ABSCHLUSSBERICHT ZUR „POWER-LINE“ STUDIE

Bearbeiter: Dr.-Ing. Ralf Vick

Gesellschaft für Wissens- und Technologietransfer der TU Dresden mbH
in Zusammenarbeit mit dem

EMV- Beratungs- und Planungsbüro
Prof. Dr.-Ing. K. H. Gonschorek und Dr.-Ing. R. Vick
Gostritzer Str. 106
01217 Dresden

net: www.emc-experts.de

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung 4
2 Power-Line Communication - PLC 6
2.1 Einführung in das Verfahren 6
2.2 Einkopplung der Datensignale 7
2.2.1 Angepaßte Einkopplung der PLC-Signale 7
2.2.2 Einkopplung im dreiphasigen Netz 8
3 Eigenschaften des Übertragungsmediums 10
3.1 Elektroinstallation 10
3.1.1 Netze 10
3.1.2 Bereich zwischen Transformatorstation und Hausanschluß 11
3.1.3 Gebäudeinstallation 13
3.2 Netzimpedanz 15
3.3 Kabelparameter 16
3.3.1 Kabeltyp 1- NYM-J 3G 3*1,5mm^2 16
3.3.2 Kabeltyp 2- NYM-J 3G *2,5mm^2 17
3.3.3 Kabeltyp 3- NYIF-J 3G *1,5mm^2 17
4 Störrelevante Parameter und deren Beschreibung 18
4.1 Störmechanismus bei symmetrischer Signaleinkopplung 18
4.1.1 Differentielle Signalausbreitung 19
4.1.2 Asymmetrische Signalausbreitung 20
4.1.3 Umwandlung symmetrischer in asymmetrische Signale 20
4.2 TCL/LCL - Parameter zur Beschreibung der Unsymmetrie 22
4.3 Störabstrahlung 23
4.4 Messung der störrelevanten Parameter 25
4.4.1 Messung des LCL und TCL 26
4.4.2 Störstrom 29
4.4.3 Elektromagnetisches Feld 29
5 Untersuchungen an einem Modellnetz 31
5.1 Zusammenhänge bei der Einspeisung ins Teilnetz S0 34
5.1.1 Asymmetrische Spannung an der Einspeisestelle P0 35
5.1.2 Symmetrische Spannung an der Speisestelle P0 36
5.1.3 Asymmetrischer Strom an der Stelle P0 bei Einspeisung in S0 37
5.1.4 Symmetrische Eingangsimpedanz am Punkt P0 37
5.1.5 Asymmetrische Impedanz 39
5.2 Stromverteilung des Stromkreis S0 41
5.3 Longitudinal Conversion Loss am Punkt P0 42
5.4 LCL der Gesamtanordnung 43
5.5 Vergleich zwischen Messung und Berechnung 46
5.6 Verteilung der elektrischen Feldstärke 49
5.7 Schlußfolgerungen 52
6 Zusammenhangs von TCL und LCL an einer Zweidrahtanordnung 53
6.1 Versuchsaufbau 53
6.2 CONCEPT-Modell 55
6.3 Asymmetrische und symmetrische Spannung bei der LCL-Messung 56

6.4 Asymmetrische und symmetrische Spannung bei der TCL-Messung 57
6.5 Messung von LCL und TCL 58
6.6 Elektrische Feldstärke – Fußpunktspannungen der Antennen 60
6.7 Anpassung des Modells 63
6.8 Schlußfolgerungen 64
7 LCL-TCL Messungen 65
7.1 LCL Dauermessungen 65
7.2 TCL an unterschiedlichen Meßobjekten 68
8 Magnetische Felder bei symmetrischer Einspeisung 70
8.1 Magnetische Feldstärke bei Einspeisung innerhalb von Gebäuden 70
8.1.1 Einfluß des asymmetrischen Abschluß des Baluns 70
8.1.2 Maximale und minimale magnetische Feldstärken 72
8.1.3 Örtliche Verteilung der magnetischen Feldstärke 73
8.1.4 Einkopplung an der Hauseinspeisung 76
8.1.5 Entfernungsabhängigkeit der gemessenen maximalen Feldstärken 79
8.1.6 NB 30 bezogene Auswertung mit Box-Plots 80
8.1.7 Zusammenhang zwischen LCL/TCL und magnetischer Feldstärke 82
8.1.8 Statistische Auswertung der Meßergebnisse 84
8.2 Modellierung der Störfeldstärken durch ein λ/2-Dipolmodell 88
8.3 Störfeldstärken von Erdkabeln außerhalb von Gebäuden 91
9 Numerisches Hausmodell 94
9.1 Modell des Hauses 94
9.2 Feldverteilung in Schnittebenen 95
9.3 Strahlungsdiagramme 97
9.4 Frequenzverlauf 99
10 Zusammenfassung 101
11 Literatur 104

1 EINFÜHRUNG

Gegenwärtig wird durch die Industrie und die Energieversorgungsunternehmen mit Nachdruck an der Einführung von Verfahren zur schnellen bidirektionalen Datenübertragung auf den Stromversorgungsleitungen, Power-Line Communication (PLC), gearbeitet. Da in einem typischen Niederspannungsnetz mehrere hundert Haushalte sternförmig mit einer Transformatorstation verbunden sind, können durch die Ausnutzung der flächendeckenden Netzstruktur eine Reihe von neuen „energienahen Mehrwertdiensten“ installiert werden.

Die Elektroenergieversorgungsleitungen werden bereits seit mehr als 70 Jahren als Kommunikationsmedium benutzt. Seit dieser Zeit sind an Hochspannungsleitungen Trägerfrequenzsysteme (TFH) in Betrieb, die zwischen 15 kHz und 500 kHz mit einer Sendeleistung von rund 10 W die Übertragung von Informationen über mehrere hundert Kilometer ermöglichen. Ausgenutzt wird, daß sich die Freileitungen mit wenigen Verzweigungspunkten in diesem Bereich als gute hochfrequente Wellenleiter verhalten. Trotz der Überlagerung der Modulationsfrequenzen mit dem Langwellenfunkbereich kam es bisher zu keinen nennenswerten gegenseitigen Beeinträchtigungen.
Auf der Mittel- und Niederspannungsebene wird seit etwa 1930 die Tonfrequenz-Rundsteuertechnik (TRT) zur Übertragung von Ein- und Ausschaltkommandos für die Tarifsteuerung und Lastoptimierung eingesetzt. Die Einspeisung der Steuersignale erfolgt unidirektional auf der Mittelspannungsebene.
Zum Ausgleich der großen Dämpfung, die in dem verwendeten Frequenzbereich von 125-3000 Hz eine erhebliche Belastung darstellt, werden die Signale mit einer hohen Leistung von 10 kW bis 1 MW eingespeist.

Gegenwärtig ist die Signalübertragung auf elektrischen Niederspannungsnetzen in einem Frequenzbereich von 3 kHz bis 148,5 kHz in der Norm EN 50065-1 geregelt [1]. Dabei werden 4 Frequenzbereiche unterschieden. Der Bereich von 3 kHz bis 95 kHz ist generell den Energieversorgungsunternehmen vorbehalten. Der restliche Frequenzbereich ist in drei Bänder unterteilt, für die teilweise Anforderungen an das Übertragungsprotokoll bestehen. Der Europäische Installationsbus (EIB) ist ein anerkanntes Datenbussystem, das den Anforderungen der Norm entspricht und auch für die Kommunikation auf den Versorgungsleitungen Verwendung findet. Als Beispiel für die praktische Umsetzung läßt sich das Automatisierungssystem der Fa. Busch-Jäger anführen.

In Amerika, Kanada und Japan ist die Signaleinspeisung auf die Leitungen mit Frequenzen bis zu 450 kHz / 500 kHz und zwischen Nulleiter und Schutzerde möglich. Entsprechende Geräte erfüllen nicht die Europäischen Standards und dürfen bei uns nicht verwendet werden.

Da der zugewiesene Frequenzbereich die Übertragungsbandbreite einschränkt und der Betrieb zudem durch die in diesem Bereich besonders stark vorhandenen Störungen beeinträchtigt ist [4], [5], werden zur Zeit praktisch nur digitale Daten zur Gebäudeautomatisierung übertragen. Insofern ist es verständlich, daß Anstrengungen unternommen werden, den nutzbaren Frequenzbereich und die Übertragungsbandbreiten zu erhöhen [6]. Damit stellt sich aber zugleich die Frage, wie die Pegel für eine Einspeisung der PLC-Signale in die Netzleitungen gewählt werden können, ohne durch ungewollte Abstrahlung den Funkempfang zu beeinträchtigen.

Die Studie liefert einen Beitrag zur Beantwortung dieser Frage und beinhaltet folgende Teilaufgaben:

- Messung und Beschreibung der zu erwartenden asymmetrischen Störspannungen im Versorgungsnetz bei PLC im Frequenzbereich von 150 kHz bis 30 MHz,
- Darstellung von besonderen Störphänomenen bei PLC,
- Beschreibung der Störfeldstärken in Abhängigkeit vom Betrachtungsort,
- grenzwertbezogene Auswertung der gemessenen Feldstärken bei symmetrischer Einspeisung,
- Vergleich der gemessenen Feldstärken und denen einer einfachen $\lambda/2$-Dipolsabschätzung.

2 POWER-LINE COMMUNICATION - PLC

2.1 Einführung in das Verfahren

Das Verfahren zur PLC- Datenübertragung ist relativ einfach zu beschreiben. Der 230 V-Netzspannung wird eine Signalspannung höherer Frequenz überlagert, welche die zu übertragenden Informationen in geeignet modulierter Weise enthält. Problematisch sind die im niederfrequenten Bereich auftretenden Störungen, die durch den verstärkten Einsatz von moderner Leistungselektronik noch vermehrt auftreten. So gab es in der Erprobungsphase des EIB vielfältige EMV-Probleme, die in Industrieumgebungen besonders kritisch waren. Auch wenn bereits industrielle PLC-Systeme existieren, konnten bis heute noch nicht alle EMV-Probleme gelöst werden [11].

Zur Verschlüsselung der Daten ist eine geeignete Modulation des Signals notwendig. Die Amplitudenumtastung ist eines der einfachsten Verfahren. Die Modulation erfolgt durch das Ein- und Ausschalten eines Trägers. Weil sich nahezu alle Störungen auf die modulierten Signale auswirken, besitzt dieses Verfahren eine hohe Störempfindlichkeit [12].
Beim Einsatz von geschlossenen Phasenregelkreisen (PLL) zum Erzeugen und Demodulieren frequenzmodulierter Signale, wie z.B. bei der Frequenzumtastung (FSK), kann die Störfestigkeit erheblich verbessert werden. Dabei werden zwei Trägerfrequenzen zur Verschlüsselung der digitalen Information genutzt. Entsprechend Abbildung 1 können die Daten durch das Umschalten zwischen den beiden Trägerfrequenzen übertragen werden.

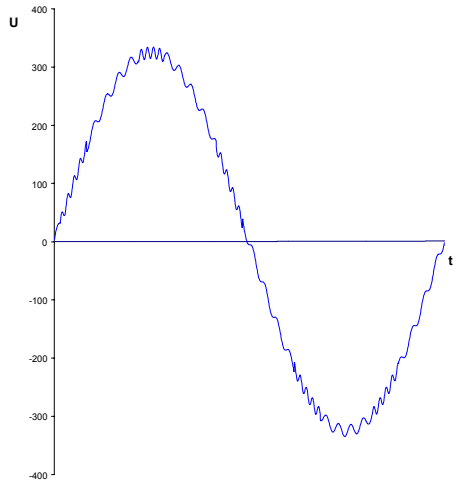


Abbildung 1 Schematische Darstellung modulierten Signals (Frequenzumtastung)

Der Schlüssel zur breitbandigen und störsicheren Datenübertragung ist die Modulationstechnik. Allgemeine Modulationsarten sind Amplitudenmodulation (AM), Frequenzmodulation (FM), Einzelseitenband-Modulation (SSB), Frequenzsprungmodulation (FSK) und deren Variationen. Die Verwendung von komplexeren Modulationsverfahren, wie z.B. die Frequenzsprungmodulation, ist mit einer wesentlichen Verbesserung der Störfestigkeit verbunden.

2.2 Einkopplung der Datensignale

Die informationstragenden Signale für Power-line Communication können in vielfältiger Weise und bei Nutzung der aufgeführten Modulationstechniken in die Netzleitungen eingekoppelt werden. In [14] werden folgende Einkopplungsarten aufgeführt:

- Nulleiter zu Erde,
- Nulleiter zu Phase,
- Phase zu Erde,
- Phase zu Phase.

Die ersten drei Methoden werden bei der einphasigen Übertragung der Informationen auch in dreiphasigen Systemen genutzt. Die letzte Methode wird verwendet, um Signale in zwei Außenleiter eines mehrphasigen Systems einzukoppeln. Eine Einspeisung zwischen Nulleiter und Erde ist in TN-Netzen in der Nähe des Hauptverteilers nicht sinnvoll, da beide Leitungen kontaktiert sind.
Auf dem Funkschauseminar „Powerline Communication und EMV“ [15] wurde darauf hingewiesen, daß bei einer Einspeisung der Nutzsignale zwischen Phase und Erde die FI-Schutzschalter der Netze ungewollt auslösen können. Aus diesem Grund wird diese Einkopplungsart voraussichtlich nicht genutzt und wurde auch innerhalb der Studie nicht weiter untersucht.

Zur Begrenzung des Umfangs der Analyse wurden somit nur die folgenden zwei Einkopplungsfälle betrachtet:

- Phase zu Nulleiter,
- Phase zu Phase.

2.2.1 Angepaßte Einkopplung der PLC-Signale

Zur Verbesserung des Übertragungsverhaltens wird eine angepaßte Einkopplung der Datensignale in das Übertragungsmedium verwendet. Im Fall einer homogenen Leitung ist die Impedanz der Übertragungsleitung durch

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \qquad \textbf{(1)}$$

gegeben. Im interessierenden Frequenzbereich 150 kHz-30 MHz kann die Übertragungsleitung gut durch

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \qquad \textbf{(2)}$$

approximiert werden, wobei L und C den Kapazitäts- bzw. Induktivitätsbelag der Leitung je Längeneinheit darstellen.
Es ist zu beachten, daß die elektrischen Parameter der Isolationsmaterialien eine starke Frequenzabhängigkeit aufweisen. Dadurch gilt die obige Gleichung nur für einen begrenzten Frequenzbereich. Bei höheren Frequenzen ist die Impedanz stark frequenzabhängig. Dieses Verhalten kann durch die Einbeziehung eines frequenzabhängigen Verlustfaktors in die Berechnung der charakteristischen Impedanz approximiert werden [16].

Vom Niederspannungstransformator gehen eine Anzahl von Einspeisungen zu den unterschiedlichen Verbrauchern (Haushalte, Büros), so daß das Modell der homogenen Übertragungsleitung auf den zu untersuchenden Fall nicht anwendbar ist. Bei Frequenzen größer 10 kHz erscheinen Lasten der Niederspannungsseite auf der Mittelspannungsseite hauptsächlich kapazitiv und reduzieren dort die charakteristische Impedanz Z_0 [17]. Dieser Effekt wird durch den Einsatz von geschalteten Lasten und von EMV-Filtern verstärkt, da diese zusätzliche kapazitive Lasten darstellen und die charakteristische Impedanz weiter verringern. Es läßt sich schlußfolgern, daß bei Frequenzen größer als 10 kHz die Leitungsimpedanzen aufgrund der Verbraucher geringer sind als für homogene Leitungen.

Erschwerend für die Signalübertragung wirkt sich die Existenz von zeitvarianten Bandsperren aus, die in der Mittenfrequenz und der Dämpfung der Übertragungsfunktion variieren. Eigenresonanzen von Transformatoren führen ebenfalls zu einer Dämpfung der PLC-Signale [18]. Zusätzliche Verzerrungen treten durch die nichtlineare Phasencharakteristik der Übertragungsfunktion auf, welche auf das Vorhandensein von mit Hysterese behafteten magnetischen Materialien zurückzuführen ist.

Zur Verbesserung der Übertragungseigenschaften müssen Sender und Empfänger an die charakteristische Impedanz des Leitungssystems angepaßt werden, was z.B. durch die Abstimmung einer L-C-Einkopplungsschaltung realisiert werden kann. Dabei wird dem Übertrager zur Signalkopplung eine Koppelkapazität in Reihe geschaltet. Die Abstimmung erfolgt auf die Trägerfrequenz des Übertragungskanals

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \qquad \textbf{(3)}$$

so daß eine ohmsche Einkopplung entsteht. Beim Einsatz von Übertragern mit magnetischem Kern ist aufgrund der Nichtlinearitäten keine hundertprozentige Abstimmung möglich. Die Verwendung von koaxialen Übertragern kann die Situation verbessern [19].

2.2.2 Einkopplung im dreiphasigen Netz

Zur Datenübertragung im dreiphasigen Netz ist eine Kopplung zwischen den Phasen notwendig. Durch die Koppelkapazitäten der Drehstromleitungen oder der Verbraucher ist bereits eine undefinierte Phasenkopplung vorhanden. Eine definierte Kopplung wird durch den Einsatz eines Phasenkopplers oder eines Repeaters realisiert.
Ein Phasenkoppler verbindet die drei Phasen kapazitiv miteinander. Er verteilt die vorhandene Sendeenergie auf alle drei Phasen. Ein Repeater sendet jedes auf einer Leitung empfangene, gültige Telegramm zeitversetzt, mit maximaler Amplitude auf allen Leitungen.

Wird von einer einfachen kapazitiven Kopplung ausgegangen, liegen die eingespeisten Signale in erster Näherung an allen Phasen mit gleichem Pegel an und es ergibt sich ein Nulleiterstrom, d.h. ein unsymmetrisches System.

Werden die Signale hingegen mit einer dem Drehstrom entsprechenden Phasenverschiebung von 120° eingekoppelt, existiert kein Nulleiterstrom und das System ist symmetriert. Durch Unsymmetrien im Aufbau des Netzes und der Verbraucher ist eine vollkommene Symmetrie jedoch nicht zu erreichen.

Entsprechend Rücksprache mit dem Auftraggeber soll zur Einbeziehung des „Worst Case" in den Untersuchungen dieser Studie davon ausgegangen werden, daß die eingeprägten Signale auf allen drei Phasen der Unterstromversorgung gleichphasig und mit gleicher Amplitude anliegen.

3 EIGENSCHAFTEN DES ÜBERTRAGUNGSMEDIUMS

Für die Übertragung der Nachrichten auf den Stromversorgungsleitungen sind prinzipiell zwei Bereiche zu unterscheiden:

- vom Mittelspannungstransformator bis zum Hausanschluß,
- innerhalb der Gebäude.

Entsprechend den Absprachen mit dem Auftraggeber wird davon ausgegangen, daß diese Bereiche durch den Einsatz von Sperrfiltern ausreichend voneinander entkoppelt sind, so daß keine gegenseitigen Beeinflussungen auftreten. Es soll ebenfalls angenommen werden, daß an der Schnittstelle zur Transformatorstation ein Sperrfilter installiert ist, so daß eine Entkopplung zum Transformator angenommen werden kann. Auf die Entstehung asymmetrischer Störungen hat so in erster Näherung nur das Kabel einen Einfluß und der Transformator kann durch ein einfaches Ersatzschaltbild repräsentiert werden.

Die unterschiedlichen Parameter und Einflußgrößen für die Entstehung von asymmetrischen Störgrößen werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

3.1 Elektroinstallation

3.1.1 Netze

Zur einheitlichen Beschreibung der Versorgungsnetze in Hinblick auf die sicherheitstechnische Konzeption und die Auswahl der Schutzmaßnahmen sind in der DIN VDE 0100 Teil 300 folgende Netzformen dargelegt:

- TN- System
- TT- System
- IT- System

Der erste Buchstabe bezieht sich auf die Erdungsverhältnisse der Stromquelle. So bedeutet „T“ eine direkte Erdung eines Netzpunktes. „I“ steht entweder für eine Isolierung aller aktiven Teile von Erde oder für die Verbindung mit Erde über eine Impedanz.

Der zweite Buchstabe kennzeichnet die Erdungsverhältnisse der Körper der Anlage. „T“ steht für eine direkte Erdung der Körper. „N“ drückt die direkte Verbindung der Körper zum Betriebserder aus.

Das TN- System stellt das in der Bundesrepublik übliche Niederspannungsnetz dar. Die Studie beschränkt sich in Absprache mit dem Auftraggeber auf die Untersuchung von PLC bedingter Abstrahlung bei elektrischen Installationen im TN- System.

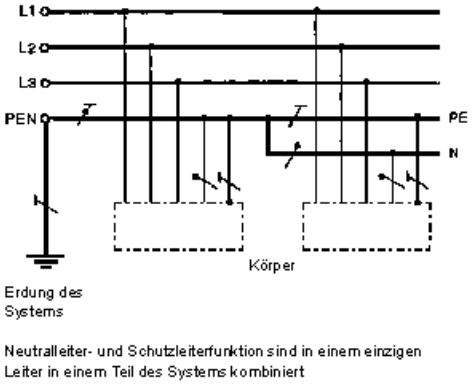


Abbildung 2 TN-C-S- Sytem

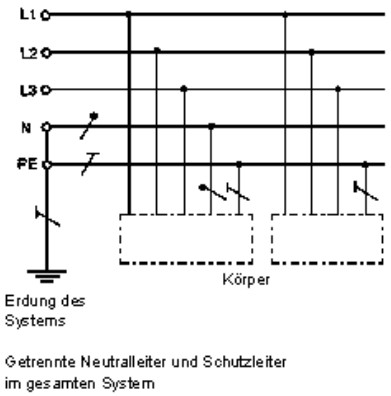


Abbildung 3 TN-S System

In TN- Systemen ist ein Punkt direkt geerdet und die Körper der elektrischen Anlage sind über Schutzleiter mit diesem Punkt verbunden. Entsprechend der Anordnung der Neutralleiter (N) und der Schutzleiter (PE) werden drei Arten von TN- Systemen unterschieden:

- TN-S- System (vgl. Abbildung 3): Im gesamten System wird ein getrennter Schutzleiter verwendet;
- TN-C-S- System (vgl. Abbildung 2): In einem Teil des Systems sind die Funktionen des Neutralleiters und des Schutzleiters in einem einzigen Leiter kombiniert;
- TN-C- System: Im gesamten System sind die Funktionen des Neutralleiters und Schutzleiters in einem einzigen Leiter kombiniert.

3.1.2 Bereich zwischen Transformatorstation und Hausanschluß

Versorgungsbereiche und Großbauten werden aus wirtschaftlichen Gründen meist aus dem Mittelspannungsnetz der Energieversorgungsunternehmen (EVU) gespeist, welche in der Regel mit Nennspannungen von 10 kV oder 20 kV betrieben werden. In den Großstädten wird das Energieversorgungsnetz meist mit 10 kV gespeist. In der Regionalversorgung überwiegt das 20 kV-Netz.

Bei den meisten Netzen im 10 kV und 20 kV Bereich wird zur Erdschlußlöschung der Sternpunkt des Netzes über eine Kompensationsspule mit Erde verbunden. Die Isolation des Sternpunktes ist bei Betriebsspannungen unter 20 kV und Netzen kleiner Ausdehnung zu finden. Die Umsetzung der Mittelspannung auf das 230 V-Netz erfolgt in Transformatorstationen. Die Transformatoren werden entsprechend ihrem Kühlmittel in Flüssigkeits-, Gießharz- und Trockentransformatoren eingeteilt.
Die Schaltgruppe Dyn5 wird für die Verteilertransformatoren im Orts- und Industrienetzen bevorzugt verwendet, d.h.:

D Oberspannungsseite in Dreieckschaltung
y Unterspannungsseite in Sternschaltung
n heraufgeführter Sternpunkt
5 Phasenverschiebung zwischen Primär- und Sekundärseite 5*30°

Zum Schutz vor zu hoher Berührungsspannung sind in Transformatorstationen und Hochspannungsschaltanlagen Metallteile zu erden, die im Fehlerfall mit unter Spannung stehenden

Teilen in Berührung kommen können. Die Mäntel bzw. Schirme von Kabeln müssen mindestens an einem Ende mit der Erdungsanlage verbunden sein. Diese Konfiguration führt zur Erhöhung der Koppelkapazitäten zur Erde.

Der Transformator kann die Entstehung asymmetrischer Störspannungen und die Dämpfung der PLC-Signale [21] entscheidend beeinflussen. Aufgrund der Auslegung für die 50 Hz-Netzfrequenz können im HF-Bereich große Unsymmetrien bestehen. In [22] wurde der Einfluß der Unsymmetrien des Transformators auf die Entstehung asymmetrischer Störspannungen ausführlich untersucht, so daß hier nicht weiter darauf eingegangen wird.

Nach der Transformation der Spannung auf die Niederspannungsseite werden die einzelnen Einheiten durch folgende Leitungssysteme angeschlossen:

- Niederspannungs-Freileitungsnetz
- Kabelnetz

Für Niederspannungsnetze werden heute überwiegend Kabelnetze (Erdkabel) verwendet, auch wenn man in ländlichen Regionen noch Freileitungsnetze findet. Diese verlieren aufgrund der geringeren Störanfälligkeit und der günstigeren Übertragungsverhältnissen von Kabelnetzen mehr und mehr an Bedeutung. Die Studie beschränkt sich deshalb auf Kabelnetze.

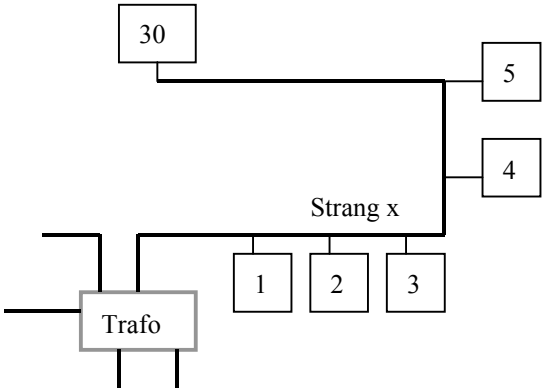


Abbildung 4 Sternförmiges Verteilungsnetz für Hausanschlüsse

Die Netze haben eine Sternstruktur oder eine vermaschte Struktur. Vom Transformator gehen bis zu 10 Kabelstränge ab, von denen jeder 30-40 Hausanschlüsse versorgt. An Netzknotenpunkten wird das Versorgungsnetz durch Kabelverteilerschränke weiter verzweigt, wobei eine Aufteilung auf vier bis zehn dreiphasige Kabel erfolgt, die mit Hochstrom-Niederspannungssicherungen (HN) für 200 A oder 400 A Nennstrom abgesichert sind. Die Stranglänge liegt in der Regel unter 1km, wobei die Stränge in ländlichen Gebieten ausgedehnter als in der Stadt sind.

Für Niederspannungs-Kabelnetze werden heute hauptsächlich Kunststoffkabel, wie NYY, NAYCWY (VDE 0271) und NAXY (DIN 0272) verwendet. Zur Verbesserung der Erdungsverhältnisse sollten die metallischen Abzweig- und Verbindungsmuffen sowie die Verteilerschränke mit Erde verbunden werden.

Das EVU legt die Führung der Leitungen bis zum Hausanschlußkasten fest. Die Einspeisung kann über einen Wandanschluß oder Dachträgeranschluß erfolgen. Bevorzugte Leitungen für Wandanschlüsse sind NYM, NYY, N2XY, NFA2X und NFYM.

Der Hausanschluß umfaßt den Hausanschlußkasten und das Hausanschlußkabel. Die Verbindungsleitung zwischen der Zähleranlage und dem Hausanschlußkasten wird als Hauptleitung bezeichnet. Sind mehrere Hauptleitungen im Gebäude, so werden diese in einem Hauptverteiler weiter verzweigt. Dieses trifft z.B. auf Bürogebäuden mit räumlich verteilten Zähler zu.
Hauptleitungen sind grundsätzlich Dreiphasen-Drehstromleitungen. Es werden hauptsächlich NYM, NYY/NYCY Kabel verwendet, die in TN-Netzen als vier- oder fünfadrige Leitungen ausgeführt sind. In Wohngebäuden werden die Stromzähler heute überwiegend im Kellerbereich untergebracht.

3.1.3 Gebäudeinstallation

Hausinstallationen sind Starkstromanlagen für Wohnungen mit einer Nennspannung bis 250 V gegen Erde. Ebenfalls in diese Gruppe fallen gewerblich genutzte Anlagen, die in Umfang und Art der Ausführung den Starkstromanlagen für Wohnungen entsprechen, z.B. Büroräume. Grundlage für die Auslegung der Stromkreise ist die DIN 18015 Teil 1-3. In dieser Norm ist der Umfang und die Art der Ausstattung sowie die Leitungsführung und Anordnung der Betriebsmittel festgelegt.

Laut DIN 18015 Teil 1 sind die Leitungen von Starkstromanlagen grundsätzlich in oder unter Putz, in Wänden, hinter Wandbekleidungen in Rohren oder Installationskanälen zu verlegen. Bei nachträglicher Installation und in Räumen, die keinen Wohnzwecken dienen, dürfen Leitungen auf der Wandoberfläche verlegt werden.
Die von der Wohnfläche abhängige Anzahl der erforderlichen Stromkreise für Beleuchtung und Steckdosen ist in Tabelle 1 angegeben.

Wohnfläche in m^2	Anzahl v. Steckdosen	Anzahl von Auslässen
bis 8	2	1
bis 12	3	1
bis 20	4	1
ab 20	5	2

Tabelle 1 Anzahl Steckdosen und Auslässe für Beleuchtung nach DIN 18015-2

Folgende allgemeine Anforderungen sind bei einer Installation zu beachten:

- Die Putzbedeckung von Stegleitungen soll mindestens 4 mm betragen.
- Die den Betten zugeordneten Steckdosen in Schlafräumen sind mindestens als Doppelsteckdosen auszuführen.
- Neben Antennensteckdosen sind mindestens Dreifach-Steckdosen vorzusehen.
- Beleuchtungs- und Steckdosenkreise in Haushalten sind für den Einsatz von 16-A-LS-Schaltern vorzusehen.
- Für Verbraucher mit einem Anschlußwert von 2 kW und mehr ist ein eigener Stromkreis vorzusehen.
- An einen Stromkreis sollen nicht mehr als 16 zweipolige Einfachsteckdosen bis 16 A angeschaltet werden.
- Beleuchtung und zweipolige Steckdosen können gemeinsam an einem Stromkreis betrieben werden.

Für die Kabelverlegung schreibt die DIN 18015-3 bestimmte Installationszonen und allgemeine Richtlinien vor:

- Der Leitungsweg ist so zu wählen, daß die Leitungen senkrecht oder waagerecht, jedoch nicht schräg über Wände gezogen werden.
- Die Leitung von Steckdose zu Steckdose ist etwa 30 cm über der Oberkante des fertigen Fußbodens zu verlegen.
- In der Küche sollte die Mindesthöhe für Steckdosen von 105 cm eingehalten werden.
- In Decken und in Fußböden dürfen Leitungen auf kürzestem Weg verlegt werden, d.h. auch schräg.
- Das Verlegen von Starkstromkabeln zusammen mit Rohrleitungen für Heizung und Sanitär in gemeinsamen Kabelschächten wird nicht empfohlen.
- Zwischen Fernmelde- und Starkstromkabeln ist mindestens ein Abstand von 1cm einzuhalten.
- Die Erde darf nicht zur betriebsmäßigen ausschließlichen Rückleitung von Betriebsströmen genutzt werden.

Anhand der Ausführungen ist erkennbar, daß keine einfache Klassifizierung von Niederspannungsnetzen möglich ist. Die Unterschiede in der Art der Verlegung und den angeschlossenen Verbrauchern sind von Haushalt zu Haushalt zu groß. Es können zwei generelle Fälle unterschieden werden:

- Die Einspeisung erfolgt am Ende oder in der Mitte eines Installationsstrangs (Steckdose). Die Nutz- und Störsignale breiten sich bis zur Unterverteilung zunächst nur innerhalb des Strangs aus. An der Unterverteilung ist das Signal bereits gedämpft und wird auf die anderen Stränge verteilt. Da im Rahmen der Studie vom Einsatz eines Repeaters ausgegangen werden soll, wird das Signal an der Unterverteilung wieder mit der zulässigen symmetrischen Amplitude in alle Stränge eingekoppelt. Die Nutz- und Störsignale breiten sich dann in allen Strängen gleichzeitig aus.
- Die Einspeisung erfolgt an der Unterverteilung und das Signal wird mit der zulässigen symmetrischen Amplitude in alle Stränge eingekoppelt. Die Nutz- und Störsignale breiten sich in allen Strängen gleichzeitig aus.

Der zweite Fall ist eine Teilmenge des ersten Falls.

Für Referenzmessungen wurde entsprechend den Anforderungen an die Elektroinstallation ein künstliches Netz aufgebaut. An diesem wurden unter definierten Bedingungen Messungen durchgeführt, die einen Vergleich mit numerischen Analysen erlauben.

3.2 Netzimpedanz

Die Impedanz des Stromversorgungsnetzes beeinflußt den Störmechanismus wesentlich. Die Netzimpedanz, d.h. die vom Verbraucher aus gesehene symmetrische Impedanz des Niederspannungsnetzes, ist orts- und frequenzabhängig. Sie variiert in einem weiten Bereich in Abhängigkeit von den angeschlossenen Lasten und somit von der Zeit. In [27] wurde ferner festgestellt, daß die Netzleitungen eine Tiefpaß- Charakteristik aufweisen und die Dämpfung periodisch schwankt.

In den 70er und 80er Jahren wurden an unterschiedlichen Stromversorgungssystemen Messungen der HF- Netzimpedanz vorgenommen [28], [29], [30], [31]. Es wurde festgestellt, daß die Impedanz in unterschiedlichen europäischen Ländern keine signifikanten Unterschiede aufweist und relativ gut durch eine kumulierte Impedanz beschrieben werden kann, die in Abbildung 5 dargestellt ist.

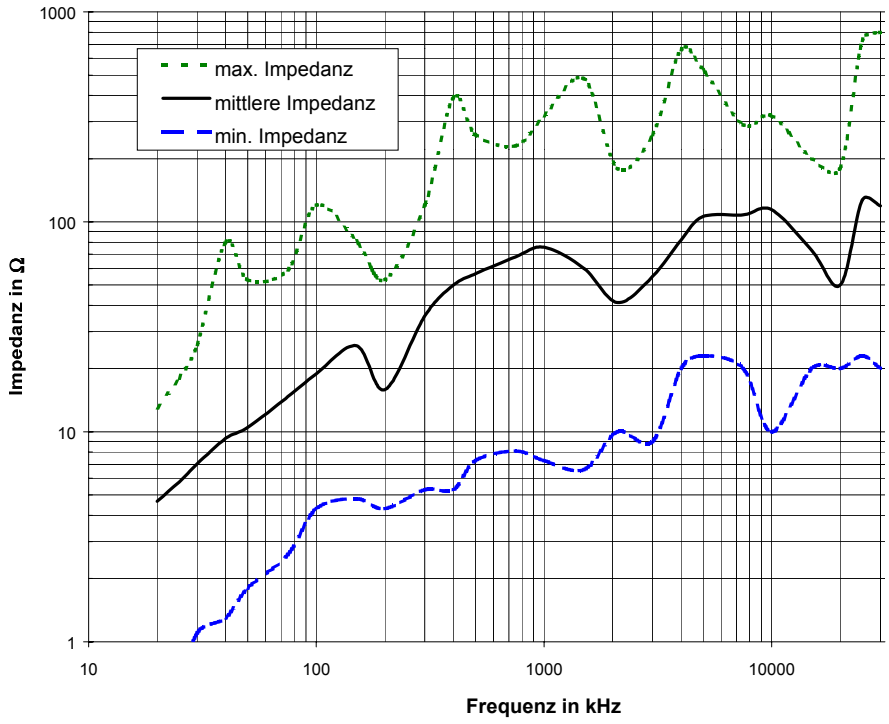


Abbildung 5 Netzimpedanz nach [29]

Neuere Messungen der Netzimpedanz eines Gewerbehauses, eines Einfamilienhauses sowie eines Gebäudeteils mit Laborräumen, Werkstatt und Arbeitszimmer sind in [32] beschrieben. Folgende Werte wurden bestimmt:

- Realteil von 0,1 Ω bis 1,2 kΩ,
- Imaginärteil von –300 Ω bis 300 Ω.

Nach [32] wirkt sich das Zuschalten von kleineren Verbrauchern im Mittel ab einer Entfernung von 8m nicht mehr auf die Impedanz des Netzes aus. Die Angabe eines Ersatzschaltbilds aus konzentrierten Elementen ist nur möglich, wenn der Frequenzbereich in Intervalle unterteilt wird und den einzelnen Intervallen Impedanzen zugeordnet werden (vgl. Tabelle 2).

Frequenz in MHz	Impedanz Re($\underline{Z}$) in Ω	Impedanz Im($\underline{Z}$) in Ω
0,1 ... 0,5	0,6 ... 9	-15 ... 31
0,5 ... 5	3,5 ... 256	-88,5 ... 140
5 ... 100	12 ... 350	-175 ... 232

Tabelle 2 Netzimpedanzen für verschiedene Frequenzbereiche nach [32]

3.3 Kabelparameter

Im folgenden sind die gemessenen Parameter und symmetrischen Impedanzen von denen in der Studie verwendeten Kabel aufgeführt. Die Messungen wurden mit einem Netzwerkanalysators durchgeführt, wobei die Leerlauf- und den Kurzschlußparameter bestimmt wurden.

*3.3.1 Kabeltyp 1- NYM-J 3G 3*1,5mm²*

Folgende Werte wurden bei einer Frequenz von 150 kHz gemessen:

C` = 127 pF/m,
L`= 755 nH/m,
R`= 43 mΩ/m,
Z_0 = 77 Ω.

In der Literatur [48] sind folgende Werte für äquivalentes Kabel angegeben:

C´ = 110 pF/m,
L´ = 620 nH/m,
R´ = 11,9 mΩ/m,
Z_0 = 75 Ω.

Ein Vergleich der gemessenen Parameter mit den Werten in [48] sowie mit den analytischen Werten der Kapazität und der Induktivität für unendlich lange, parallele Drähte zeigt eine gute Übereinstimmung. Eine Differenz ergibt sich für den Widerstand. Bei einer Berechnung des Widerstandes unter Berücksichtigung der Stromverdrängung bei 150 kHz folgt für die Eindringtiefe:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi * f * \kappa * \mu}} = \frac{0{,}06666\ m}{\sqrt{f / Hz}} = 0{,}172\ mm\ .$$

Daraus folgt für den Widerstand:

$$R' = \frac{1}{\kappa * \pi * (r_a^{\ 2} - r_i^2)} = \frac{1}{\kappa * \pi * (2\sigma r_a - \sigma^2)} = 26\ m\Omega / m\ .$$

Aufgrund der hohen Abweichung zwischen Meßwert und analytischem Wert (Ursache sind der Meßfehler des Netzwerkanalysators und die Übergangswiderstände bei der Verbindung des untersuchten Kabels) wird von einem Widerstand von 26 mΩ/m bei 150 kHz ausgegangen.

*3.3.2 Kabeltyp 2- NYM-J 3G *2,5mm²*

Für diese dreiadrige Mantelleitung wurden bei einer Frequenz von 150kHz folgende Parameter bestimmt:

C` = 86 pF/m,
L`= 490 nH/m,
R`= 25 mΩ/m,
Z_0 = 75 Ω.

*3.3.3 Kabeltyp 3- NYIF-J 3G *1,5mm²*

Stegleitungen sind unsymmetrisch aufgebaut. Es lassen sich zwei Parametersätze bestimmen, die Leitungsparameter für benachbarte Adern und die Parameter für die beiden Außenleiter. Bei einer Frequenz von 150 kHz wurden folgende Parameter gemessen:

1. Zwischen zwei benachbarten Leitern (blau-schwarz):
   C` = 29,6 pF/m,
   L`= 996 nH/m,
   Rs`= 35 mΩ/m,
   Z_0 = 183 Ω.
2. Zwischen zwei Außenleitern (PE- blau):
   C` = 20,6 pF/m,
   L`= 1,23 µH/m,
   Rs`= 38 mΩ/m,
   Z_0 = 244 Ω.

4 STÖRRELEVANTE PARAMETER UND DEREN BESCHREIBUNG

4.1 Störmechanismus bei symmetrischer Signaleinkopplung

Für die folgende Darstellung des Störmechanismus wird von einer Einkopplung der Nutzsignale zwischen Neutralleiter und Phase in ausreichender Entfernung zum Hausanschluß ausgegangen. In diesem Fall kann aufgrund der Leitungsinduktivität im höheren Frequenzbereich eine ausreichende Entkopplung zum Erdanschluß angesetzt und das Modell der symmetrischen Signaleinkopplung verwendet werden. Dieses ist annähernd auch noch für den Fall der Einkopplung zwischen Schutzleiter und Phase gültig, wenn der Schutzleiter nur an einer Stelle, dem Erdungspunkt des Gebäudes, direkt geerdet ist. Bei einer Einkopplung in direkter Nähe zum Erdungspunkt liegt eine unsymmetrische Einspeisung vor.

Die symmetrische Einkopplung der Nutzsignale des Übertragungssystems ist in Abbildung 6 dargestellt.

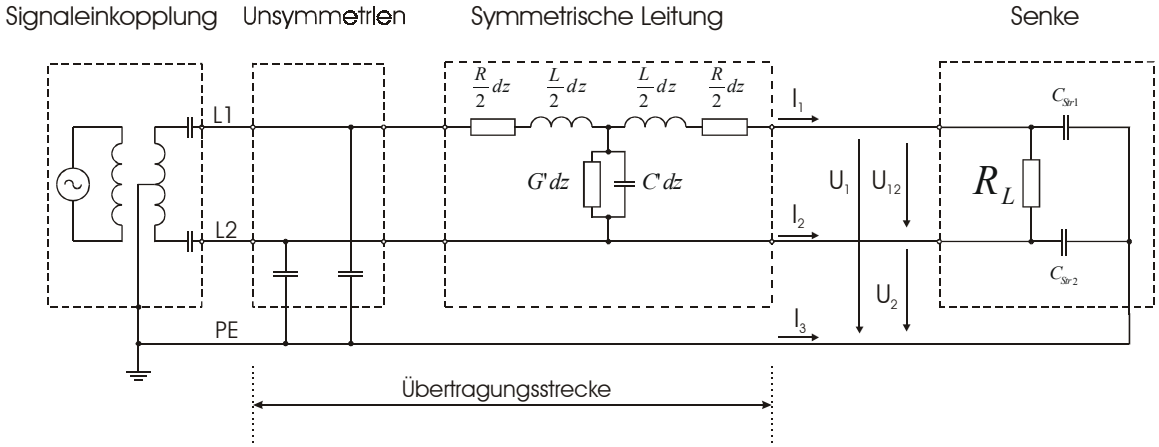


Abbildung 6 Veranschaulichung des Übertragungssystems mit Unsymmetrien

Die wichtigsten Parameter zur Beschreibung des Übertragungssystems sind:

- Wellenwiderstand,
- Dämpfung,
- Signalausbreitungsgeschwindigkeit,
- Übertragungssymmetrie,
- Nebensprechdämpfung.

Die Beschreibung durch die unsymmetrischen Spannungen U_{us} und Ströme I_{us} erlaubt eine einfache meßtechnische Bestimmung.

$$U_{us1} = U_1 \text{ , } U_{us2} = U_2 \qquad \textbf{(4)}$$

Die Beschreibung durch die symmetrischen (U_s, I_s) und asymmetrischen (U_{as}, I_{as}) Spannungen und Ströme erlaubt eine einfache Interpretation der physikalischen Effekte.

$$U_S = U_{12} = U_1 - U_2 \; ; \qquad I_S = \frac{I_1 - I_2}{2} \tag{5}$$

$$U_{as} = \frac{U_1 + U_2}{2} \; ; \qquad I_{as} = -I_3 = I_1 + I_2 \tag{6}$$

Die Größen lassen sich ineinander überführen:

$$U_{us1} = U_1 = U_{as} + \frac{U_S}{2} \quad ; \quad U_{us2} = U_2 = U_{as} - \frac{U_S}{2} \tag{7}$$

$$I_{us1} = I_S + \frac{I_{as}}{2} \quad ; \quad I_{us2} = -I_S + \frac{I_{as}}{2} \tag{8}$$

Durch die Unsymmetrien kommt es zur Ausbildung von asymmetrischen Größen, so daß eine reine symmetrische Übertragung nicht gegeben ist. Es sind deshalb zwei Arten der Signalausbreitung zu unterscheiden:

- differentielle Signalausbreitung,
- asymmetrische Signalausbreitung.

4.1.1 Differentielle Signalausbreitung

Die differentielle Signalausbreitung kann mit Hilfe der Leitungstheorie beschrieben werden. Das Leitungspaar führt Signale mit gleichem Betrag, die um 180 Grad phasenverschoben sind. Die erzeugten elektromagnetischen Felder löschen sich in größerem Abstand zum Leiterpaar aus. Das eingespeiste Signal wird durch die verlustbehafteten Elemente des Kabels gedämpft und die am Leitungsende ankommende Energie wird im Abschlußwiderstand umgesetzt. Es erfolgt eine Nutzsignalausbreitung aber keine Abstrahlung. In [34] ist ein erweitertes Modell zur Analyse von verkoppelten Netzleitungen vorgestellt, daß auf der Leitungstheorie beruht.

Andere internationale Begriffe für differentielle Signale sind

transverse signal, symmetrical signal, metallic signal.

Das durch symmetrische Ströme erzeugte Feld kann meistens vernachlässigt werden, da es schnell mit der Entfernung abnimmt und die symmetrischen Größen im Stromversorgungsnetz wesentlich stärker gedämpft werden als asymmetrische Größen.

4.1.2 Asymmetrische Signalausbreitung

Unsymmetrien im Übertragungsmedium bewirken, daß sich die Signale auf den beiden Leitungen betragsmäßig unterscheiden und sich die resultierenden Felder nicht mehr auslöschen. Es kommt zu einer asymmetrischen oder auch longitudinalen Signalausbreitung. Die resultierende unsymmetrische oder asymmetrische Funkstörspannung bewirkt einen Strom zwischen Leitung und Erde. Das mit dem asymmetrischen Strom verknüpfte Feld wird abgestrahlt. Dieser Effekt ist reziprok, so daß elektromagnetische Felder anderer Systeme Störspannungen in unsymmetrische Übertragungssysteme einkoppeln können (Nebensprechen). Es gibt viele Gründe für Unsymmetrien:

- Unsymmetrien des Senders gegenüber Erde,
- unsymmetrischer Empfänger,
- unsymmetrische Leitung gegenüber Erde.

Die Analyse der Unsymmetrie ist sehr schwierig, da die beeinflussenden Parameter und ihre zufällige Verteilung entlang des Kabels sehr variabel sind.
Eine Untersuchung der asymmetrischen Signale ist für eine Betrachtung der EMV und des Nebensprechens unerläßlich. Andere internationale Begriffe für asymmetrische Signale sind:

longitudinal signal, common mode signal, asymmetrical signal.

Asymmetrische Störströme sind schwer zu unterdrücken und bilden die Hauptursache für ungewollte Abstrahlung.

4.1.3 Umwandlung symmetrischer in asymmetrische Signale

Die Unsymmetrien im Stromkreis führen zu einer ungewollten Umwandlung des symmetrischen Nutzsignals in ein asymmetrisches Störsignal. Da in symmetrischen Systemen in der Regel keine niederohmige Verbindung zwischen Signalleitungen und Masse existiert, fließt der asymmetrische Störstrom über die parasitären Koppelkapazitäten nach Erde. Wenn diese Kapazitäten klein sind, ist der Störstrom und damit das abgestrahlte Feld bei niedrigen Frequenzen ebenfalls gering. Mit zunehmender Frequenz steigt der asymmetrische Störstrom an.
Zur Verdeutlichung ist in Abbildung 7 ein einfacher Stromkreis mit symmetrischer Einspeisung dargestellt, der an der Last unterschiedliche Streukapazitäten zur Erde aufweist. Für den Fall gleich großer Streukapazitäten C1 und C2 ist die asymmetrische Störspannung, $U_{as} = (U_1+U_2)/2$, Null. Für die gewählte Unsymmetrie ergibt sich der in Abbildung 8 dargestellte frequenzabhängige Verlauf der asymmetrischen Störspannung.

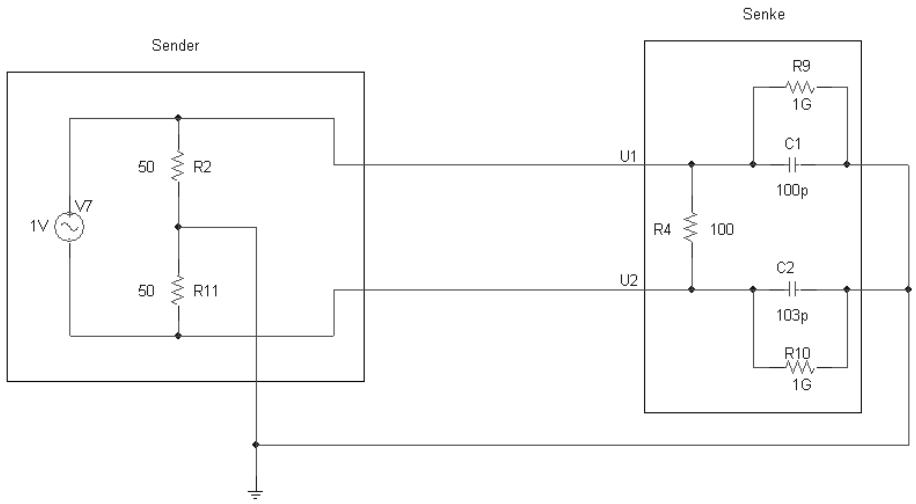


Abbildung 7 Beispielschaltung zur Berechnung asymmetrischer Störspannungen bei Unsymmetrien

Auch wenn dieses Beispiel eine ideale Leitung ohne Dämpfung annimmt, erkennt man deutlich, daß die asymmetrische Spannung mit der Frequenz schnell ansteigt. Die Gefahr der elektromagnetischen Abstrahlung führte deshalb zur Festlegung von Grenzwerten für die Funkstörspannung. Diese Grenzwerte werden in einer definierten Meßumgebung nachgewiesen [36], [37], [38].

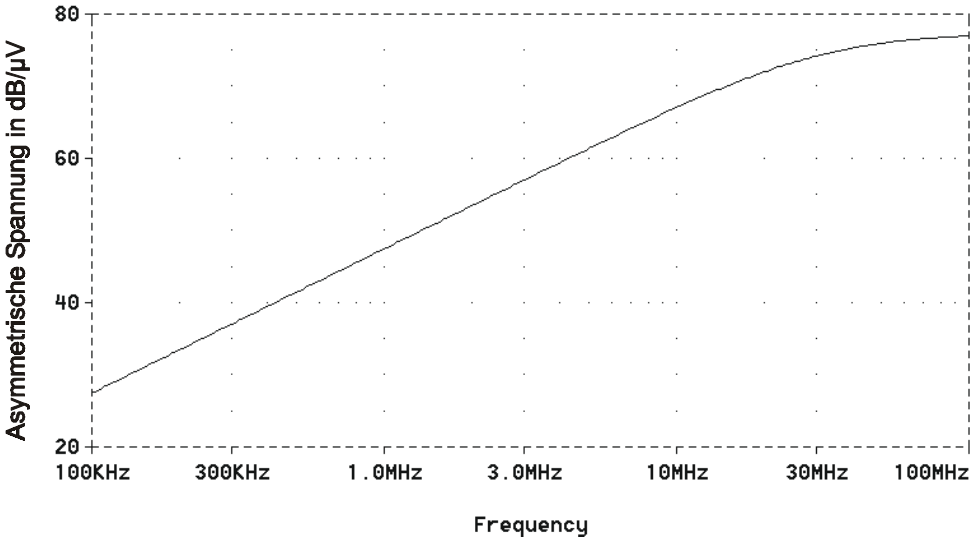


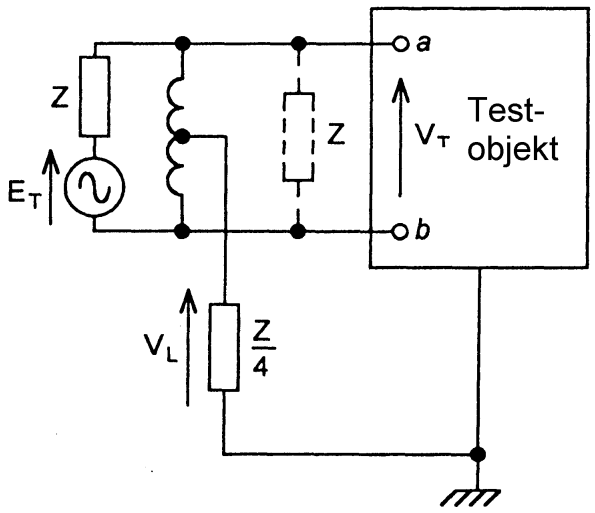
Abbildung 8 Verlauf der berechneten asymmetrischen Störspannung

Auf die Umwandlung symmetrischer Nutzsignale in asymmetrische Störspannungen bei PLC wurde bereits in [39] eingegangen, wobei der untersuchte Frequenzbereich kleiner 200 kHz war. Die Umwandlung eines symmetrischen Signals in ein asymmetrisches Signal betrug bei den Untersuchungen bis zu 20 %.

4.2 TCL/LCL - Parameter zur Beschreibung der Unsymmetrie

Als Maß für die Unsymmetrie gegen Erde und damit als Maß zur Charakterisierung der Entstehung von asymmetrischen Störungen wurden in [40] unterschiedliche Parameter definiert und in [41] die dazugehörigen Meßverfahren standardisiert. Die wichtigsten Größen sind:

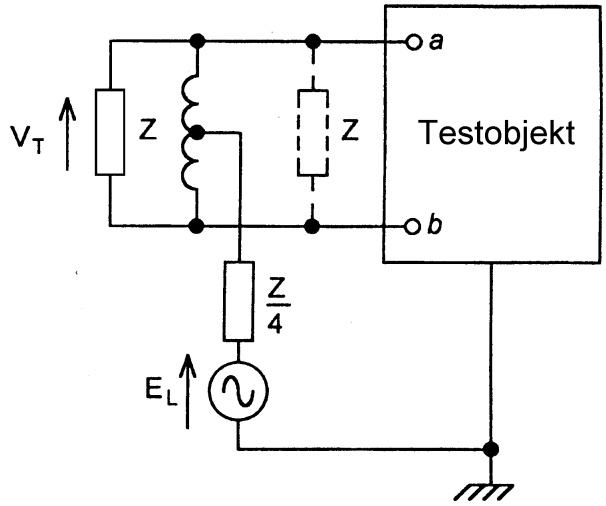
- Transverse Conversion Loss (TCL) (oder auch Ratio): TCL ist das logarithmische Verhältnis der gemessenen asymmetrischen Spannung V_L zur eingekoppelten symmetrischen Spannung E_T in dB [41].



$$TCL = 20 * \log_{10}(\frac{E_T}{V_L}) \quad dB \tag{9}$$

Der TCL gibt somit den direkten Zusammenhang zwischen ungewollter asymmetrischer Störspannung und symmetrischer Nutzspannung an. Durch die Reziprozität kann unter bestimmten Bedingungen auch der LCL zur Abschätzung der zu erwartenden asymmetrischen Störspannungen genutzt werden.

- Longitudinal Conversion Loss (LCL): “LCL is defined in Recommendation O.9 as the ratio expressed in decibel, of the value of the electromagnetic force impressed in the longitudinal path and the value of the differential mode voltage appearing at the input port of the equipment under test” [40].



$$LCL = 20 * \log_{10}(\frac{E_{L1}}{V_{T1}}) \quad dB \qquad \textbf{(10)}$$

- Longitudinal Conversion Transfer Loss (LCTL): "LCTL is defined Recommendation O.9 as the ratio expressed in decibel, of the value of the electromagnetic force impressed in the longitudinal path and the value of the differential mode voltage appearing at the output port of the equipment under test." [40]

$$LCTL = 20 * \log_{10}(\frac{E_{L1}}{V_{T2}}) \quad dB \qquad \textbf{(11)}$$

In den ITU-T Recommendation sind Meßverfahren für den LCL und den LCTL vorgeschlagen. Über einen Tastkopf wird die zu messende Leitung mit einer asymmetrischen Spannung beaufschlagt. Die resultierende symmetrische Spannung wird an der Einkoppelstelle V_{T1} (LCL) oder am Ende der Leitung V_{T2} (LCTL) gemessen. Das Meßverfahren zur Bestimmung des LCL nach [42] wird in Abschnitt 4.4.1 näher beschrieben.

4.3 Störabstrahlung

Die Umwandlung symmetrischer in asymmetrische Signale führt zu einer asymmetrischen Stromverteilung auf der Leitung und zur ungewollten Abstrahlung.
Auf diese Problematik wurde auch in der Literatur eingegangen. So ist in [44] die Situation in Kanada dargestellt, wo PLC-Systeme, die mit Frequenzen zwischen 30 kHz-200 kHz und 415 kHz-490 kHz arbeiten, seit 1983 nicht mehr lizenziert werden müssen. Es werden Meßergebnisse für die elektromagnetische Abstrahlung von 230 kV-Übertragungsleitungen, in die PLC-Signale mit 1 W eingekoppelt wurden, vorgestellt. In 10 m Abstand von der Leitung wurden Feldstärken von bis zu $90dB_{\mu V/m}$ gemessen, die im ungünstigsten Fall mit 20dB/Dekade als Funktion des seitlichen Abstands von der Leitung abnahmen. Die asymmetrische Dämpfung entlang der Leitungen betrug zwischen 0.10 und 0.42 dB/km.

In [45] wurde das Abstrahlverhalten von zwei Typen einer verdrillten Leitung und von mehreren verdrillten Leitungen meßtechnisch untersucht. Es wurde festgestellt, daß die Abstrahlung einer symmetrisch eingekoppelten Störung nahezu proportional zum Longitudinal

Conversion Loss ist. Wird das Signal gleichphasig auf mehrere parallele Leitungen aufgeprägt, steigt proportional mit der Anzahl der Leitungen die Abstrahlung. Der Parameter LCL ist somit gut zur Charakterisierung der zu erwartenden Abstrahlung geeignet.

Ein erster Ansatz zur Abschätzung der zu erwartenden Störfeldstärken bei komplizierten Leitungsstrukturen ist die Nutzung der Abstrahlcharakteristik eines λ/2-Dipolstrahlers. Nachdem der LCL an der Einkoppelstelle innerhalb des 230 V-Netzes bestimmt wurde, kann die resultierende asymmetrische Spannung an der Einspeisestelle aus der um den LCL reduzierten symmetrischen Spannung berechnet werden. Diese asymmetrische Spannung regt einen λ/2-Dipol an und man erhält eine grobe Abschätzung der zu erwartenden Feldstärken (vgl. Abbildung 9 und Abbildung 10).

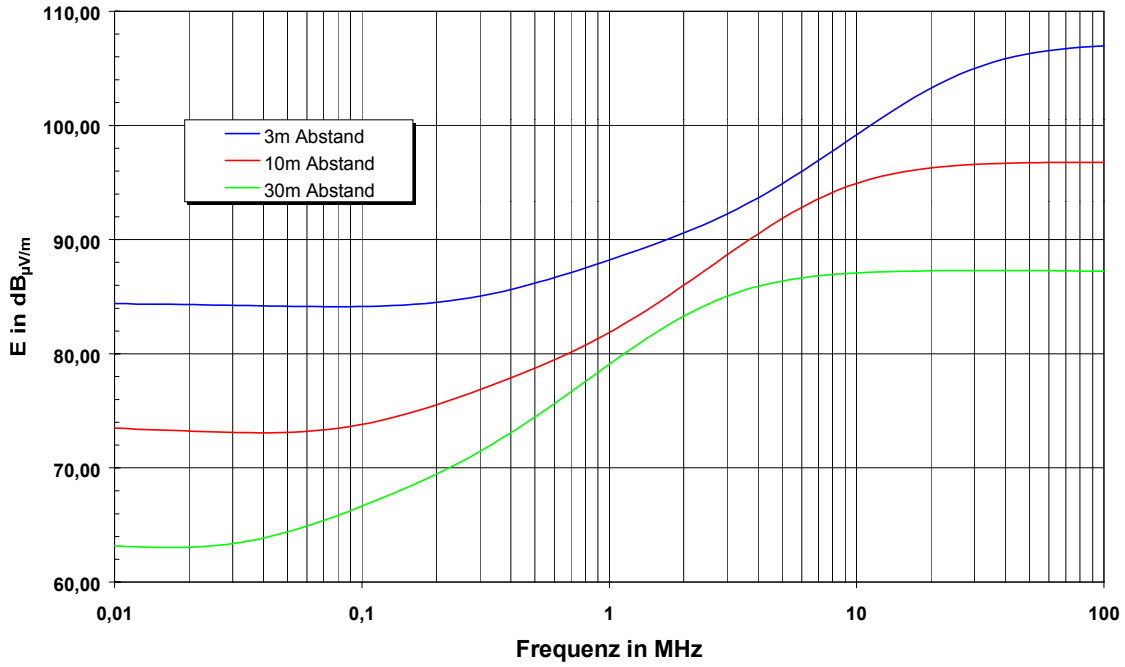


Abbildung 9 **Elektrische Feldstärke E(0,y,2.2) eines bei jeder Frequenz abgestimmten λ/2 Dipols (x,0,2.2)**

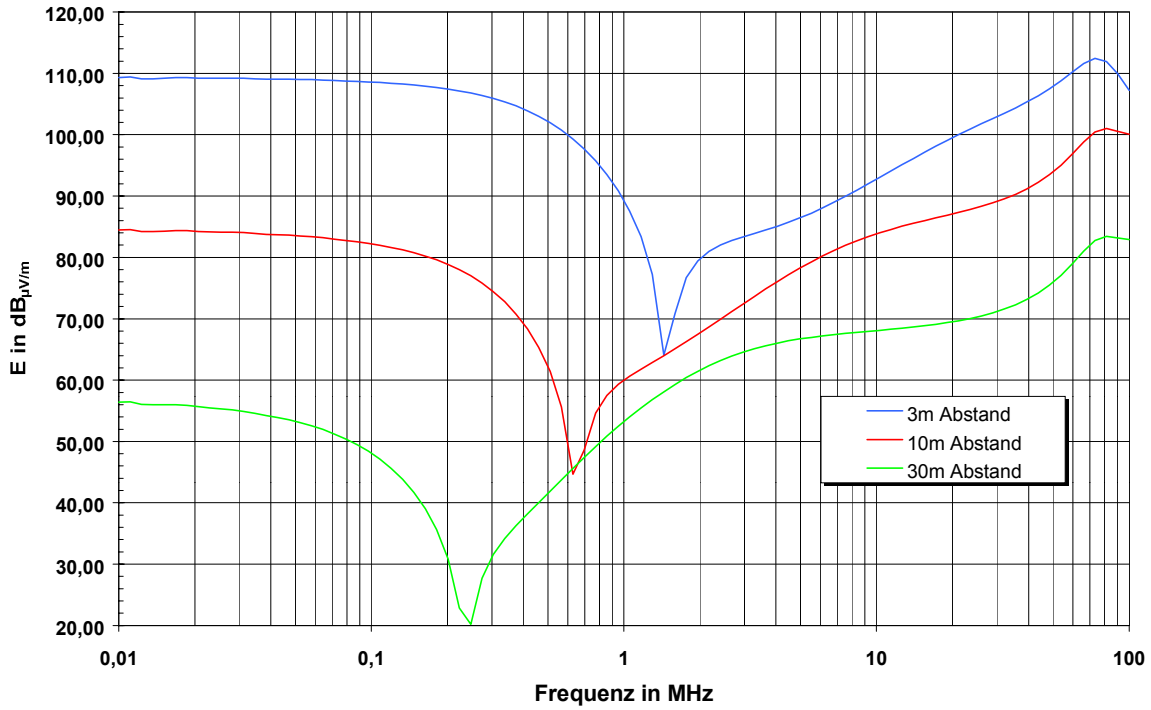


Abbildung 10 Elektrische Feldstärke E(0,y,2.2) eines bei jeder Frequenz abgestimmten λ/2 Dipols (x,0,2.2) über einer leitfähigen Ebene

Genauer kann die Abschätzung erfolgen, wenn die reale Anordnung durch eine Eindrahtanordnung ersetzt wird und mit einem numerischen Simulationsprogramm die Feldstärke an bestimmten Orten oder auch die Feldstärkeverteilung berechnet wird. Als Quelle für die asymmetrische Anregung wird erneut die um den LCL reduzierte, symmetrische Signalspannung verwendet. Durch diese Modelle können die Störfeldstärken grob abgeschätzt werden, auch wenn die Dämpfung der Struktur in einem ersten Schritt noch nicht mit einbezogen wurde. Diese kann z.B. durch die Einbeziehung der Wände als verlustbehaftetes Dielektrikum in die Berechnung oder über Korrekturfaktoren erfolgen.

Aufgrund des Zusammenhangs zwischen TLC/LCL und ungewollter elektromagnetischer Abstrahlung wird in dieser Analyse besonderer Wert auf die Messung des TCL/LCL gelegt.

4.4 Messung der störrelevanten Parameter

Zur Untersuchung der Zusammenhänge war es nötig , die Parameter asymmetrischer Störstrom, elektromagnetisches Feld und TCL/LCL zu bestimmen.

Bezüglich der Dämpfung innerhalb des 230 V-Netzes wird auf die vorhandene Literatur verwiesen, da sich dieser Parameter nur schwer bestimmen läßt. Zur Berechnung der Dämpfung muß jeweils die gleiche Lage auf der Leitungswelle genutzt werden, d.h. es sollten nur Maxima oder nur Minima in die Auswertung einbezogen werden. Die Bestimmung von den Maxima bzw. den Minima entlang eines geschlossenen Leitungssystems mit limitierter Anzahl von Abgriffen ist jedoch äußerst schwierig.

4.4.1 Messung des LCL und TCL

Der LCL/TCL wird mit einem Tastkopf nach der in [42] beschriebenen Methode bestimmt. Bei der Messung des LCL wird über den Tastkopf eine asymmetrische Spannung eingespeist und die resultierende symmetrische Spannung gemessen. Die Messung des TCL erfolgt durch Einkopplung einer symmetrischen Spannung. Der prinzipielle Aufbau des Tastkopfes ist in Abbildung 11 dargestellt.

Im Rahmen des Studie wurde ein Balun 0322[1] der Firma North Hills Signal Processing verwendet, mit dem die Messungen analog zu [42] durchgeführt werden konnte. Als Meßgerät diente ein Spektrunanalysator bzw. ein Meßempfänger mit Mitlaufgenerator.

Voraussetzung für genaue Messungen des LCL ist ein ausreichender Eigen-LCL des verwendeten Baluns. In Abbildung 12 ist der LCL des verwendeten Balun im interessierenden Frequenzbereich dargestellt. Er beträgt mindestens 70dB und ist für die Untersuchungen ausreichenden.

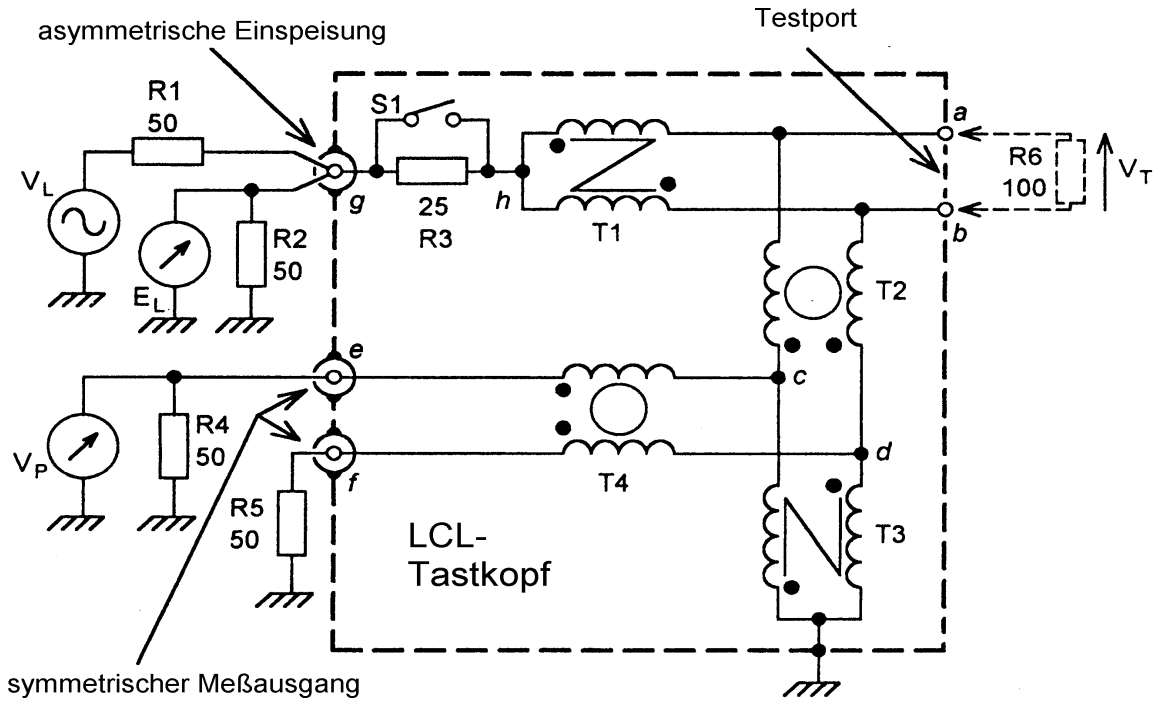


Abbildung 11 Aufbau eines Tastkopf zur Bestimmung des LCL und TCL [42]

[1] ***Mon*** bezeichnet den symmetrischen Port, ***In*** den asymmetrischen Port

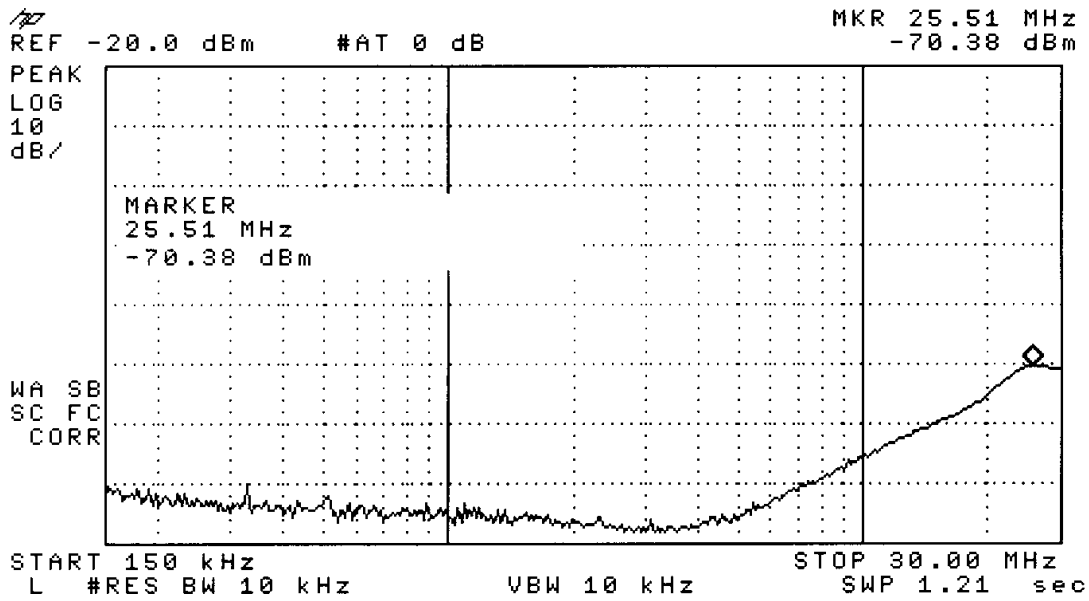


Abbildung 12 Eigen-LCL des verwendeten Balun

Um den TCL/LCL des 230 V-Netzes korrekt zu bestimmen und einen sicheren Betrieb der Meßgeräte zu gewährleisten, waren folgende Anforderungen zu erfüllen:

- ausreichende Entkopplung der 230 V-Wechselspannung am Spektrumanalysator und am Balun,
- ausreichende Symmetrie der Einkoppelvorrichtung,
- ausreichende Dämpfung von transienten Überspannungen des Stromversorgungsnetzes,
- minimale Dämpfung des Nutzsignals,
- minimale Rückwirkung der Messung der asymmetrischen Spannung.

Die weiteren Forderungen wurden durch folgende Maßnahmen erreicht:

- grobe Entkopplung der 230 V-Wechselspannung durch zwei Kondensatoren mit ausreichender Spannungsfestigkeit und hinreichend hoher Resonanzfrequenz,
- Kalibrierung der Meßeinrichtung, Überprüfung der Symmetrie,
- Zusätzliche Entkopplung (100dB) des 50Hz Signals durch Begrenzer am Generatorausgang und RF-Eingang des Spektrumanalysators.

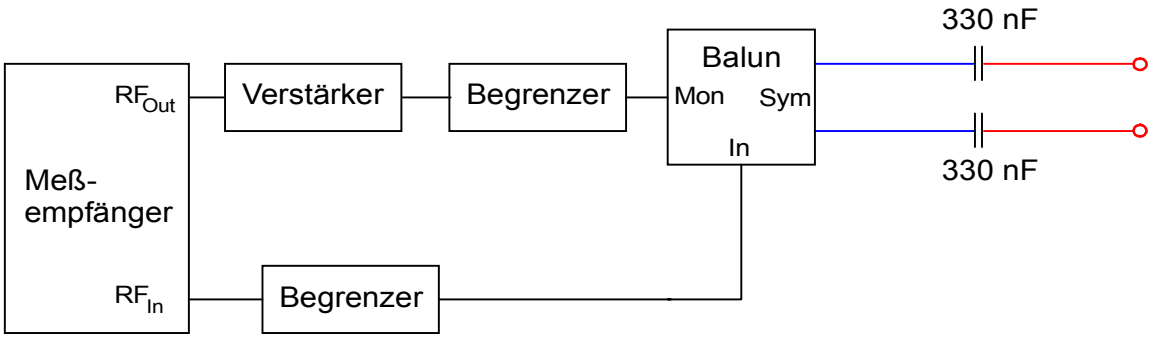


Abbildung 13 Einkoppelvorrichtung zur Messung des TCL

In Abbildung 13 ist ein Beispiel für die praktische Messung des TCL dargestellt.

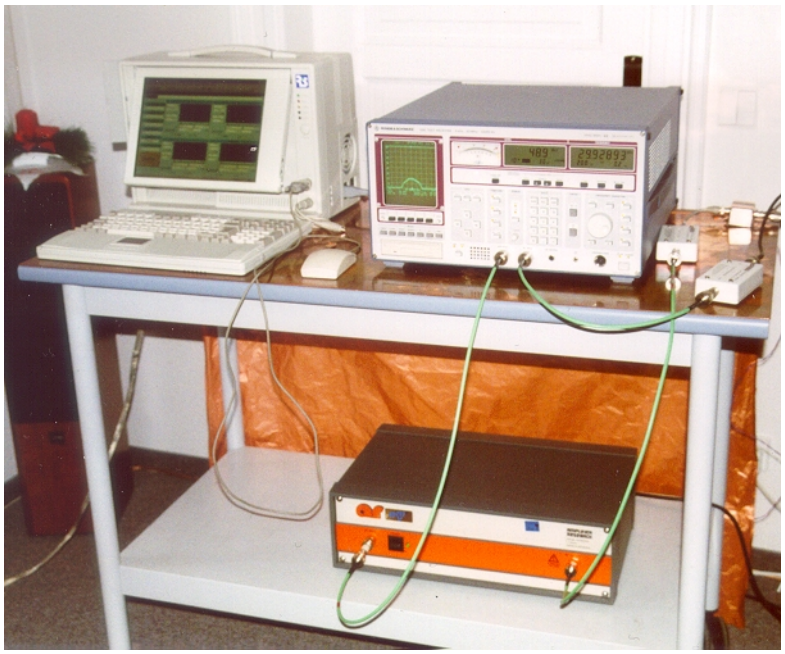


Abbildung 14 Meßaufbau zur Messung des TCL

Zur Schaffung einer Bezugserde für die Messung der asymmetrischen Spannungen wurde der Meßaufbau auf eine Kupferfläche von rund 2,3m^2 aufgebaut. Diese wurde normalerweise an der Meßstelle über ein Erdungsband mit dem Heizungssystem verbunden. Der Aufbau erlaubte eine ausreichend genaue Messung der asymmetrischen Spannungen, wie Messungen in folgenden Varianten belegten:

1. Massung des Baluns über Schutzleiter und Messung ohne Bezugsfläche,
2. Massung über Schutzleiter und unterschiedlich große Bezugsfläche,
3. Massung über Schutzleiter + Heizungssystem und unterschiedlich große Bezugsfläche.

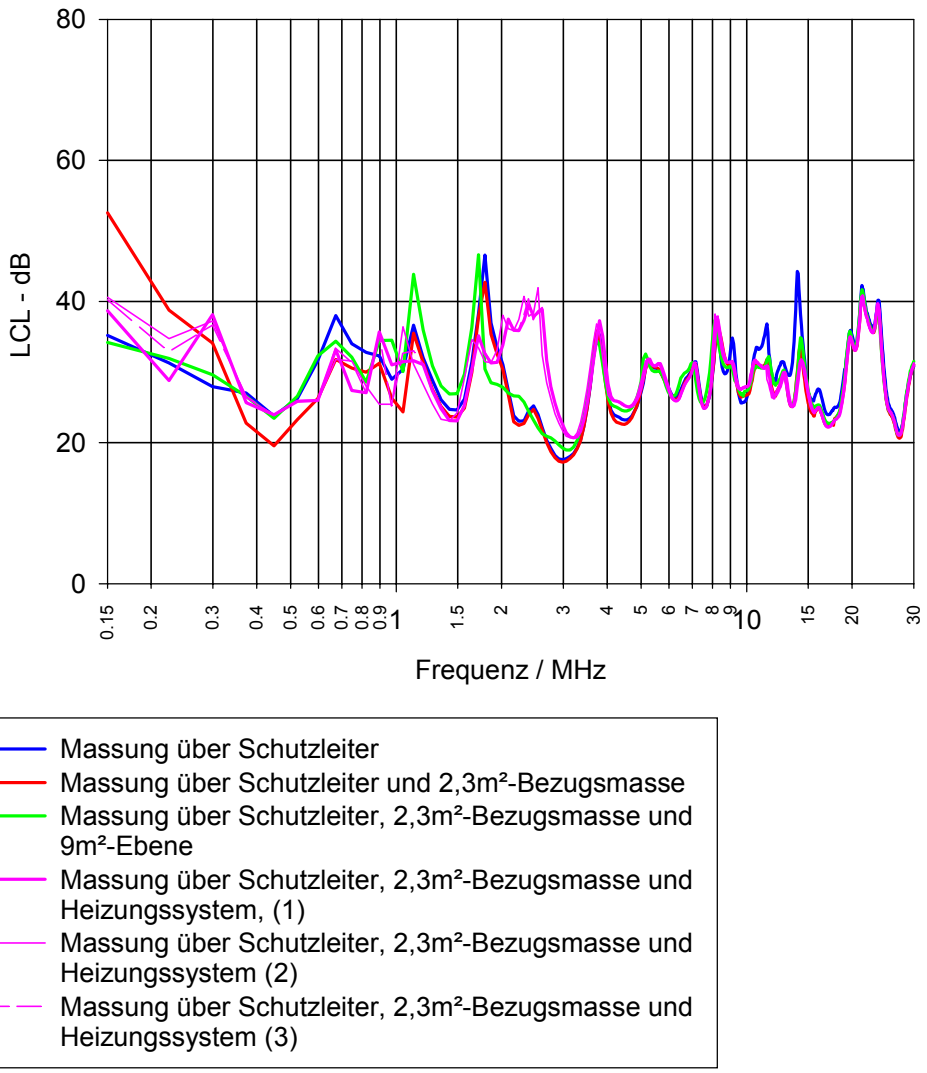


Abbildung 15 Einfluß der Massung auf die Messung des LCL

Die Ergebnisse sind in Abbildung 15 dargestellt und zeigen, daß der gewählte Meßaufbau eine ausreichende Bezugsfläche für die Messung der asymmetrischen Größen besitzt.

4.4.2 Störstrom

Die Messung des Störstroms erfolgte mit einer HF-Stromzange. Da die Anwendung der Stromzange den freien Zugriff auf die Leiter des zu untersuchenden Systems erfordert, kann dieses Messung nicht in jedem Fall angewendet werden. Sie wird voraussichtlich auf zugängliche Versuchsaufbauten und die Einspeisestelle begrenzt sein.

4.4.3 Elektromagnetisches Feld

Die Feldstärken wurden mit einer elektrischen Stabantenne in z-Richtung oder mit einer magnetischen Rahmenantenne in allen Polarisationsrichtungen gemessen. Wenn möglich erfolgten Messungen in 3 m und 10 m Abstand von den Leitungen. Anderenfalls wurde in 1 m Abstand von der Leitung gemessen, jedoch in ausreichendem Abstand von der Einkoppelstelle.

In den folgenden Abschnitten sind die Untersuchungsergebnisse erläutert. Die ausführlichen Ergebnisse können den entsprechenden Meßberichten entnommen werden.

5 UNTERSUCHUNGEN AN EINEM MODELLNETZ

Es wurde ein künstliches Stromnetz auf den Zusammenhang von LCL, TCL, symmetrischer und asymmetrischer Spannung, Stromverteilung und Verteilung der elektrischen und magnetischen Feldstärken untersucht, um so den Zusammenhang dieser Größen zu analysieren und die störrelevanten Größen zu verifizieren. Das Netz wurde entsprechend den Installationsvorschriften und definierter geometrischer Anordnung entworfen. Der Aufbau wurde in der EMV-Meßhalle der RegTP in Kolberg installiert und vermessen. Aufgrund der sehr guten Bezugsmasse und der geringen Höhe, in der die Kabel verlegt wurden, können die Meßergebnisse nicht direkt auf reale Anordnungen übertragen werden.

Das definierte Netz simulierte die Installation von zwei Wohnräumen, Wohnraum 0 - Teilnetz S0 und Wohnraum 1 - Teilnetz S1 sowie der Parallelschaltung dieser beiden Netze - S01, die von einer zentralen Wohnungsverteilung gespeist wurden. Die Stromkreise sowie die Meßpunkte für die Feldstärke, die asymmetrische und die symmetrische Spannung sind in Abbildung 16 dargestellt.

Es wurde Kabel vom Typ NYM-J 3G 3*1,5mm^2 verwendet. An der Einspeisung wurden die Stromzweige mit zwei 16A-Sicherungsautomaten abgesichert. Die Räume waren entsprechend ihrer Größe mit 4 bzw. 5 Steckdosen bestückt und in jedem Raum befand sich ein Lampenauslaß. Die Lampenstromkreise waren mit Ein/Aus-Schalter bestückt, wobei die Lampen durch 560 Ω Widerstände simuliert wurden.

Die Leitungen wurden in Kunststoffrohren ca. 0,33 m über dem Boden der Absorberhalle (Groundplane) verlegt. Holzstützen für die Kunststoffrohre befanden sich in ca. 2 m Abstand voneinander. Die Lampenauslässe wurden aus praktischen Gründen nur in einer Höhe von 1,7 m installiert, so daß die Messungen einfach durchführt werden konnten.

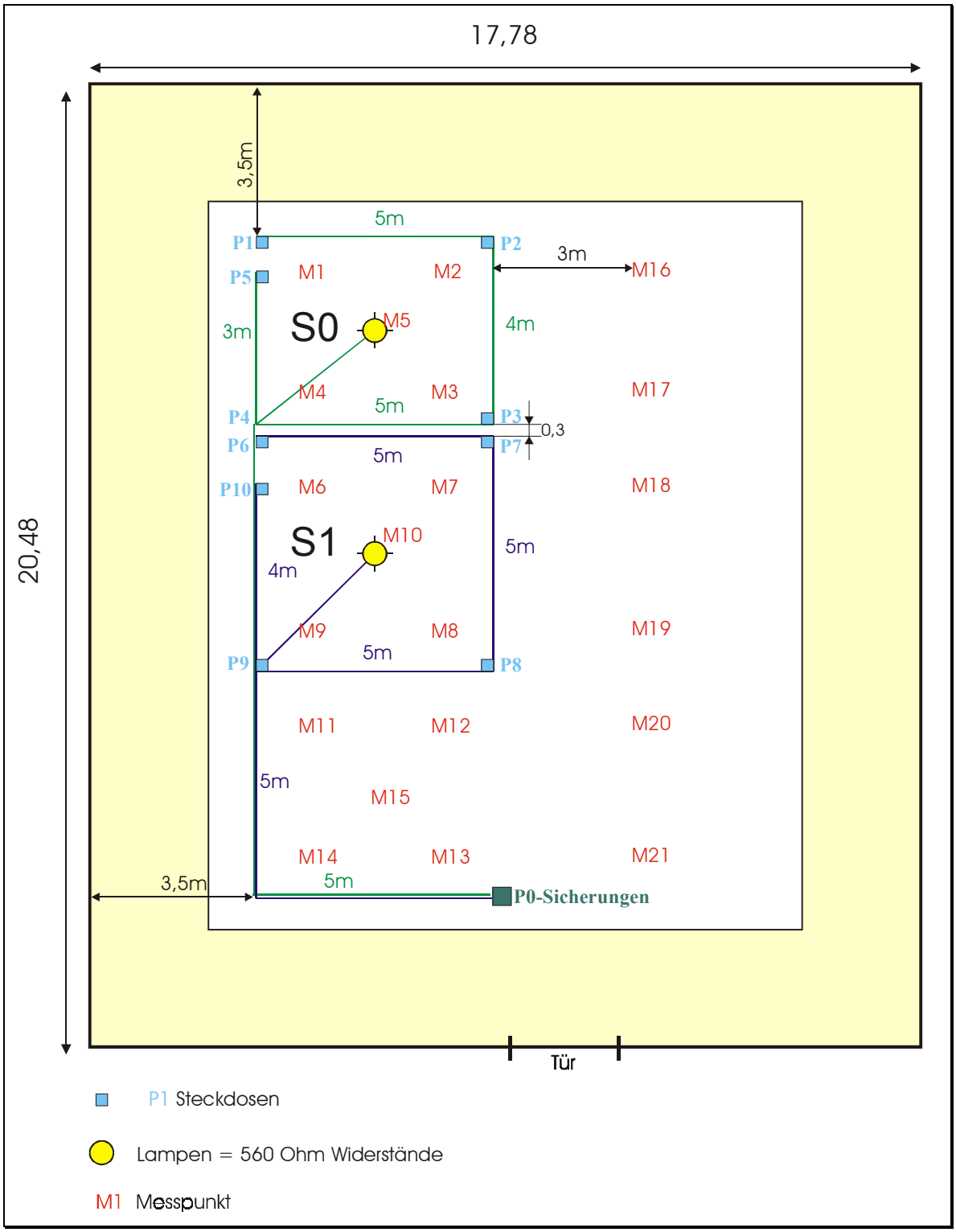


Abbildung 16 Versuchsaufbau in Kolberg

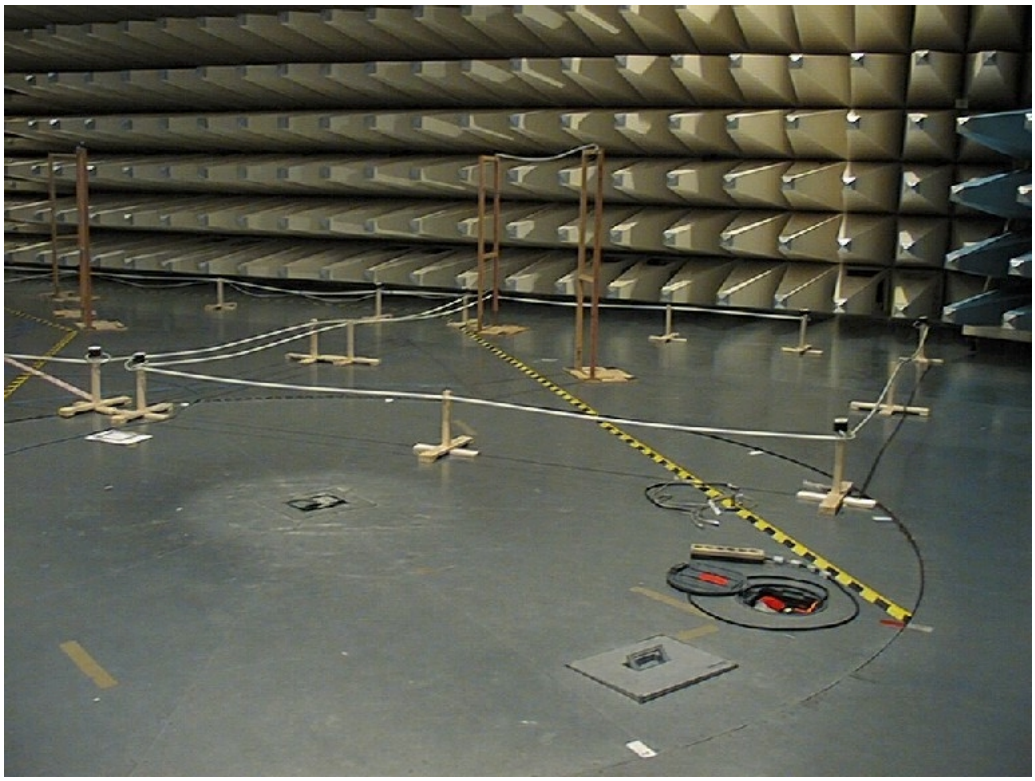


Abbildung 17 Aufbau vom Ende der Halle aus gesehen

In den Abbildung 17 und Abbildung 18 ist der Aufbau gezeigt.

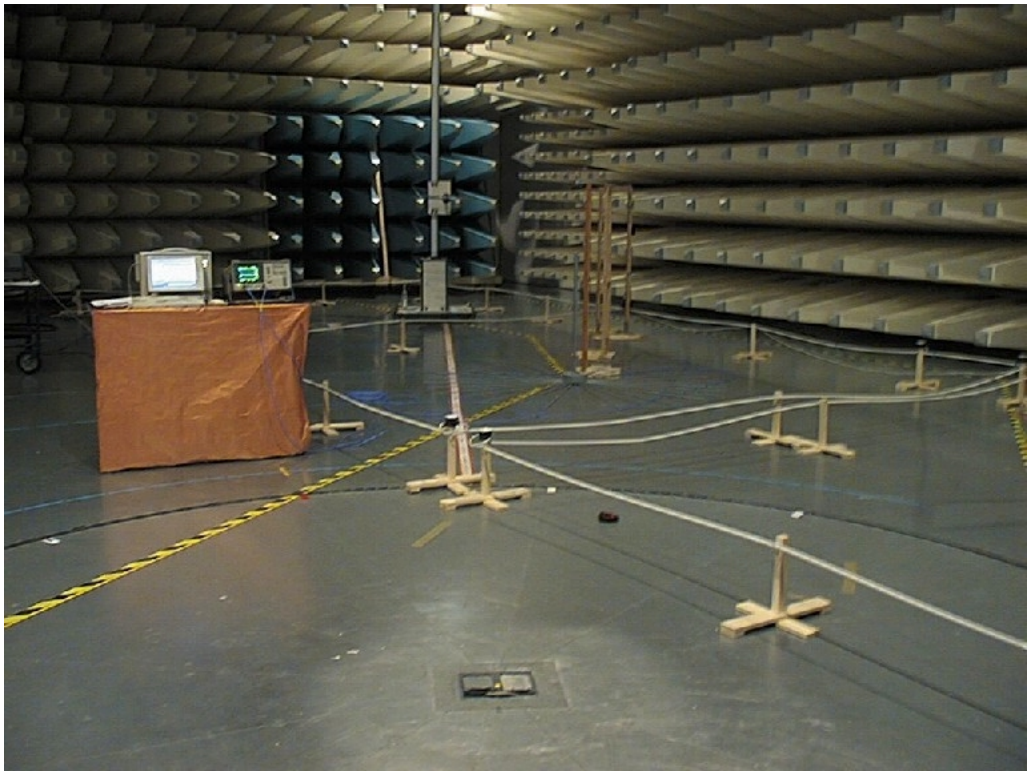


Abbildung 18 Ansicht vom Meßaufbau

Die Abbildung 19 zeigt ein Detail der Verkabelung. Die Montage der Steckdosen und Verteiler erfolgte nach dem Stand der Technik, d.h. mit Schneidklemmtechnik. In den Klemmdosen wurden die einzelnen Kreise über Schneidklemmverbindungen verzweigt. Dazu wurde innerhalb der Klemmdosen eine zusätzliche Kabellänge von etwa 1,5*Durchmesser der Klemmdose verwendet. Die Steckdosen waren mit zusätzlichen Klemmkontakten für eine Verteilung der Leitung ausgestattet. Dadurch konnten die Steckdosen einfach in die Leitung eingeschleift werden.

Abbildung 19 Detail der Verkabelung

Diese Anordnung wurde mit CONCEPT modelliert und berechnet. Zur Vermeidung von numerischen Fehlern wurde die vordere Schirmwand vernachlässigt. Die Leitungen wurden im Modell als Eindrahtanordnungen nachgebildet.

Die vollständigen Ergebnisse der Messungen sind im Meßbericht „Abstrahlverhalten eines künstlichen Netzes“ [55] festgehalten. An dieser Stelle werden lediglich die wesentlichen Ergebnisse hervorgehoben und diskutiert.

5.1 Zusammenhänge bei der Einspeisung ins Teilnetz S0

In diesem Abschnitt werden die Zusammenhänge zwischen den Parameter LCL, U_{asym}, U_{sym}, I_{asym}, Z_{sym}, Z_{asym} dargestellt. Das Modell der Störbeeinflussung, welches von einem direkten Zusammenhang von LCL und Störfeldstärken ausgeht, wird überprüft, wobei vorrangig die Verhältnisse an der Speisestelle P0 diskutiert werden.

5.1.1 Asymmetrische Spannung an der Einspeisestelle P0

Die asymmetrischen Spannungen wurden mit einem Tastkopf bei unterschiedlichen Einkopplungsarten gemessen und in Abbildung 20 dargestellt. Bei der asymmetrischen Einkopplung ist eine deutliche Resonanz bei 1 MHz zu erkennen, die sich bei der symmetrischen Einkopplung nicht wiederfindet. Dieses Minimum fällt mit einem Minimum der symmetrischen Impedanz zusammen (vgl. Abschnitt 5.1.4). Der Schutzleiter des dreiadrigen Kabels war am Einspeisepunkt direkt mit der Bezugsebene verbundenen. Demzufolge wurden die beiden Phasen L1 und L2 symmetrisch reaktiv belastet.

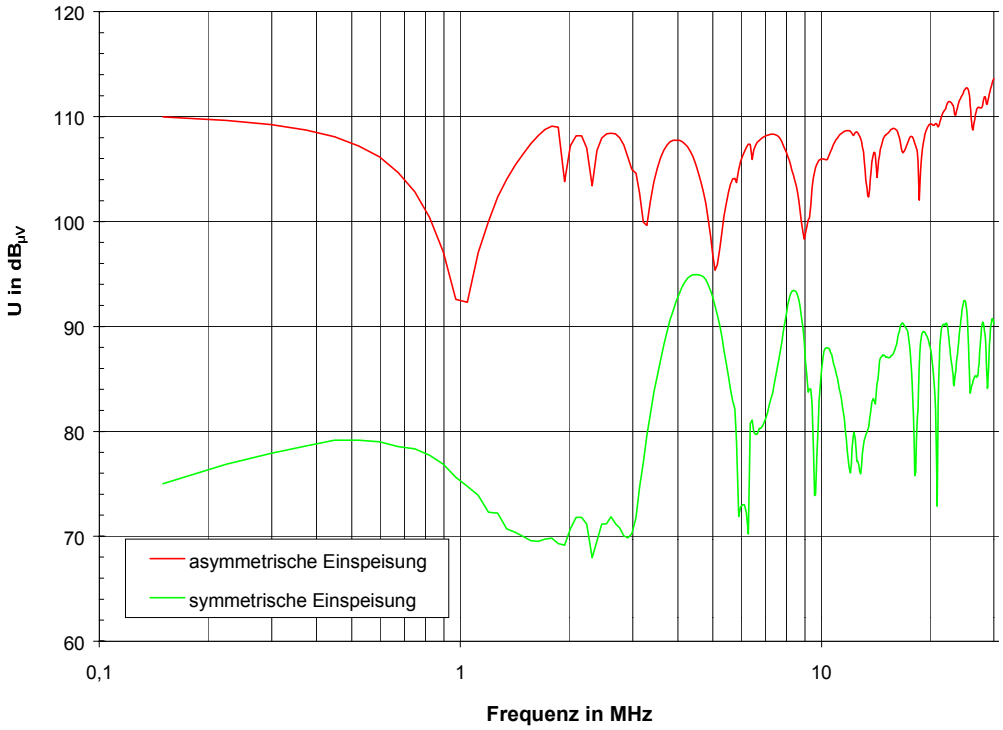


Abbildung 20 Asymmetrische Spannung bei unterschiedlicher Einkopplung in S0 am Punkt P0

Da die asymmetrische Spannung bei symmetrischer Einspeisung, die proportional zur Unsymmetrie des Netzes ist, diesen Verlauf nicht aufweist, kann dieses Minimum nicht mit einer erhöhten Unsymmetrie des Netzes gleichgesetzt werden.

5.1.2 Symmetrische Spannung an der Speisestelle P0

In Abbildung 21 sind die gemessenen symmetrischen Spannungen dargestellt. Bei der symmetrischen Einkopplung ist erneut eine Resonanz bei 1MHz zu erkennen. An dieser Stelle hat die symmetrische Impedanz ein Minimum (vgl. Abschnitt 5.1.4).

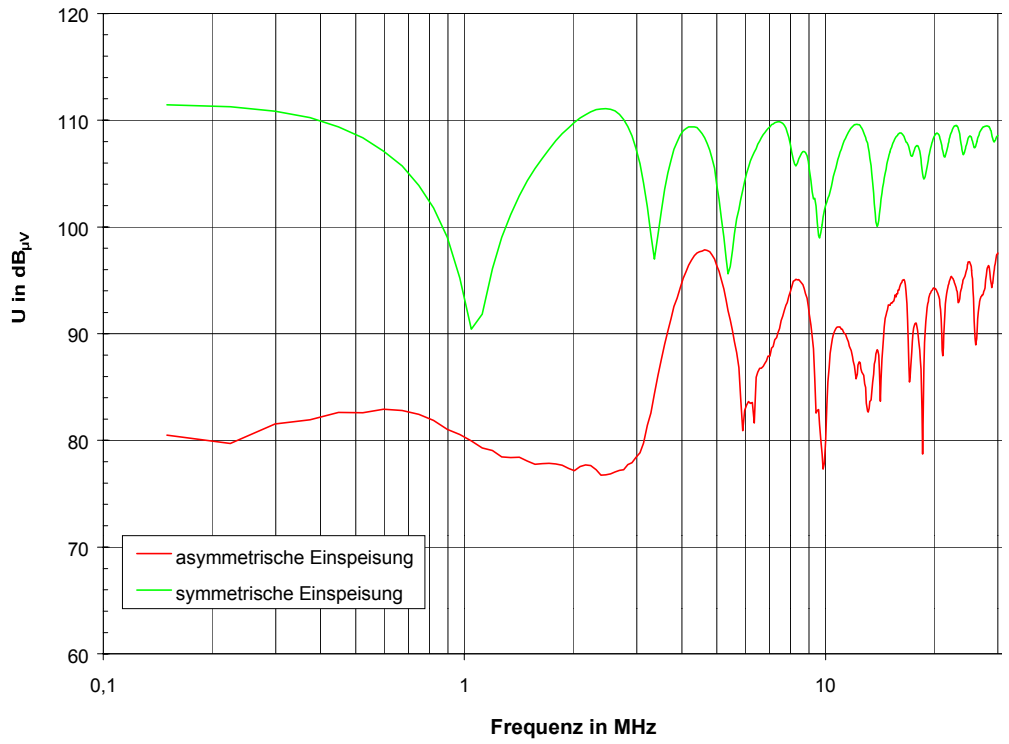


Abbildung 21 Symmetrische Spannung bei unterschiedlicher Einkopplung in S0 am Punkt P0

Anhand des Verlaufs der symmetrischen Spannung bei asymmetrischer Einspeisung läßt sich analog zu den Aussagen im vorangegangenen Abschnitt festhalten, daß diese Resonanz nicht mit einem Maximum der Unsymmetrie gleichgesetzt werden kann.

5.1.3 Asymmetrischer Strom an der Stelle P0 bei Einspeisung in S0

In Abbildung 22 sind die mit der Stromzange über alle drei Leiter des dreiadrigen Kabels gemessenen asymmetrischen Ströme an der Stelle P0 dargestellt. Es ist zu beachten, daß bei der symmetrischen Einspeisung die Werte bei Frequenzen unter ca. 1 MHz unterhalb der Rauschgrenze des Spektrumanalysators lagen.

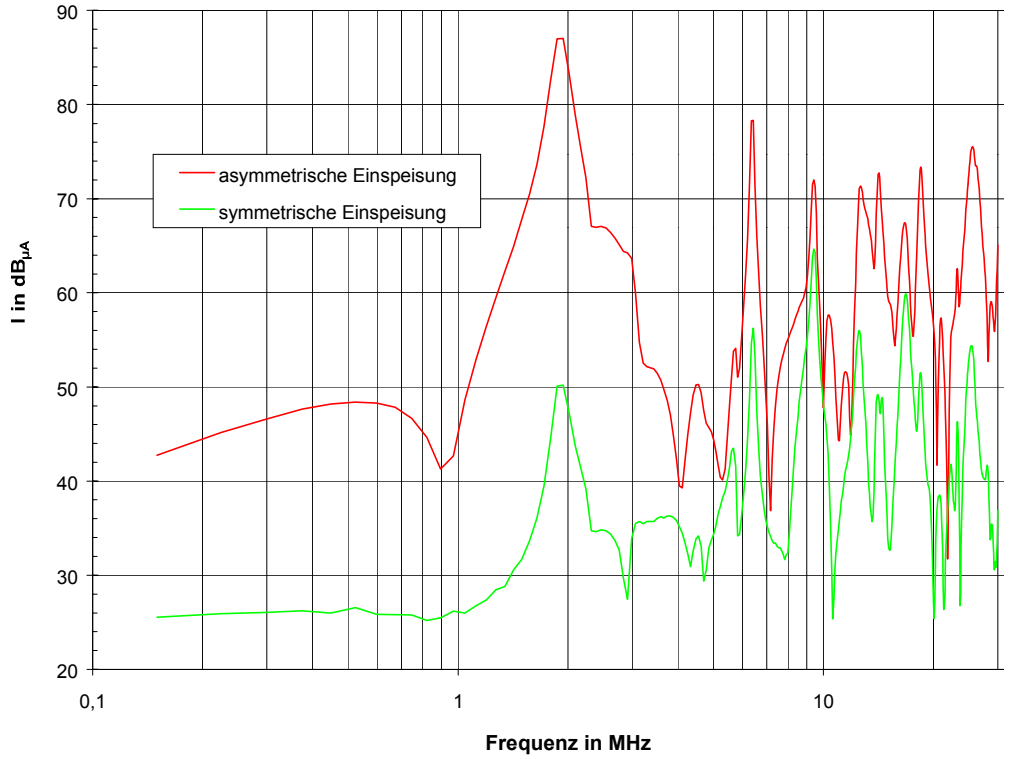


Abbildung 22 Am Punkt P0 gemessener asymmetrischer Strom bei Einkopplung in S0

Bei der asymmetrischen Einspeisung tritt bei rund 1 MHz ein Minimum im Verlauf auf. Dieses Minimum fällt ebenfalls mit einer geringen symmetrischen Impedanz zwischen L1-PE und L2-PE zusammen. Infolge der geringen Impedanz bei konstantem Innenwiderstand der Spannungsquelle bricht die asymmetrische Spannung zusammen und der größte Teil des Stromes der Leitern L1 und L2 fließt über PE zurück. Dieser Strom liefert keinen Beitrag zum asymmetrischen Strom über alle drei Adern. Aufgrund der geringeren asymmetrischen Spannung wird dieser asymmetrische Strom ebenfalls kleiner.

5.1.4 Symmetrische Eingangsimpedanz am Punkt P0

In Abschnitt 3.3 wurden die Parameter des verwendeten Kabels NYM-J 3G 3*1,5mm^2 bereits diskutiert. Die Installation kann für höhere Frequenzen nicht mehr als elektrisch kurz angesehen werden. Zur Berechnung der Ströme und Spannungen entlang der Leitung wird im folgenden die Leitungstheorie verwendet. Durch die Abhängigkeit der Ausbreitungs-konstanten von der Frequenz ergeben sich frequenzabhängige Eingangsimpedanzen sowie Strom- und Spannungsverteilungen. Die Phasengeschwindigkeit und die Wellenlänge für die

symmetrische Ausbreitung ist von der relativen Dielekrizitätskonstanten ε_r des Isolationsmaterials abhängig: $\lambda = c/(\sqrt{\varepsilon_r} f)$.

Aufgrund der maximalen Kabellänge von der Speisestelle bis zum Leitungsende von 29 m kann man für kleine Frequenzen (f=150 kHz, $\lambda \approx$ 1154 m) in guter Näherung von einem elektrisch kurzen System ausgehen. In diesem Fall ergibt sich eine rein kapazitive Eingangsimpedanz mit der symmetrischen Kapazität C, d.h. $Z_{sym} = \frac{1}{\omega j \omega C} \approx -j288\,\Omega$. Mit steigender Frequenz führen insbesondere Laufzeiteffekte, dielektrische Verluste und die Serien-Induktivität zur Veränderung der Verhältnisse, so daß die statische Näherung nicht mehr zulässig ist. Da an den Leitungsenden und entlang der Leitung keine Anpassung vorliegt, ergeben sich ortsabhängige Strom- und Spannungsverteilungen. Bei Resonanzfrequenzen von ca. $\lambda/4$ der Anordnung treten ein Maximum des Eingangsstroms und ein Minimum der Eingangsspannung am Speisepunkt auf, d.h. die symmetrische Impedanz wird minimal. Vernachlässigt man in einem ersten Schritt die Verzweigungen und geht von einer Leitungslänge von 29 m aus, so liegt das erste Minimum für die symmetrische Eingangsimpedanz bei einer Frequenz von rund 1 MHz. Mit zunehmender Frequenz ergeben sich weitere Maxima und Minima.

Aus den gemessenen Werten bei symmetrischer Einkopplung läßt sich die symmetrische Eingangsimpedanz nach

$$Z_{sym} = \frac{U_{sym}}{U_{Quell} - U_{sym}} * 50\,\Omega \qquad \textbf{(12)}$$

berechnen. Aus der geometrischen Anordnung und den Kabelparametern läßt sich die Eingangsimpedanz über die Leitungstheorie ebenfalls bestimmen. In Abbildung 23 sind die beiden Impedanzen in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt.

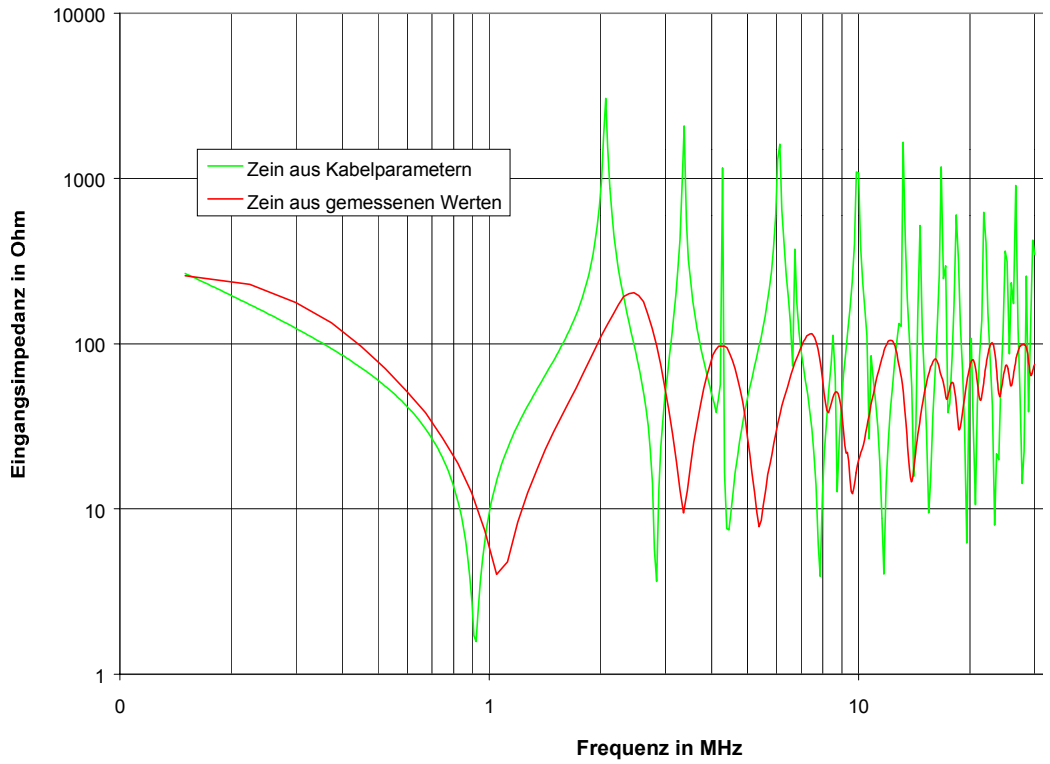


Abbildung 23 Vergleich des gemessenen und berechneten Betrages der symmetrischen Eingangsimpedanz am Punkt P0

Der prinzipielle Verlauf von gemessener und berechneter Eingangsimpedanz stimmt überein. Folgende Faktoren verursachen Unterschiede in der Höhe der Resonanz sowie eine Verschiebung der Resonanzfrequenz:

- Abweichungen der Leitungslängen,
- Vernachlässigung der zusätzlichen Leitungslänge in den Steckdosen und im Sicherungskasten,
- Beeinflussung der Leitungskapazität durch die zusätzliche Kapazität über die Groundplane,
- Verluste (ohmsche und dielektrische Verluste, Verluste durch Abstrahlung),
- Vernachlässigung der Unsymmetrie.

5.1.5 Asymmetrische Impedanz

Der Schutzleiter des Netzes war an der Stelle P0 unmittelbar mit der Groundplane der Absorberhalle verbunden. Das führte zu einer erhöhten Kapazität zwischen dem Massepunkt der Speisestelle und den beiden Leitern L1 und L2. Ein beträchtlicher Strom über PE war die Folge. Dieser Strom stellt einen symmetrischen Strom auf dem Kabel dar, der bezüglich des Abstrahlverhaltens der Leiteranordnung nur einen vernachlässigbaren Beitrag liefert. Würde der „asymmetrische“ Strom fälschlich nur unter Einbeziehung der beiden Leiter L1 und L2 gemessen, so würde sich dieser um den Rückstrom auf dem PE-Leiter von dem Strom unterscheiden, der mit einer Stromzange über alle drei Adern gemessen wird. Für die

Beurteilung der elektromagnetischen Abstrahlung ist aber der asymmetrische Strom über alle drei Adern ausschlaggebend und wurde am Aufbau gemessen.

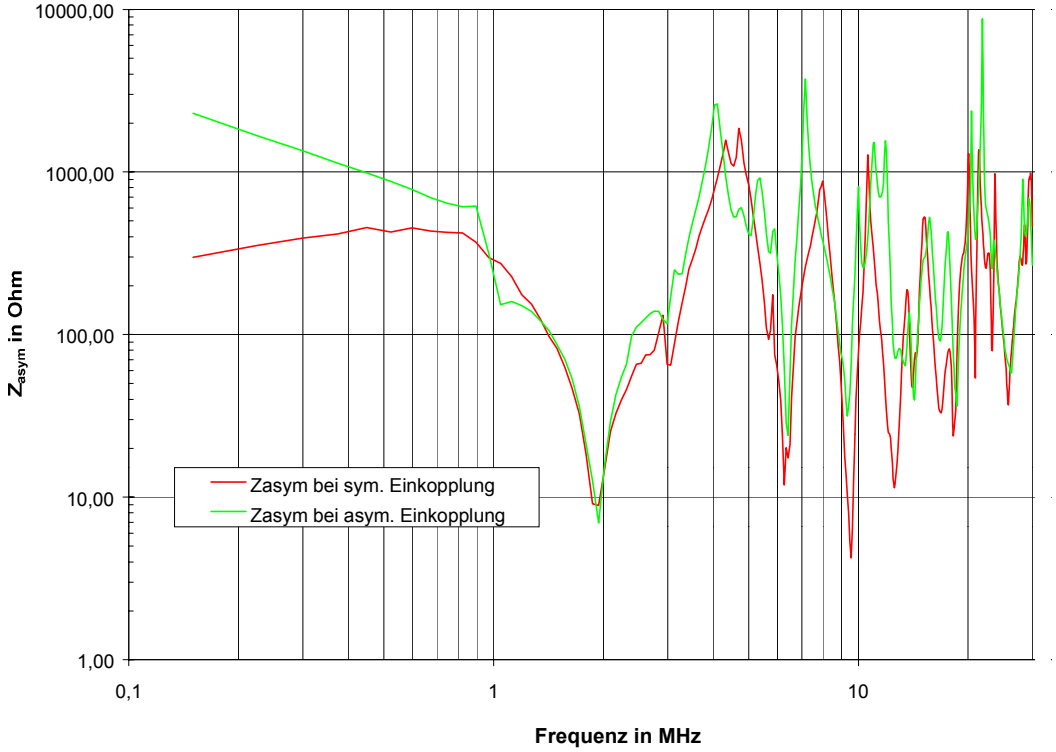


Abbildung 24 Asymmetrische Eingangsimpedanz der Anordnung bei unterschiedlichen Einkopplungsarten

Aus den Meßdaten bei symmetrischer und asymmetrischer Einspeisung wurden jeweils die asymmetrischen Impedanzen berechnet und in Abbildung 24 dargestellt. Die beiden Einkopplungsarten unterscheiden sich vor allem durch einen zusätzlichen asymmetrischen Abschlußwiderstand (bei der symmetrischen Einkopplung). Dieser führt zu einer zusätzlichen asymmetrischen Belastung an der Stelle P0 und zu einem veränderten Verhalten der Leitungsstruktur.

Die deutlichen Abweichungen unterhalb von 1 MHz ergeben sich durch die vom Rauschen beeinträchtigte Messung des asymmetrischen Stromes bei symmetrischer Einspeisung. Aus der Kurve bei asymmetrischer Einspeisung läßt sich im unteren Frequenzbereich die Kapazität[1] der Anordnung gegen Groundplane bestimmen. Sie beträgt in etwa 360 pF und stimmt gut mit dem analytisch berechneten Wert von 341 pF und dem mit CONCEPT ermittelten Wert von 337 pF überein.

[1] Der Wert wurde unter Vernachlässigung des Erdleiter, d.h. bei einer Zweidrahtanordnung berechnet. Das Ergebnis ist eine Teilkapazität, die gegenüber der Gesamtkapazität bei Berücksichtigung des Erdleiters stark reduziert ist. Diese Teilkapazität stellt bei niedrigen Frequenzen für den asymmetrischen Strom die Eingangsimpedanz dar.

5.2 Stromverteilung des Stromkreis S0

Die Stromverteilungen wurden bei der Einspeisung an unterschiedlichen Punkten gemessen. Die vollständigen Ergebnisse sind dem Meßbericht zu entnehmen. Mit CONCEPT wurde die Anordnung S0 durch eine mit 1 V asymmetrisch angeregte Drahtstruktur modelliert und die Stromverteilung bei 30 MHz berechnet. Die Ergebnisse der numerischen Berechnung wurden auf die gemessene asymmetrische Spannung normiert und zusammen mit den gemessenen Werten in Abbildung 25 dargestellt.

Bei der Berechnung ergeben sich stärker ausgeprägte Maxima und Minima, da die auftretenden Verluste bei der Modellierung vernachlässigt wurden. Die Extremwerte treten an unterschiedlichen Stellen auf. Als Ursache sind zu nennen:

- eine unterschiedliche Leitungslänge,
- die nicht berücksichtigten Steckdosen (zusätzliche Leitungslänge und Sprünge im Wellenwiderstand),
- eine zusätzliche asymmetrische Belastung durch die Stromzange.

Die asymmetrische Belastung durch die Stromzange führt insbesondere auch dazu, daß an den Enden der Leitung ein asymmetrischer Strom gemessen wurde, obwohl der Strom hier theoretisch Null ist.

Durch die Berechnung werden die realen Verhältnisse nur grob widergespiegelt. Die während der Messung ausgeschalteten Lampen führen zu einer erhöhten Unsymmetrie dieses Zweigs und so wurde im Vergleich zum weiter ausgedehnten Stromkreis des modellierten Raums ein höherer Strom gemessen. In der Berechnung hingegen fließt auf dem längeren Zweig ein höherer Strom.

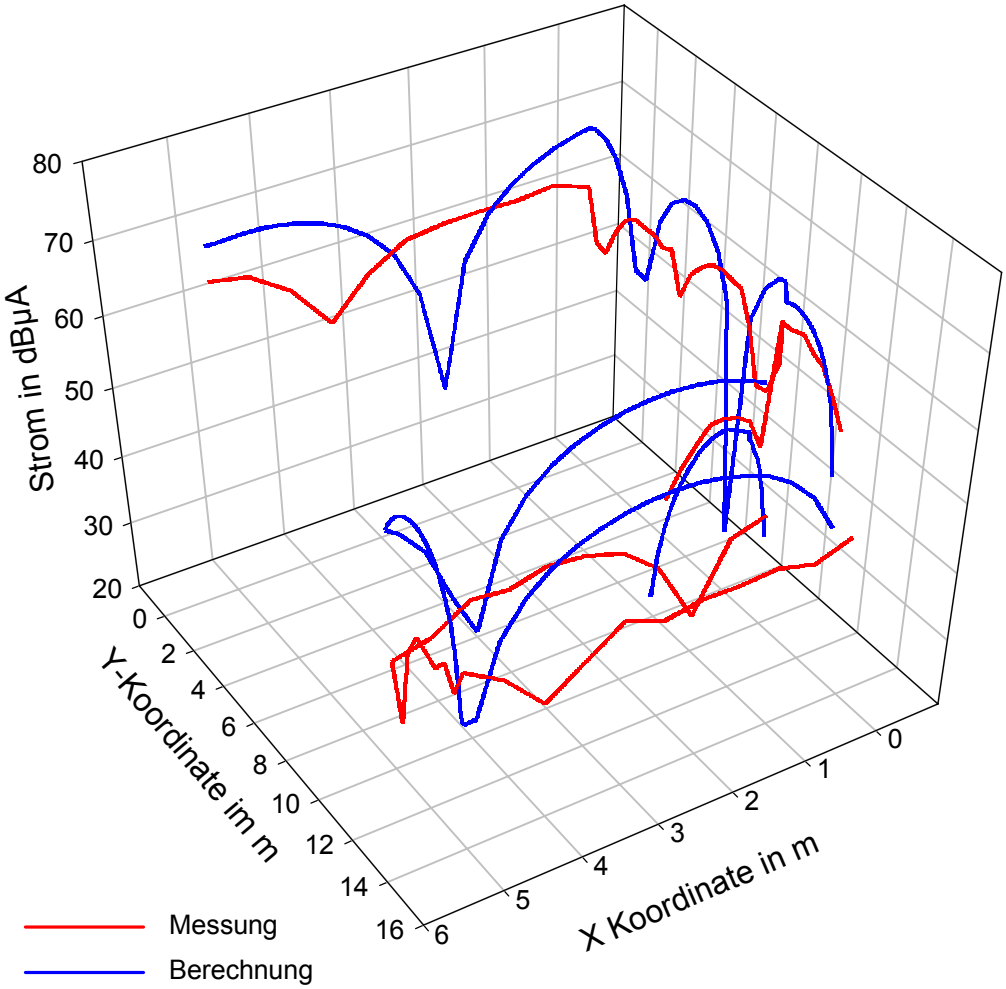


Abbildung 25 Vergleich von gemessener und berechneter Stromverteilung des Stromkreis S0 bei Einspeisung am Punkt P0 [0,0,0.3] bei einer Frequenz von 30 MHz,

Aus der Stromverteilung läßt sich die Dämpfung für den asymmetrischen Strom bestimmen, die rund 0,04 dB/m beträgt.

5.3 Longitudinal Conversion Loss am Punkt P0

Der LCL des Netzes wurde an unterschiedlichen Orten der Anordnung ermittelt. Bei der Messung wurde über einen Balun eine konstante asymmetrische Spannung angelegt und die sich ergebende symmetrische Spannung gemessen. Es wurden zwei LCL berechnet. LCL_{100} steht für das Verhältnis der halben asymmetrischen Leerlaufspannung zur gemessenen symmetrischen Spannung. LCL_R steht für das Verhältnis der gemessenen asymmetrischen Spannung zur gemessenen symmetrischen Spannung. Für den Punkt P0 und das Teilnetz S0 sind der LCL_{100} der LCL_R in Abbildung 26 dargestellt.

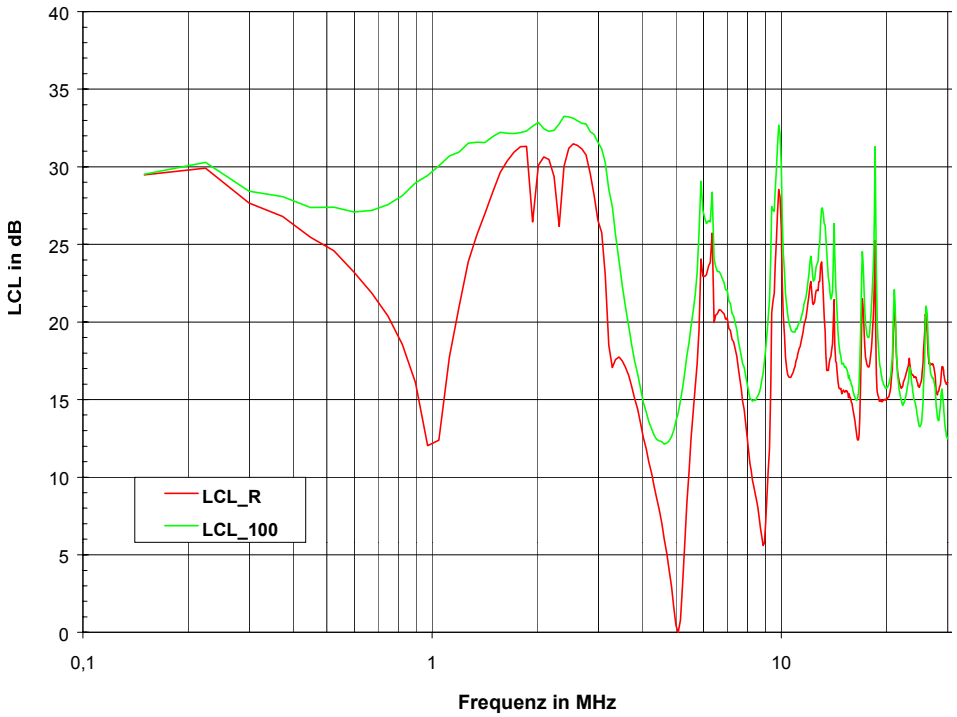


Abbildung 26 Vergleich des gemessenen und berechneten LCL

Es ist ein deutlicher Unterschied der beiden Kurven zu erkennen, wobei der LCL_R ausgeprägtere Resonanzen zeigt.

Berücksichtigt man die asymmetrische Impedanz, so kann man annehmen, daß bei deren Minimum das gemessene Feld maximal ist und demzufolge der LCL ein Minimum aufweisen sollte. In Abbildung 26 erkennt man hingegen ein Minimum des LCL_R bei 1 MHz, der ersten Resonanzfrequenz der symmetrischen Impedanz. Dieser Sachverhalt wird verständlich, wenn man die in Abschnitt 5.1.5 gezogenen Schlußfolgerungen anführt. Die Kapazität der beiden Leiter L1, L2 zum Erdleiter PE führt bei 1 MHz zum Minimum der Impedanz zwischen den Leitern und PE, wodurch die asymmetrische Spannung minimal wird. Demzufolge ergibt sich bei dieser Frequenz ein Minimum für den LCL_R. Dieses Minimum findet sich jedoch in den gemessenen Feldstärkewerten (vgl. Abschnitt 5.5) nicht wieder.

Es folgt, daß eine Berechnung der Feldstärke über eine Eindrahtanordnung mit anschließender Normierung durch den LCL_R zu einer Überschätzung der Feldstärke an den Resonanzstellen führen kann. In den Messungen wurden zunächst beide LCL-Werte bestimmt, wobei das Phänomen in einer weiteren, detaillierten Untersuchung in Abschnitt 6 besser beschrieben wird.

5.4 LCL der Gesamtanordnung

In den Diagrammen für den LCL_{100} der Anordnung sind die starken Resonanzen des LCL_{100} im oberen Frequenzbereich deutlich zu erkennen, die sich durch die Maxima und Minima der Strom- und Spannungsverteilung ergeben. Praktisch ist es nach einer Messung des LCL an unterschiedlichen Stellen eines Netzes aber unerheblich, wie der LCL an einer bestimmten Stelle ist, sondern es ist vielmehr der minimale LCL ausschlaggebend, da sich bei einer

unbekannten Installation gerade am Anschlußpunkt ein Minimum befindet könnte. Aus den gemessenen LCL an unterschiedlichen Orten im Netz sollten folglich die Einhüllenden der Minima bestimmt werden.

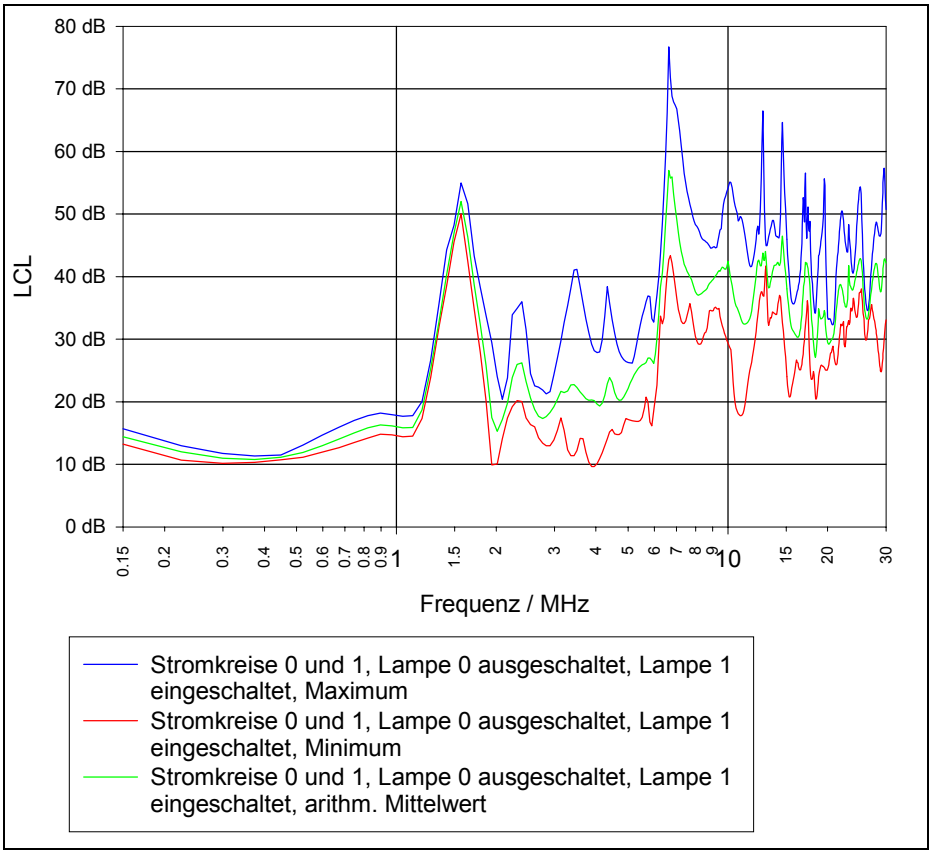


Abbildung 27 Einhüllende des LCL_{100} von S01, Lampe eingeschaltet

In den Abbildung 27 und Abbildung 28 sind die Einhüllenden des LCL_{100} für den Stromkreis S01 dargestellt.

Anhand der beiden Diagramme erkennt man sehr deutlich, daß der LCL bei ausgeschalteten Lampen, bedingt durch die einphasige Leiterführung zwischen Lampenschalter und Lampe, geringer als bei eingeschalteter Lampe ist. Somit wird nur der LCL bei ausgeschalteter Lampe relevant sein, zumal die Lampen tagsüber überwiegend ausgeschaltet sind.

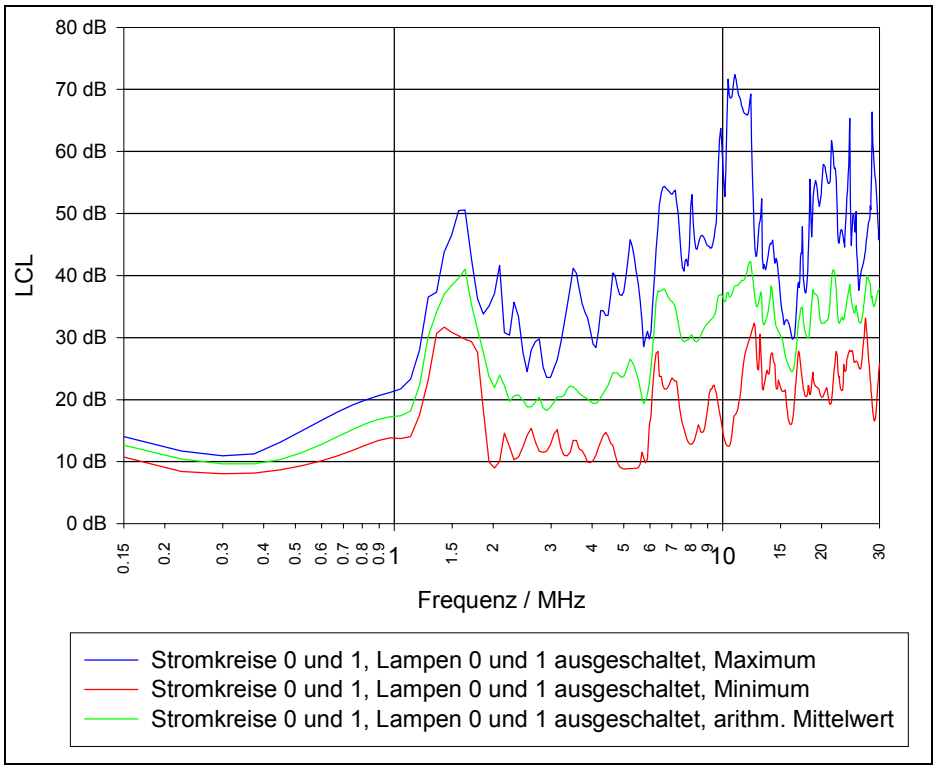


Abbildung 28 Einhüllende des LCL_{100} von S01, Lampe ausgeschaltet

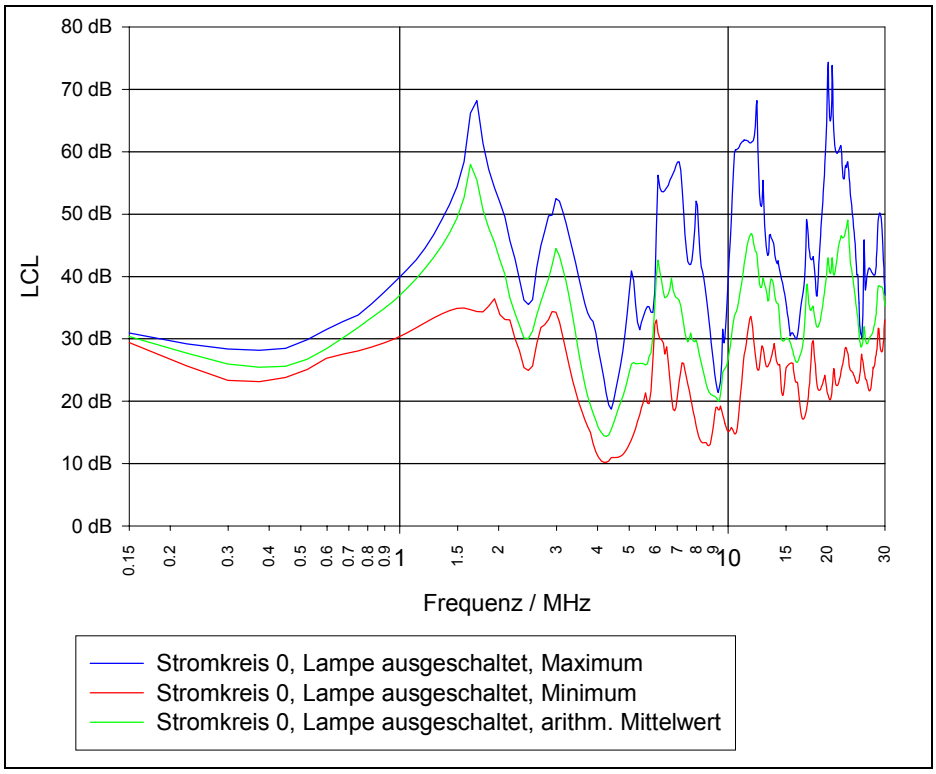


Abbildung 29 Einhüllende des LCL_{100} von S0, Lampe ausgeschaltet

In den folgenden Abbildungen sind deshalb lediglich die Einhüllenden des LCL_{100} bei ausgeschalteten Lampen dargestellt.

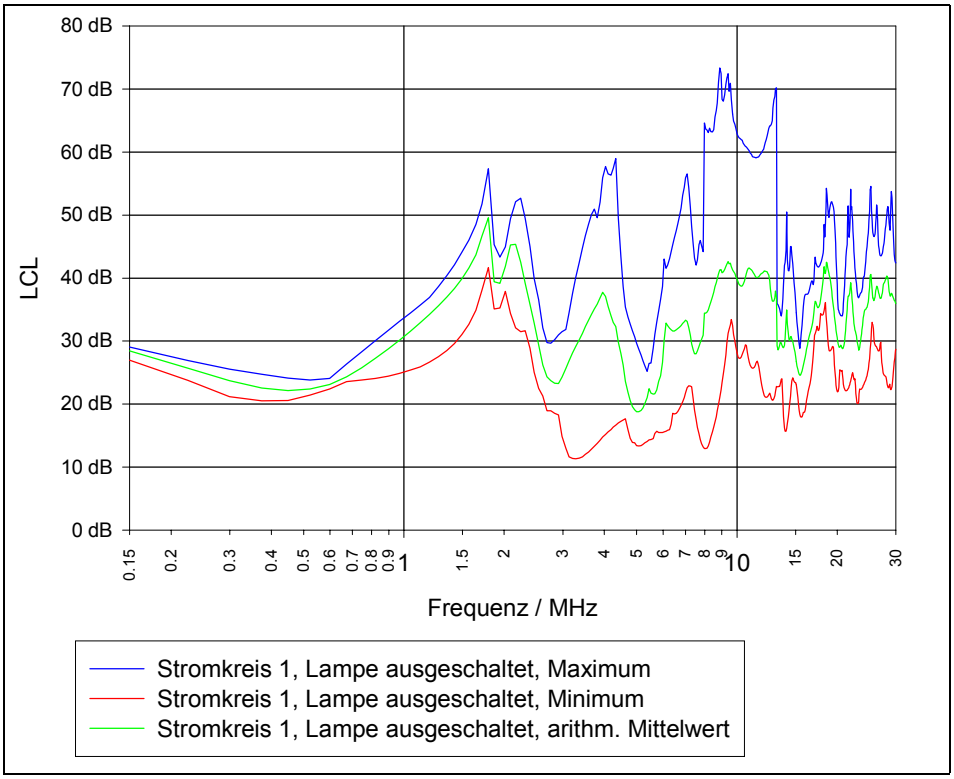


Abbildung 30 Einhüllende des LCL_{100} von S0, Lampe ausgeschaltet

Für diese Anordnung kann in Abhängigkeit von der Frequenz nur von 10-20dB LCL_{100} ausgegangen werden. Inhalt von weiterführenden Untersuchungen wird die Messung des LCL an Gebäudenetzen mit angeschlossenen Verbrauchern sein.

5.5 Vergleich zwischen Messung und Berechnung

Das elektrische Feld an den Meßpunkten wurde mit einer 1 m Stabantenne ermittelt. Die vollständigen Diagramme können dem Meßbericht entnommen werden. Bei der Messung der magnetischen Feldstärke mit der Rahmenantenne lagen die Meßwerte im unteren Frequenzbereich unter der Rauschgrenze des Spektrumanalysators. Dieses Problem trat auch an einigen Meßpunkten bei der Messung der elektrischen Feldstärke auf.

Das auf den LCL basierende Modell zur Bestimmung der magnetischen und elektrischen Feldstärke wurde bereits in Abschnitt 4.3 vorgestellt. Zunächst werden die von einer asymmetrisch angeregten Eindrahtanordnung erzeugten Feldstärken an den interessierenden Orten berechnet. Diese Werte werden anschließend um den LCL bzw. den TCL reduziert, um dann als Abschätzung für die zu erwartenden Feldstärken der realen Anordnung zu dienen.

Für eine Eindrahtanordnung über ideal leitfähiger Ebene wurde bei Vernachlässigung der Kabinenstruktur die z-Komponenten der elektrischen Feldstärke im interessierenden Frequenzbereich an den Meßpunkten berechnet. Für ausgewählte Frequenzen wurde die

Berechnung ebenfalls unter Berücksichtigung der Kabinenwände durchgeführt, wobei die vordere Kabinenwand aus programmtechnischen Gründen nicht modelliert wurde.

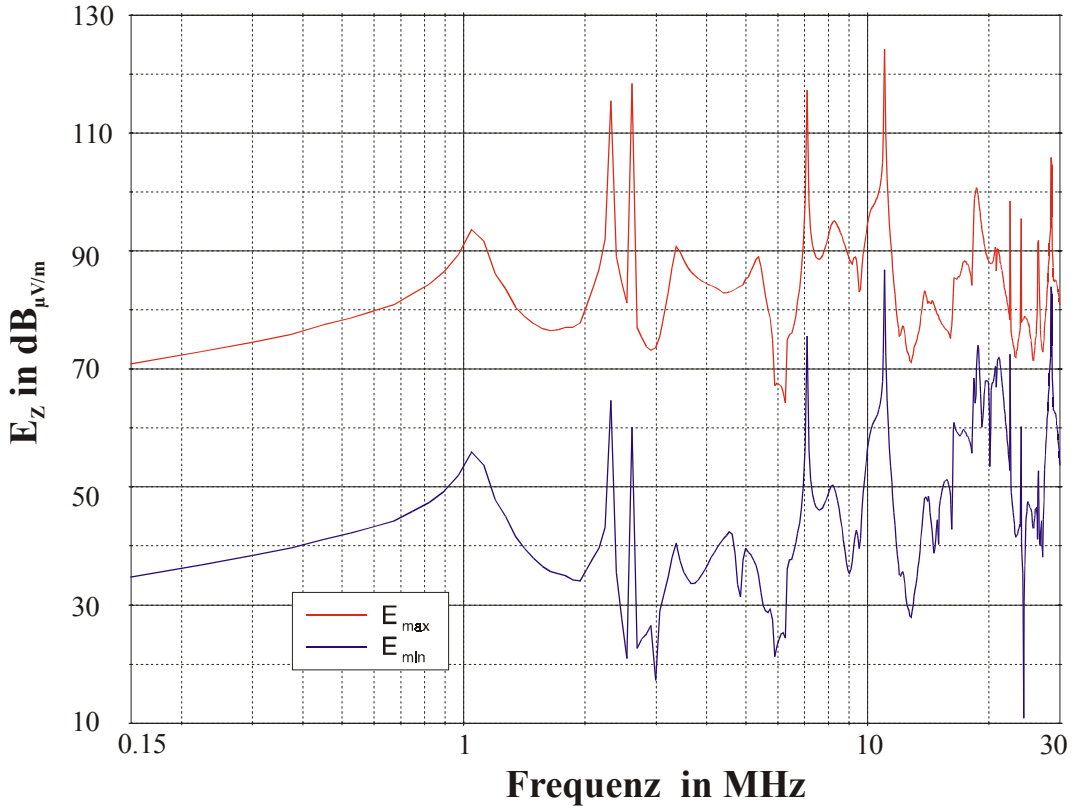


Abbildung 31 Modellierte minimale und maximale z-Komponente der elektrischen Feldstärke, Einkopplung in Eindrahtanordnung des Stromkreises S0 bei P0

Aus den einzelnen Meßpunkten wurden die minimale und maximale elektrische Feldstärke in Abbildung 31 dargestellt.

Die gemessenen maximalen Feldstärken werden im unteren Frequenzbereich durch die berechneten Kurven unterschätzt. Im oberen Frequenzbereich haben die Werte in etwa die gleiche Größenordnung wie die gemessenen Feldstärken, wobei einige Resonanzen an anderen Stellen wiederzufinden sind. Auf die Gründe für etwaige Resonanzverschiebungen wurde bereits in den vorangegangenen Abschnitten hingewiesen. Die Resonanz bei 1 MHz ist nur in den Kurven zu erkennen, die mit dem LCL_R berechnet wurden.

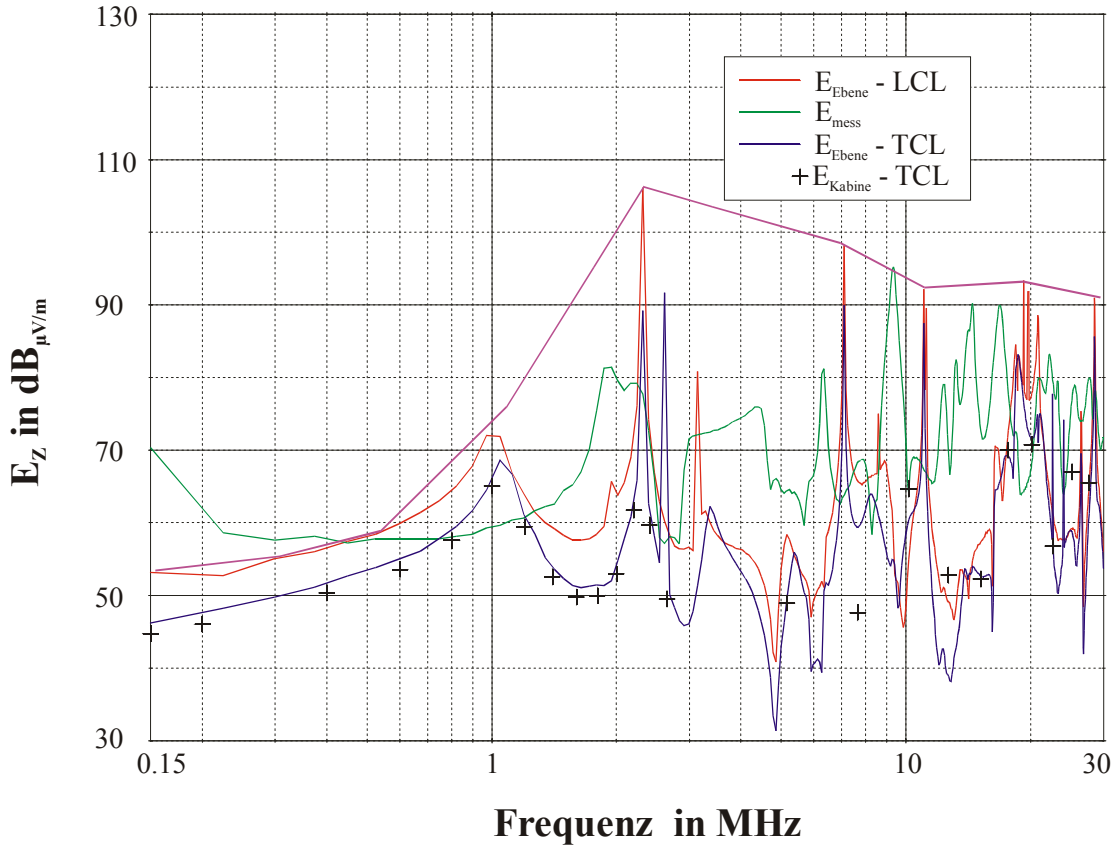


Abbildung 32 Zusammenhang zwischen gemessener und berechneter z-Komponente der elektrischen Feldstärke am Meßpunkt 8

In Abbildung 32 ist der gemessene, der mit LCL sowie der mit TCL berechnete Verlauf der z-Komponente der elektrischen Feldstärke (ohne Berücksichtigung der Kabinenwände) dargestellt. Zusätzlich wurden für einige Frequenzen die metallischen Wände der Halle bei der Modellierung berücksichtigt. Der Einfluß der Hallenstruktur ist bis ca. 5 MHz kaum zu bemerken.

Die Verläufe unterscheiden sich. Eine Abschätzung kann durch in Abbildung 32 eingetragene Hüllkurve der Maxima erfolgen. Es wird deutlich, daß der LCL_R zu einer Resonanz bei 1 MHz führt, die in den Meßwerten nicht wieder zu finden ist. Der LCL_R ist demzufolge nicht hinreichend geeignet, das Abstrahlungsverhalten der Anordnung bei geringen Frequenzen zu charakterisieren.
Aus den berechneten den gemessenen elektrischen Feldstärken wurde das Verhältnis gebildet, d.h. ein Parameter zur genaueren Bestimmung der Feldstärke gewonnen. Der Verlauf ist für den Meßpunkt 1 in Abbildung 33 dargestellt. Er unterscheidet sich an den einzelnen Meßpunkten erheblich voneinander.

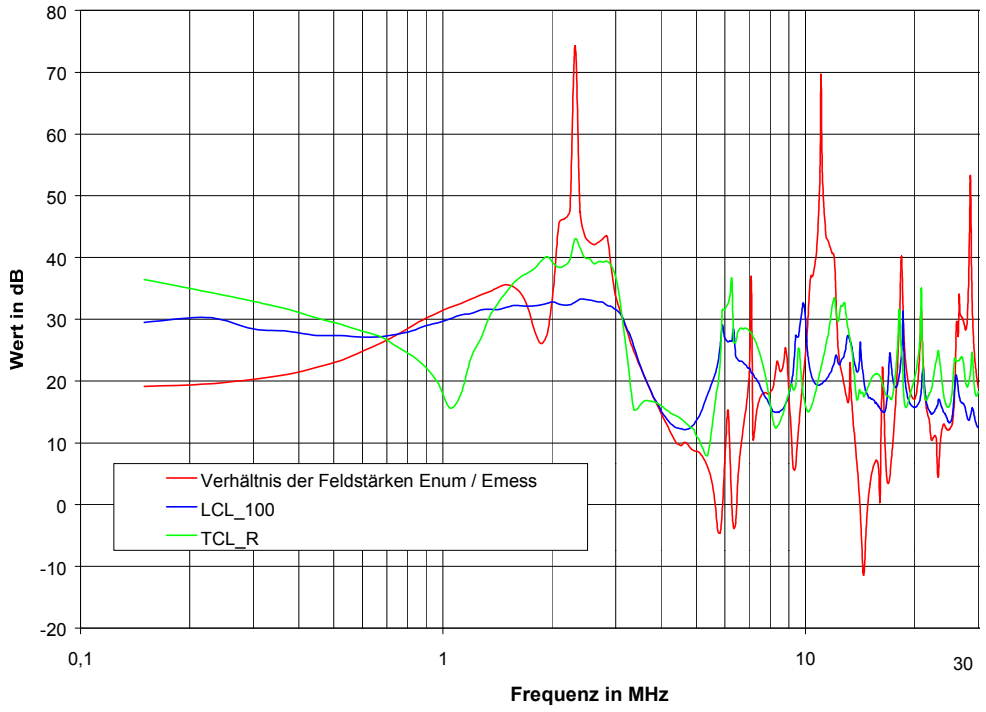


Abbildung 33 Vergleich zwischen LCL_{100}, TCL_R, und E_{num}/E_{mess}

Der LCL_{100} zeigt in einigen Bereichen einen ähnlichen Verlauf wie das Verhältnis der numerisch ermittelten und der gemessenen elektrischen Feldstärken. In anderen Bereichen hingegen führen die unterschiedliche Lage und Ausprägung der Resonanzen sowie das grobe Modell der Absorberhalle zu erheblichen Abweichungen (2,3 MHz; 11 MHz; 15 MHz).
Der Vergleich zeigt, daß der LCL den erwarteten Einfluß auf das Abstrahlverhalten hat, jedoch auch andere Parameter einen bedeutenden Einfluß besitzen, die noch bestimmt werden müssen.

5.6 Verteilung der elektrischen Feldstärke

Zur Veranschaulichung der örtlichen Verteilung der elektrischen Feldstärke wurden Berechnungen mit CONCEPT durchgeführt. Die Farbflächendarstellung ist für 4 Frequenzen in den folgenden Abbildungen dargestellt.
Die Diagramme bei 0,15 MHz und 1 MHz weisen Felddiagramme auf, die anschaulich mit einer konstant verteilten asymmetrischen Spannung auf dem Stromkreis S0 erklärt werden können. Außerhalb der Schirmkabine fällt die Spannung erwartungsgemäß stark ab.

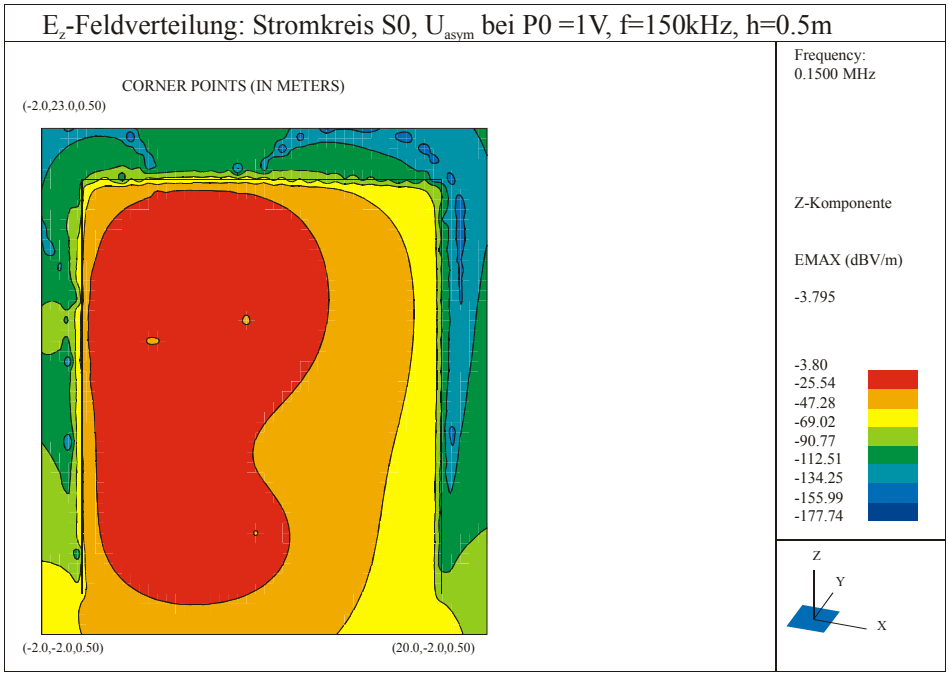


Abbildung 34 **Verteilung der z-Komponente der E-Feldstärke bei der Frequenz von 150 kHz und Anregung des durch eine Eindrahtanordnung simulierten Stromkreises S0 mit einer asymmetrischen Spannung bei P0**

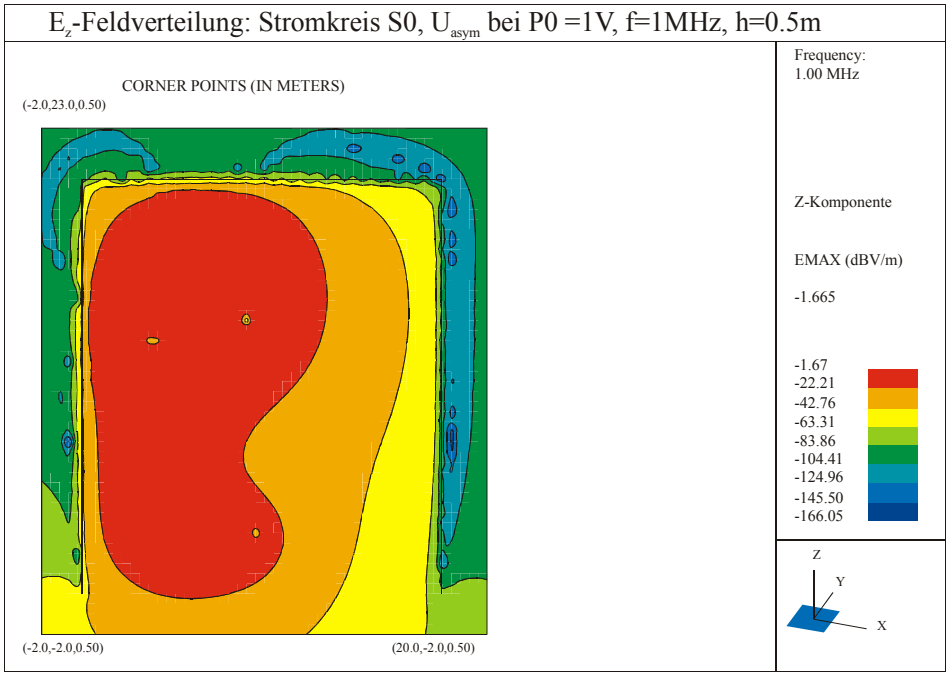


Abbildung 35 **Verteilung der z-Komponente der E-Feldstärke bei der Frequenz von 1 MHz und Anregung des durch eine Eindrahtanordnung simulierten Stromkreises S0 mit einer asymmetrischen Spannung bei P0**

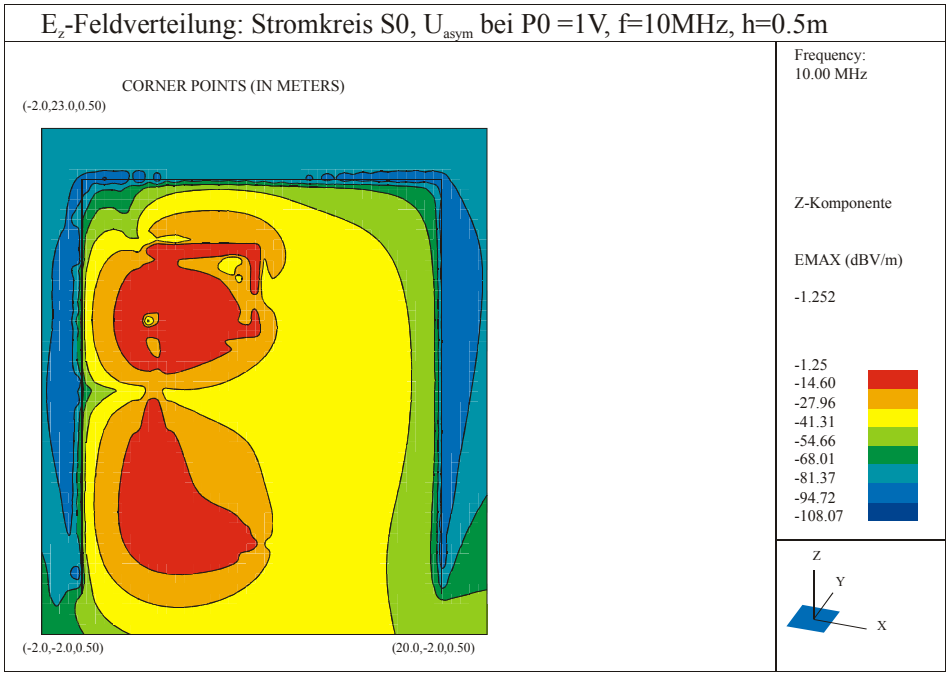


Abbildung 36 **Verteilung der z-Komponente der E-Feldstärke bei der Frequenz von 10 MHz und Anregung des durch eine Eindrahtanordnung simulierten Stromkreises S0 mit einer asymmetrischen Spannung bei P0**

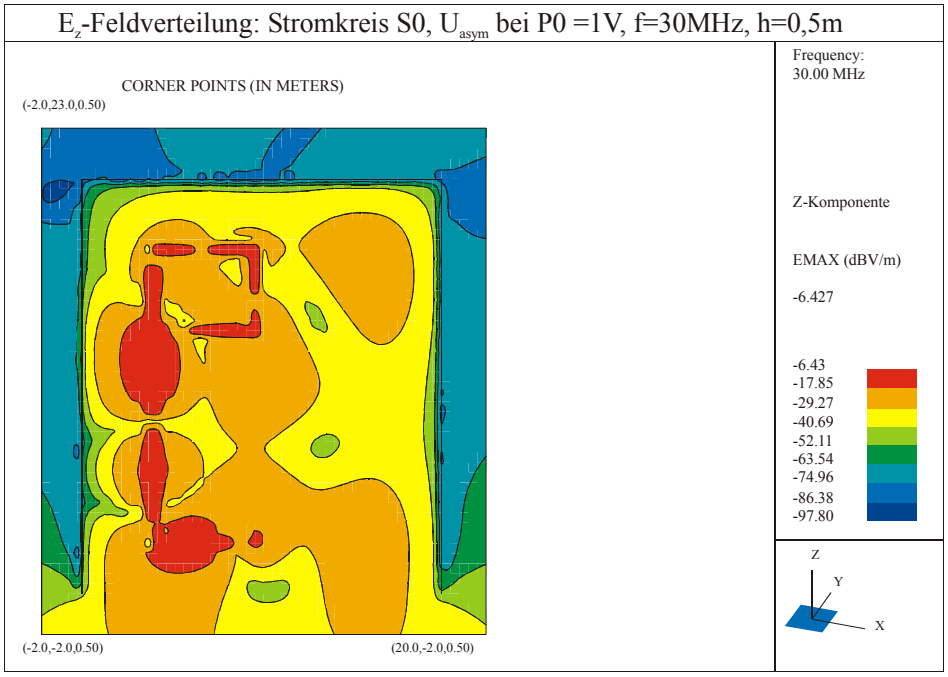


Abbildung 37 **Verteilung der z-Komponente der E-Feldstärke bei der Frequenz von 30 MHz und Anregung des durch eine Eindrahtanordnung simulierten Stromkreises S0 mit einer asymmetrischen Spannung bei P0**

Bei Frequenzen von 10 MHz und 30 MHz bilden sich entlang der Leitung asymmetrische Spannungsknoten aus, was in den Felddiagrammen deutlich am Vorhandensein von Feld-

stärkemaxima zu erkennen ist. Auffällig ist ebenfalls die besonders breite Zone mit hoher elektrischer Feldstärke am Eckpunkt P4. Diese kann anschaulich so erklärt werden, daß eine räumliche Ausdehnung mehrerer Leiter mit gleicher lokaler asymmetrischer Spannung zu einer höheren Feldstärke führt als ein Einzelleiter. Im 30 MHz-Diagramm ist dieser Effekt nicht so deutlich zu beobachten, da sich der Eckpunkt P4 direkt bei einem Spannungsminimum befindet.

Entlang der Leitung treten in Abhängigkeit von der Frequenz an unterschiedlichen Orten die Maxima der Feldstärke auf. Für Geräte, die in der Regel aus dem Netzt versorgt werden und in der Nähe der Speisepunkte stehen, kann dieser Umstand besonders kritisch sein.

5.7 Schlußfolgerungen

Aus den Messungen können folgende Aussagen abgeleitet werden:

- Bei einer Meßanordnung zur Bestimmung des asymmetrischen Stromes ist es wichtig, den vorhanden Schutzleiter sachgerecht in die Messung einzubeziehen, um die asymmetrische Komponente nicht zu überschätzen.
- Sind im Stromkreis Lampen und Verbraucher vorhanden, so hängt der LCL wesentlich von deren Schaltzustand ab. Einphasige Lampenkreise führen zu einer enormen Verschlechterung der Symmetrie des Netzes.
- Der LCL ist aufgrund der Resonanzen vom Ort der Einspeisung und von der jeweiligen Leitungslänge abhängig. Nach einer Messung kann diesem Umstand durch die Verwendung der Hüllkurve der LCL-Minima Rechnung getragen werden.
- Der LCL muß bei einer definierten Einspeisung bestimmt werden. Es ergeben sich unterschiedliche Werte für LCL_{100} und LCL_R. Welcher dieser Parameter zur Beurteilung des Abstrahlverhaltens zu beachten ist, sollte in weiteren Untersuchungen geklärt werden.
- Es ist darauf zu achten, daß bei einer Bestimmung des LCL keine zu große asymmetrische Belastung des Stromkreises auftritt, z.B. durch eine einfache Parallelschaltung von Meßgeräten mit einer Impedanz von 50Ω.
- Der LCL kann in gewissen Grenzen zur Abschätzung der maximalen Feldstärke verwendet werden.
- Entlang der Leitungen werden die größten Störungen auftreten.
- In Räumen mit verzweigten Leitungsstrukturen können bei entsprechender Lage der asymmetrischen Spannungsmaxima ausgedehnte Feldstärkemaxima auftreten. In Räumen ergeben sich teilweise konstante Feldverteilungen.

6 ZUSAMMENHANGS VON TCL UND LCL AN EINER ZWEIDRAHT-ANORDNUNG

Bei der Messung an dem künstlichen Netz in der Absorberhalle Kolberg (vgl Abschnitt 5) konnte der Zusammenhang zwischen dem symmetrisch eingekoppelten Signal, dem LCL der Anordnung und der resultierenden elektrischen bzw. magnetischen Feldstärke an den Meßpunkten nicht ausreichend geklärt werden. Zur Klärung wurde eine geometrisch einfache Versuchsanordnung entworfen, die gut mit CONCEPT modelliert werden kann und einen Vergleich von gemessenen und numerischen Größen zuläßt.

6.1 Versuchsaufbau

Die Anordnung bestand aus zwei parallel geführten Drähten eines NYM-J 3G*1,5mm^2 Kabels mit je 1,4 mm Durchmesser. Ein Draht von 2 m Länge wurde in 170 mm Höhe und ein Draht von 3 m Länge in 160 mm Höhe installiert. Die beiden Drähte wurden am Anfang mit einem Balun an das Meßequipment angeschlossen.
An den Punkten P1 und P2 wurden zur Bestimmung der elektrischen Feldstärke Stabantennen von 150 mm Länge und 1,5 mm Radius positioniert.

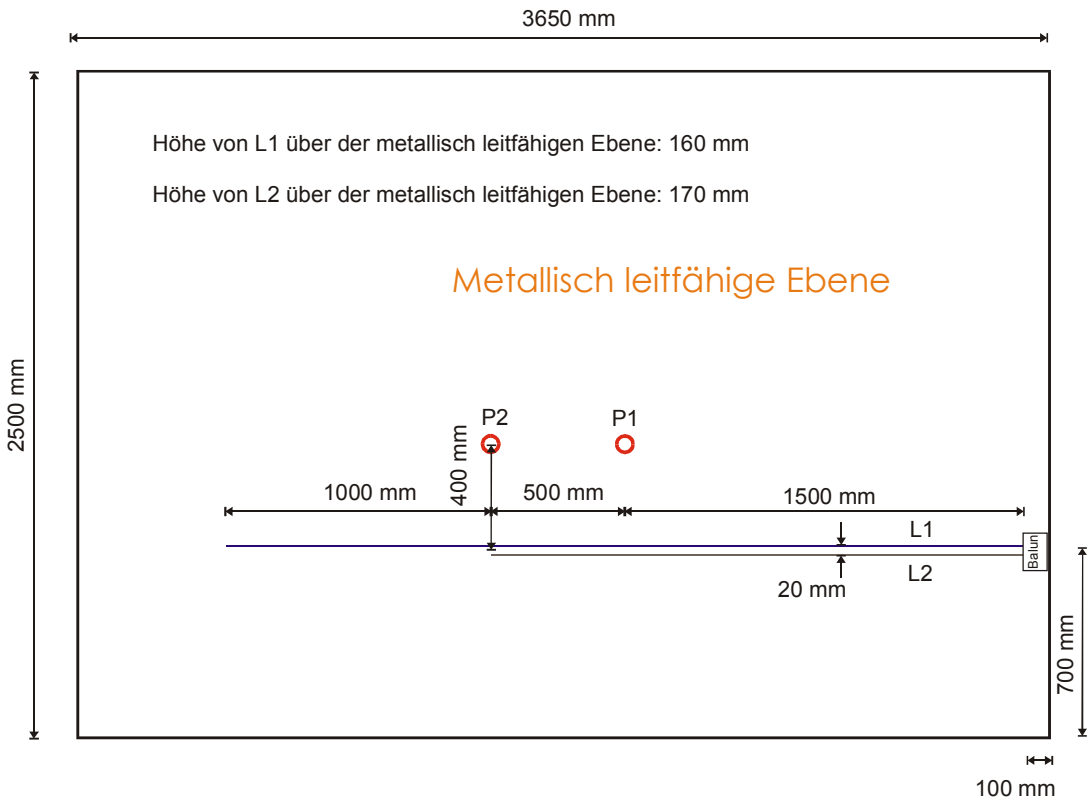


Abbildung 38 Aufbau zur erweiterten Untersuchung des LCL bzw. TCL

Die Anordnung wurde auf einer leitfähigen Ebene aufgebaut. Die genauen Abmessungen können Abbildung 38 entnommen werden. In Abbildung 39 ist der praktische Aufbau dargestellt.

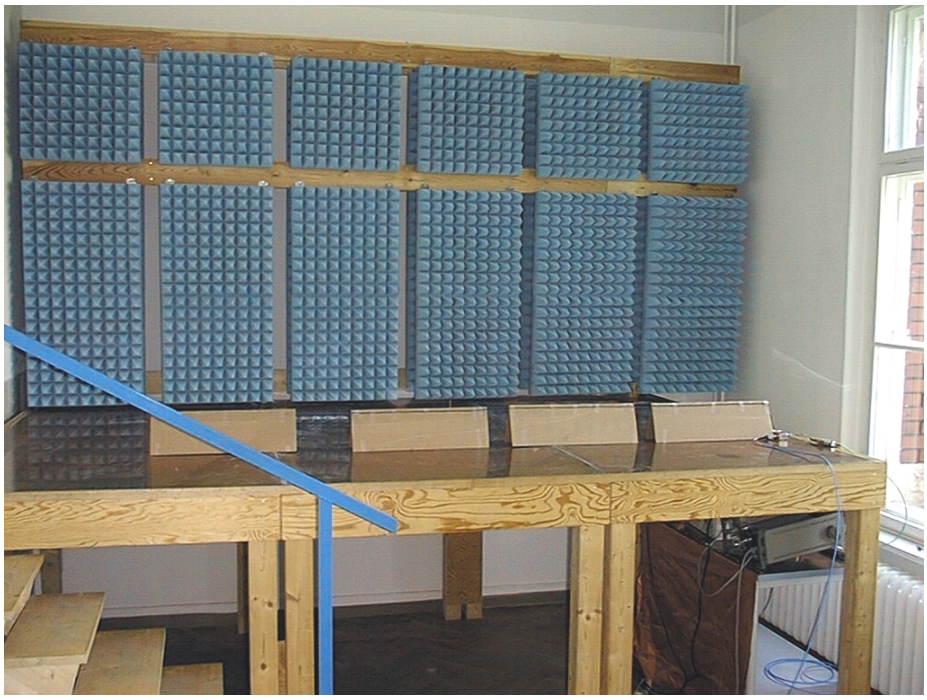


Abbildung 39 Versuchsaufbau für erweiterte TCL/LCL- Analyse

Es wurden zwei Konfigurationen gemessen:

1. LCL-Messung; asymmetrisch eingekoppelt,
2. TCL-Messung; symmetrisch eingekoppelt.

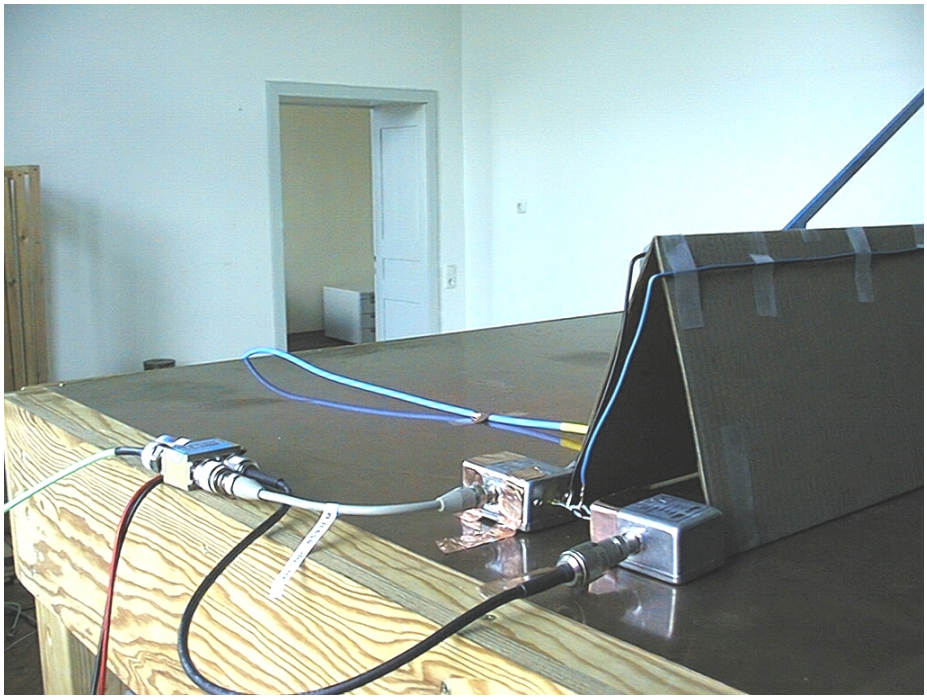


Abbildung 40 Einkoppeleinrichtung

Zeitlich versetzt wurde die symmetrische und die asymmetrische Spannung am Anfang der Zweileiteranordnung gemessen. Die Umschaltung erfolgte mit einem HF-Relais, wobei jeder Meßkreis mit 50 Ω abgeschlossen wurde (vgl. Abbildung 40).

Bei weiteren Messungen wurden die Fußpunktspannungen der beiden Stabantennen bestimmt. Eine Umrechnung über den Antennenfaktor war nicht notwendig, da die gemessene Spannung direkt mit der durch CONCEPT berechneten Spannung verglichen werden konnte.

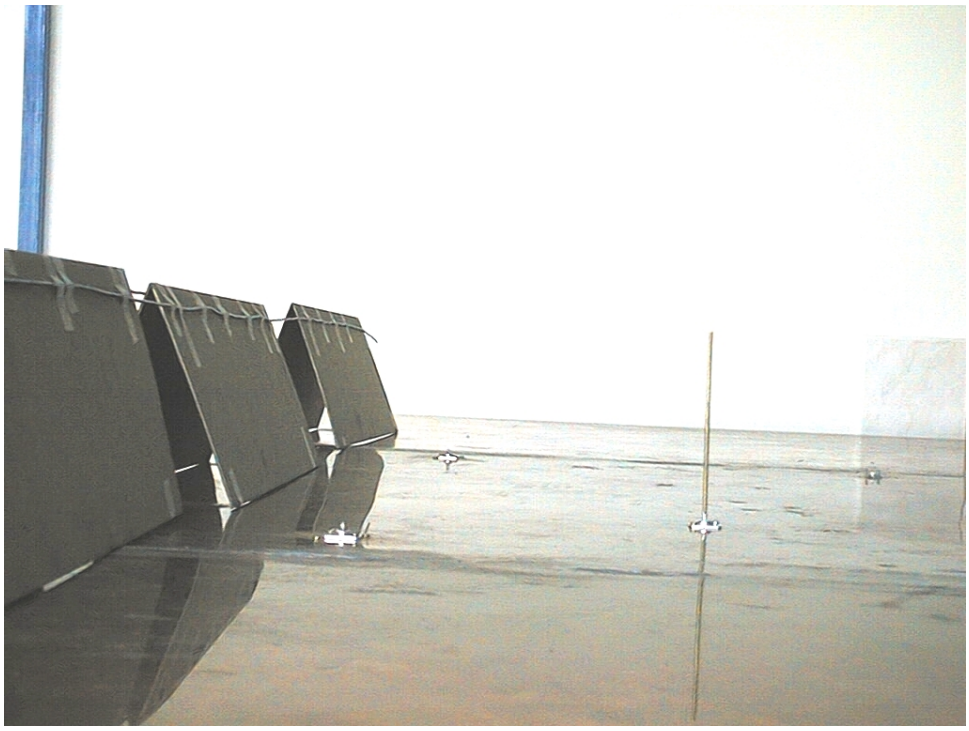


Abbildung 41 Aufbau der Stabantenne

Für die Messungen wurden folgende Geräte eingesetzt:

- Spektrumanalysator HP 8593 EM (Hewlett Packard),
- Balun 0322 BF (North Hills Signal Processing),
- ESHS 30 (Rohde und Schwarz).

6.2 CONCEPT-Modell

Die Anordnung wurde sowohl für den Fall der LCL- Messung als auch für den Fall der TCL-Messung in CONCEPT modelliert. Es wurde Wert auf die Berücksichtigung der realen Impedanzverhältnisse gelegt, d.h. die symmetrische und die asymmetrische Impedanz betrug jeweils 100 Ω. Die Schaltung ist in Abbildung 42 dargestellt.

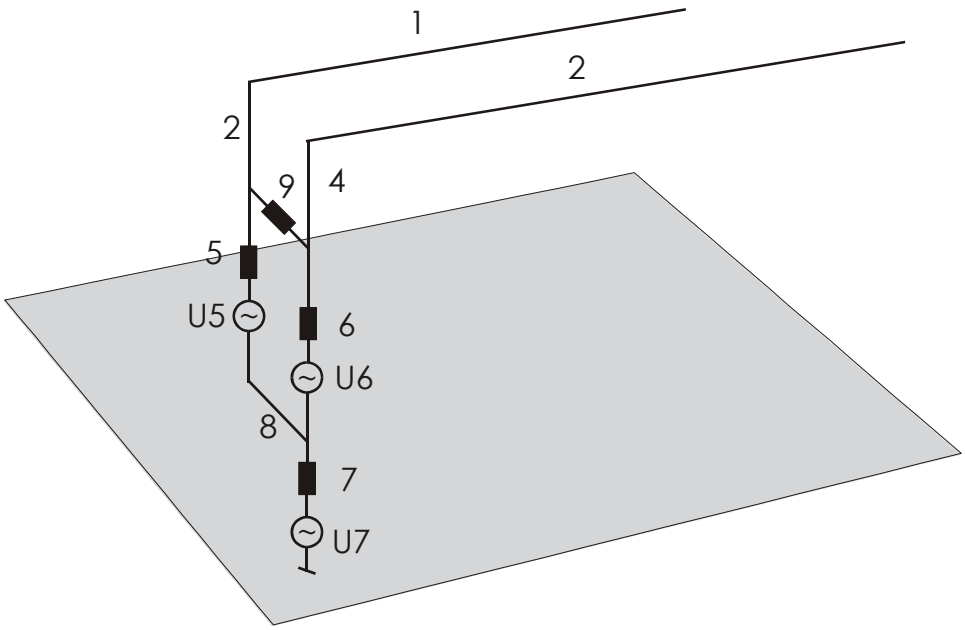


Abbildung 42 Modell der Zweidraht-Anordnung für die CONCEPT- Berechnungen

An den Positionen der Antennen wurden Stäbe mit einer Länge von 150 mm und einem Radius von 1,5 mm angeordnet, die über eine Impedanz von 50 Ω an die Bezugsfläche angebunden waren. Die Spannung über den 50 Ω modelliert unmittelbar die gemessene Antennenfußspannung.
Die Abmessung der Anordnung liegt bei 30 MHz im Bereich von λ/4, so daß unterhalb von 30 MHz nur eine nennenswerte Resonanz auftritt. Um Aussagen beim Vorhandensein von weiteren ausgeprägten Resonanzen treffen zu können, wurden die Berechnungen bis 100 MHz durchgeführt. Über eine Skalierung können die Ergebnisse grob auf größere Anordnungen übertragen werden.

6.3 Asymmetrische und symmetrische Spannung bei der LCL-Messung

Auf die beiden Drähte wurde mittels eines Baluns eine asymmetrische Spannung eingekoppelt. Sowohl die symmetrische als auch die an der Einkoppelstelle anliegende asymmetrische Spannung wurden im Frequenzbereich von 0,15-30 MHz gemessen und mit den berechneten Spannungen verglichen.
Es besteht eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung. Die Resonanz der asymmetrischen Spannung bei etwa 24 MHz ist bei den Meßwerten nicht so ausgeprägt wie bei den berechneten Werten. Umgekehrt ist im Verlauf der symmetrischen Spannung bei den gemessenen Werten hier eine ausgeprägte Resonanz zu erkennen.

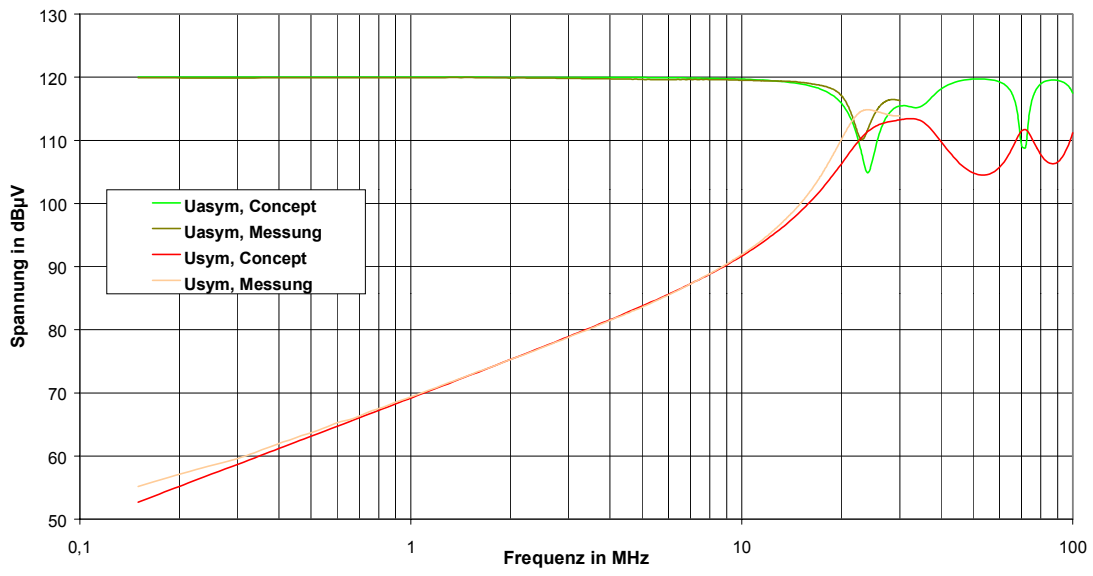


Abbildung 43 Vergleich der gemessenen und berechneten sym. und asym. Spannung bei der Messung des LCL

Diese Effekte können unter anderem auf die Vernachlässigung der Verluste bei der Modellierung der realen Anordnung (Balun und Isolierung der Drähte) zurückgeführt werden.

6.4 Asymmetrische und symmetrische Spannung bei der TCL-Messung

Bei dieser Messung wurde mit einem Balun eine symmetrische Spannung eingespeist. Die asymmetrische und die symmetrische Spannung wurden im Frequenzbereich von 0,15-30 MHz gemessen.

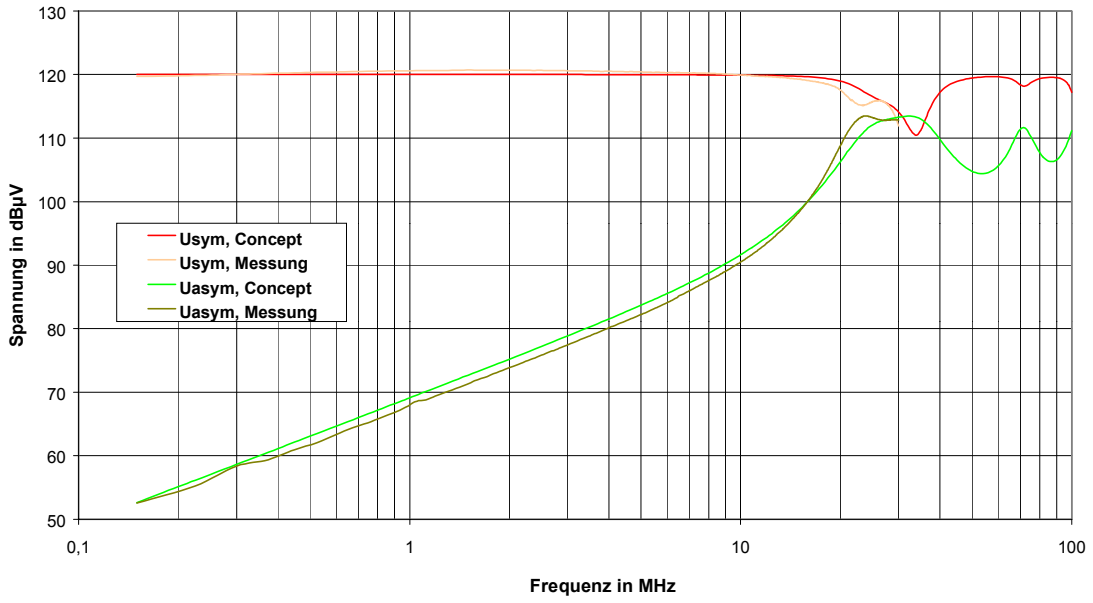


Abbildung 44 Vergleich der gemessenen und berechneten sym. und asym. Spannung bei der Messung des TCL

Es gibt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung. Die Resonanz bei den gemessenen Kurven (bei etwa 24 MHz) ist in den berechneten Daten nicht wiederzufinden.

6.5 Messung von LCL und TCL

Als Maß für die Unsymmetrie des Netzes wurde der LCL bzw. TCL eingeführt. Es war zu klären, wie diese Parameter zu bestimmen sind, um das Abstrahlverhalten des Systems ausreichend zu charakterisieren. Der LCL_R und TCL_R werden aus gemessenen Größen berechnet, d.h. sowohl die gemessene asymmetrische als auch die gemessene symmetrische Spannung werden genutzt:

$$LCL_R = 20*\log_{10}\left(\frac{U_{asym_{gemessen}}}{U_{sym\,gemessen}}\right) \qquad bzw. \qquad TCL_R = 20*\log_{10}\left(\frac{U_{sym_{gemessen}}}{U_{asym\,gemessen}}\right). \qquad \textbf{(13)}$$

Für den Versuchsaufbau sind die Verläufe von LCL_R und TCL_R in Abbildung 45 dargestellt.

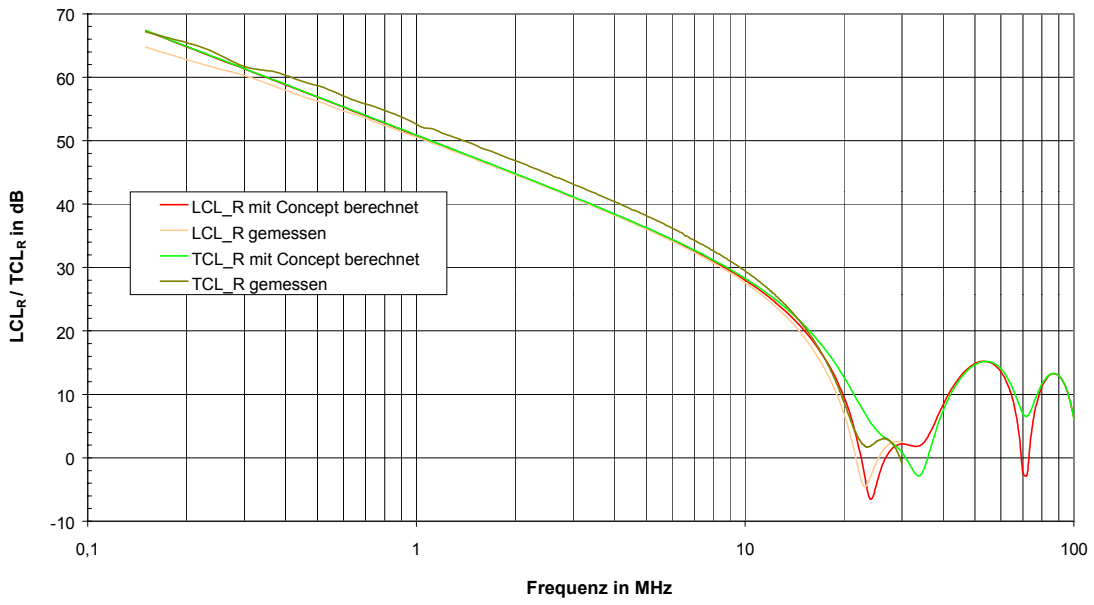


Abbildung 45 Verlauf von LCL_R und TCL_R

Bis 20 MHz existiert eine gute Übereinstimmung von LCL_R und TCL_R. Ab 20 MHz weichen die Verläufe bei Resonanzfrequenzen stark voneinander ab.
Rein anschaulich sollte die Umwandlung eines symmetrisch eingespeisten in ein asymmetrisches Signal reziprok mit dem Fall der Umwandlung eines asymmetrisch in ein symmetrisches Signal sein. Insofern wird ein gleicher prinzipieller Verlauf von LCL und TCL erwartet, der sich aufgrund unterschiedlicher Impedanzverhältnisse lediglich in einem konstanten Offset[1] unterscheiden kann.

[1] Unterschiedliche Impedanzverhältnisse führen zu einer unterschiedlichen Abschwächung der Signale. Dieser konstante Faktor (bei der Annahme von linearen Zusammenhängen) äußert sich demzufolge in der logarithmischen Darstellung als konstanter Offset.

In Abbildung 46 ist die resultierende asymmetrische Spannung bei symmetrischer Einkopplung und die resultierende symmetrische Spannung bei asymmetrischer Einkopplung dargestellt. Die Spannungen sind identisch, so daß folglich der LCL nicht vom TCL abweichen kann. Dieses Verhalten wird aber durch den LCL_R und TCL_R nicht wiedergegeben.

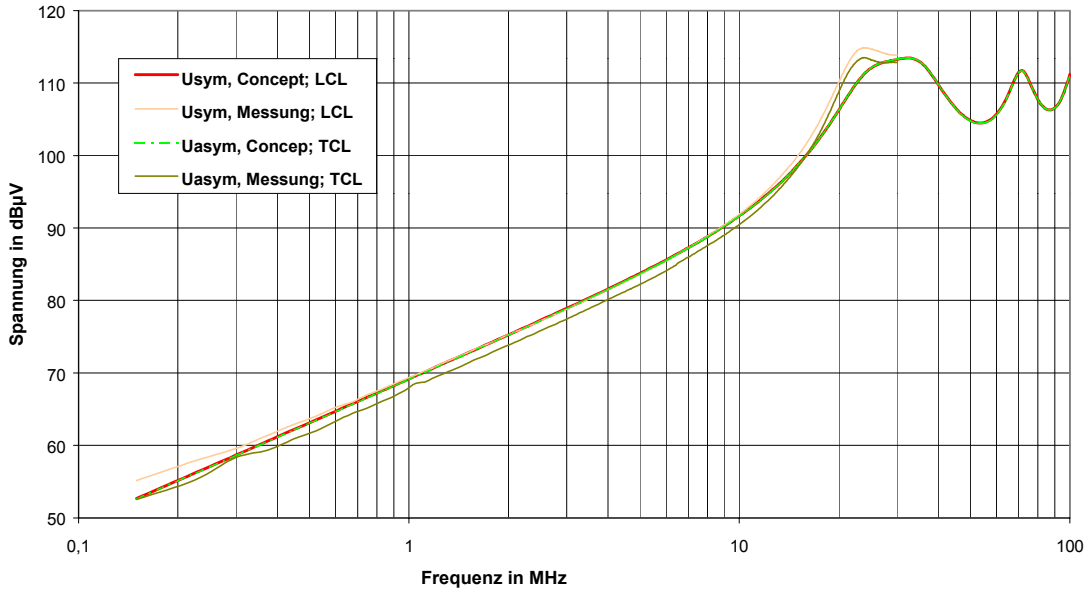


Abbildung 46 Vergleich der Übersprechspannungen bei der TCL- und der LCL-Messung

Berechnet man hingegen den LCL_{100} bzw. TCL_{100}, d.h. den Quotienten aus der als konstant angenommen Generatorspannung[1] an 50 Ω und dem gemessenen Wert der übergesprochenen Spannung, so wird das reale Verhalten gut approximiert:

$$LCL_{100} = 20 * \log_{10}\left(\frac{U_{asym_{Generator}}}{U_{sym\ gemessen}}\right) \qquad bzw. \qquad TCL_{100} = 20 * \log_{10}\left(\frac{U_{sym_{Generator}}}{U_{asym\ gemessen}}\right) \qquad \textbf{(14)}$$

[1] Wird durch den Generator eine konstante Leistung eingespeist, so ergibt sich die Generatorspannung an 50 Ω nach $U_{dB\mu V}=P_{dBmW}+107_{dB\mu V/mW}$.

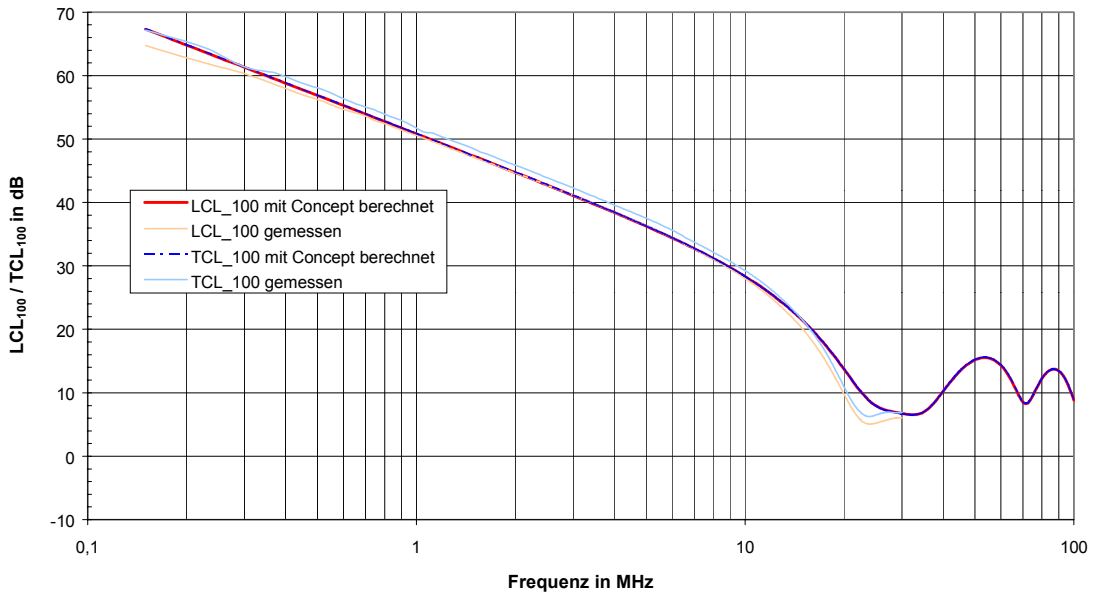


Abbildung 47 Berechneter und gemessener LCL_{100} bzw. TCL_{100} der Anordnung

Dieses kann der Abbildung 47 entnommen werden. Offensichtlich haben die Resonanzen bei den eingespeisten Größen weniger Auswirkung auf die übergekoppelten Größen, als bei der Messung in Kolberg angenommen, was sich wie folgt erklären läßt:

Im Fall eines Minimums in der Eingangsimpedanz wird ein größerer Strom in die Anordnung fließen, der an anderen Orten auf der Leitung zu einer hohen Spannung führt. Befindet sich an der Einkoppelstelle ein Maximum der Eingangsimpedanz, so fließt ein geringerer Strom. Hat die Leitungsimpedanz die gleiche Größenordnung wie die Generatorimpedanz, so wird sich das Maximum der Spannung nicht stark unterscheiden. Es wird sich eine örtlich verschobene Strom- und Spannungsverteilung einstellen. Da die Koppelvorgänge identisch sind, wird die gleiche Energie in das beeinflußte System übertragen. Diese wird an der Impedanz des Meßsystems umgesetzt, wodurch sich gleiche Meßwerte ergeben.

Der LCL_{100} bzw. TCL_{100} sind demzufolge die Größen, die die Unsymmetrie des Systems bezüglich der Spannungsverhältnisse gut beschreiben.

6.6 Elektrische Feldstärke – Fußpunktspannungen der Antennen

Die Antennenfußspannungen wurden für die symmetrische und die asymmetrische Einspeisung im Frequenzbereich bis 30 MHz gemessen und bis 100 MHz berechnet. Aufgrund der geringen Signalpegel die bei symmetrischer Einkopplung unterhalb von 1 MHz vorhanden waren, wurden einige Messungen mit dem ESHS 30 durchgeführt. Ab 1 MHz wurde generell mit dem HP 8593 EM gearbeitet. Die Nutzung von unterschiedlichen Meßgeräten garantierte einen ausreichenden Störabstand unterhalb von 1 MHz, führte aber zu Sprüngen in den entsprechenden Kurven.
In Abbildung 48 und Abbildung 49 sind die gemessenen und berechneten Daten dargestellt.

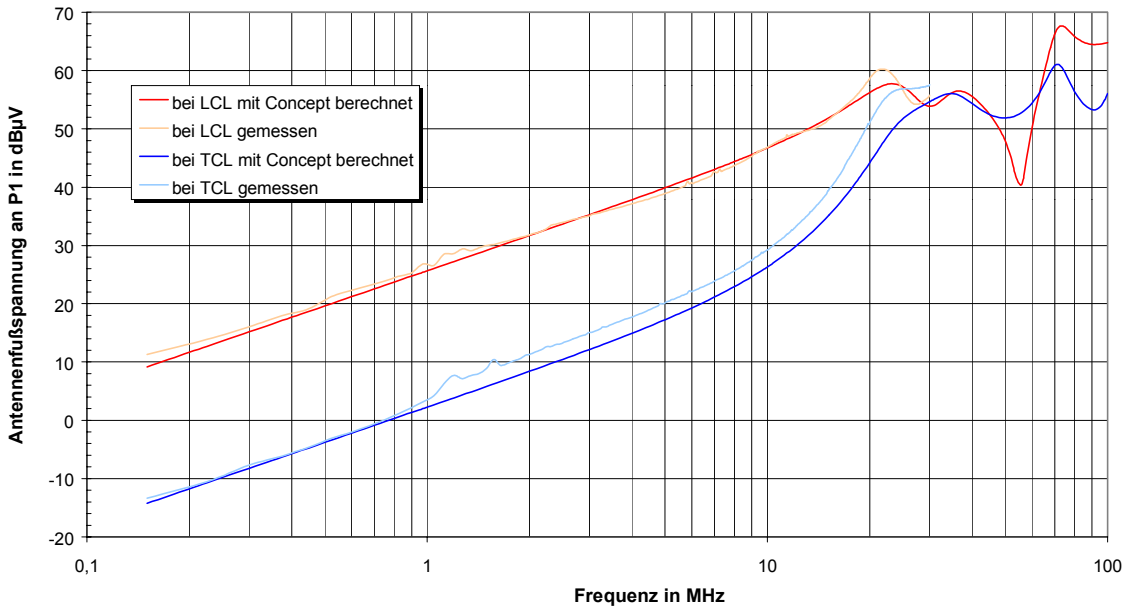


Abbildung 48 Berechnete und gemessene Antennenfußspannung am Meßpunkt P1

Auch diese Grafik bestätigt die gute Übereinstimmung zwischen numerischer Berechnung und Messung. Der bei 1 MHz vorhandene Sprung in TCL-Meßdaten hat seine Ursache in der angesprochenen Verwendung von unterschiedlichen Meßgeräten.

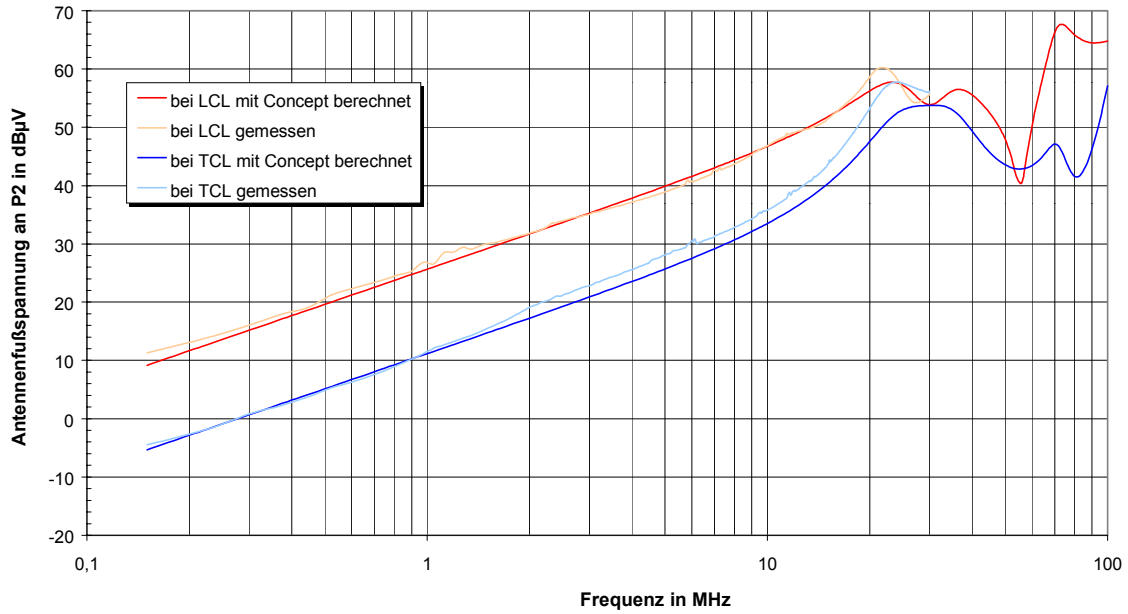


Abbildung 49 Berechnete und gemessene Antennenfußspannung am Meßpunkt P2

Die Kurve für die Antennenfußspannung bei symmetrischer Einspeisung zeigt bezüglich ihrer Resonanzen eine Ähnlichkeit mit dem Verlauf des LCL_{100} / TCL_{100} (vgl. Abbildung 47). Die durch die Resonanzen der eingekoppelten Spannung bedingten Minima des TCL_R finden sich nicht wieder.

Das bestätigen auch die Abbildung 50 und Abbildung 51, in der die um den TCL/LCL reduzierte Antennenfußspannungen an den Meßpunkten P1 und P2 einer 3m langen Eindrahtanordnung dargestellt sind.

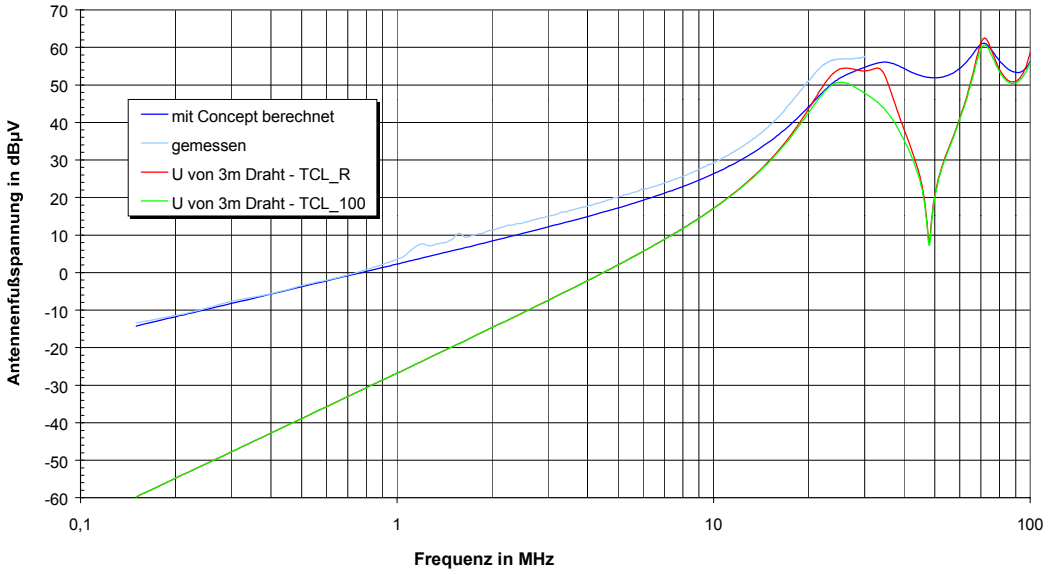


Abbildung 50 Vergleich der um den TCL reduzierten Antennenfußspannung am Punkt P1 eines 3m langen Drahtes und der Spannung bei TCL- Messung

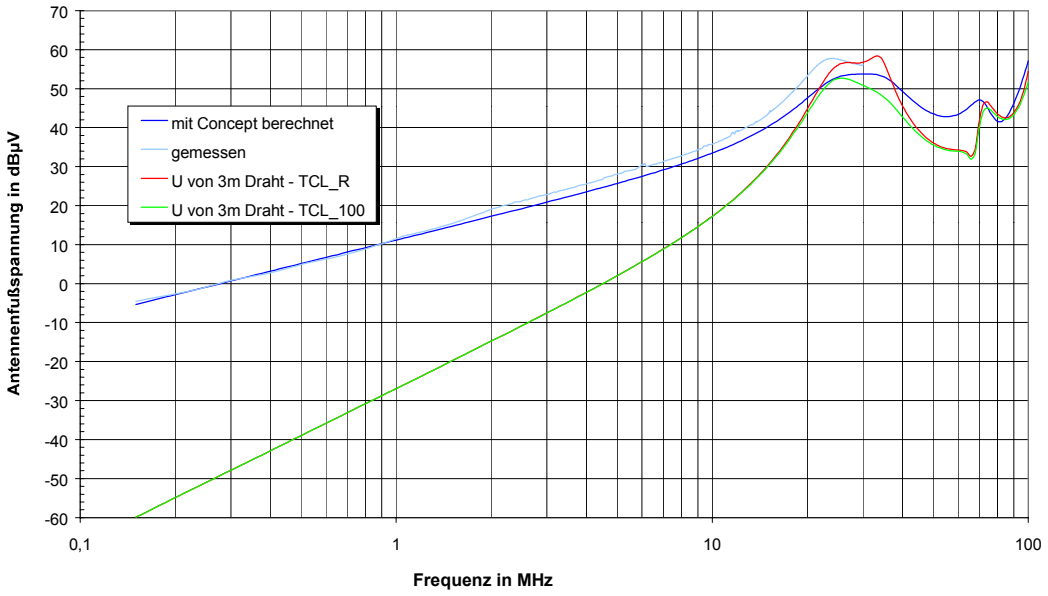


Abbildung 51 Vergleich der um den TCL reduzierten Antennenfußspannung am Punkt P2 eines 3m langen Drahtes und der Spannung bei TCL- Messung

An beiden Meßpunkten ist die Abweichung der modellierten Werte der Eindrahtanordnung von den Werten bei der TCL- Messung bei Frequenzen kleiner 20 MHz sehr hoch. Am Meßpunkt P1 ist zudem eine hohe Abweichung um 48 MHz festzustellen.

In der mit dem TCL_R berechneten Spannung ist die bereits erwähnte zusätzliche Resonanz zu erkennen. Offensichtlich beschreibt das Modell der Eindrahtanordnung die Realität nicht ausreichend, so daß eine Erweiterung der Modellvorstellung notwendig ist.

6.7 Anpassung des Modells

Die Abweichung von 47 dBµV zwischen den modellierten Werten (E-Feld) einer Eindrahtanordnung und den Werten der TCL-Messung ist durch den Einfluß des 1 m längeren Teilstücks vom 3 m langen Draht zu erklären. Entsprechend Abbildung 42 wird bei der symmetrischen Einspeisung jeder Draht der Anordnung mit der halben Signalspannung gegen Erde beaufschlagt. Das führt dazu, daß das 1 m lange, unsymmetrische Teilstück[1] bereits bei tiefen Frequenzen mit $0.5*U_{Signal}$ asymmetrisch gespeist wird. Das elektrische Feld kann im Modell durch die Überlagerung der Anteile der Eindrahtanordnung mit den Anteilen eines 1 m langen Stabes, der asymmetrisch mit $0.5*U_{Signal}$ gespeist wird, berücksichtigt werden.

Die Abweichung bei 48 MHz am Meßpunkt P1 läßt sich auf die Symmetrie der Anordnung zurückführen. Der Meßpunkt P1 liegt auf der Symmetrieachse der 3 m langen Ersatzanordnung, so daß bei dieser Frequenz eine Auslöschung von Feldanteilen auftritt. In einer ersten Näherung wird nur das 2 m lange, symmetrische Teilstück mit der aus der Unsymmetrie resultierenden asymmetrischen Spannung angeregt. Demzufolge ist eine Modellierung dieses Feldanteils durch eine 2 m lange Eindrahtanordnung sinnvoll. Der Ersatzradius (3,95 mm) kann durch einen Vergleich der asymmetrischen Kapazitäten der Eindrahtanordnung mit der realen Anordnung bestimmt werden.
In Abbildung 52 und Abbildung 53 sind die Anteile der einzelnen Teilmodelle zur Antennenfußspannung und die simulierte Gesamtspannung dargestellt.

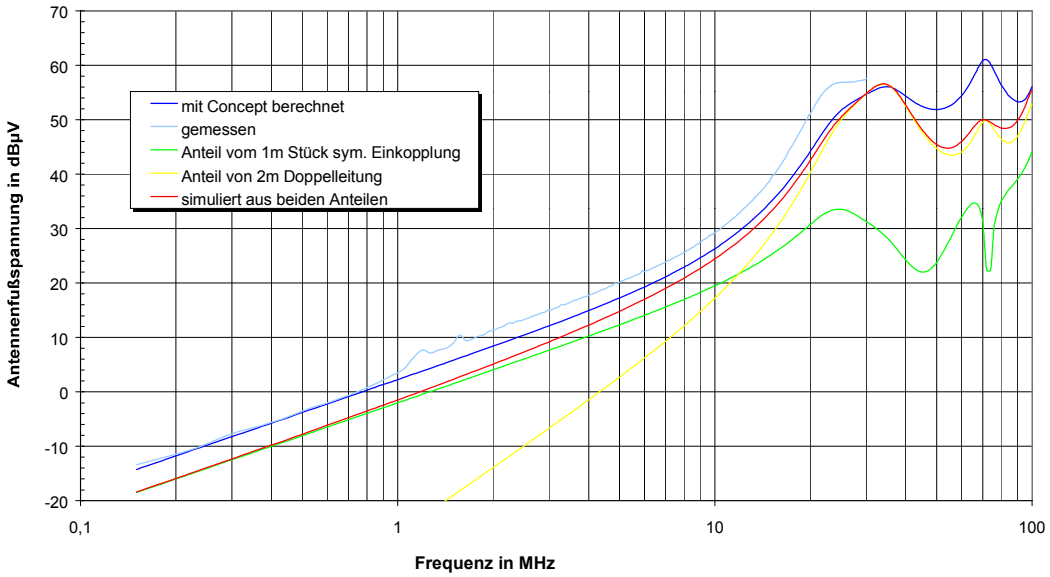


Abbildung 52 Vergleich der Anteile der einzelnen Stäbe, der simulierten Gesamtspannung und der Spannung bei der TCL- Messung am Punkt P1

[1] Für das Teilstück existiert kein symmetrisches Gegenstück. Dieser Fall tritt zum Beispiel auf, wenn Lampen, die in der Regel einphasig geschaltet werden, ausgeschaltet sind.

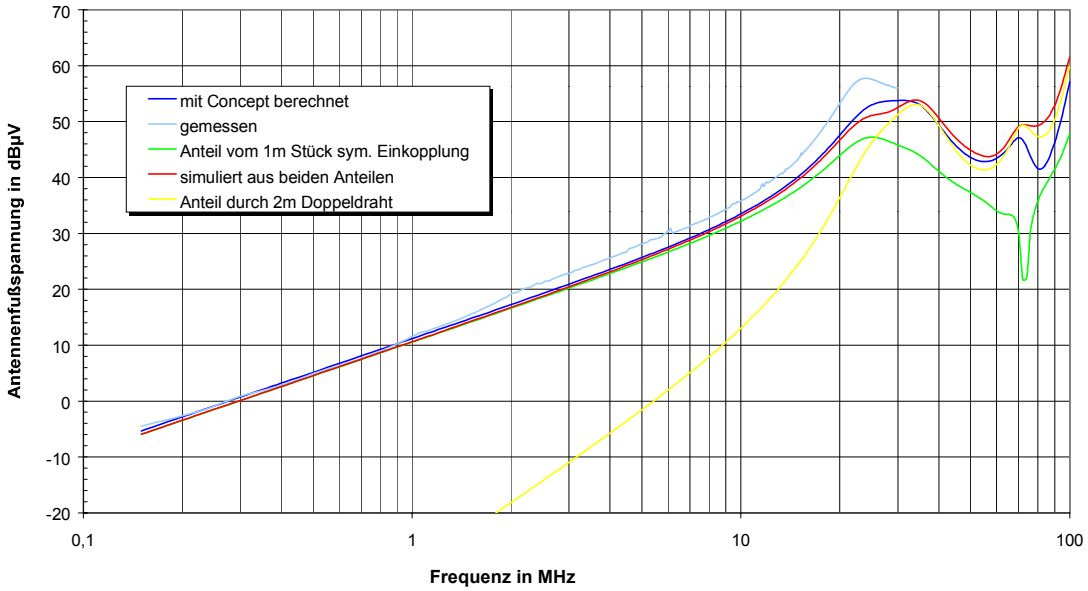


Abbildung 53 Vergleich der Anteile der einzelnen Stäbe, der simulierten Gesamtspannung und der Spannung bei der TCL- Messung am Punkt P2

Im Frequenzbereich kleiner 35 MHz ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den simulierten Werten und den Meßwerten zu erkennen. Das 1 m lange Teilstück trägt den Hauptanteil zum resultierenden elektrischen Feld bei. Im oberen Frequenzbereich, wenn die asymmetrische Spannung aufgrund eines geringen LCL hoch ist, überwiegt der durch die asymmetrische Spannung erzeugte Anteil. Eine reine Beachtung der asymmetrischen Komponente führt im unteren Frequenzbereich zu einer Unterschätzung der elektrischen Feldstärke.

6.8 Schlußfolgerungen

Bei der symmetrischen Einkopplung von Signalen in das 230 V-Netz sind bezüglich der Entstehung von elektromagnetischen Abstrahlungen folgende Sachverhalte zu beachten:

1. Der LCL_{100} bzw. der TCL_{100} beschreiben die Unsymmetrie des Netzes sehr gut und können als Grundlage für eine Abschätzung der zu erwartenden Feldstärken dienen.
2. Der TCL_{100} und LCL_{100} sind bei der gewählten Meßanordnung identisch; der Mechanismus des Übersprechens ist reziprok. Bei einer anderen Meßanordnung kann sich eine konstante Differenz aus den beiden Werten ergeben.
3. Bei einer einphasigen Leiterführung wird der LCL bzw. der TCL stark verringert.
4. Bei ausgeschalteten Geräten oder Baugruppen, z.B. ausgeschalteten Lampen oder eine einphasige Leiterführung, können bei ausreichend hohem LCL bereits störrelevante elektrische Feldstärken auftreten. Ursache dafür ist die asymmetrisch Speisung dieser Teilstromkreise mit der halben symmetrischen Signalspannung (erdbezogener Fall).
5. Bei geringen Werten des LCL / TCL, d.h. einer großen Unsymmetrie, lassen sich die Feldstärken durch eine Eindrahtanordnung berechnen.

7 LCL-TCL MESSUNGEN

Zur TCL-Messung wurde der in Abschnitt 4.4.1 beschriebene Meßaufbau verwendet.

7.1 LCL Dauermessungen

Der TCL/LCL ist stark von den angeschalteten Verbrauchern und den Impedanzverhältnissen des Netzes abhängig. Beispielsweise führt eine Verringerung der symmetrischen Impedanzen bei gleichbleibenden Steukapazitäten zu einer geringeren asymmetrischen Spannung und damit zu einem besseren TCL. So ist z.B. der Einsatz von Filtern in Geräten durch die X-Kondensatoren mit einer Verringerung der symmetrischen Impedanz im interessierenden Frequenzbereich verbunden. Um die zeitliche Abhängigkeit des LCL zu erfassen, wurde der LCL an fünf Meßpunkten im Elektrotechnischen Institut der TU Dresden während eines mehrstündigen Zeitraums von ca. 3 h bis 9 h untersucht. Die Ergebnisse sind ausführlich im Meßbericht [58] dokumentiert. Die Meßpunkte waren

- Laborraum R004, Erdgeschoß,
- Büroraum R215, 2. Etage,
- Laborraum R217, 2. Etage (zwei Meßpunkte),
- Tagungsraum R321, 3. Etage.

Es wurde die Größen LCL_R und LCL_{100} bestimmt, welche folgendermaßen definiert sind

$$LCL_R = 20 \cdot log \frac{U_{asym}}{U_{sym}}, \quad \textbf{(15)}$$

$$LCL_{100} = 20 \cdot log \frac{U_0}{U_{sym}}, \quad \textbf{(16)}$$

wobei U_{sym} die gemessene symmetrische Spannung, U_{asym} die gemessene asymmetrische Spannung, und U_0 die berechnete asymmetrische Spannung an der Einkoppelstelle für einen angepaßten Abschluß sind. Wie bereits dargestellt wurde, ist der LCL_{100} besser geeignet die Unsymmetrie zu beschreiben. Der LCL_R täuscht im oberen Frequenzbereich eine zu gute Symmetrie vor. Da der zeitliche Verlauf des LCL aber mit dem LCL_R bestimmt wurde, wird dieser hier informativ mit angegeben, da das zeitliche Verhalten prinzipiell gleich ist.

Die Zeitabhängigkeit des LCL war an den verschiedenen Meßpunkten unterschiedlich stark ausgeprägt. Während am Meßpunkt im R 215 der LCL im gesamten Frequenzbereich eine typische Schwankung von 5 - 20 dB aufwies, war jedoch in der Regel eine Abnahme der Schwankungen zu höheren Frequenzen hin zu beobachten. Dieses wird auch anhand der Abbildung 54 deutlich.

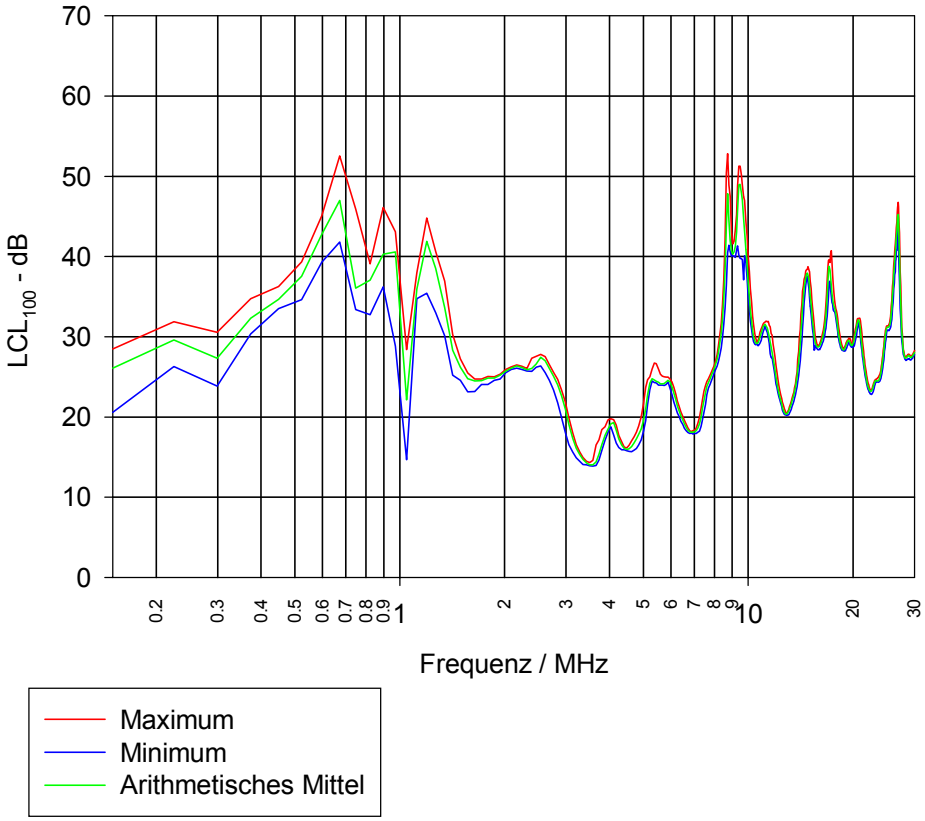


Abbildung 54 LCL_{100}, Raum 321

Ein Computer, der in einem Abstand von ca. 2 m von der Meßstelle betrieben wurde war die Ursache für stärke Schwankungen des LCL in einem Raum. Die Zeitvarianz wurde für die Frequenz 5 MHz genauer untersucht und ist in Abbildung 55 dargestellt.

Der LCL schwankt innerhalb einiger ms zwischen ca. 39 dB bis ca. 62 dB. Die Abweichung des maximalen LCL zwischen der Kurzzeitmessung und der Dauermessung bei 5 MHz wird durch das Meßverfahren verursacht. Der verwendete Peak-Detektor des Spektrumanalysators zeigt in Abhängigkeit von den Einstellungen kurzzeitige niedrige Spannungen nicht an. Somit wurden hohe Symmetrien von 60 dB innerhalb weniger ms während der Dauermessung, die eine Zeit für eine Gesamtmessung (Sweeptime) von 2 s verwendete, nicht berücksichtigt. Während der Kurzzeitmessung, in der die Zeitauflösung 250 µs betrug, wurden diese Werte jedoch gemessen.

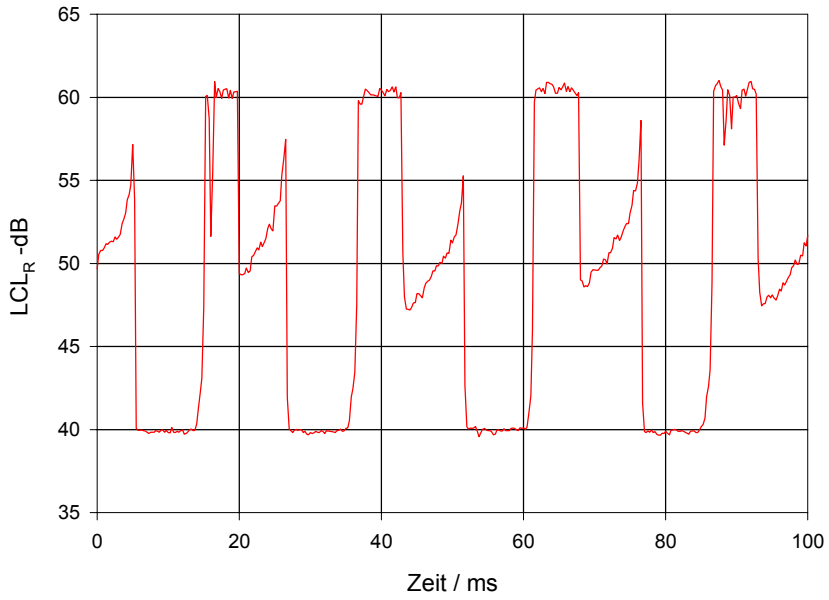


Abbildung 55 Kurzzeitverlauf des LCL$_R$, R 215

In Abbildung 56 ist der zeitliche Verlauf des LCL$_R$ bei fünf Frequenzen über einen Zeitraum von ca. 9 h dargestellt.

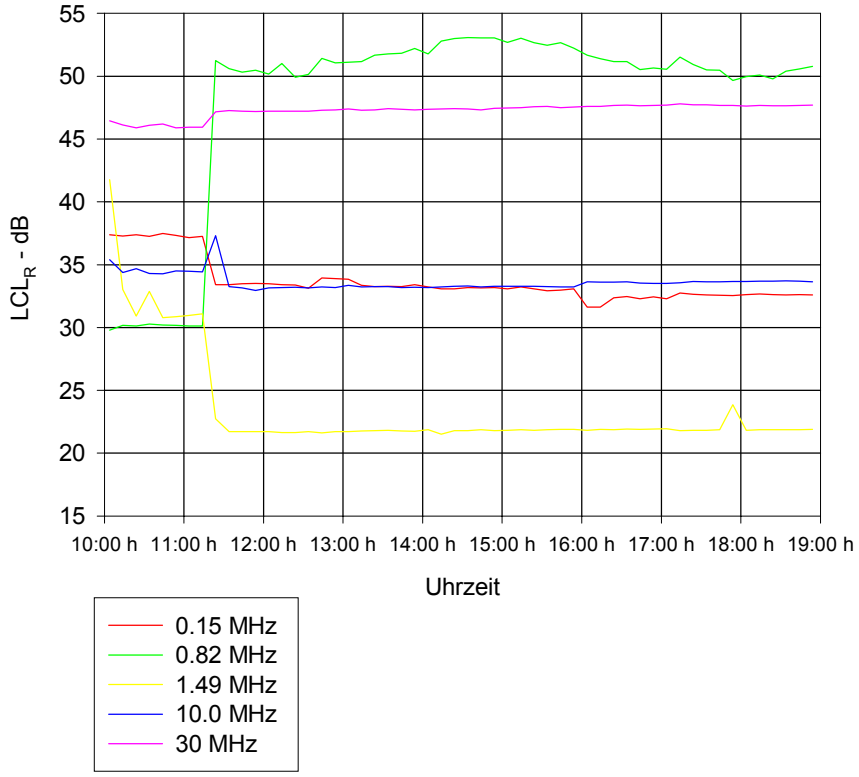


Abbildung 56 Zeitlicher Verlauf des LCL bei 5 verschiedenen Frequenzen, Raum 217, Steckdose 1

Der Verlauf an einzelnen Frequenzen läßt erkennen, wie der LCL in Abhängigkeit von den Nutzern oder Netzbedingungen innerhalb kürzester Zeit um 20 dB schwanken kann. Die Ursache dafür läßt sich zwar in den Netzbedingungen finden, aber nicht näher spezifizieren, auch wenn viele Möglichkeiten existieren, wie z.B. Schalthandlungen im Netz oder das Ausschalten bzw. die Inbetriebnahme von Geräten zu Pausenzeiten der Mitarbeiter.

Aufgrund dieses Verhaltens sollte eine statistische Interpretation des LCL erfolgen, d.h. die Spezifizierung eines Bereichs, in dem der LCL mit gewissen Wahrscheinlichkeiten gemessen wird. Dieser Bereich wäre für eventuelle Normungsansätze bei PLC zu berücksichtigen, um mit einer gewissen Sicherheit die vorhandenen Unsymmetrien zu erfassen und für den zulässigen symmetrischen Signalpegel zu berücksichtigen.

7.2 TCL an unterschiedlichen Meßobjekten

Bei den Feldstärkemessungen wurde an den Meßorten jeweils der TCL_{100} der Einkoppelstellen mitbestimmt. Die Auswertung mit einem Box-Plot ist in Abbildung 57 dargestellt.

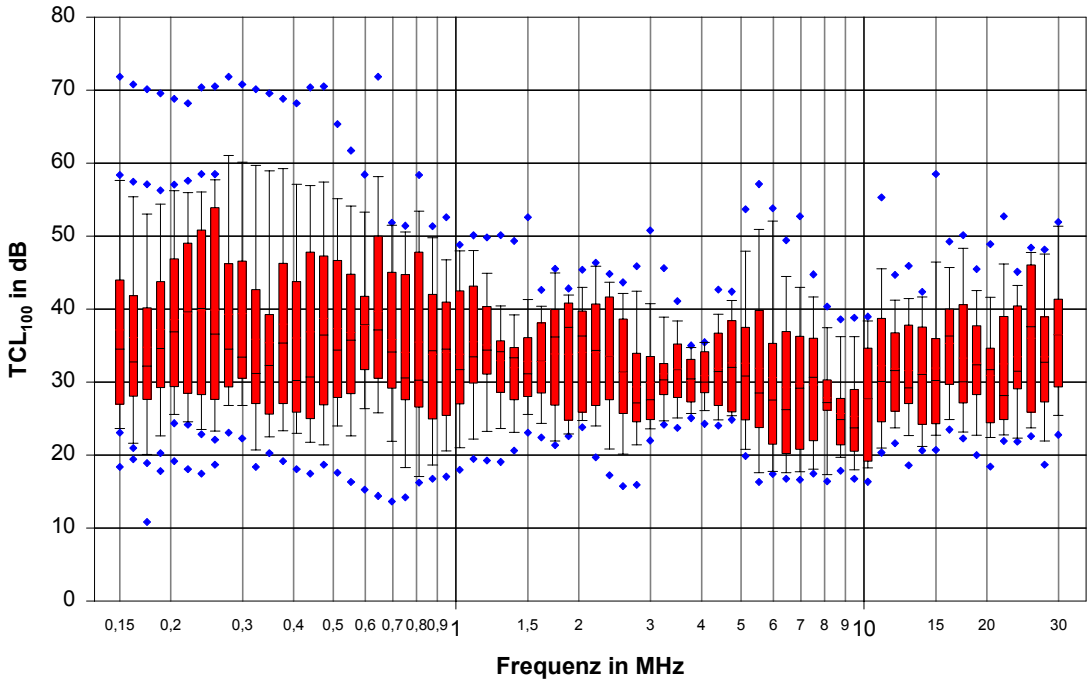


Abbildung 57 Bereich der gemessenen TCL_{100}-Werte

Entsprechend Abbildung 57 ist der gemessene TCL in 90 % der untersuchten Fälle größer als 20 dB und im oberen Frequenzbereich fast konstant bzw. etwas steigend. Dieses Verhalten wurde im Vorfeld so nicht erwartet.

An einem einfachem Modell wurde dargelegt, wie bereits geringe Steukapazitäten mit steigender Frequenz zu recht hohen asymmetrischen Spannungen führen können, da mit steigender Frequenz die unsymmetrischen Impedanzen und damit die Unsymmetrie immer größer wird. Demzufolge erwartet man eigentlich auch bei PLC mit zunehmender Frequenz

einen Abfall des TCL, d.h. eine größere Unsymmetrie. Dieses Verhalten wurde, wie oben bemerkt, bei den TCL Messungen nicht so eindeutig festgestellt.

Erklären könnte sich der Anstieg im oberen Frequenzbereich z.B. durch die Dämpfung der symmetrischen Signale auf den Netzleitungen lassen. Aufgrund der Zunahme der Dämpfung mit der Frequenz erfahren Signale im oberen Frequenzbereich eine stärkere Dämpfung, bis sie die Orte großer Unsymmetrie erreichen. Bezogen auf eine konstante Signalgröße wird dort zwar eine größere asymmetrische Komponente erzeugt, real kann aber das asymmetrische Signal aufgrund des bereits gedämpften symmetrischen Signals geringer mit steigender Frequenz werden.
Die asymmetrische Dämpfung ist relativ gering, so daß das asymmetrische Signal bis zur Meßstelle wenig verfälscht wird. Insgesamt könnte, wenn die Unsymmetrien weiter von der Einspeisung entfernt sind, der durch die Dämpfung hervorgerufenen Anteil überwiegen, so daß in Summe ein fallender LCL an der Meßstelle beobachtet werden könnte. Dieser Anstieg des LCL ist nicht mit einer besseren Symmetrie des Netzes gleichzusetzen, sondern ist nur Ausdruck für eine scheinbar bessere Symmetrie an der Einspeisestelle.
Auch dieses Verhalten erfordert eine Bestimmung des TCL an mehreren Stellen im Netz und in unmittelbarer Nähe zu Verbrauchern mit großer Unsymmetrie, da eine spätere Einkopplung der PLC Signale an diesen Stelle durchaus denkbar ist.

8 MAGNETISCHE FELDER BEI SYMMETRISCHER EINSPEISUNG

Es wurde das Abstrahlverhalten von 230 V-Stromversorgungsnetzen bei Einspeisung symmetrischer Spannungen untersucht. Für die Untersuchungen wurden ein Bürogebäude, ein Einfamilienhaus, ein Hochhaus in Plattenbauweise, ein Altbau und ein Mehrfamilienhaus ausgewählt.

Bei der Messung wurde an verschiedenen Steckdosen innerhalb der Gebäude eine symmetrische Spannung eingekoppelt und die H-Feldstärke in der Umgebung in drei orthogonalen Raumrichtungen gemessen. Zur Einkopplung wurde der gleiche Aufbau wie zur TCL-Messung genutzt. Die Feldstärke wurde mit einer Rahmenantenne, die mit dem Meßeingang des verwendeten Meßempfängers verbunden war, gemessen. Es wurden Frequenzen ausgewählt, bei denen möglichst keine Störer im Hintergrundrauschen vorhanden waren. Zur Überprüfung wurde das Hintergrundrauschen bestimmt.

An den Einkoppelstellen wurden außerdem die asymmetrischen und symmetrischen Spannungen sowie der Transversal Conversion Loss (TCL_{100}) bestimmt.

Die Meßpunkte wurden so gewählt, daß sie ca. 1 m bzw. 3 m Abstand zu Wänden des Gebäudes hatten. Die kompletten Ergebnisse können den Meßberichten [59]-[63] entnommen werden, die Bestandteil der Studie sind. An dieser Stelle soll nur auf die wichtigsten Ergebnisse eingegangen und ein Gesamtzusammenhang hergestellt werden.

8.1 Magnetische Feldstärke bei Einspeisung innerhalb von Gebäuden

8.1.1 Einfluß des asymmetrischen Abschluß des Baluns

Der Balun wurde im normalen Betrieb mit 50 Ω asymmetrisch gegen Masse abgeschlossen. Um den Einfluß dieses definierten Abschlusses auf die resultierenden Feldstärken zu überprüfen, wurde eine Vergleichsmessung mit und ohne asymmetrischen Abschluß des Baluns durchgeführt. In Abbildung 58 und in Abbildung 59 sind die Ergebnisse dargestellt.

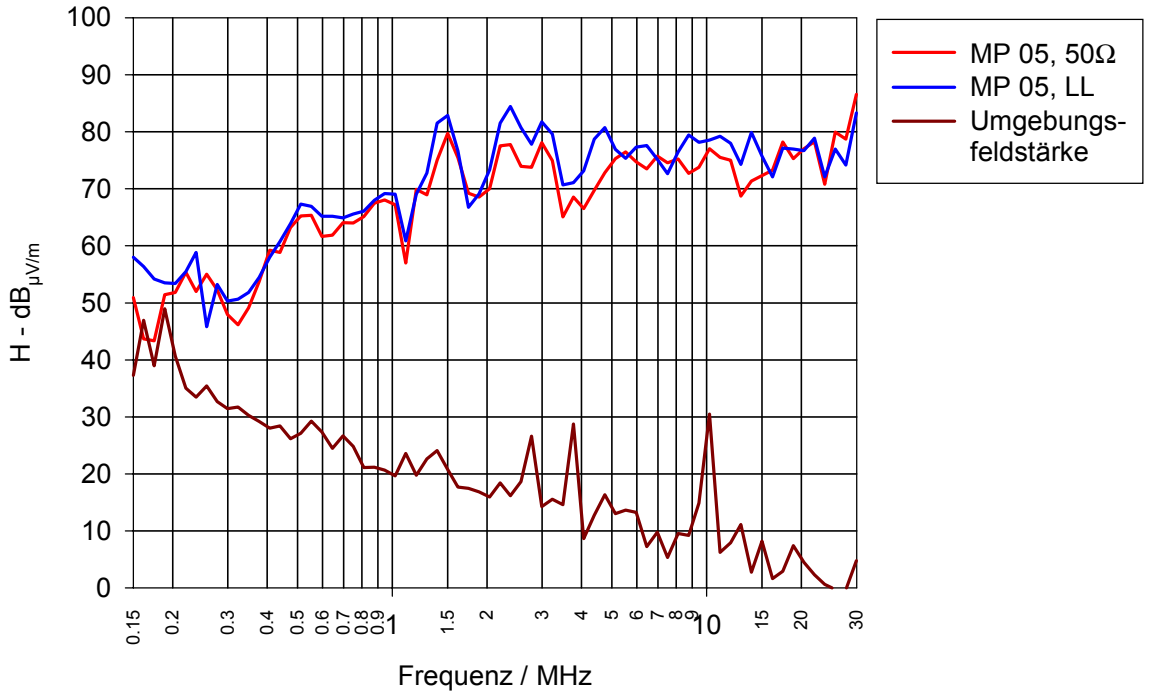


Abbildung 58 **Feld mit 50 Ω und ohne (LL) asymmetrischen Abschluß des Baluns, Meßpunkt in R217**

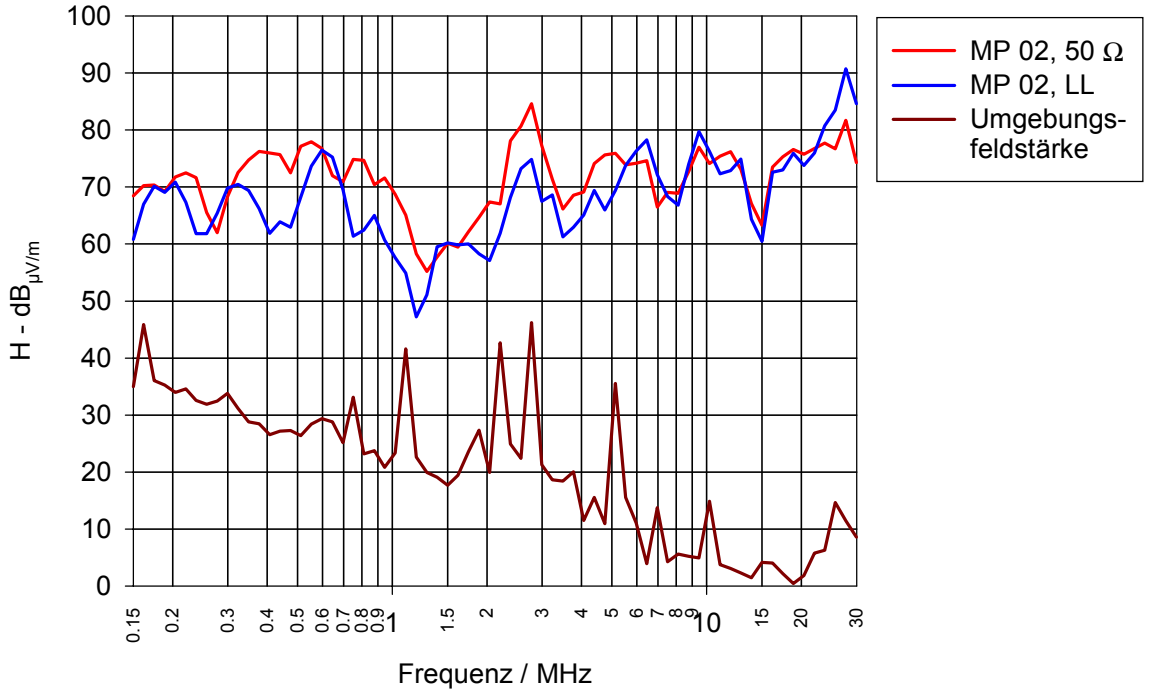


Abbildung 59 **Feld mit 50 Ω und ohne (LL) asymmetrischen Abschluß des Baluns, Meßpunkt in R125**

Entsprechend den Abbildungen kann nicht generell von einer Verringerung der Feldstärken bei einer Einspeisung ohne asymmetrischen Abschluß ausgegangen werden. Nur an vereinzelten Meßpunkten und Frequenzen wird ohne den Abschluß eine geringere Feldstärke gemessen.

8.1.2 Maximale und minimale magnetische Feldstärken

Bei den Untersuchungen wurde jeweils eine symmetrische Spannung von 105 dBµV über die Einkoppelvorrichtung in die Steckdosen des 230 V-Netzes eingekoppelt. Die minimalen und maximalen Feldstärken der einzelnen Messungen und Meßobjekte sind in Abbildung 60 und Abbildung 61 dargestellt.

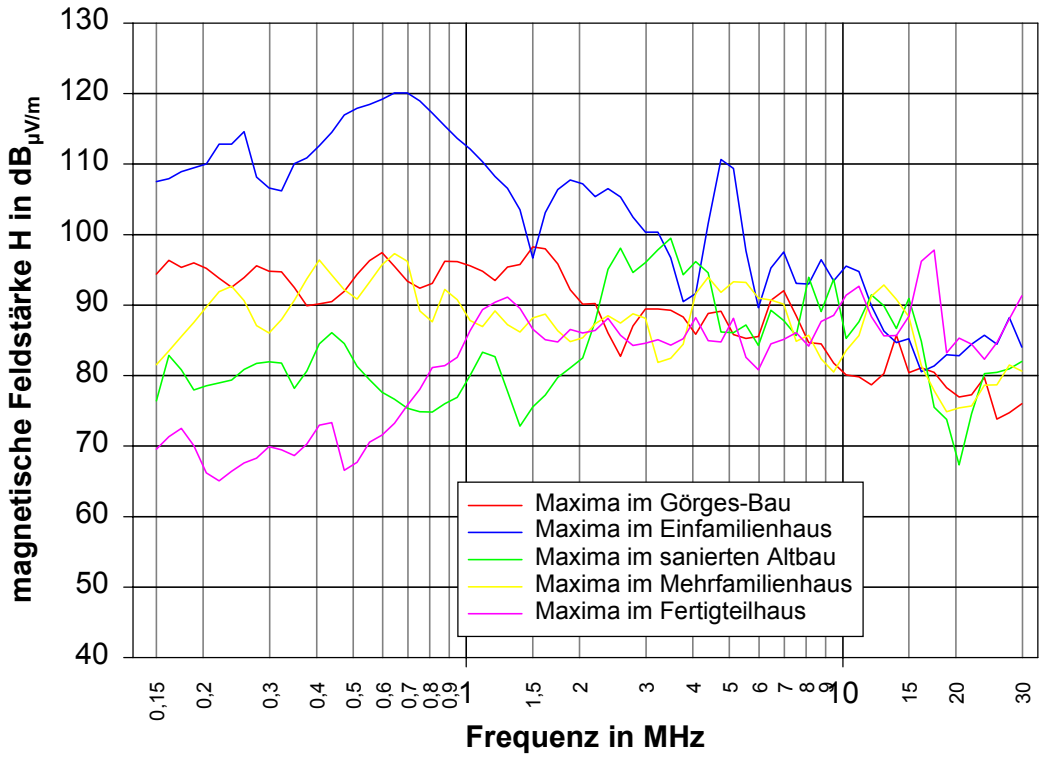


Abbildung 60 Maximale gemessene Feldstärke der einzelnen Emissionsmessungen

Im unteren Frequenzbereich, f<2 MHz, weichen die einzelnen Maxima stark voneinander ab. So ist die Maximale Feldstärke im Einfamilienhaus mit 120 $dB_{\mu V/m}$ am größten in einem Hochhaus aus den 60er Jahren mit rund 70 $dB_{\mu V/m}$ am geringsten, woraus sich eine Spanne von 50 dB ergibt. Im oberen Frequenzbereich sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Kurven nicht mehr so groß und betragen ca. 15dB.
Das Maximum von 120 $dB_{\mu V/m}$ wurde in etwa 7m Abstand von der Einkoppelstelle, in direkter Nähe zum Hausverteiler gemessen, wobei zwei Etagen zwischen diesen beiden Punkten lagen.

Der Unterschied zwischen den Minima im unteren Frequenzbereich, f<2 MHz beträgt ca. 40 dB und ist geringer als der Unterschied der Maxima. Dafür sind in diesem Bereich die

minimalen Feldstärken, die im Görgesbau gemessen wurden in der gleichen Größenordnung wie die maximalen Feldstärken in dem Hochhaus in Plattenbauweise.

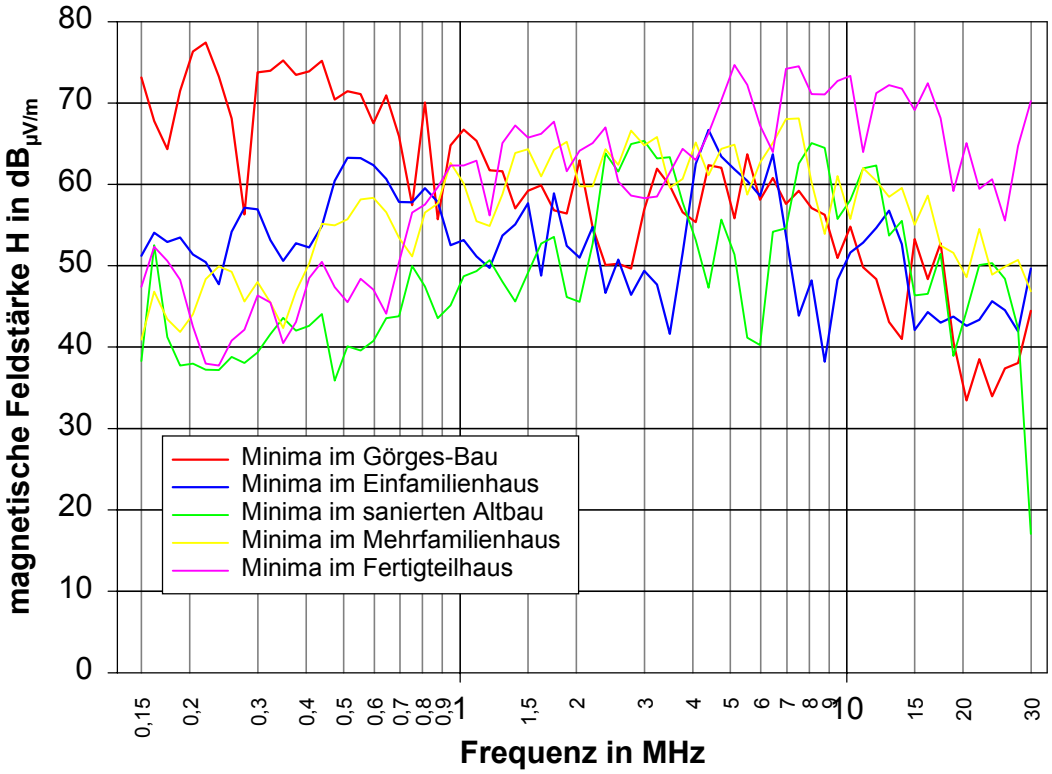


Abbildung 61 Minimale gemessene Feldstärke der einzelnen Emissionsmessungen

Es ist zu erkennen, daß symmetrisch eingekoppelte Spannungen Ursache für sehr hohe magnetische Feldstärken sind, die im Einzelfall nicht in unmittelbarer Nähe zur Einkoppelstelle, sondern in einigem Abstand zu dieser auftreten. Eine Abschätzung der maximal zu erwartenden Feldstärken scheint schwierig und die Daten sollten in Abhängigkeit von der Fragestellung entweder statistisch behandelt werden oder unter Ausnutzung der maximalen Feldstärken in eine Worst Case Analyse einbezogen werden.

Es muß hier noch darauf hingewiesen werden, daß die Maxima bei den einzelnen Meßobjekten unter Umständen aufgrund der Beschränkung der Anzahl von Meßpunkten nicht erfaßt wurden.

8.1.3 Örtliche Verteilung der magnetischen Feldstärke

Für einen Wohnraum mit rund 27 m^2 Grundfläche wurde die örtliche Verteilung der magnetischen Feldstärke bei der Einkopplung einer symmetrischen Spannung von 105 $dB_{\mu V}$ an den Koordinaten (0,0) für 70 Frequenzen im Bereich zwischen 150 kHz und 30 MHz bestimmt [60]. Die Mauern bestanden aus Kalksandstein und der Raum war mit Möbeln ausgestattet.

Die Meßpunkte wurden im Abstand von 1 m in der x- und der y-Koordinate, mit mindestens 1 m Abstand von den Wänden gewählt. Die Einspeisung lag am Punkt (0,0). Zur graphischen Darstellung wurden die Daten mit einem Raster von 0,5 m interpoliert. Die Abbildung 62 bis Abbildung 65 zeigen die örtliche Verteilung der Feldstärke innerhalb des Raumes für vier unterschiedliche Frequenzen.

Auf der Leitung ergibt sich in Abhängigkeit von der Frequenz eine unterschiedliche Lage der Strom- und Spannungsknoten. Diese sind räumlich mit korrespondierenden Maxima bzw. Minima der magnetischen Feldstärke verbunden, die in den Grafiken zu erkennen sind.

Bei einer Frequenz von $f = 150$ kHz, bzw. einer Wellenlänge von $\lambda = 2$ km, würde sich annähernd ein Abstand von 1 km zwischen zwei Nullstellen ergeben. Wird in einer ersten Annahme unter Vernachlässigung der Koppelkapazitäten zur Erde von einer am Ende leerlaufenden Leitung ausgegangen, so wird am Leitungsende ein Maximum der Spannung und ein Minimum des asymmetrischen Stromes vorhanden sein. Das Maximum des Stromes und somit das resultierende Maximum der magnetischen Feldstärke wird sich in großer Entfernung von den untersuchten Punkten befinden. Innerhalb des Raumes wird sich die Feldstärke nur geringfügig ändern.

Die Annahme einer leerlaufenden Leitung ist in der Praxis nicht gerechtfertigt, da sich durch den Anschluß von Verbrauchern, z.B. mit Filterschaltungen, eine beliebige Lage auf dem Strom- bzw. Spannungsverlauf ergeben kann. In jedem Fall prägen werden sich aufgrund der großen Wellenlänge innerhalb eines Raumes wenig Feldstärkemaxima ausprägen und die Feldstärke wird sich nur geringfügig ändern. In Abbildung 62 ist nur ein Feldstärkemaximum bei (1,3) zu erkennen.

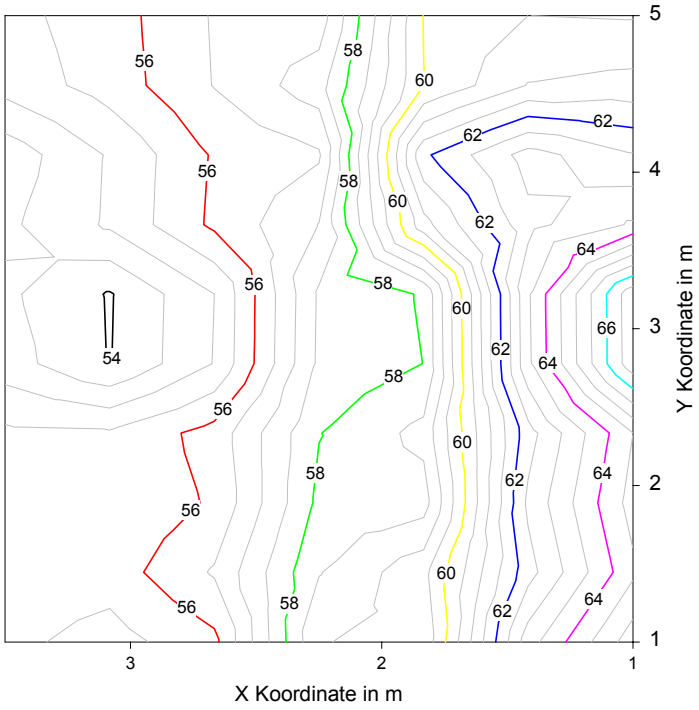


Abbildung 62 Örtliche magnetische Feldstärke in $dB_{\mu V/m}$ 150 kHz

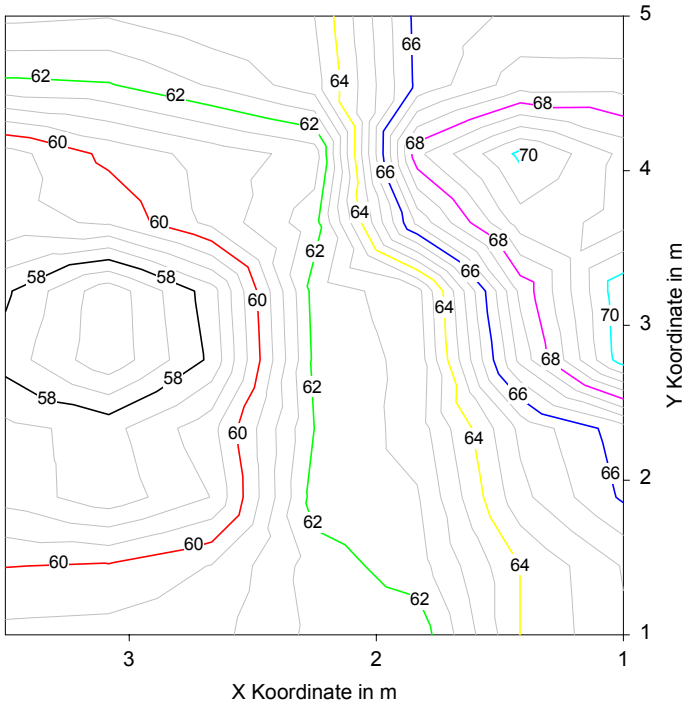


Abbildung 63 Örtliche magnetische Feldstärke in $dB_{\mu V/m}$ bei 1 MHz

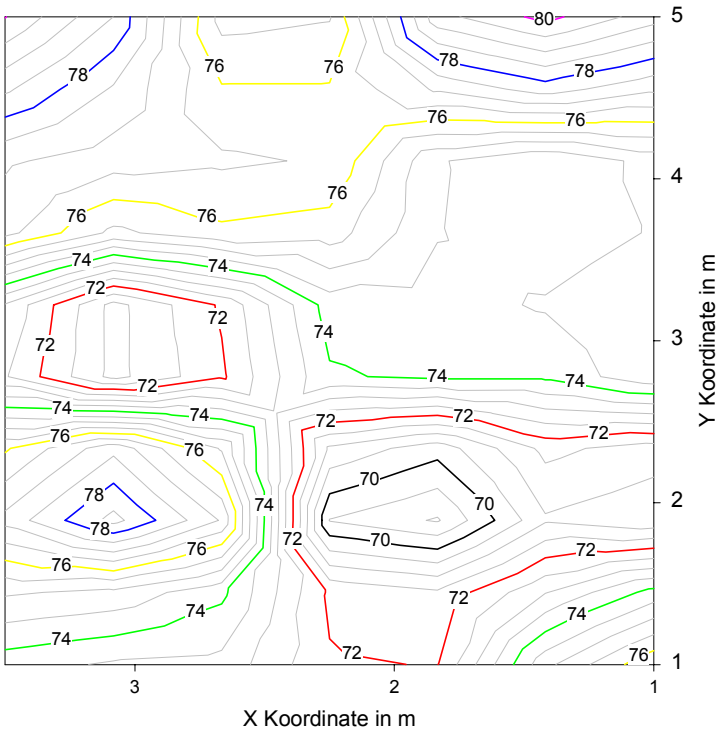


Abbildung 64 Örtliche magnetische Feldstärke in $dB_{\mu V/m}$ bei 10 MHz

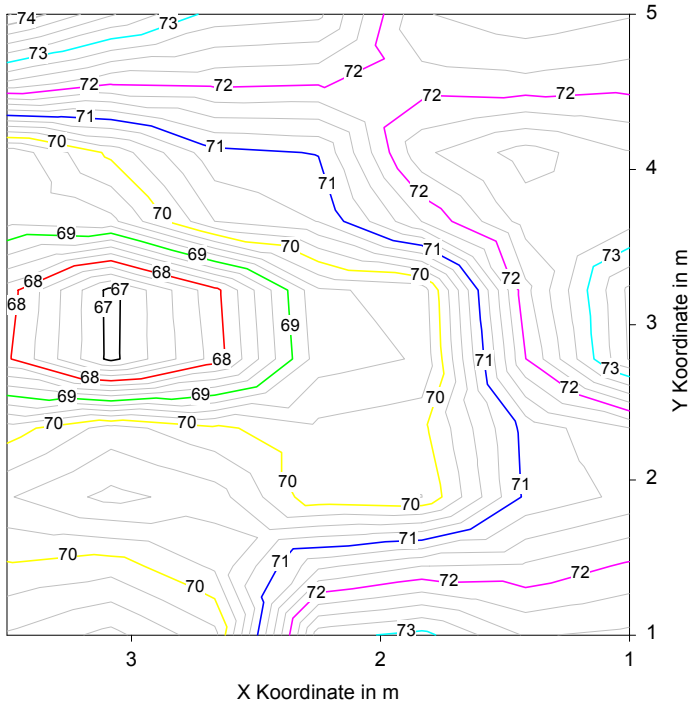


Abbildung 65 Örtliche magnetische Feldstärke in $dB_{\mu V/m}$ bei 30 MHz

Mit zunehmender Frequenz nimmt die Wellenlänge ab und es können sich in Abhängigkeit von der Leitungslänge innerhalb der Raumes auch mehrere Strom- bzw. Spannungsmaxima und damit auch mehrere Feldstärkemaxima bzw. –minima ergeben. Aufgrund der Feldüberlagerung der Anteile einzelner, in unterschiedliche Richtungen verlegter Leitungen kann dieser Effekt noch verstärkt werden.

Die Maxima sind in gewissem Abstand entlang der verlegten Leitung zu finden. Bei 30 MHz, d.h. in Abbildung 65, ist die Ausprägung der Maxima entlang der Leitungen zu erkennen.

Bei den untersuchten Frequenzen und Meßpunkten variiert die Feldstärke innerhalb des Raumes um maximal ca. 12 dB. Sie wird räumlich verschleppt. Aufgrund der verteilten Leitungen mit den verbundenen Ausbreitungs- und Überlagerungseffekten kann von einem sich räumlich schwach änderndem Betrag der Feldstärke ausgegangen werden. Diese Aussage deckt sich mit den Ergebnissen der Untersuchung am künstlichen Netz, vgl. Abschnitt 5

8.1.4 Einkopplung an der Hauseinspeisung

In Abschnitt 2 wurde zwischen zwei Einspeisungsarten für PLC-Signale unterschieden:

- Einkopplung am Ende oder in der Mitte eines Leitungsstrangs,
- Einkopplung an der Verteilung.

Durch den Einsatz von Repeatern beinhaltet der erste Fall den zweiten, da sich die Signale bis zur Verteilung ausbreiten und dort mit maximal zulässiger Amplitude wieder auf alle Leitungen eingespeist werden. Bei Verwendung von Repeatern wäre demzufolge das Störpotential bei einer Einspeisung in einen Leitungsstrang voraussichtlich größer. Bei den untersuchten Objekten wurde kein Repeater verwendet.

Interessant ist die Einspeisung in unmittelbarer Nähe zum Erdungsanschluß des Gebäudes. In diesem Fall liegt die Vermutung nahe, daß man von einer direkten asymmetrischen Signaleingekopplung ausgehen kann, da der N-Leiter räumlich gesehen unmittelbar mit dem PE-Leiter und dem Erder verbunden ist. Daher könnte man in einer ersten Annahme hier mit einem höheren Störpotential rechnen.

Eine Messung sollte belegen, ob diese Annahme gerechtfertigt ist. Dazu wurde in einem Mehrfamilienhaus eine Spannung zwischen L und N direkt an der Hauseinspeisung (EK1) eingekoppelt und die magnetischen Feldstärken in der Umgebung gemessen. Die Maxima dieser Messung wurden mit den Meßergebnissen bei Einkopplung in größerer Entfernung von der Hauseinspeisung verglichen.

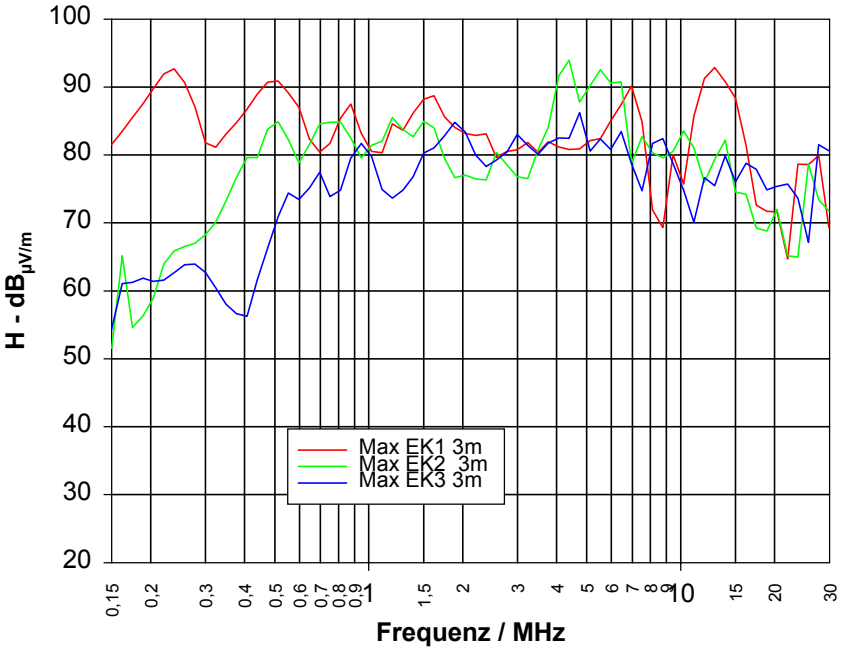


Abbildung 66 Vergleich der maximalen magnetischen Feldstärken in einem Mehrfamilienhaus in Abhängigkeit von der Einkoppelstelle, EK1 direkt an der Hauseinspeisung, Meßabstand von der Einkoppelstelle bis 3m

In Abbildung 66 bis Abbildung 68 sind die Ergebnisse bei in Abhängigkeit von der Abstandskategorie graphisch dargestellt.

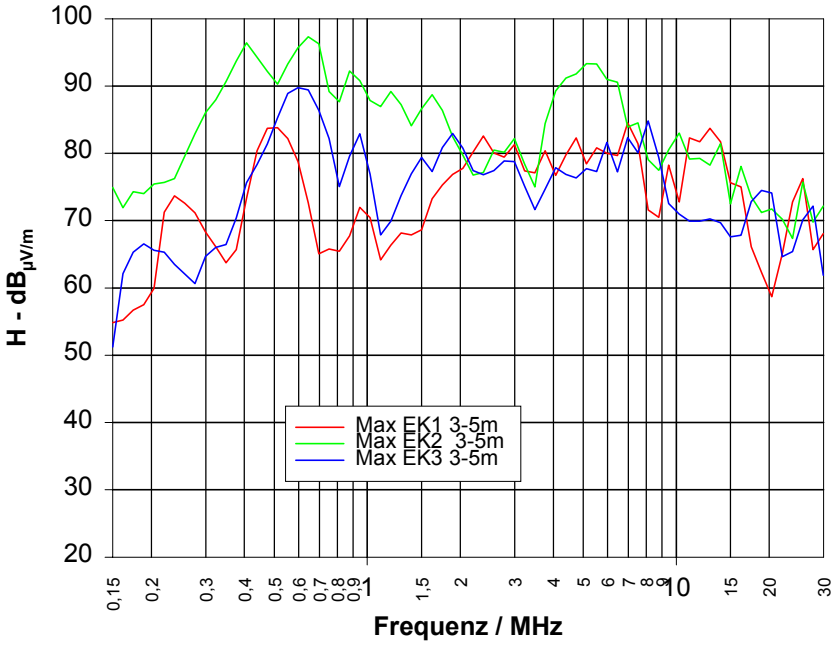


Abbildung 67 **Vergleich der maximalen magnetischen Feldstärken in einem Mehrfamilienhaus in Abhängigkeit von der Einkoppelstelle, EK1 direkt an der Hauseinspeisung, Meßabstand von der Einkoppelstelle zwischen 3m und 5m**

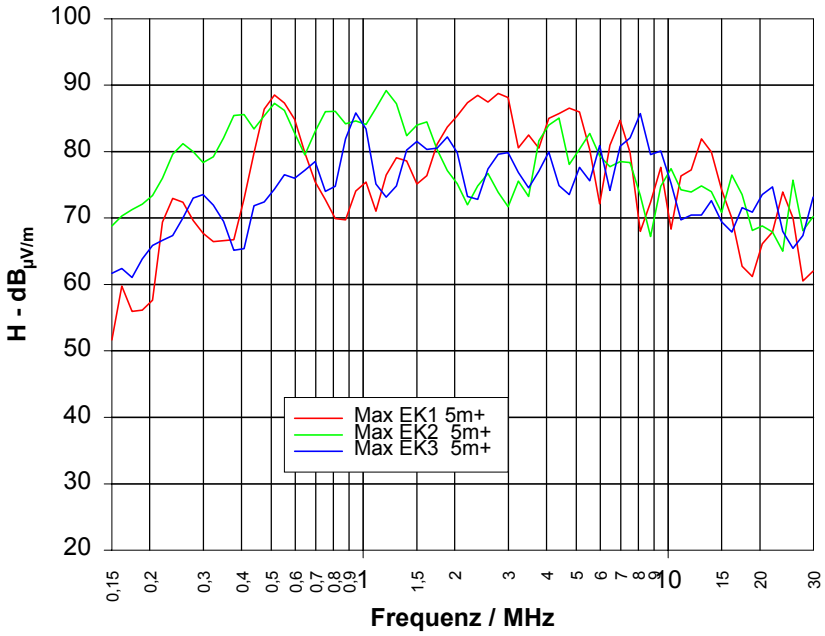


Abbildung 68 **Vergleich der maximalen magnetischen Feldstärken in einem Mehrfamilienhaus in Abhängigkeit von der Einkoppelstelle, EK1 direkt an der Hauseinspeisung, Meßabstand von der Einkoppelstelle größer 5m**

Die Meßergebnisse zeigen keine erhöhten Feldstärken gegenüber der Einspeisung an anderen Punkten des Gebäudes. Eine Erklärung des Phänomens liefert der TCL, der sich prinzipiell nicht vom Verlauf des TCL an Meßpunkten unterschied, d.h. die durch Unsymmetrie erzeugte Spannung an der Einspeisestelle ist nicht höher. Es läßt sich daraus folgern, daß die räumliche Nähe des Erders für Frequenzen ab 150 kHz nicht mit einer elektrisch kurzen und niederimpedanten Verbindung zu einer HF-Masse gleichzusetzen ist.

Sicher ist hier noch eine Verfeinerung des Modells notwendig, die jedoch nicht Inhalt dieser Studie war. Vorerst kann nicht davon ausgegangen werden, daß der Ort der Einspeisung einen signifikanten Einfluß auf die erzeugten magnetischen Feldstärken hat.

8.1.5 Entfernungsabhängigkeit der gemessenen maximalen Feldstärken

Wertet man die maximalen magnetischen Feldstärken der einzelnen Emissionsmessungen [59]-[63] innerhalb von Gebäuden aus und unterteilt die Meßergebnisse nach Abständen bzw. Etagen, so ist monotone Entfernungsabhängigkeit nicht zu erkennen. So belegen z.B. die Abbildung 69 und die Abbildung 70, daß die Maxima der Feldstärke in größerem Abstand von der Einkoppelstelle oder auch in anderen Etagen auftreten können.

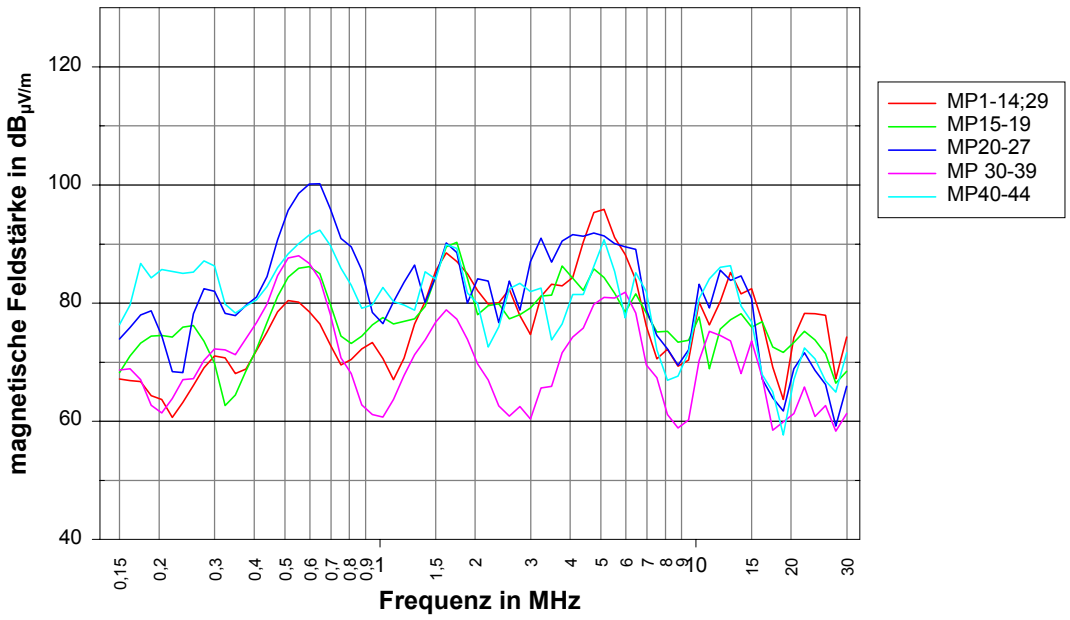


Abbildung 69 **Maxima der magnetischen Feldstärke in einem Einfamilienhaus bei Einkopplung im Erdgeschoß; MP1-19 und MP29 im EG; MP 20-27 im OG, MP 30-39 außerhalb des Gebäudes, MP 40-44 im Keller**

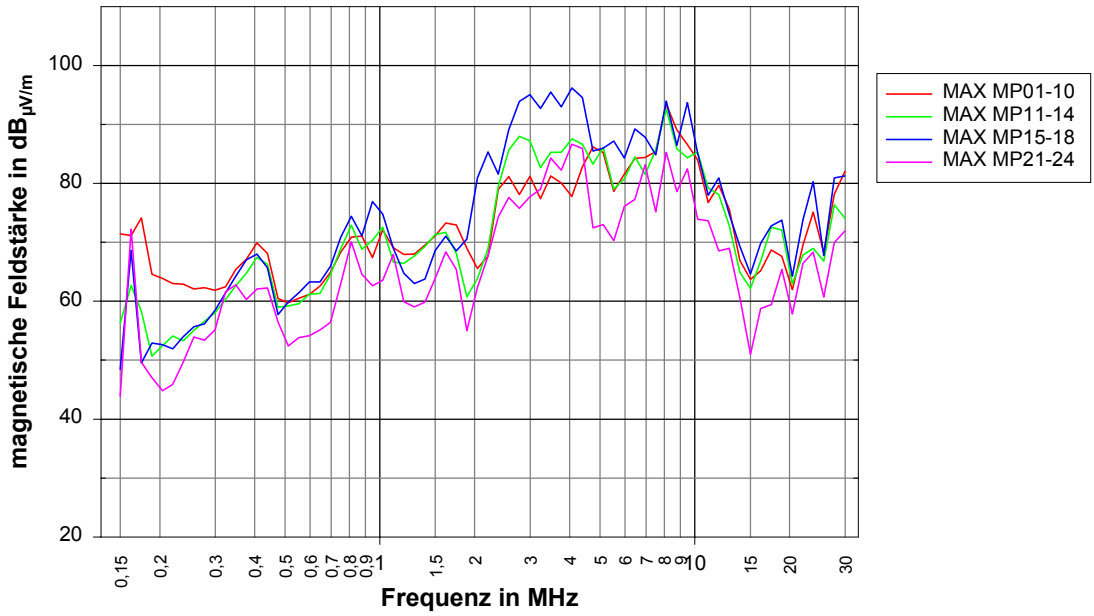


Abbildung 70 **Maxima der magnetischen Feldstärke in einem sanierten Altbau; MP 1-10 bis 3m Abstand; MP 11-14 bis 5m Abstand; MP 15-18 größer 5m Abstand von Einkoppelstelle; MP21-24 im Hausflur (Störer bei 0,16 MHz)**

8.1.6 NB 30 bezogene Auswertung mit Box-Plots

Zum Schutz des Funkempfangs vor unzulässigen Störungen durch Kommunikationsanlagen wurde von der RegTP die Nutzungsbestimmung NB 30 herausgegeben. In dieser sind Grenzwerte für die magnetische Feldstärken angegeben, die von betriebenen Systemen eingehalten werden müssen. Die Grenzwertkurve ist in Abbildung 71 dargestellt.

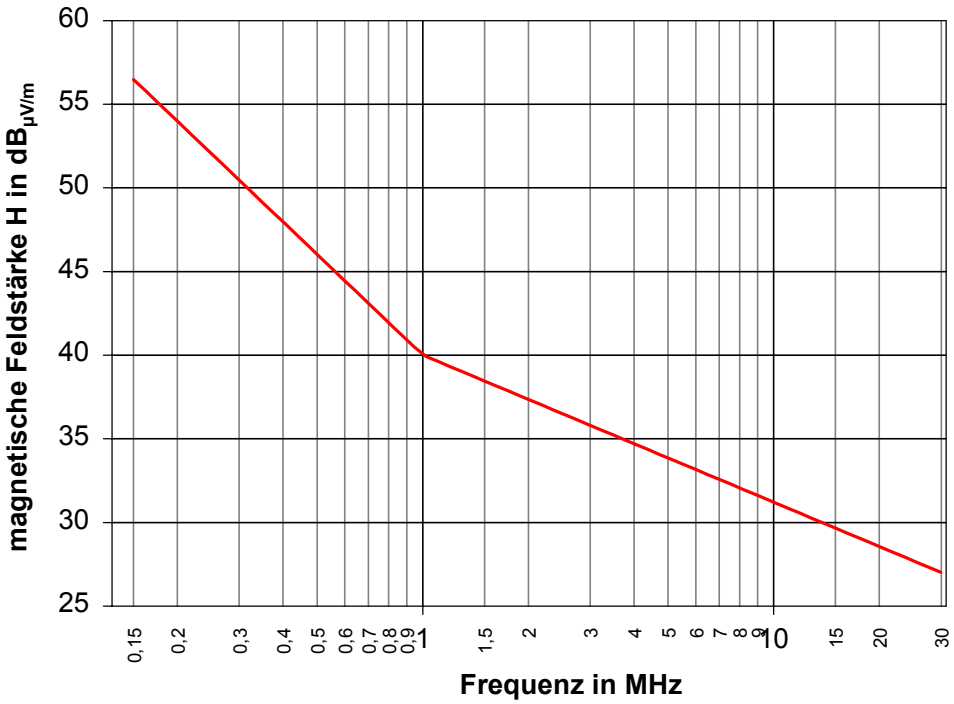


Abbildung 71 Grenzwert der magnetischen Feldstärke gemäß NB 30

Zur NB 30 bezogenen Auswertung wurde die symmetrische Spannung $U_{s,\,NB\,30}$ berechnet, die zu einer maximal zulässigen Emission gemäß Grenzwert nach NB 30 führen würde. Diese Spannung wurde aus der symmetrischen Spannung an der Einkoppelstelle für einen angepaßten Abschluß $U_{0,\,sym}$, der gemessenen magnetischen Feldstärke H_{ist} und der maximal zulässigen Feldstärke gem. NB 30 $H_{NB\,30}$ wie folgt berechnet:

$$U_{s,NB30} = U_{0,sym} \cdot \frac{H_{NB30}}{H_{ist}}. \qquad \textbf{(17)}$$

Die große Streuung der Meßwerte macht eine Interpretation der Daten durch sogenannte Box-Plots sinnvoll, die eine Auswertung der gesamten Meßdaten ermöglichen.
In diesen wird der Median als Linie, der Bereich 10 %-90 % als Intervall und der Bereich 25 %-75 % als Box gezeigt. Zusätzlich werden Ausreißer eingezeichnet die außerhalb des 10 %-90 % Intervalls liegen. Durch Box-Plots läßt sich eine große Anzahl von relevanten Daten übersichtlich darstellen.
Die Box-Plots der einzelnen Emissionsmessungen können den Meßberichten entnommen werden. Hier wird als Beispiel in Abbildung 72 nur der Plot bei Einspeisung in einen sanierten Altbau dargestellt.

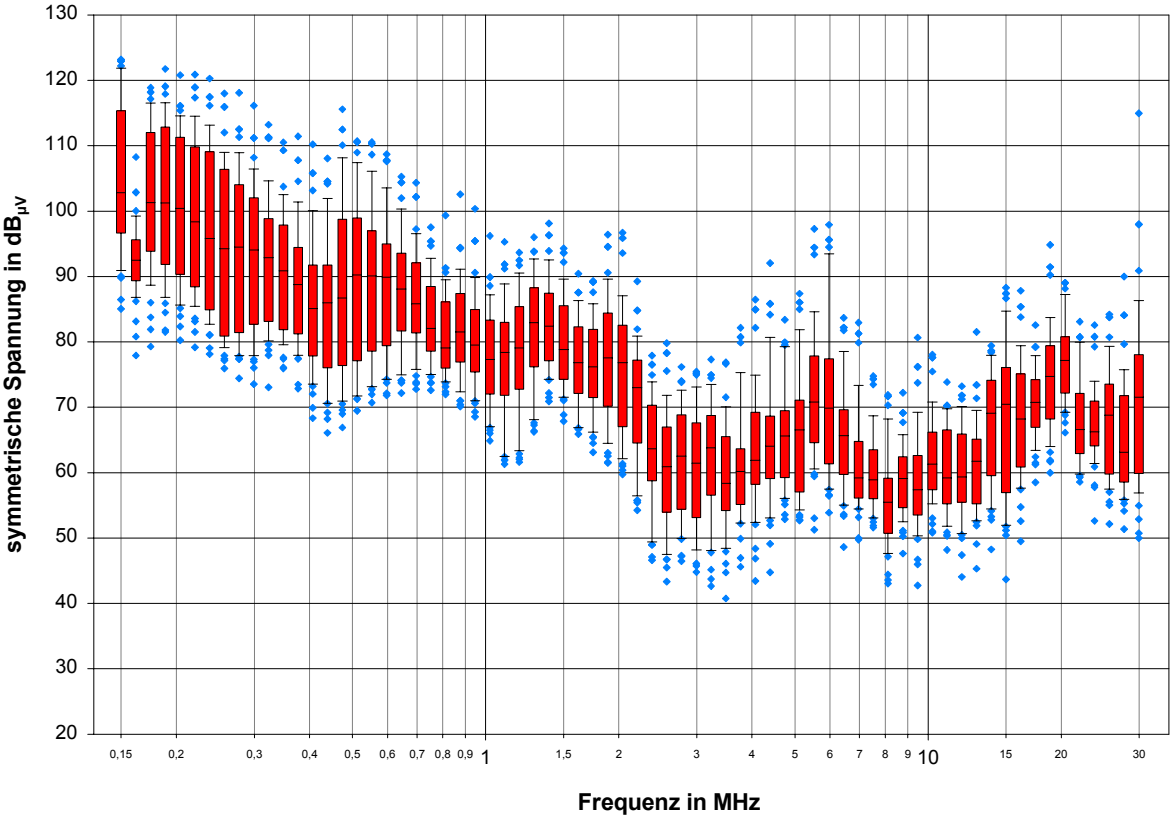


Abbildung 72 Symmetrische Spannung, die den Grenzwert der magnetischen Feldstärke nach NB 30 in einer Wohnung einer sanierten Jugendstil-Villa hervorruft

Aus den Plots können statistische Angaben entnommen werden. In der Abbildung 72 wären für die Frequenz 150 kHz bei einer symmetrischen Spannung von

124 $dB_{\mu V}$	sämtliche Feldaufpunkte,
122 $dB_{\mu V}$	90 % der Feldaufpunkte,
115 $dB_{\mu V}$	75 % der Feldaufpunkte,
103 $dB_{\mu V}$	50 % der Feldaufpunkte,
97 $dB_{\mu V}$	25 % der Feldaufpunkte,
91 $dB_{\mu V}$	10 % der Feldaufpunkte und unterhalb von
85 $dB_{\mu V}$	kein Feldaufpunkt

einer Emission oberhalb des Grenzwertes gemäß NB 30 ausgesetzt gewesen.

8.1.7 Zusammenhang zwischen LCL/TCL und magnetischer Feldstärke

Die Unsymmetrie des Netzes an der Einkoppelstelle bestimmt die Emission entscheidend. Vergleicht man die gemessenen Feldstärken mit den TCL-Werten der Einkoppelstellen, so ist augenscheinlich besonders im oberen Frequenzbereich (f>10 MHz) eine starke Korrelation zu erkennen. Im unteren Frequenzbereich ist dieser Zusammenhang graphisch nicht so ersichtlich, wird aber durch das einfache Modell eines λ/2-Dipols belegt.

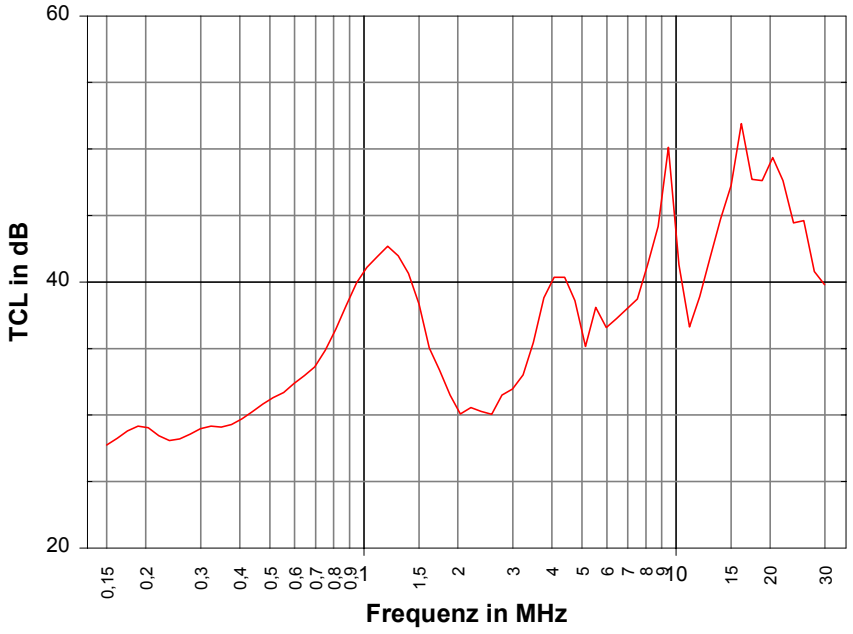


Abbildung 73 TCL der Einkoppelstelle im Obergeschoß eines Einfamilienhauses

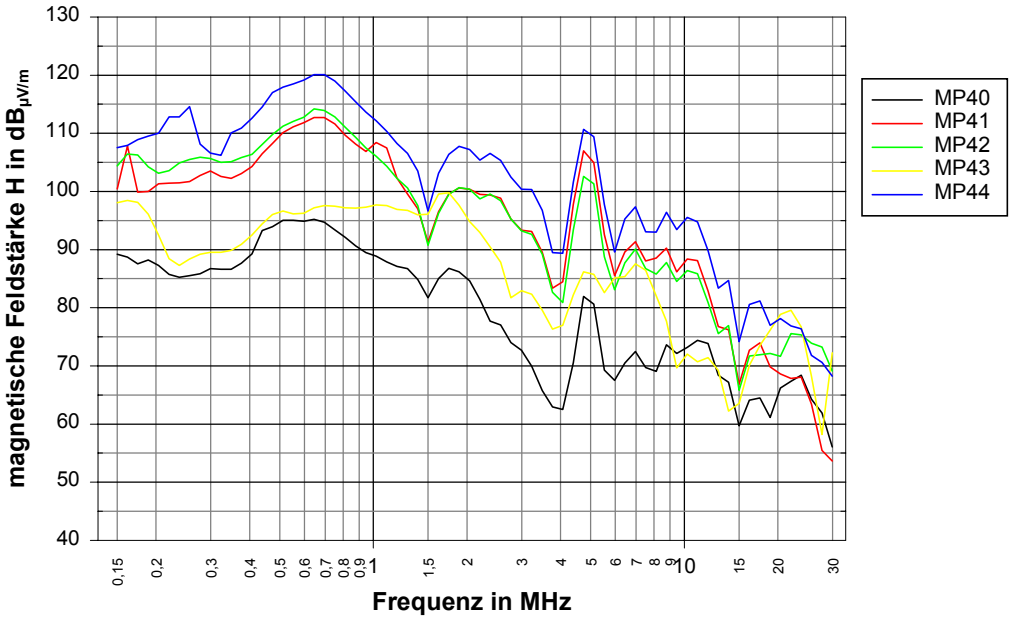


Abbildung 74 Feldstärke an den Feldaufpunkten im Keller bei Einkopplung im Obergeschoß eines Einfamilienhauses

Durch diese Korrelation läßt sich auch belegen, daß der beobachtete Anstieg des LCL/TCL im oberen Frequenzbereich nicht durch ein Fehler im Meßverfahren zustande kommt. Es wird die Annahme bestätigt, daß sich Unsymmetrien, die in einiger Entfernung[1] von der

[1] ausgedrückt durch ein Vielfaches der Wellenlänge

Einkoppelstelle liegen, sich aufgrund der symmetrischen Dämpfung nicht mehr so stark auswirken und es können nur geringere asymmetrische Spannungen entstehen.
Es ist jedoch zu beachten, daß mit steigender Frequenz asymmetrische Signale zu einer effizienteren Abstrahlung führen.

8.1.8 Statistische Auswertung der Meßergebnisse

Die vielfältigen Einflüsse auf das Abstrahlverhalten bei PLC lassen sich zur Zeit nur begrenzt modellieren. Die große Anzahl von Meßergebnissen ermöglicht eine Auswertung auf statistischer Basis. Dazu wurden die Meßergebnisse bestimmten Kriterien gruppiert und ausgewertet.

In Absprache mit dem Auftraggeber wurden im Rahmen dieser Studie die Meßergebnisse nach dem Abstand zwischen Meßpunkt und Einspeisung klassifiziert. Die 192 Meßwerte für die Feldaufpunkte innerhalb der Gebäude wurden in folgende Gruppen unterteilt:

1. alle Feldmeßaufpunkte mit einem Abstand kleiner 3 m zur Einspeisequelle (48),
2. alle Feldmeßaufpunkte mit einem Abstand zwischen 3 m und 5 m zur Einspeisequelle (57),
3. alle Feldmeßaufpunkte mit einem Abstand größer 5 m und kleiner 30 m zur Einspeisequelle (87).

Die Mediane der einzelnen Gruppen sind in Abbildung 75 dargestellt.

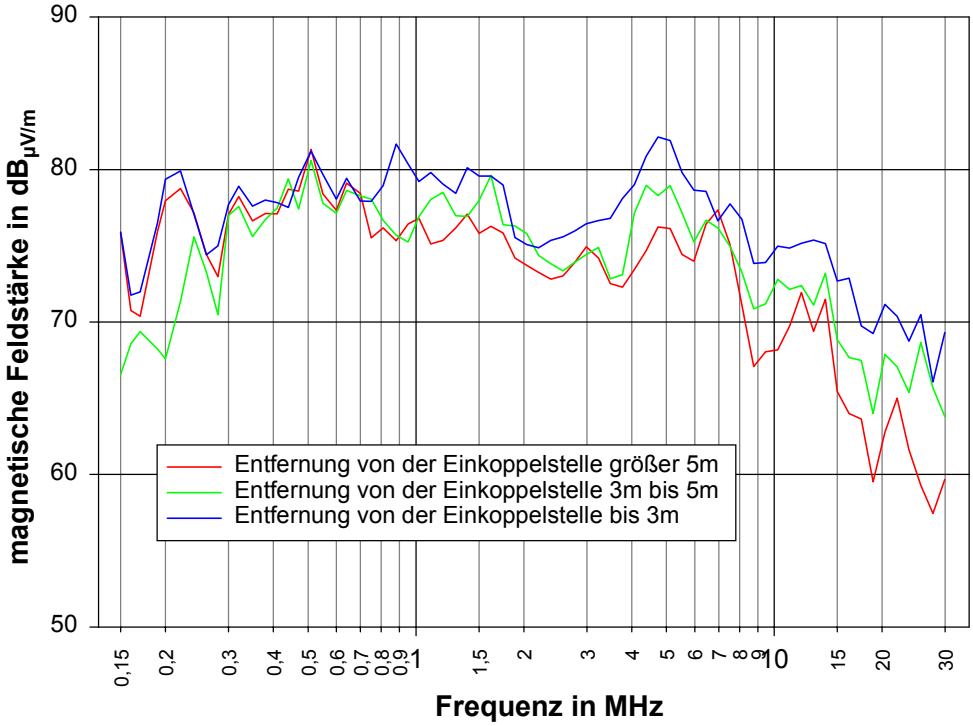


Abbildung 75 Median der magnetischen Feldstärke bei Einspeisung einer symmetrischen Spannung von 105 $dB_{\mu V}$ in Abhängigkeit vom Abstand

Im Diagramm sind die Extremwerte der einzelnen Messungen nicht wiederzufinden, welche teilweise erst in größerem Abstand von der Einspeisung auftraten. Der Median verhält sich bei Frequenzen größer 10 MHz umgekehrt proportional zum Abstand. Er kann folgendermaßen interpoliert werden:

- bis 3 m Abstand
  79 dBµV/m bis 5 MHz, dann mit 15 dB/Dekade abfallend
- 3 m bis 5 m Abstand
  150 kHz-500 kHz von 67 $dB_{\mu V/m}$ ansteigend auf 77 $dB_{\mu V/m}$ dann konstant bis 5 MHz, anschließend mit 15 dB/Dekade abfallend
- Abstand größer 5 m
  76 dBdBµV/m bis 5 MHz, dann mit 20 dB/Dekade abfallend

Bei Frequenzen größer 10 MHz läßt sich eine Entfernungsabhängigkeit des Medians erkennen, der mit ca. 10 dB/Dekade abfällt.

Der Median kann zur Beurteilung des Störpotentials von Funkstörungen nur bedingt verwendet werden, da der Funkempfang statistisch in einer prozentual festgelegten Anzahl der Fälle zu gewährleisten ist. Insofern ist zur Beurteilung des Störpotentials eher eine prozentuale Darstellung interessant, wie sie durch Box-Plots erfolgt. In den folgenden Abbildungen sind die Box-Plots für die einzelnen Abstandskategorien dargestellt.

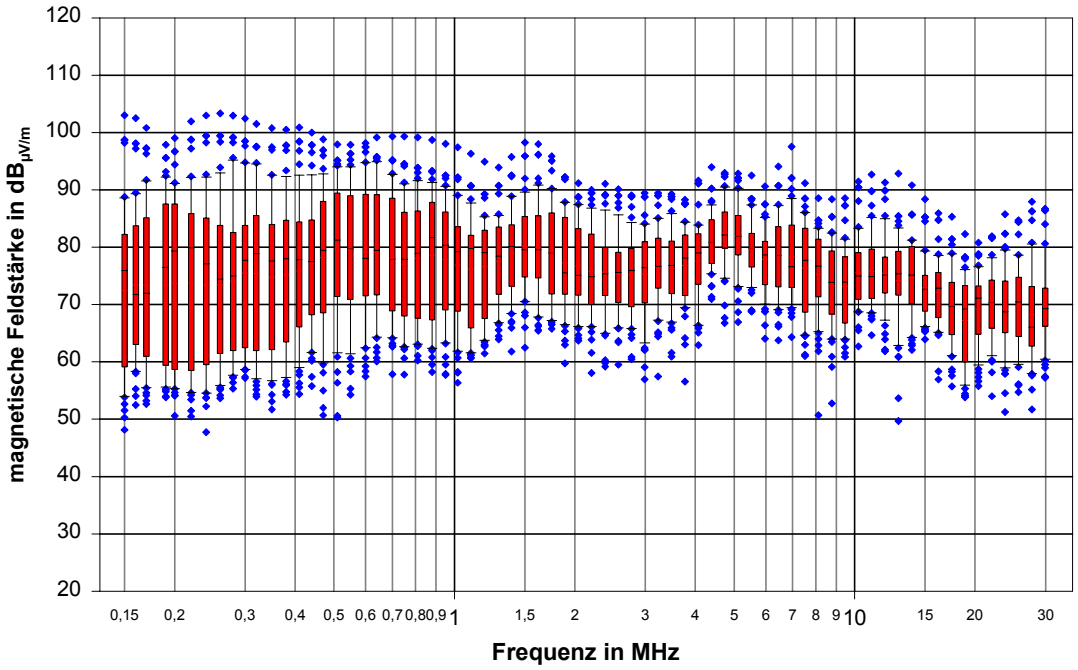


Abbildung 76 **Magnetische Feldstärke bei Einspeisung einer symmetrischen Spannung von 105 $dB_{\mu V}$ für Meßpunkte, die bis 3 m von der Einkoppelstelle entfernt sind, Box-Plot**

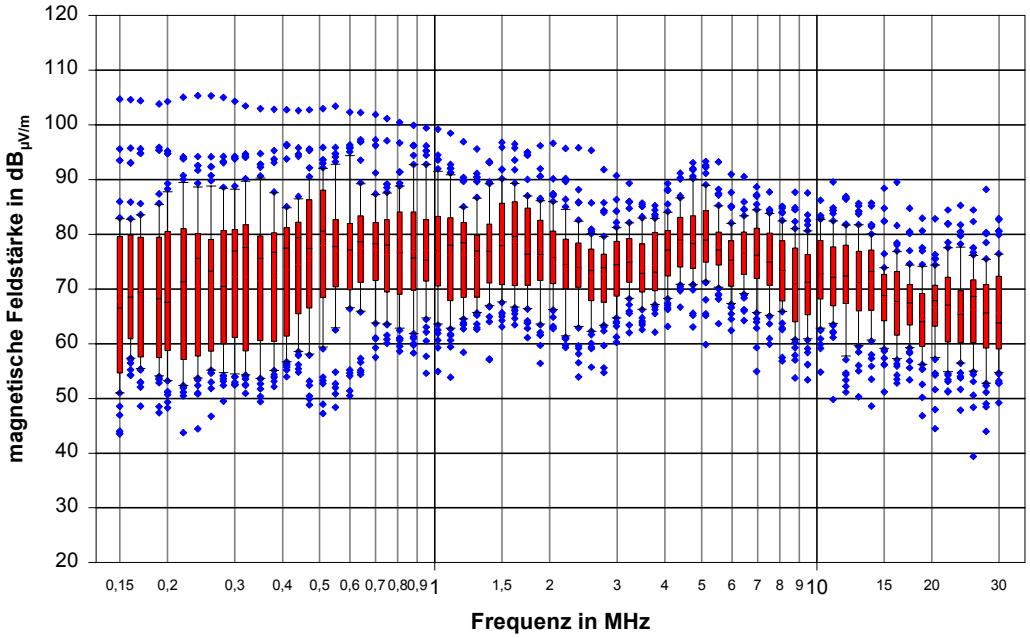


Abbildung 77 **Magnetische Feldstärke bei Einspeisung einer symmetrischen Spannung von 105 $dB_{\mu V}$ für Meßpunkte, die zwischen 3 m und 5 m von der Einkoppelstelle entfernt sind, Box-Plot**

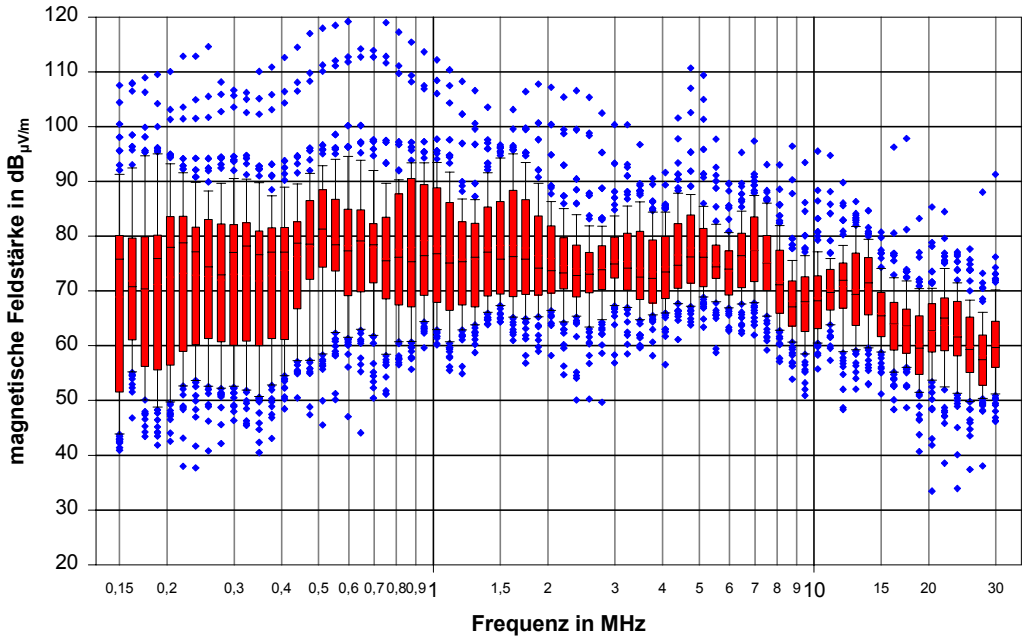


Abbildung 78 **Magnetische Feldstärke bei Einspeisung einer symmetrischen Spannung von 105 $dB_{\mu V}$ für Meßpunkte, die mehr als 5 m von der Einkoppelstelle entfernt sind, Box-Plot**

Als Beispiel ist die Auswertung für Abbildung 78 aufgeführt. Demzufolge sind bei der Einspeisung einer symmetrischen Spannung von 105 $dB_{\mu V}$ bei einer Frequenz von 150 kHz die magnetischen Feldstärken größer als

107 dBµV/m	an keinem Feldaufpunkt,
92 $dB_{\mu V/m}$	an 10 % der Feldaufpunkte,
80 $dB_{\mu V/m}$	an 25 % der Feldaufpunkte,
76 $dB_{\mu V/m}$	an 50 % der Feldaufpunkte,
52 $dB_{\mu V/m}$	an 75 % der Feldaufpunkte,
44 $dB_{\mu V/m}$	an 90 % der Feldaufpunkte,
41 $dB_{\mu V/m}$	an alle Feldaufpunkten.

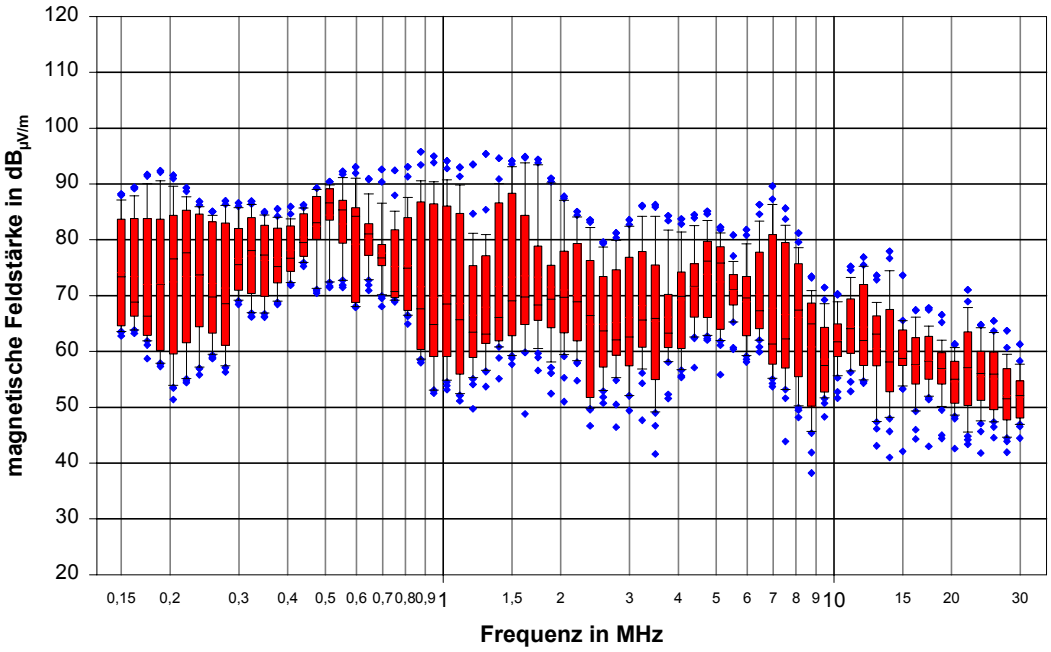


Abbildung 79 Magnetische Feldstärke bei Einspeisung einer symmetrischen Spannung von 105 $dB_{\mu V}$ für Meßpunkte (27), die außerhalb der Gebäude liegen, Box-Plot

Für die Meßpunkte außerhalb der Gebäude wurde ebenfalls ein Box-Plot erzeugt, der in Abbildung 79 dargestellt ist.

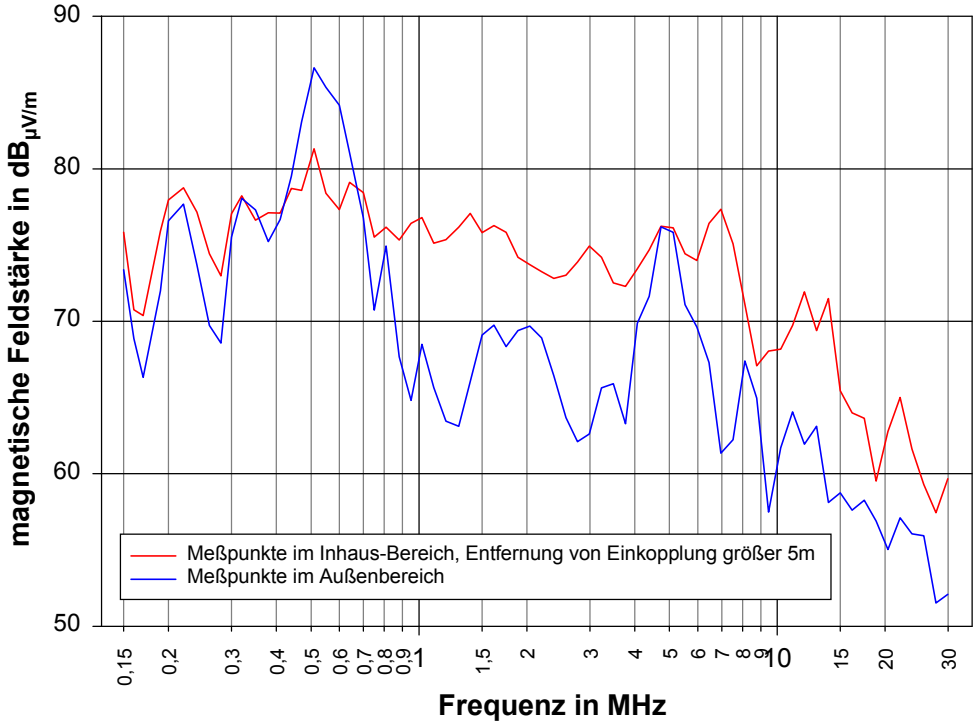


Abbildung 80 **Vergleich des Median der magnetische Feldstärke bei Einspeisung einer symmetrischen Spannung von 105 $dB_{\mu V}$ für Meßpunkte die innerhalb und außerhalb von Gebäuden liegen**

Zu Information ist in Abbildung 80 ein Vergleich des Median von Meßwerten für den Bereich innerhalb und außerhalb der Gebäude dargestellt.

8.2 Modellierung der Störfeldstärken durch ein λ/2-Dipolmodell

In der Literatur [66] wird zur Abschätzung der Feldstärke eine Modellierung mit verteilten Dipolen angegeben. Nach der Berechnung des Spannungsverlauf entlang der Leitung (Leitungstheorie), werden elektrisch kurze Dipole mit der entlang der Leitungen vorhandenen asymmetrischen Spannung angeregt und das Feld an den Aufpunkten durch die Überlagerung der Anteile einzelner Dipole berechnet. Dieser Ansatz ist nicht nur kompliziert, er ist hinsichtlich der Zulässigkeit auch fragwürdig.

Es liegt es auf der Hand, daß die Feldstärken bei Power-line Communication bei Verwendung eines λ/2-Dipols am Ort der Einspeisung nur äußerst grob abgeschätzt werden können. Die räumliche Verteilung der Kabel wird genauso vernachlässigt wie die im unteren Frequenzbereich vorhandenen elektrisch kurzen Leitungen der realen Hausverteilung. Eine Dipol-Abschätzung wird daher eher im oberen Frequenzbereich gültig sein, wenn die Leitungen elektrisch lang sind und wenn aufgrund der Dämpfung der symmetrischen Signale auch eine gewisse Entkopplung der örtlichen Bereiche existiert. Die Überlagerung der Felder einzelner Leitungssegmente wird nicht erfaßt.

Die Zulässigkeit und die Grenzen für den Ansatz eines λ/2-Dipolmodells zur Berechnung der erwarteten Feldstärken bei Power-line Communication wurden anhand der Meßwerte überprüft. Die Meßwerte für verschiedene Einspeisungen wurden hinsichtlich des Abstandes des

Feldaufpunktes zur Einspeisequelle kategorisiert und es wurde der Median der magnetischen Feldstärke berechnet. Mit CONCEPT wurden die elektrische und magnetische Feldstärke in 3 m bzw. 10 m Abstand in Hauptstrahlrichtung eines bei jeder Frequenz abgestimmten λ/2-Dipols berechnet. Aus den berechneten Feldstärken wurden unter Verwendung des TCL der Einspeisestelle[1] die Feldstärke nach

$$H_{dB_{\mu V/m}} = H^{\lambda/2}_{dB_{\mu V/m}} - TCL_{dB} \qquad \textbf{(18)}$$

abgeschätzt. Eine analoge Abschätzung erfolgte für des E-Feld.

Die Abschätzung wurde jeweils mit der magnetischen und der elektrischen Feldstärke eines λ/2-Dipols berechnet, wobei die magnetische Feldstärke mit dem Wellenwiderstand des freien Raumes auf eine äquivalente elektrische Feldstärke umgerechnet wurde.

In Abbildung 81 und Abbildung 82 ist der Vergleich zwischen Abschätzung und Messung für einen Abstand von 3 m zur Einspeisung dargestellt.

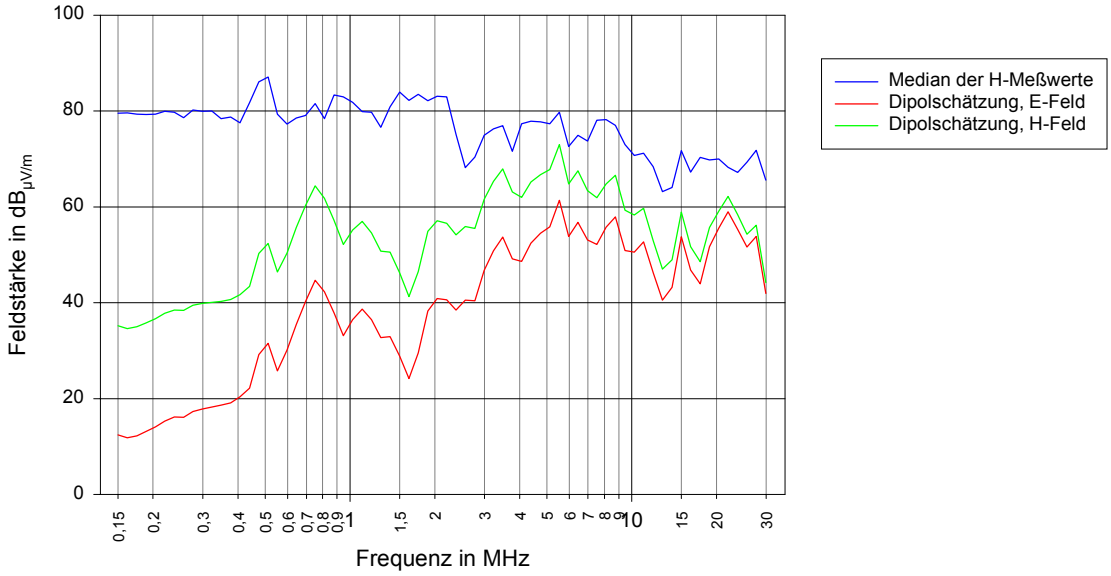


Abbildung 81 Vergleich zwischen Dipol-Abschätzung und Meßwerten in 3 m Abstand von der Einspeisequelle im Elektrotechnischem Institut der TUD, R216

[1] Die Einspeisestelle, bei der die Meßwerte für die Berechnung des Medians bestimmt wurden, mit dem die abgeschätzten Werten verglichenen wurden.

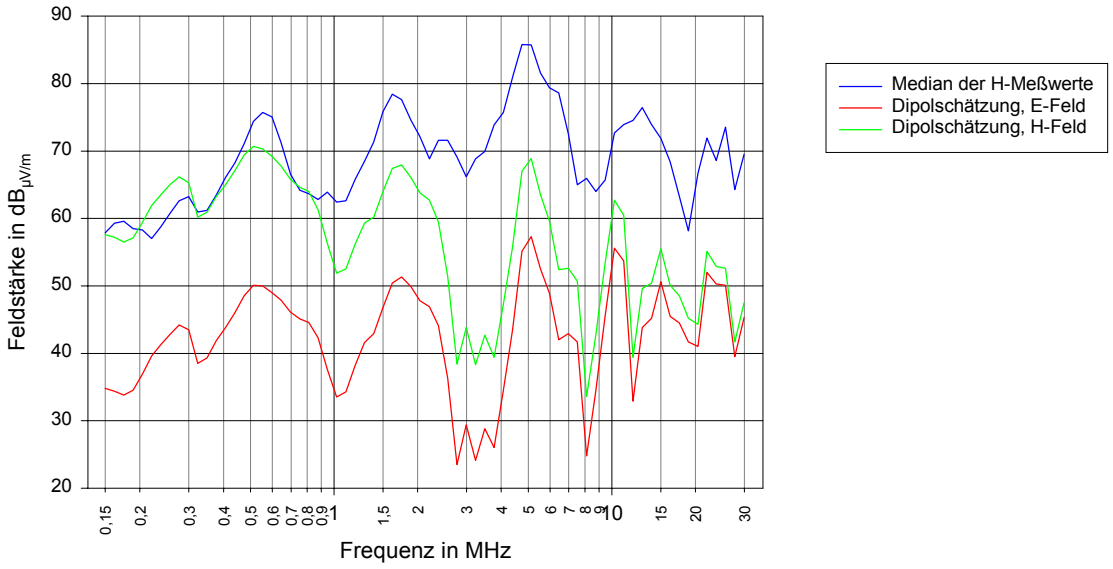


Abbildung 82 Vergleich zwischen Dipol-Abschätzung und Meßwerten in 3 m Abstand von der Einspeisequelle im Erdgeschoß eines Einfamilienhaus

Die Lage der Maxima und Minima ist zwischen Abschätzungen und Meßwerten sowohl für kleinere Frequenzen als auch für den oberen Frequenzbereich sehr gut korreliert. Dieser Sachverhalt bestätigt, daß der TCL/LCL der entscheidende störrelevante Parameter ist. Im oberen Frequenzbereich ist eine Abweichung von ca. 20 dB festzustellen, da das grobe Modell z.B. die Feldüberlagerung aufgrund der verteilten Leitungen nicht berücksichtigt. Der Übergang von Nahfeld- zu Fernfeldbedingungen ist gut zu erkennen, da im Fernfeld die elektrische und magnetische Feldstärke aufgrund der Umrechnung mit dem Feldwiderstand des freien Raumes identisch werden.

In Abbildung 82 ist im unteren Frequenzbereich eine geringe Abweichung zu den Meßwerten zu erkennen, wobei dieses Verhalten bei der Gesamtheit der Messungen eher eine Ausnahme darstellt. Allgemein existiert bis 4 MHz eine große Abweichung zwischen der Dipol-Modellierung und den Meßwerten.

In Abbildung 83 ist der Vergleich der Feldstärken für einen mittleren Abstand von 10m zur Einspeisung dargestellt. Die deutliche Korrelation der Maxima und Minima der einzelnen Kurven bestätigt erneut die störrelevante Rolle des TCL/LCL. Es ist aber auch der große Unterschied von ca. 40dB im unteren Frequenzbereich ($f < 4$ MHz) zu erkennen, der eine Anwendung des Modells nicht zuläßt. Entsprechend den Meßergebnissen ist hier eher eine konstante Feldstärke anzusetzen.

Wie aus den Modellrechnungen mit CONCEPT in Abschnitt 9 hervorgeht, wurde an einem als Drahtmodell modelliertem Haus und bei Einspeisung einer konstanten asymmetrischen Spannung an einem Leitungsende, bei Frequenzen kleiner 4 MHz eine abfallende magnetische Feldstärke an Feldaufpunkten berechnet. Bedenkt man gleichzeitig, daß der LCL in diesem Bereich geringer wird, d.h. eine mit der Frequenz steigende asymmetrische Spannung erzeugt wird, so können sich diese beiden Effekte ausgleichen und eine konstante magnetische Feldstärke resultieren.

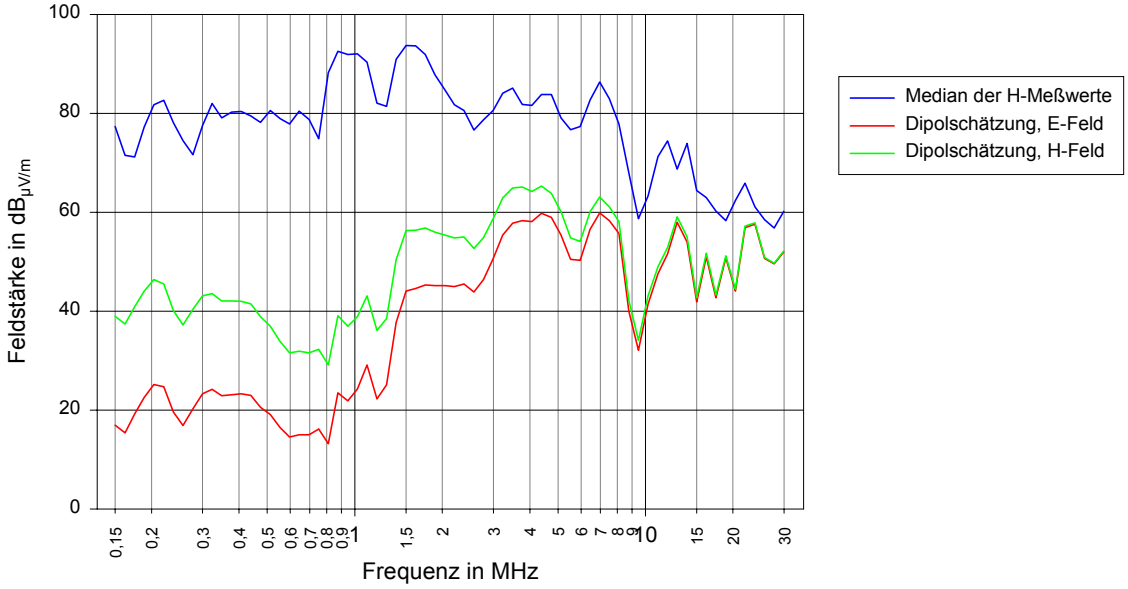


Abbildung 83 Vergleich zwischen Dipol-Abschätzung und Meßwerten in 10 m Abstand von der Einspeisequelle im Elektrotechnischem Institut der TUD, R321

Ab 20 MHz ist eine deutlich bessere Übereinstimmung zwischen modellierten und gemessenen Werten zu erkennen. Die Ursache kann einerseits in einer besseren Entkopplung aufgrund der größeren Dämpfung der symmetrischen Größen und andererseits in den dann geltenden Fernfeldbedingungen gesucht werden.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die großen Unterschiede zwischen modellierter und gemessener Feldstärke im unteren Frequenzbereich ($f < 4$ MHz) eine Anwendung des $\lambda/2$-Dipol-Modells nicht zulassen. Die Ursachen können in der vernachlässigen räumlichen Anordnung der Leitungen und in der Unzulänglichkeit der Nutzung eines $\lambda/2$-Modells aufgrund der großen Wellenlängen gesucht werden. Auch werden die Feldstärken nicht erfaßt, die durch die Anregung einphasiger Leitungsabschnitte mit der halben symmetrischen Signalspannung hervorgerufenen werden.

8.3 Störfeldstärken von Erdkabeln außerhalb von Gebäuden

Als Teil der Studie war zu untersuchen, ob außerhalb von Gebäuden bei der Übertragung auf Erdkabeln geringere Störfeldstärken durch die eingespeisten Signale hervorgerufen werden. Dazu wurde in ein Erdkabel zwischen die Adern L2-N und L1-L2 eine symmetrische Spannung von 105 $dB_{\mu V}$ eingekoppelt und die magnetische Feldstärke in 1m Höhe entlang des Kabels gemessen. Die genauen Meßergebnisse können dem entsprechendem Meßbericht, [64], entnommen werden. Hier wird nur auf die wesentlichen Zusammenhänge eingegangen.

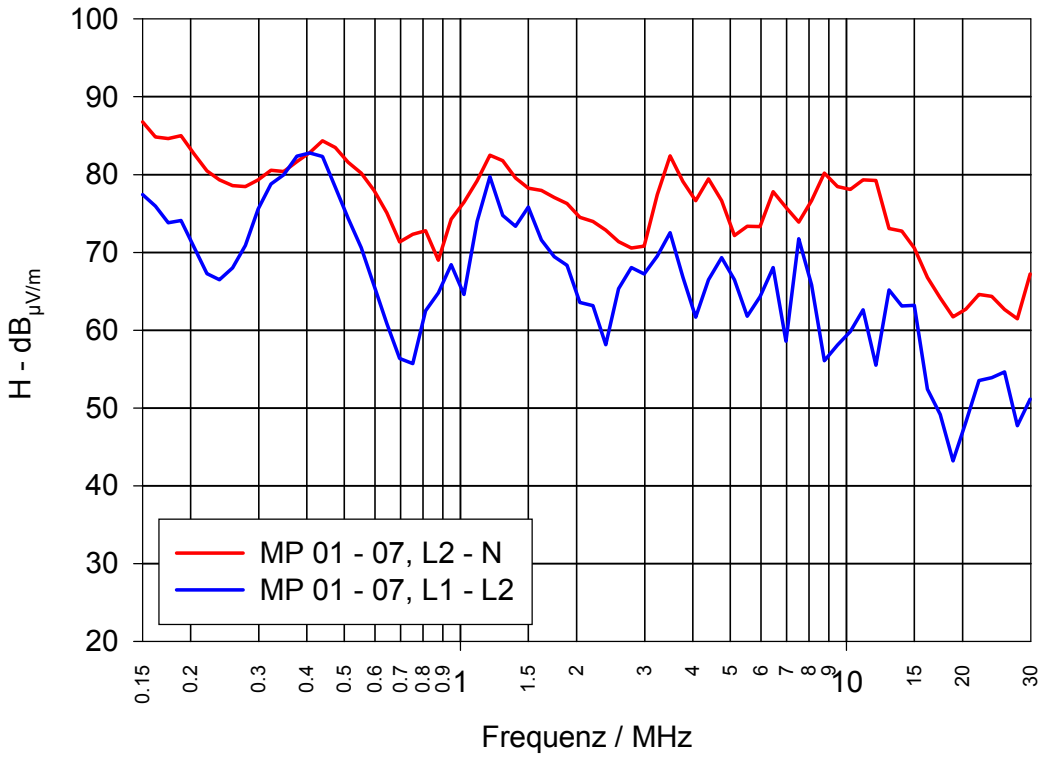


Abbildung 84 Maxima der magnetischen Feldstärken entlang eines Erdkabels bei symmetrischer Einspeisung von 105 $dB_{\mu V}$

Die Messungen belegen, daß ohne weitere Zusatzmaßnahmen ein größerer Rabatt gegenüber der Hausinstallation nicht gegeben werden kann. Dieses ist auch verständlich, da die beiden Bereiche

- Erdkabel zwischen Transformator und Hausanschluß,
- Netzt innerhalb von Gebäuden

zur Zeit nicht hochfrequenzmäßig entkoppelt sind.

Unsymmetrien innerhalb von Gebäuden wirken so unmittelbar auf den Außerhaus-Bereich zurück.

Nur bei der symmetrischen Einspeisung zwischen zwei Außenleiter ist aufgrund der besseren Symmetrie im überwiegenden Frequenzbereich mit ca. 10 dB geringeren Feldstärken zu rechnen.

Die Umrechnung auf eine symmetrische Spannung, die den Grenzwert nach NB 30 hervorruft, zeigt (vgl. Abbildung 85), daß mit einer symmetrischen Spannung von ca. 70-80 $dB_{\mu V}$ der entsprechende Grenzwert erreicht wird.

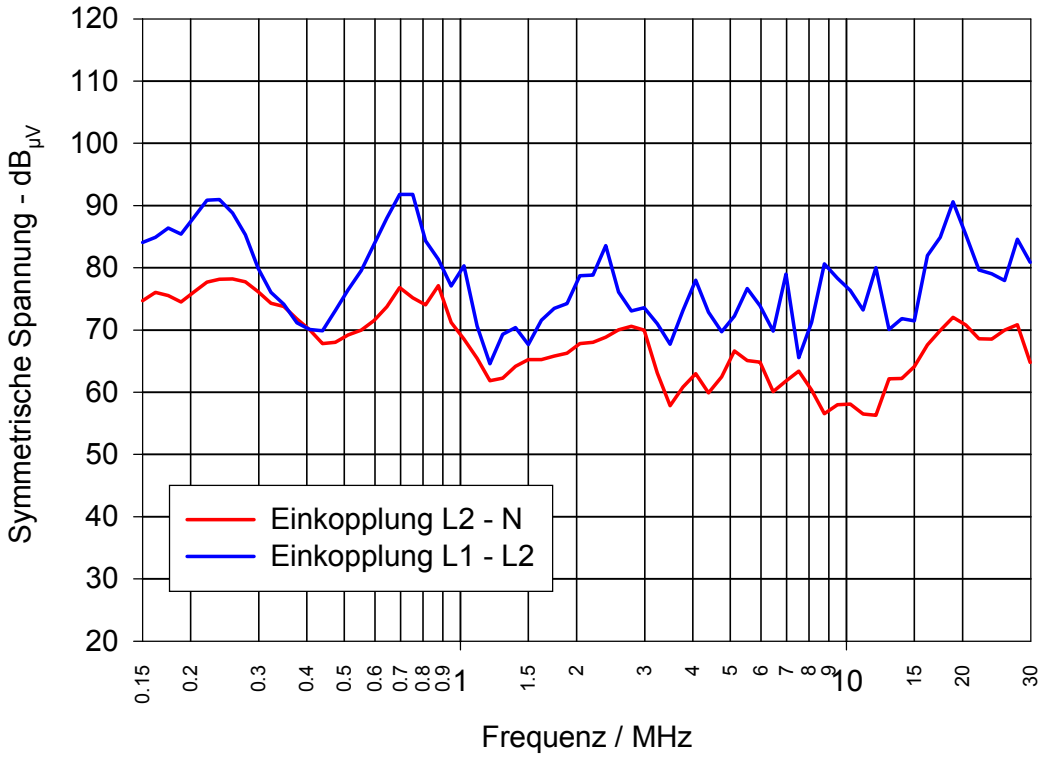


Abbildung 85 Symmetrische Spannung, die zu einer Feldstärke entlang des Erdkabels nach dem Grenzwert der NB 30 führt

Bei den Messungen war eine wesentliche Dämpfung durch das Erdreich noch nicht festzustellen.

Nach den derzeitigen Vorstellungen von PLC-Geräteherstellern, können durch eine HF-Entkopplung des inhouse und außerhaus Bereichs die Übertragungseigenschaften des Kanals positiv beeinflußt werden. Bei der standardmäßigen Installation solcher Entkopplungs-baugruppen kann die Rückwirkung der Unsymmetrien der Verbraucher im Gebäude auf das Erdkabel vernachlässigt werden. Dieses hat sicher einen positiven Einfluß auf die erzeugten Störfeldstärken, so daß höhere symmetrische Pegel zugelassen werden könnten. Da derzeitig solche Entkopplungen nicht eingesetzt werden, kann auch nicht von einem wesentlich geringeren Störpotential ausgegangen werden. In Zukunft sind sicher noch Untersuchungen notwendig, um die Entkopplung näher zu untersuchen.

9 NUMERISCHES HAUSMODELL

Zur Information wurde ein Haus in ein- und zweigeschossiger Bauweise mit jeweils zwei Wohnungen auf jeder Etage mit CONCEPT modelliert und berechnet. Da der Schwerpunkt der Studie auf den meßtechnischen Untersuchungen der Abstrahlung bei PLC lag, werden die Ergebnisse hier kurz beispielhaft dargestellt. Weitere Untersuchungen sind bei einer Verfeinerung der Modellierung in Zukunft möglich.

9.1 Modell des Hauses

Das Haus wurde durch eine Drahtanordnung nachgebildet. Die Leitungen des Stromversorgungsnetzes wurden von fiktiven Steckdosen aus zu Verteilerdosen in den Räumen geführt und dort miteinander verbunden. Von dort wurde eine Leitung zur Unterverteilung der Wohnung modelliert. An der Wohnungsverteilung wurden wiederum alle Leitungen zusammengefaßt und es wurde eine Anschlußleitung in die Hausverteilung auf Erdniveau geführt, wo ein direkter Anschluß an die Bezugsfläche erfolgte.

Die Zwischengeschoßdecken, die im Allgemeinen aus Stahlbeton gefertigt sind, wurden durch ein Drahtgitter simuliert, welches an mehreren Stellen über Stäbe mit Bezugsmasse verbunden war. In Abhängigkeit von der Geschoßanzahl wurden diese Stäbe weiter in die darüber liegende Etage geführt.

Die Anordnung wurde auf ideal leitfähiger Ebene angeordnet. In Abbildung 86 ist das Modell für ein Haus mit nur einer Etage dargestellt, wobei bei den Berechnungen die Eck- und Zwischenpfeiler mit dem Drahtgitter der Zwischengeschoßdecke und der ideal leitfähigen Ebene verbunden waren.

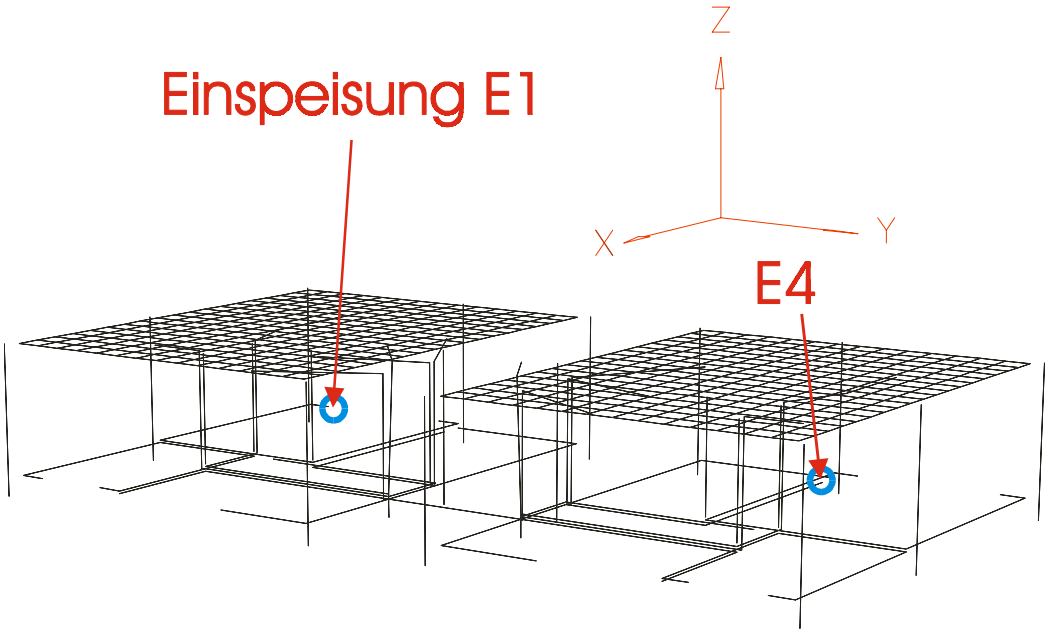


Abbildung 86 Drahtmodell für ein Haus, bestehend aus zwei Wohnungen

Eingespeist wurde eine asymmetrische Spannung von 120 $dB_{\mu V}$ zwischen dem Ende der modellierten Stromleitung und der Masse, die in Abhängigkeit von der Etage aus der Zwischengeschoßdecke bzw. der ideal leitfähigenden Ebene gebildet wurde.

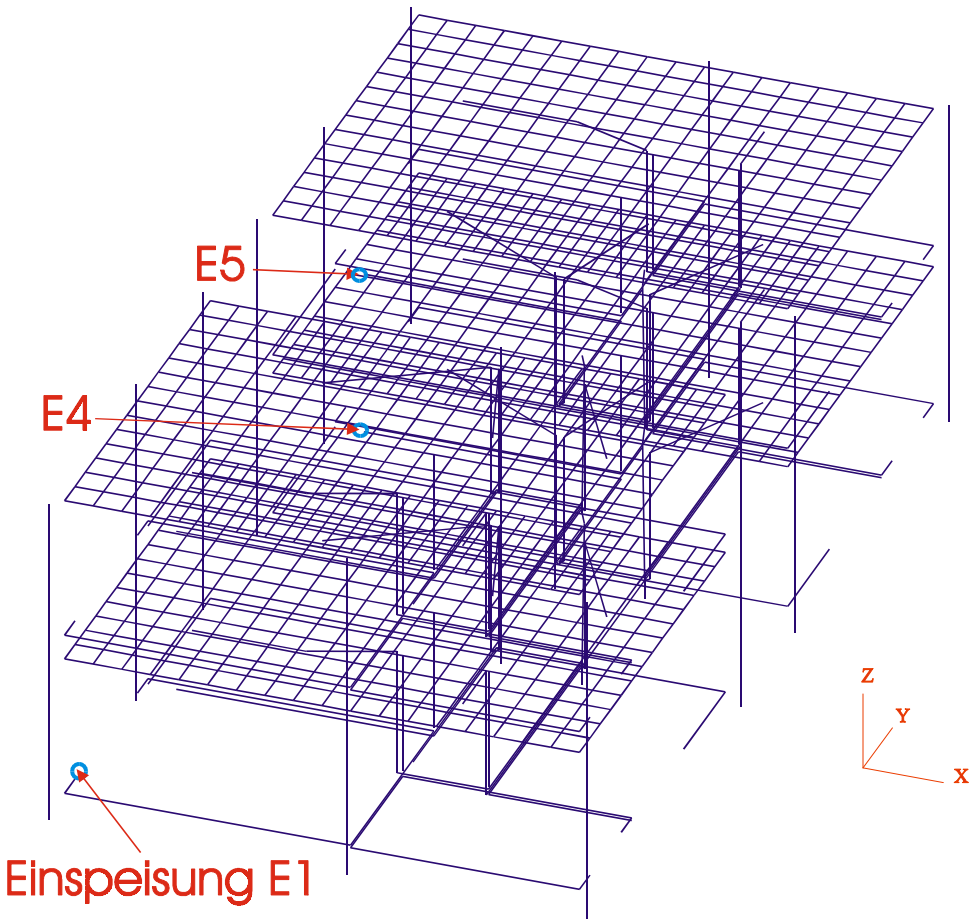


Abbildung 87 Drahtmodell für ein Haus, bestehend aus zwei Etagen

Ein Haus, bestehend aus zwei Etagen, wurde entsprechend Abbildung 87 durch das Einbringen eines weiteren, identischen Geschosses erzeugt.

9.2 Feldverteilung in Schnittebenen

Die örtliche Verteilung des magnetischen Feldes (Betrag) wurde für zwei Schnittebenen bei einer Frequenz von 5 MHz berechnet:

1. x-y Ebene
2. x-z Ebene

Die asymmetrische Spannung wurde am Punkt E1 eingespeist. Die Abbildung 88 und die Abbildung 89 stellen die Verteilung des H-Feldes bei dem Haus, bestehend aus einer Etage, dar.

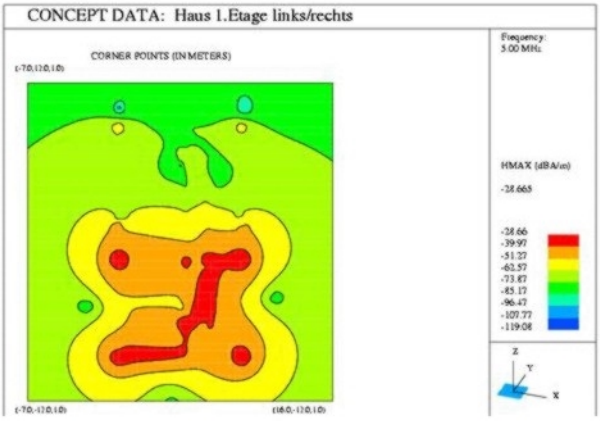


Abbildung 88 Verteilung des H-Feldes bei Einspeisung bei E1 auf der x-y-Ebene in 1m Höhe bei einem Haus mit einer Etage, f=5 MHz

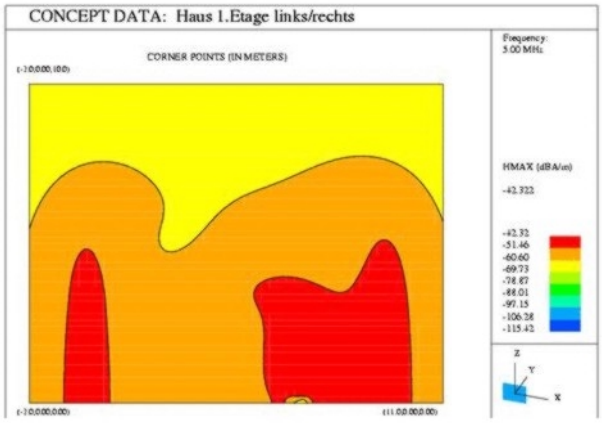


Abbildung 89 Verteilung des H-Feldes bei Einspeisung bei E1 auf der x-z-Ebene in 1m Höhe bei einem Haus mit einer Etage, f=5 MHz

Für das Haus mit zwei Etagen sind die gleichen Schnittebenen mit gleichem Einspeisepunkt in Abbildung 90 und Abbildung 91 dargestellt.

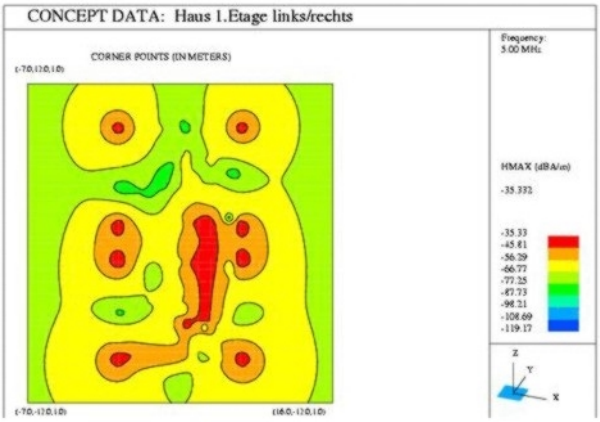


Abbildung 90 Verteilung des H-Feldes bei Einspeisung bei E1 auf der x-y-Ebene in 1m Höhe bei einem Haus mit zwei Etagen, f=5 MHz

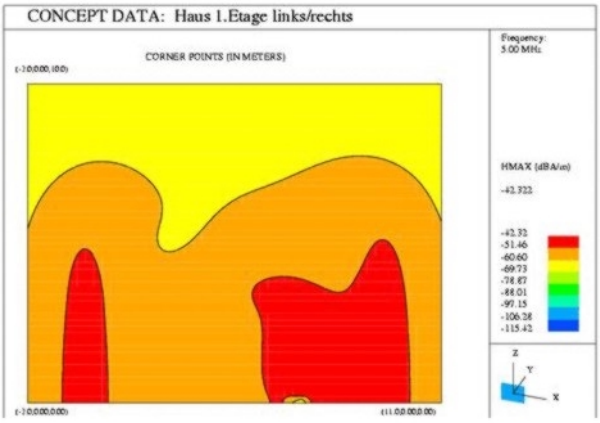


Abbildung 91 Verteilung des H-Feldes bei Einspeisung bei E1 auf der x-z-Ebene in 1m Höhe bei einem Haus mit zwei Etagen, f=5 MHz

In beiden Fällen ist eine ähnliche Feldverteilung mit einer sich räumlich schwach ändernden Feldstärke zu erkennen.

9.3 Strahlungsdiagramme

Anhand der Modelle wurden Strahlungsdiagramme für das magnetische Feld in 50 m Abstand berechnet. Bei der Einkopplung am Punkt E1 ergibt sich bei dem Haus mit einer Etage das in Abbildung 91 abgebildete Diagramm.

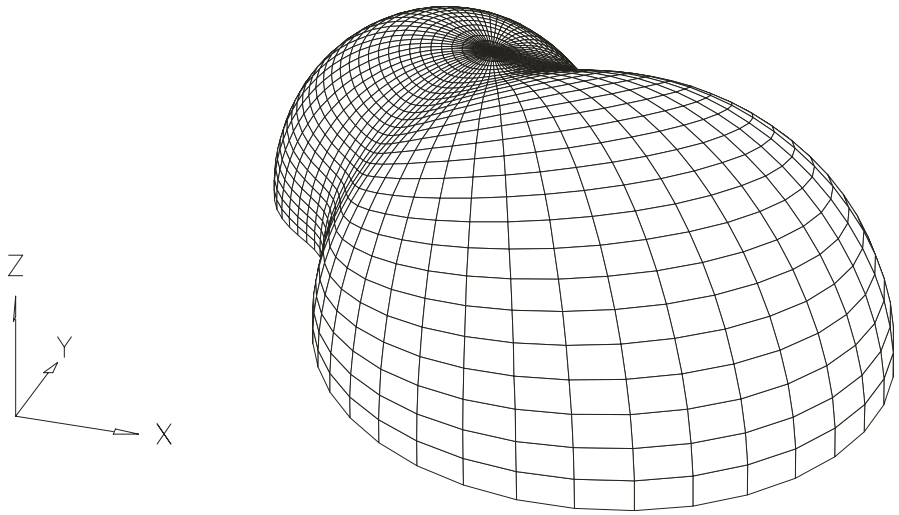


Abbildung 92 Strahlungsdiagramm bei Einspeisung bei E1, Haus mit einer Etage, f=150 kHz

Für eine Frequenz von 30MHz ergibt sich das in Abbildung 93 dargestellt Diagramm.

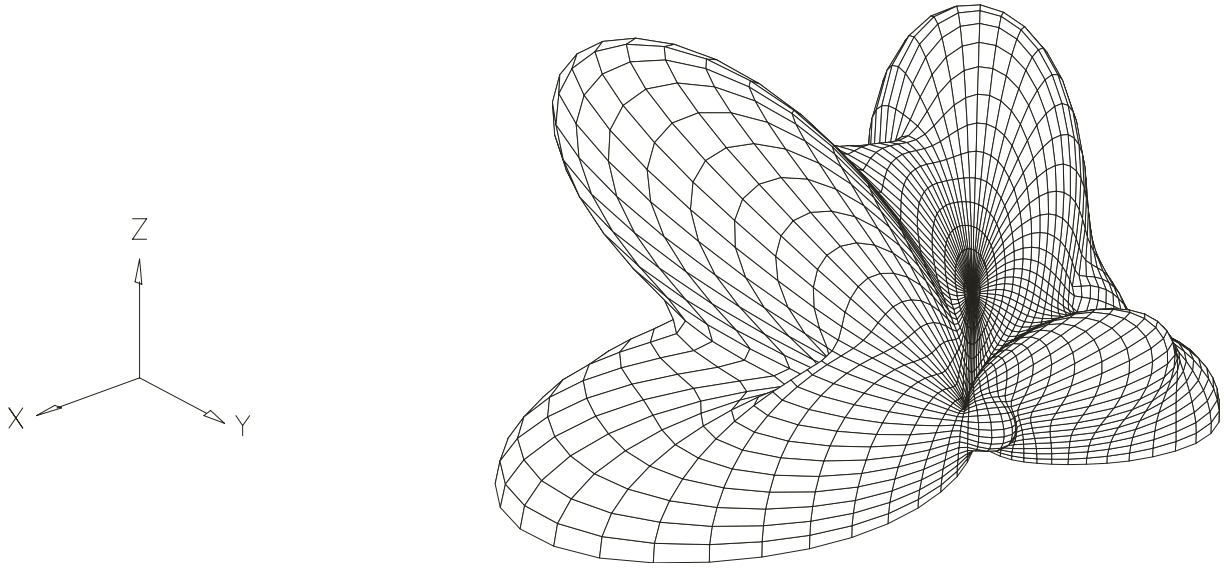


Abbildung 93 Strahlungsdiagramm bei Einspeisung in E1, Haus mit einer Etage, f=30 MHz

Bei gleicher Einspeisung und zwei Geschossen ergibt sich das in Abbildung 94 dargestellt Diagramm.

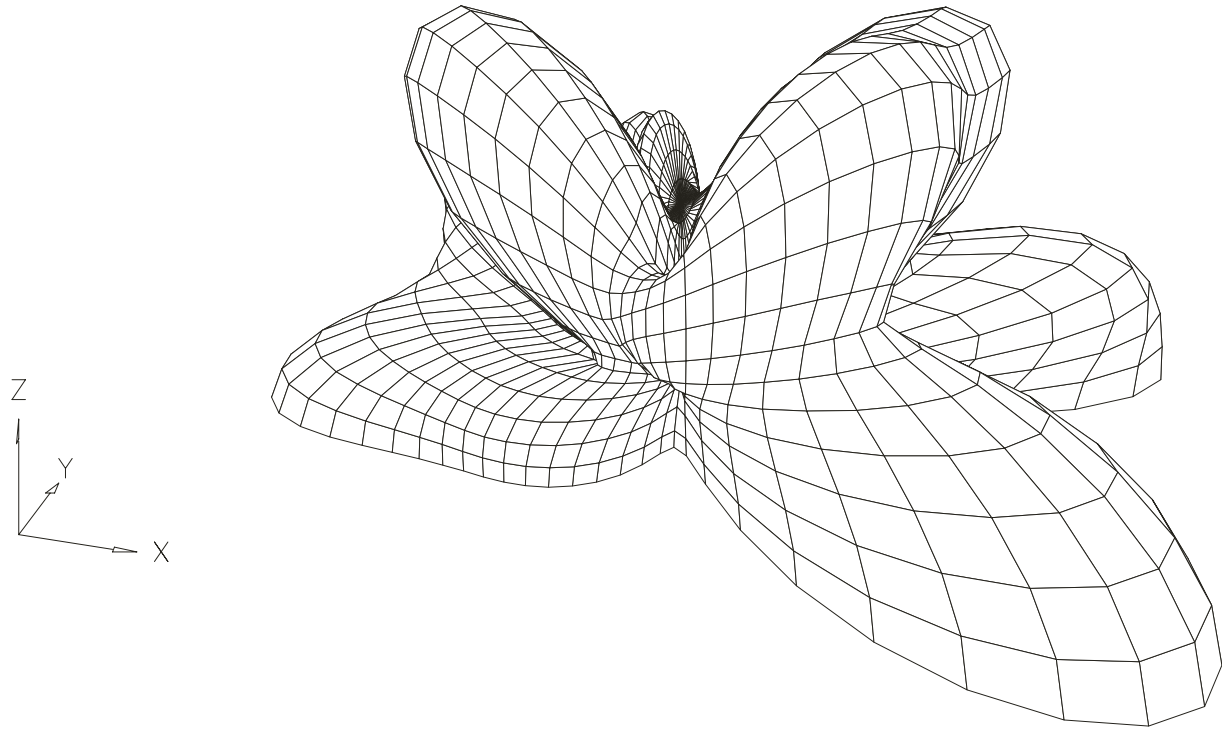


Abbildung 94 Strahlungsdiagramm bei Einspeisung in E1, Haus mit zwei Etagen, f=30 MHz

Es ist eine durch die zusätzliche Etage veränderte Abstrahlcharakteristik zu erkennen.

9.4 Frequenzverlauf

Für das Gebäude mit einer Etage wurde der Frequenzgang der magnetischen und elektrischen Feldstärke an drei Feldaufpunkten berechnet:

1. P1 (2,5;3;1),
2. P2 (7,75;3,75;1),
3. P3 (7,75;-3,75;1).

Der Verlauf ist in der Abbildung 95 wiedergegeben.

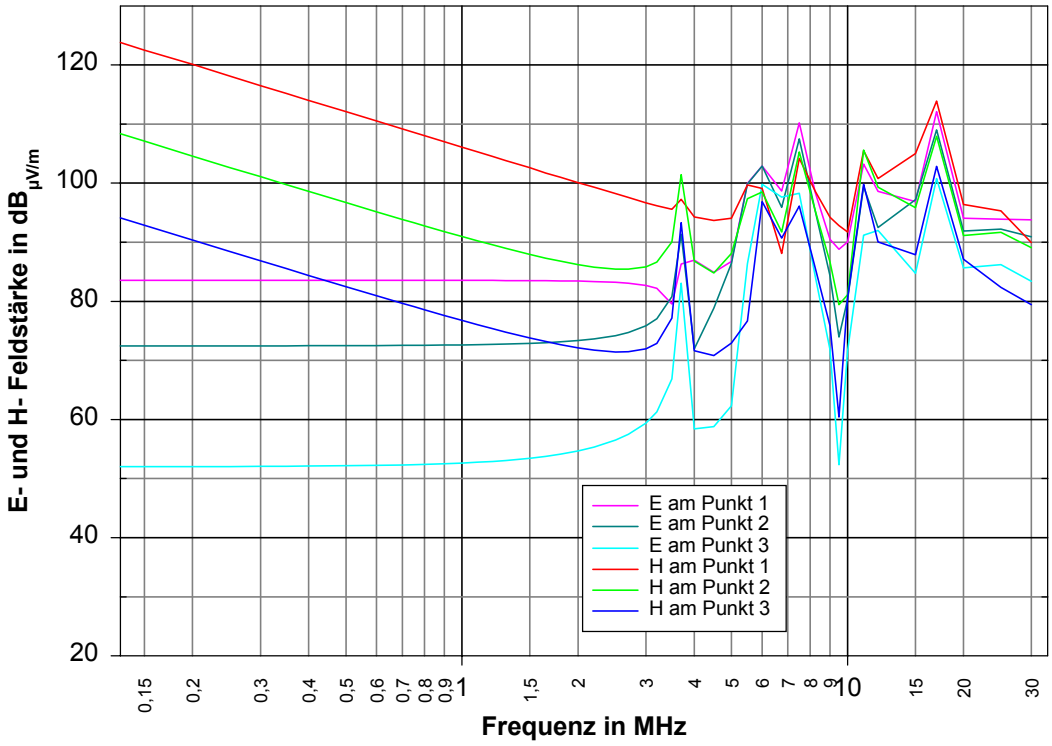


Abbildung 95 Frequenzgang der magnetischen und elektrischen Feldstärke bei Einkopplung in E4

Es ist zu erkennen, daß die elektrische Feldstärke im unteren Frequenzbereich konstant ist und die magnetische Feldstärke vom Betrag her überwiegt. Die magnetische Feldstärke nimmt mit zunehmender Frequenz ab. Die Einbeziehung eines mit der Frequenz abnehmenden TCL könnte zu einer zunächst konstanten Feldstärke führen, auch wenn der gemessene TCL den berechneten Abfall nicht ausgleicht.

10 ZUSAMMENFASSUNG

Durch die Ausnutzung der flächendeckenden Netzstruktur können bei Einführung von Power-Line Communication (PLC) eine Reihe von neuen „energienahen Mehrwertdiensten“ installiert werden. Dabei wird gegenwärtig zur Erhöhung der Übertragungsbandbreiten an einer Erweiterung des nutzbaren Frequenzbereichs gearbeitet. Damit stellt sich aber zugleich die Frage, wie die Pegel für eine Einspeisung der PLC-Signale gewählt werden können, ohne durch ungewollte Abstrahlung den Funkempfang zu beeinträchtigen. Hierzu soll die Studie einen Beitrag liefern.

Nach einer kurzen Analyse der Netzstruktur und der PLC-Verfahren (vgl. Abschnitt 2) wurde festgestellt, daß die Signale, bedingt durch das heute überwiegende TN-Netz mit teilweise vorhandenen Fehlerstromschutzschaltungen, überwiegend zwischen zwei Außenleitern bzw. zwischen Leiter und Neutralleiter eingespeist werden. Eine Klassifizierung der Netzstruktur nach PLC relevanten Eigenschaften ist schwierig, da viele Freiheitsgrade existieren, die das Hochfrequenzverhalten massiv beeinflussen.

Im Allgemeinen müssen zur Abschätzung des Störpotentials die asymmetrischen Signale betrachtet werden, da diese effizient abgestrahlt und nur gering gedämpft werden. Bei einer symmetrischen Einspeisung von Signalen ist die dem Netz und den Verbrauchern innewohnende Unsymmetrie als Ursache für die Entstehung asymmetrischer Komponenten zu benennen. Der Longitudinal Conversion Loss (LCL) bzw. der Transversal Conversion Loss (TCL) sind geeignete Größen zur Beschreibung dieser Unsymmetrie. Ein Meßplatz zur Bestimmung des TCL bzw. LCL wurde aufgebaut und kalibriert.

Zur Verifizierung der theoretischen Überlegungen bezüglich der Entstehung der Unsymmetrie und der Ausbreitungsvorgänge wurden zunächst Untersuchungen an einem künstlichen Netz in der Absorberhalle der RegTP in Kolberg durchgeführt (vgl. Abschnitt 5). Dabei wurde festgestellt, daß der LCL/TCL stark vom Schaltzustand der Verbraucher, speziell einphasig geschalteter Lasten (z.B. Lampen) abhängig ist. Der fehlende Rückleiter führt im ausgeschalteten Zustand zu hohen Unsymmetrien. So wurde bei ausgeschalteten Lampen ein schlechterer LCL gemessen als bei eingeschalteten Lampen. Die Unsymmetrie ist stark abhängig von der Netzimpedanz. Da das künstliche Netz im Leerlauf betrieben wurde, sind diese Unterschiede an realen Netzen nicht so ausgeprägt zu erkennen gewesen.
Der LCL ist aufgrund der Resonanzen vom Ort der Einspeisung und von der jeweiligen Leitungslänge abhängig. Daher sollte die Hüllkurve der Maxima aus LCL-Messungen an unterschiedlichen Punkten innerhalb des Netzes verwendet werden.

Zur weiteren Untersuchung des Zusammenhangs von LCL/TCL und elektrischer Feldstärke wurde ein Zweidraht-Modell analysiert. Entsprechend den Ergebnissen sind der LCL_{100} bzw. der TCL_{100} geeignet, die Unsymmetrie des Netzes zu beschreiben und können als Grundlage für eine Abschätzung der zu erwartenden Feldstärken dienen. Der TCL_{100} und der LCL_{100} waren bei der verwendeten Meßanordnung identisch (Mechanismus des Übersprechens ist reziprok).
Einphasige Leiterführungen (z.B. bei ausgeschalteten Lampen) können auch bei einem ausreichend hohen LCL am Speisepunkt bereits störrelevante elektrische Feldstärken

verursachen, da die halbe symmetrische Signalspannung (erdbezogener Fall) als asymmetrische Spannung an diesen Teilstromkreisen wirkt (vgl. Abschnitt 6).

Bei den Messungen am künstlichen Netz überwog im unteren Frequenzbereich der Anteil des gemessenen elektrischen Feldes gegenüber dem des magnetischen Feldes. Diese Beobachtung kann ihre Ursache in dem oben dargestellten Phänomen haben. Da dieser Effekt durch den LCL/TCL nicht erfaßt wird, würde eine reine Begrenzung auf den LCL/TCL zur Vernachlässigung dieses Störpotentials führen.
Inwiefern an realen Netzstrukturen das E-Feld ein höheres Störpotential als das H-Feld hat, ist innerhalb der Studie nicht weiter untersucht worden. Aus meßtechnischen Erwägungen wurden in Absprache mit dem Auftraggeber an realen Netzen nur die magnetischen Feldstärken gemessen.

Langzeitmessungen des LCL lassen eine starke Abhängigkeit des LCL/TCL von den Nutzern und Netzbedingungen erkennen (vgl. Abschnitt 7). An einzelnen Frequenzen kann der LCL innerhalb kurzer Zeit um 20 dB schwanken. Daher sollte der LCL statistisch interpretiert werden, d.h. es ist ein Bereich anzugeben, in dem der LCL mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit gemessen wird. Dieser Bereich wäre für Normungsansätze bei PLC zu berücksichtigen, um mit einer gewissen Sicherheit die vorhandenen Unsymmetrien der Netze zu erfassen.

Die Untersuchungen des Abstrahlverhaltens von 230 V-Stromversorgungsnetzen erfolgte an unterschiedlichen Gebäuden. Die Meßergebnisse lassen erkennen, daß symmetrisch eingekoppelte Spannungen in sehr hohen magnetischen Feldstärken resultieren können, die im Einzelfall nicht in unmittelbarer Nähe zur Einkoppelstelle, sondern in einigem Abstand zu dieser auftreten. Wie die verwendeten Modellierungsansätze belegen, bietet die asymmetrische Störspannung bei der Verwendung einfacher Modellen nur einen Ansatz, das Störpotential im oberen Frequenzbereich abzuschätzen.

Bei den untersuchten Frequenzen und Meßpunkten variierte die Feldstärke innerhalb eines Raumes um ca. 12 dB. Sie wird räumlich verschleppt. Die Maxima sind in gewissem Abstand entlang der verlegten Leitung zu finden. Aufgrund der räumlich verteilten Leitungen mit den verbundenen Ausbreitungs- und Überlagerungseffekten kann im allgemeinen von einem sich räumlich schwach ändernden Betrag der magnetischen Feldstärke ausgegangen werden.

Nach den Meßergebnissen ist nicht mit höheren Feldstärken zu rechnen, wenn in unmittelbarer Nähe zum Erdungspunkt eingespeist wird.

Die vielfältigen Einflüsse auf das Abstrahlverhalten bei PLC lassen sich zur Zeit nur begrenzt modellieren, so daß eine statistische Auswertung der Daten sinnvoll ist. Dazu wurden die Ergebnisse der Messungen in den Gebäuden nach folgenden Kriterien gruppiert und ausgewertet:

1. alle Feldmeßaufpunkte mit einem Abstand kleiner 3 m zur Einspeisequelle (48),
2. alle Feldmeßaufpunkte mit einem Abstand zwischen 3 m und 5 m zur Einspeisequelle (57),
3. alle Feldmeßaufpunkte mit einem Abstand größer 5 m und kleiner 30m zur Einspeisequelle (87).

Da der Median nur bedingt zur Beurteilung des Störpotentials von Funkstörungen verwendet werden kann, ist eine Beurteilung über die in Abschnitt 8.1.8 dargestellten Box-Plots möglich. Es wäre auch möglich, einen Koppelfaktor zu definieren, mit dem man die eingespeisten symmetrischen Spannungen direkt in Feldstärken an den Aufpunkten umrechnen könnte.

Ein Bezug der gemessenen magnetischen Feldstärken auf den Grenzwert nach der Nutzungsbestimmung NB 30 der RegTP ist in Abschnitt 8.1.6 aufgezeigt. Die minimalen symmetrischen Spannungen, die zu einer Feldstärke nach dem Grenzwert führen, liegen im Bereich von ca. 80 $dB_{\mu V}$ bis 40 $dB_{\mu V}$.

Das in einem ersten Schritt verwendete einfache Modell eines $\lambda/2$-Dipols an der Einspeisequelle ist in gewissen Grenzen erst ab ca. 10 MHz zulässig. Die großen Unterschiede zwischen modellierter und gemessener Feldstärke im unteren Frequenzbereich ($f < 4$ MHz) lassen eine Anwendung des $\lambda/2$-Dipol-Modells nicht zu. Die Ursachen können in der vernachlässigten räumlichen Anordnung der Leitungen und in den großen Wellenlängen der Signale gesucht werden. Auch werden die Feldstärken nicht erfaßt, die durch die Anregung einphasiger Leitungsabschnitte mit der halben symmetrischen Signalspannung hervorgerufenen werden.

Die Messungen am Erdkabel eines Hausanschlusses belegen, daß ohne weitere Zusatzmaßnahmen ein größerer Rabatt für die zulässigen symmetrischen Signalpegel gegenüber der Hausinstallation nicht gegeben werden kann. Dieses ist auch verständlich, da die beiden Bereiche zur Zeit hochfrequenzmäßig nicht entkoppelt sind. Nur bei der symmetrischen Einspeisung zwischen zwei Außenleiter ist aufgrund der besseren Symmetrie im überwiegenden Frequenzbereich mit ca. 10 dB geringeren Feldstärken zu rechnen.

Eine Abschätzung der Summationseffekte von leitungsgeführten und feldgekoppelten Störungen bei PLC ist schwierig, da die Störwirkung der leitungsgeführten Komponenten von den Schutzmaßnahen an dem beeinflußten Gerät abhängig ist.

Insgesamt ist eine Abschätzung der maximal zu erwartenden Feldstärken schwierig. Die Daten sollten in Abhängigkeit von der Fragestellung entweder statistisch behandelt werden oder unter Ausnutzung der maximal möglichen Feldstärken in eine Worst Case Analyse einbezogen werden. Da eine Modellierung des Abstrahlverhaltens bei PLC nicht in einfacher Form möglich ist und die im ersten Ansatz gewählte $\lambda/2$-Modellierung die realen Störphänomene erst ab etwa 10 MHz berücksichtigt, wird in Zukunft noch an der Modellbildung gearbeitet werden müssen.

Die Studie belegt das existierende Störpotential bei der symmetrischen Einspeisung von hochfrequenten Spannungen im mV-Bereich in das 230 V-Stromversorgungsnetz und zeigt, daß regulative bzw. technische Maßnahmen zur Begrenzung von Funkstörungen notwendig sind.

11 LITERATUR

[1] EN 50065-1: Signalübertragung auf Niederspannungsnetzen im Frequenzbereich 3kHz bis 148,5kHz. DKE, November 1996

[2] Downey, W.: Central Control and Monitoring in Commercial Buildings Using Power Line Communication. in Proceedings of 1997 International Symposium on Power-line Communication and its Application, Essen, Germany, April 2-4 1997, pp. 115-119

[3] Hosemann, A.: PLC Applications in Low Voltage Distribution Networks. in Proceedings of 1997 International Symposium on Power-line Communication and its Application, Essen, Germany, April 2-4 1997, pp. 134-139

[4] Vines, R. M.; Trussell, H.J.; Gale, L.J.; O'Neal, J.B.: Noise on Residential Power Distribution Circuits. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-26, No. 4, November 1984

[5] Arzberger, A.; Dostert; K. Waldeck, T.; Zimmermann, M.: Fundamental Properties of the Low Voltage Power Distribution Grid. in Proceedings of 1997 International Symposium on Power-line Communication and its Application, Essen, Germany, April 2-4 1997, pp. 45-50

[6] Strassberg, D.: Powerline Communication: Wireless Technology. EDN, Vol. 41, No. 12, June 1996, pp.71-78

[7] Gonschorek, K. H.; Singer, H.: Elektromagnetische Verträglichkeit. B.G. Teubner Verlag, Stuttgart, 1992

[8] Schwab, A. J.: Elektromagnetische Verträglichkeit. Springer Verlag, Heidelberg 1991

[9] Habiger, E.: Elektromagnetische Verträglichkeit. Hüthig Verlag, Heidelberg, 1995

[10] Zinke, O.; Brunswig, H.: Hochfrequenztechnik 1 – Hochfrequenzfilter, Leitungen, Antennen. Springer Verlag Heidelberg 1995

[11] Dostert, K.: EMV bei der Nutzung elektrischer Energieverteilnetze als Kommunikationsmedium. in Elektromagnetische Verträglichkeit, DFG Antrag auf die Finanzierung des Sonderforschungsbereichs 1684 für die Jahre 1999-2000-2001, Universität Karlsruhe

[12] Rosch, R.: Gebäudesystemtechnik: Datenübertragung auf dem 230V-Netz. Verlag moderne Industrie, Landsberg/Lech, 1998

[13] Bown, P.A.: Some Key Factors Influencing Data Transmission Rates in the Power Line Environment When Utilising Carrier Frequencies Above 1 MHz. in Proceedings of 1998 International Symposium on Power-line Communication and its Application, Tokyo, Japan March 24-26 1998, pp.67-75

[14] Summary of an IEEE Guide for Power-Line Carrier Applications. IEEE transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, No. 6, Nov-Dec. 1980, pp. 2334-2337

[15] Powerline Communication und EMV. Funkschauseminar, 01.07.1999, München

[16] Mutoh, A.; Nitta, S.; Wakai, M.; Inomata, T.: Estimation of Frequency-Impedance Characteristic of Parallel Wire. in IEEE 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 18.-22. August, Austin, Texas, pp. 266-271

[17] Hemminger, R.C.; Gale, L.J.; O'Neal, J.B.: Signal Propagation on Single Phase Power Distribution Lines at Power Line Carrier Frequencies. IEEE transaction on Power Delivery, vol. PWRD-2, No. 1, Jan. 1987, pp. 28-33

[18] Tengdin, J.T.: Distribution Line Carrier Communication – A Historical Perspective. IEEE transaction on Power Delivery, vol. PWRD-2, No. 2, Apr. 1987, pp. 321-329

[19] Abraham, K.C.;Roy, S.: A Novel High-Speed PLC Communication Modem. IEEE transaction on Power Delivery, vol. PWRD-7, No. 4, Oct. 1992, pp. 1760-1768

[20] DIN VDE 0100Teil 300, Elektrische Anlagen von Gebäuden (mit Nennspannungen bis AC 1000V oder DC 1500V), Teil 300 Bestimmungen allgemeiner Merkmale, VDE Verlag

[21] Hemminger, R.C.; Gale, L.J.; O'Neal, J.B.: The Effect of Distribution Transformers on Distribution Line Carrier Signals. IEEE transaction on Power Delivery, vol. PWRD-2, No. 1, Jan. 1987, pp. 36-40

[22] Reiter, C.: EMV- Störmodell. Abschlußbericht einer Studie für das BAPT, 1997

[23] Hösl, Alfred: Die vorschriftsmäßige Elektroinstallation: Wohnungsbau, Gewerbe, Industrie. 16. Auflage, Hüthig Verlag, 1995.

[24] DIN VDE 0532 Teil 10, Leistungstransformatoren, Teil 1: Allgemeines. VDE Verlag

[25] DIN VDE 0141, Erdungen für Starkstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV. VDE Verlag

[26] VDE 0271, Starkstromkabel mit Isolierung und Mantel aus thermoplastischen PVC und Nennspannungen bis U_o/U (U_m) 3,6/6 (7,2) kV. VDE Verlag

[27] Dostert, K.: RF-Models of the Electrical Power Distribution Grid. in Proceedings of 1998 International Symposium on Power-line Communication and its Application, Tokyo, Japan March 24-26 1998, pp. 105-114

[28] Nicholson, J.R.; Malack, J.A.: RF Impedance of Power Lines and Line Impedance Stabilization Networks in Conducted Interference Measurements. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-15, pp. 84-86, May 1973

[29] Malack, J.A.; Engstrom, J.R.: RF Impedance of United States and European Power Lines. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-18, pp. 36-38, Feb. 1976

[30] Vines, R.M.; Trusseli, H.J.; SHUEY, K.C.; O'Neal, J.B.: Impedance of Residential Power Distributioon Circuits. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-27, pp. 6-12, Feb. 1985

[31] Newbury, J.: Power Line Communication Development. in Proceedings of 1998 International Symposium on Power-line Communication and its Application, Tokyo, Japan March 24-26 1998, pp. 203-212

[32] Assembe, L. T.: Bestimmung der Netzimpedanz in Gebäuden im Frequenzbereich 0,1...100MHz. in Elektromagnetische Verträglichkeit EMV'94, S. 587-596, VDE Verlag, Berlin, 1994

[33] Rathai, U.: EMV in lokalen Netzen. EMV-Kompendium'95, S.190-193, KM Verlag & Kongreß, München, 1995

[34] Dalby, A. B.: Signal Transmission on Power Lines. in Proceedings of 1997 International Symposium on Power-line Communication and its Application, Essen, Germany, April 2-4 1997, pp. 37-44

[35] Montrose, M.: EMC and the printed circuit board: design, theory and layout made simple. IEEE press 1999

[36] DIN EN 55011 / VDE 0875, Grenzwerte und Meßverfahren für Funkstörungen von industriellen, wissenschaftlichen und medizinischen Hochfrequenzgeräten (ISM-Geräten), VDE Verlag Berlin

[37] DIN VDE 0871, Funk-Entstörung von Hochfrequenzgeräten, Festlegung von Grenzwerten für von industrielle, wissenschaftliche und medizinische Geräte. VDE Verlag Berlin

[38] DIN VDE 0877, Messen von Funkstörungen, Messen von Funkstörspannungen. VDE Verlag Berlin

[39] Duval, G.: Low Voltage Network Models to the Analysis of Unexpected Phenomena in PLC Communication. in Proceedings of 1998 International Symposium on Power-line Communication and its Application, Tokyo, Japan March 24-26 1998, pp. 123-133

[40] Low Frequency Interference Due to Unbalance About Earth of Telecommunication Equipment. ITU-T Recommendation K.10

[41] Transmission Aspects of Unbalance About Earth. ITU-T Recommendation G.117

[42] Macfarlane, I.P.: A Probe for the Measurement of Electrical Unbalance of Networks and Devices. IEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, Vo. 41, No. 1, February 1999, pp. 3-14

[43] D'Armore, M.; Sarto, M. S.: Electromagnetic Field Radiated from a Broadband Signal Transmission on Power Line Carrier Channels. in IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. PWRD-12, No. 2, 1997

[44] Madge, R.C.; Hatanaka, G.K.: Power Line Carrier Emissions from Transmission Lines. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 7, No. 4, October 1992, pp. 1775-1785

[45] Kuwabara, N.; Makino, H.; Tajima, K.; Tokuda, M.: Characteristics of Emission from Twisted Pair Cables Used for High Speed LANs. in EMC 96, International Wroclaw Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 296-300

[46] Shimoshio, Y.; Miyoshi, M; Koga, H.; Tokuda, M.: A New Calculation of LCTL for Balanced Pair Cable with Partial Unbalance. in EMC 98, International Wroclaw Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 175-179

[47] Tanabe, S.; Shiraki, Y.; Murata, Y.: Near and Far Filed Analysis from Flat Cables. in IEEE 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 18.-22. August, Austin, Texas, pp. 419-424

[48] Pfeiffer, W.; Gräf, T.: Ausbreitung und Dämpfung von Überspannungen in Niederspannungsinstallationen. in Elektromagnetische Verträglichkeit EMV'94, S. 587-596, VDE Verlag, Berlin, 1994

[49] Bauer, J.: Untersuchung unterschiedlicher Leitungstypen zum Einsatz in Gebäude-Installations- Bussystemen. in Elektromagnetische Verträglichkeit EMV'96, S. 981-988, VDE Verlag, Berlin, 1996

[50] Jakobus, U.; Landsdorfer, F.M.: Numerisches Verfahren zur Berechnung der Schirmwirkung von Stahlbetongebäuden. in Elektromagnetische Verträglichkeit EMV'94, S. 177-186, VDE Verlag, Berlin, 1994

[51] Köhler, W.; Reinhardt, U.; Jakobus: Messung und Betrechnung der Dämpfung elektromagnetischer Wellen durch Gebäude im Frequenzbereich 10Hz bis 1000MHz. in Elektromagnetische Verträglichkeit EMV'96, S. 973-980, VDE Verlag, Berlin, 1996

[52] Meßbericht- Balun mit Koppelkapazitäten, EMV- Beratungs- und Planungsbüro Prof. Gonschorek und Dr. Vick, Mai 1999

[53] LCL in der Schirmkabine der TU Dresden; 230 V Stromversorgung und Zusatzleitung, EMV- Beratungs- und Planungsbüro Prof. Gonschorek und Dr. Vick, Juni 1999

[54] Ausbreitung auf Streifenleitung; Streifenleitung in der Schirmkabine der TU Dresden, EMV- Beratungs- und Planungsbüro Prof. Gonschorek und Dr. Vick, Juli 1999

[55] Abstrahlverhalten eines künstlichen Netzes, EMV- Beratungs- und Planungsbüro Prof. Gonschorek und Dr. Vick, August 1999

[56] LCL der Ankoppelvorrichtung; Ankoppelvorrichtung mit Blockkondensatoren, EMV- Beratungs- und Planungsbüro Prof. Gonschorek und Dr. Vick, September 1999

[57] Anhang zum Meßbericht - Abstrahlverhalten eines künstlichen Netzes, EMV-Beratungs- und Planungsbüro Prof. Gonschorek und Dr. Vick, September 1999

[58] LCL Dauermessung; TU Dresden, Elektrotechnisches Institut, EMV- Beratungs- und Planungsbüro Prof. Gonschorek und Dr. Vick, September 1999

[59] Meßbericht; Emissionsmessung; TU Dresden, Elektrotechnisches Institut, EMV-Beratungs- und Planungsbüro Prof. Gonschorek und Dr. Vick, Oktober 1999

[60] Meßbericht; Emissionsmessung; Einfamilienhaus, EMV- Beratungs- und Planungsbüro Prof. Gonschorek und Dr. Vick, November 1999

[61] Meßbericht; Emissionsmessung; Wohnung in einer sanierten Jugenstilvilla, EMV-Beratungs- und Planungsbüro Prof. Gonschorek und Dr. Vick, Dezember 1999

[62] Meßbericht; Emissionsmessung; Mehrfamilienhaus, EMV- Beratungs- und Planungsbüro Prof. Gonschorek und Dr. Vick, Dezember 1999

[63] Meßbericht; Emissionsmessung; Fertigteil-Haus (Plattenbau), EMV- Beratungs- und Planungsbüro Prof. Gonschorek und Dr. Vick, Dezember 1999

[64] Meßbericht; Emissionsmessung; TU Dresden, Erdkabel zum Elektrotechnischen Institut, EMV- Beratungs- und Planungsbüro Prof. Gonschorek und Dr. Vick, Dezember 1999

[65] Meßbericht; Abschluß des Meßbaluns, EMV- Beratungs- und Planungsbüro Prof. Gonschorek und Dr. Vick, Dezember 1999

[66] R. V. Wormersley, R. D. Simmons, C. V. Tournadre: Final Report on a Study to Investigate PLT Radiation