

Kontaktlose Leistungs- und Informationsübertragung in bewegten Antriebssystemen / Wireless Transmission of Power and Information in moving drive systems

Daniel Kürschner, Institut für Automation und Kommunikation e.V., Magdeburg, Deutschland
Werner-Heisenberg-Str. 1, 39106 Magdeburg, Tel.: +49 391 9901 433, E-Mail: daniel.kuerschner@ifak.eu
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Jumar, Institut für Automation und Kommunikation e.V., Magdeburg, Deutschland

Kurzfassung / Abstract

Mit der induktiven Energieübertragung ist es heute möglich, die Energie für elektrische Antriebssysteme, welche sich auf bewegten Anlagenteilen befinden, zu übertragen. Nicht nur im Bereich mehrerer Kilowatt erfordert der Entwurf sowie der Betrieb einer kontaktlosen Übertragungsanordnung neben neuartigen leistungselektronischen Baugruppen auch die Berücksichtigung verschiedener Toleranzen. Solche Toleranzen ergeben sich z.B. durch Bauelementestreuung oder durch mechanische Parameter wie eine ungenaue Positionierung der Spulen und bewirken eine Verstimmung des in Resonanz arbeitenden Übertragungssystems. Aufgrund der verwendeten neuartigen Elektronikkomponenten sowie aufgrund des Ausnutzens des magnetischen Wechselfeldes als Energieträger sind des Weiteren spezielle Aspekte hinsichtlich EMV zu berücksichtigen.

Today the inductive power transmission enables the transfer the electrical energy of drive systems on movable plant sections. In the power range of several kilowatts and below, the design as well as the operation of wireless transmission systems efforts new power electronic components and the consideration of system tolerances. Such tolerances are a result of straying electrical components or of inexactly positioned coils and they cause a detuning of the resonance of the magnetic system. Because of the new fast switching power electronics and because of the magnetic leakage field of the air gapped transformer, special aspects of electromagnetic compatibility (EMC) have to be considered.

1 Einleitung

Der Trend zur Automatisierung industrieller Prozesse bewirkt, dass immer mehr mechatronische Systeme und bewegliche Systemkomponenten ihren Einsatz in industriellen Anlagen finden. Während die kabellose Übertragung von Daten heutzutage Stand der Technik ist, bedarf die Stromversorgung in den meisten Fällen einer galvanischen Verbindung mit dem Versorgungsnetz oder eines Energiespeichers. Die kontaktlose induktive Energieübertragung ermöglicht die Versorgung von stationären, rotierenden und linear bewegten Systemen ohne Schleifkontakte und Schleppkabel [1]. Durch das Transformatorprinzip und durch den Verzicht auf elektrische Kontakte eröffnen sich weitere Vorteile wie eine verlustarme Spannungsstellung und eine komplette Isolation der Primär- und Sekundäreinheit.

Das induktive Übertragungssystem besteht aus dem Spulensystem sowie der Primär- und Sekundärelektronik. Dabei stellt die luftspaltbehaftete Magnetanordnung neue Anforderungen an die Energiewandlung hinsichtlich Schaltungstopologien, Ansteueralgorithmen und leistungselektronischer Bauelemente. Hierzu wurde von den Autoren ein modulares Stromrichterkonzept erarbeitet, durch welches sich der Entwicklungsaufwand neuer Anordnungen verringern lässt [3].

Das gleichzeitige Erreichen hoher Ausgangsleistungen und hoher Wirkungsgrade erfordert sowohl einen resonanten Betrieb des Spulensystems als auch hohe Übertragungsfrequenzen und große Ausgangsströme, welche eine starke Beanspruchung und hohe Verluste der Leistungshalb-

leiterschalter und des Spulensystems zur Folge haben. Diese Verluste sind nicht nur aus Energieeffizienzgründen unvorteilhaft, sondern die in Wärme umgesetzte Energie bringt insbesondere bei kleinen und isolierten Bauräumen thermische Probleme mit sich.

Aufgrund der Resonanz sind während des Entwurfes und des Betriebes des Weiteren verschiedene Toleranzen zu berücksichtigen um sicherzustellen, dass die Vorgabebereiche der elektrischen Betriebsparameter eingehalten werden. Aufgrund dieser elektrischen Betriebsparameter und des mittelfrequenten Magnetfeldes müssen auch verschiedene Aspekte hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) schon während der Entwurfsphase berücksichtigt werden. Ein Ansatzpunkt hierfür bildet die Optimierung des Magnetsystems mit Hilfe der Feldsimulation [16].

Trotz der genannten technischen Anforderungen konnte in einem Laboraufbau mit einem Spulensystem mit 300 mm Luftspalt und einer übertragbaren Leistung von 1 kW bei einer Übertragungsfrequenz von 100 kHz ein Gesamtwirkungsgrad von über 80 % erzielt werden [5].

2 Anwendungsbereiche

Bei der Energieversorgung fahrerloser Transportsysteme (FTS) wurden Funktionstüchtigkeit und Nutzen der kontaktlosen Energieübertragung bereits des Öfteren erfolgreich praktisch nachgewiesen [6][7][8]. Das Spektrum aussichtsreicher Einsatzmöglichkeiten umfasst aber auch Anwendungen, bei denen Antriebssysteme mit elektrischer Energie versorgt werden müssen, welche sich aufgrund des Funktionsprinzips der Anlage auf rotatorisch

oder linear bewegten Systemen befinden. Solche bewegten Antriebssysteme findet man in der Praxis beispielsweise im Verseilmaschinenbereich [9]. Des Öffern muss dabei die Energieversorgung kabellos über einen konstruktiv notwendigen Abstand (Luftspalt) erfolgen. Abbildung 1 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Das Spulensystem des Demonstrators (Durchmesser: 210 mm) überträgt eine Leistung von max. 2000 W auf die rotierenden Anlagenteile und versorgt zwei Drehstromantriebe, welche über handelsübliche Umrichter gespeist werden. Diese Antriebe bewirken zum einen eine Rotation der Verseilspindel und zum anderen die Ver- und Entriegelung derselben, wenn diese gewechselt werden muss. Darüber hinaus ermöglicht eine integrierte bidirektionale Datenübertragung (RS232, 187,5 kBaud) das Auslesen diverser, sich auf dem rotierenden Teil befindlicher Näherungsschalter und Ultraschallsensoren sowie die Übermittlung von Anweisungen für die Stromrichter auf den rotierenden Teil. Die Sensoren dienen z.B. zur Überprüfung des Füllgrades der Verseilspindel oder zur Überprüfung der Drehwinkel des rotierenden Teils.

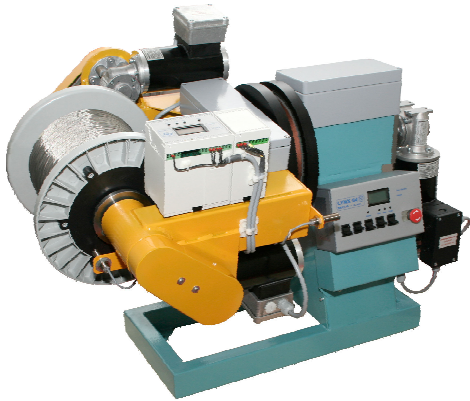


Abbildung 1: Induktives Energie- und Datenübertragungssystem für Anwendungen des Maschinenbaus

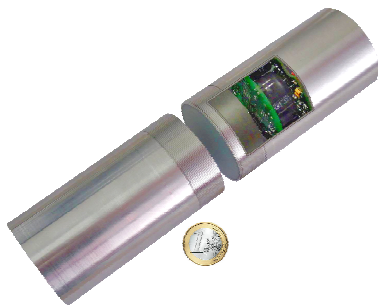


Abbildung 2: Induktives Energie- und Datenübertragungssystem für die Sensor- und Aktorversorgung

Abbildung 2 zeigt eine weitere Anwendung für die kontaktlose Energie- und Datenübertragung im Leistungsbereich von 50 W für die Sensor- und Aktorversorgung auf rotierenden Wellen oder bei Wechselwerkzeugen. Bei diesem System sind Primärelektronik und Primärspule sowie Sekundärelektronik und Sekundärspule jeweils in einem Aluminiumgehäuse integriert, um den Einfluss elektrisch leitender Materialien in der Umgebung sowie die Abstrahlung niederfrequenter Magnetfelder zu

reduzieren. Die induktive Datenübertragung ermöglicht bei diesem Beispiel ebenfalls eine Baudrate von 187,5 kBaud. Weitere potentielle Anwendungen bei beweglichen Antriebssystemen im Maschinenbau sind z.B. Transportanlagen, Roboter oder Werkzeugmaschinen.

3 Theoretische Grundlagen

Induktive Übertragungssysteme mit Luftspalt basieren auf dem Transformatorprinzip und können mit dem T-Ersatzschaltbild (Abbildung 3) beschrieben werden. Dieses berücksichtigt die ohmschen Wicklungswiderstände (R_1 , R_2) sowie die Kopplungsinduktivitäten (L_h , $L_{1\sigma}$, $L_{2\sigma}$) [14].

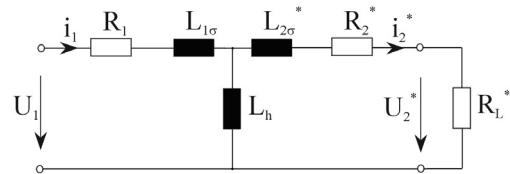


Abbildung 3: T-Ersatzschaltbild mit ohmscher Last

Die Parameter des Ersatzschaltbildes können sowohl durch Messung als auch durch Feldsimulationen (z.B. Methode der finiten Elemente - FEM) ermittelt werden. Analytische Verfahren erweisen sich bei großen Luftspalten und bei der Verwendung von Ferritelementen aufgrund der inhomogenen Felder als unzuverlässig. Die Größe der Haupt- und Streuinduktivitäten werden im Besonderen durch die Größe der Primär- und Sekundärspulen, den Abstand und der Position der Spulen zueinander sowie die Verwendung von Ferritelementen beeinflusst. Die betrachtete Übertragungsanordnung ist im Vergleich zum üblichen Transformator durch große Streuinduktivitäten und eine kleine Hauptinduktivität gekennzeichnet. Diese großen Streuinduktivitäten erfordern eine Kompensation, wenn hohe Leistungen bei hohen Wirkungsgraden übertragen werden sollen. Zur Verwendung einfacher spannungseinprägender Speisewechselrichter wird primärseitig häufig ein Serienkondensator und zum Erhalten einer lastunabhängigen Ausgangsspannung sekundärseitig ein Parallelkondensator verwendet. Abbildung 4 (oben) zeigt das erweiterte T-Ersatzschaltbild mit den Resonanzkondensatoren. Abbildung 4 (unten) zeigt die Spannungsverstärkung u_2/u_1 in Abhängigkeit von der normierten Speisefrequenz ω_N und der Belastung, welche in Form der Schwingkreisgüte Q ausgedrückt werden kann ($R_1 = R_2 \ll R_L$, ω_R - Resonanzkreisfrequenz der charakteristischen Impedanz, L_1 - primärseitige Selbstinduktivität, \ddot{u} -Übersetzungsverhältnis).

$$Q = \omega_R \frac{1}{\ddot{u}^2} \frac{L_1}{R_L} \quad (1)$$

Sowohl die Primär- als auch die Sekundärseite ist über die Resonanzkapazitäten auf die Resonanzkreisfrequenz ω_R abgestimmt ($\omega_N = \omega/\omega_R = 1$). Wie zu erkennen ist, erfährt die Ausgangsspannung bei kleinen Belastungen ($Q < 1$) und bei konstanter Eingangsspannung unerwünschte Resonanzüberhöhungen, wenn das System nicht mehr in

Resonanz angeregt wird. Im Resonanzpunkt selbst ($\omega_N = 1$) ist die Spannungsverstärkung bei sekundärseitiger Parallelkompensation lastunabhängig.

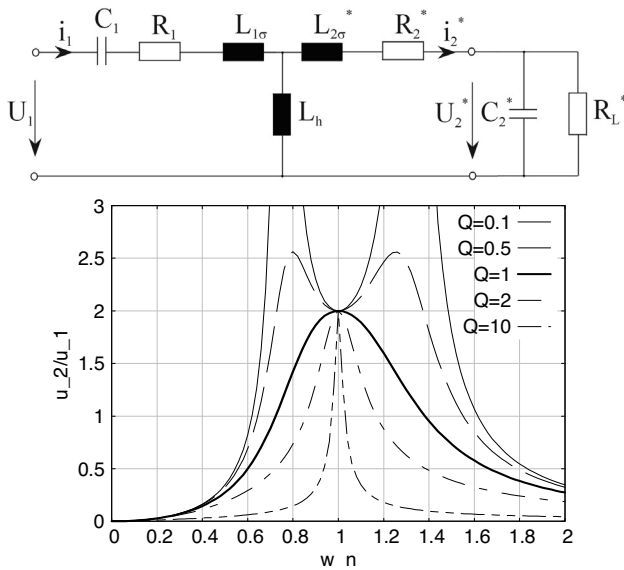


Abbildung 4: Erweitertes T-ESB (oben) und Spannungsverstärkung u_2/u_1 bei Serien-Parallel-Resonanz (unten)

Viele Anwendungen der kontaktlosen Energieübertragung erfordern auch eine Informationsübertragung, welche in einem gemeinsamen Energie – und Datenübertragungssystem integriert werden kann. Gegenüber existierenden Funk-Lösungen bietet hierbei die Nahfeldübertragung den Vorteil einer geringeren Störbeeinflussung räumlich dicht benachbarter Sende- und Empfangseinrichtungen. Durch den Einsatz einer separaten, geometrisch optimierten, Datenspule lässt sich auch die Störbeeinflussung zwischen induktivem Energie- und induktivem Datenkanal sehr gut reduzieren [3]. Des Weiteren sind mit der induktiven Übertragung gegenüber der kapazitiven Variante größere Luftspalte realisierbar [2] und die Unempfindlichkeit gegenüber Schmutz und Wasser wird erhöht.

4 Konstruktive Anordnungen

Die geometrische Anordnung des Spulensystems kann in verschiedenartiger Weise ausgeführt werden, wofür sich in der Literatur verschiedene Beispiele finden.

- 1-dimensional – linear [4][12][6][7][8]
- 2-dimensional – planar, rotatorisch [13][5][19][20][21]
- 3-dimensional – frei im Raum positionierbar [10][11]

In ersterer Variante wird ein Primärleiter entweder im Boden oder entlang einer Schiene installiert. Die Sekundäreinheiten greifen dann über eine mit E-Kernen oder speziell gestalteten Kernformen [12][21] versehenen Sekundärspulen (Pick-Ups) das Magnetfeld des Primärleiters ab. Aufgrund der großen primären Streuinduktivität ist eine segmentierte Zuschaltung und eine abschnittsweise Kompensation sinnvoll. Da der Primärleiter aus Kostengründen oft nur aus einer einzigen Windung besteht, ist ein

sehr großer Primärstrom erforderlich, was den Gesamtwirkungsgrad verringert.

Übertragungsanordnungen mit zwei räumlichen Freiheitsgraden können entweder aus einem Spulenpaar [13][5] oder aus einer Matrix von Primär- und Sekundärspulen [19][20] bestehen. Ein Sonderfall zweidimensional beweglicher Anordnungen ergibt sich, wenn der Abnehmer stationär auf einer Oberfläche oder am Kopf einer rotierenden Achse positioniert wird. Dabei wird ein nahezu rotationsunabhängiger Betrieb über axiale Spulensysteme erreicht. Bei einer genauen Positionierung ist bei diesen Anordnungen aufgrund der vergleichsweise kleinen Streuinduktivitäten der größte Wirkungsgrad erreichbar. Die Energieübertragung in Systemen mit drei räumlichen Freiheitsgraden vollzieht sich über kubisch und mehrachsig angeordnete Primär- und Sekundärleitersysteme [10][11]. Aufgrund der vergleichsweise sehr geringen Hauptinduktivitäten bzw. der sehr kleinen Koppelfaktoren werden diese vorzugsweise zur Versorgung von Komponenten mit geringem Leistungsbedarf eingesetzt.

Die Anforderung der Integration kontaktlos induktiver Energieübertragungseinheiten in komplexe mechatronische oder Antriebssysteme, welche meist wenig Bauraum bieten und häufig hohen Umgebungstemperaturen ausgesetzt sind, erfordert eine Maximierung des Wirkungsgrades. Einen entscheidenden Anteil an den Gesamtverlusten des Spulensystems bilden die ohmschen Verluste in der Kupferwicklung, welche durch den Einsatz speziell verdrahteter Litzleiter sowie durch die Verwendung hoher Übertragungsfrequenzen ($f > 50$ kHz) reduziert werden können. In den bisherigen Untersuchungen der Autoren hat sich bei induktiven Übertragungssystemen mit Luftspalt die Verwendung hoher Übertragungsfrequenzen ($f < 400$ kHz) als günstig erwiesen [14][15].

5 Einfluss von Toleranzen

Bei dem Aufbau kontaktloser Übertragungssysteme sind aufgrund der konstruktiven Anforderungen und durch den resonanten Betrieb der beiden Spulen verschiedene Toleranzen zu berücksichtigen. Es muss sichergestellt werden, dass die Vorgabebereiche der elektrischen Betriebsparameter eingehalten werden. Bei Änderung mechanischer Parameter oder bei Streuung von Bauelementgrößen ändern sich die elektrischen Klemmgrößen in Form von Spannungs- und Phasenwinkeländerungen. Einen Überblick über Toleranzen gibt Tabelle 1. Während die Toleranzen durch Frequenz- oder Kapazitätsänderungen analytisch mit Hilfe des T-Ersatzschaltbildes beschrieben werden können, müssen mechanische Toleranzen oft auf der Basis von Feldsimulationen bewertet werden. Dabei werden zunächst mit Hilfe der FEM (ANSYS) die Koppelparameter in Abhängigkeit von seitlicher Spulenverschiebung ermittelt. Abbildung 5 zeigt die simulierten Magnetfelder verschiedener axialer Spulensysteme (Schalenkerne und Flachferrite) bei seitlicher Spulenverschiebung

Tabelle 1: Toleranzen bei kontaktlosen Übertragungssystemen

Treten auf bei:	Änderung der elektrischen Größen durch:		
	Frequenzänderung	seitliche Spulenverschiebung	Luftspaltänderung
Produktion / Fertigung		X	X
Streuung von Gehäusemaßen und Materialparametern		X	X
Montage / Installation		X	X
Streuung von Kompensationskapazitäten	X		
Spulenpositioning		X	X
Umgebungsbedingungen (Temperatur)	X		X
Unwuchten (bei rotierenden Wellen)		X	
Umgebende elektrisch leitfähige Materialien (Metallgehäuse)	X		

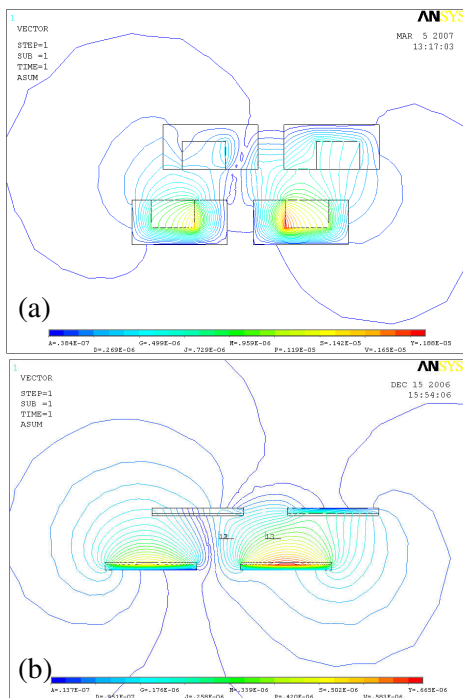


Abbildung 5: FEM-Simulationen der Spulensysteme mit Schalenkernen (a) und Flachferriten (b)

In Abbildung 6 sind die durch Simulation und Messungen ermittelten Koppelfaktoren gezeigt. Es ist ersichtlich, dass die Änderung des Koppelfaktors bei Verschiebung flacher Spulensysteme deutlich geringer ausfällt als bei Schalenferriten und somit ein günstigeres Verhalten der elektrischen Größen zu erwarten ist. Um dies zu überprüfen sind die ermittelten Koppelfaktoren im T-Ersatzschaltbild einzusetzen und die errechneten Resonanzkondensatoren C_1 und C_2 (vgl. Abbildung 4) konstant zu halten. Abbildung 7 zeigt exemplarisch die Spannungsverstärkungen u_2/u_1 der Übertragungssysteme mit den verschiedenen Spulensystemen.

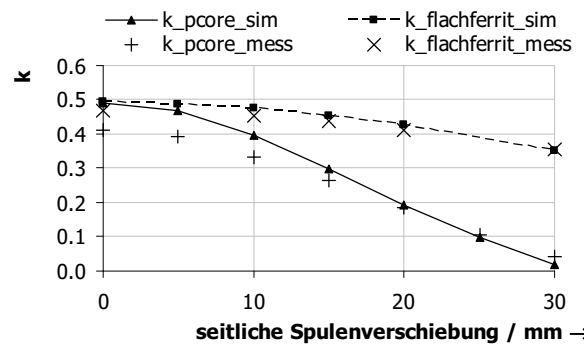


Abbildung 6: Ermittelte Koppelfaktoren bei Verschiebung der Spulensysteme

Wie in Abbildung 7 (oben, Schalenferrite) zu sehen, sind bei seitlicher Verschiebung bei Spulengüten kleiner $Q < 0,8$ starke Überhöhungen in der Ausgangsspannung zu erwarten. Des Weiteren fällt diese schon bei Erreichen einer geringen seitlichen Verschiebung ($v > 15$ mm) stark ab. Im Gegensatz dazu zeigt Abbildung 7 (unten) das Übertragungsverhalten bei der Verwendung von Flachferriten. Die Spannungsverstärkung erfährt erst bei sehr kleinen Güten ($Q < 0,4$) eine merkliche Spannungsüberhöhung und erlaubt darüber hinaus weitaus größere seitliche Spulenverschiebungen bis zu $v = 40$ mm.

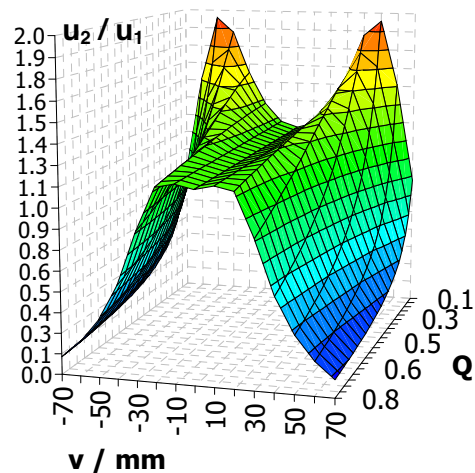
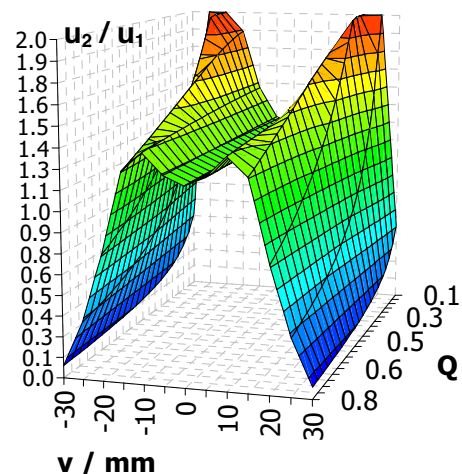


Abbildung 7: Spannungsverstärkung u_2/u_1 bei seitlicher Spulenverschiebung (Spulen mit Schalenferriten (oben) und mit Flachferriten (unten))

6 Aspekte der EMV und EMVU

Systembedingt treten bei kontaktlosen Übertragungsanordnungen Störemissionen auf, welche sowohl hinsichtlich der technischen EMV als auch hinsichtlich der Wirkung auf die Umwelt, insbesondere den Menschen relevant sind. Die vielseitigen Einsatz- und Umgebungsbedingungen sowie spezielle, durch die Applikation vorgegebenen Anforderungen, wie z.B. hohe zu übertragene Leistung ($> 1 \text{ kW}$) oder Verschiebungen der Spulen zueinander bedingen zum einen hohe magnetische Flussdichten und zum anderen extreme elektrische Betriebsparameter, wie Resonanzspannungen bis über 10 kV und Resonanzströme bis zu 50 A . Hinsichtlich der geleiteten Störemission existieren seit längerem entsprechende nationale und internationale Normen und Richtlinien. Im Bereich der niederfrequenten Magnetfelder wurden erst in den letzten Jahren Messverfahren, Messmittel sowie Grenzwerte national und international genormt [17][18]. Tabelle 2 zeigt relevante Arten der Störemission kontaktloser Übertragungsanordnungen.

Tabelle 2: Störemissionen kontaktloser Übertragungssysteme

Störquelle	Relevanz/Ausbreitung	Möglichkeiten der Reduzierung
Schnell schaltende Leistungshalbleiter	EMV / geleitet	Nullstromschalten, optimierter Masseanschluss, Netzfilter
Spannung an Resonanzkapazitäten	EMV / gestrahlt	Schirmung, Verringerung Resonanzspannung
Streumagnetfeld	EMV / gestrahlt	Einsatz von Ferritkernen, Verkleinerung Luftspalt
Übertragungssystem / Wicklungsstrom	EMVU / gestrahlt	Optimierung Spulen- und Ferritgeometrie, Verbesserte Kopplung, Schirmung

Durch die Schaltvorgänge an den Leistungshalbleitern des Speisewechselrichters treten geleitete Störemissionen in Form von Gleichtaktströmen auf. Diese können durch entsprechende Filtermaßnahmen, durch den Einsatz spezieller Massesysteme und Schutzleiterdrosseln sowie durch Einstellung eines Nullstromschaltverhaltens verringert werden.

Aufgrund der großen Luftspalte und den damit verbundenen großen Streuinduktivitäten muss eine Kompensation dieser mittels Resonanzkondensatoren vorgenommen werden. Die sich im Resonanzfall über diesen Kondensatoren und über der Wicklung selbst einstellende überhöhte Resonanzspannung verursacht des Weiteren ein lokal stark überhöhtes elektrisches Feld, welches umgebende Elektronikkomponenten beeinflussen kann.

Eine weitere Form der Störausbreitung luftspaltbehafteter Energieübertragungseinrichtungen stellt das magnetische Streufeld dar, welches in Form der magnetischen Flussdichte messtechnisch oder durch Simulation ermittelt und bewertet werden kann. Bei kleinen Frequenzen wirkt

das magnetische Feld überwiegend als Reizwirkung (Störeinwirkung auf das Nervensystem), bis zu einem Bereich von 100 kHz nimmt die Reizbarkeit des Gewebes jedoch stark ab. In dem Frequenzbereich von $0,1\text{-}10 \text{ MHz}$ äußert sich das Magnetfeld in einer thermischen Wirkung, das heißt bei einer Feldfrequenz von ca. 100 kHz gibt es keine nachgewiesenen Dosiswirkungen für Geweberwärmung. In den Normen werden aber in der Regel ausschließlich Reizwirkungen auf das menschliche zentrale Nervensystem (ZNS) betrachtet [18].

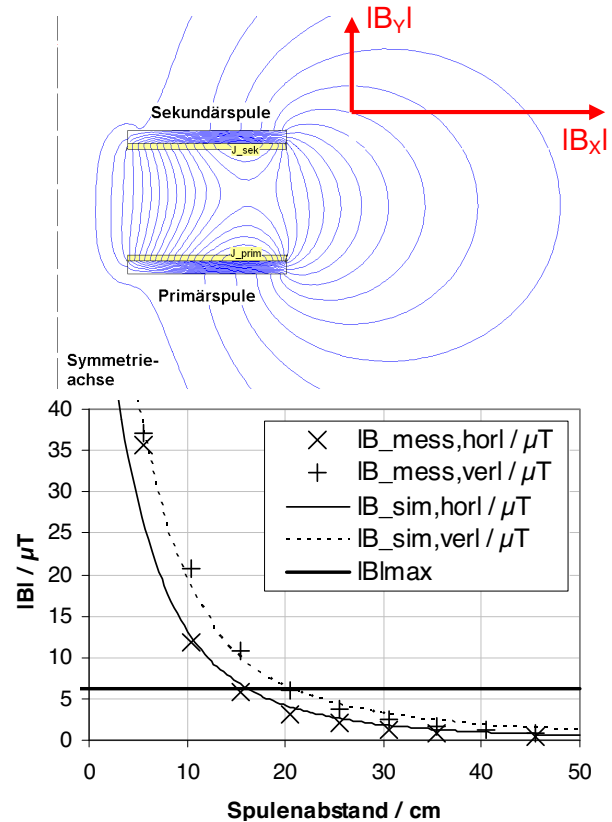


Abbildung 8: Magnetische Flussdichte $|B|$; Messachsen (oben) und Simulations- und Messwerte (unten)

Ein geeignetes Hilfsmittel bei der Bestimmung der Flussdichteverteilung ist die Magnetfeldsimulation. Hiermit können bereits im Entwicklungsstadium Aussagen zur Ausbreitung der elektromagnetischen Felder getroffen werden. Abbildung 8 zeigt die Simulation und die Messung der magnetischen Flussdichte mit einer Magnetfeldsonde an einer Versuchsanordnung im Leistungsbereich von 1 kW zu übertragender Leistung. Hierbei ist erkennbar, dass die geltenden Referenzgrenzwerte (ICNIRP) in horizontaler Richtung bereits in einem Abstand von 15 cm unterschritten werden. Für die berufliche Exposition gilt im betrachteten Frequenzbereich der Grenzwert von $|B_{\text{max}}| = 21 \mu\text{T}$ [17], was eine Unterschreitung schon bei einem Abstand ab 7 cm bedeutet. Es konnte ferner gezeigt werden, dass eine Reduzierung der äußeren Flussdichte durch die Verwendung von Schalenferritkernen erreicht werden kann [16].

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die kontaktlose Energie- und Datenübertragung ist eine prädestinierte Technologie im Bereich der Antriebssysteme, wenn sich diese auf bewegten Anlagenteilen befinden. Mit dieser Technologie lassen sich potenziell verschleißbehaftete Systemkomponenten bewegter Antriebssysteme, wie Schleifringe oder Schleppkabel ersetzen sowie konstruktiv bedingte Luftspalte überbrücken. Im Verbund mit einer induktiven Datenübertragung können Komplettsysteme realisiert werden, die aufgrund der Nahfeldanwendung nahezu störunanfällig gegenüber äußeren Einflüssen sind.

Der sichere, normkonforme und effiziente Betrieb von Lösungen auf der Basis dieser Technologie erfordert eine Anpassung und Optimierung des Übertragungssystems und der leistungselektronischen Baugruppen für jeden Anwendungsfall. Vor allem für die Übertragung größerer Leistungen ist der Wirkungsgrad ein entscheidendes Kriterium. Das Erreichen hoher Übertragungsleistungen ($> 1 \text{ kW}$) und hoher Wirkungsgrade ($\eta > 80 \%$) erfordert insbesondere bei großem Luftspalt ($> 5 \text{ cm}$) hohe Übertragungsfrequenzen ($f > 50 \text{ kHz}$) sowie Spulensysteme mit Ferritelementen.

Aufgrund des resonanten Betriebes sind schon während des Entwurfes verschiedene Toleranzen (z.B. Falschpositionierung der Spulen) zu berücksichtigen, um sicherzustellen, dass die Vorgabebereiche der elektrischen Betriebsparameter eingehalten werden. Eine höhere Positionierflexibilität sowie das Einhalten von EMV-Vorschriften hinsichtlich Emission des Magnetfeldes kann über eine geometrische Optimierung des Spulensystems erreicht werden. Es wurde gezeigt, wie das elektrische Betriebsverhalten bei seitlichen Spulenverschiebungen über eine Optimierung der Spulengeometrie deutlich verbessert werden kann. Ebenso wurde gezeigt, dass die Grenzwerte für die magnetische Flussdichte schon in einem Spulenabstand von wenigen Zentimetern eingehalten werden können.

Für eine zukünftige Etablierung der Technologie in weiteren Anwendungsbereichen neben Hallentransportanlagen sind vertiefende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig, welche sich der Vereinfachung des Designprozesses, der Verlustminimierung, der Normkonformität und den Toleranzen aber auch der Produzierbarkeit sowie der Plug&Play-Tauglichkeit widmen.

8 Literatur

- [1] Kontaktlose Energieübertragung für mobile Systeme der Stückgutförderung, VDI – Richtlinie 4443 (Entwurf), VDI-Handbuch Materialfluss und Fördertechnik, Band 3: Stetigförderer für Stückgut, 2006
- [2] Eßer, A.: Berührungslose, kombinierte Energie- und Informationsübertragung für bewegliche Systeme, Dissertation, RWTH Aachen, 1992

- [3] Kürschner, D.: Dimensionierung von hochfrequenten Luftspaltübertragern, Institut für Automation und Kommunikation e.V., Haus der Technik - Essen, 08.05.2008, Essen / Germany
- [4] Knap, P.: Berührungslose Energieübertragung auf linear bewegte Systeme, Dissertation, Universität Darmstadt, 99
- [5] Mecke, R.; Rathge, C.; Fischer, W.; Andonovski, B.: Analysis of inductive energy transmission systems with large air gap at high frequencies. European Conference on Power Electronics and Applications, Toulouse 2003
- [6] Bültmann, U.: Berührungslose Energieübertragung - Stand der Technik, Paul Vahle GmbH & Co.KG, Haus der Technik, Essen, 17.05.2006
- [7] Wechlin, M.: Induktive Übertragung, praktisch angewandt, Wampfler AG, Haus der Technik, Essen, 2007
- [8] Schedler, D.: Berührungslose Energieübertragung – Von der Theorie zur industriellen Anwendung, SEW-Eurodrive GmbH & Co.KG, Haus der Technik, Essen, 17.05.2006
- [9] Beckel, D.: Kontaktlose Energie- und Informationsübertragung in rotierenden Systemen im Maschinen- und Anlagenbau, KONTENDA - Workshop, Berlin-Adlershof, 13.05.2005
- [10] O' Brien, K.: Inductively coupled radio frequency power transmission system for wireless systems and devices, Dissertation, TU-Dresden, 2006
- [11] Apneseth, C.; Kjesbu, S.; Dzung, D.; Scheible, G.; WISA - Wireless Interface for Sensors and Actuators, ABB STOTZ KONTAKT GmbH, ABB Technik 4/2002
- [12] Raabe, S.; Boys, J.T.; Covic, G. A.: A High Power Coaxial Inductive Power Transfer Pickup, The University of Auckland, New Zealand, PESC 2008, Rhodes
- [13] Papastergiou, K. D.: A power converter with a rotating secondary stage for an airborne radar system, PhD, University of Edinburgh, 2006
- [14] Mecke, R.: High frequency inverter for contactless energy transmission", PCIM 2001, Nürnberg
- [15] Mecke, R.; Rathge C.: High frequency resonant inverter for contactless energy transmission over large air gap, 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference Aachen, Germany, 2004
- [16] Kürschner, D.; Rathge, C.: Contactless energy transmission systems with improved coil positioning flexibility for high power applications, Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg, Power Electronics Specialists Conference - PESC, 15.-19.06.2008, Rhodes
- [17] Berufsgenossenschaft für Feinmechanik und Elektrotechnik BGFE (Hrsg.), „BGV B11“, Unfallverhütungsvorschrift Elektromagnetische Felder, Köln, 1. Juni 2001
- [18] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", Health Physics 74 (4): 494-522; 1998
- [19] Boeij, J. de; Lomonova, E.; Duarte, J. L.; Vandenput, A. J. A.: Contactless Planar Actuator with Manipulator, EPE 2007, Aalborg
- [20] Sonntag, C. L. W.; Lomonova, E. A.; Duarte, J. L.; Vandenput, A. J. A.: Specialized Receivers for Three-Phase Contactless Energy Transfer Desktop Applications, EPE 2007, Aalborg
- [21] Parspour, N.: Berührungslose Energieübertragung - Stand der Technik, Haus der Technik, Essen, 2008