

# **Elektromagnetische Felder von Powerline-Anlagen**

## **Teil 3: Verkopplung zwischen benachbarten Anlagen**

Harald Dalichau

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

In den Teilen 1 und 2 dieser Serie [1, 2] sind für die externen elektromagnetischen Felder, die bei der Nutzung des elektrischen Niederspannungsnetzes zur digitalen Datenkommunikation auftreten, Näherungsformeln abgeleitet und praktische Ergebnisse berechnet worden. Es wurde berichtet, daß aus Marktuntersuchungen bekannt ist, daß für den Zielmarkt der Datenkommunikation in privaten Haushalten, mit Stückzahlen von einer Million Anlagen zur Powerline Kommunikation (PLC-Anlagen) pro Industrienation und Jahr gerechnet werden kann. Insofern wird es nach einer anfänglichen Phase der Markteinführung, in der nur wenige Haushalte PLC-Anlagen besitzen werden, in zunehmendem Maße zu Fällen kommen, bei denen zwei oder mehr benachbarte Wohnungen jeweils mit einer PLC-Anlage ausgerüstet sind. Im Folgenden wird deshalb untersucht, inwieweit es zu wechselseitigen Störungen zwischen solchen benachbarten Anlagen kommen kann und welche Abhilfemaßnahmen zur Verfügung stehen.

### **Leitungsgeführte Verkopplung**

In Europa sind in Ballungsräumen bis zu 400 Haushalte, in ländlichen Bereichen entsprechend weniger, an den gleichen Mittelspannungstransformator angeschlossen. Die Niederspannungsnetze benachbarter Wohnungen bzw. Häuser sind somit alle elektrisch leitend miteinander verbunden und bilden eine Einheit. Dies bedeutet, daß PLC-Signale, die an einer Steckdose innerhalb einer Wohnung in das 230-V-Netz eingespeist werden, grundsätzlich auch in den benachbarten Wohnungen nachgewiesen werden können. Da Powerline-Signale nur eine begrenzte Leitungslänge bzw. Dämpfung überbrücken können, bis sie in den auf dem Niederspannungsnetz stets vorhandenen Störsignalen oder im Rauschen

untergehen, betrifft dieses Problem der Verkopplung über das Niederspannungsleitungsnetz selbstverständlich nur solche Wohnungen, die räumlich dicht benachbart sind. Dies kann also zum Beispiel der Fall sein bei Appartementhäusern, bei Mehrfamilienhäusern und bei Reihenhäusern.

Aus der Sicht der PLC-Anlage in einer Privatwohnung ist der Stromzähler (kWh, Bild 1), der Verbindungspunkt des Inhaus-Netzes mit dem Außennetz, ein Randpunkt des Netzes, bis zu dem man von den meisten Steckdosen aus bereits eine beträchtliche Dämpfung zu überbrücken hat. Zusätzlich hat die Verbindungsleitung zwischen den einzelnen Wohnungen aufgrund der vielen daran angeschlossenen Verbraucher eine sehr niederohmige Impedanz. Diese Impedanzverhältnisse führen zusammen mit den meist nicht unerheblichen Längen der Hausanschlußleitungen dazu, daß der Übergang von einer Wohnung zur benachbarten in aller Regel mit einer beträchtlichen Dämpfung des PLC-Signals verbunden ist. Der Normalfall ist also der, daß die PLC-Signale aus der Nachbarwohnung so stark gedämpft sind, daß sie keine Störung hervorrufen. Dennoch kann der Fall nicht ausgeschlossen werden, daß ein PLC-Signal aus der Wohnung 1 in der Nachbarwohnung 2 noch eine so große Amplitude hat, daß dies zu nennenswerten Störungen der Datenkommunikation führen kann.

Bild 1 zeigt schematisch zwei benachbarte Wohnungen, die an die gleiche 230-V-Versorgungsleitung angeschlossen sind. Die Details der Leitungsführung und die daran angeschlossenen Steckdosen und Verbraucher sind nicht dargestellt. Statt dessen soll die dargestellte Fläche die Ausdehnung des Netzes beschreiben. In jeder Wohnung soll sich Steckdose B sehr dicht am Zählerkasten (kWh) befinden und Steckdose A soll sehr weit davon entfernt sein. In jeder Wohnung ist die Kommunikation von A nach B möglich. Außerdem ist, aufgrund der leitungsgeführten Verkopplung eine Verbindung von B1 nach B2 möglich, das heißt, ein bei B1 eingesteckter PLC-Sender stört einen PLC-Empfänger bei B2. Der Bereich, in dem sich beide PLC-Netze gegenseitig stören können, ist rot markiert. Von A1 nach B2 oder gar von A1 nach A2 ist die Gesamtdämpfung so groß, daß keinerlei Störung oder sonstige Beeinflussung möglich ist.

Bei modernen Anlagen für die Powerline Kommunikation hat eine derartige Verkopplung nur eine Einbuße in der Datenübertragungsgeschwindigkeit zur Folge. Ein unbewußtes Mithören

oder gezieltes Abhören der Kommunikation in der Nachbarwohnung ist unter anderem aus folgenden Gründen nicht möglich:

- Die digitalen Datenpakete sind mit einer (weltweit nur einmal vergebenen) Empfängeradresse versehen, die nur dem Besitzer des Inhaus-Netzwerks bekannt ist.
- Zu Beginn der Kommunikation zwischen zwei Netzknoten werden die Übertragungsparameter jeweils aktuell nur zwischen diesen beiden Knoten ausgehandelt und übermittelt, so daß nur der daran beteiligte Empfänger die anschließend gesendeten Daten demodulieren kann.
- Die Daten sind nach modernsten Methoden verschlüsselt, so daß nur der rechtmäßige Empfänger sie auswerten kann.

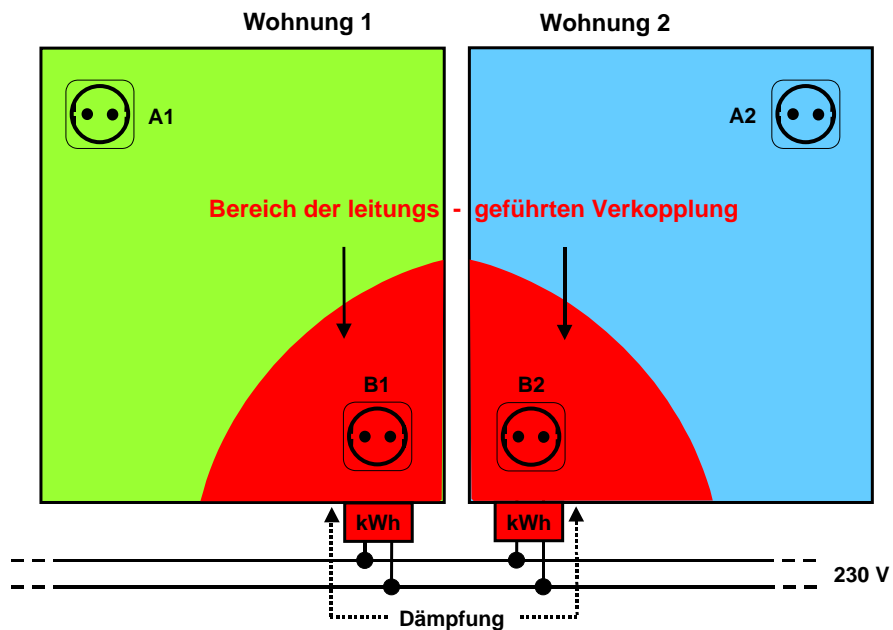


Bild 1: Zwei PLC-Netze in benachbarten Wohnungen

Die oben beschriebene Überlappung von Telekommunikationsnetzen ist nichts Powerline-Spezifisches. Sowohl schnurlose Telefone als auch Mobiltelefone benutzen die jeweils gleichen Funkkanäle und Modulationsverfahren und gelten gemeinhin als abhörsicher. Das Internet benutzt die gleichen Übertragungswege für Millionen von Teilnehmern, und auch dort ist, durch geeignete, dem derzeitigen Stand der Technik entsprechende, zusätzlich einsetzbare Verschlüsselungsmethoden eine ausreichend hohe Datensicherheit erreichbar.

Insofern verbleibt bei der Interaktion zwischen benachbarten PLC-Anlagen nur die gegenseitige Störung: Ist Netzwerk 1 aktiv, dann kann Netzwerk 2 entweder gar nicht mehr übertragen oder nur mit verminderter Datenrate arbeiten. Für den Fall, daß beide PLC-Anlagen die gleiche, hochwertige Technologie benutzen, wird die vermeintliche Störung als PLC-Datenübertragung erkannt. Das Multiple Access (MAC) Protokoll sorgt dann dafür, daß die einzelnen Datenpakete aus beiden Inhaus-Netzen kollisionsfrei, zeitlich nacheinander, auf der Powerline übertragen werden. Bei gleichem Datendurchsatz in beiden Netzen reduziert sich dadurch die erreichbare Datenrate für jedes einzelne Netz auf die Hälfte. Anstelle von z.B. 1 MBit/s stellt das Inhaus-Netzwerk nur noch 0,5 MBit/s zur Verfügung. Sofern der Nutzer dies erkennt und auch in der Lage ist, diese Fehlfunktion seinem eigenen Netzwerk und nicht z.B. dem Internet Service Provider zuzuordnen, kann er versuchen, geeignete Gegenmaßnahmen zu ergreifen, um derartige Qualitätseinbußen für die Zukunft zu verhindern.

## **Entkopplung durch Trennfilter**

Für leitungsgeführte Verkopplungen gibt es eine einfache, preiswerte und wirksame Gegenmaßnahme: Durch den Einbau eines Trennfilters am Zählerkasten erreicht man sowohl, daß die Signale der PLC-Anlage des Nachbarn nicht in das eigene Powerline-Netzwerk eindringen können, als auch, daß die Signale der eigenen PLC-Anlage die eigene Wohnung nicht verlassen können. Nur so ist gewährleistet, daß das Inhaus-Powerline-Netzwerk ständig mit maximaler Datenrate arbeiten kann. Neben den PLC-Signalen aus der Nachbarschaft werden gleichzeitig auch alle anderen Störungen, die von außen kommen, durch das Trennfilter abgeblockt.

Bild 2 zeigt den Aufbau eines derartigen Filters. Es handelt sich um einen Tiefpaß. Die Komponenten sind so bemessen, daß die 50-Hz-Netzfrequenz unbeeinträchtigt durchgelassen wird. Die höherfrequenten PLC-Signale werden dagegen hinreichend stark gedämpft, so daß keine Störungen des Inhaus-Netzes mehr auftreten können. Das Inhaus-PLC-Netz wird gegen die Umwelt isoliert und abgeschirmt.

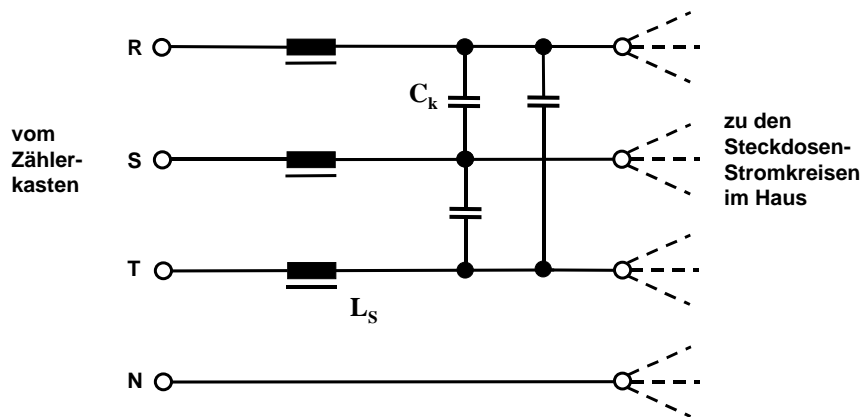


Bild 2: Dreiphasiges PLC-Sperrfilter mit Phasenkoppler, Prinzipschaltbild

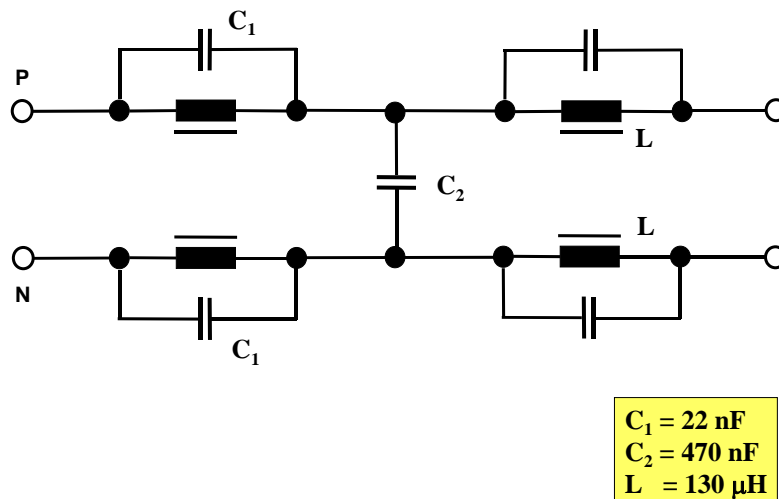


Bild 3: Einphasiges PLC-Sperrfilter, Schaltbild mit Dimensionierungsvorschlag

Dargestellt ist ein dreiphasiges PLC-Trennfilter, wie es zum Beispiel in einem Reihenhaus eingesetzt werden müßte, bei dem die Steckdosenkreise in den verschiedenen Etagen jeweils an eine andere Phase des Niederspannungsnetzes angeschlossen sind. Für den Fall einer normalen Etagenwohnung oder eines Apartments, bei dem die Spannungsversorgung

einphasig ist, genügt ein wesentlich einfacheres Trennfilter. Die Stränge R und S und alle Komponenten, die dort angeschlossen sind, entfallen (Bild 3). Das dreiphasige PLC-Filter wurde jedoch aus dem Grund hier als Beispiel angeführt, um einen weiteren Vorteil dieser Lösung aufzuzeigen. In einem Haus mit drei Phasen tritt nämlich folgendes Problem auf: Ein PLC-Signal, das in Phase R eingespeist wird und in Phase S oder T empfangen werden soll, wird durch diesen Phasenübergang in manchen Fällen stark gedämpft. Da die Verkopplung zwischen unterschiedlichen Phasen nur durch das Übersprechen zwischen den Leitungen und durch angeschlossene Drehstromverbraucher (wie z.B. den Küchenherd) gegeben ist, liegen diese zusätzlichen Dämpfungen bei typisch 20 dB, in ungünstigen Fällen bei bis zu 40 dB. Selbstverständlich können moderne, leistungsfähige PLC-Systeme solche Zusatzdämpfungen in 99% aller Fälle überbrücken. Unter Umständen wird jedoch dadurch die Bitfehlerrate ansteigen oder die Übertragungsgeschwindigkeit wird verringert. Um diesen Effekt zu vermeiden, ist in das PLC-Trennfilter ein Phasenkoppler integriert. Die drei Kondensatoren  $C_k$  in Bild 2 bilden diesen Phasenkoppler. Dadurch werden die drei Phasen des Drehstromsystems für den PLC-Frequenzbereich niederohmig miteinander verbunden. Die Zusatzdämpfung durch den Phasenübergang entfällt und die Leistungsfähigkeit des PLC-Netzwerks wird durch den Phasenübergang nicht mehr beeinträchtigt.

Bild 4 zeigt den typischen Dämpfungsverlauf eines PLC-Entkopplungsfilters entsprechend Bild 3.

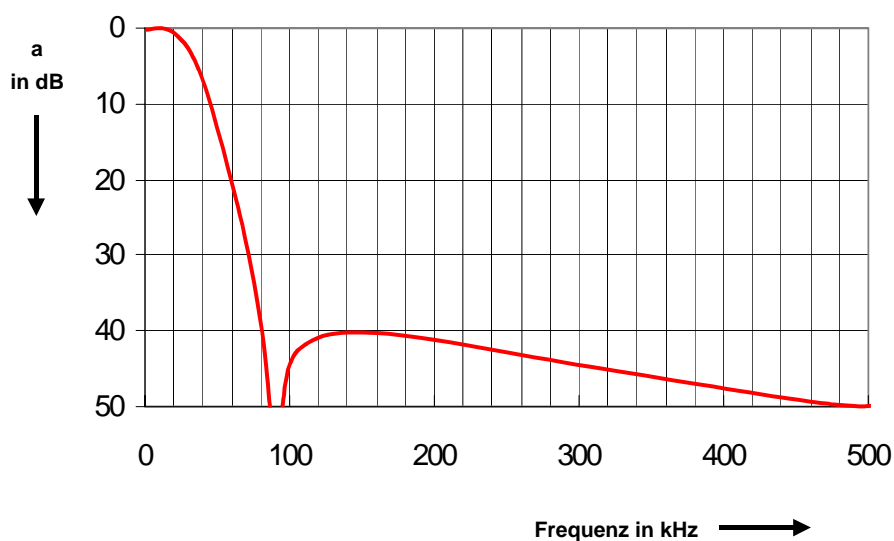


Bild 4: Durchgangsdämpfung a des Sperrfilters in Bild 3

Derartige Filter können jederzeit nachträglich zur Optimierung eines bereits vorhandenen Inhaus-PLC-Netzwerks installiert werden. Sie sind, wie gesagt, nicht notwendig zum Betrieb einer PLC-Anlage, aber sie verbessern die Übertragungseigenschaften unter Umständen erheblich und nachhaltig. Die Installation am Zählerkasten muß durch eine ausgebildete Fachkraft des Elektroinstallationshandwerks erfolgen. Preiswerte PLC-Trennfilter sind im Fachhandel erhältlich [3]. Die Kosten dafür sind geringer als die Summe der für die Anbringung (Arbeitszeit  $\leq 15$  Minuten, Hutschienenmontage) einschließlich An- und Abfahrt anfallenden Zusatzkosten.

Neben den oben angeführten Verbesserungen, die der Einbau eines Sperrfilters bewirkt:

- leitungsgeführte Störungen von außen werden ferngehalten,
- leitungsgeführte Störungen durch benachbarte PLC-Anlagen werden unterbunden,
- die Verkopplung der PLC-Signale zwischen den drei Phasen des eigenen Inhaus-Drehstromnetzes wird optimiert,
- die Signale des privaten Inhaus-Daten-Netzes dringen nicht nach außen,

ergeben sich weitere Vorteile für den Betrieb der Inhaus-PLC-Anlage:

- a) Am Hausanschlußkasten ist das hauseigene Netz mit der Versorgungsleitung auf der Straße verbunden. Da an dieser Leitung alle Nachbarhäuser und Wohnungen parallel angeschlossen sind, ergibt sich insgesamt am Hausanschlußkasten eine sehr niederohmige Impedanz. Diese nimmt unter Umständen einen großen Anteil der PLC-Sendeleistung auf. Durch das Trennfilter wird dies verhindert.
- b) Wie in Teil 1 des Artikels [1] beschrieben, ist die Verbindung von Nulleiter, Schutzleiter und Hauserdungsanlage (Wasserleitung) am Zählerkasten eine wesentliche Ursache für das Auftreten des Gleichtaktstroms  $I_{\text{even}}$ , der die unerwünschten externen Störfelder erzeugt. Durch das Sperrfilter wird diese Nullung und Erdung für den Frequenzbereich der PLC-Anlage nicht wirksam. Die Symmetrie des PLC-Signals bleibt erhalten, die Umwandlung der Gegentaktwelle in die unerwünschte Gleichtaktwelle entfällt an dieser Stelle und die externen Störfelder der PLC-Anlage werden nachhaltig verringert (Bild 5).

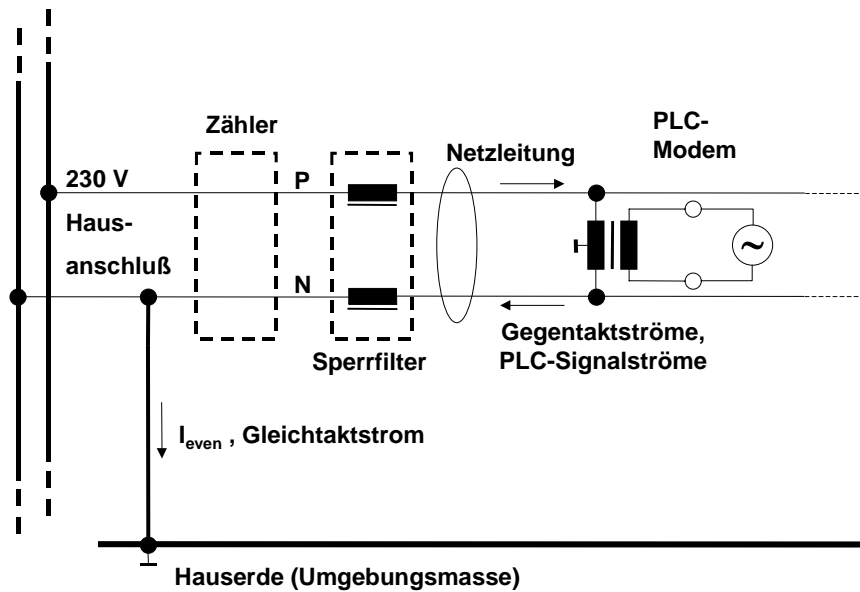


Bild 5: Die Symmetriestörung durch Erdung des Nulleiters N, die wesentlich an der Entstehung des Gleichtaktstroms beteiligt ist, wird durch das Sperrfilter verhindert

## Induktive Kopplung zwischen zwei Netzleitungen

Neben der Verkopplung zwischen zwei benachbarten PLC-Anlagen über leitungsgebundene Ströme existiert die Verkopplung über das externe Magnetfeld der Leitungswelle. Wie in Teil 1 dieses Artikels abgeleitet (Gl. (8)), erzeugt der Strom  $I_{\text{even}}$  der Gleichtaktwelle eine magnetische Feldstärke entsprechend

$$H_{\text{even}} = I_{\text{even}} / (2\pi r). \quad (1)$$

Dieses Magnetfeld induziert in einer anderen Netzleitung in der Entfernung  $r$  eine Spannung  $U_i$ . In Bild 6 ist beispielhaft eine derartige, stark vereinfachte Anordnung skizziert. Die von einem magnetischen Wechselfeld in eine Leiterschleife induzierte Spannung läßt sich mit dem Induktionsgesetz berechnen zu:

$$U_i = d\Phi/dt = 2 \pi f \mu_0 H_{\text{even}} A. \quad (2)$$

In dieser Gleichung ist  $f$  die Frequenz des Wechselfeldes,  $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs}/(\text{Am})$  die magnetische Feldkonstante und  $A = 2 d l$  die rechteckige Fläche der Leiterschleife, die das



Magnetfeld  $H_{\text{even}}$  senkrecht durchtritt. Die induzierte Spannung  $U_i$  wirkt in Netzleitung 2 als Störspannung.

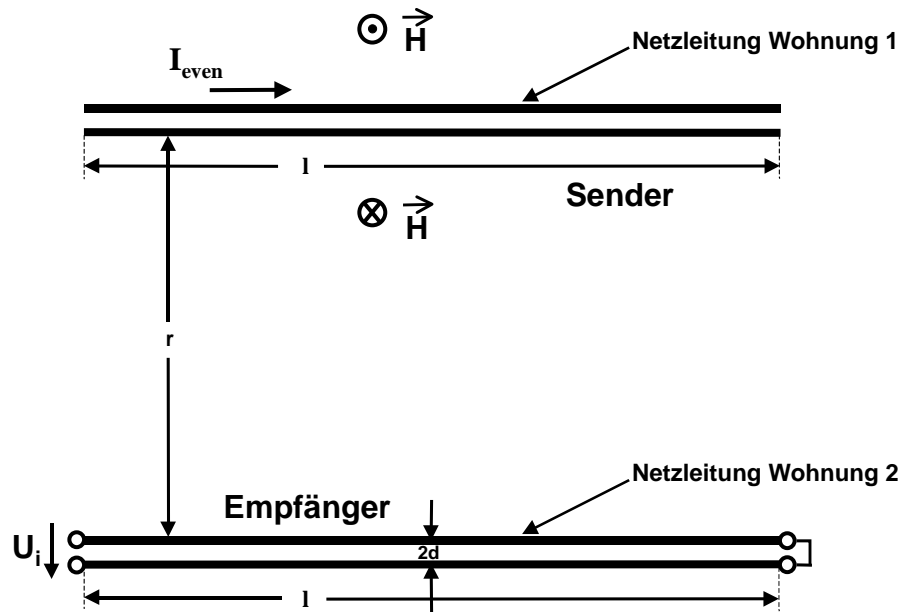


Bild 6: Verkopplung zwischen zwei Netzleitungen: Induzierte Spannung

Das Nutzsignal der PLC-Anlage in Netzleitung 1 hat die Amplitude

$$U_{\text{odd}} = I_{\text{odd}} R_L, \quad (3)$$

wobei  $R_L$  der Lastwiderstand des PLC-Senders in Netzleitung 1 ist. Der Zusammenhang zwischen der Gegentaktamplitude und der Gleichtaktamplitude ist nach Teil 1, Gl. (14 und 15)

$$I_{\text{even}} = I_{\text{odd}} f / f_{\text{grenz}} \quad \text{mit } f \leq f_{\text{grenz}} \quad \text{und } f_{\text{grenz}} = 10 \text{ MHz}. \quad (4)$$

Bis zur Grenzfrequenz steigt die Gleichtaktamplitude proportional zur Frequenz an. Ab  $f_{\text{grenz}}$  und darüber wird angenommen, daß Gegentaktamplitude und Gleichtaktamplitude gleich groß sind. Zur numerischen Abschätzung, um wieviel das Störsignal  $U_i$  kleiner ist als das Nutzsignal  $U_{\text{odd}}$ , wird die Koppeldämpfung  $a_k$  berechnet. Im logarithmischen Maß ergibt sich  $a_k$  zu:

$$a_k = 20 \log (U_i / U_{\text{odd}}). \quad (5)$$

Setzt man die oben angegebenen Beziehungen ineinander ein, so ergibt sich

$$U_i / U_{\text{odd}} = \mu_0 f^2 l^2 d / (r R_L f_{\text{grenz}}) \quad \text{mit } f \leq f_{\text{grenz}} \quad \text{und } f_{\text{grenz}} = 10 \text{ MHz.} \quad (6)$$

Das Störsignal  $U_i$  in Netzleitung 2, bezogen auf das Nutzsinal  $U_{\text{odd}}$  in Netzleitung 1, hat somit folgende Frequenzabhängigkeit: Es steigt bis zur Grenzfrequenz  $f_{\text{grenz}}$  proportional zum Quadrat der Frequenz an (im logarithmischen Maß um 12 dB bei Frequenzverdopplung und um 40 dB bei Verzehnfachung der Frequenz). Oberhalb von  $f_{\text{grenz}}$  steigt es dann nur noch linear mit der Frequenz an. Es ist proportional zum Quotienten aus der Länge  $l$  der Netzleitungen und dem Abstand  $r$ , daß heißt, bei 10 m langen Netzleitungen und 10 m Abstand wird gleich viel Störsignal eingekoppelt wie bei 5 m Länge und 5 m Abstand. Weiterhin wird das Störsignal um so größer, je mehr Strom im Leitungskreis 1 fließt, also je kleiner der Lastwiderstand  $R_L$  dort ist.

Die oben abgeleitete Formel zur Abschätzung der Koppeldämpfung zwischen zwei benachbarten PLC-Anlagen aufgrund der induktiven Verkopplung über das Feld der Leitungswelle wird numerisch ausgewertet für:

$$2 d = 2,8 \text{ mm,}$$

$$R_L = 100 \Omega,$$

$$l = r.$$

Das Ergebnis ist in Bild 7 eingetragen. Die Koppeldämpfung sinkt mit 40 dB pro Dekade von etwa 122 dB bei 500 kHz auf 70 dB bei 10 MHz und anschließend mit 20 dB pro Dekade auf 60 dB bei 30 MHz. Für die induktive Verkopplung ergeben sich somit recht hohe Koppeldämpfungen, solange die Abstände  $r$  zwischen den Leitungen ausreichend groß sind.

Deutlich ungünstigere Werte ergeben sich für den Fall, daß beide Leitungen in der gleichen Wand verlegt sind. Für 5 m Leitungslänge und 20 cm Abstand werden alle Koppeldämpfungen in Bild 7 um 28 dB kleiner. Im ungünstigsten Fall, wenn beide Leitungen im gleichen Leerrohr verlegt sind ( $l = 5 \text{ m}$ ,  $r = 1 \text{ cm}$ ) werden alle Koppeldämpfungen um 54 dB kleiner. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, daß die der Rechnung zugrundeliegende Geometrie den absoluten "worst case" voraussetzt, das heißt, beide Leitungen verlaufen

parallel und das Magnetfeld durchsetzt die Querschnittsfläche A entlang der gesamten Strecke senkrecht. Falls die Querschnittsfläche A entlang der gesamten Strecke um  $90^\circ$  gedreht ist, wird die induzierte Spannung zu Null und falls die Leitung verdrillt ist, wird die Spannung ebenfalls zu Null.

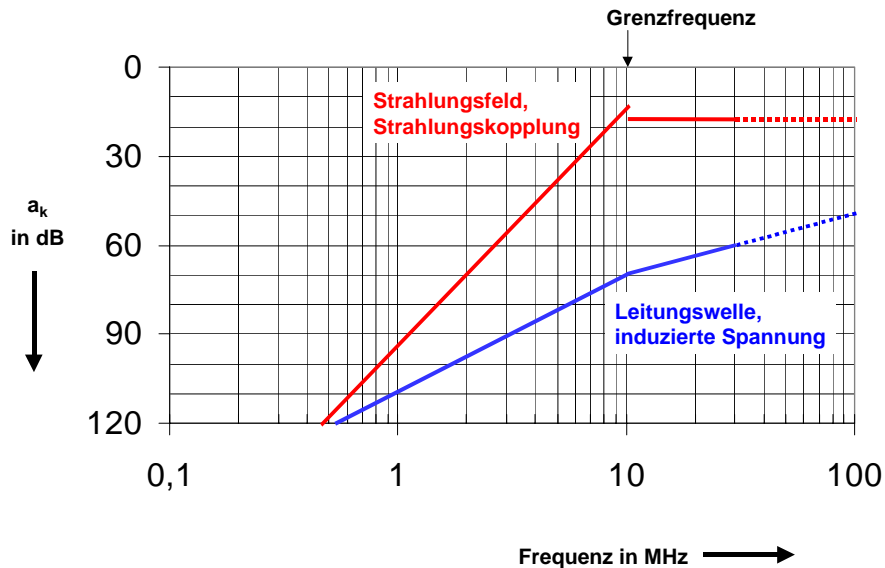


Bild 7: Koppeldämpfung  $a_k$  zwischen zwei parallelen Leitungen mit 10 m Abstand

## Antennenkopplung über das Strahlungsfeld

Wie in Bild 8 schematisch dargestellt, erzeugt der Strom  $I_{\text{even}}$  der Gleichtaktwelle sowohl das geführte Wellenfeld der Leitungswelle, bei dem die Energieausbreitungsrichtung parallel zum Draht verläuft, als auch ein Strahlungsfeld mit der Energieausbreitungsrichtung radial in die Umgebung hinein. Wie in Teil 2 des Artikels [2] beschrieben, entsteht das Strahlungsfeld dadurch, daß die Drähte der Netzleitung als Sendeantenne wirken. Diese Antenne wird vom PLC-Modem mit dem Strom  $I_{\text{even}}$  gespeist und erzeugt so die abgestrahlte Welle. Von der Netzleitung in der Nachbarwohnung, die als Empfangsantenne wirkt, wird diese Welle empfangen. Auf diese Weise entsteht dort ein Störsignal für die PLC-Anlage des Nachbarn.

### Frequenzbereich unterhalb von 10 MHz

Im Folgenden wird die Koppeldämpfung  $a_k$  für diese Antennenkopplung berechnet. Zunächst betrachten wir den Frequenzbereich unterhalb von 10 MHz, in dem die Netzleitung als elektrisch kurze Drahtantenne mit konstanter Strombelegung angenähert werden kann. Der Speisestrom  $I_{\text{even}}$  steigt in diesem Bereich linear mit der Frequenz an. Die elektrische Feldstärke  $E_E$  des Strahlungsfeldes im Abstand  $r$  wurde in Teil 2 berechnet (Gl. (23)):

$$E_E = 0,513 (\mu\text{s } \Omega/\text{m}) \text{ sqr}(G_s) (I l f) / r \quad \text{in } \mu\text{V/m.} \quad (7)$$

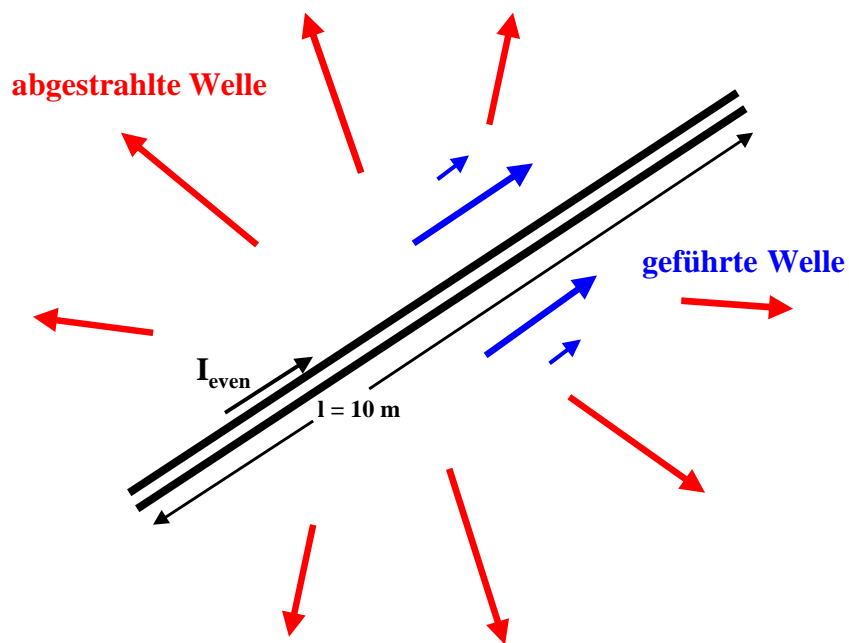


Bild 8: Externe Felder des Rechenbeispiels: Leitungswelle und Strahlungsfeld

Wie in Bild 9 skizziert, erzeugt die Feldstärke  $E_E$  am Empfangsort die Spannung [4]

$$U_E = E_E l. \quad (8)$$

Diese Leerlaufspannung  $U_E$  der Empfangsantenne hat einen Gleichtaktstrom  $I_{\text{even}}$  zur Folge, der sich mit dem Antennenersatzschaltbild in Bild 9 näherungsweise berechnen läßt zu:

$$I_{\text{even}} \approx U_E / X_A \quad \text{mit } X_A = 1/(2 \pi f C_A). \quad (9)$$

Wie in Bild 9 dargestellt, kann man eine Drahtantenne, deren Länge  $l$  sehr viel kürzer als die Wellenlänge ist, im Empfangsfall beschreiben durch eine Spannungsquelle mit der Leerlaufspannung  $U_E$  und einem Innenwiderstand, der aus der Serienschaltung des Strahlungswiderstandes  $R_S$  und der Antennenkapazität  $C_A$  besteht. Diese Spannungsquelle wird mit dem Lastwiderstand  $R_L$  belastet. Die Antennenkapazität  $C_A$  ist für eine 10 m lange Drahtantenne etwa 50 pF [5]. Damit wird  $X_A$  z.B. bei 1 MHz zu 3,2 k $\Omega$ . Verglichen damit sind die beiden Widerstände  $R_S$  und  $R_L$  in diesem Frequenzbereich sehr klein und können bei der Größtwert-Abschätzung des Empfangsstroms  $I_{\text{even}}$  vernachlässigt werden ( $R_S$  ist bei 1 MHz ungefähr 1 $\Omega$  und der Kleinstwert von  $R_L$  wird bei etwa 10  $\Omega$  liegen).

Als Koppeldämpfung  $a_k$  ergibt sich in diesem Fall im logarithmischen Maß der Wert

$$a_k = 20 \log (I_{\text{oddE}} / I_{\text{oddS}}). \quad (10)$$

Die Indizes E und S kennzeichnen dabei den Empfänger und den Sender.

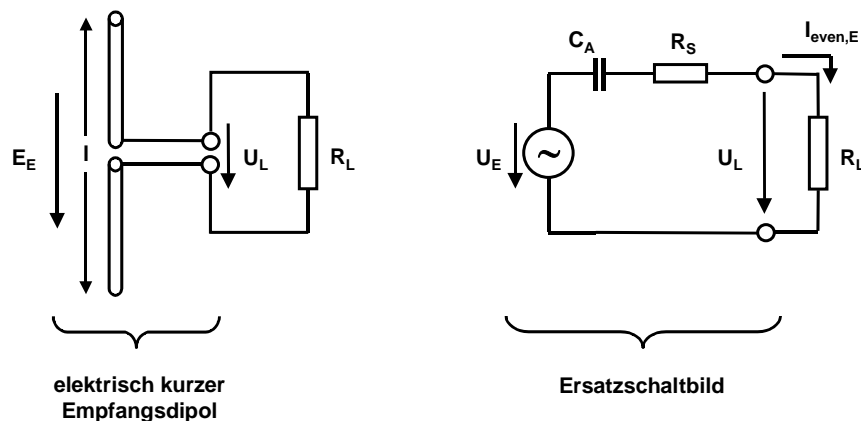


Bild 9: Dipolantenne als Empfänger und Ersatzschaltbild

**Zahlenbeispiel für  $f = 1$  MHz,  $l = r = 10$  m und  $I_{\text{oddS}} = 1$  mA:**

Betrachtet man die Übertragungsstrecke vom Sender zum Empfänger, so ergibt sich zuerst beim Sender der Faktor 1/10 bei der Umwandlung von  $I_{\text{odd}}$  in  $I_{\text{even}}$  (siehe Gl. (4)). Dies

entspricht einem ersten Koppeldämpfungsanteil von 20 dB. Danach erhält man entsprechend Gl. (7) bis Gl. (10) einen Koppeldämpfungsanteil von 54 dB für die Strahlungskopplung zwischen  $I_{\text{evenS}}$  und  $I_{\text{evenE}}$ . Zum Schluß ergeben sich weitere 20 dB als Koppeldämpfungsanteil für die Umwandlung von  $I_{\text{evenE}}$  in  $I_{\text{oddE}}$ . Als Summe ergibt sich so eine Koppeldämpfung  $a_k$  von 94 dB für die Antennenkopplung bei 1 MHz.

Betrachten wir nun die Frequenzabhängigkeit dieser Koppeldämpfung. Die Umwandlung vom Gegentaktsignal  $I_{\text{odd}}$  in das Gleichtaktsignal  $I_{\text{even}}$  beim Sender nimmt nach Gl. (4) proportional zur Frequenz zu. Das vom Sender abgestrahlte Feld wächst nach Gl. (7) auch proportional zur Frequenz. Der Strom im Empfänger nach Gl. (9) nimmt ebenfalls

proportional zur Frequenz zu und die anschließende Umwandlung des Gleichtaktsignals  $I_{\text{even}}$  in ein Gegentaktsignal  $I_{\text{odd}}$  desgleichen. Daraus resultiert insgesamt ein Zunahme des Störsignals mit  $f^4$  bzw. eine Abnahme der Koppeldämpfung durch Antennenkopplung mit  $1/(f^4)$ . Dies entspricht im logarithmischen Maß 24 dB bei Verdopplung bzw. 80 dB bei Verzehnfachung der Frequenz.

Damit sind ein Zahlenwert (94 dB bei 1 MHz) und die Steigung (80 dB pro Dekade) bekannt und die gesamte Funktion kann dargestellt werden (Bild 7). Da diese Abschätzung für alle dargestellten Frequenzen oberhalb der Werte der Koppeldämpfung liegt, die sich für die Verkopplung über das Induktionsgesetz ergibt, wird auf eine weitere detaillierte Diskussion der induktiven Kopplung verzichtet.

## **Grenzfrequenz bei 10 MHz**

In Teil 1 dieses Artikels [1] wurde eine Grenzfrequenz eingeführt, bei deren Erreichen der Gleichtaktstrom und der Gegentaktstrom gleich groß sind. Grundsätzlich kann  $I_{\text{even}}$  sogar größer werden als  $I_{\text{odd}}$ , aber aus Messungen ist bekannt, daß es in der Realität eher zu einem Sättigungsverhalten kommt. Deshalb wird davon ausgegangen, daß sich der Gleichtaktstrom oberhalb der Grenzfrequenz nicht weiter erhöht.

In Teil 2 dieses Artikels [2] wurde eine weitere Grenzfrequenz eingeführt, bei deren Erreichen das Abstrahlverhalten der Netzleitung als Drahtantenne ebenfalls einen Sättigungszustand

erreicht. Bei dieser Frequenz kommt die Leitungslänge in die Größenordnung einer halben Wellenlänge und die Antenneneigenschaften, also sowohl die Abstrahlung als auch das Empfangsvermögen, werden optimal. Mit weiter zunehmender Frequenz kann keine weitere, nennenswerte Verbesserung mehr erreicht werden. Insofern gehen wir auch hier von einem Sättigungsverhalten als vereinfachender Annahme aus.

Beide Grenzfrequenzen wurden für die hier abgeleiteten Formeln und Diagramme der Übersichtlichkeit halber auf 10 MHz gelegt. Aus einer Vielzahl von Messungen ist bekannt, daß je nach den örtlichen und zeitlichen Gegebenheiten der jeweiligen PLC-Anlage (Struktur des Netzes, Länge der Leitungen, Ort des PLC-Senders, aktueller Belastungszustand des

Netzes etc.) diese Grenzfrequenzen in der Realität im Bereich zwischen etwa 3 MHz und 10 MHz liegen.

## **Frequenzbereich oberhalb von 10 MHz**

Die Näherungslösung, die aus der Annahme elektrisch kurzer Antennen mit konstanter Strombelegung hergeleitet wurde, liefert für die Grenzfrequenz 10 MHz eine Koppeldämpfung von 14 dB. Da dieser Wert sehr niedrig zu sein scheint, wird er durch eine andere Herleitung noch einmal verifiziert:

Bei 15 MHz beträgt die Freiraumwellenlänge 20 m, sodaß die dem Rechenbeispiel zugrundegelegte 10 m lange Netzleitung genau eine halbe Wellenlänge lang ist (Bei der Gleichtaktwelle und bei der Wellenablösung vom Draht verlaufen die elektrischen Feldlinien zum überwiegenden Teil durch die Luft. Insofern ist es sinnvoll, hier mit der Freiraumwellenlänge  $\lambda_0$  zu rechnen. Nur bei der Gegentaktwelle, wo die elektrischen Feldlinien zwischen den beiden Leitern verlaufen, muß mit der verkürzten Wellenlänge  $\lambda_\epsilon = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_r}$  gerechnet werden.). Die Übertragungsdämpfung zwischen zwei  $\lambda/2$ -Dipolen im Abstand  $r$  ergibt sich nach [4] zu:

$$a = (\lambda_0 / (4 \pi r))^2 G_S G_E. \quad (11)$$

Mit dem Gewinn  $G = 1,64$  für einen  $\lambda/2$ -Dipol wird  $G_S = G_E = 1,64$  und es ergibt sich im logarithmischen Maß eine Dämpfung von 11,7 dB für  $r = 10$  m Abstand. In der Realität ist die Dämpfung zwischen zwei parallelen, 10 m langen  $\lambda/2$ -Stabantennen bei 10 m Abstand etwa 6 dB, da Gl. (11) für das Fernfeld gültig ist. Im Nahfeld tritt eine wesentlich stärkere, resonante Verkopplung auf. Für die hier gesuchte Abschätzung wird dennoch der größere Zahlenwert für die Dämpfung beibehalten, denn reale Netzleitungen verlaufen nicht auf 10 m Länge exakt parallel zueinander. Es sollte allerdings auch gesehen werden, daß die Leitungen der Nachbarwohnung unter Umständen in geringerer Entfernung als 10 m verlegt sein können.

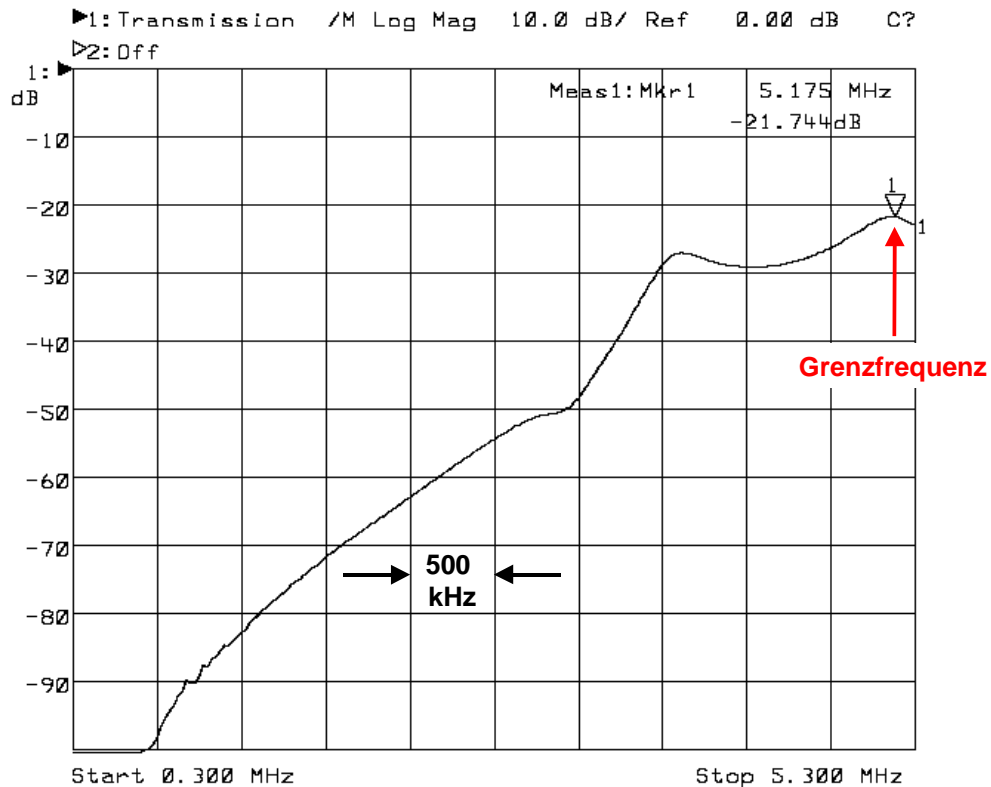
Zu dem Dämpfungswert von 11,7 dB müssen noch 6 dB addiert werden. 3 dB für die Wandlung der Gegentaktwelle in eine Gleichtaktwelle beim Sender und weitere 3 dB für die

Rückwandlung der Gleichtaktwelle in eine Gegentaktwelle beim Empfänger. Die vom Empfangsdipol aus dem Strahlungsfeld aufgenommene Leistung läuft zunächst als Gleichtaktwelle auf der Leitung. Aufgrund der unvermeidbar vorhandenen Unsymmetrie wird oberhalb der Grenzfrequenz die Hälfte dieser Leistung in eine Gegentaktwelle umgewandelt und kann als solche das ebenfalls als Gegentaktwelle laufende PLC-Nutzsignal stören. Die sich als Summe ergebende Koppeldämpfung von 17,7 dB ist ebenfalls in Bild 7 eingetragen.

## Meßergebnisse

Bild 10 zeigt das Ergebnis einer Messung der Verkopplung zwischen zwei benachbarten, galvanisch nicht miteinander verbundenen PLC-Netzen. Man erkennt den typischen Verlauf der Koppeldämpfung als Funktion der Frequenz: Beginnend mit sehr hohen Werten der Koppeldämpfung bei niedrigen Frequenzen sieht man zunächst die starke Abnahme mit zunehmender Frequenz, bis zur Grenzfrequenz. Die Koppeldämpfung sinkt in diesem speziellen Fall von 100 dB bei 700 kHz auf etwa 20 dB bei 5 MHz. Dies ist in guter Übereinstimmung mit dem berechneten Abfall von 80 dB pro Dekade, wie er in Bild 7 skizziert ist (dort von 100 dB bei 800 kHz auf 20 dB bei 8 MHz).





**Bild 10: Gemessene Verkopplung zwischen zwei Inhaus-PLC-Anlagen**

Die Grenzfrequenz, oberhalb derer die elektromagnetische Verkopplung in den Sättigungsbereich kommt, liegt in diesem Fall bei etwa 5 MHz, und nicht bei 10 MHz, wie im Rechenbeispiel angenommen. In Bild 11 ist ein ähnliches Meßergebnis in einem größeren Frequenzbereich dargestellt. Oberhalb der Grenzfrequenz sieht man starke Schwankungen der Koppeldämpfung, zwischen in diesem Fall etwa 20 dB und 55 dB. Die Lage der Minima und Maxima in diesem Bereich wird durch die örtliche Netzstruktur (die Leitungslängen) und die Belastung des Netzes (die Abschlußimpedanzen) vorgegeben. Für jedes Netz, für jeden Belastungszustand und für jede Steckdose, an die der PLC-Sender angeschlossen ist, ergibt sich eine andere Verteilung.

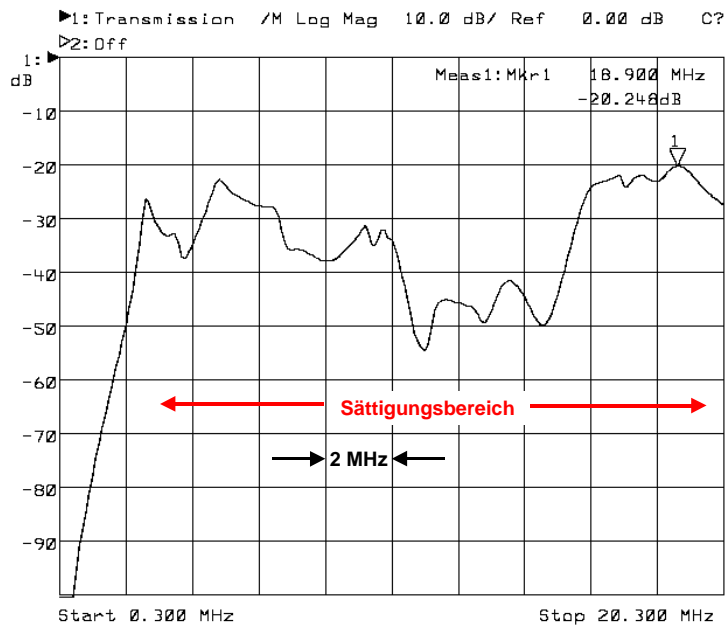


Bild 11: Gemessene Verkopplung zwischen zwei Inhaus-PLC-Anlagen (Sättigungsbereich)

## Bewertung der Ergebnisse

Sowohl die formelmäßige Abschätzung der physikalischen Gegebenheiten als auch die Messungen zeigen, daß oberhalb von 5 bis 10 MHz Koppeldämpfungen in der Größenordnung von 15 bis 30 dB zwischen benachbarten PLC-Netzen auftreten. Da die Verkopplung über das Strahlungsfeld erfolgt, und dieses mit zunehmender Entfernung nur sehr langsam kleiner wird, muß zusätzlich damit gerechnet werden, daß nicht nur die Nachbarwohnung, sondern auch noch PLC-Anlagen in weiter entfernten Wohnungen die Datenkommunikation stören. Eine Abhilfemaßnahme gegen diese unerwünschte Störung gibt es nicht. Die bei den leitungsgeführten Verkopplungen wirksamen Sperrfilter haben auf die Strahlungskopplung keinen Einfluß. Damit ergibt sich, daß die Nutzung des oberen MHz-Bereichs für Inhaus-PLC-Anlagen wenig sinnvoll ist. Neben der Verkopplungsproblematik gibt es noch weitere Gründe, die ebenfalls dagegen sprechen, diesen Frequenzbereich für Inhaus-PLC zu nutzen [6].

Sehr positiv sehen die Ergebnisse allerdings für den kHz-Bereich aus. Wenn man von folgenden Randbedingungen ausgeht:

- Ein modernes Inhaus-PLC-System arbeitet bei Störabständen oberhalb von etwa 25 dB mit voller Datenrate ( $\text{SNR} \geq 25 \text{ dB}$ ),
- die Dämpfung zwischen zwei Steckdosen beträgt im Inhaus-Bereich in 99% aller Fälle weniger als 70 dB,

dann bewirken Störsignale die  $25 \text{ dB} + 70 \text{ dB} = 95 \text{ dB}$  unter dem Sendepiegel liegen, keine Beeinträchtigung der Datenübertragung. Die ideale Entkopplung zwischen zwei PLC-Anlagen ist also dort gegeben, wo die Koppeldämpfung größer als 95 dB ist. Nach den oben gewonnenen Ergebnissen (Bild 7, 10 und 11) ergeben sich so hohe Koppeldämpfungen im Frequenzbereich unterhalb von etwa 900 kHz bzw. 1 MHz. Dieser Frequenzbereich ist somit besonders gut geeignet, um Inhaus-Powerline Kommunikation zu betreiben.

## Literatur

[1] Dalichau, H.: Elektromagnetische Felder von Powerline-Anlagen; Teil 1: Theoretische Grundlagen für die Störstrahlungsberechnung. *Elektronik 2001*, H. 9, S. 77 bis 81.

[2] Dalichau, H.: Elektromagnetische Felder von Powerline-Anlagen; Teil 2: Ableitung von Näherungsformeln und praktische Ergebnisse. *Elektronik 2001*, H. 10, S. 84 bis 91.

[3] <http://www.bajog.de>

[4] Meinke-Gundlach: Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, 5. Auflage. Berlin: Springer 1992.

[5] Lindenmeier, H.; Hopf, J.: Kurzwellenantennen. Heidelberg: Hüthig 1992.

[6] Dalichau, H.: Evaluation of different frequency bands regarding their qualification for Inhouse Powerline Communication. 5<sup>th</sup> International Symposium on Powerline Communications, Lund University, Malmö, Sweden, 4<sup>th</sup> - 6<sup>th</sup> April 2001.