

Abschätzung der Abstrahlung von Gleichstrommaschinen mit Hilfe leitungsgebundener Messungen und Simulation

M. Sc. Alexander Engeln, Grundlagen der Elektrotechnik, Helmut-Schmidt-Universität, Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg, alexander.engeln@hsu-hh.de
Prof. Dr.-Ing. Stefan Dickmann, Grundlagen der Elektrotechnik, Helmut-Schmidt-Universität, Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg, stefan.dickmann@hsu-hh.de

1 Einleitung

Gleichstrommaschinen senden auf Grund abrupter Stromänderungen (u.a. Funkenbildung) zwischen Kohlebürsten und Kommutator Störemissionen aus. Als Quellen der Abstrahlung kommen der Motor selbst, eventuelle Filterschaltungen und die Zuleitungen von der Stromversorgung in Frage. Die Länge der Zuleitungen befindet sich bei typischen Haushaltgeräten in der Größenordnung der Wellenlänge der Strahlung. Die dominante Störquelle stellen somit die Ströme auf den Zuleitungen dar. Diese lassen sich in Gleich- und Gegentaktkomponenten zerlegen. Die Gleichtaktsignale sind für die Emissionen im Fernfeld von größerer Bedeutung, da deren Anteile konstruktiv interferieren, während die Gegentaktsignale sich größtenteils gegenseitig auslöschen [4].

In dieser Arbeit wird die Gegentakt-Stromverteilung über die Leitungstheorie bestimmt. Anschließend werden die Gleichtaktströme auf der Leitung gemessen. Aus den Strömen werden die Felder berechnet, indem die Leitung als Reihung kleiner Dipol-Segmente simuliert wird. Vorherige Arbeiten haben dieses Prinzip bereits verwendet [6]. In dieser Arbeit wird weitergeführt, dass die Phaseninformation des Gleichtaktsignals entscheidend für die korrekte Vorhersage der Abstrahlung ist.

2 Grundlagen

2.1 Entstehung von Gleichtaktsignalen

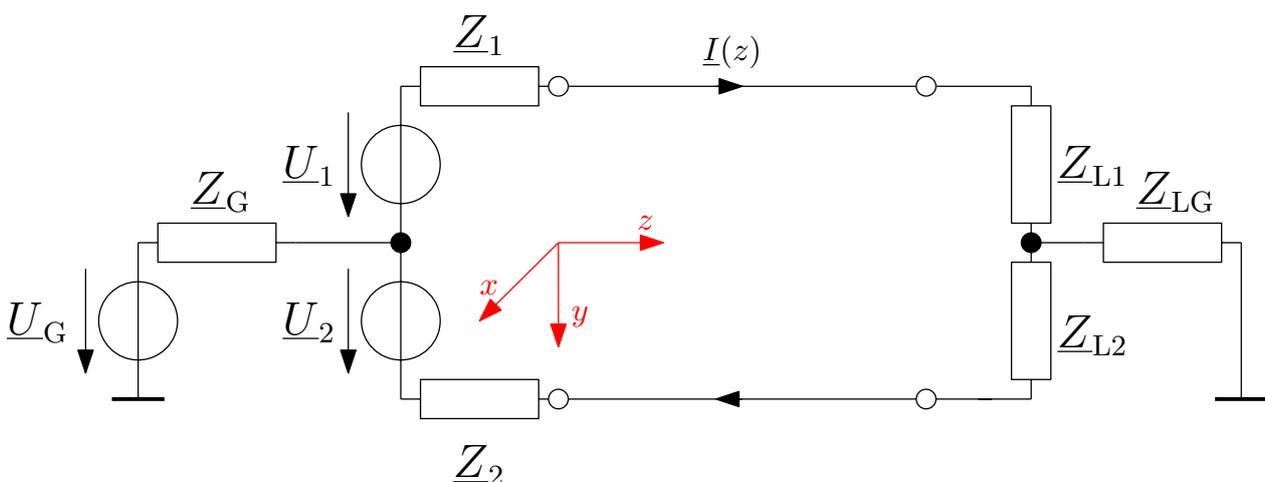


Bild 1: Schaltskizze einer Doppelleitung

In Bild 1 ist dargestellt, welche Quellen und Impedanzen an der Doppelleitung relevant sind [7]. Sowohl die Störquelle (über Z_G), als auch die Last (über Z_{LG}) können an Masse

gekoppelt sein. Dies kann z. B. über die kapazitive Kopplung des Motors zum Gehäuse geschehen, sofern dieses geerdet ist, oder im Messaufbau über die Impedanz der Netznachbildung. Liegt eine Kopplung vor, so tritt ein Gleichtaktstrom auf, wenn

- a) Last oder Quelle asymmetrisch sind (z. B. $\underline{U}_1 \neq \underline{U}_2$).
- b) die Doppelleitung asymmetrisch ist.
- c) Störungen in die Quelle direkt eingekoppelt werden ($\underline{U}_G \neq 0$).

2.2 Motorcharakterisierung

Der Motor wird als reale Spannungsquelle hinsichtlich Innenimpedanz \underline{Z}_M und Leerlaufspannung \underline{U}_M charakterisiert. Die Störspannung wird bei direktem Anschluss der beiden Pole über je eine Netznachbildung an die Gleichstromversorgung gemessen. An der Netznachbildung mit Impedanz \underline{Z}_{NNB} gegen Erde wird die Spannung \underline{U}_{NNB} zwischen den Polen des Motors gemessen. Gemäß Spannungsteiler folgt nach Bild 2

$$\underline{U}_M = \frac{2 \underline{Z}_{NNB} + \underline{Z}_M}{2 \underline{Z}_{NNB}} \underline{U}_{NNB}. \quad (1)$$

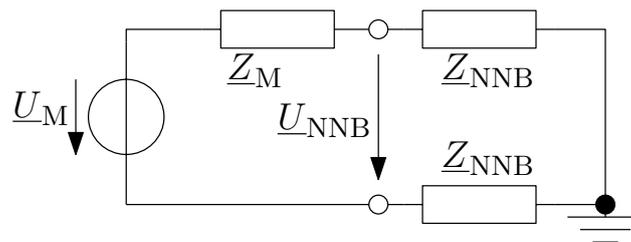


Bild 2: Charakterisierung des Motors

2.3 Gegentaktstrom aus der Leitungstheorie [5]

Für die Berechnung des reinen Gegentaktstroms werden

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 = \frac{\underline{U}_M}{2}, \quad \underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \frac{\underline{Z}_M}{2}, \quad \underline{U}_G = 0, \quad \underline{Z}_{L1} = \underline{Z}_{L2} = \frac{\underline{Z}_L}{2}$$

gesetzt, die Leitung ist symmetrisch.

Der verlustlosen Doppelleitung lässt sich pro Länge ein Induktivitätsbelag L' und ein Kapazitätsbelag C' zuordnen. Daraus folgt als geometrieabhängige Kenngröße die Wellenimpedanz der Leitung \underline{Z}_C . Durch Reflexionen an den Abschlüssen der Leitung bilden sich stehende Wellen aus. Quellenseitig ($z = 0$) beträgt der Reflexionskoeffizient $\underline{\Gamma}_S$ und lastseitig entsprechend $\underline{\Gamma}_L$. Es gilt

$$\underline{Z}_C = \sqrt{\frac{L'}{C'}}, \quad \underline{\Gamma}_S = \frac{\underline{Z}_M - \underline{Z}_C}{\underline{Z}_M + \underline{Z}_C}, \quad \underline{\Gamma}_L = \frac{\underline{Z}_L - \underline{Z}_C}{\underline{Z}_L + \underline{Z}_C}.$$

Abhängig von der Frequenz bzw. Wellenzahl $\beta = 2\pi \frac{f}{c}$ folgt aus der Leitungstheorie entlang der Leitung der Länge l die Stromverteilung

$$\underline{I}(z) = \frac{1 - \underline{\Gamma}_L e^{-2j\beta(l-z)}}{1 - \underline{\Gamma}_S \underline{\Gamma}_L e^{-2j\beta l}} \frac{\underline{U}_M}{\underline{Z}_C + \underline{Z}_M} e^{-j\beta z}. \quad (2)$$

2.4 Gleichtaktstrom aus Stromzangen-Messung

Die Gleichtakt-Stromverteilung auf der Doppelleitung wird mit Hilfe einer Stromzange gemessen. Die Stromzange ist im Prinzip ein Transformator, dessen Primärwicklung die zu untersuchende Leitung ist. Fließt durch diese ein Wechselstrom \underline{I} , so wird im Ferritring ein magnetischer Fluss erzeugt, welcher in der Sekundärwicklung die Spannung $\underline{U} = \underline{Z}_T \cdot \underline{I}$ induziert. Die Transferimpedanz \underline{Z}_T wird zuvor in einem Kalibrierhalter mittels eines Netzwerkanalysators (NWA) über den Streuparameter \underline{S}_{12} [2] bestimmt.

2.5 Feldberechnung

Die Stromverteilung wird nun verwendet, um das elektrische Feld im Beobachtungspunkt zu berechnen. Dazu wird die Leitung in 40 Segmente pro Wellenlänge diskretisiert. Bei einer größeren Anzahl wurde keine Verbesserung festgestellt. Jedes Segment wird als Hertz'scher Dipol [3] der Länge Δ und räumlich konstantem Strom $\underline{I} = \underline{I}(z)$ betrachtet. Im lokalen Kugelkoordinatensystem des Dipols ergibt sich für die Freiraum-Abstrahlung

$$\vec{E}(r, \theta, \varphi) = \cos \vartheta \frac{\Delta \underline{I}}{2\pi j c \epsilon_0 \beta r^3} (1 + j\beta r) e^{-j\beta r} \vec{e}_r + \sin \vartheta \frac{\Delta \underline{I}}{4\pi j c \epsilon_0 \beta r^3} (1 + j\beta r - (r\beta)^2) e^{-j\beta r} \vec{e}_\vartheta. \quad (3)$$

Der Polarwinkel θ bezieht sich auf die z -Achse in Leitungsrichtung, c ist die Lichtgeschwindigkeit.

Die Feldstärken aller Segmente werden im Auswertungspunkt auf kartesische Koordinaten projiziert und addiert. Das verwendete Koordinatensystem ist in Bild 3 dargestellt.

3 Messverfahren

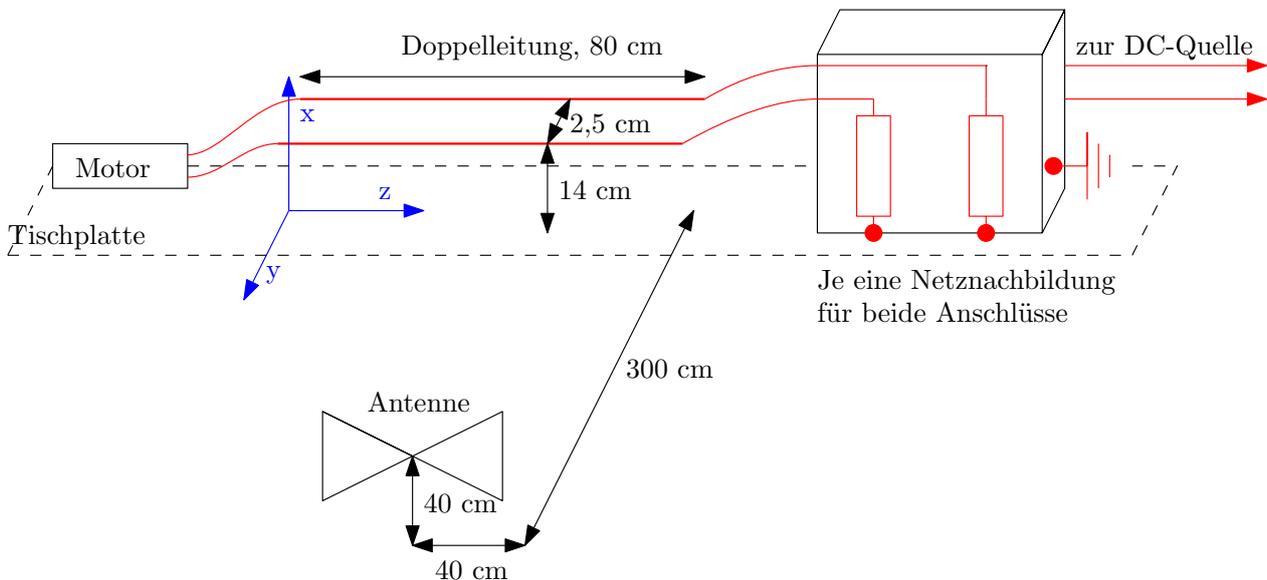


Bild 3: Schematischer Messaufbau

In Bild 3 ist der Messaufbau mit allen Abmessungen dargestellt. Die verwendete biko-nische Antenne wird absichtlich höher (40 cm über dem Tisch) als die Leitung platziert,

damit die gesamte Antenne oberhalb des Tisches liegt. Nach DIN EN 55014-1 [9] liegt der für die EMV relevante Frequenzbereich bei 30 bis 1000 MHz. Als obere Grenzfrequenz wird in diesem Fall 300 MHz angenommen. Ein Vergleich mit vorherigen Arbeiten [8] zeigt, dass höhere Frequenzen bei Gleichstrommaschinen zu vernachlässigen sind. Aus eigenen Messungen an Motoren wird dies ebenfalls bestätigt. Für die Messung der Gleichtaktströme müssen immer beide Leitungen umschlossen werden. Insgesamt werden drei Teilmessungen durchgeführt.

- a) Die in die Antenne eingekoppelte Spannung wird mit einem Spektrumanalysator mit Max-Hold-Detektor aufgezeichnet. Der Average-Detektor kommt hier nicht zum Einsatz, da die Störsignale einer Gleichstrommaschine zufällig und nur für kurze Zeit auftreten. Nach Korrektur mit dem Antennenfaktor erhält man betragsmäßig das E -Feld. Die Polarisation wird parallel zur Leitung gewählt. Die Stromzange muss zur Vergleichbarkeit dabei im Aufbau verbleiben.
- b) Die Stromverteilung wird betragsmäßig mit einer Stromzange in 5 cm Schritten entlang der Leitung gemessen.
- c) Die Phase der Stromverteilung wird bestimmt. Dazu wird direkt am Motor mit einer Stromzange eine Gleichtaktwelle auf die Doppelleitung gegeben. Die Messstromzange wird an den zweiten Port des NWA angeschlossen und der komplexe S_{12} -Parameter bestimmt. Wieder wird in 5 cm Schritten gemessen. Daraus lässt sich die relative Phasenverschiebung zwischen den einzelnen Positionen berechnen. Die absolute Phase spielt keine Rolle, da nur der Betrag des Feldes berechnet werden soll.

4 Test im 50- Ω -System

Die Feldberechnung soll an Hand eines Testaufbaus überprüft werden. Dazu wird die Netznachbildung durch einen 50 Ω -Abschluss ersetzt, der über ein Balun symmetrisch angeschlossen wird. Der Motor wird durch einen Signalgenerator (Innenwiderstand 50 Ω , Leistung 0 dBm) ersetzt, der in zwei Varianten angeschlossen wird: a) über ein Balun, um Gegentaktströme zu erzeugen, oder b) über ein T-Stück direkt auf beide Leitungen, um Gleichtaktströme zu erzeugen. Die Frequenz wird von 30 MHz bis 300 MHz in Schritten zu 100 kHz durchlaufen. Für die Messung der Gleichtaktphase wird der erste Port des NWA über ein T-Stück direkt an die Doppelleitung angeschlossen.

4.1 Validierung der Gegentaktstrom-Simulation

Zunächst wird die Gegentaktstrom-Simulation mit einem Vollwellenlöser [1] verglichen. In Bild 4 werden sowohl die zu erwartenden Felder an der Position der Antenne als auch der Strom durch den Lastwiderstand in Abhängigkeit von der Frequenz verglichen. Im Vollwellenlöser werden die Verbindungsstücke an den Leitungsenden berücksichtigt. Dies erklärt den Unterschied in der y -Komponente.

Des Weiteren werden die Stromverteilungen (siehe Gleichung (1)) entlang der Leitung für die maximale Frequenz und die Frequenz im lokalen Maximum (179,175 MHz) verglichen. Die gute Übereinstimmung bestätigt die Berechnung des Feldes über den Dipol-Ansatz in Verbindung mit der Leitungstheorie.

4.2 Ergebnisse

In Bild 5 sind die Ergebnisse für den Testaufbau zu sehen. Die Dämpfung des Balun wurde zuvor in der Simulation berücksichtigt. Bei Gegentakt-Anregung fällt auf, dass das gemessene Feld stärker als die allein aus der Leitungstheorie berechneten Felder ist. Trotz möglichst symmetrischen Aufbaus treten dennoch Gleichtaktströme auf, welche zwar in der Größenordnung einiger μA liegen, die Abstrahlung jedoch dominieren. Bei der Berechnung des Feldes über den Gleichtaktstrom $\underline{I}_{\text{CM}}(z)$ werden zwei Varianten unterschieden.

- Nur Beträge: $\underline{I}(z) = |\underline{I}_{\text{CM}}(z)|$
- Betrag und Phase gemessen: $\underline{I}(z) = \underline{I}_{\text{CM}}(z)$

Es zeigt sich, dass die Berücksichtigung der Phase für eine wesentlich genauere Vorhersage der Abstrahlung sorgt.

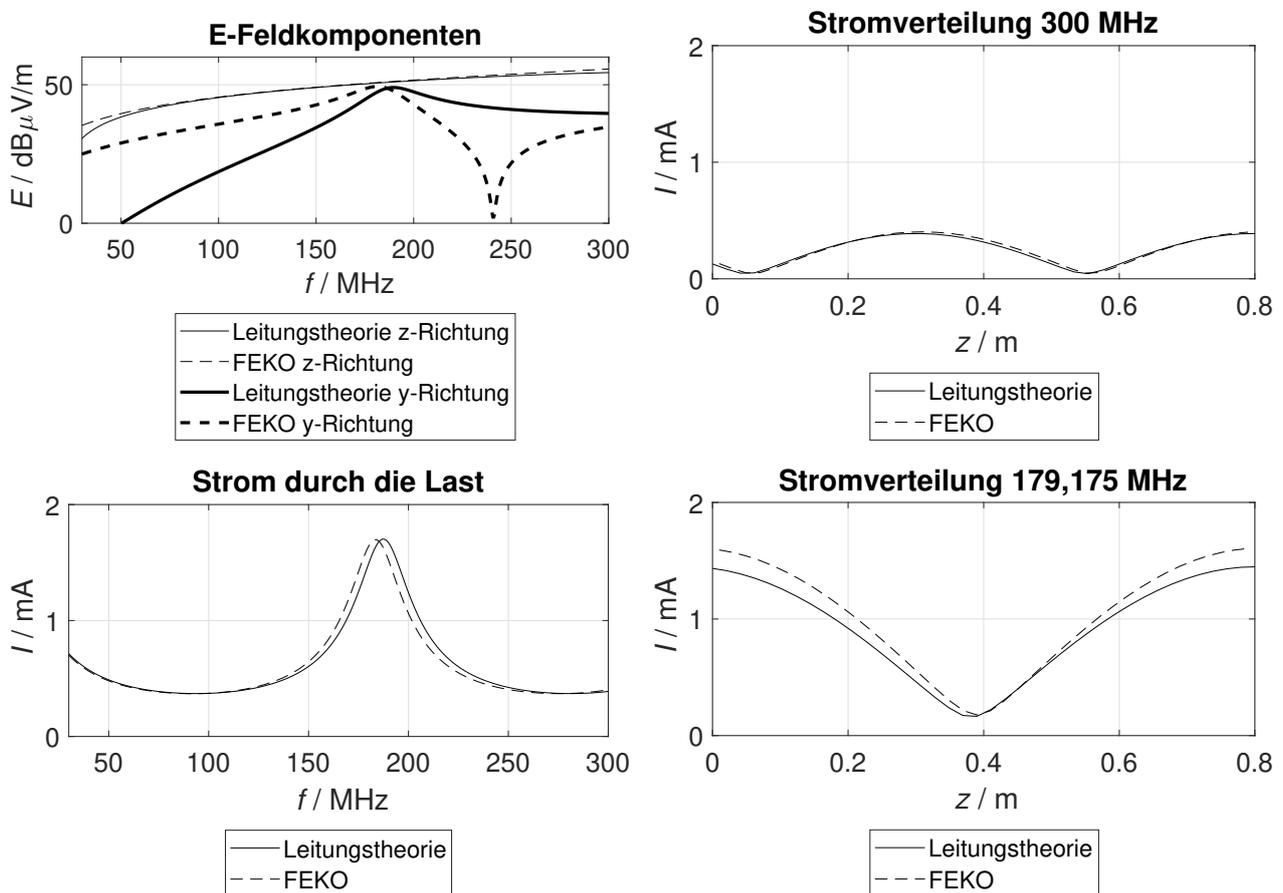


Bild 4: Vergleich Leitungstheorie / Vollwellenlöser am Testaufbau

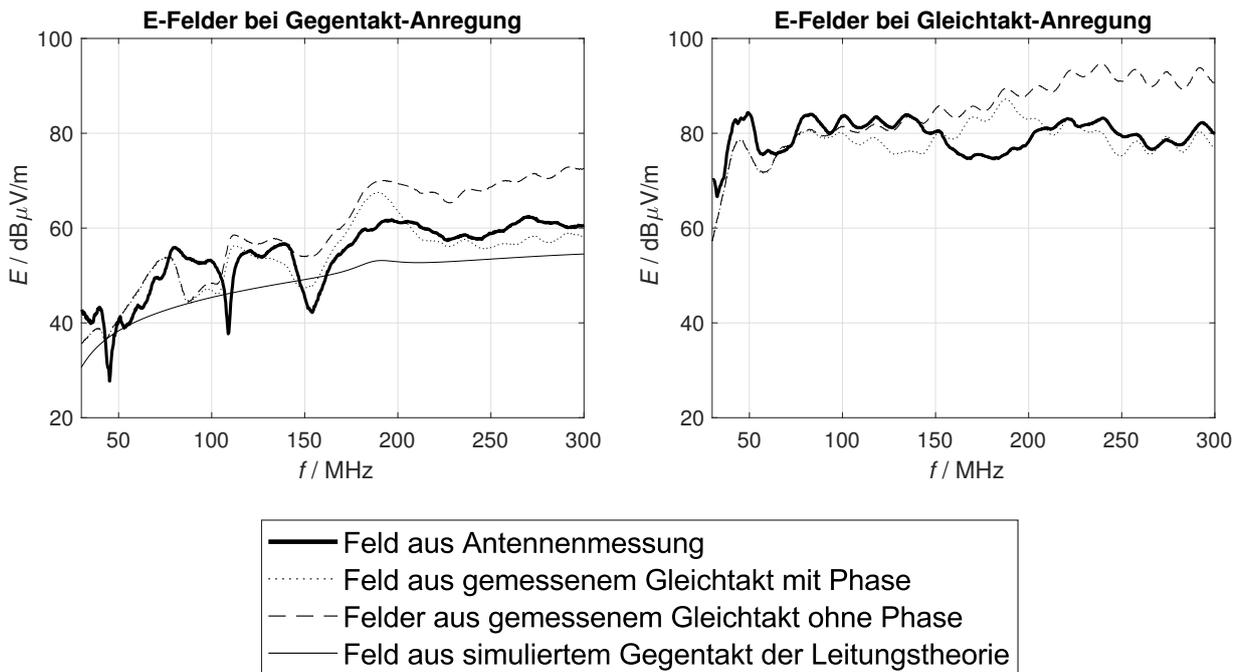


Bild 5: E-Feld in 3 Metern horizontaler Entfernung im Testaufbau

5 Messung an Motoren

Die zwei Netznachbildungen (siehe Bild 3) sind über die gemeinsame Erde verbunden, sodass für das Lastnetzwerk $\underline{Z}_{L1} = \underline{Z}_{L2} = \underline{Z}_{NNB}$, $\underline{Z}_{LG} = 0$ nach Abbildung 1 gilt. Da der Motor selbst keine messbare Verbindung zur Masse aufweist (das Gehäuse ist nicht geerdet), sind $\underline{U}_G = 0$ und \underline{Z}_G unbekannt. Der Motor wird mechanisch unbelastet bei 30 V Nennspannung betrieben. Für die Messung muss der Motor erst einige Zeit im Betrieb sein, da durch die innere Reibung durch Erwärmung abnimmt, sodass sich die Leistung im Dauerbetrieb erst nach einiger Zeit einpendelt.

Die Ergebnisse in Bild 6 zeigen, dass der Gleichtaktstrom als Ursache der Abstrahlung dominiert. Nach Validierung des Prinzips im Testaufbau wird der Gleichtaktstrom wieder in Betrag und Phase gemessen. Die daraus vorhergesagte Abstrahlung spiegelt das gemessene Frequenzverhalten des elektrischen Feldes im Rahmen weniger dB wieder.

6 Zusammenfassung

Gleichstrommaschinen lassen sich über Messung der Motorstörspannung und Innenimpedanz als reale Quellen auffassen. Auf Grund von Asymmetrien erzeugen sie auf ihren Zuleitungen Gleich- und Gegentaktströme. Für die Abstrahlung sind die Gleichtaktströme dominant. Die durch diese erzeugten Felder wurden mittels Dipol-Diskretisierung berechnet und mit der Messung verglichen. Dabei stellt sich heraus, dass die Phaseninformation der Gleichtaktströme, insbesondere bei hohen Frequenzen, von entscheidender Bedeutung ist. Deren Messung kann über zwei Stromzangen an einem Netzwerkanalysator erfolgen. Dadurch kann vorhergesagt werden, ob die Abstrahlung gegebene Grenzwerte einhalten kann.

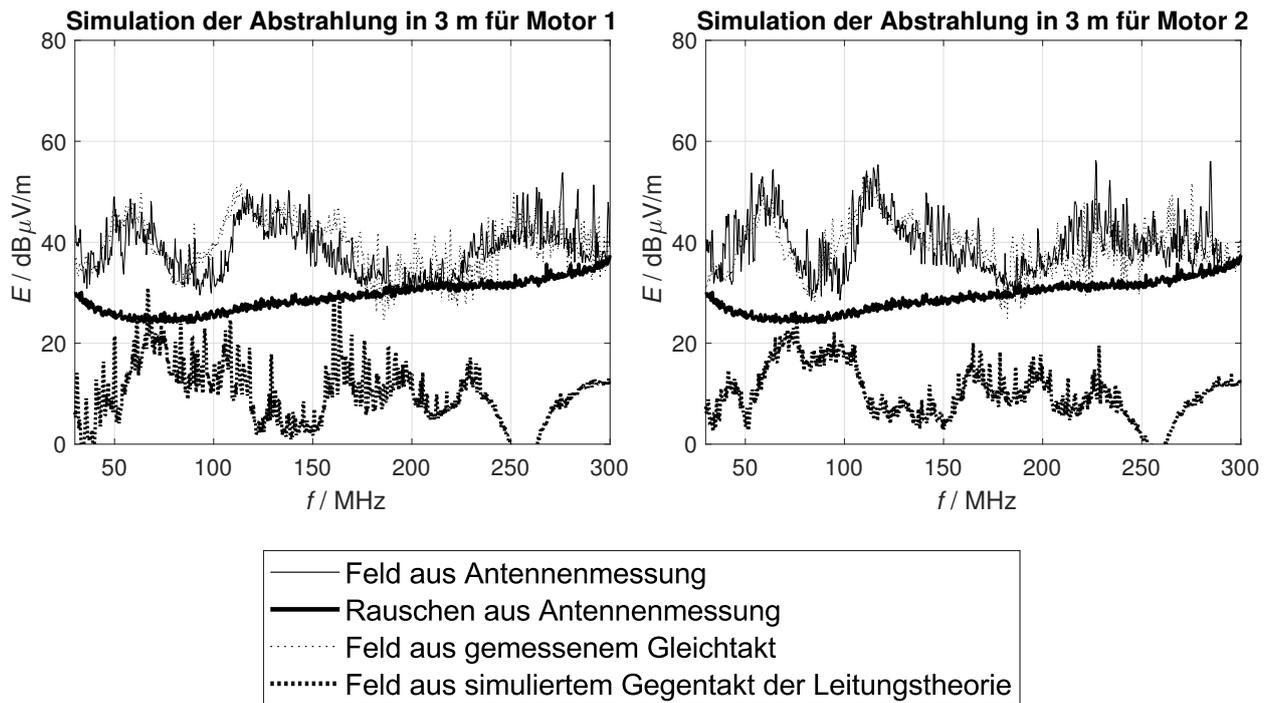


Bild 6: E-Feld in 3 Metern horizontaler Entfernung für Motoren als Quelle

Literatur

- [1] ALTAIR: *FEKO, Simulationssoftware*. <https://altairhyperworks.com/product/FEKO>
- [2] INC., Fischer Custom C.: *Current Probe Calibration*. https://www.fischercc.com/wp-content/uploads/2016/07/Current_Probe_Calibration_PGD_2014_02_06_2.pdf. – Aufgerufen am 20.11.2019
- [3] LEUCHTMANN, Pascal: *Einführung in die elektromagnetische Feldtheorie*. Pearson Studium, 2005. – ISBN 978–3–827–37144–7
- [4] PAUL, C. R. ; BUSH, D. R.: Radiated Emissions From Common-Mode Currents. In: *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility* (1987). <http://dx.doi.org/10.1109/ISEMC.1987.7570770>. – DOI 10.1109/ISEMC.1987.7570770
- [5] PAUL, Clayton R.: *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*. Wiley - IEEE Press, 2007. – ISBN 978–0–470–13154–1
- [6] SMITH, W. T. ; FRAZIER, R. K.: Prediction of anechoic chamber radiated emissions measurements through use of empirically-derived transfer functions and laboratory common-mode current measurements. In: *IEEE EMC Symposium* (1998). <http://dx.doi.org/10.1109/ISEMC.1998.750122>. – DOI 10.1109/ISEMC.1998.750122
- [7] SUGIURA, A. ; KAMI, Y.: Generation and Propagation of Common-Mode Currents in a Balanced Two-Conductor Line. In: *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* (2012). <http://dx.doi.org/10.1109/TEMC.2011.2162523>. – DOI 10.1109/TEMC.2011.2162523
- [8] SURIANO, C. R. ; SURIANO, J. R. ; THIELE, G. ; HOLMES, T. W.: Prediction of radiated emissions from DC motors. In: *IEEE EMC Symposium* (1998). <http://dx.doi.org/10.1109/ISEMC.1998.750300>. – DOI 10.1109/ISEMC.1998.750300
- [9] VDE-VERLAG: *Elektromagnetische Verträglichkeit – Anforderungen an Haushaltgeräte, Elektrowerkzeuge und ähnliche Elektrogeräte - Teil 1: Störaussendung - DIN EN 55014-1 VDE 0875-14-1:2018-08*