verwendet. Die elektrischen Felder werden nicht berücksichtigt.³ Eine zukünftige Norm hinsichtlich elektrischer Felder ist nicht ausgeschlossen, daran wird aber gegenwärtig nicht aktiv gearbeitet, denn elektrischen Feldern wird hinsichtlich Gesundheit eine klar geringere Bedeutung zugemessen als magnetischen Feldern.

³ "In general, there is no need to evaluate electric fields around household appliances. For most appliances, the electric field strength can be deemed to comply with the reference levels without testing. If electric fields are found to be relevant, a test method will be established" (EN50366, p.7).



3. Technische Standards zum drahtlosen Laden

3.1 Industrielle Initiativen

Im vergangenen Jahrzehnt haben sich verschiedene Firmen und Allianzen mit dem drahtlosen laden von Mobilgeräten (und anderen Anwendungen wie Elektrofahrzeugen – siehe dazu (Dürrenberger, Fröhlich et al. 2014) – befasst. Es ist nicht ausgeschlossen, dass ‚wireless charging‘ in Zukunft das kabelgebundene Laden weitgehend ersetzen wird.

Für das drahtlose Aufladen von Mobiltelefonen und Tablets sind zwei Standards vorherrschend. Die im Markt angebotenen Geräte arbeiten dabei mit induktiver Koppelung. Qi Wireless wird vom Wireless Power Consortium (WPC) vorangetrieben, AirFuel Inductive wird von der die AirFuel Alliance gestossen.

Die am weitesten verbreitete Technologie ist Qi. Ein prominenter Vertreiber hier ist Ikea. Die AirFuel Alliance hat sich im Juni 2015 aus dem Zusammenschluss der zwei Konsortien *Alliance for Wireless Power* (A4WP) und *Power Matters Alliance* (PMA) gebildet, um den dominierenden Qi Standard zu konkurrenzieren. Prominente Vertreter sind Starbucks und Delta Airlines. Die AirFuel Alliance beschränkt sich nicht auf induktives Aufladen, sondern forciert auch die resonante Kopplung wie sie über lange Jahre von A4WP verfolgt worden ist. Daneben werden auch andere kabellose Energieübertragungen, die nicht auf gekoppelten Magnetfeldern beruhen, etwa Mikrowellen, Laser oder Ultraschall für zukünftige Produkte nicht ausgeschlossen. Aufgrund der AirFuel Initiative hat das Wireless Power Consortium inzwischen auch Arbeiten an einem resonanten Qi-Standard aufgenommen.

3.2 Standards des Wireless Power Consortiums

3.2.1 Das Konsortium

Das Wireless Power Consortium (WPC) propagiert den Qi Wireless Standard (Consortium 2013). Er basiert auf magnetischer Induktion. Das WPC umfasst gegen 250 Firmen. Eine Liste der Mitglieder findet sich auf der Webseite: <https://www.wirelesspowerconsortium.com/member-list/>). Viele Firmen sind dabei auch Mitglied der AirFuel Alliance.



3.2.2 Der Qi-Standard für induktives laden

Der Qi-Standard setzt eine enge Kopplung zwischen Sende- und Empfangsspule voraus, was in der Praxis einen unmittelbaren Kontakt zwischen Ladestation und Mobilgerät erfordert. Die typische Ladedistanz beträgt 5 mm. Das Laden durch Tischplatten o.ä mehrere Zentimeter dicke Medien hindurch ist nur sehr eingeschränkt möglich.

Um die Ladeleistung zu regulieren, kombiniert der Standard Anpassungen der Arbeitsfrequenz (dadurch „verstimmt“ sich der Ladekreis und der Ladestrom sinkt; die Frequenz des sendeseitigen Inverters kann zu diesem Zweck zwischen 110 und 205 kHz eingestellt werden) und der Dauer des Ladestroms (durch Aktivieren eines on-off Regimes im Ladezyklus). Solche Leistungsrosselungen sind nötig, weil ein Akku mit zunehmender Ladung immer weniger Strom aufnehmen kann. Grundsätzlich wird die Kontrolle

über den Leistungsfluss vom Empfangsgerät übernommen. Die Kommunikation vom Leistungsempfänger zum Sender findet durch Modulation der aufgenommenen Leistung statt (vgl. mit Tabelle 4)

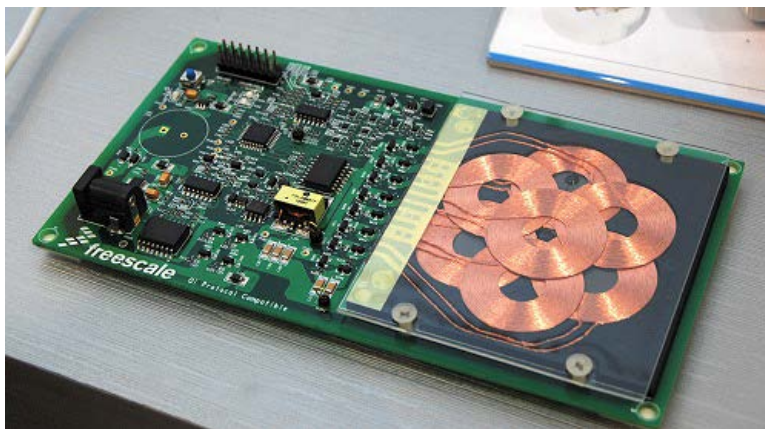
Prinzip	Induktive Kopplung	
Distanz	5 - 7 mm	
Leistung	5 - 15 W 60 W 120 W	Regelung der Leistung anhand Frequenz und on/off Für Laptops. Erste Fabrikate auf Trade Shows gezeigt 120 W noch weit entfernt von Einführung
Frequenz	110 - 205 kHz	Variabel
Kommunikation	Empfangsseitig geregelt	Modulation der aufgenommenen Leistung

Tabelle 4: Steckbrief des Qi-Standards für induktives Laden

Die Hersteller von Qi-konformen Ladestationen sind beim Design an genaue Vorgaben gebunden. Die Form und Anordnung der Ladespulen ist im Qi Standard anhand einer Reihe von normierten „Power Transmitter Designs“ definiert (siehe als Beispiel Figur 7). Momentan sind 23 Designs definiert, wobei drei davon aufgrund von unzuverlässiger Performance zurückgezogen wurden und nicht mehr empfohlen werden. Bei den Power Transmitters wird zwischen Typ A und Typ B Systemen unterschieden. Typ A Designs (Designs A1-A18) arbeiten mit einer einzelnen Primärspule; obwohl diese Designs durchaus über mehrere Spulen verfügen können, darf davon jeweils nur eine aufs Mal aktiv sein.

Typ B Power Transmitters (Designs B1-B5) bestehen in jedem Fall aus Spulenarrays und haben die Möglichkeit, mehrere Spulen zu kombinieren und gleichzeitig zu betreiben. Dies führt einerseits zu mehr Freiheit bei der Positionierung des Empfangsgerätes, ausserdem ist vorgesehen, dass sich mehrere Power Transmitters das Spulenarray teilen können. Dies ermöglicht das gleichzeitige Aufladen mehrerer Empfangsgeräte.

Sämtliche Power Transmitter Designs beinhalten zudem genaue Angaben zu den nötigen Vorkehrungen um die Sendespule abzuschirmen.



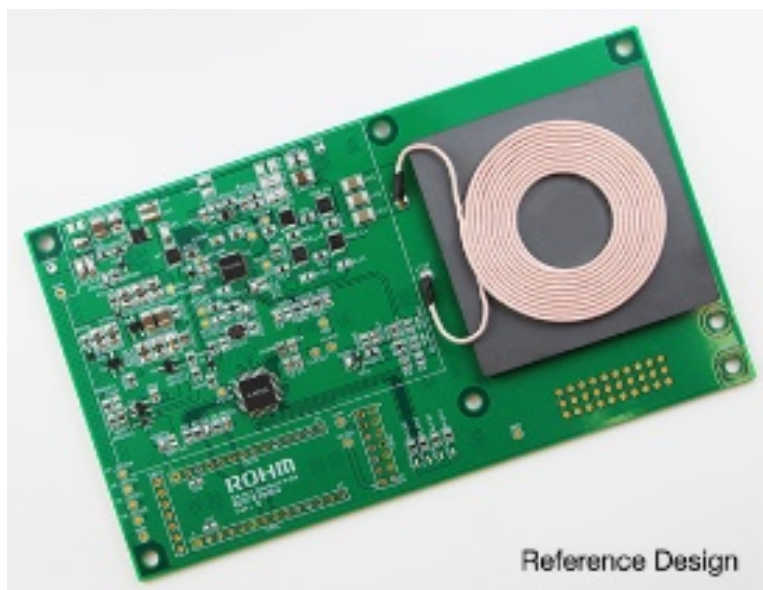
Figur 7: Qi spezifizierte Spulen; Quelle: WPC⁴.

⁴ <https://www.wirelesspowerconsortium.com/data/downloadables/1/2/4/6/magnetic-resonance-or-magnetic-induction.pdf>
19/57

3.2.3 Weitere Qi- Standards

Das Konsortium ist mit der Ausarbeitung weiterer Standards beschäftigt. Die Spezifizierung zur Übertragung grösserer Leistungen (120 W) ist noch weit von einer Einführung entfernt.

In der kürzlich erschienenen Version 1.2 wird auch eine Spezifikation für resonantes Laden (5W) bis 30 mm erwähnt. Diese soll mit bestehenden Qi Geräten rückwärtskompatibel sein. Die neuste Revision des Standards enthält zudem die Definition für Geräte bis 15 W (medium power). Erste darauf basierende Referenzdesigns (Figur 8) beginnen am Markt zu erscheinen (Rohm Semiconductor 2015). Das Spezifikationsdokument ist momentan jedoch nur für die Mitglieder des WPC zugänglich und wurde noch nicht veröffentlicht.



Figur 8: 15 W Qi Reference Design; Quelle: Rohm Semiconductor⁵

3.3 Standards der AirFuel Alliance

3.3.1 Die Allianz

Im Juni 2015 haben sich die Alliance for Wireless Power (A4WP) und Power Matters Alliance (PMA) zur AirFuel Alliance zusammengeschlossen. Ihre Standards umfassen sowohl die induktive Kopplung

(PMA) als auch die resonante Kopplung (A4WP) und sind offen für weitere Ansätze. Die Allianz zählt über 150 Firmenmitglieder (Liste: <http://airfuel.org/home/our-members>). Viele sind auch im Wireless Power Consortium, das den Qi Standard definiert.



⁵ http://www.rohm.com/web/global/news-detail?news-title=2015-11-17-the-world%E2%80%99s-first*-qi-certified-medium-power-transmitter-reference-design.



3.3.2 AirFuel Inductive

AirFuel Inductive (Tabelle 5) ist der aktuelle Name des ursprünglich von der PMA propagierten induktiven Ladestandards Powermat. AirFuel Inductive beruht auf demselben Prinzip wie Qi und ist in vielerlei Hinsicht damit vergleichbar. Wie bei letzterem findet auch bei AirFuel Inductive eine Kommunikation zwischen Sende- und Empfangseinheit durch kontrollierte Variation der aufgenommenen Leistung statt. Die Hauptunterschiede zwischen Qi und AirFuel Inductive sind die unterschiedliche Arbeitsfrequenz, das Leistungsspektrum sowie die Möglichkeit, auch Nutzerdaten, welche nichts mit dem eigentlichen Ladevorgang zu tun haben, mit dem zu ladenden Gerät auszutauschen. AirFuel Inductive Ladestationen in öffentlichen Gebäuden und Restaurants sind oftmals in Cloud-Systeme eingebunden, um über diesen Kanal kundenspezifische Informationen und Dienstleistungen anbieten zu können.

Prinzip	Induktive Kopplung	
Distanz	Typischerweise 5 mm	
Leistung	5 W	Regelung der Leistung anhand Frequenz
Frequenz	235 – 275 kHz	Variabel
Kommunikation	Empfangsseitig geregelt	Modulation der aufgenommenen Leistung, auch Nutzerdaten

Tabelle 5: Steckbrief AirFuel Inductive

3.3.3 AirFuel Resonant

AirFuel Resonant (Tabelle 6) ist der aktuelle Name des ursprünglich von A4WP propagierten resonanten Ladestandards Rezence (AirFuel Alliance 2014). Der Standard beruht auf der losen magnetischen Kopplung zweier LC-Resonatoren (Schwingkreise), bestehend aus den entsprechend beschalteten Sende- und Empfangsspulen. Für einen effizienten Energietransfer müssen beide Schwingkreise exakt auf dieselbe Arbeitsfrequenz (6.78 MHz) abgestimmt sein. Diese ist im Vergleich zu den induktiven Ladestandards, welche im Bereich 100 – 300 kHz arbeiten, viel höher angesetzt. Die höhere Frequenz hat den Vorteil, dass sich fremde Metallobjekte, die versehentlich zwischen die Spulen gelangen, im Vergleich zu den induktiven Systeme weniger stark aufheizen (Alliance for Wireless Power 2015). Ein weiteres Merkmal dieser Technologie ist die Möglichkeit, mehrere Geräte pro Sendespule zu versorgen. Die Kommunikation zwischen Ladegerät und Empfänger findet bei AirFuel Resonant via Bluetooth Low Energy (BLE) und somit im 2.4 GHz ISM Band statt.

Prinzip	Resonante Kopplung	
Distanz	Bis ca. 50 mm	Je nach Implementation
Leistung	10 - 22 W (Transmitter)	5 Leistungsklassen. Class 1 und 5 noch nicht spezifiziert
Frequenz	3.5 / 6.5 W (Receiver)	5 Leistungsklassen. Momentan nur Class 2 und 3 spezifiziert
Kommunikation	6.78 MHz	Fix eingestellt (Toleranz ± 15 kHz) – ISM Frequenzband

Tabelle 6: Steckbrief AirFuel Resonant



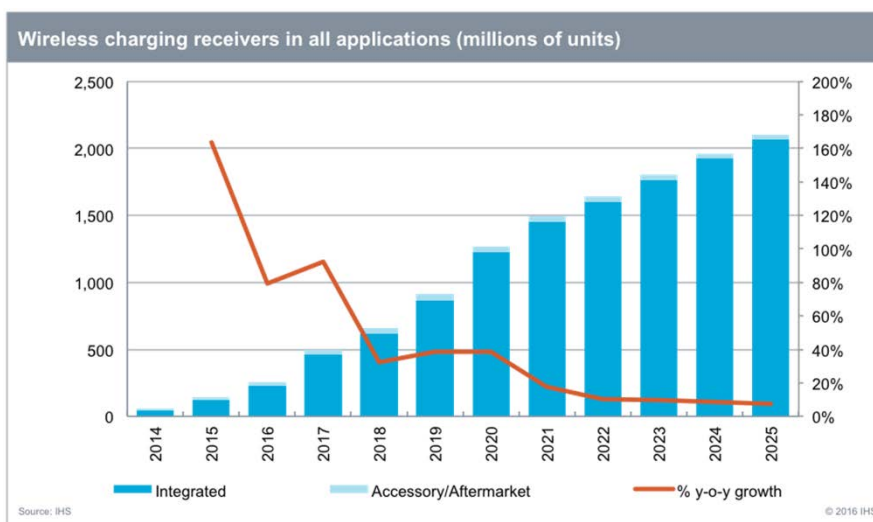
3.3.4 AirFuel Uncoupled

AirFuel Uncoupled ist der Brand für zukünftige drahtlose Ladetechnologien, die nicht mit Magnetfeldern arbeiten. Dazu zählt die Allianz Mikrowellen, Ultraschall und Laser. Definiert ist in diesem Bereich noch nichts. Eine Arbeitsgruppe widmet sich der Thematik.

4. Auswahl der Produkte

4.1 Marktsituation

Generell sind die Mobiltelefone die treibende Kraft im Markt. An zweiter Stelle folgen die Smart-Watches. Es wird erwartet, dass sich WPT im Konsumgüterbereich in den kommenden Jahren stark verbreiten wird, insbesondere weil immer mehr Hersteller die kabellose Auflademöglichkeit in die Geräte integrieren und sie nicht mehr als Zubehör gekauft werden muss. Figur 9 zeigt eine Schätzung des Marktwachstums (alle WPT-Anwendungen).



Figur 9: Marktwachstum von WPT-Anwendungen. Quelle: IHS.⁶

Der Markt wird beherrscht vom Qi-Standard. Der Standard ist global verbreitet und in allen Märkten erhältlich, so auch in der Schweiz. Fast alle hierzulande verkauften WPT-Produkte gehören zum Qi-Standard. Auf der Internetplattform Testberichte werden 50 verschiedene Fabrikate bewertet.⁷

WPT-Produkte der AirFuel Alliance sind dagegen noch nicht weit verbreitet und teilweise nicht lieferbar. Der Markt beschränkt sich nach unserem Stand des Wissens gegenwärtig vorwiegend auf die USA, v.a. weil dort Starbucks auf diese Technologie setzt. Powermat liefert inzwischen auch in die Schweiz. Produkte von WiTricity und Gill Electronics (beides Pionierfirmen bei der Entwicklung der PMA-Technologie) konnten (noch?) nicht bestellt werden. Bei letzteren ist unklar, ob überhaupt und wann kommerzielle Serien verfügbar werden. Es wird mit einiger Sicherheit noch eine Weile dauern bis die AirFuel Alliance im Markt fest etabliert ist, falls sich der Standard gegen Qi behaupten kann. Eine gewisse Vorreiterrolle könnte Samsung mit dem Galaxy S7 spielen, das im Dual Mode (Qi/PMA) für beide WPT-Standards geliefert wird.

Noch nicht etabliert haben sich die resonanten Standards. Qi hat zwar inzwischen auch eine entsprechende Spezifikation entwickelt, aber Produkte sind noch keine erhältlich. Das gilt auch für die von WiTricity neu unter dem Label ‚AirFuel resonant‘ vermarktete WPT-Version. Es scheint erst Prototypen zu geben. Auf Informations- und Bestellanfragen unsererseits reagierten die Unternehmen nicht. Das Marktforschungsunternehmen IHS vermutet, dass der resonante Standard sich zuerst als Anwendung

⁶ <http://press.ihs.com/press-release/technology/high-growth-wireless-charging-market-matures-2016-ihs-says>

⁷ <http://www.testberichte.de/audio-hifi-zubehoer/273/ladegeraete/kabellose-qi-ladegeraete.html>



in Laptop Computern verbreiten wird (voraussichtlich mit mehr Leistung als 5W; 5W genügen für Kleingeräte wie Mobiltelefone).

Auf dem schweizerischen Markt findet man von den meisten Mobiltelefonherstellern WPT-fähige Handys nach Qi-Standard, einige Anbieter offerieren auch eigene Sendestationen (Ladestationen). Verbreitet sind neben den Stationen der Smartphoneproduzenten u.a. solche von Ikea (Vitahult), fonsalesman (Koolpad) und Qinside (Qi #).

4.2 Ausgewählte DUT

(DUT: Device Under Test). Folgende Geräte zur induktiven Aufladung wurden beschafft (Geräte zur resonanten Energieübertragung sind noch keine auf dem Markt verfügbar):

4.2.1 Qi kompatible Geräte

Bezeichnung	Hersteller	Art	Merkmale
Nexus 5 Ladepad	LG	Sender (Qi)	Versorgung über Micro-USB
NORDMÄRKE	IKEA	Sender (Qi)	Ein- und Dreifachsender
EP-PG920i	Samsung	Sender (Qi)	Versorgung über Micro-USB
Qi 1001	Qinside	Sender (Qi)	Einbaugerät (für unter Tischplatte)
KoolPad	Fonesalesman	Sender (Qi)	Versorgung über Micro-USB

Tabelle 7: Beschaffte Qi Ladestationen



Figur 10: Beschaffte Qi Sender von LG, IKEA, Samsung, Qinside, Fonesalesman (vlnr)

Bezeichnung	Hersteller	Art	Merkmale
Galaxy S6	Samsung	Smartphone Qi integriert	Qi Empfänger fest eingebaut
iTian	iTian	Empfänger (Qi, 900 mA)	Flacher nachrüst-Empfänger
iQi Mobile	Fonesalesman	Empfänger (Qi, 600 mA)	Flacher nachrüst-Empfänger
VITAHULT	IKEA	Empfänger (Qi, 1000 mA)	Hülle für iPhone 5/5s

Tabelle 8: Beschaffte Qi Empfänger



Figur 11: Qi Empfänger von iTian, Fonesalesman, IKEA (vlnr)

4.2.2 PMA kompatible Geräte

Bezeichnung	Hersteller	Art	Merkmale
Powermat	Duracell	Sender (PMA)	Magnet zentriert Endgerät

Tabelle 9: Beschaffte PMA Ladestation



Figur 12: PMA Ladestation von Duracell

Bezeichnung	Hersteller	Art	Merkmale
Ghost Charger	Incipio	Receiver (PMA)	Handyhülle
Powercube	Duracell	Receiver (PMA)	Empfänger mit 5V USB Output

Tabelle 10: Beschaffte PMA Empfänger

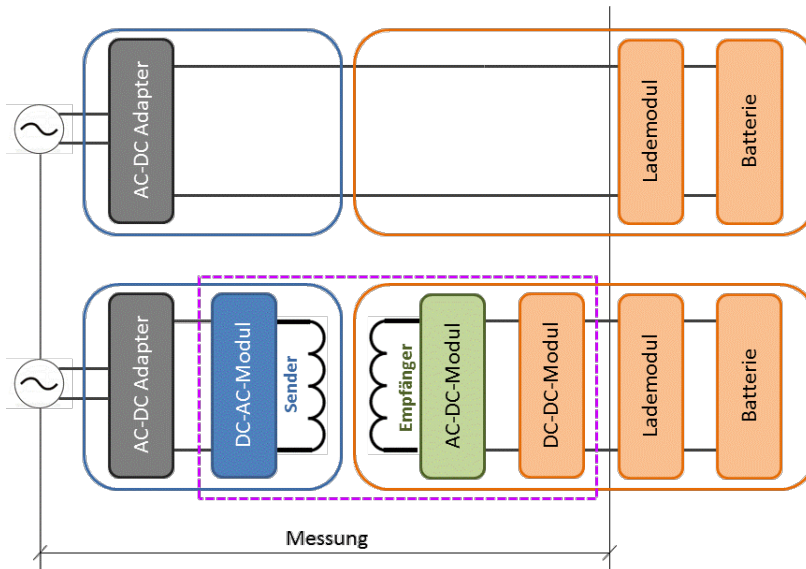


Figur 13: PMA Empfänger von Incipio und Duracell (vlnr)

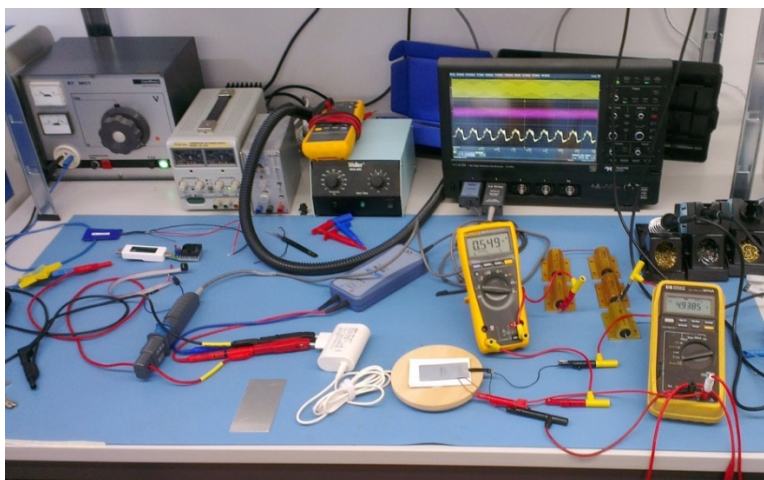
5. Energieeffizienz

5.1 Messaufbau

Die Effizienz des kabellosen Ladens wurde im Labor getestet (siehe Figur 15) und mit dem konventionellen Laden verglichen. In Figur 14 ist die Situation am Beispiel einer Messung „von der Steckdose bis zum Batterielademodul“ schematisch dargestellt, oben für kabelgebundenes, unten für kabelloses Laden. Die Leistung auf der Primärseite wurde mittels Stromzange und einer differentiellen Spannungsprobe an einem Oszilloskop mit Leistungsanalyse-Software erfasst. Auf der Empfängerseite (5V DC) wurden je ein Multimeter für die Strom- und Spannungsmessung verwendet (für das Messequipment: siehe Tabelle 11). Um eine stabile Messung zu ermöglichen, wurde der Ausgang mit Widerständen belastet. Bei den verwendeten Widerstandswerten ergeben sich Lastströme zwischen 400 mA und 1A, was der typischen Spanne des nominellen Ladestroms im Betrieb entspricht.



Figur 14: Messpunkte für den Vergleich der Energieeffizienz zwischen drahtgebundener (oben) und drahtloser (unten) Aufladung



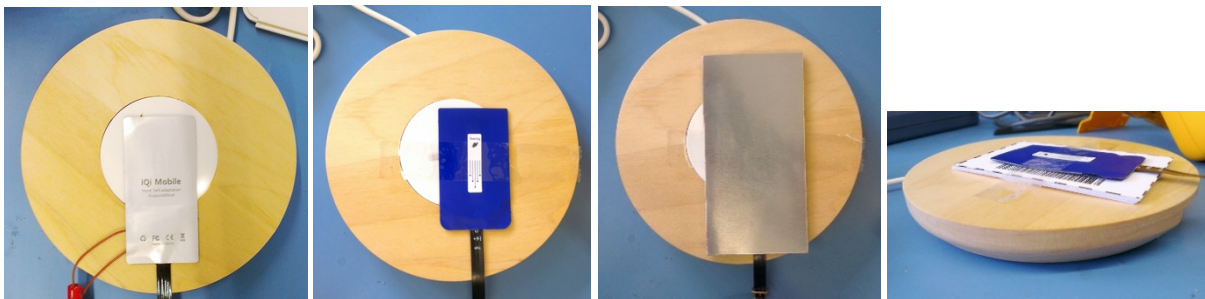
Figur 15: Messaufbau für die Effizienzmessungen

Bezeichnung	Hersteller	Bschreibung
HDO6104	Teledyne LeCroy	12bit Oszilloskop
HDO6K-PWR	Teledyne LeCroy	Power Analyzer Package für Oszilloskop
AP015	Teledyne LeCroy	Stromzange, DC – 50 MHz
ADP300	Teledyne LeCroy	Differentielle Spannungsprobe, 20 MHz
77	Fluke	Digital-Multimeter (USB Strommessung)
974A	Hewlett-Packard	Digital-Multimeter (USB Spannungsmessung)

Tabelle 11: Verwendete Messausrüstung

5.2 Mess-Szenarien

Die beste Energieeffizienz wird erreicht, wenn Sender und Empfänger optimal ausgerichtet und der vertikale Abstand minimal ist. Jede Abweichung von diesem Optimalfall führt zu einer Verringerung der Effizienz und limitiert den maximal erreichbaren Ladestrom. Wenn die Empfangsspule sehr schlecht auf dem Sender positioniert ist, wird dies von der Sendespule erkannt, worauf der Ladevorgang abgebrochen wird. Die in Figur 16 dargestellten Abweichungen stellen in etwa den maximalen Spielraum dar, bei dem ein sinnvoller Betrieb des Systems noch möglich ist. Dabei wurde auch eine Anordnung (use-case) getestet, in welcher der Effekt von Metallflächen hinter der Spule (Telefongehäuse) vorkam.



Figur 16: Ausgewählte Mess-Szenarien, von links: Optimal zentrierte Empfängerspule; Seitlicher Offset; Aluminiumplatte über der Empfängerspule; Erhöhter vertikaler Abstand (+2 mm) zwischen Sende- und Empfängerspule.

Im Folgenden werden die Messergebnisse anonymisiert dargestellt. Die Qi-Sender werden als DUT-QiSx, die Qi-Empfänger als DUT-QiEx bezeichnet. Die (wenigen) AirFuel Produkte entsprechend als DUT-AFS1 (nur ein Produkt) und DUT-AFEx (siehe Tabelle 12). Die Nummerierung ist zufällig gewählt worden.

	Qi	AirFuel
Sender	DUT-QiS1 bis DUT-QiS5	DUT-AFS1
Empfänger	DUT-QiE1 bis DUT-QiE4	DUT-AFE1 und DUT-AFE2

Tabelle 12: Die 12 für die Messungen verwendeten Produkte (anonymisiert).



5.3 Orientierungsmessungen

Alle für diese Messungen verwendeten Produkte (2 Sender, 3 Empfänger) gehören zum Qi-Standard.

5.3.1 Leerlaufverbrauch

Die Messungen wurden mit dem Sender DUT-QiS2 durchgeführt. Im Stand-by (keine Empfängerspule) beträgt die Leistungsaufnahme der Sendespule 451 mW. Dies liegt über der auch in der Schweiz gültigen Norm (EU-Verordnung Nr. 178/2009), wonach ab 2013 die Stand-by Leistung 0.3 W nicht übersteigen darf. Allerdings bezieht sich diese Norm auf externe AC/DC Netzteile. Im vorliegenden Fall umfasst der Leerlaufverbrauch bei Nulllast sowohl die Adapter- als auch die Sendelelektronik. In den systematischen Messungen haben wir deshalb die einzelnen Komponenten separat getestet (5.4).

5.3.2 Effizienz und Ladestrom

Die Messungen wurden ebenfalls mit DUT-QiS2 bei zentrierten Empfängerspulen durchgeführt. Die Messresultate sind in Tabelle 13 aufgelistet. Die Effizienz der getesteten Kombinationen bleibt über dem getesteten Leistungsbereich in etwa konstant. Nur der DUT-QiE2 Empfänger war in der Lage, einen stabilen Ladestrom von 990 mA zu liefern. Die beiden anderen Empfänger sind nicht für diesen Ladestrom spezifiziert. Wenn diese Empfänger über dem Maximalstrom belastet werden, fällt die Ausgangsspannung weit unter die benötigten 5 V, was den Ladebetrieb verunmöglicht.

Empfänger	Last: 550 mA	Last: 730 mA	Last: 990 mA
DUT-QiE1	53.2 %	52.5 %	nicht möglich
DUT-QiE2	55.0 %	55.5 %	56.1 %
DUT-QiE3	51.5 %	52.3 %	nicht möglich

Tabelle 13: Effizienz in Abhängigkeit des Laststromes

Die Messergebnisse zeigen, wenn man sie mit den Literaturdaten (Tabelle 2) vergleicht, dass die Ergebnisse den heute üblichen Effizienzzahlen (46-58 % Effizienz von AC zu Telefon) entsprechen. Bei kabelgebundenem Aufladen (von AC/DC Adapter) liegen die Messwerte zwischen 61 % und 77 %.

5.3.3 Effizienz mit verschiedenen Sendespulen

Um den Einfluss des Sendegeräts zu bestimmen, wurde die Effizienz des DUT-QiE3 Empfängers auf einer anderen Sendespule getestet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 dargestellt. Mit dem DUT-QiS5 ist die Effizienz bei beiden getesteten Ladeströmen geringer als mit dem DUT-QiS2 Ladegerät.

Sender / Empfänger	DUT-QiE3 / 550 mA	DUT-QiE3 / 730 mA
DUT-QiS2	51.5 %	52.3 %
DUT-QiS5	49.7 %	48.0 %

Tabelle 14: Effizienz eines iQi Empfängers mit verschiedenen Sendespulen



5.3.4 Einfluss Position und Metallflächen (DUT-QiE1 Empfänger)

Die beste Energieeffizienz wird erreicht, wenn Sender und Empfänger optimal ausgerichtet und der vertikale Abstand minimal ist. Jede Abweichung von diesem Optimalfall führt zu einer Verringerung der Effizienz und limitiert den maximal erreichbaren Ladestrom (Tabelle 15).

Solange die beiden Spulen horizontal gut ausgerichtet sind, sind die Einbussen durch die Anwesenheit einer Metallfläche über der Empfangsspule und der Vergrößerung des vertikalen Abstandes nicht sehr gross. Auf eine schlechte horizontale Positionierung der Empfangsspule reagiert das System hingegen viel empfindlicher. Wenn die Empfangsspule nicht gut zentriert ist (1-2 Zentimeter Abstand zum Zentrum des Senders), ist nicht nur die Effizienz des Systems deutlich geringer, sondern es lässt sich auch stärker beeinflussen. So sinkt die Effizienz nochmals deutlich, wenn sich hinter der schlecht zentrierten Empfangsspule eine Alufläche befindet oder der vertikale Abstand vergrössert wird.

Szenario	Zentriert	Zentriert mit Alufläche	Zentriert mit Alufläche d=2mm	Seitl. Offset	Seitl. Offset Alufläche	Seitl. Offset d=2mm
Ladestrom	550 mA	550 mA	550 mA	550 mA	550 mA	550 mA
Effizienz	53.2 %	53.0 %	51.3 %	47.4 %	43.9 %	42.6 %

Tabelle 15: Effizienz DUT-QiE1 Empfängerspule für verschiedene Anordnungen (d = Abstand zu Sender)

Wenn die Empfangsspule sehr schlecht auf dem Sender positioniert ist, wird dies vom Sender erkannt, worauf der Ladevorgang abgebrochen wird. Die in Tabelle 15 dargestellten Abweichungen stellen in etwa den maximalen Spielraum dar, bei dem ein sinnvoller Betrieb des Systems noch möglich ist.

5.3.5 Erstes Fazit

Grundsätzlich ist die Energieeffizienz der gemessenen Systeme (um 56 %) nicht besonders hoch aber im Rahmen der Erwartungen. Je nach Kombination und Situation liegt die gemessene Energieeffizienz zwischen 230V AC Netzstecker zum 5V DC USB Ladestecker zwischen 40 % und 55 %. Verluste, die innerhalb des Mobiltelefons entstehen (Laderegulierung und Batterie) sind in dieser Zahl noch nicht berücksichtigt, treffen aber gleichermassen auf kabelgebundenes Laden zu.

Solange auf eine gute horizontale Ausrichtung der Empfangsspule geachtet wird, unterscheidet sich die Effizienz zwischen verschiedenen Empfängermodellen nicht sehr stark. Bei einem Ladestrom von 720 mA liegen die gemessenen Werte der Fabrikate zwischen 52.2 % und 55.5 %.

Eine schlechte Positionierung der Empfangsspule hat bedeutsamere Auswirkungen auf den Wirkungsgrad als der Modelltyp. Je schlechter die Empfängerspule auf der Ladestation positioniert ist, desto niedriger sind Ladestrom und Effizienz. Dabei kann die Empfängerspule höchstens 1-2 cm von der idealen Position bewegt werden, weil eine schlechte Kopplung vom Sender erkannt und der Ladevorgang abgebrochen wird. Eine Alufläche hinter der Empfängerspule verringert die Effizienz nur geringfügig (1-3 %), falls die Ladespule zentriert ist. Der relative Abfall ist etwas höher, wenn die Empfängerspule nicht gut zentriert ist. Eine schlechte Positionierung erhöht zudem und ganz generell das Störungspotential durch nahe gelegene Metallteile erheblich.

Da Qi zu den eng gekoppelten Systemen gehört, entsprechen diese Resultate grundsätzlich dem, was man aus der Theorie erwartet.

Für eine Beurteilung der Energie-Effizienz dürfen die Leerlaufverbräuche des Ladesystems (speziell

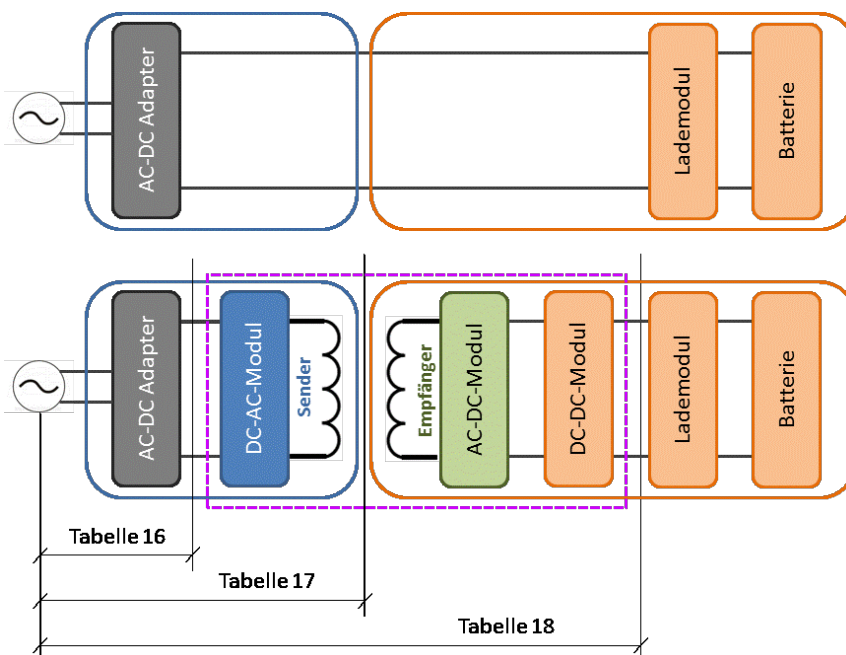


sendeseitig) nicht vergessen werden. Im Falle des DUT-QiS2 Senders betragen diese immerhin gegen 0.5 W, was etwa einem Zehntel der Leistung im Ladebetrieb (ca. 5 W) entspricht. Falls das System permanent am Netz angeschlossen ist, gehen täglich 12 Wattstunden im Stand-by Betrieb verloren, was in etwa der Energiemenge einer Vollladung eines heutigen Smartphones entspricht.

5.4 Systematische Messungen

5.4.1 Leerlaufverbrauch

Für den Leerlaufverbrauch wurden verschiedene Konfigurationen vermessen. Sie sind in Figur 17 mit Verweis auf die entsprechenden Tabellennummern vermerkt. In Tabelle 16 sind die Verbräuche (Leistungen) der AC-DC Adapter aufgelistet, in Tabelle 17 finden sich die Verbräuche der unbelasteten Ladestationen (Stand-by Betrieb), in Tabelle 18 die Verbräuche der Sender (Ladestationen) im Stand-by Betrieb bei aufgelegtem Empfänger (aufgeladenes Mobiltelefon).



Figur 17: Messpunkte für den Leerlaufverbrauch (ohne Last)

Netzteil	Kenndaten	Leerlaufverbrauch (230 V)
DUT-QiS2 (Exemplar #1), Messung 1	19 V / 1.74 A	212 mW
DUT-QiS2 (Exemplar #1), Messung 2	19 V / 1.74 A	212 mW
DUT-QiS2 (Exemplar #2)	19 V / 1.74 A	220 mW
DUT-QiS3	5 V USB / 2.0 A	8 mW
DUT-QiS4	19 V / 630 mA	60 mW
DUT-AFS1	18 V / 834 mA	128 mW

Tabelle 16: Isolierter Verbrauch der Netzteile (230 V AC, unbelastet)



Netzteil	Sendeeinheit	Leerlaufverbrauch (230 V)
DUT-QiS2 (Exemplar #1)	DUT-QiS2	450 mW
DUT-QiS2 (Exemplar #2)	DUT-QiS2	450 mW
DUT-QiS3	DUT-QiS3	70 mW
DUT-QiS3	DUT-QiS1 (Exemplar #1)	230 mW
DUT-QiS3	DUT-QiS1 (Exemplar #2)	230 mW
DUT-QiS4	DUT-QiS4	270 mW
DUT-AFS1	DUT-AFS1 (Exemplar #1)	170 mW
DUT-AFS1	DUT-AFS1 (Exemplar #2)	174 mW

Tabelle 17: Leerlaufverbrauchsmessung Netzteil inkl. Sendeeinheit im Standby (ohne Empfängerspule)

Netzteil	Sendeeinheit	Empfänger	Leerlaufverbrauch (230 V)
DUT-QiS2 (Exemplar #1)	DUT-QiS2	DUT-QiE2	2150 mW
DUT-QiS2 (Exemplar #2)	DUT-QiS2	DUT-QiE3	1390 mW
DUT-QiS3	DUT-QiS3	DUT-QiE2	1320 mW
DUT-QiS3	DUT-QiS3	DUT-QiE3	880 mW
DUT-QiS3	DUT-QiS3	DUT-QiE1	870 mW
DUT-QiS3	DUT-QiS1	DUT-QiE2	1460 mW
DUT-QiS3	DUT-QiS1	DUT-QiE3	1300 mW
DUT-QiS3	DUT-QiS1	DUT-QiE1	950 mW
DUT-QiS1	DUT-QiS1	DUT-QiE1	1050 mW
DUT-AFS1	DUT-AFS1	DUT-AFE2	1620 mW

Tabelle 18: Leerlaufverbrauchsmessung Netzteil, Sendeeinheit und unbelasteter Empfänger

5.4.2 Effizienz und Ladestrom

Die folgenden Resultate zum Energieverbrauch (Leistung) beim Ladevorgang basieren auf Konfigurationen mit zentrierten Sende- und Empfängerspulen. Die Messresultate sind in Tabelle 19 aufgelistet. Die Effizienz der getesteten Kombinationen bleibt über dem getesteten Leistungsbereich (Ladestrom) in etwa konstant. Über alle Messungen gesehen verbessert sich die Effizienz bei höheren Lastströmen nur um einige wenige Prozentpunkte. Mit Ausnahme einer Messung liegt die Effizienz bei allen Produktkombinationen Sender/Empfänger im Bereich zwischen 50 und 60 %.

In Tabelle 20 wird am Beispiel der Kombination DUT-QiS3 (Sender) / DUT-QiE2 (Empfänger) die Effizienz des drahtlosen Aufladens (ab Steckdose bis zum Lademodul des Endgerätes) mit derjenigen des kabelgebundenen Aufladens (ebenfalls ab Steckdose bis zum Lademodul des Endgerätes) verglichen.



Es wird in beiden Fällen dasselbe AC/DC-Netzteil (das effizienteste unter den getesteten Geräten) eingesetzt. Wiederum wird die Effizienz bei unterschiedlichen Ladeströme und mit dem USB-Standard von 5 V DC verwendet.

Kombination	Last: ca. 400 mA	Last: ca. 500 mA	Last: ca. 650 mA
DUT-QiS2 / DUT-QiE2	49.3 %	57.0 % (ca. 650 mA)	58.2 % (ca. 900 mA)
DUT-QiS2 / DUT-QiE1	53.2 %	52.5 % (ca. 650 mA)	900 mA nicht möglich
DUT-QiS2 / DUT-QiE3	50.7 %	53.4 % (ca. 650 mA)	900 mA nicht möglich
DUT-QiS3 / DUT-QiE2	52.9 %	54.1 %	55.0 %
DUT-QiS4 / DUT-QiE1	53.8 %	nicht gemessen	53.6 %
DUT-QiS1 / DUT-QiE1	56.2 %	56.7 %	56.5 %
DUT-AFS1 / DUT-AFE2	54.9 %	56.0 %	56.2 %

Tabelle 19: Effizienz verschiedener Sender/Empfänger Kombinationen in Abhängigkeit des Laststromes am 5V Ausgang

Netzteil	Sendeeinheit	Empfänger	Ladestrom (5 V)	Effizienz
DUT-QiS3	(USB Kabel)	-	440 mA	75.4 %
DUT-QiS3	(USB Kabel)	-	540 mA	75.7 %
DUT-QiS3	(USB Kabel)	-	690 mA	75.9 %
DUT-QiS3	(USB Kabel)	-	980 mA	76.2 %
DUT-QiS3	DUT-QiS3	DUT-QiE2	420 mA	52.9 %
DUT-QiS3	DUT-QiS3	DUT-QiE2	520 mA	54.1 %
DUT-QiS3	DUT-QiS3	DUT-QiE2	670 mA	55.0 %

Tabelle 20: Effizienz von kabelloser und kabelgebundener Energieübertragung (ab Steckdose bis Lademodul des Mobiltelefons)

5.4.3 Einfluss der Empfängerposition auf die Effizienz

Zuletzt wird der Einfluss der Positionierungsgenauigkeit auf die Gesamteffizienz des Ladens dargestellt. Aus den Orientierungsmessungen wurde ersichtlich, dass der Ladevorgang schon bei wenigen Zentimetern Dezentrierung (2-3 cm) vom Sender erkannt und das Laden abgebrochen wird. Aus diesem Grunde haben wir bei einigen ausgewählten Kombinationen von Sendern und Empfängern die grösste, gerade noch zum Aufladen akzeptierte Position gesucht und als worst-case Konfiguration vermessen. Bei „maximal“ schlecht ausgerichteten Spulen kann die Effizienz auf ca. 40 % fallen (Tabelle 21).



Kombination	Effizienz (optimal)	Effizienz (worst-case)
DUT-QiS4 / DUT-QiE1	53.8 %	41.4 %
DUT-QiS2 / DUT-QiE2	49.3 %	39.8 %
DUT-QiS2 / DUT-QiE3	50.7 %	38.6 %

Tabelle 21: Effizienz von Optimalfall und bei schlecht positioniertem Empfänger (Ladestrom fix 400 mA)

5.5 Fazit der Verbrauchsmessungen

Zunächst: wie bei anderen am Netz aufladbaren oder angeschlossenen Kleingeräten ist auch bei kabellosen Ladestationen der Verbrauch des Netzadapters ein zentrales Thema. Der beste hier getestete Adapter hat einen sehr tiefen Leerlaufverbrauch von 8 mW, der verbrauchsmässig schlechteste einen solchen von 220 mW. Dimensionierung (technische Kenndaten) und Kosten (Qualität der Bauteile) erklären den Grossteil dieses Unterschieds.

Sodann: Der Stand-by Verbrauch der Ladestation insgesamt ist ein zweites wichtiges Thema. Neben dem Netzadapter spielt die im Gerät verbaute Elektronik eine wichtige Rolle. Auch hier gibt es zwischen den Fabrikaten deutliche Unterschiede. Der tiefste Verbrauch betrug 70 mW, der höchste 450 mW.

Bei WPT-Systemen wird der Stand-by Verbrauch nicht nur durch das Ladegerät allein bestimmt, sondern auch durch die Konfiguration mit dem Endgerät – auch wenn dieses nicht aufgeladen wird (voller Akku). Das hängt mit der Kommunikation und der Regelung zwischen Sender und Empfänger zusammen (siehe auch: 6.2). Die Messwerte variieren hier von 870 mW bis über 2 W.

Insgesamt variiert der Stand-by Verbrauch je nach Fabrikat und Benutzerverhalten also massiv. Der tiefste Verbrauch lag bei 70 mW (5V-Netzteil; stromeffizientes Design; kein Endgerät auf dem Sendemodul), der höchste war 30 Mal höher und lag bei 2150 mW (16 V Netzteil; Standarddesign; Empfangsspule auf dem Sendemodul).

Im Vergleich zwischen kabellosem und kabelgebundenem Aufladen – bei gleichen technischen Parametern von Netzadapter, Lademodul und Akku der Endgeräte – ist das drahtlose Laden aufgrund der Verluste in den Sender- und Empfängereinheiten weniger energieeffizient als das traditionelle Aufladen über Kabel:

Im Stand-by Betrieb betragen die Leerlaufverbräuche beim kabelgebundenen Laden wie oben bereits erwähnt zwischen 8 mW und 220 mW, gegenüber den berichteten 70 mW bis 2150 mW bei drahtlosem Laden. Als Faustregel kann man folgende Grössenordnungen des Stand-by Verbrauchs nennen: kabelgebundenes Laden (eingestecktes Netzteil ohne Endgerät oder mit voll aufgeladenem Endgerät angeschlossen) um 100-200 mW. Drahtloses Laden ohne aufgelegtes Endgerät: 200-400 mW, mit aufgelegtem Endgerät: 1-2 W. WPT-Ladestationen können also bis 10 Mal mehr Stand-by Energie verbrauchen als AC/DC-Netzteile allein.

Während des aktiven Ladebetriebs (Ladestrom > ca. 400 mA) liegt die Energieeffizienz von der Steckdose bis zum Lademodul des Endgerätes bei den getesteten Systeme im Bereich von 50-60 %, bei traditionellem Laden bei ca. 75 %. Gegenüber dem kabelgebundenen Aufladen erzeugen WPT-Systeme während des Ladens doppelt so hohe Verluste.



5.6 Relevanz von WPT hinsichtlich Energieverbrauch

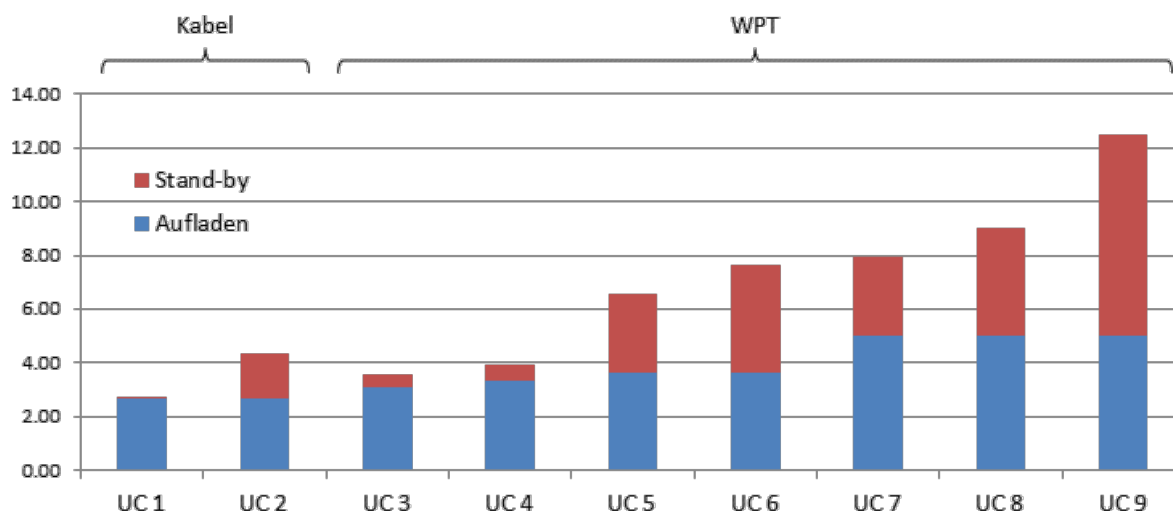
Um die Relevanz des drahtlosen Ladens im Vergleich zum herkömmlichen Laden abzuschätzen, definieren wir eine Reihe von Anwendungsfällen (use cases, Tabelle 22). Bei allen Fällen nehmen wir an, dass das Endgerät (Mobiltelefon) einmal täglich aufgeladen wird (Vollladung) und dass die Ladeeinheit (Kabel oder Sendemodul) *ständig am Netz angeschlossen* bleibt (1 h Ladevorgang, 23 h Stand-by Betrieb). Als Ladeverbrauch gehen wir von Lithium-Ionen-Zellen mit 1500 mAh und 3.8 V Spannung aus. Dies ergibt für eine Ladung eine benötigte Energiemenge von 0.0055 kWh.

Beschreibung	Wire _{best} UC 1	Wire _{Norm} UC 2	WPT _{max} UC 3	WPT _{best} UC 4	WPT _{opt} UC 5	WPT _{norm} UC 6	WPT _{bad1} UC 7	WPT _{bad2} UC 8	WPT _{worst} UC 9
Leerlauf Adapter	8	200	8	8	20	200	200	200	300
Ladeeffizienz	75 %	75 %	65 %	60 %	55 %	55 %	40 %	40 %	40 %
Rx zentriert	-	-	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein
On top (h)*	-	-	0	0	3	7	3	7	7
Leerlauf ohne Rx	-	-	60	70	250	250	250	250	400
Leerlauf mit Rx	-	-	1000	1000	1000	1000	1000	1000	2000

* Anzahl Stunden pro Tag nach dem Aufladen auf der Station

Tabelle 22: Definierte Anwendungsfälle. Leerlaufleistung in mW (Rx = Empfangsmodul bzw. Endgerät).

In Figur 18 sind die jährlichen Energieverbräuche der oben definierten use cases einander gegenübergestellt. Die dazugehörigen Zahlenwerte sind in Tabelle 23 wiedergegeben. Darin sind auch die Mehrverbräuche von WPT gegenüber kabelgebundener Aufladung als Faktoren angegeben, einmal im Vergleich zur energieeffizientesten Kabelversion (Adapterverbrauch im Leerlauf 8 mW), sodann im Vergleich zu einem durchschnittlich energieeffizienten Netzadapter (200 mW).



Figur 18: Energieverbräuche ausgewählter use cases, pro Jahr in kWh



Beschreibung	Wire _{best} UC 1	Wire _{Norm} UC 2	WPT _{max} UC 3	WPT _{best} UC 4	WPT _{opt} UC 5	WPT _{norm} UC 6	WPT _{bad1} UC 7	WPT _{bad2} UC 8	WPT _{worst} UC 9
Energieverbrauch (in kWh pro Jahr)									
Laden	2.68	2.68	3.09	3.35	3.65	3.65	5.02	5.02	5.02
Stand-by	0.07	1.68	0.50	0.59	2.92	4.02	2.92	4.02	7.45
Total	2.74	4.36	3.59	3.93	6.57	7.67	7.94	9.03	12.46
Vergleich mit Kabel _{best} (UC 1)									
Laden	1.0	1.0	1.2	1.3	1.4	1.4	1.9	1.9	1.9
Stand-by	1.0	25.0	7.5	8.8	43.5	59.8	43.5	59.8	110.9
Total	1.0	1.6	1.3	1.4	2.4	2.8	2.9	3.3	4.5
Vergleich mit Kabel _{norm} (UC 2)									
Laden	1.0	1.0	1.2	1.3	1.4	1.4	1.9	1.9	1.9
Stand-by	0.04	1.0	0.3	0.4	1.7	2.4	1.7	2.4	4.4
Total	0.6	1.0	0.8	0.9	1.5	1.8	1.8	2.1	2.9

Tabelle 23: Jährlicher Energiekonsum in kWh der verschiedenen use cases und Mehrverbrauchsfaktoren von drahtlosem Laden (UC 3 bis UC 9) gegenüber kabelgebundener Aufladung (UC 1 und UC 2).

Wenn man eine ungefähre Grössenordnung angeben will, kann man von einer Verdoppelung des jährlichen Energieverbrauchs bei drahtlosem Aufladen gegenüber kabelgebundenem Aufladen sprechen, wobei die Hälfte davon dem höheren Stand-by Verbrauch geschuldet ist, bei Liegenlassen des aufgeladenen Endgerätes auf der Sendestation sogar deutlich mehr als die Hälfte, wobei dann der Gesamtverbrauch das Dreifache des traditionellen Ladens betragen kann.

Aus den Daten wird klar, dass nicht nur die Technik, sondern auch das Nutzerverhalten den Energieverbrauch beeinflussen. Bei der Technik spielt der Netzadapter eine entscheidende Rolle. Sehr energieeffiziente Adapter konsumieren im Stand-by Modus praktisch keine Energie. Weil drahtlose Ladestationen dauernd am Netz angeschlossen bleiben, wäre es besonders wünschbar, wenn v.a. die Produkte mit den energieeffizientesten Netzgeräten die Gunst der Konsumenten finden würden.

Bei AC/DC-Netzteilen mit grösserem Energieverbrauch (bis max. 300 mW) ist hinsichtlich des Gesamtstromverbrauchs das Nutzerverhalten wichtig. Der Grund dafür ist die Tatsache, dass die Sendestationen bei aufgelegtem Endgerät (z.B. über Nacht) deutlich mehr Strom für den Stand-by Betrieb „benötigen“ als wenn sie ohne Empfangsantenne am Netz angeschlossen bleiben.

Man beachte: alle hier aufgelisteten Zahlen müssen als Grössenordnungen interpretiert und auch im Verhältnis zum Gesamtstromverbrauch in Haushalten gesehen werden. Figur 19 zeigt letzteres am Beispiel einiger ausgewählter Stromverbräuche von Elektrogeräten.

Sodann gilt es den Energieverbrauch von Induktionsladestationen, insbesondere den Mehrenergieverbrauch gegenüber kabelgestütztem Aufladen, für die Schweiz insgesamt abzuschätzen.



ELEKTROGERÄT	LEISTUNG	BETRIEBSSTUNDEN PRO JAHR	ENERGIEVERBRAUCH PRO JAHR
Gutes Handyladegerät	0,5 W	4000 h	2,0 kWh
LED-Lampe	6 W	750 h	4,5 kWh
Halogenlampe	50 W	750 h	37,5 kWh
LED-Fernseher	100 W	1000 h	100 kWh
Elektrovelo	500 W	100 h	50 kWh
Staubsauger	1400 W	50 h	70 kWh

Figur 19: Stromverbrauch ausgewählter Haushaltsanwendungen. Quelle: BFE (2016), S.4.

Nehmen wir für diesen Vergleich an, dass alle Mobiltelefonbesitzer (wir gehen von 8 Millionen aus, siehe auch: Brüniger, 2015) ihr Gerät nur noch mit WPT aufladen, wobei jede Person dafür eine eigene Station benützen würde. Mit diesen Annahmen (die in naher Zukunft kaum Realität werden) ergäben sich die in Tabelle 24 aufgelisteten Energieverbräuche (in GWh) pro Jahr. Der Mehrverbrauch durch WPT im Vergleich zu kabelgebundener Aufladung liegt in der Grössenordnung von 30 GWh (Annahme: um 60 GWh für WPT, um 30 GWh für Kabel). Das ist 1-2 Promill des schweizerischen Haushaltsstromverbrauchs von etwas über 17'000 GWh im Jahr 2014 (BFE, 2015). Für I+K (inklusive Unterhaltung) wird der Stromverbrauch der schweizerischen Haushalte mit ca. 1300 GWh (für 2014) beziffert. Der Mehrverbrauch betrüge, bezogen auf diesen Verwendungszweck, 2-3 %.

Beschreibung	Wire ^{best} UC 1	Wire ^{Norm} UC 2	WPT ^{max} UC 3	WPT ^{best} UC 4	WPT ^{opt} UC 5	WPT ^{norm} UC 6	WPT ^{bad1} UC 7	WPT ^{bad2} UC 8	WPT ^{worst} UC 9
Laden	21.4	21.4	24.7	26.8	29.2	29.2	40.2	40.2	40.2
Stand-by	0.5	13.4	4.0	4.7	23.4	32.1	23.4	32.1	59.6
Total	22.0	34.8	28.7	31.5	52.6	61.3	63.5	72.3	99.7

Tabelle 24: Jährliche Energieverbräuche in der Schweiz nach use cases (in GWh). Kabelgebundenes Laden: UC 1 und UC 2, drahtloses Laden (UC 3 bis UC 9)

5.7 Schlussfolgerungen

Beim Aufladen von elektronischen Kleingeräten, insbesondere Mobiltelefone, an kabellosen Ladestationen, wird mehr Strom konsumiert als beim kabelgebundenen Aufladen. Das liegt daran, dass die für das drahtlose Laden (WPT – Wireless Power Transfer) zusätzlich benötigten Sender- und Empfänger-spulen plus dazugehörige Elektronik verlustbehaftet sind.

Der Gesamtverbrauch beträgt über alles gesehen etwa das Doppelte des kabelgebundenen Ladens.

Ein zusätzlicher Aspekt betrifft das Nutzerverhalten. Im Stand-by Modus konsumieren Ladestationen deutlich mehr Strom, wenn ein Empfangsmodul aufgelegt ist, auch wenn die Batterie des aufgelegten Endgerätes vollgeladen ist. Der Gesamtverbrauch ist, wenn das Endgerät über Nacht auf dem Sende-modul liegt, etwa dreimal höher als bei kabelgebundenem Laden.



Aus technischer Sicht ist für den Stromverbrauch ganz generell (es betrifft also auch das konventionelle Laden) der Netzadapter zu beachten. Hier liegt das grösste Sparpotenzial. Die Unterschiede bei Adaptern übersteigen eine Grössenordnung (10-300 mW). Weil WPT-Stationen erst seit wenigen Jahren auf dem Markt sind, müssen sie die auch in der Schweiz gültigen Werte der Leistungsaufnahme von Adaptern aus der EU-Verordnung 178/2009 einhalten. Diese legen den maximalen Stand-by Verbrauch (Nulllast) bei 300 mW fest. Die getesteten Netzadapter alleine für sich genommen haben diese Norm erfüllt, in Kombination mit den Sendern – also als Ladestation insgesamt – liegen nicht alle Fabrikate unterhalb dieses Wertes.

In einer optimalen Konstellation mit energieeffizientem Adapter und entfernen des Endgerätes nach erfolgter Aufladung sowie tiefem Verbrauch der Sendemodule konsumieren drahtlose Ladestationen im Stand-by Betrieb zwar immer noch mehr Energie als steckengelassene Netzadapter, aber insgesamt gesehen kommt dann der Verbrauch unter 100 mW liegen.

Anders sieht es im worst-case aus. Schlechte Netzgeräte und Elektronikmodule, in Kombination mit einem nach dem Aufladen liegengelassenen Endgerät, führen zu einem substanziellen Standby-Verbrauch. Dieser kann dann mehr betragen als für das Aufladen der Batterie an Strom benötigt wird.

Der Batterieladevorgang selber ist im Falle von WPT etwa 20-50 % weniger effizient als beim Laden über Kabel (75 % vs. 55-60 %). Eine schlechte Effizienz liegt insbesondere dann vor, wenn das Endgerät nicht gut zentriert auf der Sendespule liegt und die Energieübertragung deshalb nicht optimal ist. Bei stark dezentrierter Spule (> 2-3 cm) bricht die Übertragung automatisch ab.

Die Variabilität zwischen den WPT-Produkten ist, wenn man vom Netzadapter absieht, mässig gross (um Faktor 2). Das liegt daran, dass in den Standards die wichtigsten Parameter festgelegt sind. Hinsichtlich des Verbrauchs der elektronischen WPT-Module haben wir Verbräuche zwischen 50-100 mW gemessen.

Hinsichtlich des Mehrverbrauchs von WPT gegenüber konventionellem Laden via Kabel kommt man bei angenommener 100 %iger Durchdringung der Technologie im Haushaltsbereich in die Grössenordnung von einem oder einiger weniger Promille des Stromverbrauchs der Haushalte. In absoluten Zahlen würde der Mehrverbrauch in der Schweiz um die 30 GWh pro Jahr betragen.

6. EMF-Messungen

Für ausgewählte Anordnungen wurden die magnetischen Immissionen gemessen. Als Resultate zeigen wir Feldwerte (magnetische Flussdichten) an ausgewählten Orten. Zur Beurteilung der Immissionen wurden auch worst-case Messungen vorgenommen und mit Hilfe von Simulationen (siehe 7) auf ihre Wirkung auf den Körper hin (induzierte elektrische Felder; siehe dazu auch 2.2) untersucht.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass wir hier primär Feldwerte diskutieren. Nur in Ausnahmefällen referenzieren wir auf Ströme. Man kann und darf auch nicht direkt von den Strommessungen zum Energieverbrauch auf Magnetfeld-Immissionen schliessen, denn die Ströme in der Sendespule sind direkt mit den konsumierten Netzströmen verknüpft. Mit Hilfe von Resonanzeffekten werden die Spulenströme erhöht, um gute Wirkungsgrade des Energietransfers zu erhalten. Letzteres wiederum hängt von der Kopplung der Spulen ab, die mit Hilfe der Steuerungselektronik über die Frequenz beeinflusst werden kann. Insgesamt kann im Qi-Standard der Strom in der Sendespule bis ca. 3 A betragen, also etwa das Dreifache des typischerweise über USB-Kabel bezogenen Netzstroms.

6.1 Messaufbau

6.1.1 Messausrüstung

Für die EMF Messungen wurde eine geschirmte magnetische Feldsonde (Beehive Electronics, Typ 100C, siehe Figur 20) verwendet.



Figur 20: Feldsonden für die Messung magnetischer und elektrischer Feldkomponenten über verschiedene Frequenzbereiche (Beehive Electronics, Sebastopol, USA). Für die Magnetfeldmessungen wurde die grosse Loop Sonde (zweite von oben) verwendet.

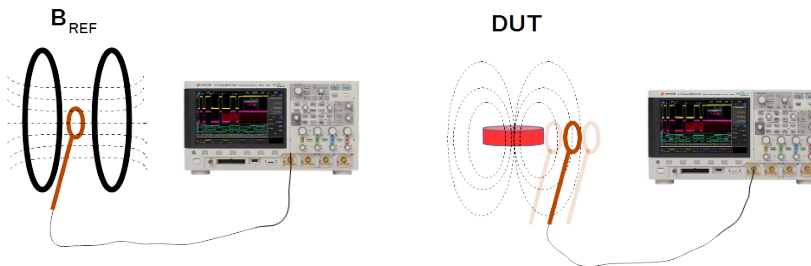
Die Feldstärke wurde mithilfe eines Spectrum Analyzer ermittelt, weil damit alle im Signal vorkommenden Frequenzkomponenten gemessen werden können. Die verwendete Messausrüstung ist unten in Tabelle 25 zusammengestellt.

Bezeichnung	Hersteller	Beschreibung
100C	Beehive	B-Field Loop Probe
DSO-X 3034A	Agilent Technologies	Digital Oszilloskop
MS2606A	Anritsu	Spectrum Analyzer

Tabelle 25: Verwendete Messausrüstung

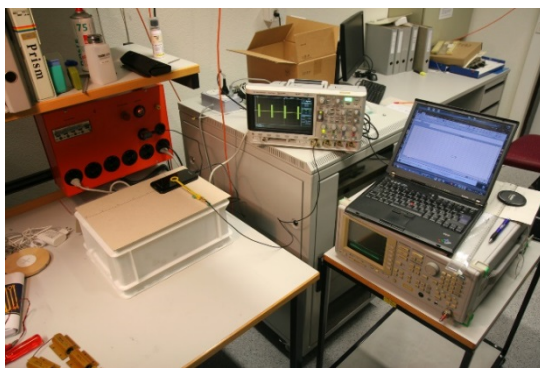
6.1.2 Messprotokoll

Die Messsituationen sind in Figur 21 skizziert. Vor der Messung wird eine Kalibrierung der magnetischen Messsonde mit einer bekannten Feldstärke (B_{REF}) in einer Helmholtzspule durchgeführt. Dank der Kalibrierung können dann die gemessenen Werte am DUT in die entsprechenden magnetischen Flussdichten umgerechnet werden.



Figur 21: Schematische Darstellung der Anordnung für die magnetischen Feldstärkemessungen.

Die Messungen wurden sowohl im Zeitbereich wie im Frequenzbereich durchgeführt. Die räumliche Lage wurde mit einem Koordinatensystem festgelegt: die Mitte der Sendeeinheit (das Spulenzentrum) liegt im Ursprung des Koordinatensystems. Die x-Koordinate verläuft nach links (vgl. mit Figur 22, rechts), die y-Koordinate parallel zur Sonde in Richtung Kabel und die z-Koordinate ab Oberfläche Sendeeinheit nach oben. Die Gesamtfeldstärke wurde aus den Einzelwerten der Messungen in den drei Raumebenen berechnet. Wegen des radialen Aufbaus der Spulen führten wir die horizontalen Abstandsmessungen nur in x-Richtung durch. Bei aufgelegtem Endgerät liegt diese parallel zur Schmalseite der Mobiltelefone.



Figur 22: Messaufbau für die Magnetfeldmessungen. Übersicht und Detail der Messanordnung

6.1.3 Messunsicherheit

In Tabelle 26 sind die Unsicherheiten des Messaufbaus für die Magnetfeld-Messungen aufgeführt. Diese stellen sich aus den Beiträgen der verwendeten Komponenten und Geräte zusammen. Der grösste Unsicherheitsfaktor betrifft allerdings die Positionierung der Magnetfeldsonde. Insbesondere in der Nähe der Sendespulen sind die Magnetfelder inhomogen, da die Feldstärke mit zunehmendem Abstand zur Quelle sehr rasch abnimmt. Bereits kleine Verschiebungen der Messsonde bewirken in

diesem Bereich eine relativ starke Veränderung der Messwerte. Die Grössenordnung dieser Positionierungsunsicherheit liegt im Bereich von ± 3 dB und übersteigt damit diejenige der technisch bedingten Unsicherheiten (Tabelle 26).

Komponente	Ursache	Messunsicherheit (dB)
Loop Sonde	Kalibration	± 1.5
Kabel + Attenuator	Unsicherheit Dämpfungsfaktor	± 0.2
Spectrum Analyzer	Kalibrierung Amplitude und Frequenzanzeige	± 1

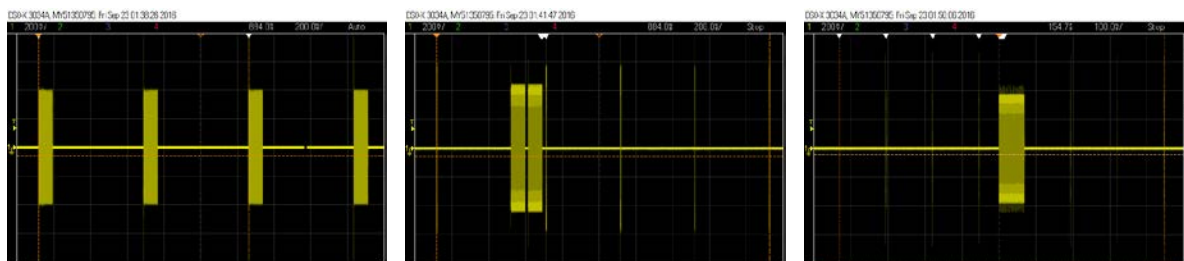
Tabelle 26: Messunsicherheit (technische Komponenten)

6.2 Ergebnisse

6.2.1 Stand-by Aktivität

Bei den Effizienzmessungen konnte beobachtet werden, dass die jeweiligen Ladestationen eine z.T recht hohe Stromaufnahme aufweisen, auch wenn keine Empfangsspule auf dem Sendemodul liegt. Diese Aktivität ist dadurch begründet, dass die Ladestationen jederzeit in der Lage sein müssen, die Anwesenheit eines Empfängers zu detektieren um in den vollen Betrieb schalten zu können. Im Qi Standard geschieht dies mittels einem periodisch ausgesendeten «digital Ping». Gemäss Qi Spezifikation (siehe 3.2.2) besteht ein solcher Ping aus einem bis zu 65 ms langen Impuls bei voller spezifizierter Sendeamplitude des jeweiligen Power Transmitter Designs.

Auch wenn die Pulse jeweils recht kurz sind, ist das Maximum der Flussdichte an der Oberfläche der Sendeeinheit in derselben Grössenordnung wie während des Ladebetriebs zwischen Sende- und Empfangsspule. Im Unterschied zum Laden ist das Feld im Stand-by (oder idle) Betrieb allerdings nicht durch eine Empfangseinheit abgeschirmt, so dass diese Felder hinsichtlich Immissionen und Expositionen besonderer Beachtung erfordern. Wie in Figur 23 zu sehen ist, sind die Ping Pulse bei allen Qi-Geräten zu beobachten. Die Häufigkeit der Pulse variiert jedoch deutlich zwischen den Herstellern. Beim AirFuel Standard ist ohne Empfänger hingegen weder im Zeit- noch im Frequenzbereich irgendein Magnetfeld messbar. Der bei den Strommessungen gefundene vergleichsweise hohe Stand-by Stromverbrauch (bei aufgelegtem Empfänger) wird also nicht durch die Sendespule verursacht, sondern durch die Steuerungselektronik.



Figur 23: Gemessene magnetische Aktivität im idle-Betrieb: DUT-QiS1, DUT-QiS3, DUT-QiS2 (vlnr)

6.2.2 Signalform

In Figur 24 sind die gemessenen Signalformen verschiedener Sender im Zeitbereich abgebildet. Die gelbe Kurve ist das von der Magnetfeldsonde aufgenommene Signal. Da das Signal einer B-Feld Sonde der zeitlichen Ableitung der magnetischen Flussdichte entspricht, wurde die ursprüngliche Signalform mittels numerischer Integration (violett) rekonstruiert. Die gemessenen Kurven sind alle sehr ähnlich zueinander. Auch das nach dem AirFuel Standard arbeitende System weist, abgesehen von der höheren Arbeitsfrequenz, dieselbe Signalcharakteristik auf wie die Qi Systeme.

Die Signalform des B-Felds ist tendenziell dreieckförmig und somit spektral recht «sauber». Im Spektrum sind zwar viele harmonische Frequenzanteile vorhanden, diese sind aber allesamt wesentlich schwächer als die Komponente auf der Grundfrequenz.



Figur 24: Signalformen: DUT-QiS3, DUT-QiS1, DUT-QiS2, DUT-AFS1 (ol nach ur)

6.2.3 Feldstärke zwischen den Spulen

Setup: die Sonde liegt im Sandwich zwischen Sende- und Empfangsspule, der vertikale Abstand ist minimal. Der Durchmesser der Messsonde ist kleiner als der Qi-Spulendurchmesser, so dass Mitteleffekte (Unterschätzung der Feldstärke) nicht sehr stark ins Gewicht fallen. Die Messungen wurden mit verschiedenen Lasten an der Empfängerspule vorgenommen, so dass sich unterschiedliche Ladeströme ergaben. Die Minimallast resultiert aus dem Verbrauch der Steuerungselektronik der Empfangseinheit (ohne Ladestrom in die Batterie). Sie kann nicht leicht quantifiziert werden, liegt aber in der Grössenordnung von 100-200 mA. Die maximale Last während des Ladebetriebs kann, wie eingangs erwähnt bis 3 Ampère (rms) betragen.

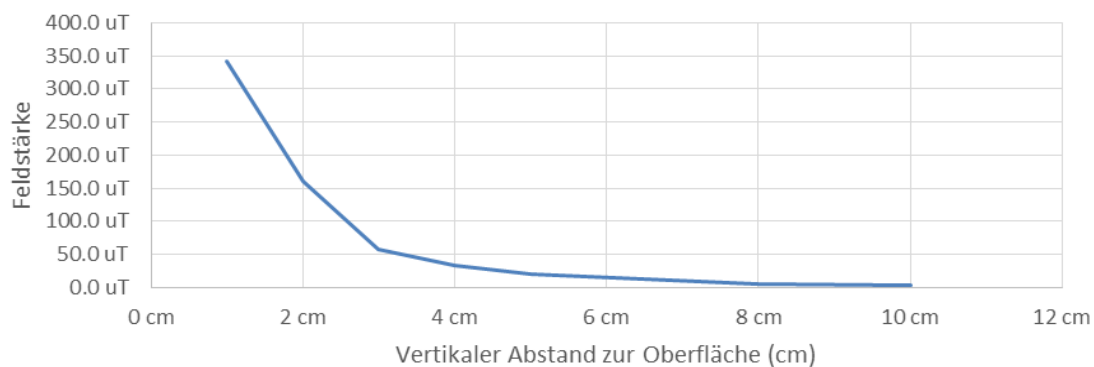
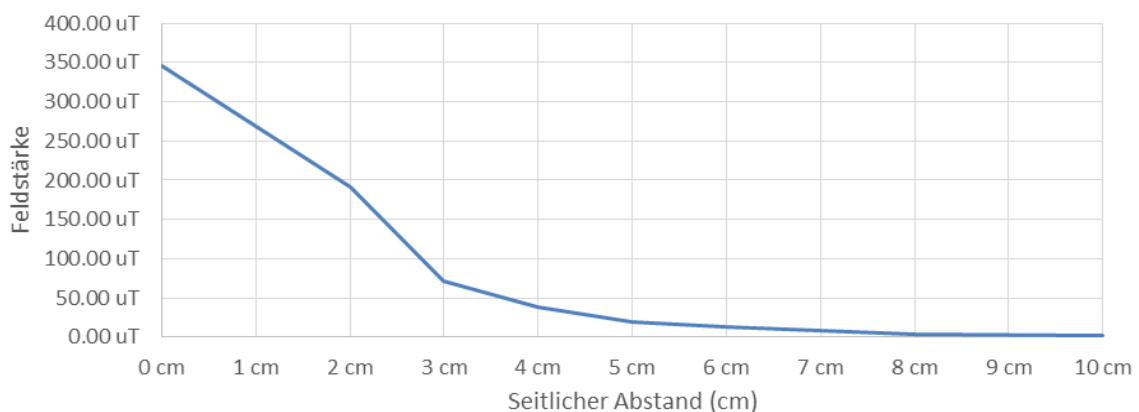


Sender	Empfänger	Last an Empfänger	RMS Feldstärke (mT)	Frequenz (kHz)
DUT-QiS2	DUT-QiE1	Minimallast	1.12	141
DUT-QiS2	DUT-QiE1	500 mA	1.14	142
DUT-QiS2	DUT-QiE3	Minimallast	1.49	133
DUT-QiS2	DUT-QiE3	500 mA	1.28	139

Tabelle 27: Feldstärke zwischen TX und RX Spule während des aktiven Betriebs

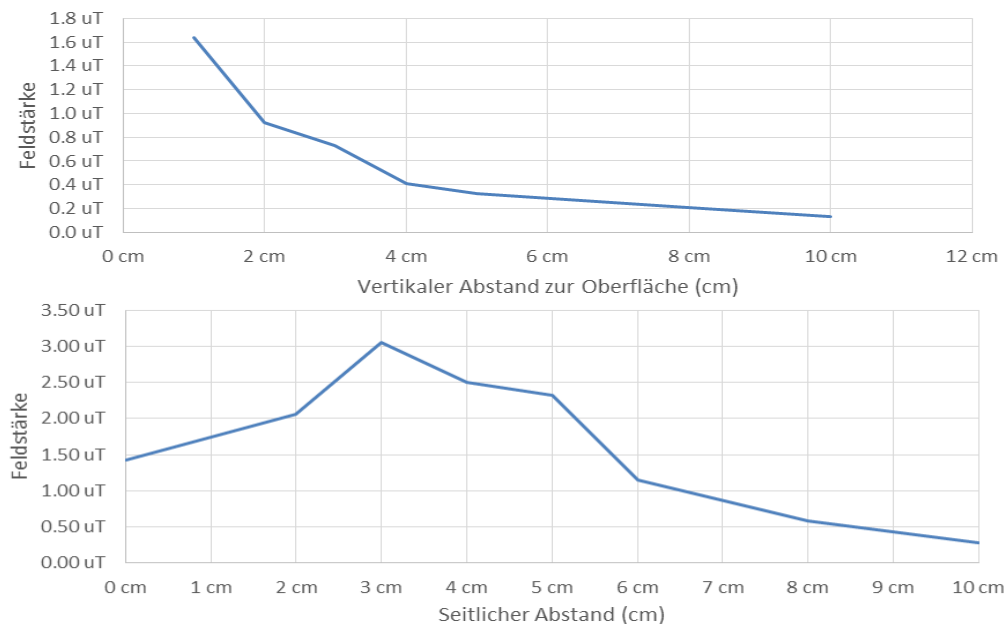
6.2.4 Feldstärke bei aufgelegter Empfangsspule (keine Abschirmung durch Endgerät)

Diese Konfiguration kommt im realen Betrieb nicht vor. Sie diene uns zur Kalibrierung der Simulationen. Es war anzunehmen, und die Messresultate (Figur 25 und Figur 26) bestätigen das, dass die Feldstärken vergleichsweise gross sind, dass sie unterhalb derjenigen zwischen den Spulen liegen, und dass sie mit zunehmendem Abstand vom Zentrum schnell kleiner werden. Die Figuren zeigen die Messwerte in Abhängigkeit des Abstands vom Sendespulenzentrum in vertikaler und in horizontaler Richtung. Verwendete Geräte: DUT-QiS5 und DUT-QiE2.

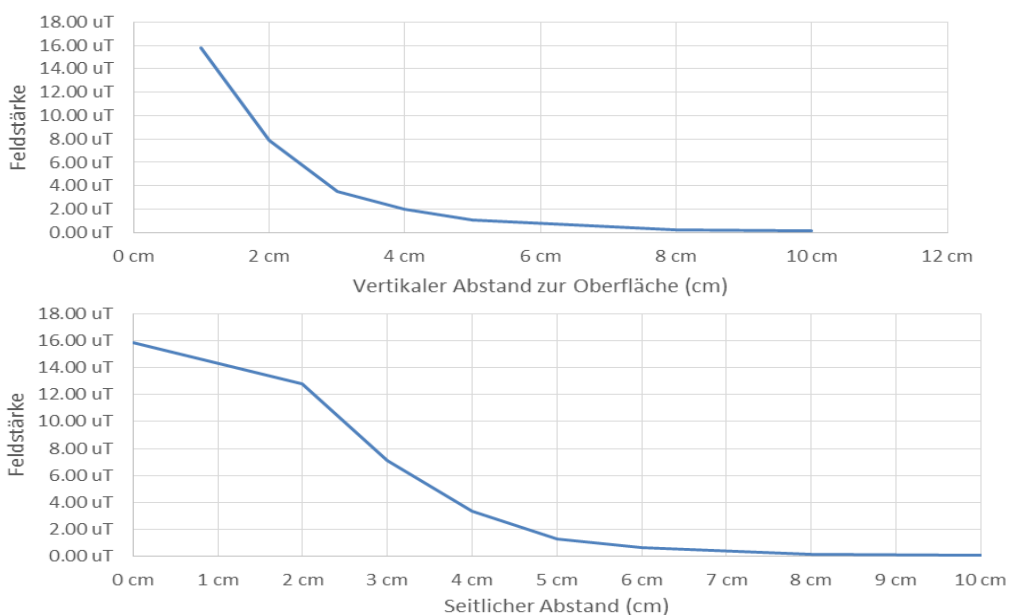
**Figur 25: Magnetische Flussdichten (in μT) während des Ladevorgangs in vertikaler Richtung, nur Empfängerspule (keine Abschirmung durch Endgerät)****Figur 26: Magnetische Flussdichten (in μT) während des Ladevorgangs in horizontaler Richtung, nur Empfängerspule (keine Abschirmung durch Endgerät)**

6.2.5 Streufelder im Ladebetrieb (Abschirmung durch Endgerät)

Gemessen wurden die Streufelder in Abhängigkeit vom Abstand zum Mittelpunkt der Sendespule in vertikaler und in horizontaler Richtung. Es wurde eine Konfiguration des Qi-Standards (DUT-QiS3 und DUT-QiE4; Figur 27) und eine des AirFuel Standards (DUT-AFS1 und DUT-AFE1; Figur 28) verwendet. Die Werte für die Flussdichten sind zeitlich gemittelt. Zudem wurden auch worst-case Abschätzungen (Feldmaxima oder Hot Spots im Raum) bestimmt und gemessen. Tabelle 28 zeigt diese Werte. Man beachte: Sobald ein Endgerät auf der Sendekonsole liegt, wird das Magnetfeld abgeschirmt, auch bei Plastikhüllen. Verantwortlich dafür sind Leiterplatten und metallische Beschichtungen im Handyinneren.



Figur 27: Magnetische Flussdichten (in μT) während des Ladevorgangs in vertikaler (oben) und in horizontaler (unten) Richtung für die Qi-Konfiguration DUT-QiS3 / DUT-QiE4



Figur 28: Magnetische Flussdichten (in μT) während des Ladevorgangs in vertikaler (oben) und in horizontaler (unten) Richtung für die AirFuel-Konfiguration DUT-AFS1 / DUT-AFE1



Sender	Empfänger	Bedingung	Bemerkung	Feldstärke (μT)	Frequenz (kHz)
DUT-QiS3	DUT-QiE4	mittig platziert		12.9	136
DUT-QiS3	DUT-QiE4	1 cm offset		18.1	117
DUT-QiS3	DUT-QiE4	1.5 cm offset		24.1	113
DUT-QiS2	DUT-QiE2	mittig platziert	Nur Empfängerspule	398	138
DUT-QiS2	DUT-QiE2	1 cm offset	Nur Empfängerspule	496	130
DUT-QiS2	DUT-QiE2	1.5 cm offset	Nur Empfängerspule	Ladeabbruch	-
DUT-QiS2	DUT-QiE2	mittig platziert	Aluplatte auf Empfänger	25.3	132
DUT-QiS1	DUT-QiE4	mittig platziert		10.6	132
DUT-QiS1	DUT-QiE4	1 cm offset		13.7	134
DUT-QiS1	DUT-QiE4	1.5 cm offset		18.4	121
DUT-AFS1	DUT-AFE1	mittig platziert		24.8	279

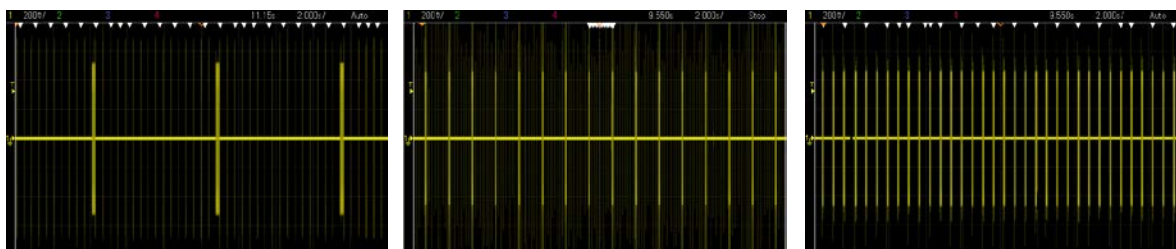
Tabelle 28: Maximale magnetische Flussdichten

6.2.6 Streufelder im Stand-by Betrieb (keine Abschirmung durch Endgerät)

Tabelle 29 zeigt die peak-Werte und die rms-Mittelwerte im Stand-by Betrieb der Sendestationen. Der AirFuel Standard, fehlt, weil er im idle Mode keine Signale aussendet. Die Signalverläufe der vermessenen Qi-Sender sind in Figur 29 wiedergegeben.

Sender	Feldstärke (peak) (μT)	Feldstärke (rms) (μT)	Duty Cycle (%)	Frequenz (kHz)
DUT-QiS3	1062	193	3.3	151
DUT-QiS2	620	145	5.5	177
DUT-QiS1	348	130	14.0	175

Tabelle 29: Maximale und rms Flussdichten von Qi-Stationen im Stand-by Betrieb



Figur 29: Signale im Stand-by Betrieb (Dauer: 20 s; links: DUT-QiS3, Mitte: DUT-QiS2, rechts: DUT-QiS1)



6.3 Diskussion

Die Magnetfelder der Energieübertragung nehmen mit zunehmender Distanz vom Spulenzentrum sehr schnell ab. Das liegt einerseits an der Charakteristik des sog. Nahfeldes selber, andererseits aber auch an den eingebauten Abschirmungen. In 10 cm Distanz betragen die Felder in der Grössenordnung weniger als 1 μT . Die Maximalfeldstärken während des Ladebetriebs belaufen sich unmittelbar an der Oberfläche der Empfangsgeräte auf 10-25 μT .

Die Elektronik der Endgeräte (Leiterplatten, Beschichtungen) ist ein wirkungsvoller Schutz vor Streufeldern. Die Empfangsspulen selber haben dank den verbauten Ferriten ebenfalls deutliche Abschirmwirkungen.

Die Emissionen sind nicht stark von der Last am Empfänger abhängig, weil die Regelung des Ladestroms unter anderem durch kontrolliertes Verstimmen der Sendefrequenz erreicht wird. Dadurch nimmt die übertragene Leistung ab, der Strom in der Sendespule (und somit das erzeugte Magnetfeld) bleibt aber mehr oder weniger konstant.

Die Sendeeinheit ist auch im Leerlauf aktiv (Pings). Die dabei erreichten (Spitzen- und rms) Feldstärken an der Oberfläche des Ladegeräts können mehrere 100 μT betragen. Das gilt allerdings nicht für den AirFuel Standard, dessen Sendespule im Stand-by Betrieb nicht bestromt wird.

Zur Beurteilung der Immissionen im idle-Modus sind die in Kapitel 2.2 erörterten Produktvorschriften nur bedingt nützlich. Gemäss Standard darf bei lokaler (inhomogener) Exposition ein Kopplungsfaktor angewendet werden; er trägt dem Umstand Rechnung, dass bei körpernahen Quellen die Exposition sehr inhomogen ist und deshalb auch bei lokal hoher Einstrahlung – oberhalb der offiziellen Referenzwerte – die induzierten Ströme unbedenklich sein können; siehe: (Sunohara, Hirata et al. 2015), (Nadakuduti, Douglas et al. 2015). Bei einem Faktor 5-6 (üblich für Produkte wie die hier diskutierten kabellosen Ladestationen) darf somit die Exposition je nach Frequenz zwischen 20 und 40 μT betragen (die Referenzwerte liegen im hier relevanten Frequenzbereich zwischen 3.35 und 6.25 μT , bezogen auf den SAR-Basisgrenzwert). Bei den vermessenen Ladestationen sind im Leerlaufbetrieb die Flussdichten jedoch deutlich höher: der höchste Peakwert betrug bei einem Produkt um 1 mT, der entsprechende rms-Wert knapp 200 μT . Bei Überschreitung der Referenzwerte ist es nötig, die im Gewebe induzierten elektrischen Feldstärken bzw. die SAR zu berechnen und mit den in der ICNIRP- oder IEEE-Empfehlung festgelegten Maximalwerten zu vergleichen. Erst dieser Vergleich gibt gültig Auskunft über die Grenzwertkonformität der getesteten Produkte. Das wird in Kapitel 7 mit Hilfe von worst-case Simulationen gemacht.

7. EMF-Simulationen

Mit den numerischen Modellen wurden einerseits Fragen zu prinzipiellen Effekten – etwa bezüglich Lageverschiebungen (dezentrierte Positionen) oder Unterschieden im Spulendesign – simuliert und entsprechende generische (qualitative) Aussagen zu solchen Effekten formuliert. Andererseits dienten die Modellrechnungen auch dazu, die Wirkung der Magnetfelder im Körperinnern abzuschätzen. Als Beurteilungsgrundlage dafür wurden die Basisgrenzwerte (siehe 2.2.2) zu Rate gezogen und es wurde mit worst-case Feldstärken simuliert.

7.1 Simulationssoftware

Für die numerischen Modellierungen wurden verschiedene Softwarepakete evaluiert. Die Anforderungen an die Simulationsplattform sind ihre Eignung für Magneto-quasi-statische Simulationen von Situationen, die auch Ferrite und biologische Gewebe enthalten können. Dies setzt ein Simulationsmodul voraus, das einerseits in der Lage ist, verschiedene Ferrite innerhalb des Simulationsvolumens zu berücksichtigen und andererseits die induzierten Ströme in biologischen Geweben zu berechnen. Für diesen Zweck wurde die Simulationsplattform Sim4Life (ZMT, Zürich) gewählt.⁸ Zu Beginn stand nur eine Option für verschiedene Permeabilitäten als experimentelle Version zur Verfügung. Der Release der offiziellen Version der Plattform ist gegen Schluss unserer Projektlaufzeit erfolgt.

7.2 Ergebnisse

7.2.1 Modellierung und Simulation der Sendeeinheit

Die Sendeeinheit wurde gemäss Qi-Standard modelliert. Der Aufbau und die Abmessungen sind in Figur 30 abgebildet. Im Sinne einer worst-case Betrachtung wurde ein 200 kHz Sinus-Signale verwendet.

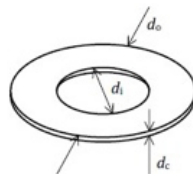


Figure 3-66: Primary Coil of Power Transmitter design A17

Table 3-49: Primary Coil parameters of Power Transmitter design A17

Parameter	Symbol	Value
Outer diameter	d_o	43 ± 0.5 mm
Inner diameter	d_i	20.5 ± 0.5 mm
Thickness	d_c	2.1 ± 0.5 mm
Number of turns per layer	N	10
Number of layers	–	2

3.2.17.1.2 Shielding

As shown in Figure 3-67, soft-magnetic material protects the Base Station from the magnetic field that is generated in the Primary Coil. The Shielding extends to at least 2 mm beyond the outer diameter of the Primary Coil, has a thickness of at least 0.5 mm, and is placed below the Primary Coil at a distance of at most $d_s = 1.0$ mm. This version 1.1.2 of the System Description Wireless Power Transfer, Volume I, Part 1, limits the composition of the Shielding to a choice from the following list of materials:

⁸ www.zurichmedtech.com/sim4life/

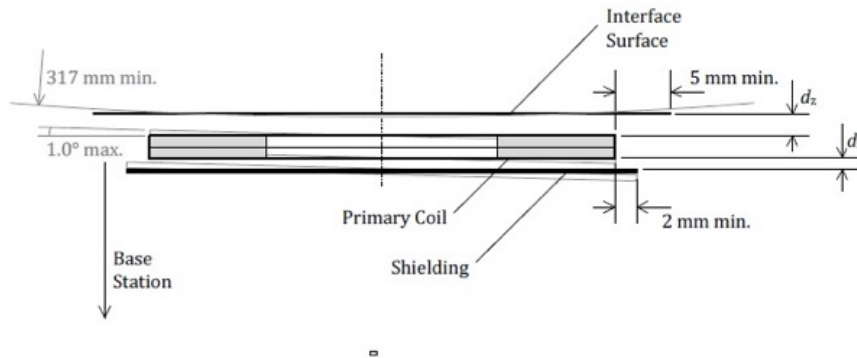


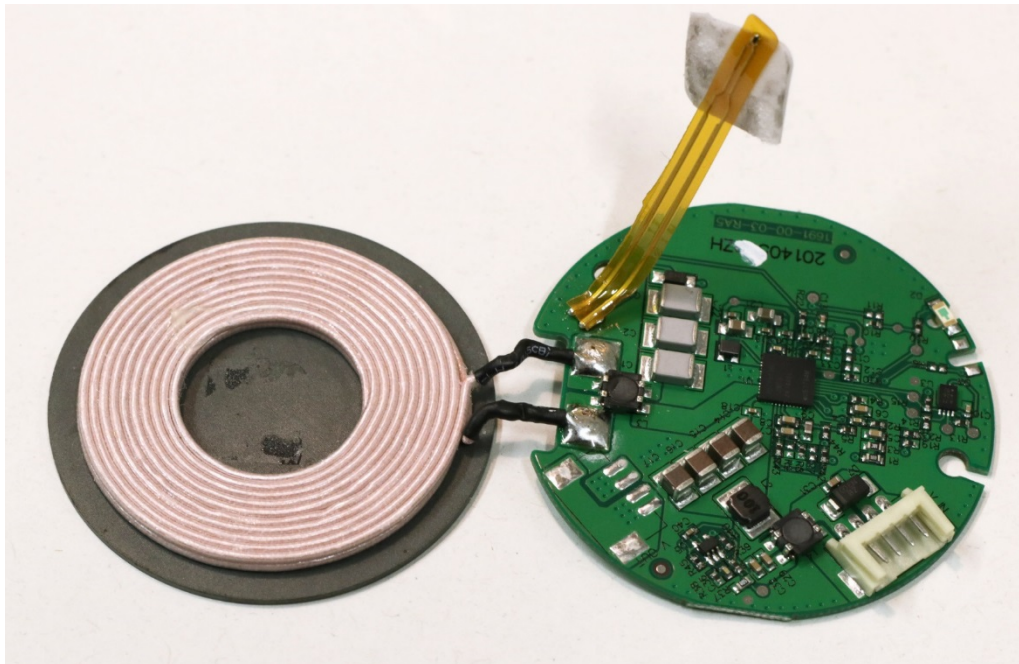
Figure 3-67: Primary Coil assembly of Power Transmitter design A17

3.2.17.1.3 Interface Surface

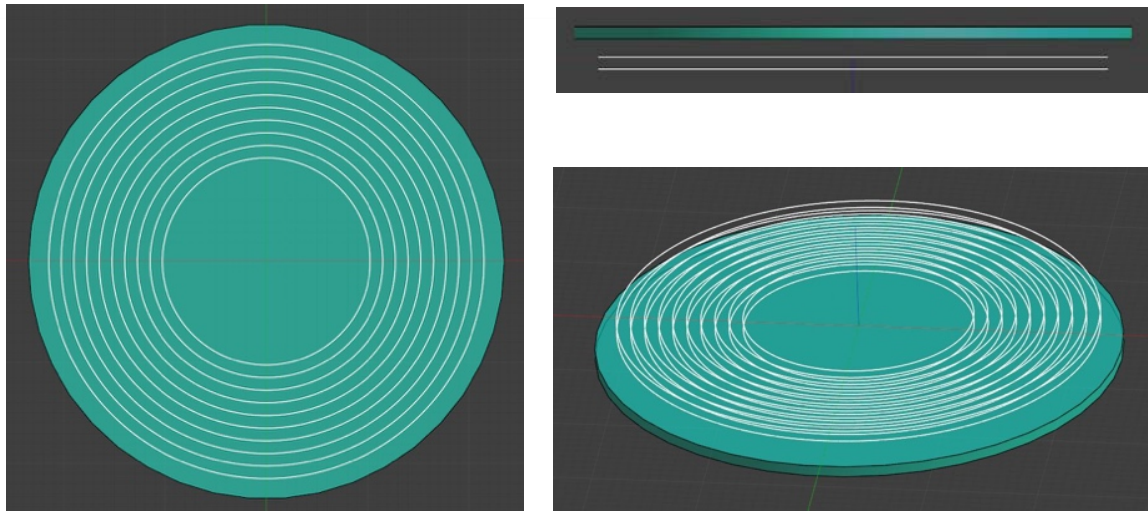
As shown in Figure 3-67, the distance from the Primary Coil to the Interface Surface of the Base Station is $d_z = 7^{+0.5}_{-0.5}$ mm, across the top face of the Primary Coil. In addition, the Interface Surface of the Base Station extends at least 5 mm beyond the outer diameter of the Primary Coil. (Informative) This Primary-Coil-to-Interface-Surface distance implies that the tilt angle between the Primary Coil and a flat Interface Surface is at most 1.0°. Alternatively, in case of a non-flat Interface Surface, this Primary-Coil-to-Interface-Surface distance implies a radius of curvature of the Interface Surface of at least 317 mm, centered on the Primary Coil. See also Figure 3-67.

Figur 30: Aufbau und Abmessungen im Qi-Standard

Die zwei Lagen mit je 10 Windungen (Figur 31) sind als konzentrische Kreisströme modelliert. Die Abstände und die Dicke der Ferritabschirmung sind gemäss Standard ausgeführt. Das numerische Modell ist in Figur 32 abgebildet.



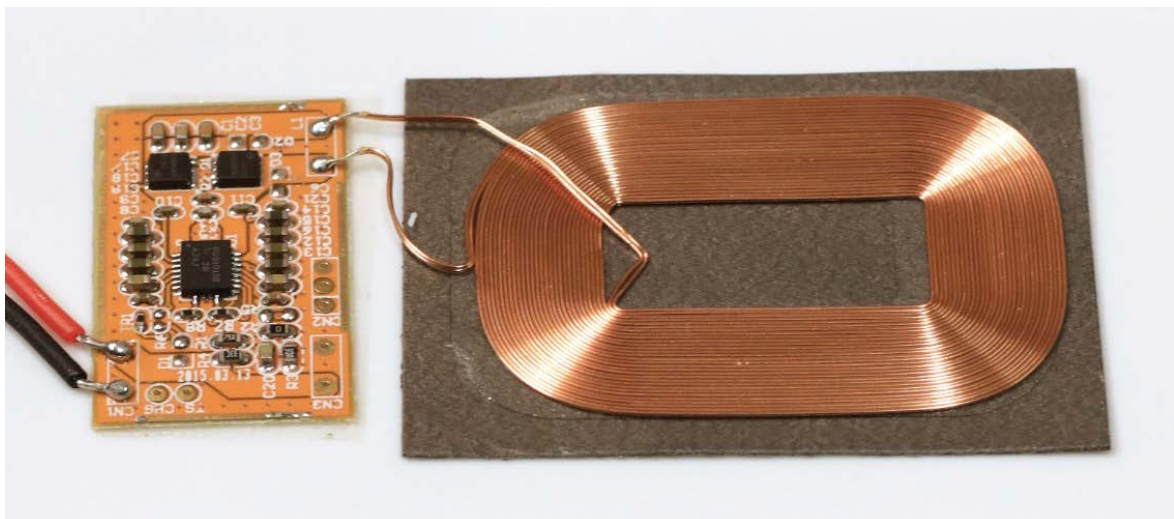
Figur 31: Foto der Sendeeinheit wie sie in den Basisstationsmodulen eingebaut werden



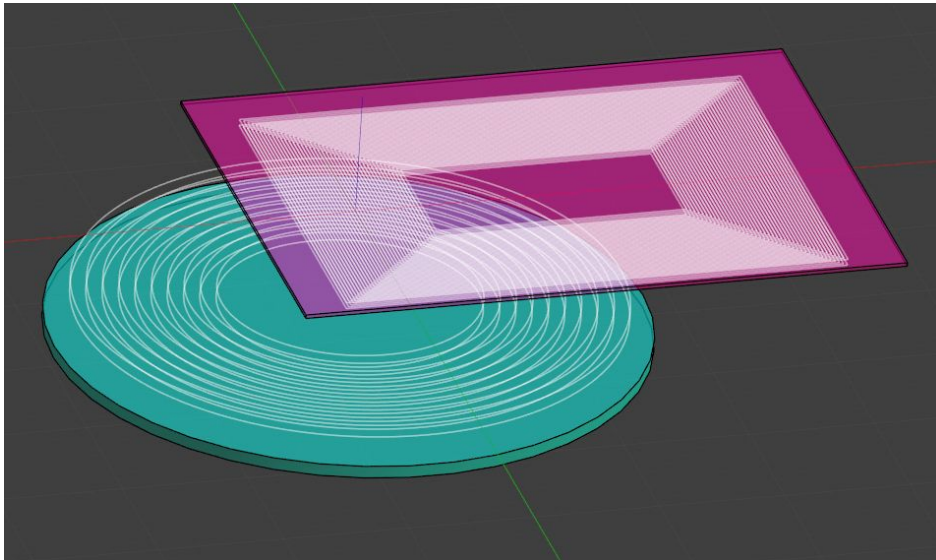
Figur 32: Modell der Sendeeinheit, Ansicht von oben (links), von schräg oben (rechts unten) und von der Seite (rechts oben) gemäss Standard

7.2.2 Modellierung von Sende und Empfangseinheit

Um das Verhalten des Gesamtsystems zu simulieren wurde eine Variante der Empfangsseite modelliert. In Figur 33 ist die Empfangsspule abgebildet. Figur 34 zeigt das entsprechende numerische Modell der Empfängerspule inklusive der Ferritfolie. Die Konfiguration wurde für verschiedene Verschiebungen der Empfangsspule gegenüber der Sendeeinheit gerechnet.



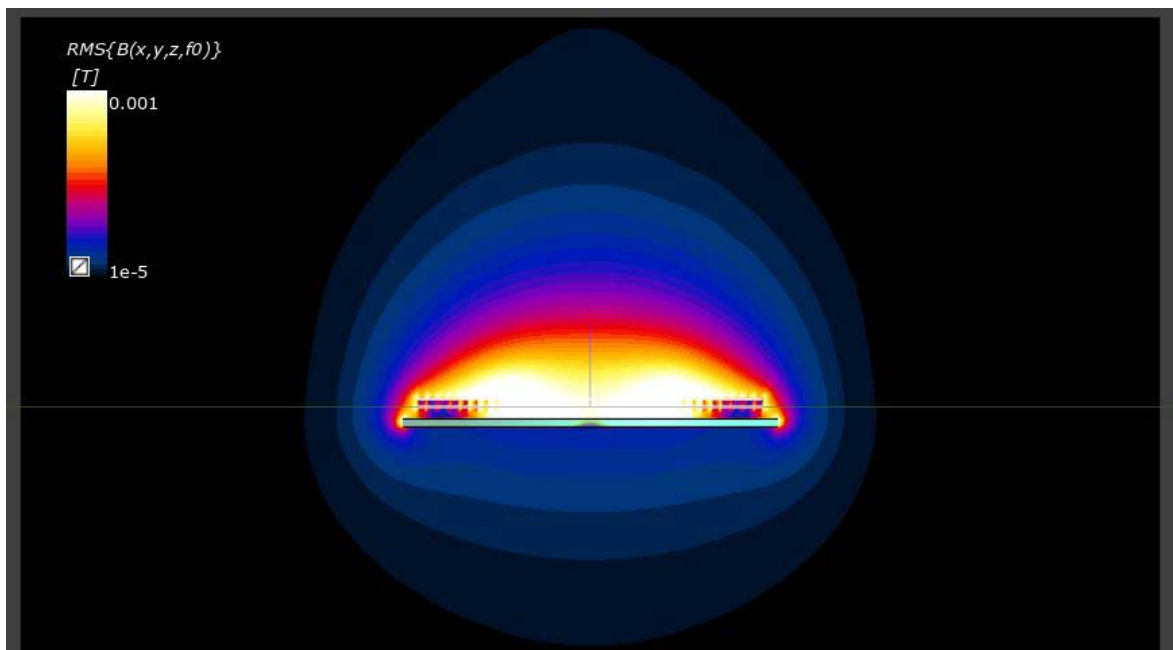
Figur 33: Foto der Empfangseinheit wie sie für die Simulationen verwendet wird



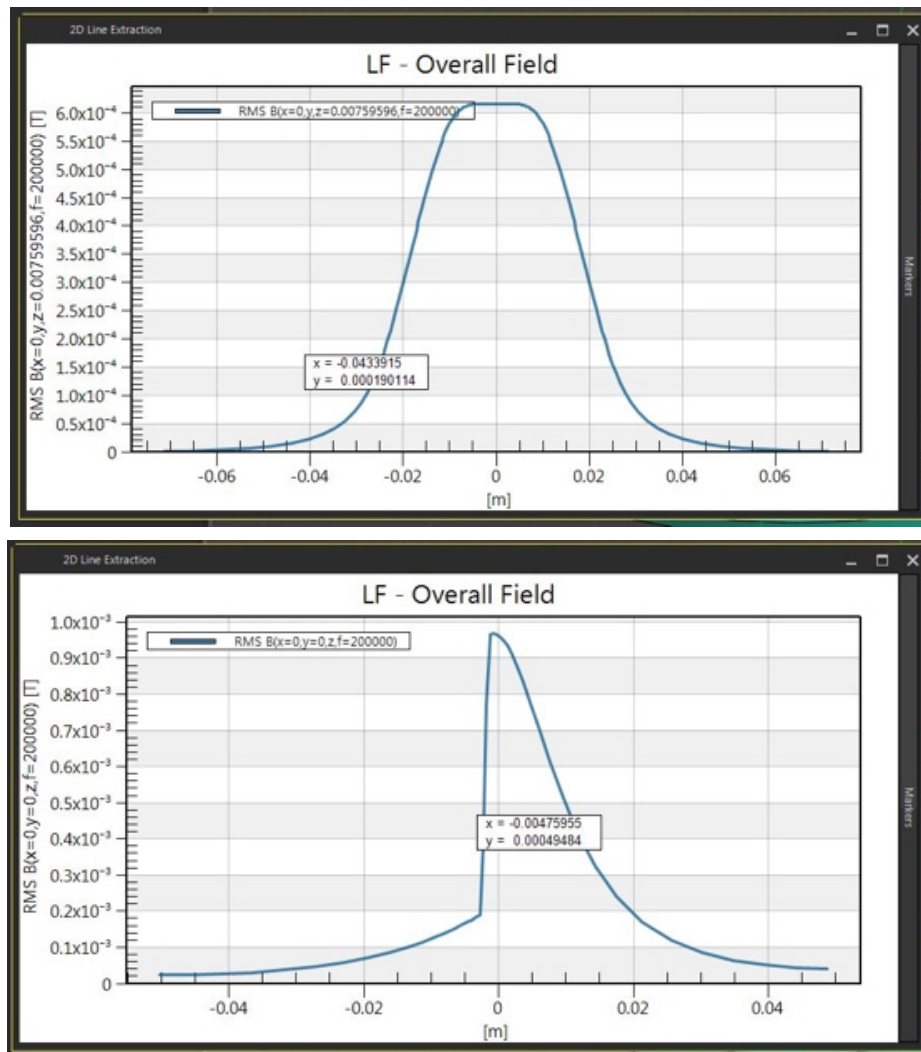
Figur 34: Beispiel einer Konfiguration von Transmitspule, Shield und Empfangsspule mit Ferrit-Folie im numerischen Modell

7.2.3 Feldsimulationen

Im Folgenden präsentieren wir die Simulationsergebnisse der modellierten Magnetfeldverteilungen. Die Modellierungen wurden mit 1 A Spulenstrom gerechnet. Die Diskussion der Ergebnisse folgt in einem eigenen Abschnitt. Zunächst das Ergebnis der Feldverteilung um die Sendespule:

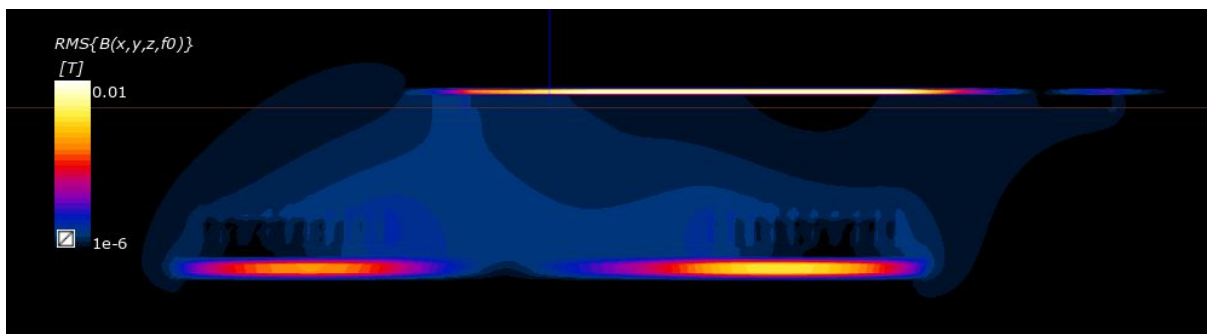


Figur 35: B-Feldverteilung der Sendespule in der zentralen Ebene (rms-Wert in Tesla)

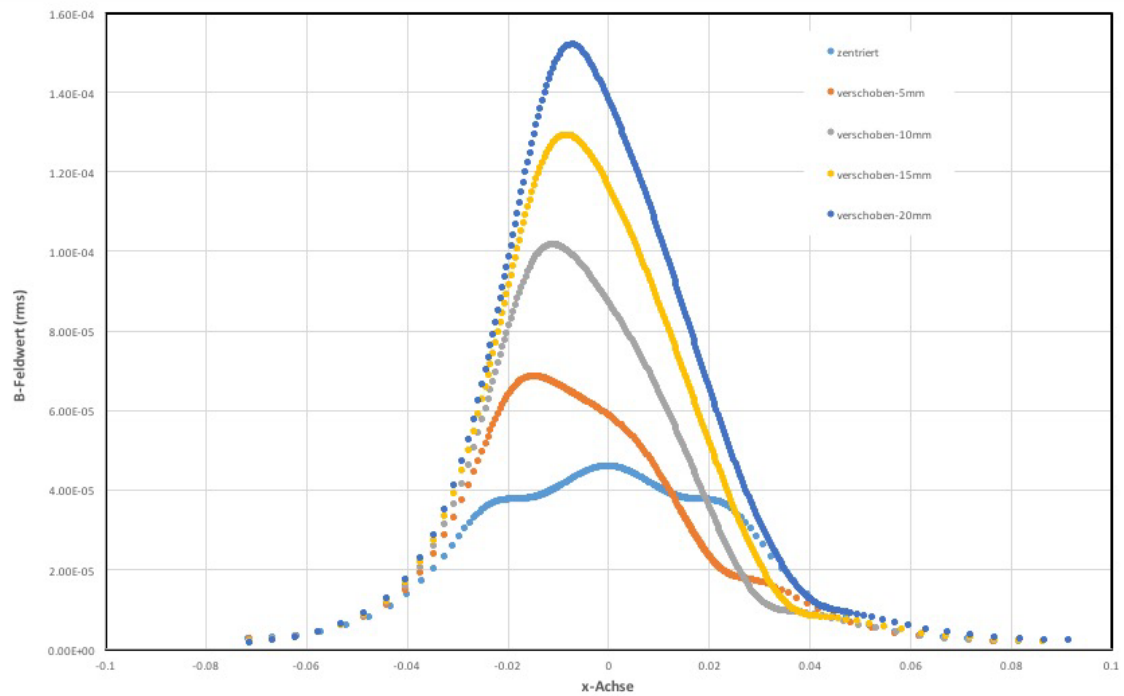


Figur 36: Feldverteilung 7 mm (gemäss Standard) über der Sendeeinheit (oben) und auf der zentralen Achse (vertikal) durch die Sendeeinheit (unten)

Die nachfolgenden Figuren zeigen die Resultate der Modellierung von Sende und Empfangsspule. In Figur 37 ist die Feldverteilung dargestellt, wenn die Empfangsspule ca. 1.5 cm verschoben ist.

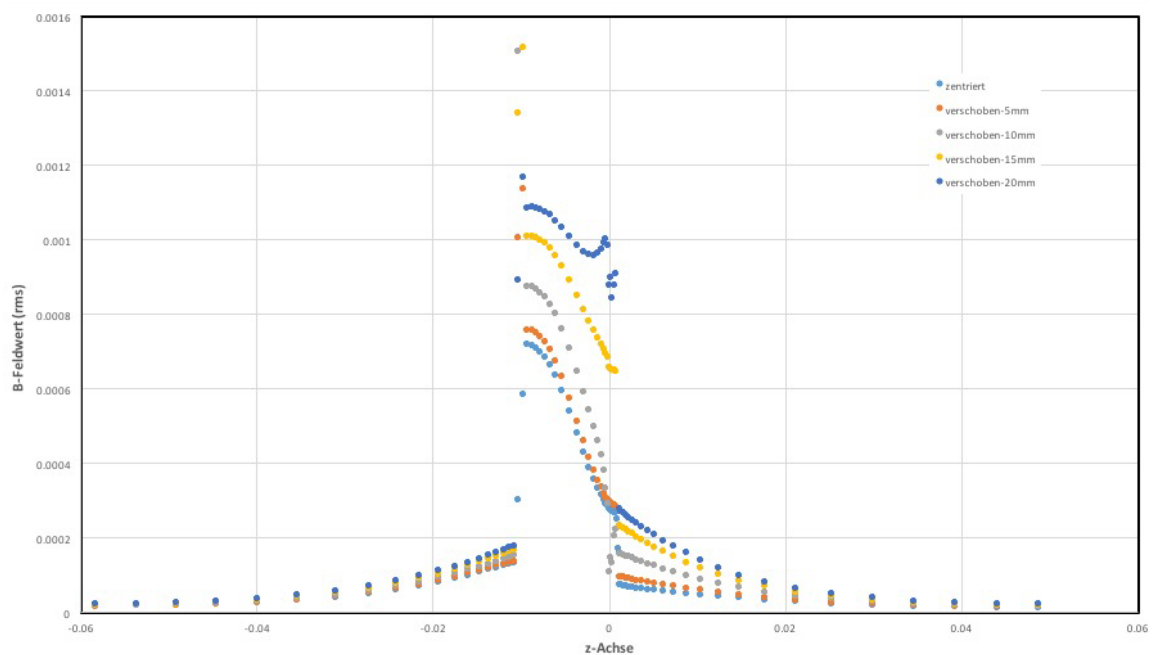


Figur 37: B-Feldverteilung der Konfiguration mit der um 15 mm verschobenen Empfangsspule



Figur 38: Feldverteilung entlang der x-Achse (Verschiebungsrichtung) für verschiedene Verschiebungsdistanzen zwischen der Sende- und der Empfängerspule entlang der x-Achse

In Figur 38 sind die Resultate für die magnetische Flussdichte in Richtung der Verschiebung 1cm über der Konfiguration gezeigt. Figur 39 fasst die Resultate für die Änderungen der Flussdicht in Richtung der zentralen vertikalen Achse zusammen.

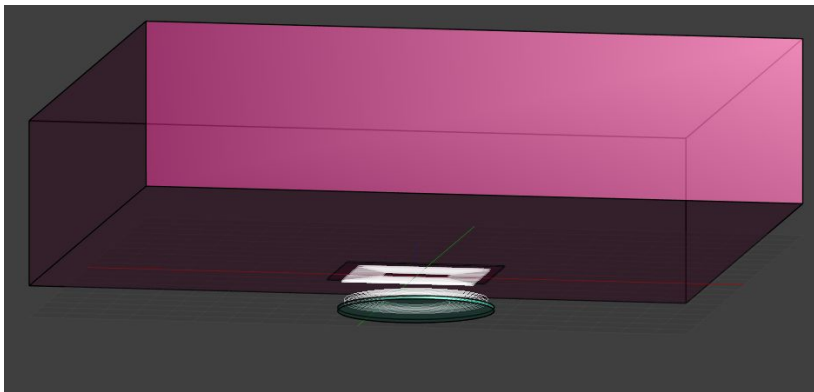


Figur 39: Feldverteilung entlang der zentralen z-Achse für verschiedene Verschiebungsdistanzen zwischen der Sende- und der Empfängerspule entlang der x-Achse

7.2.4 Simulation von SAR und induzierten elektrischen Feldstärken

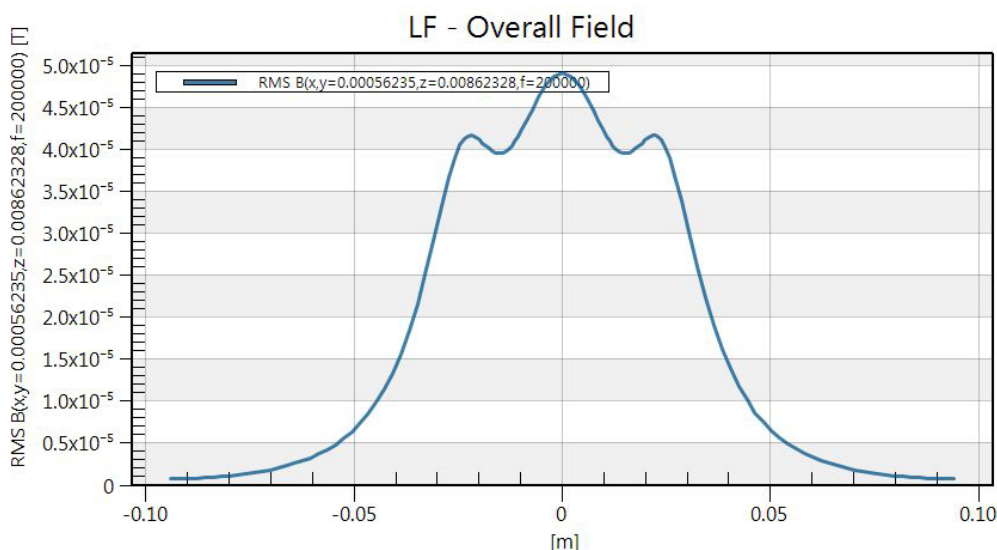
Für die biologische Beurteilung der Magnetfeldimmissionen drahtloser Ladestationen sind die Basisgrenzwerte relevant, denn die gemessenen Feldstärken im freien Raum überschreiten die empfohlenen Referenzwerte deutlich (bis zu einer Grössenordnung). Im hier genutzten Frequenzbereich müssen sowohl die Basisgrenzwerte für die Energieabsorption (SAR-Werte) als auch diejenigen für die Nervenstimulation (elektrische Feldstärken im Gewebe) eingehalten werden. Die maximal zulässige SAR beträgt 0.08 W/kg. Betreffend elektrischen Feldern betragen die maximal zulässigen Feldstärken im Gewebe 200-400 V/m (Frequenz: 100-200 kHz; siehe 2.2.2).

Im Sinne einer worst-case Abschätzung haben wir einen Block aus Muskelgewebe in 8 mm Abstand (ein dünnes Smartphone) über der Empfangseinheit platziert und die daraus resultierenden biologischen Belastungen berechnet (Figur 40), wiederum für einen Strom von 1 A bei 200 kHz. Über entsprechende Volumen (2x2x2 mm) wurden die Werte für das im Gewebe wirksame elektrische Feld bzw. die lokale und über 1 g Gewebe gemittelte SAR berechnet.

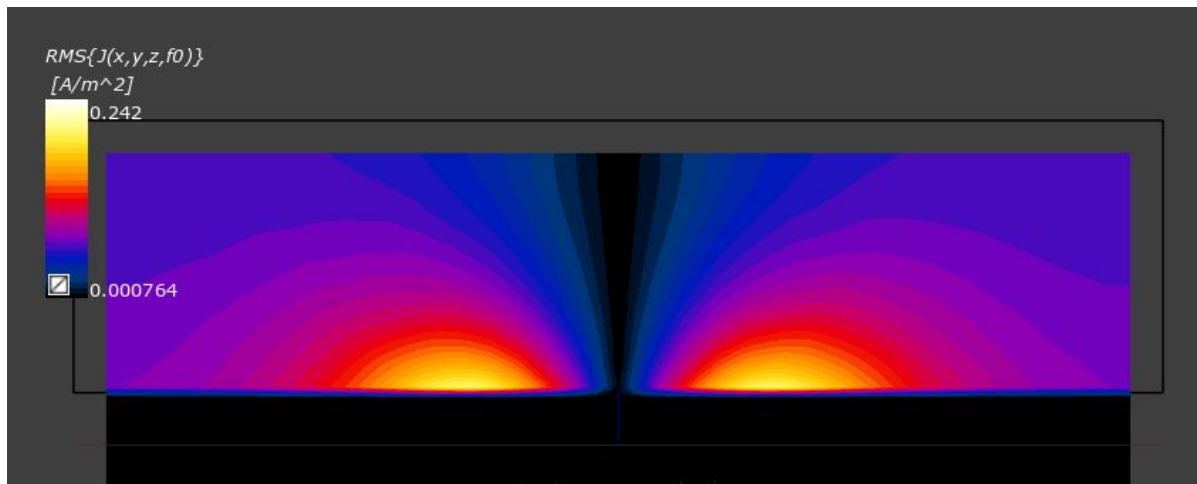


Figur 40: Simulationsmodell mit Block aus Muskelgewebe

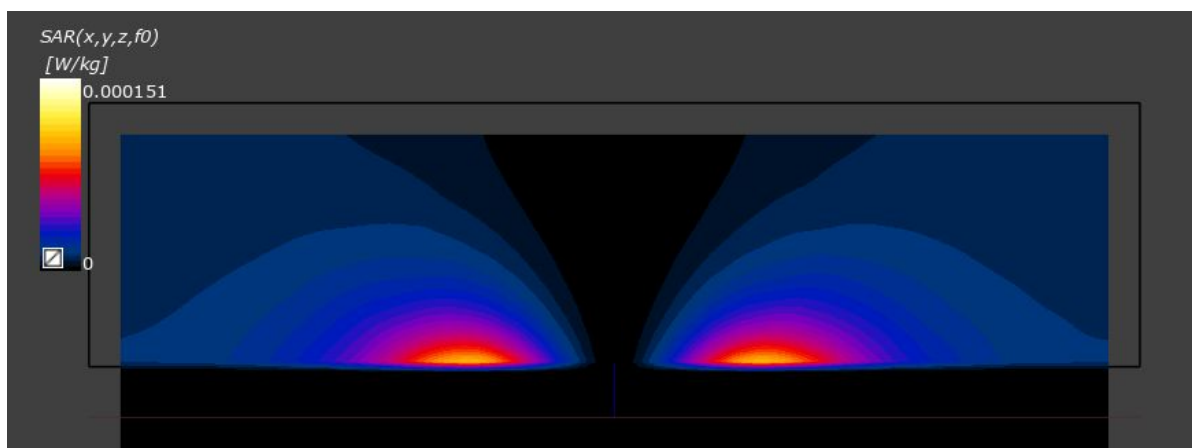
In Figur 41 ist die Verteilung der magnetischen Flussdichte an der Unterseite des Gewebeblocks entlang einer Durchmesserlinie gezeigt. Figur 42 visualisiert den durch dieses Feld induzierten Strom im Gewebe, Figur 43 die Verteilung der SAR und Figur 44 die Verteilung des elektrischen Feldes.



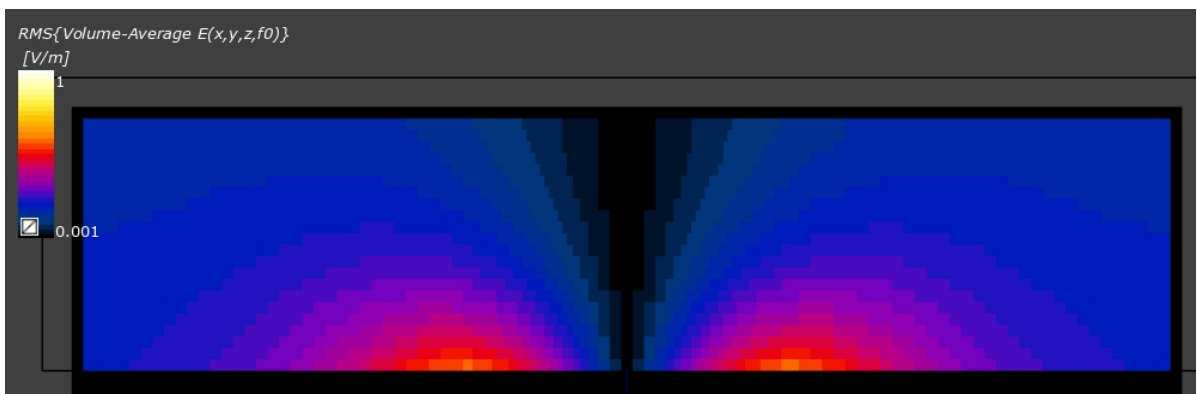
Figur 41: B-Feldverteilung an der Unterseite des Gewebeblocks



Figur 42: Verteilung der im Gewebe induzierten Stromdichte (A/m²)



Figur 43: Verteilung der spezifischen Absorptionsrate in der Ebene mit maximaler SAR (Peakwert über 1g Gewebe gemittelt: 0.000082 W/kg)



Figur 44: Verteilung des über 8 mm³ gemittelten E-Feld



In den nachfolgenden Figuren sind die für die biologische Beurteilung relevanten Werte zusammengestellt: Figur 45 zeigt die SAR-Statistik. In Figur 46 sind die Werte für das elektrische Feld gemäss den Empfehlungen der ICNIRP aufgeführt.

SAR Statistics							
Regions	Max Loss Power Density W/m ³	Min. local SAR W/kg	Mass-Averaged SAR W/kg	Max. local SAR W/kg	Total Loss W	Total Mass kg	Total Volume m ³
Background	0	0	0	0	0	0	2.347e-003
MuscleBlock	0.1642	2.504e-010	1.210e-005	1.506e-004	2.144e-005	1.7714	1.625e-003
Shield	0	0	0	0	0	0	1.734e-006
All Regions	0.1642	0	1.210e-005	1.506e-004	2.144e-005	1.7714	3.973e-003

Figur 45: Statistik für die SAR Werte im Gewebeblock

Volume-Average Report [ICNIRP 2010]		
	Max [V/m] @200000Hz	99th [V/m] @200000Hz
All Selected Regions	0.6468	0.5204
MuscleBlock	0.6468	0.5204

Figur 46: Werte für das elektrische Feld gemäss ICNIRP (2010) im Gewebeblock

7.3 Diskussion

Die Simulationen haben die Messresultate bestätigt. Quantitativ liegen die modellierten Feldstärken im freien Raum unterhalb der Messwerte. Das hat mit der für die Simulationen verwendeten Stromstärke von 1 A zu tun. Im realen Einsatz können bis zu 3 A vorkommen, was zu entsprechend höheren Magnetfeldstärken führt. Auch das Verhalten der Magnetfelder zeigt keine Überraschungen. So nehmen etwa die Streufelder bei Verschiebungen von Sende und Empfangsspulen erwartungsgemäss zu.

Man beachte aber, dass ein direkter (numerischer) Vergleich zwischen Simulation und Messung innerhalb der relevanten Abmessungen mit den zur Verfügung stehenden experimentellen Werkzeugen für diese Konfigurationen wenig sinnvoll ist. Dies wäre nur mit einem entsprechend aufwändigen Messaufbau möglich, der den Rahmen dieser Studie sprengen würde. Der qualitative Vergleich zeigt aber eine gute Übereinstimmung zwischen Modellierung und Messung.

Die hohen magnetischen Feldstärken in unmittelbarer Nähe der Sendespule sind nicht überraschend. Die Grenzwertempfehlungen werden massiv überschritten. Hinsichtlich Gesundheit kann aus diesen Werten allerdings kein gültiger Schluss gezogen werden. Bei nahe am Körper verwendeten Feldquellen befindet man sich immer in einer Zone grosser Inhomogenität der einstrahlenden Felder. Deshalb müssen für eine robuste Beurteilung hinsichtlich Grenzwerten die im Körper wirksamen elektrischen Felder berechnet und mit den entsprechenden Basisgrenzwerten verglichen werden.

Dazu führten wir worst-case Berechnungen durch. Sie zeigten, dass die Basisgrenzwerte bei weitem nicht überschritten werden. Betreffend SAR liegt ein Faktor über 1'000 dazwischen, betreffend elektrischer Feldstärke im Gewebe ein Faktor über 500. Aus gesundheitlicher und regulatorischer Sicht sind die Anlagen deshalb unbedenklich.



Schlussfolgerungen

Für den vorliegenden Bericht wurden heute erhältliche Produkte für das drahtlose, induktive Laden von elektronischen Kleingeräten, insbesondere von Mobiltelefonen, auf ihren Energieverbrauch und ihre EMF-Emissionen hin untersucht. Zwei technische Standards existieren, Qi und AirFuel, wobei der erste marktbeherrschend ist. Die Standards werden beschrieben, ebenso die regulatorischen Rahmenbedingungen hinsichtlich elektromagnetischer Immissionen.

Es wurden 5 verschiedene Sendestationen und 4 verschiedene Empfänger des Qi-Standards ausgewählt, sowie ein Sender und zwei verschiedene Empfänger des AirFuel Standards.

Betreffend Stromverbrauch zeigte sich, dass wie bei anderen am Netz aufladbaren Geräten der Verbrauch des Netzadapters ein zentrales Thema ist. Der beste getestete Adapter hat einen sehr tiefen Leerlaufverbrauch von 8 mW, der verbrauchsmässig schlechteste einen solchen von 220 mW. Für den Stand-by Verbrauch spielt auch die in der Ladestation verbaute Elektronik eine wichtige Rolle. Auch hier gibt es zwischen den Fabrikaten grosse Unterschiede. Der tiefste Verbrauch betrug 70 mW, der höchste 450 mW. Falls die Norm zum Stand-by Verbrauch auf die Ladestation insgesamt angewendet wird, also nicht nur auf den AC/DC-Adapter, dann ist die Konformität der Geräte zu prüfen, denn nicht alle von uns vermessenen Fabrikate liegen unterhalb 300 mW.

Sodann ist auch wichtig, ob sich ein Endgerät auf der Sendeeinheit befindet oder nicht, denn Sender und Empfänger kommunizieren miteinander, auch wenn nicht aufgeladen wird. Insgesamt variiert der Stand-by Verbrauch massiv. Der tiefste Verbrauch lag bei 70 mW (5 V Netzteil; stromeffizientes Design; kein Endgerät auf dem Sendemodul), der höchste war 30 Mal höher und lag bei 2150 mW (16 V Netzteil; Standarddesign; Empfangsspule auf dem Sendemodul).

Im Vergleich zwischen kabellosem und kabelgebundenem Aufladen ist das drahtlose Laden aufgrund der Verluste in den Sender- und Empfängereinheiten weniger energieeffizient: Als Faustregel kann man folgende Grössenordnungen des Stand-by Verbrauchs nennen: kabelgebundenes Laden (eingestecktes Netzteil ohne Endgerät oder mit vollgeladenem Endgerät angeschlossen) um 100-200 mW. Drahtloses Laden (mit vergleichbarem Adapter) ohne aufgelegtes Endgerät: 200-400 mW, mit aufgelegtem Endgerät: 1-2 W. Im worst-case verbrauchen WPT-Ladestationen also bis 10 Mal mehr Stand-by Energie als AC/DC-Netzteile allein.

In einer optimalen Konstellation mit energieeffizientem Adapter und entfernen des Endgerätes nach erfolgter Aufladung konsumieren drahtlose Ladestationen im Stand-by Betrieb unter 100 mW. Ein vergleichbar effizienter Adapter, der stecken gelassen wird konsumiert um 10 mW.

Schlechte Netzgeräte und Elektronikmodule, in Kombination mit einem nach dem Aufladen liegengelassenen Endgerät, führen zu einem täglichen Standby-Verbrauch drahtloser Ladestationen der höher ist als für das Aufladen der Batterie an Strom benötigt wird.

Während des aktiven Ladebetriebs (Ladestrom > ca. 400 mA) liegt die Energieeffizienz von der Steckdose bis zum Lademodul des Endgerätes bei den getesteten Systeme im Bereich von 50-60 %, bei traditionellem Laden bei ca. 75 %. Gegenüber dem kabelgebundenen Aufladen erzeugen WPT-Systeme während des Ladens doppelt so hohe Verluste, oder: sie sind etwa 20-50 % weniger effizient als das Laden über Kabel. Eine schlechte Effizienz liegt insbesondere dann vor, wenn das Endgerät nicht gut zentriert auf der Sendespule liegt und die Energieübertragung deshalb nicht optimal ist. Bei stark dezentrierter Spule (> 2-3 cm) bricht die Übertragung automatisch ab. Beim AirFuel Standard sorgt ein Magnet für eine optimale Positionierung.



Betreffend Strom-Mehrverbrauch von WPT gegenüber konventionellem Laden via Kabel muss bei angenommener 100 %iger Durchdringung der Technologie im Haushaltsbereich von einer Grössenordnung von einem oder einiger weniger Promille des Stromverbrauchs der Haushalte, oder in absoluten Zahlen ausgedrückt: von 30 GWh pro Jahr für die Schweiz, ausgegangen werden.

Zur Erfassung der EMF-Emissionen wurden Messungen und Simulationen durchgeführt. Ebenso wurde mit einer numerischen Simulation berechnet, ob die Geräte den Grenzwertempfehlungen zum Schutz vor nicht-ionisierender Strahlung entsprechen. Wie erwartet zeigten Messungen und Simulationen, dass die Magnetfelder der Energieübertragung mit zunehmender Distanz vom Spulenzentrum sehr schnell abnehmen. Das liegt u.a. auch an den eingebauten Abschirmungen. In 10 cm Distanz betragen die Felder weniger als 1 μT . Die Maximalfeldstärken während des Ladebetriebs belaufen sich unmittelbar an der Oberfläche der Empfangsgeräte auf 10-25 μT .

Die Felder sind nicht stark von der Last am Empfänger abhängig, weil die Regelung des Ladestroms unter anderem durch kontrolliertes Verstärken der Sendefrequenz erreicht wird. Dadurch nimmt die übertragene Leistung ab, der Strom in der Sendespule (und somit das erzeugte Magnetfeld) bleibt aber mehr oder weniger konstant. Die Sendeeinheit ist auch im Leerlauf aktiv (Pings). Die dabei erreichten (Spitzen- und rms) Feldstärken an der Oberfläche des Ladegeräts können einige 100 μT betragen, also deutlich mehr als während des Ladebetriebs. Das gilt allerdings nicht für den AirFuel Standard, dessen Sendespule im Stand-by Betrieb nicht bestromt wird. Im Sinne einer worst-case Betrachtung beurteilten wir die Immissionen im idle-Modus.

Gemäss Standards und Grenzwertempfehlungen dürfen die Immissionen (bei den vorliegenden Frequenzen) zwischen 20 und 40 μT betragen, wobei in diesen Referenzwerten ein Koppelungsfaktor für Nahfeldnutzung mitberücksichtigt ist. Bei den vermessenen Ladestationen sind im Leerlaufbetrieb die Flussdichten deutlich höher: der höchste Peakwert betrug bei einem Produkt um 1 mT, der entsprechende rms-Wert knapp 200 μT . Die Feldsimulationen haben diese Grössenordnungen bestätigt.

Bei Überschreitung der Referenzwerte ist es nötig, die im Körper induzierten elektrischen Feldstärken bzw. die SAR zu berechnen und mit den in der ICNIRP-Empfehlung festgelegten Basisgrenzwerten zu vergleichen. Dazu wurden die im Gewebe induzierten Ströme numerisch modelliert. Die Resultate zeigten, dass die Basisgrenzwerte bei weitem nicht überschritten werden. Betreffend SAR liegen sie einen Faktor grösser 1'000, betreffend elektrischer Feldstärke im Gewebe einen Faktor grösser 500 darunter. Aus gesundheitlicher Sicht sind die Anlagen deshalb unbedenklich.



Referenzen

- AirFuel Alliance. (2014). "Wireless Power Transfer System Baseline System Specification (BSS) V1.2.1." 2014, from <http://www.rezence.com/system/files/A4WP%20Rezence%20BSS%20v1.2.1.pdf>.
- Alliance for Wireless Power (2015) "Wireless Power Systems and Metal Object Heating."
- Brüniger, R. (2015) Stand-by Verbrauch im Haushaltsbereich. Aktualisierte Bestandsaufnahme. Bern, BFE.
- Consortium, W. P. (2013). System Description Wireless Power Transfer, Part 1: Interface Definition, Version 1.1.2. Interface Definition, Version 1.1.2. 1: Low Power.
- Dubal, P. (2015). "Rezence – Wireless Charging Standard based on Magnetic Resonance." International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering (IJARCCE) 4(12).
- Dürrenberger, G., J. Fröhlich and P. Leuchtmann (2014). Wireless Power-Transfer für Elektrofahrzeuge: eine Literaturstudie. Bern, BAFU.
- ICNIRP (1998). "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection." Health Phys 74(4): 494-522.
- ICNIRP (2010). "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)." Health Phys 99(6): 818-836.
- Nadakuduti, J., M. Douglas, L. Lu, A. Christ, P. Guckian and N. Kuster (2015). "Compliance Testing Methodology for Wireless Power Transfer Systems." IEEE Transactions on Power Electronics 30(11): 6264-6273.
- Rohm Semiconductor. (2015). "The World's First Qi-Certified Medium Power Transmitter Reference Design." from http://www.rohm.com/web/global/news-detail?news-title=2015-11-17-the-world%E2%80%99s-first*-qi-certified-medium-power-transmitter-reference-design.
- Siddabattula, K. (2015). Why not a wire? The case for wireless power. T. Instruments.
- Sunohara, T., A. Hirata, I. Laakso, V. De Santis and T. Onishi (2015). "Evaluation of nonuniform field exposures with coupling factors." Phys Med Biol 60(20): 8129-8140.