

Elektromagnetische Felder von Powerline-Anlagen

Teil 2: Ableitung von Näherungsformeln und praktische Ergebnisse

Das Problem des Powerline-Verfahrens ist das ungestörte Nebeneinander von PLC-Anlagen und Funkdiensten. Während im ersten Teil dieses Artikels auf der Grundlage der Feldtheorie einfache Formeln für die Ermittlung des Störpotentials der Powerline-Technik entwickelt wurden, werden hier anhand praxisnaher Netztopologien die entstehenden Feldstärken numerisch abgeschätzt.

Harald Dalichau

Theoretische Elektrotechnik
Universität der Bundeswehr München
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Institut für Hoch- und Höchstfrequenztechnik

3.5 Feldstärken der Leitungswelle in größerer Entfernung von der Leitung

Die in Teil 1 dieses Artikels [5] angegebenen Gleichungen zur Berechnung der Feldstärken der Gegentaktwelle und der Gleichtaktwelle gelten exakt nur für sehr lange, geradlinige Leitungen. Für die genaue Berechnung einer realen Netztopologie ist die Gleichung

$$dH = I (dl \times e_r)/(4\pi r^2) \quad (17)$$

über alle stromführenden Leiterabschnitte zu integrieren. Wie in Bild 7a dargestellt, ist dl der Einheitsvektor in Richtung des Stromes und e_r der Einheitsvektor, der in Richtung des Punktes zeigt, in dem der gesuchte Feldstärkevektor dH berechnet werden soll.

Mit dieser Gleichung kann man berechnen, daß die exakte Feldstärke im Punkt P, in der Nähe eines stromführenden Drahtes der Länge y (Bild 7b), für $x = y$ um 10 % kleiner ist und für $x = 0,3 y$ um 1 % kleiner ist als der Wert für $y = \infty$. Für Entfernungen, die kleiner sind als die Drahtlängen, kann man also ohne weiteres die wesentlich einfacher auszuwertenden

Gleichungen 1 und 9 (siehe Teil 1 dieses Artikels [5]) benutzen, um die Größe der dort auftretenden Feldstärken abzuschätzen. Zudem ergeben sich mit den Näherungen stets Feldstärkewerte, die etwas größer sind als die exakte Lösung nach Gl. (17).

Für größere Entfernungen von der Leiterstruktur sind die oben getroffenen Voraussetzungen ohnehin nicht mehr erfüllt. Dann sind die Rückleiter der Gleichtaktströme (die Umgebungsmasse) nicht mehr weit entfernt. Zur Feldberechnung kann man nicht mehr von einem Einzeldraht ausgehen, sondern man muß jeweils die gesamte Leiterschleife berücksichtigen (siehe Bild 5). Für typische Inhouse-Leiternetze gilt dies zum Beispiel sicherlich für Entfernungen von mehr als 10 m von der Wohnung bzw. vom betrachteten Haus.

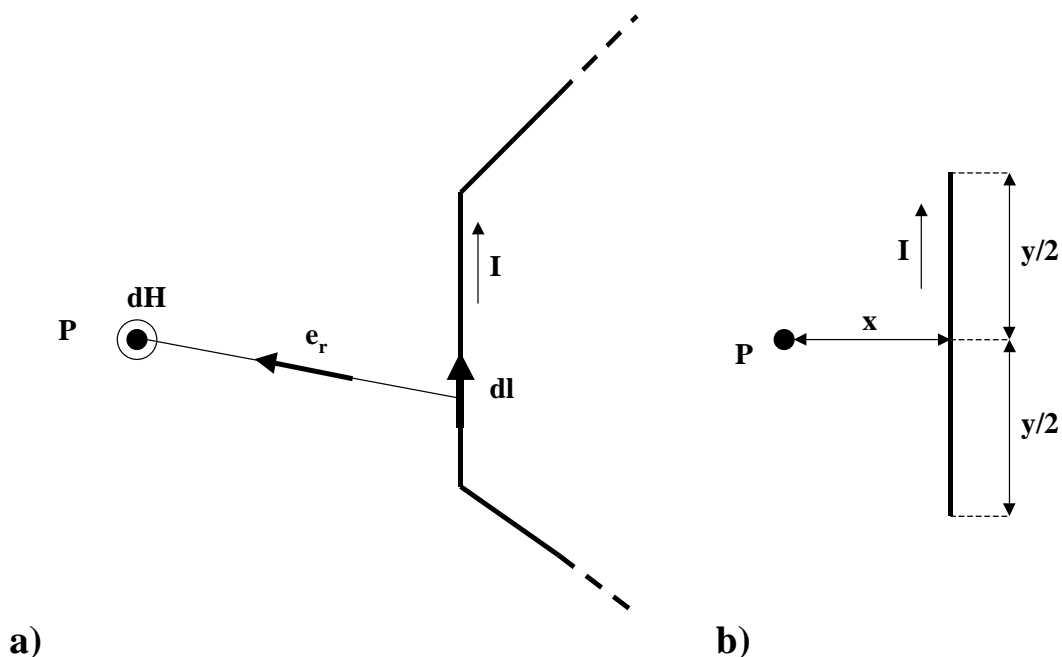


Bild 7: Exakte Berechnung des quasistatischen Feldes eines Leiters

Das Fernfeld einer Leiterschleife mit der Fläche A, die den Strom I führt, ergibt sich zu [4]:

$$H = I A / (2\pi r^3) \quad (18)$$

Die Fernfelder solcher Leiterschleifen nehmen mit zunehmender Entfernung proportional $1/r^3$ ab; dies bedeutet eine Abnahme um 18 dB bei Verdopplung und um 60 dB bei Verzehnfachung des Abstands r .

Bild 8 verdeutlicht die unterschiedlichen Entfernungsabhängigkeiten bei der Gleichtaktwelle ($1/r$), der Gegentaktwelle ($1/r^2$) und der Leiterschleife ($1/r^3$). In der Realität überlagern sich die verschiedenen Effekte. Bis zu Entfernungen von etwa 10 m erfolgt die Feldstärkeabnahme mit $1/r$, danach bis zu einer Entfernung von etwa 30 m mit $1/r^2$ und danach dann mit $1/r^3$. Bild 9 zeigt diesen Feldstärkeverlauf, der eine recht gute Approximation an die Verhältnisse einer realen PLC-Anlage darstellt. Die Zahlenwerte gelten für 100 kHz und einen Gegentaktstrom von 1mA.

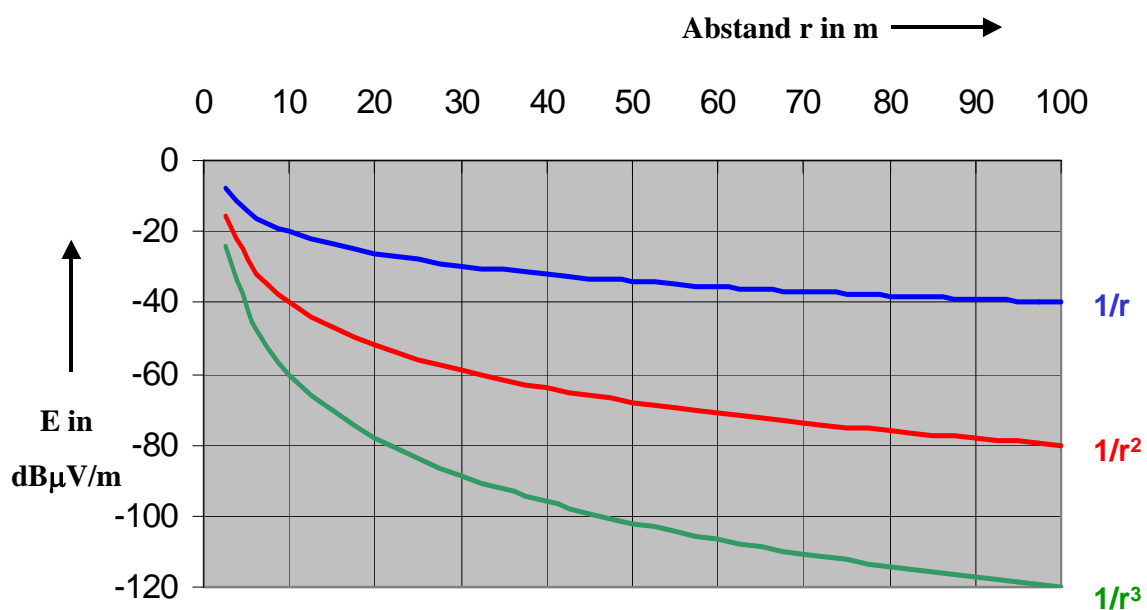


Bild 8: Entfernungsabhängigkeit unterschiedlicher Felder

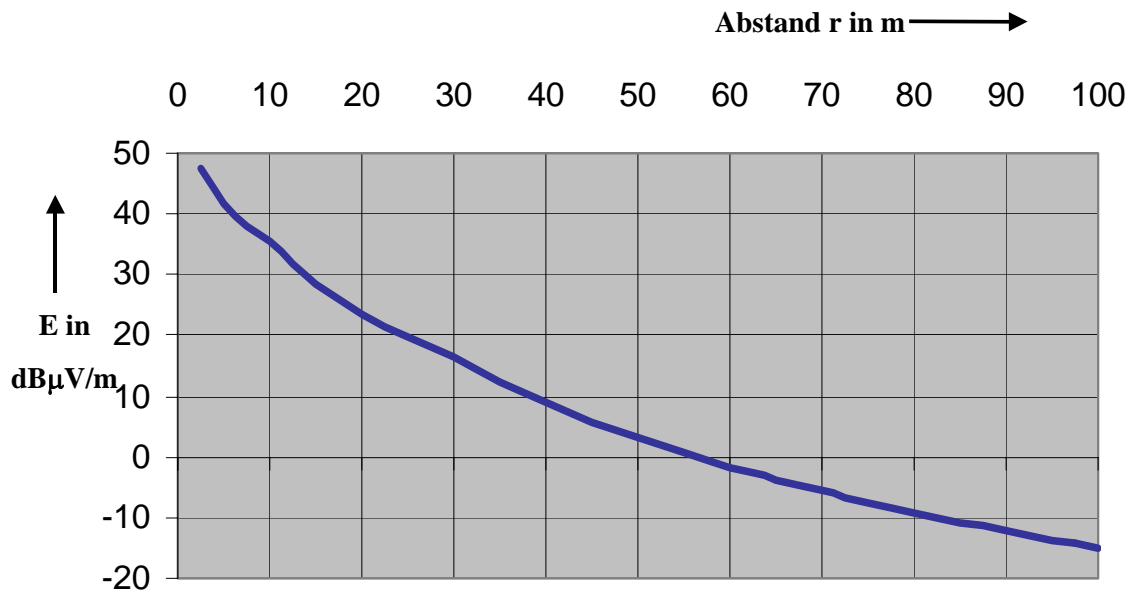


Bild 9: Elektrische Feldstärke $E(r)$ der Leitungswelle

Zusammenfassung: Im unmittelbaren Nahfeld eines Inhouse-Powerline-Netzes werden die wesentlichen Feldstärkeanteile durch Gleichtaktströme erzeugt. Der Anteil jedes einzelnen Leiterstroms hat eine Entfernungsabhängigkeit mit $1/r$. Da sich alle Einzelanteile überlagern, ergibt sich ein Summenfeld mit unter Umständen nur geringer Ortsabhängigkeit im Nahbereich der Leiterschleifen. Mit zunehmendem Abstand geht die Entfernungsabhängigkeit über in $1/r^3$. Dies bedeutet eine extrem starke Verringerung der Feldstärke mit zunehmender Entfernung, so daß diese Feldstärkeanteile bei weiter zunehmender Entfernung sehr bald vollständig vernachlässigt werden können.

4 Strahlungsfelder einer PLC-Anlage

4.1 Leitungslänge kurz gegen die Wellenlänge

Im Unterschied zu den im Kapitel 3 betrachteten Leitungswellen, die fest an die bzw. den Leiter gebunden sind und deren Energieausbreitungsrichtung parallel zur Leitung erfolgt, löst sich bei den Strahlungsfeldern die elektromagnetische Welle von der sie erzeugenden Struktur (der Sendeantenne) ab. Die Energieausbreitung erfolgt im Fernfeld radial von der Sendeantenne weg in alle Raumrichtungen. Die elektrische und die magnetische Feldstärke des Strahlungsfeldes nehmen mit $1/r$ ab. Dies bedeutet eine Abnahme um 6 dB bei Verdopplung des Abstands und um 20 dB bei Verzehnfachung des Abstands (siehe Bild 8). Strahlungsfelder werden von hochfrequenten Leitungsströmen erzeugt. Im hier betrachteten Fall der Hochfrequenzeinspeisung ins Niederspannungsnetz ergibt die Gegentaktwelle keine Abstrahlung, nur die Ströme der Gleichtaktwelle erzeugen Strahlungsfelder.

Im Frequenzbereich unterhalb 500 kHz ist die Wellenlänge größer als 600 m. Die Leiterlängen von Inhouse-Netzen sind damit in jedem Fall klein gegen die Wellenlänge. Zur Abschätzung der dabei auftretenden Feldstärken wird von einem $l = 10$ m langen, geraden Draht mit einer konstanten Stromstärke I ausgegangen. Eine derartige Stabantenne hat ein zylindersymmetrisches Strahlungsfeld mit je einer Nullstelle in Richtung der Stabachsen und einer Hauptstrahlungsrichtung senkrecht zur Stabachse mit einem Gewinn von $G_s = 1,5$ (Index S für Sender).

Die abgestrahlte Leistung ist [3]:

$$P_s = I^2 R_s / 2 \quad (19)$$

mit dem Strahlungswiderstand R_s für eine Drahtantenne mit konstanter Strombelegung

$$R_s = 80 \Omega (\pi l / \lambda)^2 \quad (20)$$

Die Strahlungsdichte S_E (Leistung pro Flächeneinheit, Index E für Empfänger) im Abstand r in Hauptstrahlungsrichtung ist

$$S_E = P_s G_s / (4\pi r^2). \quad (21)$$

Außerdem gilt

$$S_E = E_E^2 / (2Z_0). \quad (22)$$

Damit kann man die elektrische Feldstärke E_E im Abstand r in Hauptstrahlungsrichtung berechnen zu:

$$E_E = 49\Omega \sqrt{G_s} (I \pi l) / (r \lambda) \quad (23)$$

$$E_E = 0,513 (\mu\text{s } \Omega/\text{m}) \sqrt{G_s} (I l f) / r \quad \text{in } \mu\text{V/m}. \quad (24)$$

Die Gleichung zeigt, daß die Feldstärke des Strahlungsfeldes einer PLC-Anlage bis zu einer Frequenz von 500 kHz proportional f^2 ansteigt. Zum einen strahlt eine elektrisch kurze Stabantenne um so besser, je größer ihre Länge ist, bezogen auf die Wellenlänge (dies ist der Term mit l/λ in Gl. (23)), zum anderen ist ihr Speisestrom I der Strom der Gleichtaktwelle. Wie in Kapitel 3 abgeleitet, steigt dieser proportional f an.

$$E_E \sim I_{\text{even}} f \sim f^2 \quad (25)$$

Zahlenbeispiel zur quadratischen Proportionalität zwischen Frequenz und Feldstärke des Strahlungsfeldes einer PLC-Anlage:

Drahtlänge:	$l = 10 \text{ m}$	
PLC-Sende-Strom:	$I_{\text{odd}} = 1 \text{ mA}$	
Frequenz:	150 kHz	500 kHz
Gleichtaktunterdrückung:	36 dB	26 dB
Gleichtaktstrom:	$I_{\text{even}} = 0,015 \text{ mA}$	$I_{\text{even}} = 0,05 \text{ mA}$
Feldstärke in 30 m:	$E_E = 0,47 \mu\text{V/m}$	$E_E = 5,23 \mu\text{V/m}$
	$E_E = -6,5 \text{ dB}\mu\text{V/m}$	$E_E = 14,4 \text{ dB}\mu\text{V/m}$

Zusammenfassung: Im Frequenzbereich unterhalb 500 kHz kann man das Strahlungsfeld einer Inhouse-PLC-Anlage durch das Feld einer elektrisch kurzen Stabantenne abschätzen.

Diese wird vom Strom der Gleichtaktwelle gespeist. Damit ergibt sich eine generell sehr geringe Abstrahlung. Sie wird jedoch mit dem Quadrat der Frequenz größer. Bei Verdopplung der Frequenz beträgt die Zunahme 12 dB, bei Verzehnfachung 40 dB.

4.2 Frequenzbereich von 1,6 MHz bis 30 MHz

Betrachtet man zunächst das Abstrahlverhalten eines Niederspannungsnetzes bei PLC-Betrieb als Funktion der Frequenz, so ergibt sich, wie im Vorangegangenen behandelt, ein Anstieg des Strahlungsfeldes mit f^2 . Dieser Anstieg endet, wenn die Länge des gespeisten Drahtes in den Bereich einer viertel Wellenlänge kommt. Von dort an ist das bestmögliche Abstrahlverhalten erreicht. Eine weitere Steigerung der abgestrahlten Felder ist praktisch nicht mehr möglich. Im Einzelfall tritt zwar eine starke Frequenzabhängigkeit auf, aber die Maximalwerte der Feldstärke des Strahlungsfeldes bleiben bei weiter zunehmender Frequenz praktisch konstant, nämlich optimal. Um abschätzen zu können, bei welcher Frequenz das bestmögliche Abstrahlverhalten erreicht ist, wird folgende Tabelle betrachtet:

Frequenz:	1,6 MHz	5 MHz	10 MHz	20 MHz	30 MHz
$\lambda_0/4$:	47 m	15 m	7,5 m	3,75 m	2,5 m
$\lambda_\epsilon/4$:	28 m	9 m	4,5 m	2,25 m	1,5 m

Für jede Frequenz wurde ein Viertel der Freiraumwellenlänge λ_0 und ein Viertel der wirklichen Wellenlänge λ_ϵ berechnet. Wie in Teil 1 dieses Artikels ist dabei ein pauschaler Verkürzungsfaktor der Wellenlänge von 0,6 ($\epsilon_r = 2,8$) berücksichtigt worden. Die Wahrscheinlichkeit, mit einem PLC-Sender eine $\lambda_\epsilon/4$ -lange Leitung zu speisen, ist offensichtlich bei 1,6 MHz bereits recht gut, oberhalb von 5 MHz aber sicherlich äußerst hoch.

Dadurch, daß die Leitungslängen nicht mehr kurz gegen die Wellenlänge sind, machen sich in diesem Frequenzbereich die transformierenden Eigenschaften einer Leitung besonders ungünstig bemerkbar: Ein Leerlauf am Ende der Leitung transformiert sich nach einer Leitungslänge von $\lambda_\epsilon/4$ in einen Kurzschluß und ein Kurzschluß wird nach $\lambda_\epsilon/4$ in einen Leerlauf transformiert. Eine unbeschaltete (leerlaufende) Steckdose am Ende einer Leitung wird bei 20 MHz nach 2,25 m Leitungslänge in einen Kurzschluß mit der Impedanz 0 Ohm transformiert. Die Netzimpedanz, in die ein PLC-Sender seine Leistung abgibt, und das

Abstrahlverhalten der angeschlossenen Netzleitungen wird also weitaus stärker als im kHz-Bereich von der Sendefrequenz, der Netztopologie, der Lage des Einspeisepunktes und der aktuellen Belastung des Netzes abhängen. Dies bedeutet, daß in diesem Frequenzbereich sowohl maximale als auch minimale abgestrahlte Feldstärken im raschen Wechsel auftreten können. Unter realen Bedingungen gewonnene Meßergebnisse werden also in Abhängigkeit von der Frequenz und vom Meßort sehr stark streuen.

Besonders ungünstig wirken sich unter diesen Umständen außerdem alle Leitungen aus, die zu abgeschalteten 50-Hz-Verbrauchern, wie zum Beispiel Deckenleuchten führen (Bild 10). Durch die im 50-Hz-Netz übliche einpolige Abschaltung ergibt sich aus der Sicht der Hochfrequenztechnik eine hervorragende Stabantenne. Im ungünstigsten Fall ist die Leitungslänge von der hochohmigen Deckenleuchte bis zum Ort des Schalters $\lambda_g/4$ bzw. ungeradzahlige Vielfache davon. Dann speist die Leerlaufspannung der regulären Gegentaktwelle diese optimal abstrahlende Antenne.

Es erscheint sinnvoll, den Frequenzbereich von 1,6 bis 30 MHz noch einmal zu unterteilen. Im Bereich von 1,6 bis etwa 10 MHz wird die Amplitude der Gleichtaktwelle analog zum kHz-Bereich proportional zur Frequenz ansteigen. Außerdem wird die für optimale Abstrahlung benötigte homogene Leitungslänge von $\lambda_g/4$ wegen der notwendigen 28 m bzw. 4,5 m in der Regel nicht erreicht. Üblicherweise sind Netzleitungen von solcher Länge mehrfach durch in Abständen angeschaltete Lastwiderstände in Teilbereiche mit jeweils unterschiedlicher Stromstärke unterteilt. Dadurch verringert sich die Abstrahlung, verglichen mit einem Draht mit konstanter Strombelegung.

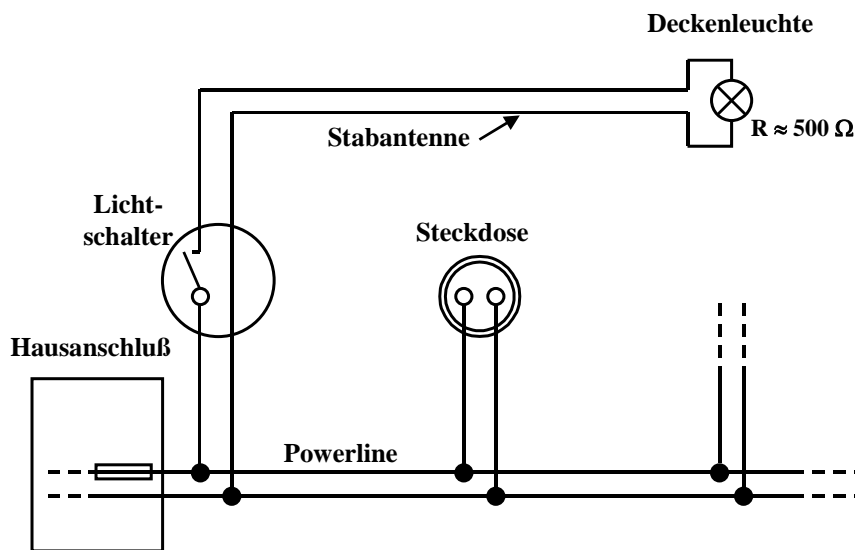


Bild 10: Einpolig abgeschaltete Leuchtzuleitung

Bei etwa 10 MHz hat dann die Gleichtaktunterdrückung den Wert 0 dB erreicht, das heißt, man muß damit rechnen, das der Strom der Gleichtaktwelle genauso groß ist wie der Strom der Gegentaktwelle. Für den anschließenden Frequenzbereich von 10 bis 30 MHz bleibt dieser ungünstige Fall erhalten. Die Verschlechterung der Abstrahlbedingungen durch zusätzlich angeschaltete Verbraucher bzw. Topologie-Einflüsse entfällt weitgehend, da für eine Leitungslänge von $\lambda_g/4$ nur 4,5 bis 1,5 m benötigt werden. Eventuelle Einflüsse durch die ohmsche Leitungsdämpfung sind auch bei 30 MHz noch zu vernachlässigen. Das gleiche gilt für die Dämpfung aufgrund dielektrischer Verluste durch Mauerwerk, Kunststoffe, Holzmöbel oder dergleichen.

Die Grenzfrequenz 10 MHz, unterhalb derer die externen Fernfelder einer PLC-Anlage mit etwa 35 bis 40 dB pro Dekade kleiner werden und oberhalb derer diese Felder weitgehend konstant bleiben, ist zunächst willkürlich festgelegt. Aus den voranstehenden Überlegungen und aus orientierenden Messungen wird ersichtlich, daß diese Grenzfrequenz im Bereich zwischen etwa 3 MHz und 10 MHz liegt. Die genaue Lage ist von den jeweiligen Gegebenheiten der untersuchten PLC-Anlage abhängig.

Zahlenbeispiel (Stabantenne mit konstantem Strom):

Drahtlänge:	$l = 10 \text{ m}$	
PLC-Sende-Strom:	$I_{\text{odd}} = 1 \text{ mA}$	
Frequenz:	1,6 MHz	5 MHz
Gleichtaktunterdrückung:	16 dB	6 dB
Gleichtaktstrom:	$I = 0,16 \text{ mA}$	$I = 0,5 \text{ mA}$
Feldstärke in 30 m:	$E_E = 53 \text{ } \mu\text{V/m}$	$E_E = 523 \text{ } \mu\text{V/m}$
	$E_E = 34,5 \text{ dB}\mu\text{V/m}$	$E_E = 54 \text{ dB}\mu\text{V/m}$

5. Zusammenfassung

a) Ortsabhängigkeit

Entsprechend Bild 11 kann man 4 Bereiche voneinander unterscheiden. In unmittelbarer Nähe einer Leitung (Punkt A, Abstand zur Leitung z.B. 1m) dominiert der Leiterstrom I_{even} als Ursache der magnetischen Feldstärke (Gl. 9). Im Punkt B überlagern sich die Feldstärkeanteile von allen benachbarten Leiterströmen, es entstehen Maxima und Minima, je nach Phasenlage der Einzelkomponenten. Außerhalb des Hauses bzw. der Wohnung (Punkt C, Abstand z.B. 30 m) wirkt das PLC-Leiternetz wie eine stromführende Leiterschleife. Die Feldstärke klingt mit zunehmender Entfernung sehr schnell, proportional $1/r^3$, ab. In größerer Entfernung schließlich (Punkt D, Abstand z.B. 300m) sind alle bis dahin relevanten Feldstärkeanteile des geführten Wellenfeldes zu vernachlässigen. Es existieren nur noch Strahlungsfelder, die sehr langsam, nämlich proportional $1/r$, abklingen.

Im unmittelbaren Nahbereich der Energieversorgungsleitungen (Punkte A und B, Abstände $< 10 \text{ m}$) überwiegt das Feld der geführten Leitungswelle und zwar das der Gleichtaktwelle. Da der Gleichtaktstrom mit zunehmender Frequenz größer wird, sind die Maximalwerte der Felder bei 10 MHz etwa 40 dB größer als bei 100 kHz. Im Fernfeld des PLC-Systems (Punkt D, Abstand z.B. 300m oder mehr) dominieren die Strahlungsfelder. Diese werden ebenfalls durch den Gleichtaktstrom hervorgerufen (daraus resultiert eine um 40 dB größere Feldstärke bei 10 MHz als bei 100 kHz). Außerdem verbessert sich das Abstrahlverhalten der Leitungen

allerdings wesentlich größer als bei 100 kHz, aufgrund des größeren Gleichtaktstroms. Das Strahlungsfeld ist, da die Leitungslänge etwa gleich einer halben Wellenlänge ist, überall im betrachteten Bereich größer als das Leitungswellenfeld.

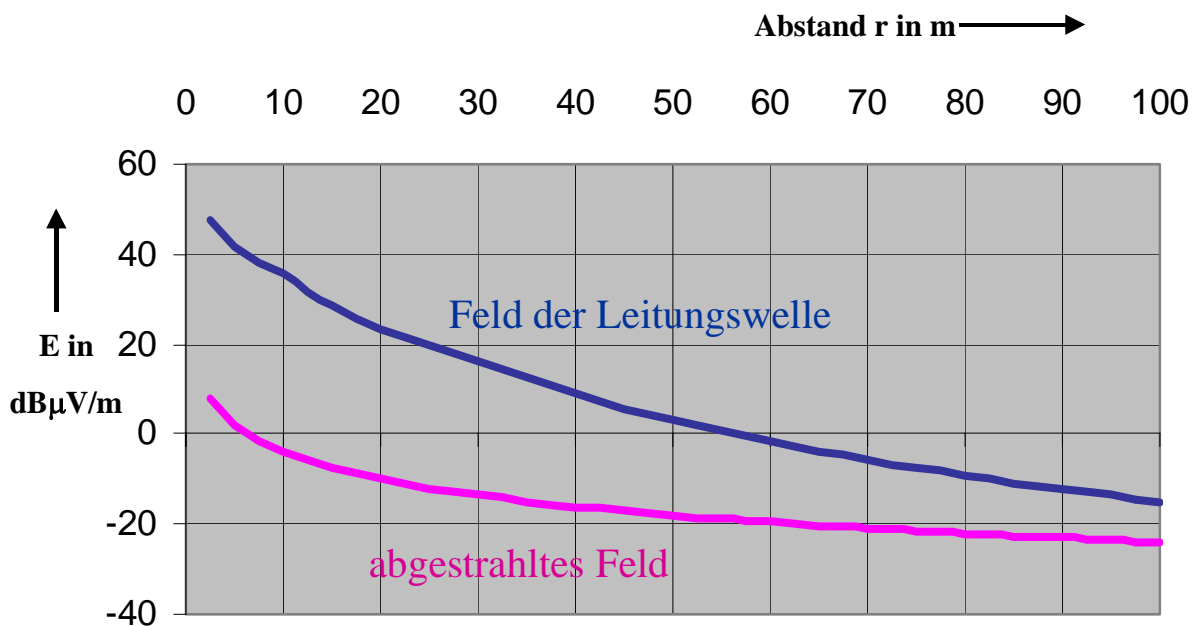


Bild 12: Elektrische Feldstärke $E(r)$, $f = 100 \text{ kHz}$

In einer Entfernung von 100 m beträgt die elektrische Feldstärke etwa $-15 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ bei 100 kHz und etwa $+55 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ bei 10 MHz. Ein PLC-System, das bei 10 MHz arbeitet, erzeugt damit im Fernfeld eine um 70 dB größere Feldstärke als ein PLC-System, das bei 100 kHz arbeitet.

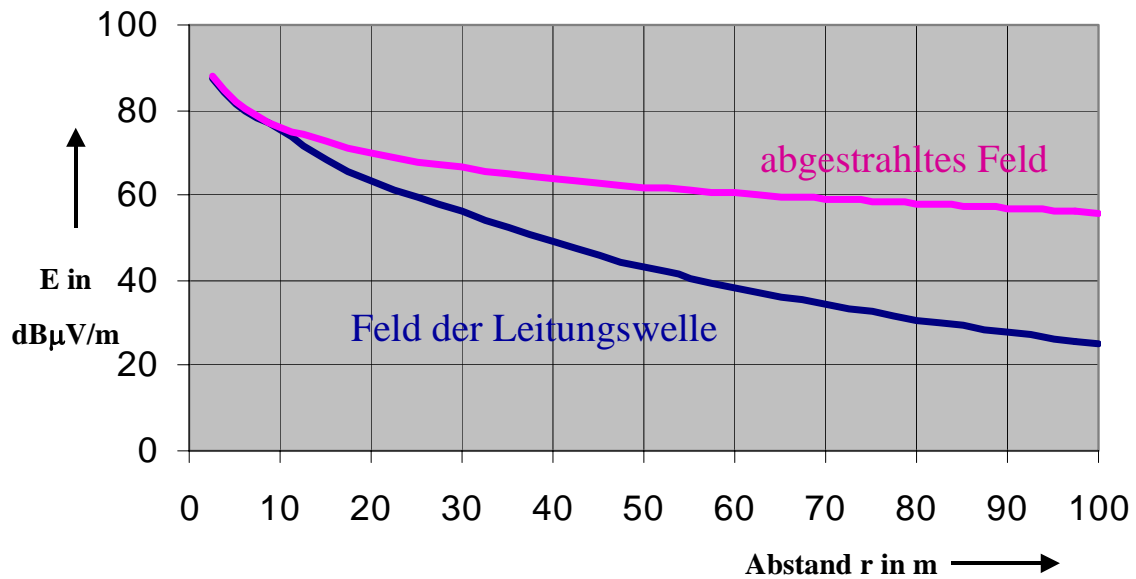


Bild 13: Elektrische Feldstärke $E(r)$, $f = 10$ MHz

Die hier vorgestellten Ergebnisse beruhen nicht nur auf den angeführten mathematischen Zusammenhängen. In den vergangenen zwei Jahren wurden zusätzlich umfangreiche Meßreihen durchgeführt, um diese Aussagen zu verifizieren.

Die elektromagnetischen Felder, die beim gleichzeitigen Betrieb sehr vieler PLC-Anlagen entstehen, und die Ausbreitungseigenschaften der Strahlungsfelder werden in einem demnächst folgenden Artikel betrachtet.

Literatur:

- [1] www.polytrax.com
- [2] Dalichau, H.; Täger, W.: Description of the technology and comparison of the performance of two different approaches for a powerline modem in the Cenelec-band. 4th International Symposium on Powerline Communications, University of Limerick, Ireland, 5th - 7th April 2000.
- [3] Meinke-Gundlach: Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, 5. Auflage. Berlin: Springer 1992.
- [4] Lehner, G.: Elektromagnetische Feldtheorie. Berlin: Springer 1990.
- [5] Dalichau, H.: Elektromagnetische Felder von Powerline-Anlagen; Teil 1: Theoretische Grundlagen für die Störstrahlungsberechnung. Elektronik 2001, H. 9, S. 77 bis 81.