Elektrotechnik & Informationstechnik (2009) 126/4: 139–148. DOI 10.1007/s00502-009-0631-7

Magnetfeldemissionen von Traktionsmaschinen

G. Lauber, H. Neudorfer OVE, VDE, IEEE, M. Schrödl OVE

Der Themenbereich EMV gewinnt bei Triebfahrzeugen durch hochausgenützte Traktionsmaschinen einerseits und den europaweiten Einsatz von Triebfahrzeugen unter verschiedenen Zugsicherungssystemen andererseits immer mehr an Bedeutung. Ein störungsfreier Betrieb der Zugsicherungsanlagen ist unbedingt erforderlich. Zur Bewertung der auftretenden elektromagnetischen Felder im Außenraum von Traktionsmaschinen wurden diese in verschiedenen Messreihen untersucht. Um eine Aussage bereits vor der Typenprüfung der Maschine zu ermöglichen, wurden Finite-Elemente-(FE-)Berechnungen durchgeführt und mit den Messungen verglichen. Da in vielen Fällen die FE-Berechnung alleine kein geeignetes Ergebnis liefern kann, wird eine hybride Untersuchungsmethode vorgestellt. Abschließend werden noch Maßnahmen zur Abschirmung von B-Feldern bei Traktionsmaschinen angesprochen.

Schlüsselwörter: Traktionsmotor; EMV; Personenschutz; Streufeldbestimmung; Abschirmmaßnahmen

Magnetic field emission of traction machines.

Electromagnetic compatibility for railway vehicles is getting more and more important, on the one hand due to highly utilized traction machines and on the other hand due to the operation of railway vehicles within whole of Europe. Railway security systems have to work without dysfunction at any time. For the estimation of electromagnetic fields in the surroundings of traction machines lots of measurements were carried out. In order to be able to rate these fields before the final tests on the assembled machine are made, finite-element-calculations are carried out and are compared with measurements. In many cases finite-element-calculations cannot provide an appropriate solution. Therefore, hybrid evaluation methods are used. Finally, shielding methods for the magnetic field of a traction machine are discussed.

Keywords: traction machine; electromagnetic compatibility; personal safety; leakage field measurements; shielding methods

Eingegangen am 11. Dezember 2008, angenommen am 12. Februar 2009
© Springer-Verlag 2009

1. Einleitung

An Schienenfahrzeuge werden heute neben Anforderungen wie gute Beschleunigungswerte, hohe Endgeschwindigkeiten, geringe Geräuschemission und hoher Fahrkomfort auch sehr hohe Ansprüche an einen sicheren und unfallfreien Betrieb gestellt. Dies bedingt, dass die Gleiskörper im Besonderen für den Hochgeschwindigkeitsverkehr tauglich gemacht und entsprechende Zugsicherungsanlagen errichtet werden müssen. Bedingt durch den wachsenden Bedarf an nachrichtentechnischen Systemen mit immer komplexeren elektronischen und rechnergestützten Einheiten in der Schienenverkehrsleittechnik kommt der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) eine stetig steigende Bedeutung zu.

Um das Ziel des ungehinderten grenzüberschreitenden Zugverkehrs zu erreichen, ist es notwendig, eine europaweit einheitliche Zugsicherung und -beeinflussung zu implementieren. Aus diesem Grund wurde das European Train Control System (ETCS), welches eine Komponente eines einheitlichen europäischen Eisenbahnverkehrsleitsystems (European Rail Traffic Management Systems, ERMTS (*Lübke et al., 2008*)) darstellt, entwickelt. In vielen strittigen Punkten konnten bereits Einigungen erzielt werden, einheitliche EMV-Grenzwerte für die Sensoren wurden jedoch noch nicht festgelegt (*EU, 2006*).

Die Fehlerwahrscheinlichkeit von Sicherungseinrichtungen muss minimiert werden und sollte gegen Null gehen. Die Fehleranfälligkeit wurde seit jeher mit großer Sorgfalt untersucht. Zurzeit fehlen allerdings konkrete nationale und internationale Grenzwertdefinitionen der Störaussendung von Fahrzeugen im Hinblick auf Sensoren der Zugsteuerungssysteme ebenso wie konkrete Werte der Störbeeinflussungsgrenzen der jeweiligen Sensoren. Es bleibt nur die Möglichkeit, auf einer Versuchsstrecke (siehe u. a. *EN 50238*) die Verträglichkeit eines gefertigten Fahrzeuges mit den Leitsystemen zu verifizieren und gegebenenfalls eine Korrektur am Fahrzeug vorzunehmen.

Dieses Vorgehen wird auch dann noch notwendig sein, wenn einheitliche Grenzwerte für die Störaussendung eines Schienenfahrzeuges festgelegt sind. Der daraus für die Betreiber von Fahrzeugflotten entstehende entscheidende Vorteil liegt in der Objektivierung des Verfahrens. Dies ist besonders im Hinblick auf den grenzüberschreitenden Zugverkehr von Bedeutung, da die Überprüfung meist auf nationaler Ebene erfolgt. Der problemlose Einsatz in einem Schienennetz eines Mitbewerbers ist momentan mit der Überprüfung in obigem Sinne im Allgemeinen nicht gewährleistet. Einheitliche Grenzwerte wären ein wichtiger Fortschritt, um Wettbewerbsverzerrungen zu verhindern.

Die Randbedingungen für die Auslegung von Traktionsmaschinen stellen in vielerlei Hinsicht hohe Anforderungen an die Konstruktion. Ein wichtiges einschränkendes Kriterium ist der im Fahrzeug zur Verfügung stehende Einbauraum, der durch die Bauart des Fahrzeuges (Spurweite, Niederflurbauweise, ...) vorgegeben ist. Daher muss der für den Fahrmotor mit seinen gewünschten Leistungsmerkmalen vorgesehene, meist sehr knapp bemessene Einbauraum so effektiv wie möglich ausgenützt werden. Bei gegebenem Volumen ist daher die Leistung bzw. das Drehmoment der Traktionsmaschine zu maximieren, weshalb diese bis an die Grenzen der mechanischen, thermischen, elektrischen und magnetischen Belastbarkeit ausgenützt wird. Speziell die hohe magnetische

Lauber, Gernot, Dipl.-Ing., Neudorfer, Harald, Dipl.-Ing. Dr. techn. Dr. phil., Traktionssysteme Austria GmbH, Brown-Boveri-Straße 1, 2351 Wiener Neudorf, Österreich; **Schrödl, Manfred, Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn.,** Technische Universität Wien, Institut für Elektrische Antriebe und Maschinen, Gußhausstraße 25-25a, 1040 Wien, Österreich (E-Mail: harald.neudorfer@traktionssysteme.at)

Ausnützung ist für die vorliegende Untersuchung von besonderer Bedeutung. Trotz der allgemein hohen Beanspruchungen im rauen Betriebsalltag soll eine Lebensdauer von 30 Jahren erreicht werden. Ein Vergleich mit Industriemaschinen ist daher nur sehr eingeschränkt möglich.

Die Art der Anspeisung der Traktionsmotoren ist für die Betrachtung der EMV von großer Bedeutung. Diese erfolgt derzeit fast ausschließlich über Wechselrichter, wodurch der Statorstrom eine von der Sinusform abweichende Gestalt aufweist. Das bewirkt zusätzliche höherfrequente Komponenten im Spektrum des Maschinenstreufeldes, wodurch die Bandbreite der Störaussendung deutlich erhöht wird. Da moderne Traktionswechselrichter mit Schaltfrequenzen bis zu einigen Kilohertz arbeiten, reichen auch die Oberschwingungen bis in diesen Frequenzbereich hinein.

Für die vorliegenden elektromagnetischen Störaussendungen muss der klassische EMV-Begriff weiter gefasst werden. Laut Definition betrifft die EMV im üblichen Sinn nur die funktionale, technische Ebene. Für eine umfassende Betrachtung ist allerdings auch die Beeinflussung des Menschen durch das elektromagnetische Feld eines Schienenfahrzeuges von Bedeutung.

1.1 Personenbeeinflussung

Die allgemein gültige ÖNORM E 8850 legt Grenzwerte für die magnetische Flussdichte, der eine Person maximal ausgesetzt sein darf, fest. Es wird zwischen der Allgemeinbevölkerung und beruflich exponierten Personen, zu denen auch Triebfahrzeugführer zählen, unterschieden. Eine groß angelegte Studie der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) (*Lörtscher, 2004*) stellt die Unbedenklichkeit der Exposition von Bahnbediensteten fest. Als Hauptverursacher werden die Hauptstromapparate und ihre Verkabelungen (insbesondere Fahrmotorzuleitungen) sowie die Zugsammelschiene angeführt. Die Anordnung der Geräte und Kabel hat gemäß dieser Untersuchung einen entscheidenden Einfluss auf die auftretenden Induktionen am Arbeitsplatz des Triebfahrzeugführers. Allgemein kann festgestellt werden, dass sich die Problematik des Personenschutzes in ihrer Gesamtheit vor allem durch die eindeutige normative Lage zufriedenstellend behandeln lässt.

1.2 Beeinflussung von technischen Einrichtungen

Wesentlich schwieriger und komplexer stellt sich die Situation für die Untersuchung und Beurteilung der EMV von Geräten und Anlagen im Schienenverkehr dar. Grundsätzlich wird im Folgenden davon ausgegangen, dass die EMV zwischen den einzelnen Geräten im Fahrzeuginneren sichergestellt ist. Es sollen nur die ortsfesten Einrichtungen am Gleiskörper und die damit verbundenen Störungen beim Überfahren durch Fahrzeuge betrachtet werden. Bei den potenziellen Störsenken für die emittierten Felder von Traktionsmotoren handelt es sich daher beispielsweise um Sensoren der Zugbeeinflussungssysteme und Gleisfreimeldeeinrichtungen, welche in mehreren Varianten von unterschiedlichen Herstellern gebräuchlich sind. Für die Funktionsprinzipien der Sensoren sei auf (*Petkova, 2006*; *Frauscher, 2006*) u. a. verwiesen.

Wegen der Komplexität des Themas, des Fehlens von einschlägigen Vorschriften und Normen sowie mangels ausreichend aussagekräftiger Fachliteratur, stellt die Behandlung des Problems eine große Herausforderung dar. Viele Faktoren sind dafür verantwortlich, dass es schwierig ist, eine klare Aussage zu treffen, ob ein Motor zu einer Störung von Sensoren führen kann. Einerseits liegt dies, wie bereits erwähnt, an den nicht existenten allgemeinen Grenzwertdefinitionen, andererseits spielt auch die Vielfalt der im Einsatz befindlichen Sensormodelle eine wesentliche Rolle. Außerdem stellen die fehlenden, unzureichenden oder unseriösen Gabarits (Maximalwerte der Störbeeinflussung in Abhängigkeit von Frequenz und Zeitdauer, welche zu keiner Beeinträchtigung des Zugbeeinflussungssystemes führen (*EN 50238, 2003*)) der jeweiligen Systeme bzw. Systembetreiber eine Schwierigkeit dar.

2. Überblick über die normative Situation

Zahlreiche Normen reglementieren die Aussendung elektromagnetischer Wellen und Felder. Nachfolgend sind diejenigen Normen angeführt, die dem Problembereich nahe kommen und zur Anwendung geeignet erscheinen.

EN 50121:2000 behandelt Prüfverfahren für die Störaussendung und die Störfestigkeit von elektrischen und elektronischen Geräten in einem Frequenzbereich von 0 bis 400 GHz. Weiters werden Prüfaufbauten zur Störfestigkeitsuntersuchung von leitungsgeführten und gestrahlten Störgrößen festgelegt. Diese Norm geht allerdings von einem Abstand von 10 m vom Fahrzeug aus und ist somit für die Betrachtung der Störbeeinflussung von Sensoren am Gleiskörper nicht anwendbar. In Teil 3-1 wird im Anhang, welcher jedoch nicht als verbindlich anzusehen ist, festgestellt, dass für den Fahrmotor kein Erfordernis einer Prüfung besteht.

Die bereits erwähnte allgemein gültige ÖNORM E 8850, welche die Exposition von Personen durch elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 0 bis 300 GHz beschränkt, trifft sehr klare Aussagen und ist in jedem Fall einzuhalten. In Abb. 1 ist die Grenzwertkurve dieser Norm in Abhängigkeit der Frequenz auszugsweise dargestellt. Wenn man die Emissionen des Fahrmotors betrachtet, sind diese Beschränkungen vor allem bei Nahverkehrsmitteln wie Triebwagenzügen oder Straßenbahnen zu beachten. Besonders bei Niederflurfahrzeugen ist die Situation so, dass sich der Antriebsteil in unmittelbarer Nähe zum Fahrgastraum befindet. Bei Vollbahnlokomotiven besteht hingegen eine räumliche Trennung der Antriebseinheit vom Fahrgastraum.

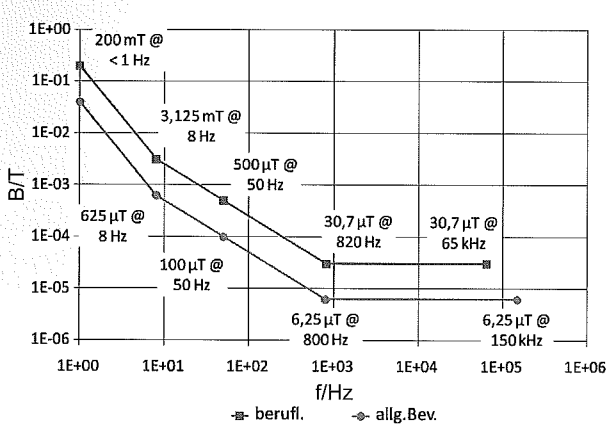


Abb. 1. Grenzwerte der magnetischen Induktion für Allgemeinbevölkerung und beruflich exponierte Personen

Die Norm (*EN 50238, 2003*) legt fest, dass ein Schienenfahrzeug, bevor es im regulären Betrieb zugelassen wird, einer Kompatibilitätsprüfung in Bezug auf die Zugsicherungsanlagen unterzogen werden muss. Als Ursache für die Beeinflussungen zwischen Fahrzeug und Signaltechnik werden unter anderem der Schienenstrom, elektromagnetische Felder und elektrische Potenzialdifferenzen zwischen Achsen genannt. In der Norm wird bei den Gleisfreimeldesystemen zwischen Gleisstromkreisen und Achszählern bzw. Raderkennungssystemen unterschieden. Zum Zeitpunkt der Untersuchung sind noch Ergänzungen der Norm ausständig (*Jank, Knight, 2004*).

Bei Betrachtung der Schienenströme ist zu bedenken, dass der Schienenrückstrom nicht nur Gleisstromkreise beeinträchtigt, sondern in indirekter Wirkung auch die Funktionstüchtigkeit der Sensoren, die auf dem Funktionsprinzip der induktiven Kopplung basieren oder mit Permanentmagneten arbeiten, mindern könnte. Bei Senso-

ren der genannten Bauarten ist auch die direkte Beeinflussung durch Kopplung mit Streuflüssen zu berücksichtigen. Die stärkste Empfindlichkeit von Sensoren gegenüber Störungen ist im Normalfall bei der Nutzfrequenz des Sensors gegeben, welche typischerweise über der Frequenz des Bahnversorgungsnetzes liegt. Allerdings sind sowohl der Schienenrückstrom als auch das Streufeld des Motors mit Oberwellen behaftet, wodurch in bestimmten Fällen die Störgrenzwerte im Bereich der Arbeitsfrequenz des Sensors überschritten werden können. Daher wird zunehmend davon abgegangen, den Schienenrückstrom allein als Größe zur Festlegung von Grenzwerten heranzuziehen. Stattdessen wird erwogen, für Achszähler direkt die magnetische Feldstärke oder das am Ort des Sensors festzustellende Pulsmuster festzulegen. Die Arbeitsgruppe WGA4-2 der CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique, Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung) ist mit der Aufgabe betraut, diese Ansätze in einer Erweiterung der bestehenden Norm umzusetzen und somit einheitliche Grenzwerte für den interoperablen Schienenverkehr zu schaffen.

3. Messtechnische Untersuchung der Streufelder von Traktionsmaschinen

3.1 Betrachtung der räumlichen Verteilung der Magnetfeldemissionen

In Abb. 2 sind verschiedene Messpunkte der magnetischen Induktion außerhalb eines Traktionsmotors mit einer Leistung von 100 kW in der Ebene normal zur Motormittenachse dargestellt. Gemessen wurde mit dem B-Feld-Messgerät der Firma *NARPA* Type EFA 200 in der „magnetischen Mitte", also in der achsialen Mitte des Eisenblechpaketes. Bei den dargestellten Punkten handelt es sich um „Isopunkte", also um Punkte gleicher Flussdichte. Bei der Messung wurde jeweils der Ort des gewünschten Flussdichtewertes entlang der vorgegebenen Entfernungsrichtungen aufgesucht und der Abstand bezogen auf die Motormittenachse ermittelt. Der in der Abbildung eingezeichnete Kreis dient dem einfacheren Erkennen der Kreissymmetrie. Alle untersuchten Objekte wiesen eine Zylindersymmetrie der Flussdichtewerte in achsialer Richtung auf. Erst bei Annäherung an die Lagerschilde änderte sich die Form des Feldes.

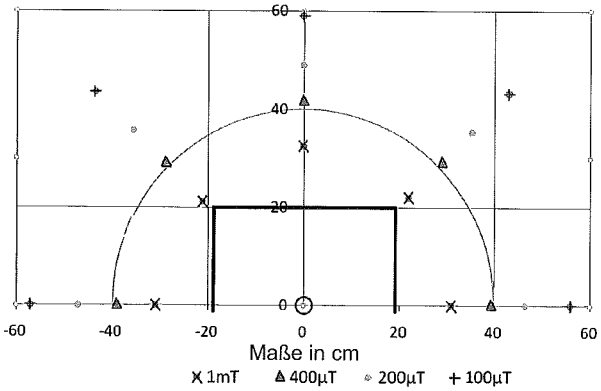


Abb. 2. Darstellung der Punkte gleicher magnetischer Induktion eines Traktionsmotors

3.2 Ermittlung der streufeldbestimmenden Parameter

In einem großangelegten Versuchsaufbau wurden zahlreiche Messreihen zur Ermittlung der streufeldbestimmenden Parameter aufgenommen. In Abb. 3 ist die Streuflussdichte in Abhängigkeit vom Drehmoment der untersuchten elektrischen Maschine (Nennleistung $P_N = 320\,\text{kW}$, Nenndrehzahl $n_N = 2370\,\text{min}^{-1}$) aufgetragen. Die

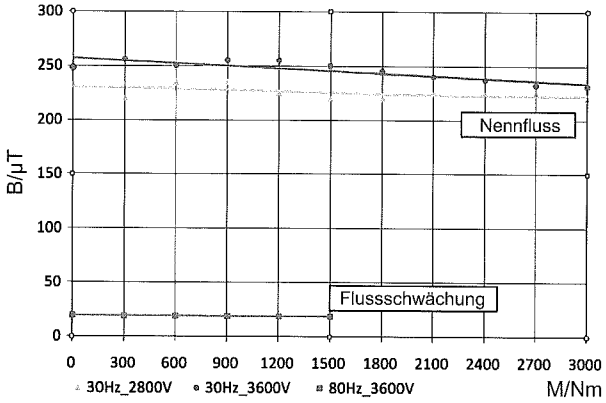


Abb. 3. Magnetische Flussdichtewerte (Effektivwerte) aller gemessenen Punkte in Abhängigkeit des abgegebenen Moments

Bezeichnung „Nennfluss" kennzeichnet jene Messungen, die mit Nennfluss im Stator durchgeführt wurden. Das Attribut „Flussschwächung" bezeichnet jene Werte, die bei Messungen der Streuflussdichte mit einer durch die Wechselrichtersteuerung vorgegebenen Statorflussschwächung ermittelt wurden. Die Last- und die Prüfmaschine wurden mit Traktionswechselrichtern gespeist.

Man kann erkennen, dass die Streuflussdichte weitgehend von der Belastung unabhängig ist. Wie auch in Abb. 4 zu sehen, ist jedoch ein Zusammenhang der Streuflussdichte mit der magnetischen Ausnutzung bzw. dem momentanen magnetischen Betriebspunkt der Maschine gegeben. In dieser Abbildung ist die Streuflussdichte über der prozentuellen magnetischen Ausnutzung (Nennfluss = 100 %) der Maschine aufgetragen. Sehr deutlich ist das überproportionale Ansteigen des Streufeldes mit der Erhöhung des Flusses in der Maschine zu erkennen.

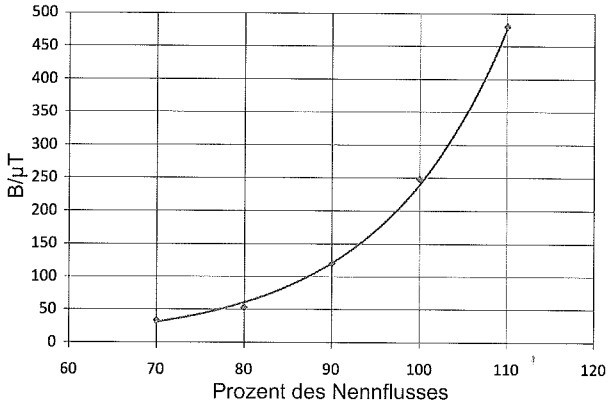


Abb. 4. Messwerte der magnetischen Induktion in Abhängigkeit des Flusses der Maschine

Im Zuge dieser Messreihe wurden auch Fast-Fourier-Analysen des magnetischen Flussdichtesignals durchgeführt. Diese sind in Abb. 5 für schwache magnetische Ausnutzung (70 % des Nennflusses) und in Abb. 6 für sehr hohe magnetische Ausnutzung (110 % des Nennflusses) dargestellt. Beide Messungen wurden am selben Ort vorgenommen. Beim Vergleich der beiden Abbildungen fällt auf, dass sich die qualitative Form der Kurven nicht unterscheidet, während die Absolutbeträge der Peaks bei höherer Ausnutzung erwartungsgemäß deutlich höher ausfallen.

In Abb. 7 sind die Ergebnisse einer weiteren Messreihe an einer Traktionsmaschine mit Wechselrichterspeisung zu sehen. Hier

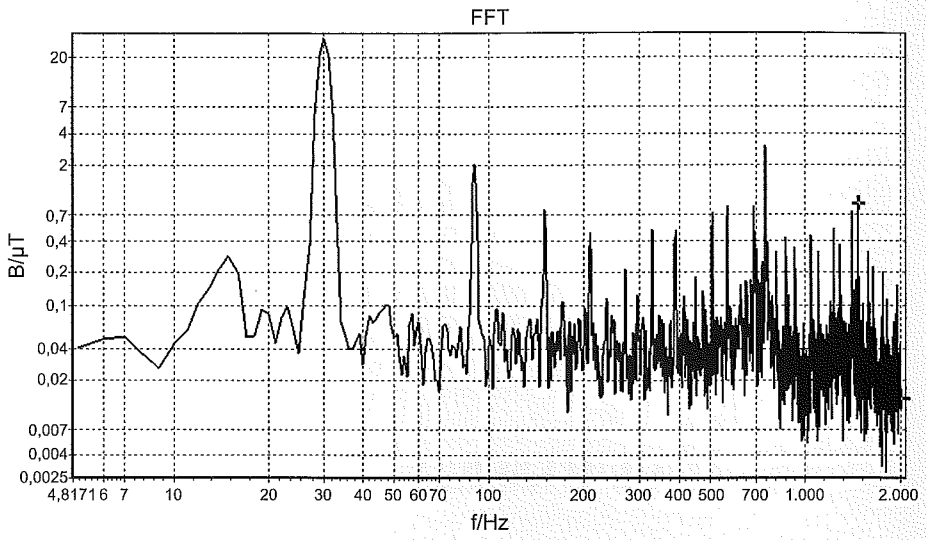


Abb. 5. Spektrum der magnetischen Flussdichte bei 70 % des Nennflusses

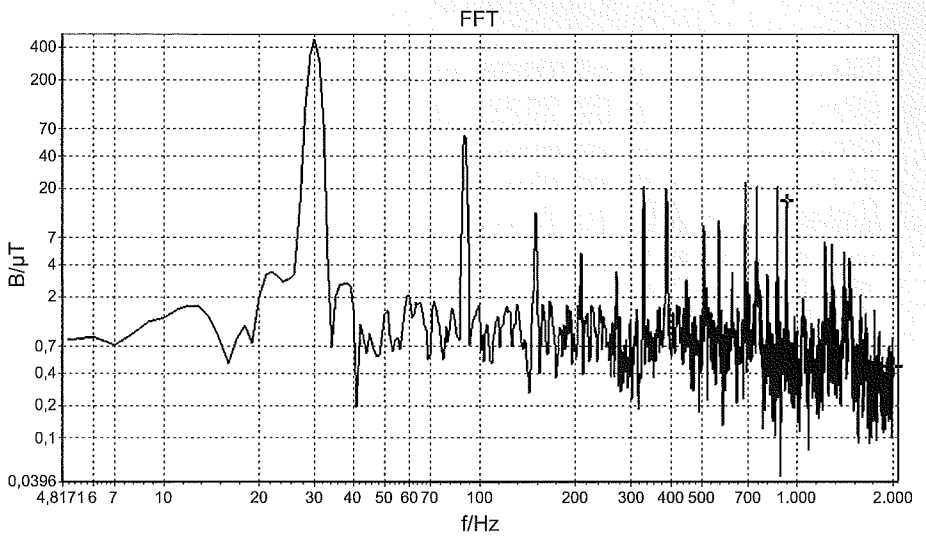


Abb. 6. Spektrum der magnetischen Flussdichte bei 110 % des Nennflusses

erkennt man, dass die Sättigungsoberwellen des Magnetfeldes eine Abnahme mit einer Tiefpasscharakteristik höherer Ordnung aufweisen. In derselben Abbildung sind ab 1 kHz wieder höhere Peaks zu sehen. Diese sind auf die von der Sinusform abweichenden Stromform, welche durch die Wechselrichterspeisung bedingt ist, zurückzuführen. Aus einem Vergleich der Spektren von Messungen an derselben Maschine sowohl mit Sinus- als auch mit Wechselrichterspeisung ist zu erkennen, dass die höherfrequenten Anteile nur bei gepulster Anspeisung auftreten.

4. Finite-Elemente-Untersuchung

Bei der Auslegung und Konstruktion einer elektrischen Traktionsmaschine wäre schon zu einem frühen Zeitpunkt eine Bewertung der zu erwartenden Streuflüsse wünschenswert und sinnvoll. Auf diese Weise könnten bereits während des Konstruktionsprozesses Maßnahmen gegen zu hohe Induktionswerte im Außenraum von Traktionsmaschinen gesetzt werden. Die Ermittlung der Streuflüsse müsste rechnerisch mit Hilfe eines Simulationstools erfolgen, da eine Messung erst an der bereits gefertigten Maschine, etwa an einem Prototyp, durchgeführt werden kann. Notwendige Eingriffe in die Auslegung einer Maschine zu einem späteren Zeitpunkt sind nur mit einem beträchtlichen Mehraufwand möglich.

Zur Kontrolle der Auslegung des magnetischen Kreises einer elektrischen Maschine wird üblicherweise eine Simulation mit Hilfe der Methoden der Finiten Elemente (FE) durchgeführt. Für diese Betrachtung wird als Systemgrenze in der Regel die Außenkontur des Stators oder des umgebenden Gehäuses gesetzt. Um die Feldverhältnisse außerhalb des Statorblechpaketes darstellen und das Streufeld bestimmen zu können, wäre eine Verlegung des Bereiches mit dem Vektorpotential Null in den Außenraum des Motors denkbar.

Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse einer FE-Berechnung für den Eisenkreis einer Maschine (Nennleistung $P_N = 125$ kW). Dabei handelt es sich hier nur um den Blechschnitt des simulierten Motors. Zusätzliche Aussagen über das Feld im Außenraum liefert eine FE-Simulation, welche nach der zuvor beschriebenen Art durchgeführt wurde. Die Ergebnisse einer solchen FE-Rechnung sind in Abb. 9a (Fernbereich) und 9b (Nahbereich) ersichtlich. Wegen des großen Wertebereiches wurde das Feldbild der magnetischen Flussdichte im Außenraum in zwei getrennten Teilbildern dargestellt. Die mess-

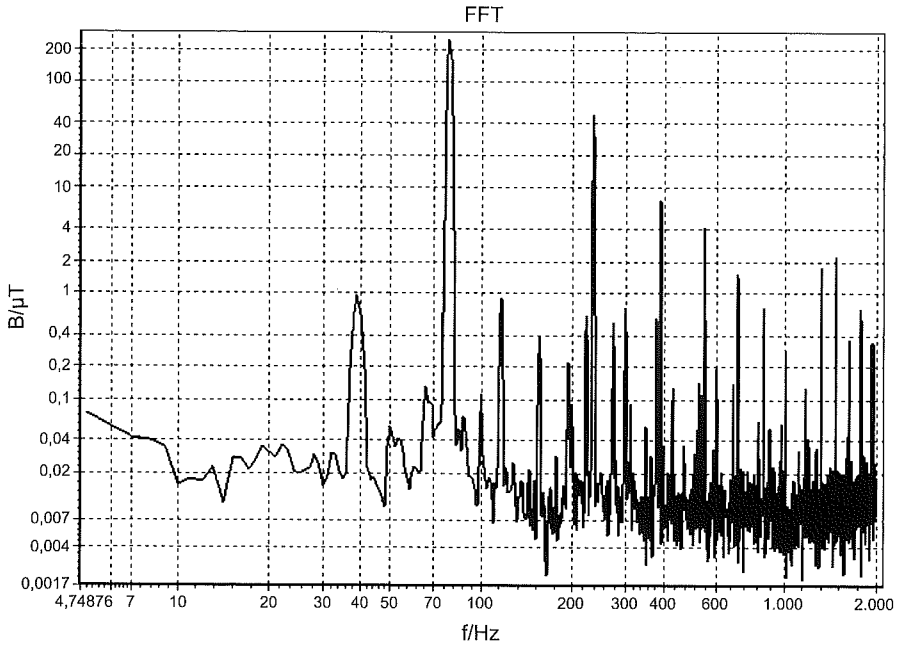


Abb. 7. Spektrum der magnetischen Flussdichte

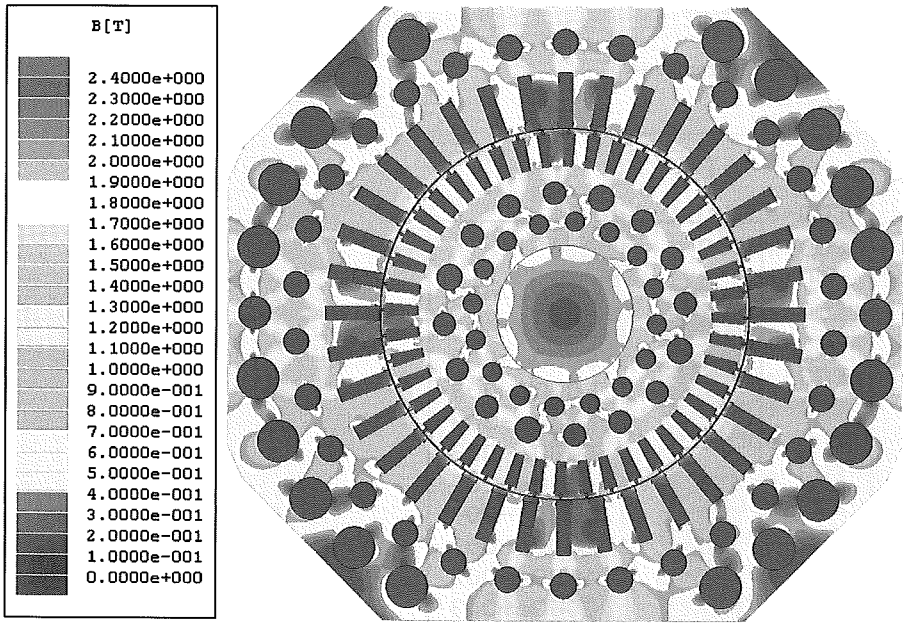


Abb. 8. FE-Berechnung: Induktionsverteilung im Aktivteil der Traktionsmaschine

technisch gefundene Kreissymmetrie wird durch die Berechnungsergebnisse bestätigt, wobei die nach außen größer werdenden Abstände der Isolinien auf ein logarithmisches Abnahmeverhalten schließen lassen.

5. Vergleich zwischen Messung und FE-Berechnung

An derselben Maschine, für die eine FE-Rechnung durchgeführt wurde, fand auch eine Messung des Entfernungsgesetzes statt. Als Entfernungsgesetz oder Abstandsgesetz wird die Darstellung der Flussdichtewerte im Außenraum bezogen auf den Abstand zum Objekt (in diesem Fall zur Symmetrieachse des Motors) bezeichnet. Ein Vergleich zwischen Messung und Rechnung ist Abb. 10 zu entnehmen, wobei die obere Linie das Simulationsergebnis und die untere die Messreihe am realen Objekt repräsentiert. Eine Hauptabmessung der Maschine ist zur Orientierung eingezeichnet.

Der Unterschied im Abnahmeverhalten ist deutlich zu erkennen. Während die Messung ein Entfernungsgesetz mit der vierten Potenz zeigt, ergibt die FE-Berechnung eine Abnahme mit der dritten Potenz. Aus dem Unterschied zwischen Rechnung und Messung ist zu schließen, dass die Simulation alleine kein geeignetes Mittel zur Untersuchung des Streufeldes darstellt.

Die Abstandsgesetze stammen aus der Feldtheorie, wo einer Quelle bestimmter Ausführung ein charakteristisches Abnahmeverhalten zugeordnet wird. In der EMV und im Personenschutz

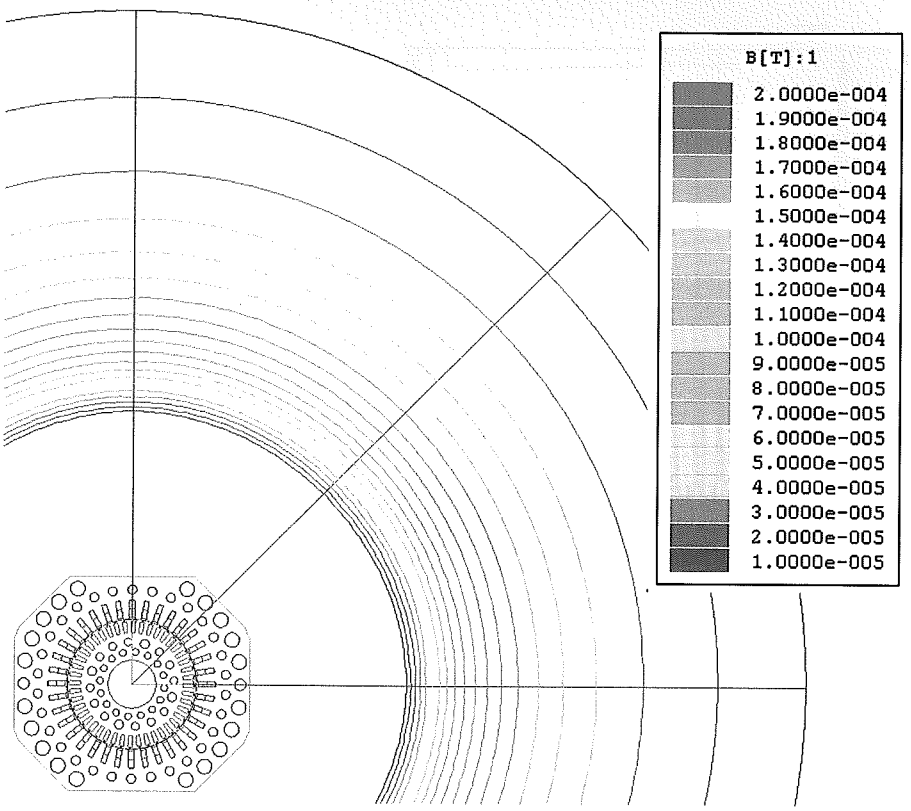


Abb. 9a. FE-Berechnung: B-Feld im Außenraum der Maschine (Fernbereich)

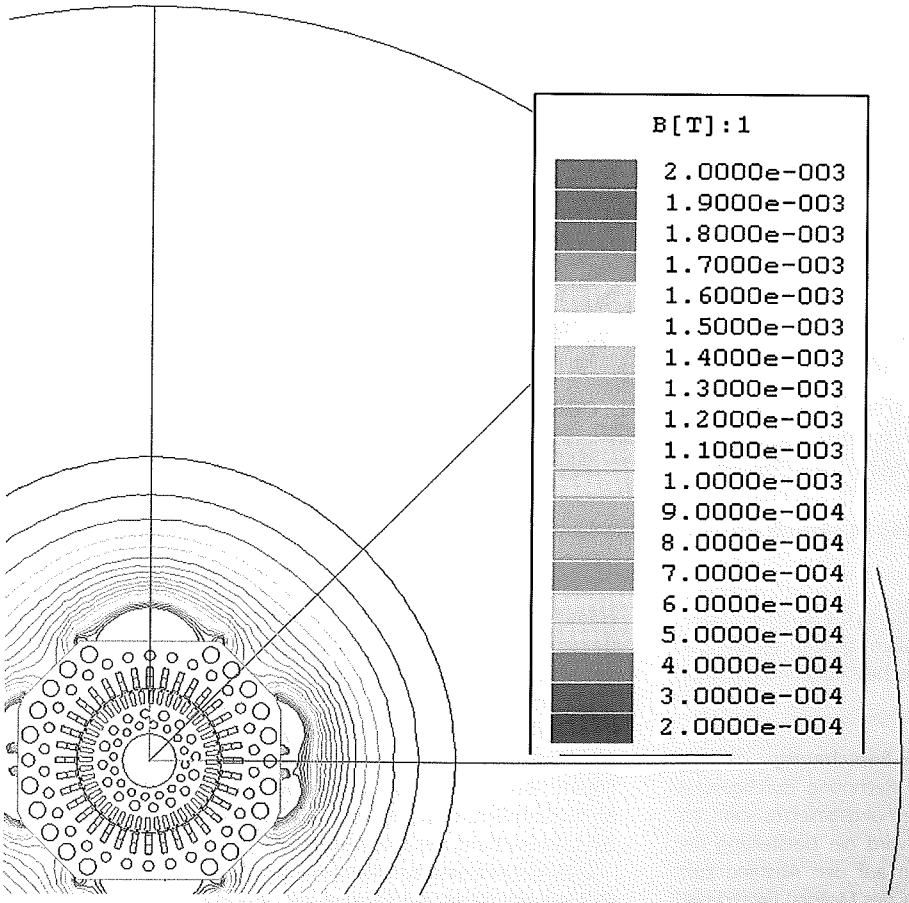


Abb. 9b. FE-Berechnung: B-Feld im Außenraum der Maschine (Nahbereich)

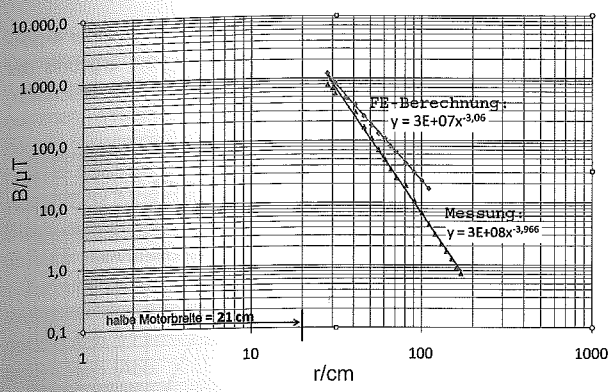


Abb. 10. Vergleich zwischen Messung und FE-Berechnung

bedient man sich dieses Wissens, um eine gezielte Minderung des Streufeldes zu erreichen. Nicht nur durch eine Vergrößerung des Abstandes zwischen Quelle und Senke, sondern auch durch Maßnahmen wie Verdrillen der Leiter, Ausführung als Doppelleiter etc. ist eine Verringerung der magnetischen Flussdichte an einem bestimmten Ort möglich. Zum Beispiel gilt für den unendlich langen Linienleiter ein Entfernungsgesetz mit $1/r$, während bei einer Doppelleitung, bei der Hin- und Rückleiter nebeneinander verlegt sind, das Feld mit $1/r^2$ abnimmt. Für geometrische Grundformen können die Entfernungsgesetze oft relativ einfach ermittelt werden (*Hadrian, 1981*).

Tabelle 1. Entfernungsgesetze in Abhängigkeit der Polpaarzahl

Polzahl	Abnahme mit Entfernung
2	r^3
4	r^4
8	r^5

Bei elektrischen Maschinen lässt sich zeigen, dass das Verhalten der Streufelder durch ihre Polpaarzahl charakterisiert ist (Tabelle 1). Die in der Tabelle angegebenen Gesetze der polpaarzahlabhängigen Flussdichteabnahme wurden messtechnisch bei jeweils einem 2-, 4- und 8-poligen Vertreter verifiziert (Abb. 12a–c).

Der Grund der deutlichen Abweichung zwischen Messung und FE-Berechnung liegt in den unterschiedlichen geometrischen Annahmen, die als Basis für die Betrachtung dienen. Während für die zweidimensionale FE-Berechnung ein unendlich langer Körper vorausgesetzt wird, um sich auf zwei Dimensionen beschränken zu können, was innerhalb des magnetischen Aktivteils zulässig ist, entspricht die reale Maschine durch ihre würfelige Bauform ab einer gewissen Entfernung eher einer Kugel als einem langen Zylinder. Durch die Tatsache, dass die Entfernungsgesetze wesentlich von der geometrischen Form und der Anzahl der Pole (Multipolentwicklung) abhängig sind, lässt sich der Unterschied zwischen Messung und FE-Berechnung schlüssig erklären.

Die Untersuchung zeigt auch, dass eine FE-Simulation, so wertvoll sie für die Berechnung des Eisenkreises einer elektrischen Maschine

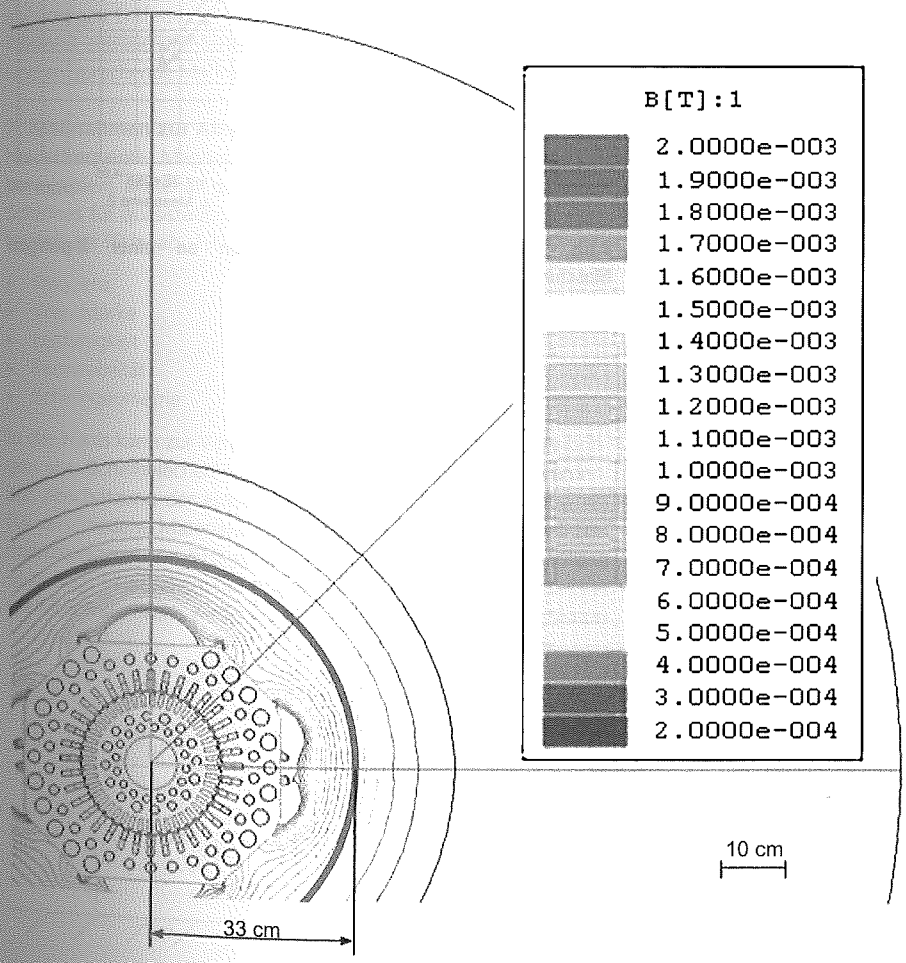


Abb. 11. B-Feld im Außenraum einer Traktionsmaschine

ist, alleine nicht ausreicht, um die Verhältnisse im Außenraum zu bestimmen. Allerdings ermöglicht das Wissen über die Entfernungsgesetze eine Abschätzung der zu erwartenden magnetischen Induktion. Eine Kombination beider Betrachtungsweisen führt zur hybriden Untersuchungsmethode.

6. Hybride Untersuchungsmethode

6.1 Theoretische Überlegungen

Bei einer neu zu konstruierenden Maschine ist im Allgemeinen eine FE-Berechnung des Magnetkreises notwendig. Unter Ausnutzung dieser Berechnung ist die Bestimmung der Größenordnung der Streufelder bereits im Auslegungsstadium möglich und nur mit einem geringen Mehraufwand verbunden. Die notwendige Änderung für die FE-Simulation betrifft die Verlegung des Gebiets mit Vektorpotenzial Null in den Bereich außerhalb des Blechpaketes. Durch die Zusammenführung des Ergebnisses der Simulation und des Wissens über den Zusammenhang des Entfernungsgesetzes mit der Polpaarzahl ist eine Abschätzung der Streuflussdichte an einem gewünschten Ort durchführbar.

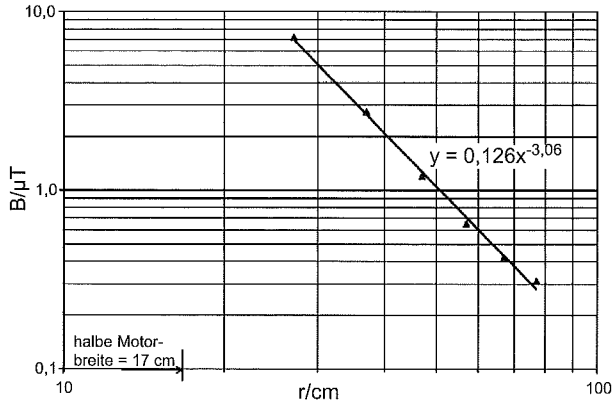


Abb. 12a. Entfernungsgesetz gemessen an einer 2-poligen Maschine

Diese Vorgehensweise sei anhand eines Beispiels mit einer 4-poligen Maschine verdeutlicht. Ausgegangen wird vom Ergebnis der Simulation, welches in Abb. 11 gezeigt ist. Daraus ist ersichtlich,

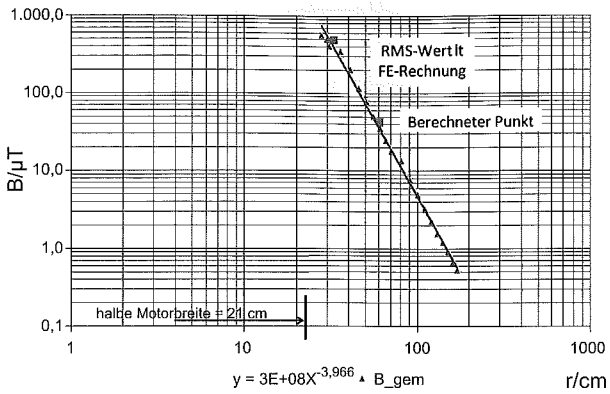


Abb. 12b. Entfernungsgesetz gemessen an einer 4-poligen Maschine

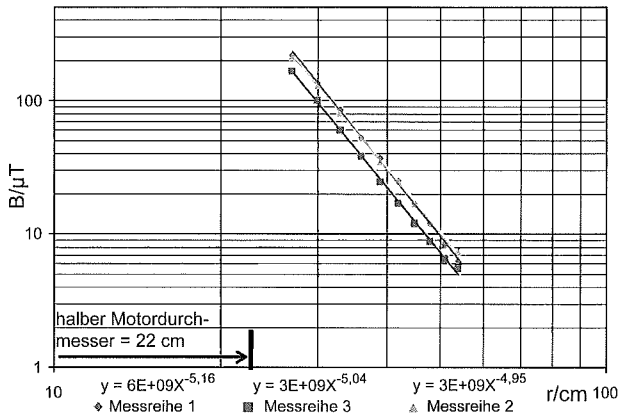


Abb. 12c. Entfernungsgesetz gemessen an einer 8-poligen Maschine

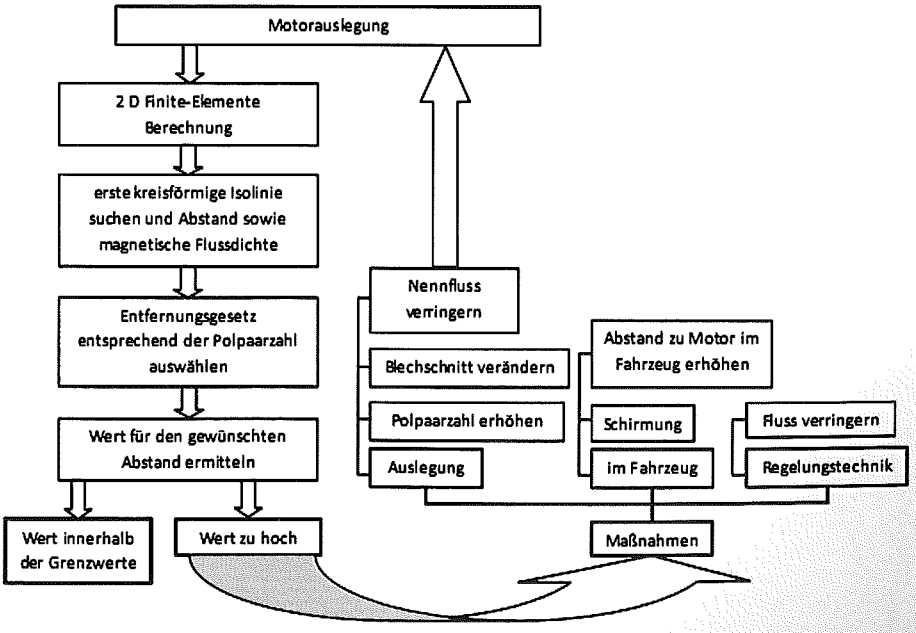


Abb. 13. Flussdiagramm zur Bestimmung der magnetischen Flussdichte außerhalb einer elektrischen Maschine

dass das Feld im Nahbereich der Oberfläche des Motors noch keine Kreissymmetrie besitzt. Für die Anwendung des Entfernungsgesetzes wird jedoch eine kreissymmetrische Verteilung des Streuflusses angenommen, weshalb als Ausgangspunkt die ersten Isolinien mit annähernd kreissymmetrischer Form aufgesucht werden (hervorgehobene Linie in Abb. 11). Der Wert der magnetischen Flussdichte und der Abstand zur Motormittenachse werden an diesem Punkt bestimmt. Durch die Kenntnis des Entfernungsgesetzes kann daraus die Flussdichte im gewünschten Abstand ermittelt werden.

Zur Überprüfung dieser Methode wurden die so gewonnenen Werte mit den Ergebnissen der Messung verglichen. Dazu wurden der aus Abb. 11 ermittelte und der extrapolierte Wert in die Messreihe eingetragen (Abb. 12b). Die Abbildung zeigt das gemessene Entfernungsgesetz vierter Potenz in doppelt logarithmischer Darstellung, wobei zur Orientierung auch eine Hauptabmessung des Motors eingezeichnet ist. Von den beiden eingetragenen gerechneten Punkten (kleine Quadrate) bezeichnet der obere den Wert der magnetischen Flussdichte bzw. den Abstand der Isolinie aus Abb. 11. Der untere Punkt stellt das Ergebnis der Extrapolation dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Berechnung mit der hybriden Untersuchungsmethode und die Messung ausreichend gut übereinstimmen.

6.2 Systematische Vorgangsweise zur Erreichung von Vorgaben

Im Flussdiagramm (Abb. 13) wird eine mögliche Vorgangsweise zur Einhaltung von Flussdichtevorgaben in der Umgebung von Traktionsmotoren dargestellt. Ausgehend von einer 2D-FE-Berechnung wird eine etwa kreisförmige Isolinie der magnetischen Flussdichte in geringem Abstand zum magnetischen Aktivteil berechnet. Die anschließende Flussdichteverteilung wird gemäß dem polpaarzahlabhängigen Entfernungsgesetz (siehe Tabelle 1) bis zum gesuchten Abstand extrapoliert. Sollten Vorgabewerte überschritten werden, sind entsprechende Maßnahmen (gemäß Flussdiagramm) zu treffen.

7. Maßnahmen zur Abschirmung des magnetischen Feldes

Niederfrequente Magnetfelder können durch Hüllen aus hochpermeablem Material geschirmt werden. Die Wirksamkeit eines Schirmes für quasistationäre Felder wird von mehreren Parametern beeinflusst (*Schwab, 1991*):

- Frequenz
- Wandstärke
- Leitfähigkeit
- Permeabilität
- Schirmgeometrie

In der Praxis kann zur Verringerung der Streuflussdichte das Anbringen von Schirmblechen unter dem Fahrmotor angedacht werden. Zur Abschätzung der erreichbaren Dämpfung wurden Messreihen für verschiedene Materialien aufgenommen. Dabei wurde das Frequenzspektrum von 5 Hz bis 2 kHz betrachtet. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 14 zu sehen. Der Abstand des zu untersuchenden Bleches zur Motoroberfläche wird mit r_1 bezeichnet, der Abstand der Motor-

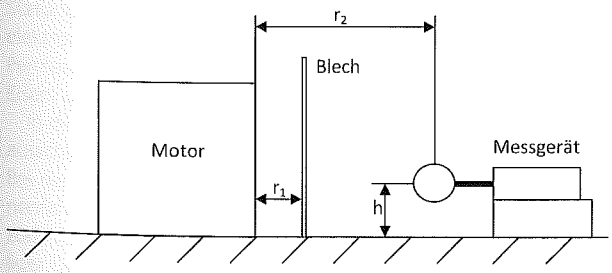


Abb. 14. Skizze des Versuchsaufbaus zur Abschirmung des B-Feldes

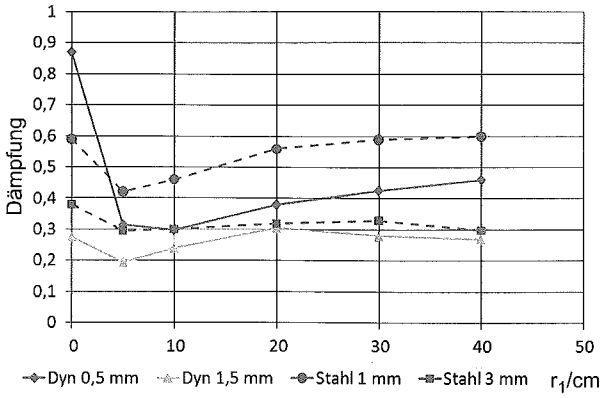


Abb. 15. Dämpfung in Abhängigkeit des Abstandes und des Schirmmaterials

oberfläche zum Mittelpunkt des Messgerätes mit r_2 und der Abstand zum Untergrund mit h. In Abb. 15 sind die Ergebnisse der Messung für Stahl und Dynamoblech zusammengestellt. Der Abstand r_1 des Bleches von der Motoroberfläche ist auf der Abszisse aufgetragen, die Position des Messgerätes ($r_2 = 48{,}5$ cm und $h = 25$ cm) wurde während der Messreihen nicht verändert. Auf der Ordinate ist die Dämpfung D angegeben, welche durch die magnetische Flussdichte B_S *nach* dem Einbringen des Schirmes bezogen auf die magnetische Flussdichte B_0 *vor* dem Einbringen des Schirms definiert ist.

$$D = \left(\frac{B_S}{B_0}\right) \tag{1}$$

Mit Hilfe der FFT (Fast Fourier Transformation) wurden die Quotienten der Induktionen bei den jeweiligen Frequenzen gebildet und daraus der Mittelwert errechnet. In der Literatur wird üblicherweise die Schirmdämpfung SD in Dezibel nach Gleichung 2 angegeben, siehe z. B. (*Habinger et al., 1992*):

$$SD = 20 \log\left(\frac{B_0}{B_S}\right) \tag{2}$$

In Abb. 15 sind Messergebnisse für 0,5 mm und 1,5 mm Dynamoblech sowie für 1 mm und 3 mm Stahlblech eingetragen. Die Größe des quadratischen Bleches betrug das 1,5-Fache der Hauptabmessung des Motors. Aus den verschiedenen Messwerten ist ersichtlich, dass durch das Dynamoblech erwartungsgemäß die beste Verringerung der Flussdichte erreicht werden kann. Für die Praxis relevant sind jedoch auch die Ergebnisse der Messreihe für Stahlblech. Mit dem 3 mm Stahlblech ist eine Verringerung der Streuflussdichte auf ein Drittel des ursprünglichen Wertes möglich. Dadurch ist die Möglichkeit gegeben, eventuelle Emissionen, welche die Grenzwerte überschreiten, zu reduzieren.

Literatur

EN 50238 (2003): Kompatibilität zwischen Fahrzeugen und Gleisfreimeldesystemen.

EU (2006): Entscheidung der Kommission über die Technische Spezifikation für die Interoperabilität (TSI) zum Teilsystem „Zugsteuerung/Zugsicherung und Signalgebung" des konventionellen transeuropäischen Eisenbahnsystems; Aktenzeichen K (2006) 964; 28. März 2006.

Frauscher, J. (2006): Vom Schienenschalter zum Induktiven Radsensor mit Verfahrensmix. Signal + Draht. Hamburg: Tetzla.

Habinger, E. et al. (1992): Elektromagnetische Verträglichkeit. Berlin, München: Verlag Technik.

Hadrian, W. (1981): Äußere Elektromagnetische Felder von Starkstromtechnischen Betriebsmitteln und Blitzströmen. Untersuchungsmethoden der Elektromagnetischen Verträglichkeit. Habilitationsschrift: TU Wien.

Jank, St., Knight, A. (2004): Elektromagnetische Verträglichkeit zwischen Fahrzeugen und Gleisfreimeldeanlagen – Ergänzung zu CENELEC EN 50238. Signal + Draht. Hamburg: Tetzla.

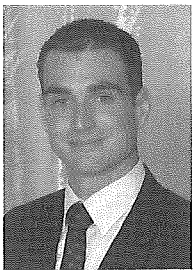
Lörtscher, M., Lörtscher, E. (2004): Niederfrequente elektromagnetische Felder in Führerständen von Triebfahrzeugen der SBB. Elektrische Bahnen. München: Oldenbourg.

Lübke, D. et al. (2008): Das System Bahn. Hamburg: Tatzlaff.

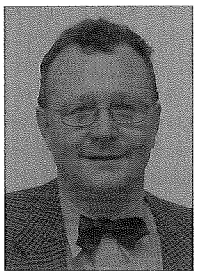
Petkova, M. (2006): Compatibility between rolling stock and train detection systems. The Institution of Engineering and Technology.

Schwab, A. (1991): Elektromagnetische Verträglichkeit. Wien, Heidelberg, New York: Springer.

Autoren



Gernot Lauber
Studium der Elektrotechnik, Studienzweig Energietechnik an der Technischen Universität Wien. Diplomarbeit bei Traktionssysteme Austria, Wiener Neudorf, zum Thema „Magnetfeldemissionen von Traktionsmaschinen", Abschluss 2008.



Harald Neudorfer
Studium der Elektrischen Energietechnik an der Technischen Universität Wien, 1998 Promotion mit Auszeichnung am Gebiet der elektrischen Maschinen. Studium der Pädagogik an der Universität Klagenfurt, 2002 Promotion auf dem Gebiet der Ingenieurspädagogik. Seit 2001 Habilitand an der Technischen Universität Darmstadt (Abschluss Mitle 2009), Habilitationsthema: Elektrische Traktionsantriebe.

Berufliche Positionen: 1982–2001 BBC, ABB, Adtranz Wiener Neudorf, 2001–2006 Daimler AG Stuttgart, Leitung Abteilung E-Drive Powertrain. Seit 2006 Traktionssysteme Austria, Wiener Neudorf, Leitung Engineering, Prokurist. Seit 2000 Lehrbeauftragter, Univ.-Lektor an der TU Wien und TU Darmstadt.

Manfred Schrödl

Studium der Elektrotechnik an der Technischen Universität Wien, Studienzweig Industrielle Elektronik und Regelungstechnik, Abschluss 1982 mit Auszeichnung. Universitätsassistent am Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe der TU Wien, 1987 Promotion zum Dr. techn. mit Auszeichnung. 1992 Habilitation für Elektrische Antriebe und Leistungselektronik in der Antriebstechnik. Seit 1998 Ordentlicher Universitätsprofessor für Elektrische Antriebe und Maschinen sowie Vorstand des gleichnamigen Institutes an der TU Wien.