

Elektromagnetische Felder von Powerline-Anlagen

Teil 4: Überlagerung der Felder einer großen Zahl von Powerline-Anlagen

Harald Dalichau

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

Derzeit befinden sich Powerline-Modems, mit denen es möglich ist, das elektrische Niederspannungsnetz einer Privatwohnung zur digitalen Datenkommunikation zu nutzen (Schlagwort: "Internet aus der Steckdose"), in der Phase der Markteinführung. In zwei früheren Aufsätzen [1, 2] sind für die externen elektromagnetischen Felder, die bei einer derartigen Nutzung auftreten, Abschätzungen durchgeführt worden. Bild 1 zeigt eine Zusammenfassung der dort gewonnenen Ergebnisse. Die Modellrechnung geht von einer Sendeleistung eines PLC-Modems von $100 \mu\text{W}$ in 9 kHz Bandbreite bzw. von -50 dBm/Hz aus. Eine Vielzahl von Feldtests hat ergeben, daß eine Sendeleistung in dieser Größenordnung notwendig ist, um eine zuverlässige Datenverbindung mit etwa 99% Erreichbarkeit aller Steckdosen eines Privathaushalts garantieren zu können.

Die sich daraus ergebenden Maximalwerte der abgestrahlten externen Feldstärken sind in Bild 1 als rote Linie eingetragen. In logarithmischer Darstellung ergibt sich bis zu einer Grenzfrequenz von 10 MHz ein linearer Anstieg mit 20 dB pro Dekade (Verzehnfachung der Frequenz). Oberhalb von 10 MHz bleiben die zu erwartenden Größtwerte der elektrischen Feldstärke in 3 m Entfernung von einer PLC-Anlage konstant. Der Anstieg mit zunehmender Frequenz ist physikalisch darin begründet, daß zum einen die Unsymmetrie des Niederspannungsnetzes mit zunehmender Frequenz größer wird und zum anderen das Abstrahlvermögen der Leitungen mit abnehmender Wellenlänge immer besser wird. Oberhalb einer Grenzfrequenz, die hier auf 10 MHz gelegt wurde (die in der Realität, abhängig von den Eigenschaften der jeweiligen Anlage, zwischen 3 und 10 MHz liegt), tritt ein Sättigungsverhalten auf: Unsymmetrie und Abstrahlvermögen haben ihre Maximalwerte erreicht.

Die ebenfalls in das Diagramm eingetragene blaue Kurve gibt die in Deutschland seit dem 1.7.2001 gültigen Grenzwerte der Störfeldstärke einer PLC-Anlage an. Diese Grenzwerte sind in einer am 26.4.2001 in Kraft getretenen Bundesverordnung namens Frequenzbereichs-Zuweisungsplanverordnung (FreqBZPV), die aus dem Frequenzbereichszuweisungsplan und den Nutzungsbestimmungen 1 bis 30 besteht, in der Nutzungsbestimmung Nr. 30 festgelegt [3]. Daher werden sie abgekürzt als NB 30 bezeichnet. Aus dem Vergleich der Kurve, die die externen Feldstärken einer sinnvoll dimensionierten PLC-Anlage angibt, mit den Grenzwerten, die nicht überschritten werden dürfen, wird deutlich, daß Powerline-Anlagen, die die NB 30 einhalten, nur im Bereich unterhalb von 500 kHz technisch machbar sind. Dies ist der Grund, warum sich in der letzten Zeit mehrere Firmen, die PLC-Anlagen im MHz-Bereich in den Markt bringen wollten, von diesem Vorhaben zurückgezogen haben.

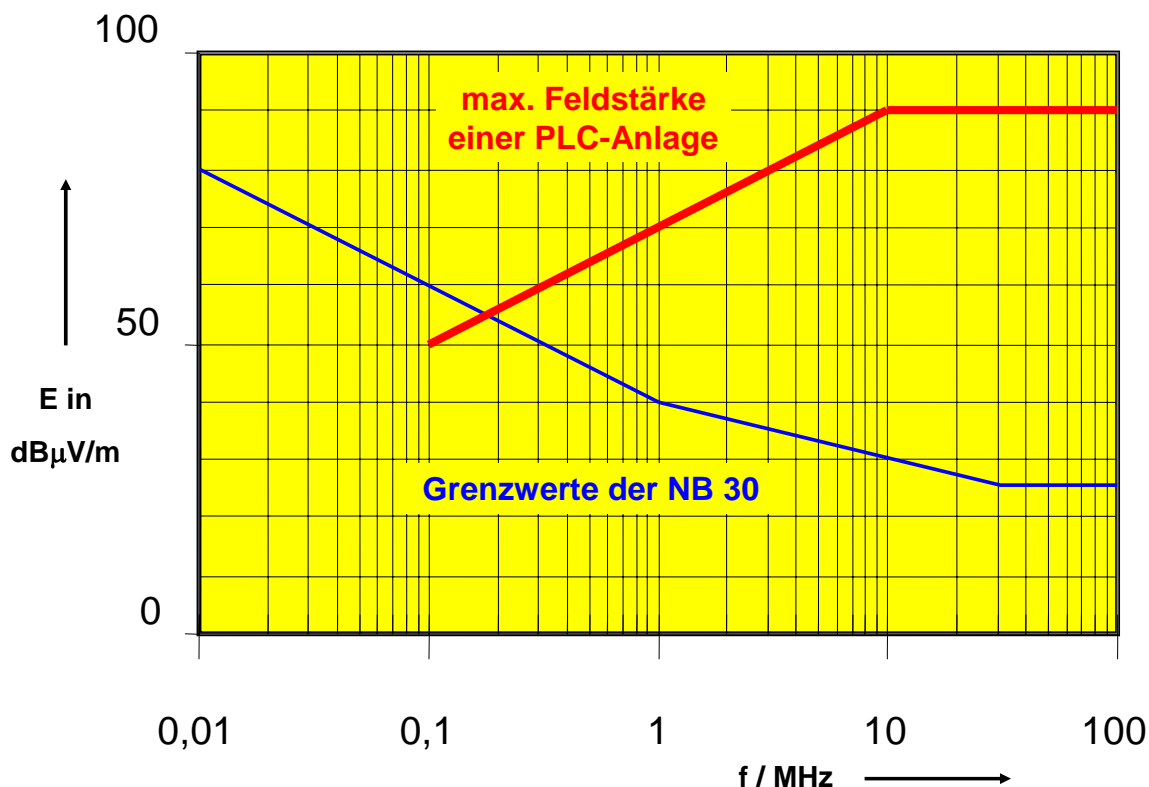


Bild 1: Externe Felder einer sinnvoll dimensionierten PLC-Anlage im Vergleich mit den Grenzwerten der NB 30

Während sich die früheren Aufsätze [1,2], ebenso wie die NB 30, mit den externen Feldern **einer einzelnen** PLC-Anlage befassen, soll in diesem Artikel untersucht werden, welche Summenfeldstärken auftreten, wenn **eine große Anzahl** von Powerline-Anlagen gleichzeitig in Betrieb sind. Die Gegner der Powerline-Technologie sprechen in diesem Zusammenhang von "kumulativen" Effekten der Störemission. Dieser Begriff erscheint in diesem Zusammenhang eher weniger sinnvoll. Kumulative Effekte treten zum Beispiel auf bei einem Kapitalvermögen, das durch Zins und Zinseszins immer mehr anwächst, oder bei der Schädigung von biologischem Gewebe durch ionisierende Strahlen (z.B. Röntgen-Strahlen), wo die Schädigung mit der Häufigkeit bzw. mit der Gesamtdauer der Bestrahlung zunimmt. Im Unterschied dazu handelt es sich bei den hier betrachteten elektromagnetischen Wellen um eine schlichte Überlagerung: Wenn zwei Sender das gleiche Gebiet bestrahlen, überlagern sich dort die Feldanteile beider Sender und wenn beide Sender abgeschaltet werden, sind beide Feldanteile nicht mehr da.

Störszenario

Um im Folgenden zu konkreten numerischen Abschätzungen für die zu erwartende Summenfeldstärke zu kommen, wird entsprechend der derzeitigen Markteinschätzung davon ausgegangen, daß in Deutschland im Endausbau etwa 1 Million PLC-Anlagen installiert sind. Die Nutzung dieser PLC-Anlagen liegt schwerpunktmäßig in der Vernetzung der PCs in einem Privathaushalt (Inhome-LAN) und in der Internetanbindung dieses PC-Netzes über die analoge Telefonleitung bzw. über ISDN oder ADSL. Diese Art der digitalen Datenkommunikation ist dadurch gekennzeichnet, daß Datenpakete begrenzter Länge in unregelmäßigen Abständen zeitlich nacheinander übertragen werden. Da kontinuierliche

Downloads großer Datenmengen eher selten sind, handelt es sich in der Mehrzahl um die impulsartige Übertragung einer limitierten Menge von Datenpaketen, die von langen Zeiten der Inaktivität (Sendepausen) unterbrochen sind. Im Folgenden wird deshalb davon ausgegangen, daß in Spitzenzeiten 50% aller PLC-Anlagen eingeschaltet sind und daß im Mittel 5% dieser Anlagen gleichzeitig Daten übertragen. Wenn man bedenkt, daß ein Datenübertragungszeitraum von 5% beim analogen Telefon mit 56 kBit/s eine übertragene Datenmenge von 900 MByte pro Monat und bei T-DSL mit 768 kBit/s von 12,5 GByte pro Monat für den einzelnen Nutzer bedeutet, sieht man, daß diese Annahmen relativ hoch liegen. Bei einer Million installierter Anlagen sind somit in Spitzenzeiten etwa 25.000 PLC-Sender zur gleichen Zeit eingeschaltet und übertragen Daten. Im Zentrum Deutschlands überlagern sich also in diesen Spitzenzeiten die Feldstärken, die von 25.000 PLC-Anlagen abgestrahlt werden.

Die im Voranstehenden durchgeführte Abschätzung kann sicherlich kontrovers diskutiert werden. Dabei sollte allerdings berücksichtigt werden, daß es im Bereich des Schutzes von Funkdiensten vor Störungen, um den es hier geht, durchaus akzeptiert wird, daß, den Gesetzen der Statistik entsprechend, kurzzeitig auch Störungen mit höherer Amplitude auftreten.

Störsignal

Als Modulationsverfahren für die PLC-Kommunikation hat sich das OFDM-Verfahren (Orthogonal Frequency Division Multiplex) als besonders gut geeignet herausgestellt. Es wird deshalb von der Mehrheit der PLC-Hersteller weltweit eingesetzt. In Bild 2 ist ein Ausschnitt aus einem OFDM-Signal als Funktion der Zeit dargestellt. Das Signal entsteht durch die Überlagerung sehr vieler sinusförmiger Trägerfrequenzen. Dadurch ergibt sich eine Amplitudenverteilung, die statistisch dem eines weißen Rauschens nahe kommt. Diese Signalform ist in Bezug auf den Schutz von Funkdiensten optimal, das heißt sie verursacht trotz Dateninhalt äußerst geringe Störungen.

In das Diagramm ist eingetragen, wo die Meßwerte liegen, die sich bei der Messung dieses Signals mit unterschiedlichen Detektoren ergeben. Im Bereich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) werden hauptsächlich drei Detektoren eingesetzt, um Störsignale zu messen: Der Mittelwertdetektor, der Quasipeak-Detektor und der Spitzenwertdetektor. Rauschsignale mißt man mit einem Mittelwertdetektor (Average-Detektor). Der sich damit ergebende Meßwert (hier 0,13 V) besagt, daß eine Gleichspannung von 0,13 V die gleiche Erwärmung eines Widerstands erzeugt, wie das dargestellte OFDM-Signal. Da in der Vergangenheit die meisten Störsignale zum Beispiel amplitudenmoduliert oder pulsmuliert waren, und diese Signalformen eine größere subjektive Störwirkung beim Hörer eines Funkdienstes erzeugen als ein Rauschsignal, wurde zur Messung dieser Signale der Quasipeak-Detektor eingeführt (Spannungswert im Diagramm 0,2 V). Folgerichtig wird im Bereich der EMV-Gesetzgebung generell bei den Störfeldstärke-Grenzwerten der Quasipeak-Detektor zur angemessenen Bewertung der möglichen Störwirkung vorgeschrieben. Abweichend davon beziehen sich die Grenzwerte in der NB 30 auf die Bewertung mit dem Peak-Detektor (Spitzenwert-Detektor). Beim dargestellten OFDM-Signal ergibt sich dabei im Diagramm ein Wert von 0,7 V. Bei der Messung mit dem Peak-Detektor wird jedoch $0,7 \text{ V} / \sqrt{2} = 0,5 \text{ V}$ angezeigt. Dies liegt daran, daß die drei Detektoren (Peak, Quasipeak und Average) so kalibriert sind, daß alle drei bei einem Sinussignal den gleichen Meßwert anzeigen, nämlich den Effektivwert der Sinusschwingung, also $\text{Amplitude} / \sqrt{2}$.

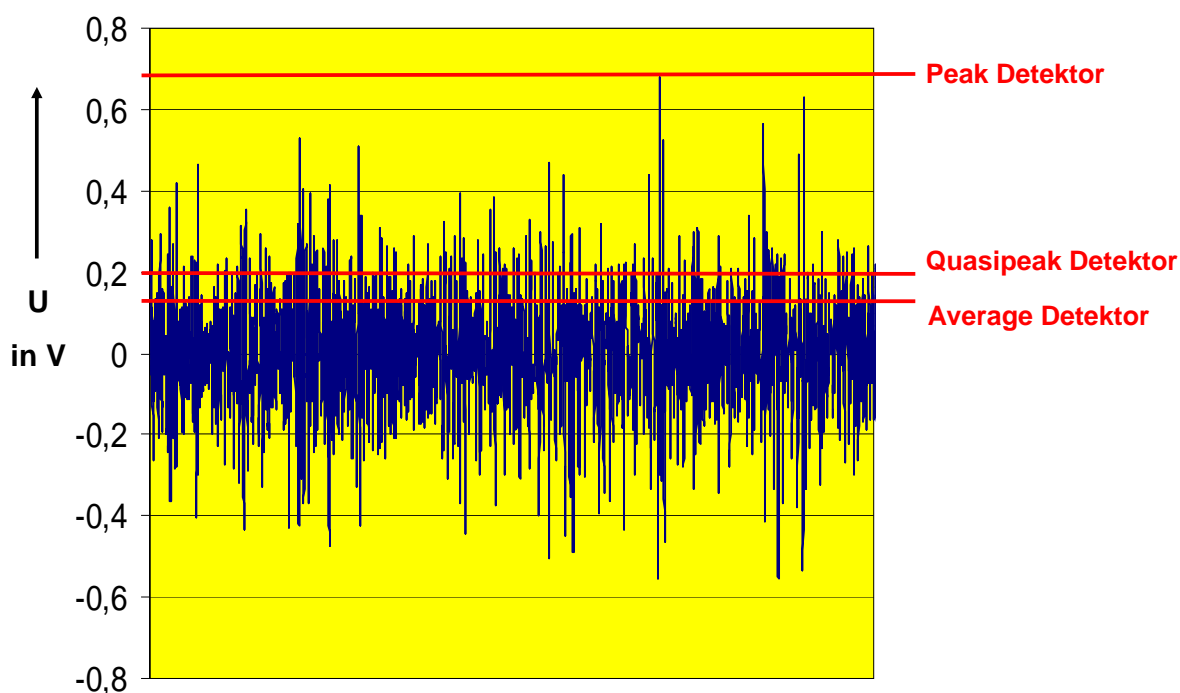


Bild 2: OFDM Signal als Funktion der Zeit

Im logarithmischen Maß ausgedrückt liegt bei einem OFDM-Signal der Quasipeak-Wert etwa 8 dB unter dem Peak-Wert und der Average-Wert etwa weitere 4 dB darunter. Im Unterschied zu einem echten stochastischen Signal wie dem weißen Rauschen, sind bei einem OFDM-Signal die sich überlagernden Sinusschwingungen miteinander synchronisiert. Deshalb liegt bei echtem weißem Rauschen der Quasipeak-Wert etwa 7 dB unter dem Peak-Wert und der Average-Wert etwa weitere 7 dB darunter.

Abstrahlverhalten einer einzelnen Inhome-PLC-Anlage

Betrachtet man zum Beispiel ein Einfamilienhaus unter dem Gesichtspunkt der Abstrahlung elektromagnetischer Wellen von einer installierten PLC-Anlage, so verbleibt in erster Näherung eine dreidimensionale sternförmige Anordnung von Kupferleitungen mit rechtwinkligen Knicken an den unterschiedlichsten Stellen. Sie sind in den Randflächen und innerhalb eines Quaders mit einer Kantenlänge von ca. 10 m angeordnet. Im betrachteten Frequenzbereich erzeugen Putz, Mauerwerk, Holzschränke, Stoffe, Papier und Teppichböden keine nennenswerte Dämpfung und können deshalb weggelassen werden. Alle Metallteile dagegen, wie zum Beispiel Wasserleitungen, Heizungsrohre, Heizkörper, TV-Kabel, Blechschränke, Elektrogroßgeräte, Alu-Fensterrahmen, Alu-Isolierfolie und die Bewehrung der Stahlbetonböden beeinflussen die Abstrahlung erheblich. Bei den hier betrachteten Wellenlängen zwischen 6000 m (50 kHz) und 10 m (30MHz) ergibt sich dadurch jedoch keine nennenswerte Dämpfung der abgestrahlten Welle: Die Metallteile befinden sich im Nahfeld der Antennenstruktur, sie sind elektromagnetisch gekoppelt und schwingen mit. Auf allen Metalloberflächen fließen HF-Ströme, die wiederum Felder abstrahlen.

Die größte Abstrahlung stammt von den Stellen dieser komplexen dreidimensionalen Antennenstruktur, die den größten HF-Strom führen. Dies sind primär die Leitungsstücke, die von der Steckdose, an der das gerade sendende PLC-Modem eingesteckt ist, nach beiden Seiten abgehen. Mit zunehmender Entfernung von der Speisestelle wird der HF-Strom grundsätzlich kleiner werden. Auch die strahlungsgekoppelten Metallstrukturen werden in der Regel keine größeren Ströme führen als ihre primäre Quelle. Zu beachten ist, daß hier die HF-Ströme als Quelle des abgestrahlten Fernfeldes betrachtet werden. Wie in [1] erläutert, existiert zusätzlich noch im Nahfeld der Antenne das an die Leiter gebundene Feld der geführten Welle. Dieses klingt mit zunehmender Entfernung jedoch sehr schnell ab und kann im Fernfeld generell vernachlässigt werden. Feldstärkemessungen in 3 m Entfernung von den stromführenden Teilen der Antenne, wie sie die NB 30 vorschreibt, geben also keinerlei Aufschluß über das Fernfeld der Anlage.

Die Abstrahlung von einem geraden, stromführenden Draht ist jeweils Null in Richtung des Drahtes und hat ein Maximum in der dazu senkrechten Schnittebene, mit Kreischarakteristik (nach allen Seiten gleich groß). Die Abstrahlcharakteristik einer Inhome-PLC-Anlage kann man berechnen, indem man sie approximiert durch eine Vielzahl von geraden Stäben mit jeweils konstantem Strom. Im Fernfeld werden dann in jedem Punkt die Feldanteile aller dieser Elementarantennen nach Betrag und Phase addiert. Für das Abschätzen der Abstrahlcharakteristik einer komplexen Struktur kann man daraus ableiten: Schaut man auf eine Drahtantenne und sieht man in der flächigen Projektion Metallteile, die HF-Ströme führen, so wird in dieser Richtung HF-Energie abgestrahlt. Damit ist klar, daß eine Inhome-PLC-Anlage grundsätzlich nach allen Seiten abstrahlt. Abhängig vom Ort des PLC-Senders und von der Belastung des Netzes werden sich die abgestrahlten Amplituden in den jeweiligen Raumrichtungen verändern. Mit zunehmender Frequenz (genauer: wenn die Ausdehnung der strahlenden Struktur größer als eine halbe Wellenlänge ist) entstehen immer mehr Nullstellen im Strahlungsdiagramm, weil im Fernfeld zueinander gegenphasige Feldanteile auftreten, die sich gegenseitig auslöschen. Die Einhüllende der Maxima der Abstrahlcharakteristik wird sich dadurch jedoch nicht verändern.

Abstrahlverhalten einer Vielzahl von Inhome-PLC-Anlagen

Gerade weil das Abstrahlverhalten jeder einzelnen PLC-Anlage anders ist, läßt sich das Zusammenwirken einer großen Zahl von PLC-Anlagen sehr genau abschätzen: Je mehr Anlagen betrachtet werden, desto genauer entspricht das Summendiagramm einem isotropen Strahler, der in alle Raumrichtungen des oberen Halbraums (oberhalb des Erdbodens), die gleiche Strahlungsdichte abstrahlt. Die Unterschiede in der Strahlungsintensität in den einzelnen Raumrichtungen, die die Einzelanlage aufweist, mitteln sich bei der Überlagerung vieler solcher Anlagen heraus, da alle Anlagen voneinander verschieden sind. Dabei ist allerdings zu beachten, daß der sich ergebende Mittelwert nicht aus der Überlagerung der Maximalintensität aller Anlagen entsteht. Betrachtet man eine einzelne Anlage, so wird es mit großer Wahrscheinlichkeit immer mindestens eine Raumrichtung geben, in der für eine bestimmte Position des PLC-Senders eine besonders große Feldstärkeamplitude abgestrahlt wird. Aus diesem Grund wurde in den ersten beiden Teilen dieser Serie davon ausgegangen, daß eine PLC-Anlage genauso gut abstrahlt wie eine gerade Stabantenne mit 10 m Länge. Dies führt zu relativ hohen Feldstärkewerten, die Aufgabenstellung war aber auch, eine Abschätzung für die zu erwartenden Maximalwerte der Störstrahlung zu finden.

Bei der Überlagerung der Abstrahlung von einer großen Zahl von PLC-Anlagen ist jedoch nun zu berücksichtigen, daß die Hauptstrahlrichtung bei jeder Anlage eine andere ist. In einem gegebenen Punkt wird man ebensooft im Strahlungsminimum (der Nullstelle) einer Einzelanlage sein, wie im Strahlungsmaximum einer anderen. Insofern ist bei der Überlagerung aller Einzelanteile eine Mittelwertbildung über das Strahlungsdiagramm durchzuführen. Für die folgenden Abschätzungen wird dafür ein Antennengewinn durch Mittelwertbildung von $G_M = -10$ dB angesetzt (die mittlere Strahlungsintensität beträgt 1/10 der Maximalintensität). Aus vielen unveröffentlichten Meßergebnissen zu diesem international viel diskutierten Thema ist bekannt, daß dieses eine sehr konservative Abschätzung ist. So ergibt sich z.B. bereits für eine gerade Stabantenne (Dipol), die für die Abstrahlung von Wellen optimiert wurde, ein Wert von $G_M = -2,1$ dB. Andere Autoren benutzen für die Abstrahlung von PLC-Anlagen Werte für G_M zwischen -20 dB und -60 dB.

Summensignal einer Vielzahl von Inhome-PLC-Anlagen

Bild 3 zeigt die Überlagerung zweier gleich großer Sinusschwingungen mit unterschiedlicher Frequenz. Das Resultat wird als Schwebung bezeichnet und weist periodisch Maximalamplituden auf, die doppelt so groß sind wie die der Einzelschwingungen. Die Überlagerung von n gleich großen Sinusschwingungen ergibt somit periodische Maxima von n -mal der Einzelamplitude. Im logarithmischen Maß ergeben dann 10 kohärente (bezüglich ihrer Phasenlage miteinander synchronisierte) Strahlungsquellen periodische Feldstärkemaxima, die um 20 dB ($20 \log n$) größer sind als die Feldstärke einer einzelnen Strahlungsquelle.

Im Fall einer großen Zahl von Inhome-PLC-Anlagen mit OFDM-Modulation sind die zu überlagernden Strahlungsquellen jedoch weder sinusförmig noch kohärent. Daraus folgt, daß nicht die Feldstärkeamplituden der Einzelstrahler addiert werden dürfen, sondern deren Leistungen, bzw. deren Strahlungsdichten. Diese sind proportional zum Quadrat der Feldstärke. Im logarithmischen Maß ergibt dann die Überlagerung von 10 gleichstarken, nicht-kohärenten Strahlungsquellen eine Summenfeldstärke, die um 10 dB ($10 \log n$) größer ist als die einer einzelnen Strahlungsquelle. Diese Art der Überlagerung läßt sich zum Beispiel durch 10 Glühbirnen von jeweils 100 W veranschaulichen, die entlang des Umfangs eines Kreises angeordnet sind. Im Mittelpunkt dieses Kreises ist die Lichtintensität dann proportional zur Anzahl der jeweils eingeschalteten Glühbirnen.

In beiden beschriebenen Fällen, bei der Überlagerung von kohärenten und von nicht kohärenten Schwingungen, ist die zugrundeliegende Physik die gleiche: die einzelnen Schwingungen addieren sich und können sich dabei wechselseitig auslöschen oder in der Summe vervielfachen. Der Unterschied liegt in der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von ganz kleinen und ganz großen Summenamplituden. Bei kohärenten Schwingungen treten die Maximalwerte in periodischen Zeitabständen regelmäßig immer wieder auf. Bei stochastischen, nicht kohärenten Schwingungen wird die Wahrscheinlichkeit, daß eine große Zahl der Schwingungen sich konstruktiv überlagert, mit steigender Zahl der Schwingungen immer kleiner. Letztlich ist dies ja der Grund für die in Bild 2 gezeigte Amplitudenverteilung: Das Maximum entsteht dadurch, daß sich dort zufällig besonders viele Einzelschwingungen gleichphasig d.h. konstruktiv überlagern. Verglichen mit thermischem Rauschen bedeutet dies: Die große Zahl der sich in einem Leitermaterial willkürlich bewegenden Elektronen ergibt in der Überlagerung eine echt stochastische (willkürliche) Amplitudenverteilung. Je größer die Summenamplitude, desto mehr Elektronen haben sich in diesem Moment in die gleiche Richtung bewegt.

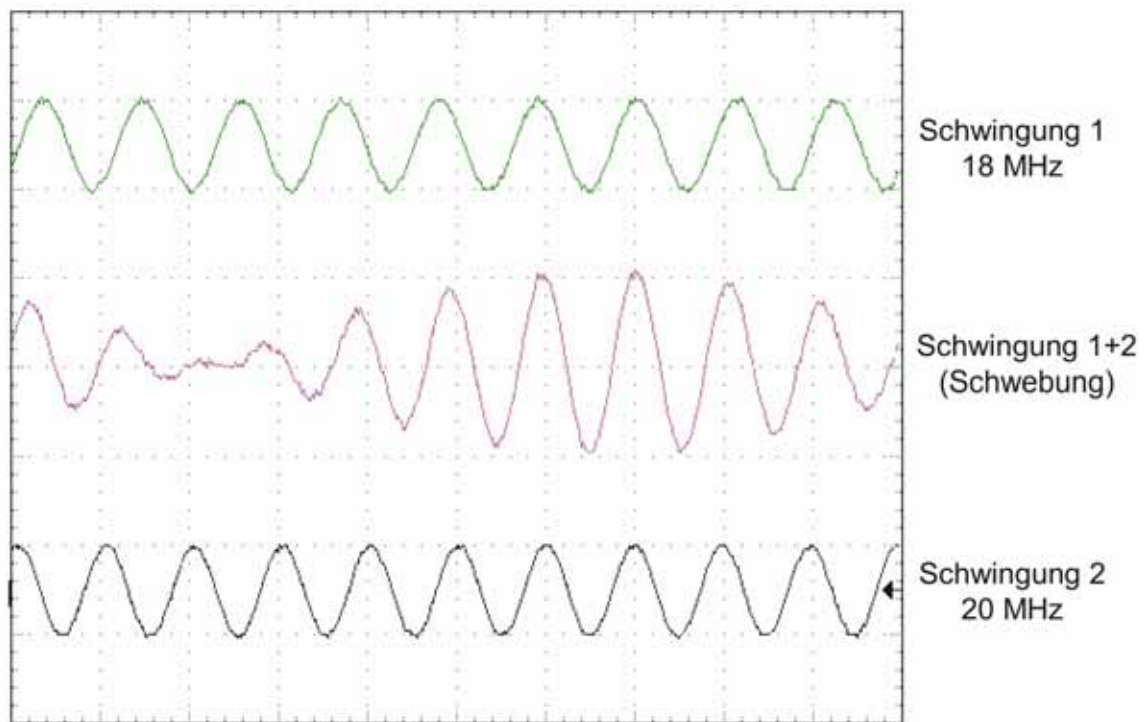


Bild 3: Überlagerung zweier Sinusschwingungen mit unterschiedlicher Frequenz zu einer Schwebung mit doppelter Amplitude

Summenfeldstärke der Bodenwelle

Derjenige Anteil einer abgestrahlten Welle, der sich parallel zur Erdoberfläche ausbreitet, wird als Bodenwelle bezeichnet. Im hier betrachteten Frequenzbereich ist der Erdboden (in Europa) ziemlich gut leitend. In einer ersten, groben Näherung kann er sogar als metallisch leitend angenommen werden. Bei einer genaueren Betrachtung liegt die Leitfähigkeit für das europäische Festland nach [4] zwischen den Extremwerten 1 = Wüste und 10 = Meerwasser bei der Stufe 7 mit der spezifischen Leitfähigkeit $\sigma = 0,01 \text{ S/m}$ und der Dielektrizitätszahl $\epsilon_r = 30$.

Eine vertikale Stabantenne erzeugt im Fernfeld ein vertikal polarisiertes Feld, das heißt die dazugehörige elektrische Feldstärke steht senkrecht auf der Erdoberfläche. Dieser Wellentyp wird durch die Erdoberfläche gar nicht oder nur wenig beeinflusst. Die Energiedichte nimmt mit zunehmender Entfernung r von der Antenne mit $1/r^2$ ab. Eine horizontale Stabantenne dagegen erzeugt im Fernfeld ein horizontal polarisiertes Feld, das heißt die dazugehörige elektrische Feldstärke verläuft parallel zur Erdoberfläche. Aufgrund der Leitfähigkeit des Erdbodens werden diese elektrischen Felder an der Erdoberfläche kurzgeschlossen. Dieser Wellentyp kann sich also nicht als Bodenwelle ausbreiten. Selbst bei weniger guter Bodenleitfähigkeit ist dieser Wellentyp nach kurzer Entfernung so stark gedämpft, daß er nicht mehr nachgewiesen werden kann.

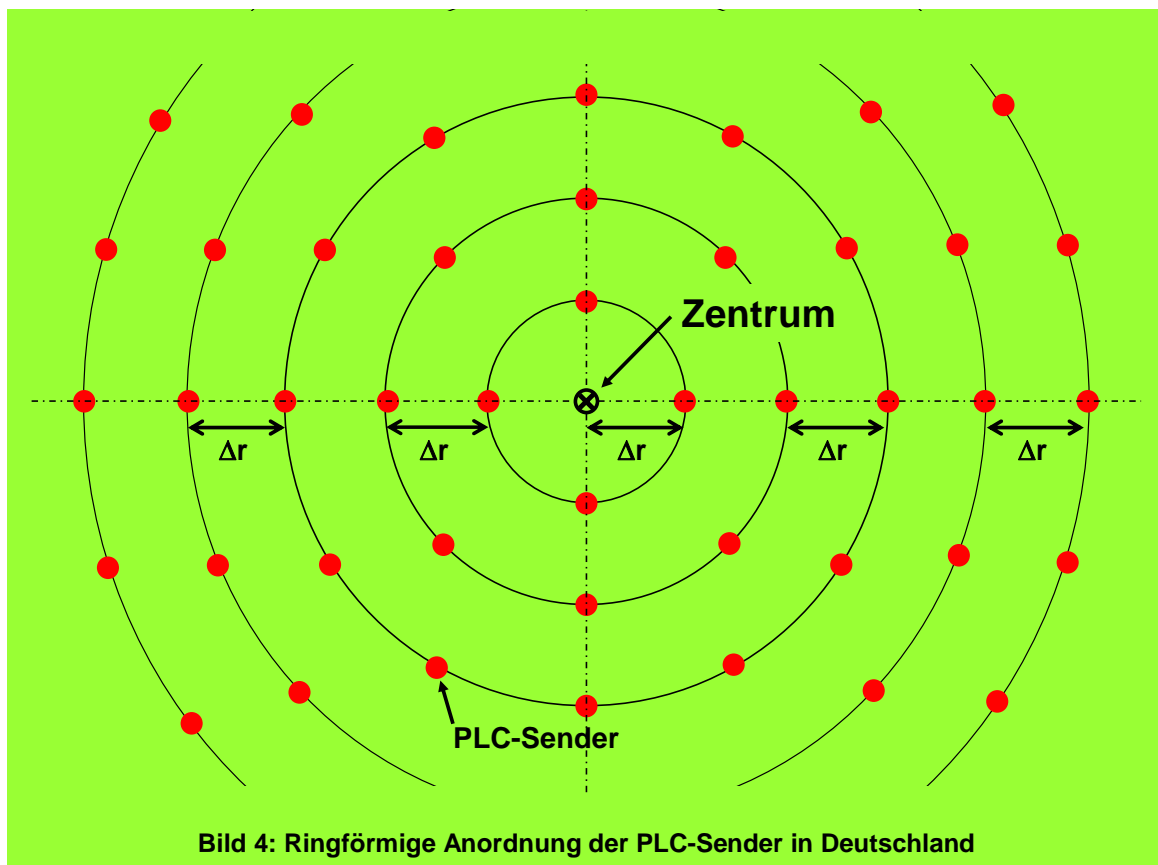
Alle Wellen, die von schräg im Raum liegenden Antennen abgestrahlt werden, kann man im Fernfeld zerlegen in einen horizontal und einen vertikal polarisierten Anteil. Der horizontal

polarisierte Anteil wird der jeweiligen Bodenwelle entzogen. Da bei einer großen Zahl von beliebig orientierten Strahlungsquellen jeweils die Hälfte der abgestrahlten Leistung horizontal und die andere Hälfte vertikal polarisiert ist, geht der Bodenwelle die von PLC-Anlagen erzeugt wird, somit die Hälfte der abgestrahlten Leistung verloren. Dieser Effekt bewirkt eine Dämpfung der Fernfelder um $a_{\text{Pol}} = -3$ dB.

Die größte Summenfeldstärke der Bodenwelle stellt sich im Zentrum eines Gebiets ein, in dem PLC-Sender aktiv sind. Bei einer Grundfläche von 357.000 km^2 wird Deutschland approximiert durch einen flächengleichen Kreis mit dem Radius $r_D = 337$ km. Nimmt man weiterhin vereinfachend an, daß die eingangs abgeleiteten 25.000 PLC-Anlagen, die gleichzeitig senden, gleichmäßig auf N konzentrischen Ringen verteilt sind (Bild 4), so ergibt sich die Gesamtzahl M der PLC-Sender zu:

$$M = 4 \sum_{n=1}^N n = 2 N^2. \quad (1)$$

Daraus läßt sich berechnen, daß $N = 112$ Ringe gebraucht werden, um $M = 25.000$ PLC-Sender in dieser Art zu verteilen. Mit r_D/N ergibt sich damit ein minimaler Abstand von $\Delta r = 3,01$ km zwischen zwei benachbarten Anlagen. In Bild 4 ist das Zentrum dieser Anordnung skizziert. Im Zentrum befindet sich kein PLC-Sender. An dieser Stelle soll die sich einstellende Summenfeldstärke $E_{\Sigma N}(r)$ berechnet werden. Im Abstand Δr befinden sich die vier am dichtesten benachbarten PLC-Sender. Im Abstand $r = 2 \cdot \Delta r$ befinden sich die nächsten $2 \cdot 4 = 8$ PLC-Sender, im Abstand $r = 3 \cdot \Delta r$ die nächsten $3 \cdot 4 = 12$ usw. Für das Zentrum gilt also der Zusammenhang, daß die Anzahl der gleichzeitig sendenden PLC-Anlagen proportional zum Abstand r zunimmt. Auf einem Ring im Abstand $r = n \cdot \Delta r$ befinden sich $n \cdot 4$ PLC-Sender.



Wenn man, wie im Bereich der EMV üblich, unter E den Effektivwert der Feldstärke versteht, dann ist die Strahlungsdichte eines Senders in der Entfernung r:

$$S(r) = E(r)^2 / Z_0. \quad (2)$$

Da die NB 30 die maximal zulässige elektrische Feldstärke E_0 in $r_0 = 3$ m Entfernung festlegt, ist die Feldstärke einer NB-30-konformen PLC-Anlage in der Entfernung r

$$E(r) = E_0 r_0 / r. \quad (3)$$

Dort beträgt die Energiedichte bzw. die Strahlungsdichte

$$S(r) = (E_0 r_0 / r)^2 / Z_0. \quad (4)$$

Die ersten 4 PLC-Anlagen liefern im Zentrum einen Beitrag von

$$S_1(r) = 4 S(r) = 4 (E_0 r_0 / \Delta r)^2 / Z_0 \quad (5)$$

und der n-te Ring mit 4n Sendern in der Entfernung $n \cdot \Delta r$ liefert einen Beitrag von

$$S_n(r) = 4n \{E_0 r_0 / (n \Delta r)\}^2 / Z_0 = S_1(r) / n. \quad (6)$$

Alle Strahlungsdichten sind entsprechend den vorhergehend abgeleiteten Ergebnissen noch um $G_M = -10$ dB und um $a_{pol} = -3$ dB zu dämpfen. Dies ist im linearen Maßstab der Faktor 1/20. Damit ergibt sich

$$S_n(r) = S_1(r) / (20n). \quad (7)$$

Zur Berechnung der Summenenergiedichte $S_{\Sigma N}(r)$ werden alle Anteile $S_n(r)$ addiert. Die Gesamtheit aller N-Ringe ergibt dann:

$$S_{\Sigma N}(r) = \frac{S_1(r)}{20} \sum_{n=1}^N \frac{1}{n}. \quad (8)$$

Mit Gl. (2) ergibt sich aus Gl. (5) und (8) die Summenfeldstärke $E_{\Sigma N}(r)$ zu:

$$E_{\Sigma N}(r) = \sqrt{S_{\Sigma N}(r) Z_0} = \frac{2E_0 r_0}{\Delta r} \sqrt{\frac{1}{20} \sum_{n=1}^N \frac{1}{n}}. \quad (9)$$

Im logarithmischen Maß wird damit die Dämpfung $a_{\Sigma N}(r)$ der Summenfeldstärke $E_{\Sigma N}(r)$ im Zentrum Deutschlands bezogen auf den Feldstärkegrenzwert E_0 der NB 30 zu:

$$a_{\Sigma N}(r) = 20 \log (E_{\Sigma N}(r) / E_0) = 6 \text{ dB} + a(r) + a(N) + G_M + a_{pol}, \quad (10)$$

mit einem ersten Anteil von +6 dB, der dadurch hervorgerufen wird, daß im ersten Ring 4 Sender sind $\{20 \log(2)\}$. Danach kommt der Dämpfungsanteil $a(r)$, der durch die Entfernung Δr hervorgerufen wird,

$$a(r) = 20 \log (r_0 / \Delta r) \quad (11)$$

und dann der Dämpfungsanteil $a(N)$, der durch die Überlagerung der Felder der insgesamt N Ringe hervorgerufen wird,

$$a(N) = 20 \log \sqrt{\sum_{n=1}^N \frac{1}{n}} = 10 \log \sum_{n=1}^N 1/n \quad (12)$$

Im hier betrachteten Beispiel eines Kreises mit $r = 337$ km und $N = 112$ hat die Reihe $\sum 1/n$ den Summenwert 5,3. Für die eingangs getroffenen Annahmen wird $a_{\Sigma N}(r)$ zu -60 dB. Die Summenfeldstärke im Zentrum Deutschlands ist damit um 60 dB bzw. um den Faktor 1/1000 kleiner als der Grenzwert der NB 30 (bzw. kleiner als die Feldstärke, die eine einzelne Anlage in 3 m Entfernung erzeugt). In der folgenden Tabelle 1 sind die Werte der einzelnen Terme dieser Formel und ihre Summe noch einmal getrennt aufgeführt.

$a_{\Sigma N}(r)$	6 dB	$a(r)$	$a(N)$	G_M	a_{pol}
-59,8 dB	6 dB	-60 dB	7,24 dB	-10 dB	-3 dB

Tabelle 1: Dämpfungsanteile bei 25.000 PLC-Sendern

In diesem Beitrag wird folgende Bezeichnungsweise benutzt: Ist der Wert des Ausdrucks $a = 20 \log (E_1 / E_0)$ negativ, dann wird der **Betrag** des Wertes Dämpfung genannt. Eine große Dämpfung bedeutet, daß E_1 sehr viel kleiner ist als E_0 . Ist a positiv, so wird es Gewinn genannt. Ein negativer Gewinn, wie im Fall von G_M , ist ebenfalls eine Dämpfung. Nur wird in diesem Fall weiterhin der Begriff Gewinn benutzt, da Antennengewinn ein feststehender Ausdruck ist. Die Vergrößerung oder Verkleinerung der Feldstärke wird hier durch das Vorzeichen festgelegt. In den Tabellen sind die Dämpfungsanteile vorzeichenrichtig und nicht als Beträge angegeben.

Man sieht, daß der größte Dämpfungsanteil $a(r)$ durch die Entfernung von in diesem Fall 3 km zwischen dem Meßort und dem ersten PLC-Sender entsteht. Daß noch weitere 24.999 PLC-Sender vorhanden sind, ergibt eine Erhöhung um insgesamt 13 dB (um 6 dB wegen der nächsten 3 im gleichen Abstand und um 7,24 dB wegen der weiteren 24.996 in den daran anschließenden Ringen). Diese Erhöhung wird durch die Mittelwertbildung über die Strahlungsdiagramme und den Verlust der horizontalen Polarisation wieder rückgängig gemacht.

Höhere PLC-Senderdichte

Mit der abgeleiteten Gleichung (10) für die Summenfeldstärke können nun beliebige Szenarien berechnet werden. Hier seien nur noch die Ergebnisse für die 5-fache PLC-Senderdichte angeführt. 125.000 gleichzeitig aktive PLC-Sender bedeutet, daß jeder der eingeschalteten 500.000 Nutzer im Mittel eine Datenmenge von 4,5 GByte/Monat bei einem analogen Telefonanschluß und 62,3 GByte/Monat bei einem ADSL-Anschluß lädt. Mit dem sich dann einstellenden Abstand der Kreisringe von $\Delta r = 1,35$ km und ihrer Gesamtzahl $N = 250$ ergeben sich die Werte in Tabelle 2:

$a_{\Sigma N}(r)$	6 dB	$a(r)$	$a(N)$	G_M	a_{pol}
-52 dB	6 dB	-53 dB	7,85 dB	-10 dB	-3 dB

Tabelle 2: Dämpfungsanteile bei 125.000 PLC-Sendern

Eine Verschlechterung der Möglichkeiten des Funkempfangs durch das Zusammenwirken der Störsignale von sehr vielen PLC-Anlagen kann auch hier nicht festgestellt werden. Ein Störsignal, das 52 dB unter den Grenzwerten der NB 30 liegt, liegt damit mehrere Größenordnungen unter dem allgegenwärtigen Störpegel in bewohnten Gebieten. Bild 5 zeigt einige solcher Kurvenverläufe: Die obere Kurve gibt den Maximalwert des atmosphärischen Rauschens an [5, 6, 7]. Diese Feldstärkewerte werden nur in 0,5 % der Zeit überschritten. Das atmosphärische Rauschen entsteht primär durch die weltweit bis zu 100 Blitzschläge pro Sekunde. Die beiden darunterliegenden Geraden geben international anerkannte Mittelwerte für "man-made radio-noise" in städtischen Gebieten und für ländliche Gebiete an [6, 7, 8]. Die Kurven beruhen auf ausgiebigen Messungen. Da diese Messungen aber zwischen 1966 und 1971 durchgeführt wurden, entsprechen sie nicht mehr der heutigen Realität. Diese Rauschstörungen, die üblicherweise als Mittelwerte (Effektivwerte) angegeben werden, sind hier, um mit den ebenfalls eingetragenen Grenzwerten der NB 30 vergleichbar zu sein, auf den Spitzenwert und auf 9 kHz Meßbandbreite umgerechnet worden. Für die Bandbreitenumrechnung von Rauschsignalen gilt:

$$E \text{ in dB}\mu\text{V/m in Bandbreite } B = E \text{ in dB}\mu\text{V/m in Bandbr. } B_0 + 10 \log (B / B_0). \quad (13)$$

Da die NB 30 unterhalb von 150 kHz eine Meßbandbreite von 200 Hz festlegt, bedeutet dies für die Darstellung in Bild 5 einen Sprung von 16,5 dB bei dieser Frequenz. Für die Umrechnung eines Rauschsignals von Peak auf Average gilt, wie weiter oben bereits angegeben:

$$E \text{ in dB}\mu\text{/m (Peak)} = E \text{ in dB}\mu\text{/m (Average)} + 14 \text{ dB}. \quad (14)$$

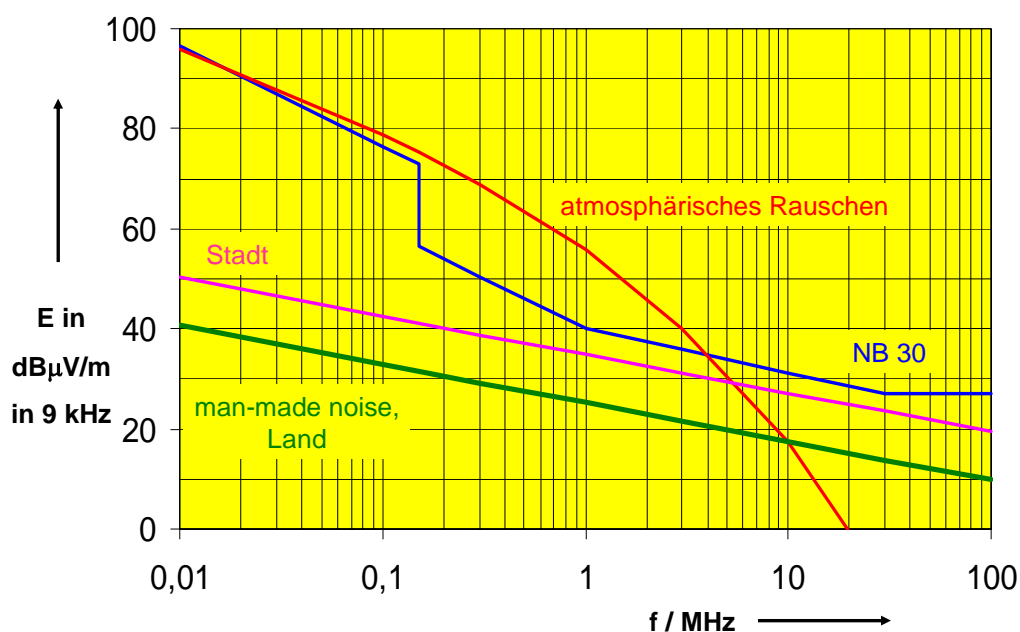


Bild 5: Vergleich der NB-30-Grenzwerte mit verschiedenen, umweltbedingten Störfeldstärken (Spitzenwerte in 9 kHz Meßbandbreite)

In Wirklichkeit beträgt der Anstieg der umweltbedingten Störgrößen mehr als 14 dB, wenn man sie mit einem Peak-Detektor mißt. Das atmosphärische Rauschen und das Man-made-Geräusch haben eine grundsätzlich andere Amplitudenverteilung als weißes Rauschen. Hier treten sehr häufig sehr große Störampplituden auf. Spitzenwerte, die bis zu 40 dB über dem Mittelwert liegen, sind durchaus normal. Aus Bild 5 wird außerdem ersichtlich und die bisherigen Erfahrungen in der Anwendung der NB 30 haben dies bestätigt, daß in städtischen Gebieten die Kontrolle der NB-30-Grenzwerte nicht möglich ist, da die Umgebungsstörungen im Freien deutlich darüber liegen.

Sonderfall: Ballungszentren

Die Annahme einer Gleichverteilung aller PLC-Anlagen auf der Grundfläche Deutschlands stellt eine Näherung dar, die in der Realität nicht zutrifft. Stattdessen wird die PLC-Dichte in Ballungszentren wie z.B. dem Ruhrgebiet und in Großstädten wie Berlin und München wesentlich höher sein als in weniger dicht besiedelten Gebieten. Dabei ist aber Folgendes zu berücksichtigen: In der obigen Abschätzung ist von ungestörter Ausbreitung der Bodenwelle entlang einer ebenen Erdoberfläche ohne Bebauung und ohne Wälder ausgegangen worden. In Gebieten mit Großstadtbebauung kann diese Annahme nicht mehr aufrecht erhalten werden. Die Bodenwelle muß entlang ihrer Ausbreitungsrichtung durch sehr viele andere Häuser hindurch. Während für die Abschätzung der externen Felder einer einzelnen sendenden PLC-Anlage die Dämpfung durch Mauerwerk etc. vernachlässigt wurde, was natürlich zu etwas zu großen Feldstärken führt, ist diese Vernachlässigung beim Durchtritt einer Welle durch benachbarte Gebäude nicht mehr zulässig. Zunehmend mit der Frequenz tritt im Mittel eine Gebäudedämpfung von etwa 3 dB pro Gebäude bei 50 kHz bis herauf zu 8 dB und mehr pro Gebäude im MHz-Bereich auf. Daraus ergibt sich für einen mittleren Gebäudeabstand von 30 m eine Zusatzdämpfung durch urbane Bebauung von 100 dB/km bei 50 kHz und von 267 dB/km bei 30 MHz. In Städten wird die Bodenwelle dadurch so stark gedämpft, daß die auftretenden Summenfeldstärken weit unter den Rechenergebnissen des voranstehenden Abschnitts liegen. Die angegebenen Schätzwerte gelten für zwei- bis dreistöckige Wohnhäuser. Großstadtbebauung mit hohen Häusern und engen Straßenschluchten bewirkt ein Vielfaches dieser Dämpfungswerte. Insofern verursachen Ballungszentren nicht eine verstärkte Störstrahlung in ihrem Fernfeld sondern sie wirken eher wie Absorber für elektromagnetische Wellen. Nur ihre Ränder erzeugen eine in die Umgebung abgestrahlte Feldstärke.

PLC-Anlagen außerhalb Deutschlands

Die oben berechneten Abschätzungen für die Überlagerung der Störwirkungen von sehr vielen PLC-Anlagen sind davon ausgegangen, daß die Gesamtheit der gleichzeitig sendenden PLC-Anlagen auf eine Fläche beschränkt ist, die der Grundfläche Deutschlands äquivalent ist. Diese Vereinfachung erscheint bei näherer Betrachtung unzulässig, da in Dänemark, Holland, Polen, Belgien etc. selbstverständlich auch Inhome-PLC-LANs vorhanden sein werden.

Die in Gl. (8) und (12) auftretende Summe über $1/n$ heißt harmonische Reihe. Dies ist eine divergente Reihe, das heißt die Summe der Reihenglieder geht für N gegen unendlich ebenfalls gegen unendlich. Wäre die Erde eine dicht bewohnte flache Scheibe mit unendlich großem Radius, dann würden sich die Störfelder aller PLC-Anlagen in dem betrachteten, vereinfachten Ausbreitungsmodell zu unendlich großen Summenstörfeldstärken überlagern. Zum Glück ist die Erde kugelförmig mit einem Radius von etwa 7.800 km. Dies hat zur

Folge, daß sich die Bodenwelle, deren Ausbreitungsrichtung grundsätzlich geradlinig ist, nach einer kurzen Wegstrecke von der gekrümmten Erdoberfläche ablöst und im Weltraum verschwindet. Ein Lichtstrahl, der im Zentrum des betrachteten Kreisgebiets tangential zur Erdoberfläche verläuft, hat nach 337 km bereits einen Abstand von 7,3 km zur Erdoberfläche. Bei den hier betrachteten Frequenzen ist die Bindung der Bodenwelle an die Erdoberfläche umso stärker, je höher die Leitfähigkeit des Bodens und je niedriger die Frequenz ist. Die entlang der Erdoberfläche messbare Dämpfung der Feldstärken der Bodenwelle nimmt deshalb nach einer gewissen Entfernung vom Sender nicht mehr mit $1/r$ sondern zunehmend stärker ab. Aufgrund von Beugungseffekten ist das Erreichen der $1/r$ -Grenze frequenzabhängig. Nach [9] beginnt diese Änderung des Ausbreitungsgesetzes in Mitteleuropa bei 500 kHz ab etwa 50 km Entfernung vom Sender und bei 10 MHz schon weit unterhalb von 1 km. Unter Berücksichtigung dieser Ausbreitungseffekte müssen die Terme $a(N)$ und $a(r)$ noch einmal korrigiert werden. Zunächst bedeutet dieses Ablösen der Bodenwelle von der Erdoberfläche jedoch, daß durch Störstrahlungen von Quellen außerhalb Deutschlands keine Erhöhung des Störpegels im Zentrum möglich ist. Da in der vereinfachten Annahme für Deutschland jedoch von einem Kreis mit dem Radius 337 km ausgegangen wurde, muß auch diese Schätzung noch einmal nach unten korrigiert werden.

Im Anschluß an den Ausbreitungsbereich mit $1/r$ kann man die Wellenausbreitung in größeren Entfernungen vom Sender mathematisch mit $1/r^{3/2}$ beschreiben. Danach folgt dann eine Zone mit $1/r^2$. Geht man einmal durchgängig von einer Entfernungsabhängigkeit mit $1/r^{3/2}$ aus, was bei 10 MHz für Entfernungen bis etwa 100 km durchaus zulässig ist, so wird Gl. (3) zu

$$E(r) = E_0 (r_0 / r)^{3/2}, \quad (15)$$

und die Summenfeldstärke $E_{\Sigma N}(r)$ ergibt sich zu:

$$E_{\Sigma N}(r) = 2E_0 \left(\frac{r_0}{\Delta r} \right)^{3/2} \sqrt{\frac{1}{20} \sqrt{\sum_{n=1}^N \frac{1}{n^2}}}. \quad (16)$$

Diese Summe über $1/n^2$ ist konvergent und hat den Summenwert $\pi^2/6 = 1,64$ bzw. $\pi/\text{sqr}(6) = 1,28$ für die Wurzel daraus. In Bild 6 sind die Zusammenhänge graphisch dargestellt. Die obere Kurve zeigt das Ansteigen der Wurzel aus der harmonischen Reihe $\text{sqr}(\sum 1/n)$ mit zunehmendem N . Die untere Kurve zeigt das Ansteigen des Summenwertes der Reihe $\text{sqr}(\sum 1/n^2)$. In der Realität verläuft die Zunahme der elektrischen Summenfeldstärke zunächst mit $1/n$ und dann mit $1/n^2$, so daß sich z.B. ein Verlauf wie in der mittleren Kurve dargestellt ergibt. Bezüglich der Bodenwelle bedeutet dies, daß das Vorhandensein einer sehr großen Anzahl von PLC-Sendern dazu führt, daß der Feldstärkeanteil des ersten Rings mit 4 PLC-Sendern durch die Existenz aller weiteren äußeren Ringe etwa zu verdoppeln ist.

Für 10 MHz ergibt sich also ein genauerer Wert für die Summenfeldstärke mit

$$a_{\Sigma N}(r) = 20 \log (E_{\Sigma N}(r) / E_0) = 6 \text{ dB} + a(r) + a(N) + G_M + a_{\text{pol}}, \quad (17)$$

wobei $a(N) = 6 \text{ dB}$ ist, für große N also unabhängig von N (siehe Bild 6, die weit entfernten Ringe liefern keinen Feldstärkebeitrag), und

$$a(r) = 20 \log (r_0 / \Delta r)^{3/2} = 30 \log (r_0 / \Delta r). \quad (18)$$

$a_{\Sigma N}(r)$	6 dB	$a(r)$	$a(N)$	G_M	a_{pol}
-91 dB	6 dB	-90 dB	6 dB	-10 dB	-3 dB

Tabelle 3: Dämpfungsanteile bei 25.000 PLC-Sendern, wenn die mit zunehmender Entfernung ansteigende Dämpfung der Bodenwelle berücksichtigt wird.

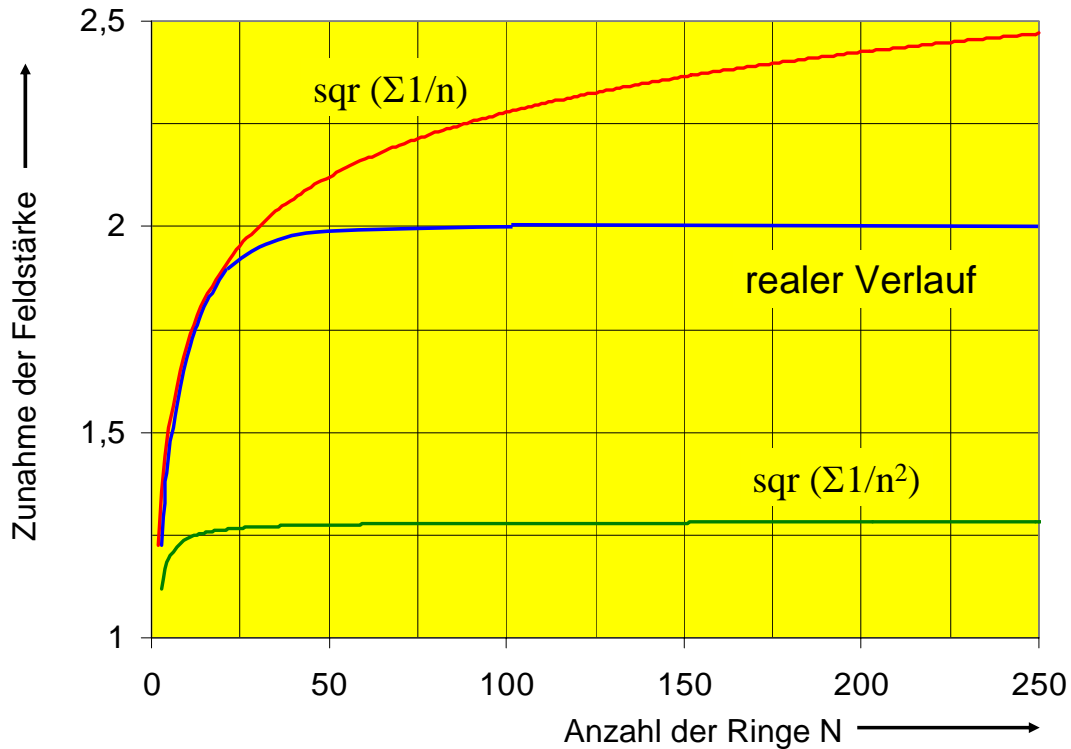


Bild 6: Zunahme der Summenfeldstärke mit der Fläche des Verbreitungsgebietes von PLC-Anlagen, ausgedrückt durch die Anzahl N der Ringe

Summenfeldstärke der Raumwelle

Da die im Luftraum über Deutschland befindlichen Flugzeuge ebenfalls den MHz-Bereich für Funkdienste benutzen (z.B. Sprechfunk in mehreren Kanälen zwischen 2,85 MHz und 23,35 MHz), muß abgeschätzt werden, wie sich die Überlagerung von PLC-Störfeldstärken dort auswirkt. Die Gleichungen zur Berechnung des gewünschten Zahlenwertes bleiben die gleichen wie im Abschnitt über die Summenfeldstärke der Bodenwelle. Der Maximalwert tritt wiederum entsprechend Bild 4 oberhalb des Zentrums von Deutschland auf. In der Raumwelle sind zwar horizontale und vertikale Polarisierung gleichermaßen enthalten, aber der Term a_{pol} kann in Tabelle 4 dennoch nicht entfallen, da die Empfangsantennen am Flugzeug nur eine Komponente dieser Polarisierung empfangen können.

Mit der Geometrie wie in Bild 7 ergibt sich

$$E_{\Sigma N}(r) = 2E_0 \frac{r_0}{\Delta r} \sqrt{\frac{1}{20} \sum_{n=1}^N \frac{1}{n + (h/\Delta r)^2/n}} \quad (19)$$

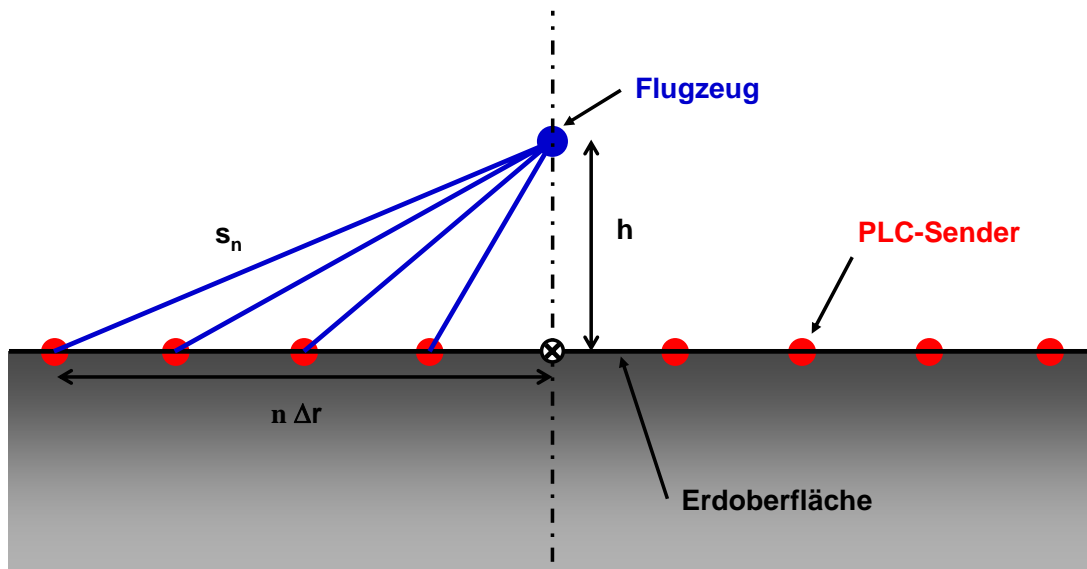


Bild 7: Flugzeug über dem Zentrum Deutschlands

Dies läßt sich umformen und im logarithmischen Dämpfungsmaß bezogen auf den Grenzwert E_0 der NB 30 darstellen als:

$$a_{\Sigma N}(r) = 20 \log (E_{\Sigma N}(r) / E_0) = 6 \text{ dB} + a(r) + a(N) + G_M + a_{\text{pol}}, \quad (20)$$

mit der einzigen Änderung gegenüber der Bodenwelle in Gl.(10), daß hier

$$a(N) = 10 \log \sum_{n=1}^N \frac{1}{n + (h / \Delta r)^2 / n} \quad (21)$$

ist.

Die Summenfeldstärke nimmt mit zunehmender Höhe h langsam ab, da die Entfernungen $s_n = \text{sqr}[(n \Delta r)^2 + h^2]$ zwischen den PLC-Sendern und dem Ort des Flugzeugs, an dem die Feldstärke berechnet wird, mit zunehmendem h größer werden. Für das hier betrachtete vereinfachte Modell, in dem die mit der Entfernung überproportional zunehmende Dämpfung der Bodenwelle nicht berücksichtigt wird, tritt die größte Feldstärke an der Erdoberfläche, bei $h = 0$ auf. (In der Realität tritt an der Erdoberfläche ein kleinerer Feldstärkewert entsprechend Tabelle 3 auf, der mit zunehmender Höhe in den Wert entsprechend Tabelle 4 übergeht.)

Beginnend bei $h = 0$ wird die Summenfeldstärke zunächst langsam kleiner, da die Entfernung s zu den am dichtest benachbarten PLC-Sendern, die den größten Feldstärkebeitrag liefern, etwas zunimmt. Für die weiter entfernten PLC-Sender bleibt die Entfernung praktisch unverändert. In der Summenfeldstärke ergibt sich damit nur eine sehr geringe Veränderung. Der bei der Bodenwelle auftretende Begrenzungseffekt, daß die sehr weit entfernten PLC-Sender keinen Beitrag mehr liefern, da sie aufgrund der Krümmung der Erdoberfläche keine Sichtverbindung zum Empfangsort mehr haben, tritt hier nicht auf. Deshalb wird die

Abnahme der Summenfeldstärke in großen Höhen geringer, da mit zunehmender Höhe ein immer größerer Anteil der Erdoberfläche in den Sichtbereich des Flugzeugs gelangt. Dieser gegenläufige Effekt strebt theoretisch gegen einen Grenzwert, weil die Erde Kugelform hat. In der Praxis bleibt dies jedoch ohne Auswirkung, weil in Höhen oberhalb von 10 bis 20 km kein Flugverkehr mit HF-Funkverbindungen existiert und weil die dort auftretenden Feldstärken aufgrund der großen Entfernungen weit unterhalb des Umgebungsrauschens liegen und somit vernachlässigt werden können. Die Auswertung von Gleichung (20) ergibt z.B. für das eingangs besprochene Beispiel mit $N = 112$ und $h = \Delta r = 3$ km Höhe eine Dämpfung der Summenfeldstärke von 60,3 dB bezogen auf den Grenzwert der NB 30. Damit ist die Summenfeldstärke in 3 km Höhe um 0,6 dB kleiner als die Summenfeldstärke an der Erdoberfläche. Tabelle 4 zeigt die einzelnen Dämpfungsterme.

$a_{\Sigma N}(r)$	6 dB	$a(r)$	$a(N)$	G_M	a_{pol}
-60,3 dB	6 dB	-60 dB	6,66 dB	-10 dB	-3 dB

Tabelle 4: Dämpfungsanteile der Raumwelle bei 25.000 PLC-Sendern

Feldstärke der Raumwelle nach Reflexion an der Ionosphäre

Der Kurzwellenbereich zwischen 1,6 und 30 MHz bietet als einziger Frequenzbereich die Möglichkeit zu weltumspannenden Funkverbindungen. Möglich wird dies durch die einmalige oder mehrfache Reflexion dieser Funkwellen an der Ionosphäre. Dies ist ein Teilbereich unserer Atmosphäre, gegliedert in mehrere Schichten in Höhen von 60 bis 1000 km, in dem sich durch den Ultraviolettanteil und noch höherfrequentere Anteile der Sonneneinstrahlung nennenswerte Mengen von Ionen (elektrisch geladene Atome und Moleküle) bilden. Diese ionisierten Schichten reflektieren elektromagnetische Wellen in einem bestimmten Frequenzbereich, die innerhalb eines bestimmten Winkelbereichs einfallen. Höhere Frequenzen und Wellen, die andere Einfallswinkel haben, durchdringen die Ionosphäre und verlassen die Erde.

Die Übertragungsbedingungen bei der Nutzung der Ionosphärenreflexion sind sehr stark abhängig von der Tageszeit, der Jahreszeit, der Sonnenfleckenzahl, der Elektronendichte, vom Erdmagnetfeld und vom Ort des Senders und des Empfängers. Für den hier betrachteten Störfall ist nur der Frequenzbereich zwischen 2 und 14 MHz von Interesse, mit möglichen Maxima bei 4 bis 10 MHz. Mit Hilfe der Ionosphärenreflexion sind weltweite Funkverbindungen sehr preiswert (ohne Satelliten) herstellbar. Die Verbindungen haben allerdings nur geringe Zuverlässigkeit und geringe Übertragungsqualität. Wegen der großen zu überbrückenden Distanzen sind die Empfangsfeldstärken sehr gering. Kurzwellen-Weitbereichsverbindungen sind damit darauf angewiesen, daß die Störfeldstärken am Empfangsort sehr niedrig sind, damit das Empfangssignal erfolgreich demoduliert werden kann.

Es gibt mehrere Rechnerprogramme, mit denen Weitverkehrsverbindungen mit einmaliger oder mehrmaliger Reflexion an der Ionosphäre berechnet werden können. Mit deren Hilfe ist für den hier betrachteten Störfall das ungünstigste Ergebnis herausgesucht worden. Bild 8 zeigt sehr stark vereinfacht ein typisches Beispiel für die Frequenz 10 MHz. Von den von einem punktförmigen Sender in alle Raumrichtungen abgestrahlten Wellen wird ein Teilbereich an der Ionosphäre reflektiert. Der Sender erreicht ein kreisringförmiges Versorgungsgebiet in einem Umkreis von 700 km bis 1300 km Entfernung vom Sender. Um

die Feldstärke am Empfangsort zu berechnen, benötigt man die Länge des Übertragungsweges $s = s_1 + s_2$, den Raumwinkel der reflektierten Strahlung und die Ionosphärendämpfung a_{io} . Die Ionosphäre ist selbstverständlich kein idealer Reflektor wie ein leitfähiges Blech sondern ein teildurchlässiger Reflektor. Die Ionosphärendämpfung a_{io} beträgt mindestens 6 dB (einmal jährlich für eine Stunde) und im Mittel 17 bis 20 dB. Zur Abschätzung der Empfangsfeldstärke $E_E(r)$ am Erdboden nach einmaliger Reflexion an der Ionosphäre ergibt sich damit im logarithmischen Maß die Gleichung:

$$a_{ionrefl}(r) = 20 \log (E_E(r) / E_0) = a_{RW} + a(r) + a_{io}, \quad (22)$$

mit der Ausbreitungsdämpfung $a(r) = 20 \log (r_0 / s)$. Wenn man den Raumwinkel der reflektierten Strahlung zu $RW = 1/3$ annimmt, ergeben sich für den mittleren Strahl des dargestellten Beispiels ($s = 1221$ km) folgende Werte (Für die beiden Randstrahlen ist $a(r)$ einmal 2 dB kleiner und einmal 2 dB größer.):

$a_{ionrefl}(r)$	a_{RW}	$a(r)$	a_{io}
-123 dB	-4,8 dB	-112,2 dB	-6 dB

Tabelle 5: Dämpfungsanteile der Ionosphärenreflexion für einen PLC-Sender

Im betrachteten Beispiel mit der Frequenz $f = 10$ MHz ist die Feldstärke am Empfangsort in 1000 km Entfernung um 123 dB kleiner als der Grenzwert der NB 30.

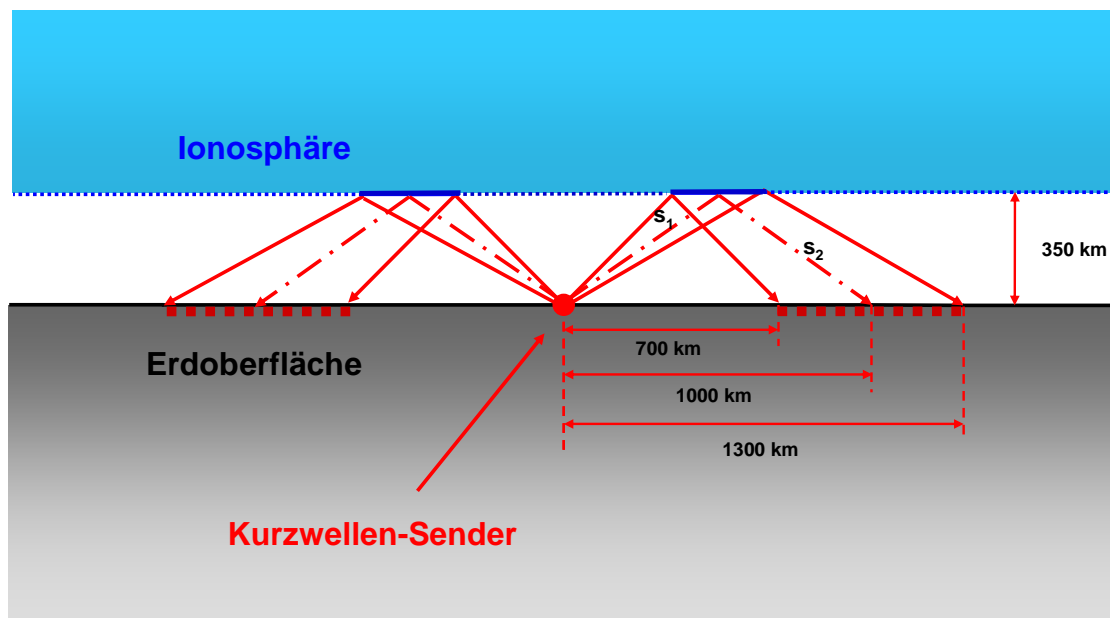


Bild 8: Ausbreitung der Raumwelle bei 10 MHz, Punktquelle im Zentrum Deutschlands

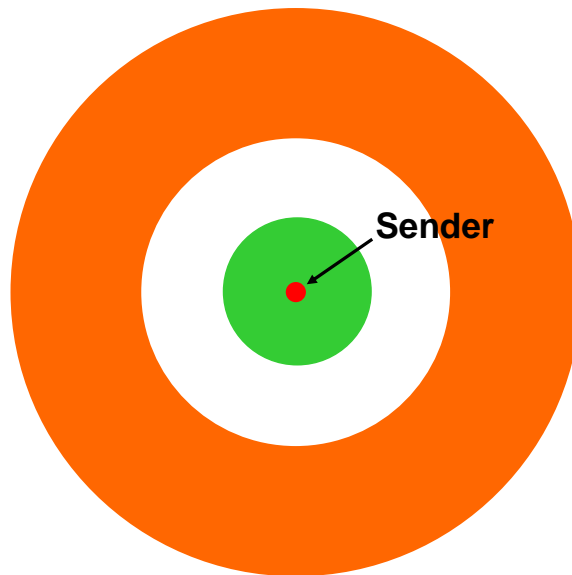


Bild 9: Versorgungsgebiet der Raumwelle (ausgeleuchtete Fläche) bei Annahme eines einzelnen Senders im Zentrum Deutschlands, $f = 10$ MHz (Draufsicht auf Bild 8)

Summenfeldstärke der Raumwelle nach Reflexion an der Ionosphäre

Zur Abschätzung der Summen-Empfangsfeldstärke nach einmaliger Reflexion an der Ionosphäre für eine große Zahl von PLC-Sendern muß die flächige Verteilung dieser Sender berücksichtigt werden. Wie in Bild 10 skizziert haben die PLC-Sender, die sich am Rand Deutschlands befinden keinen gemeinsamen Versorgungsbereich, bezogen auf die dargestellte Querschnittsebene. Verglichen mit Bild 9, das den Versorgungsbereich eines einzelnen Senders wiedergibt, wird der Versorgungsbereich unter der Annahme, daß die PLC-Sender sich gleichmäßig auf die Fläche Deutschlands verteilen, etwa verdoppelt. Die ausgeleuchtete Fläche ist ein Kreisring mit einem Innendurchmesser von 680 km und einem Außendurchmesser von 2000 km (Bild 11). Aufgrund der oben beschriebenen Eigenschaften der Ionosphärenreflexion werden jedoch an keiner Stelle in diesem Kreisring die Signale aller PLC-Sender in Deutschland empfangen (siehe Bild 10).

Dennoch wird für die Abschätzung der Summenfeldstärke der Raumwelle die Gesamtzahl M der gleichzeitig aktiven PLC-Sender berücksichtigt, indem die Strahlungsdichte des Summenfeldes mit M multipliziert wird. Dementsprechend ist die Feldstärke des Summenfeldes mit \sqrt{M} zu multiplizieren, bzw. in logarithmischer Darstellung um den Term $a(M) = 10 \log M$ zu vergrößern. Die Summenfeldstärke nach einmaliger Reflexion an der Ionosphäre ergibt sich damit zu

$$a_{\Sigma\text{Mionrefl}}(r) = 20 \log (E_{E\Sigma\text{io}}(r) / E_0) = a_{\text{RW}} + a(r) + a_{\text{io}} + a(M) + G_M, \quad (23)$$

Die Werte der einzelnen Dämpfungsterme für $M = 25.000$ PLC-Sender sind in Tabelle 6 angegeben.

$a_{\Sigma\text{Mionrefl}}(r)$	a_{RW}	$a(r)$	a_{io}	$a(M)$	G_M
-89 dB	-4,8 dB	-112,2 dB	-6 dB	44 dB	-10 dB

Tabelle 6: Dämpfungsanteile der Raumwelle bei 25.000 PLC-Sendern

Die Maximalwerte der Feldstärken aufgrund der Ionosphärenreflexion sind um 89 dB kleiner als die Grenzwerte der NB 30.

Die Werte der einzelnen Dämpfungsterme für $M = 125.000$ PLC-Sender sind in Tabelle 7 angegeben.

$a_{\Sigma Mionrefl}(r)$	a_{RW}	$a(r)$	a_{io}	$a(M)$	G_M
-82 dB	-4,8 dB	-112,2 dB	-6 dB	51 dB	-10 dB

Tabelle 7: Dämpfungsanteile der Raumwelle bei 125.000 PLC-Sendern

Die Maximalwerte der Feldstärken aufgrund der Ionosphärenreflexion sind um 82 dB kleiner als die Grenzwerte der NB 30. Die sich aus der sehr stark vereinfachten Modellierung der Wellenausbreitung mit Reflexion an der Ionosphäre ergebenden Dämpfungswerte sind so groß, daß keine Notwendigkeit besteht, das benutzte Modell zu verfeinern, um zu genaueren Ergebnissen zu kommen.

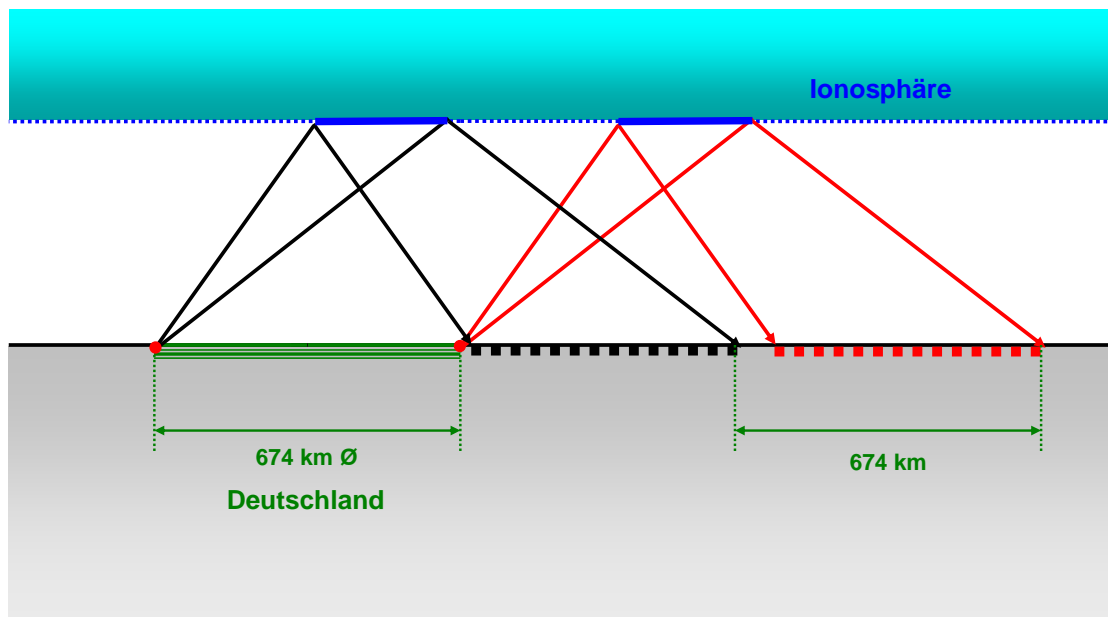


Bild 10: Die PLC-Sender am Außenrand Deutschlands haben Versorgungsgebiete, die sich nicht überlappen

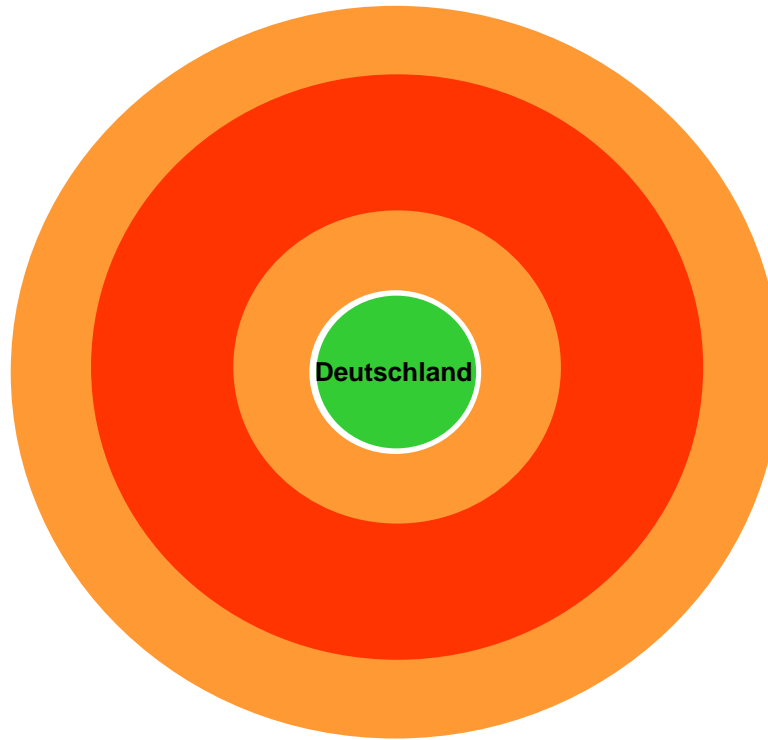


Bild 11: Vergrößerung der ausgeleuchteten Fläche durch die flächige Verteilung der Sender in ganz Deutschland (grün)

Zusammenfassung der Ergebnisse

Die im Voranstehenden gewonnenen numerischen Abschätzungen beruhen zum einen auf fest vorgegebenen physikalischen Zusammenhängen (z.B. der Ausbreitungsdämpfung einer abgestrahlten Welle) und zum anderen auf bestimmten Annahmen (z.B. der Zahl der gleichzeitig aktiven PLC-Anlagen) und Schätzwerten (z.B. dem Reflexionsfaktor an der Ionosphäre). Die Aufgabenstellung war, eine Abschätzung der möglichen Maximalwerte der Störfeldstärke durchzuführen. Daher sind die im Text benutzten Annahmen und Schätzwerte grundsätzlich so gewählt, daß sich ein möglichst ungünstiges Ergebnis einstellt. Dennoch sind die damit gewonnenen Ergebnisse für die Summenfeldstärken so niedrig, daß eine weitere Verfeinerung der Abschätzung nicht notwendig ist.

Die ermittelten Werte $a_{\Sigma}(r)$ für die Dämpfung der Summenfeldstärke verglichen mit der Grenzfeldstärke der NB 30 liegen bei -60 dB, -52 dB, -91 dB, -60dB, -89 dB und -82 dB. Diese Dämpfungswerte sind so groß, daß daraus folgt, daß der Einfluß der vielen anderen PLC-Sender generell vernachlässigt werden kann: Es gibt keine schädlichen kumulativen Effekte. Angenommen, am Ort der Berechnung von $a_{\Sigma}(r)$ befindet sich bereits ein PLC-Sender und erzeugt dort die Grenzfeldstärke E_0 der NB 30. Dann beträgt die Vergrößerung der örtlichen Feldstärke 3 dB, wenn $a_{\Sigma}(r) = 0$ dB ist, und 1 dB, wenn $a_{\Sigma}(r) = -6$ dB ist. Alle darüberliegenden Dämpfungswerte $a_{\Sigma}(r)$, wie oben angegeben, führen zu keiner irgendwie nachweisbaren Vergrößerung der bereits vorhandenen Feldstärke.

Im Bereich der HF-Technik ist allgemein bekannt, zum Beispiel durch die vielen Mobilfunk-Basisstationen (in Deutschland gibt es etwa 100.000), bei denen weltweit die gleichen Frequenzbereiche in geringem räumlichen Abstand voneinander immer wieder verwendet werden, daß kumulative Effekte bei elektromagnetischen Wellen nicht auftreten. Dennoch wurde die NB 30 geschaffen mit der Begründung, daß aufgrund der großen Zahl der zu erwartenden neuartigen Anlagen zur leitergebundenen Telekommunikation (ADSL, VDSL,

PLC, Ethernet und CATV) ein völlig neues EMV-Störszenario (kumulative Effekte!) auf unsere Gesellschaft zukommt, welches mit allem bisher Dagewesenen nicht vergleichbar ist. Aus dem Vorhergehenden ergibt sich, daß diese Befürchtungen unbegründet sind. Dennoch haben eifrige Regulierer aufgrund dieser vermeintlichen Bedrohung entweder in Unkenntnis der physikalischen Zusammenhänge oder in böser Absicht eine Verordnung erlassen, die weit über das Ziel des Schutzes von Funkdiensten hinausgeht. Das früher ebenfalls einmal geäußerte Ziel, die Entwicklung innovativer Technologien in Deutschland fördern zu wollen, ist mit der NB 30 ins Gegenteil verkehrt worden. Viele Firmen haben ihre erfolgreichen Aktivitäten im Bereich Powerline-Kommunikation inzwischen eingestellt. Der deutschen Volkswirtschaft ist damit ein Schaden in Höhe von mehreren hundert Millionen Euro entstanden. Zudem ist der Wissens-Vorsprung, den Deutschland auf diesem Gebiet hatte, verloren gegangen. In den USA, wo Grenzwerte gültig sind, die etwa 20 bis 30 dB über denen der NB 30 liegen [10], ist die Powerline-Kommunikation ein wirtschaftlicher Erfolg geworden: So hat z.B. die Firma Intellon bis Ende 2004 zwei Millionen PLC-ICs ausgeliefert. Die damit hergestellten Powerline-Modems werden weltweit vertrieben, auch in Deutschland.

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://bundesrecht.juris.de/bundesrecht/freqbzpv_2004/gesamt.pdf
- [4] Recommendations and Reports of the CCIR, 1990, Vol.V (Propagation in non-ionized media), Genf: ITU 1990, Report 717-1 (World atlas of ground conductivities).
- [5] Recommendations and Reports of the CCIR, 1990, Vol.VI (Propagation in ionized media), Genf: ITU 1990, Report 322-3 (Characteristics and applications of atmospheric radio noise data).
- [6] Meinke-Gundlach: Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, 5. Auflage. Berlin: Springer 1992.
- [7] Lindenmeier, H.; Hopf, J.: Kurzwellenantennen. Heidelberg: Hüthig 1992.
- [8] Recommendations and Reports of the CCIR, 1990, Vol.VI (Propagation in ionized media), Genf: ITU 1990, Report 258-4 (Man-made radio noise).
- [9] Recommendations and Reports of the CCIR, 1990, Vol. V (Propagation in non-ionized media), Genf: ITU 1990, Recommendation 368-6 (Groundwave propagation curves for frequencies between 10 kHz and 30 MHz).
- [10] Dalichau, H.: EMV-Aspekte von Inhome-PLC-Anlagen; Vergleich des kHz-Bereiches mit dem MHz-Bereich. EMC Kompendium 2002, S. 30 bis 34.