

- 1 Forschungsinstitut der Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V.
- 2 MVV Energie AG, Mannheim
- 3 ABB Utility Automation GmbH, Ladenburg
- 4 Manet GmbH, Mannheim

Namen der Forschungsstellen

13 ZN

AiF-Vorhaben-Nr.

01.09.1999 bis 31.08.2000

Bewilligungszeitraum

Schlußbericht für den Zeitraum : 1.9.1999 bis 31.8.2000

(Forschungsstellen 1 von 4 bis 4 von 4)

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten Forschungsvorhaben

Forschungsthema :

Elektromagnetische Verträglichkeit von pulsmodulierten Umrichtern im Frequenzbereich der „Power-line“-Kommunikation

Mannheim, 7. November 2001

Ort, Datum

Unterschrift des Projektleiters der FS 1

Mannheim,

Ort, Datum

Unterschrift des Projektleiters der FS 2

Ladenburg,

Ort, Datum

Unterschrift des Projektleiters der FS 3

Mannheim,

Ort, Datum

Unterschrift des Projektleiters der FS 4

1	Zusammenfassung	3
2	Einführung	4
3	Pulsgerichtete Umrichter	5
	3.1 Grundlagen	5
	3.2 Aufbau des IGBT-Umrichters der FGH.....	6
	3.2.1 Der Leistungsteil des Umrichters	7
	3.2.2 Die Regelung des Umrichters	8
4	Datenübertragung über Verteilnetze der EVU	10
	4.1 PLC für EVU – Dienstleistungen.....	11
	4.2 PLC für Telekommunikation	13
5	Messung und Beurteilung von Störaussendungen	13
	5.1 Gesetzliche Bestimmungen und Normen	13
	5.2 Bestimmung des Funkstörpegels F	15
	5.3 Messungen im Frequenzbereich 9 kHz – 150 kHz.....	16
	5.3.1 Meßgeräte und Verfahren	16
	5.3.2 Kalibrierung der Meßeinrichtungen	17
	5.4 Messungen im Frequenzbereich 3 MHz – 30 MHz	20
	5.4.1 Meßgeräte und Verfahren	20
	5.5 Spannungsmessungen	22
	5.5.1 Aufzeichnung und Auswertung.....	22
	5.5.2 Meßfilter für die Netzspannung	22
6	Messung in der Anlage MA-Luzenberg	23
	6.1 PLC Geräte im Alleinbetrieb	24
	6.2 Parallelbetrieb von PLC und Umrichter	27
	6.3 Messungen von Störaussendungen	29
7	Messungen in der Anlage MA-Niederfeld	33
	7.1 Pilotanlage MA-Niederfeld	33
	7.2 Messung von Störaussendungen in Niederfeld.....	34
8	Verzeichnis der Abkürzungen	41
9	Literaturverzeichnis	42

1 Zusammenfassung

In diesem Forschungsprojekt wurde die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) einer Powerline Übertragungseinrichtung mit einem IGBT-Umrichter untersucht. Die Powerline Übertragung bestand aus der DLC-Übertragung der ABB-UTA, die nach dem „frequency hopping“-Verfahren im CENELEC-A-Band zwischen 9 kHz und 95 kHz arbeitet. Der IGBT-Umrichter wurde von der FGH erstellt. Die Installation der beiden Einrichtungen erfolgte im Niederspannungsnetz der MVV AG. Zusätzlich wurde eine Hochbit-Übertragung mit einer Übertragungsrate von 2 Mbit/s der Fa. Mainet untersucht, die von der Manet GmbH in einem Pilotversuch für den Internet-Anschluss betrieben wird.

Die DLC-Übertragung der ABB-Übertragung arbeitet mit vier Frequenzen zwischen 50 kHz und 95 kHz. Als Einspeise-Spannungspegel wurden etwa 4 V bei jeder der vier Frequenzen gemessen. Die Spannungspegel bewirken Ströme von etwa 1 A, die an den Anschlußpunkten des Knotenkontrollers und der vier installierten Teilnehmer bewirkten **Bild 17**. Mit diesen Pegeln war die Datenübertragung zwischen dem Kontroller und Teilnehmern beim Betrieb über etwa 1 Jahr einwandfrei.

Beim Parallelbetrieb eines der Teilnehmer der DLC und des IGBT-Umrichters am gleichen Einspeisepunkt waren die Sendesignale im Zeitverlauf der Netzspannung aufgrund der Störungen des IGBT-Umrichters nicht mehr zu erkennen. Trotzdem war die Datenübertragung noch einwandfrei. Die Frequenzanalyse zeigt, daß das Signal für die Frequenz von 53 kHz zwar mit deutlich verringerter, aber noch genügender Amplitude empfangen wurde **Bild 20**.

Als Rahmenbedingung für den Betrieb von Powerline liegt die Frequenzbereichszuweisungsplanverordnung der Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (RegTP) vor. Sie wurde am 14. 07.00 vom Bundesrat verabschiedet und wird voraussichtlich am 1. Juli 2001 in Kraft treten. Diese Verordnung erlaubt in der Nutzungsbestimmung 30 (NB 30) [1] den Betrieb von Kommunikationseinrichtungen auf Leitungen, wenn die vorgegebenen Bedingungen für die von der Kommunikationseinrichtung abgestrahlten Störfelder erfüllt sind.

Die DLC-Übertragung der ABB-UTA erfüllt aufgrund der hohen verwendeten Spannungs- und Strompegel die Forderungen der RegTP-NB 30 nicht. Die Pegel müßten um einen Faktor von etwa 30 reduziert werden, um die gegebenen Bedingungen einhalten zu können. Bei einer Reduktion der Pegel um einen solchen Betrag wird aber die elektromagnetische Verträglichkeit der DLC-Datenübertragung und IGBT-Umrichtern nicht mehr gegeben sein. Es ist anzunehmen, daß dies auch für andere Prinzipien einer Powerline-Übertragung im Bereich niedriger Frequenzen zutreffen wird.

Die Hochbit-Übertragungseinrichtung der Fa. Mainet arbeitet im Frequenzbereich von 5 MHz bis 15 MHz. In diesem Bereich sind Störungen durch IGBT nur dann zu erwarten, wenn beide Einrichtungen direkt parallel arbeiten. Vergleichende Untersuchungen der EMV waren in

diesem Projekt nicht geplant, aber das gemessene Frequenzspektrum des Einspeisestroms des IGBT-Umrichters läßt eine solche Schlußfolgerung vermuten, auch wenn diese Übertragungseinrichtung mit wesentlich kleineren Spannungs- und Strompegeln arbeitet. Durch Messungen der Störfeldstärken im Pilotprojekt der Manet konnte nachgewiesen werden, daß die installierte PLC-Einrichtung die Anforderung der RegTP, NB 30; erfüllt.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

2 Einführung

Dezentrale Energieerzeugungsanlagen werden mit steigendem Anteil mit pulsmodulierten Umrichtern unter der Verwendung von IGBT als Schaltelementen ausgerüstet. Als Modulationsverfahren sind Pulsweitenmodulation, Pulsfrequenzmodulation und Pulsregelung mit unterschiedlichen Schaltschwellen üblich. Aufgrund der hohen Schaltgeschwindigkeiten der IGBT enthält der von solchen Umrichtern in das elektrische Versorgungsnetz eingespeiste Strom Anteile mit sehr hohen Frequenzen. Gleichzeitig besteht hohes Interesse, das elektrische Versorgungsnetz für die Übertragung von Daten zu benutzen. Dies gilt sowohl für den heute bereits durch Normen festgelegten Frequenzbereich bis 148,5 kHz als auch für den für Telekommunikation oder Rechnerdaten-Übertragung genutzten Frequenzbereich bis zu einigen MHz.

Auf der einen Seite wird der für die Datenübertragung nötige Spannungspegel durch die Festlegungen der zulässigen elektromagnetischen Störfeldstärken der Regulierungsbehörde des Bundeswirtschaftsministeriums begrenzt, so daß die Datenübertragung mit kleinen Spannungswerten erfolgen muß. Auf der anderen Seite verursachen IGBT-Umrichter im Netz Störspannungen, die deutlich unter dem für die Datenübertragung verwendeten Pegel liegen müssen. Dies bedeutet, daß für einen störungsfreien Parallelbetrieb von solchen Umrichtern mit Datenübertragungseinrichtungen strenge Regeln für die verwendeten Nutz- und Störsignale gefunden werden müssen, damit ein Parallelbetrieb ohne unzulässige Beeinflussung der Datenübertragung und ohne unnötig strenge Einschränkungen der modernen pulsmodulierten Umrichter ermöglicht wird. Geeignete Messungen der relevanten Signale im Netz wurden bisher nicht durchgeführt und geeignete Regeln sind nicht vorhanden.

Das Forschungsvorhaben berührt alle aufgeführten Bereiche. Die aus den Ergebnissen zu erwartenden Regeln für Störaussendung und Störfestigkeit von IGBT-Umrichtern und PLC - Einrichtungen machen das Vorhaben zu einer produktorientierten Forschung, und es bietet auch Verfahren zur Festlegung der Verträglichkeit beider Geräte miteinander.

Das Vorhaben wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) gefördert.

3 Pulsgerichtete Umrichter

3.1 Grundlagen

Bis vor wenigen Jahren waren Thyristoren das einzige Bauelement, das für Umrichter mittlerer und hoher Leistungen geeignet war. Typische Geräte mit dieser Konstruktion waren netzgeführte, selbstgelöschte Umrichter mit Gleichstrom-Zwischenkreis, deren Stromspeisung in das Versorgungsnetz eindeutig bestimmt und bekannt war. Neben diesen sogenannten I-Umrichtern waren aber auch bereits zu dieser Zeit Umrichter mit Gleichspannungszwischenkreis (U-Umrichter) mit Transistoren als Schaltelemente auf dem Markt, die erreichbaren Einheitsleistungen waren aber gering.

Mit der Entwicklung abschaltbarer Halbleiter mit hohen Strömen wie GTOs oder IGBTs wurden U-Umrichter mit großen Einheitsleistungen möglich. GTO-Umrichter wurden wegen der niedrigen möglichen Schaltfrequenzen noch synchron zur Netzfrequenz geschaltet, so daß die ins Netz eingespeisten Ströme mit den bekannten Gesetzmäßigkeiten der Oberschwingungen beschrieben werden konnten. IGBTs erlauben dagegen hohe Schaltfrequenzen und machten die Entwicklung von sogenannten pulsmodulierten Umrichtern möglich. Unabhängig von dem gewählten Schaltprinzip der IGBTs haben die heute eingesetzten Umrichter eine gemeinsame Wirkungsweise:

- Rechnerische Vorgabe eines Zeitverlaufs des dem Netz entnommenen (Gleichrichter) oder in das Netz eingespeisten (Wechselrichter) Stromes. Der Strom ist in der Regel sinusförmig und hat Betriebsfrequenz. Seine Phasenlage zur Spannung hängt von der Zielsetzung der Anlage ab und kann beliebig eingestellt werden. Neben der Verwendung als Umrichter können also auch dynamische Kompensatoren realisiert werden.
- Annäherung des vorgegebenen, sinusförmigen Stroms durch eine geeignete Schaltfolge der IGBTs. Die gewählte Schaltung entspricht in etwa dem in **Bild 1** dargestellten Prinzip, so daß sich der dem Netz entnommene Strom aus zeitlich linear verlaufenden Stromteilen zusammensetzt. Die Höhe der Ladespannung des Kondensators und der Wert der Induktivität sind so gewählt, daß sie zusammen mit dem gewählten Schaltprinzip eine optimale Annäherung der gewünschten Sinusform des Stromes ergeben.

Als Schaltprinzip der IGBTs haben sich heute im wesentlichen durchgesetzt:

- **Pulsweitenmodulation**
Die Schaltfrequenz ist konstant und die Pulsweite ergibt sich aus einer Bedingung, die an die positive und negative Abweichung des tatsächlichen vom vorgegebenen Strom gestellt wird. Die Wahl dieses Schaltprinzips geschieht häufig.
- **Pulsfrequenzmodulation**

Die Pulsweite ist konstant und die Pulsfrequenz ergibt sich aus den an die Abweichungen gestellten Bedingungen. Die Anwendung dieses Prinzips ist selten.

– **Pulsregelung**

Bei diesem Schaltprinzip werden Pulsfrequenz und Pulsweite entsprechend vorgegebenen positiven und negativen Abweichungen vom vorgegebenen Stromverlauf geregelt. Es ergibt sich damit eine Kombination aus Pulsfrequenz- und Pulsweitenmodulation und dieses Prinzip ist häufig.

Die durch diese Schaltprinzipien entstehenden Stromverläufe sind in **Bild 1** zusammengefaßt.

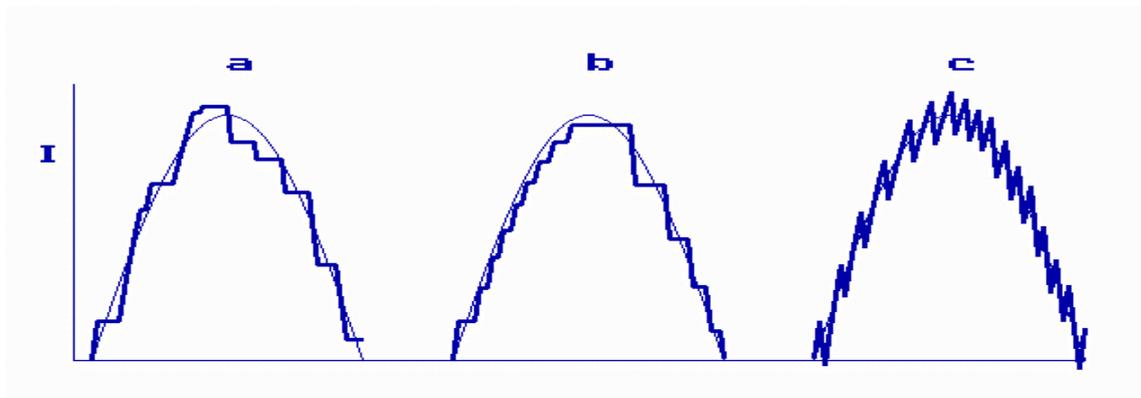


Bild 1: Beispiele von idealen (dünn) und durch pulsmodierte Umrichter angenäherten Stromverläufen (dick) für die drei angewendeten Schaltprinzipien.
a: Pulsweitenmoduliert, Pulsfrequenz konstant (hier 1000 Hz);
b: Pulsfrequenzmoduliert, Pulsweite konstant (hier etwa 0,35 ms);
c: Puls geregelt, Pulsfrequenz und Pulsweite variabel.

3.2 Aufbau des IGBT-Umrichters der FGH

Der FGH-Umrichter besteht aus zwei getrennten Funktionseinheiten, dem eigentlichen Umrichter mit der Leistungselektronik und der zugehörigen Regelung, die jeweils in einem geschirmten 19 Zoll Einschub untergebracht sind. Obwohl Umrichter im allgemeinen dreiphasig aufgebaut sind, ist für die vorgesehenen Untersuchungen eine einphasige Ausführung vollkommen hinreichend. Der FGH Umrichter arbeitet als Blindleistungskompensator, so daß, abgesehen von dessen Verlustleistung, keine Wirkleistung ausgetauscht wird. Dies ist im Hinblick auf die Form des erzeugten Netzstromes ohne Bedeutung.

3.2.1 Der Leistungsteil des Umrichters

Der Schaltplan des FGH-Umrichters ist in **Bild 2** auszugsweise wiedergegeben. Dieser zeigt nur die für das Verständnis der Arbeitsweise des Umrichters wichtigen Komponenten.

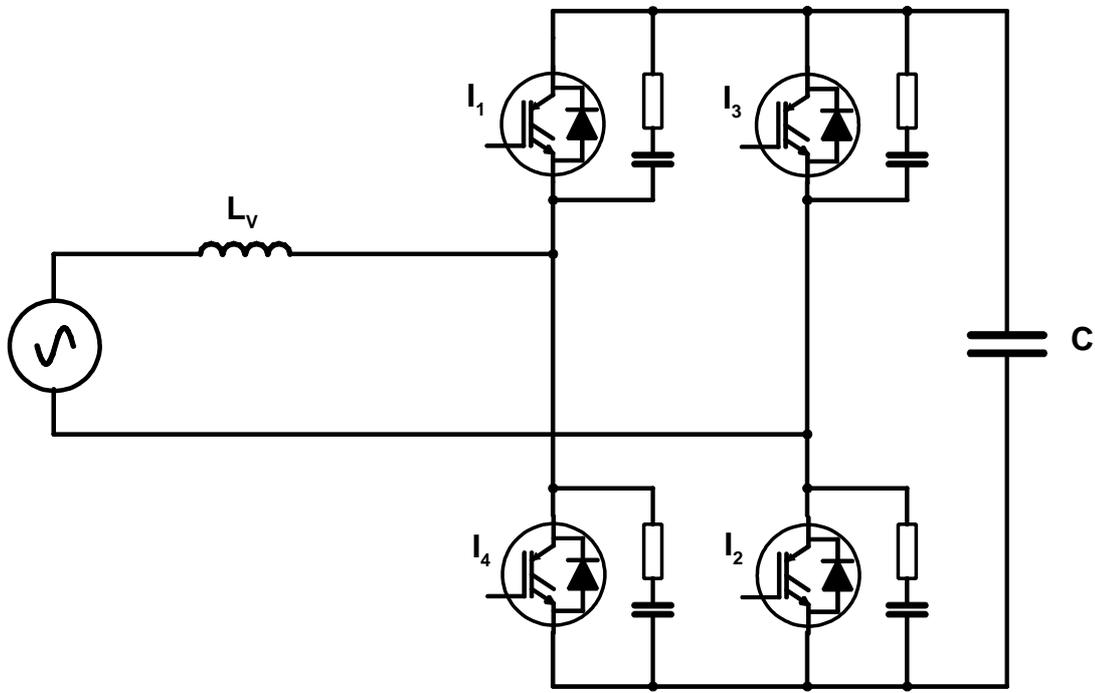


Bild 2 auszugsweiser Schaltplan des FGH-Umrichters

Der Leistungsteil des Umrichters besteht aus einer Brückenschaltung mit 4 IGBT Modulen, I_1 bis I_4 einer Luftdrossel L_v und dem Kondensator C. Die IGBT Module sind mit integrierten Freilaufdioden, einer RC-Ventilbeschaltung und Varistoren zum Schutz gegen Überspannungen ausgerüstet. Die Ansteuerung erfolgt über eine Elektronikbaugruppe, die auch galvanische Trennung zwischen dem Leistungsteil und der Regeleinrichtung des Umrichters bereitstellt.

Nicht im Schaltplan dargestellte Komponenten, die zwar für die Funktion und den sicheren Betrieb notwendig sind, sind im folgenden aufgelistet:

- Netzanschlutung und Sicherungsautomat
- Lade- und Entladeeinrichtung für den Kondensator
- Spannungswandler zur Messung der Netzspannung
- Spannungswandler zur Messung der Kondensatorspannung
- Stromwandler für Messung und Regelung

3.2.2 Die Regelung des Umrichters

Die Regelung des Umrichters hat folgende Aufgaben zu erfüllen:

- Erzeugung des Sollwertes für den Umrichterstrom
- Synchronisation auf die Netzspannung
- Regelung des Umrichterstromes
- Erzeugung der Zündimpulse für die IGBTs
- Regelung der Spannung des Kondensators
- Überstromschutz

Das Blockschaftbild der Regelung des Umrichters ist in **Bild 3** dargestellt.

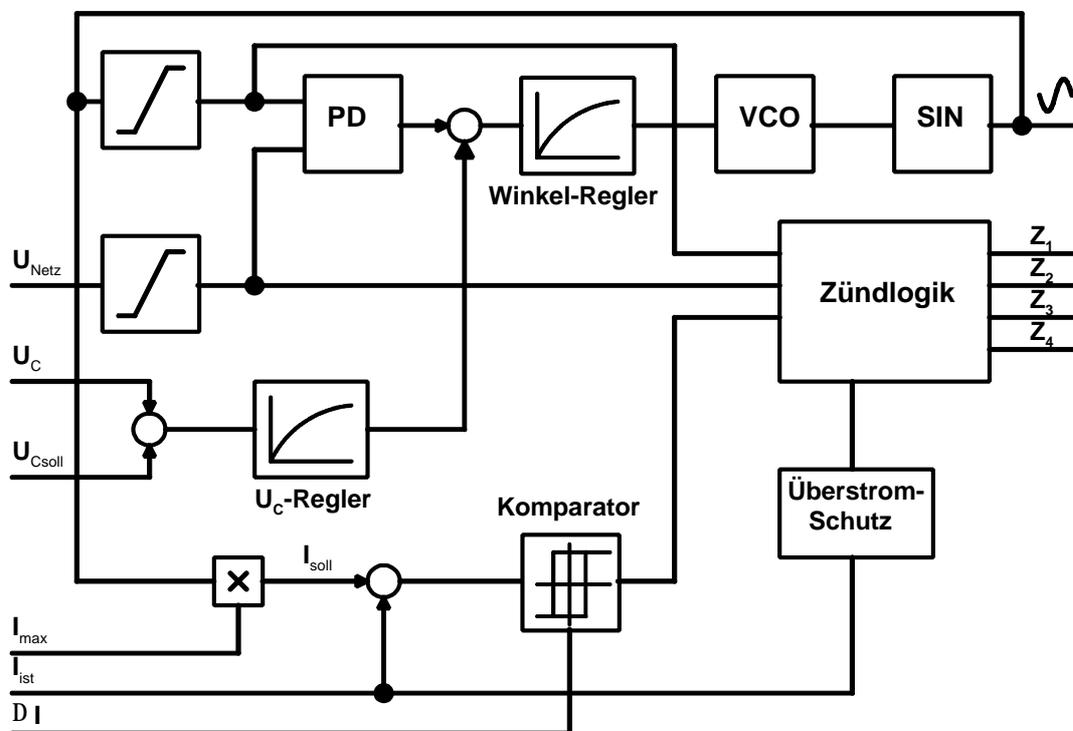


Bild 3 Blockschaftbild der Regelung des Umrichters

Der spannungsgesteuerte Oscillator VCO liefert ein digitales Signal mit einer Frequenz, die proportional seiner Eingangsspannung ist. Der Sinusgenerator SIN erzeugt hieraus mit Hilfe der in einem Eprom gespeicherten Werte der sinus - Funktion und eines Digital-Analog-Wandlers eine sinusförmige Spannung, die zur Bildung des Sollwertes des Umrichterstromes benutzt wird. Die Winkelauflösung beträgt 0,352 Grad. die Amplitudenauflösung 0,000488.

Die Synchronisation auf die Netzspannung erfolgt nach dem Prinzip der PLL. Aus der Ausgangsspannung des Sinusgenerators SIN und der Netzspannung wird mit Hilfe von Komparatoren und des Phasendiskriminators PD die Phasenverschiebung beider Signale ermittelt. Der Winkel-Regler steuert die Frequenz des VCO so daß diese Phasenverschiebung im synchronisierten Betrieb etwa 90 Grad beträgt.

Obwohl für eine umfassende Untersuchung von pulsmodulierten Umrichter alle drei oben angegebene Verfahren zur Stromregelung herangezogen werden müssten, wurde der von der FGH gebaute Umrichter nur mit Pulsregelung ausgerüstet. Dieses Verfahren bietet bei geringem Aufwand für die Realisierung das beste Regelverhalten. Wie in **Bild 4** dargestellt ist, folgt der Strom I_{ist} im Mittel dem vorgegebenen Strom I_{soll} . Der im wesentlichen dreieckförmige Verlauf ist begründet durch das Regelverfahren, das man allgemein als Zweipunkt-Regelung bezeichnet.

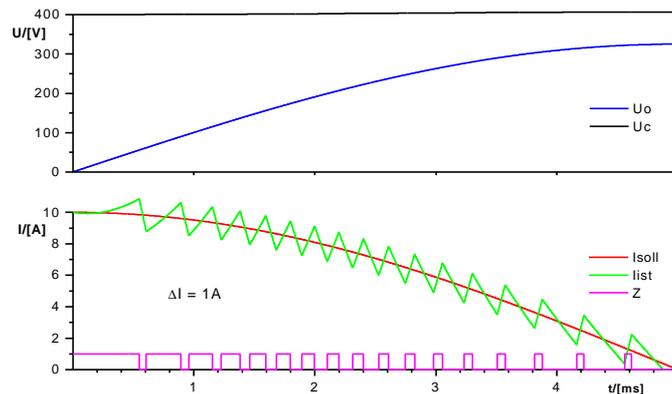


Bild 4 Zeitlicher Verlauf von Umrichter – Größen für $\frac{1}{4}$ Netzperiode

U_0	Netzspannung
U_C	Kondensatorspannung
I_{soll}	Sollwert des Umrichterstromes
I_{ist}	Umrichterstrom
Z	Zündimpuls

Wie aus **Bild 5** zu ersehen ist, wird die Regelabweichung $I_{soll} - I_{ist}$ einem Komparator mit einstellbarer Schaltschwelle ΔI (Hysterese) zugeführt. Sein Ausgang liefert den Zündimpuls Z zur Ansteuerung des IGBT. Bei Erreichen der negativen Schaltschwelle ($I_{soll} - I_{ist} < -\Delta I$) wird der IGBT angesteuert. Der Strom fließt über den IGBT und die Drossel L_V . Das Differential des Stromes gehorcht der Beziehung:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L_V} \bullet U_0 \quad (3.1)$$

Bei Erreichen der positiven Schaltschwelle ($I_{soll} - I_{ist} > +\Delta I$) wird der IGBT gesperrt. Der Strom fließt über die Diode, die Drossel L_V und den Kondensator C . Das Differential des Stromes gehorcht der Beziehung:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L_V} \bullet (U_0 - U_C) \quad (3.2)$$

Voraussetzung für die korrekte Funktion dieses Prinzips ist, daß die Kondensatorspannung U_C größer als der Scheitelwert der Spannung U_0 ist.

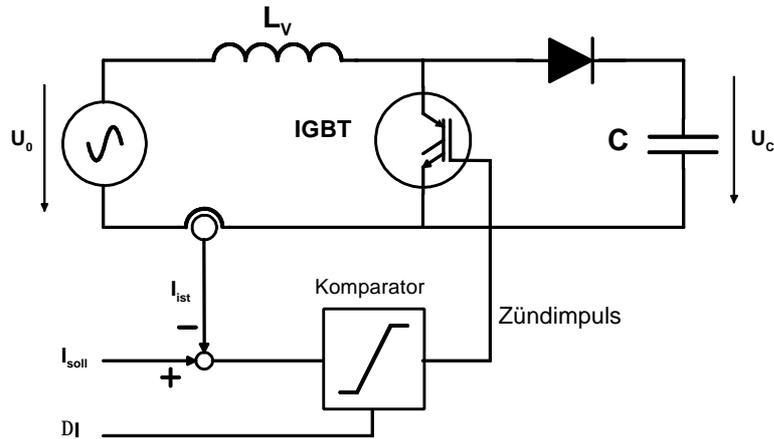


Bild 5 Prinzipschaltbild des IGBT-Umrichters gültig für $\frac{1}{4}$ Netzperiode

Die Stromregelung erzeugt lediglich ein Signal mit der Bedeutung „Strom vergrößern“ oder „Strom verkleinern“. Eine Zündlogik generiert hieraus die Steuersignale für die IGBT Module in Abhängigkeit von der Polarität des Stromsollwertes und der Polarität der Netzspannung.

Der Umrichter ist nicht in der Lage auf Dauer Energie aus dem Netz zu entnehmen oder in das Netz einzuspeisen. Lediglich die Verluste müssen aus dem Netz gedeckt werden. Überschüssige Energie wird im Kondensator gespeichert und sorgt damit zum Anstieg der Kondensatorspannung bis zu seiner Zerstörung. Können andererseits die Verluste nicht aus dem Netz gedeckt werden, so führt dies zum Absinken der Kondensatorspannung, was die Funktion des Umrichters beeinträchtigt. Daher muß Kondensatorspannung geregelt werden. Die Wirkleistung ist proportional dem Kosinus der Phasenverschiebung φ zwischen der Netzspannung und dem netzfrequenten Anteil des Umrichterstromes. Für $\varphi \sim 90^\circ$ ist $\cos\varphi \sim \sin\varphi \sim \varphi$. Eine Änderung der Phasenverschiebung ändert die Wirkleistung des Umrichters und somit die Kondensatorspannung.

Außerdem ist ein ein schneller Überstromschutz, der bei Erreichen eines einstellbaren Ansprechwertes die Zündimpulse für die IGBTs sperrt, Bestandteil der Regelung.

4 Datenübertragung über Verteilnetze der EVU

Außer für die Energieübertragung werden Hochspannungsleitungen seit langem auch zur Nachrichtenübertragung der EVU genutzt. Für die „Trägerfrequenz – Nachrichtenübertragung über Hochspannungsleitungen (TFH)“ sind die Frequenzbereiche 15 bis 450 kHz und 450 bis 470 kHz zugewiesen und in der Reihe DIN VDE 0850 [2] genormt. Neu hinzugekommen ist die Datenübertragung über Energieleitungen durch „power line carrier (PLC)“. Das Verfahren ist identisch mit der TFH, lediglich die in der Europeanorm EN 50065 [3] spezifizierten Frequenzbereiche sind verschieden. Die folgenden Bereiche sind vorgesehen:

- Nutzung durch das EVU : 3 kHz bis 95 kHz;

- Nutzung durch den Kunden : 95 kHz bis 148,5 kHz.

Die Öffnung des Strommarktes wird zukünftig einen erhöhten Informationsbedarf über die im Netz herrschenden Lastzustände und den Energiefluß zum Kunden erfordern. Feststellung und Steuerung des Energieverbrauchs eines jeden, am öffentlichen Netz angeschlossenen Kunden werden entsprechend den gegebenen vertraglichen Abmachungen erforderlich werden, wenn die Liberalisierung des Strommarktes voll greifen soll. Dies bedeutet, daß Datenübertragungsleitungen vom Kunden zur steuernden Zentrale benötigt werden und es liegt nahe, hierfür die ohnehin vorhandenen Stromleitungen zu verwenden.

In den letzten Jahren ist aus Diskussionen und initiierten Pilotprojekten ein verstärkter Trend zu bemerken, Verteilnetze auch für die Datenübertragung und zur Telekommunikation zu verwenden [4]. Für beide sind digitale Übertragungsraten von 1 Mbit/s bis 2 Mbit/s in der Diskussion, was den üblichen in Mobiltelefonen verwendeten Übertragungsraten entspricht. Für solche, heute als „power-line“ bezeichnete Übertragungen sind Bandbreiten von 2 MHz bis 4 MHz erforderlich, was für den für Verteilnetze angedachten Frequenzbereich bis etwa 20 MHz in jedem Falle eine sehr breitbandige Übertragung bedeuten würde. Dies hat zur Folge, daß eine Trennung mehrerer Übertragungskanäle durch Zuweisung unterschiedlicher Übertragungsfrequenzen, wie es im Rundfunk bisher üblich ist, nur eingeschränkt möglich ist, da insgesamt für die „power-line“-Übertragung nur wenige Kanäle zur Verfügung stehen würden. Man wird also digitale Verfahren zur Kanaltrennung mitberücksichtigen, was u.U. die notwendige Übertragungsbandbreite erhöhen würde.

Für beide oben erwähnte Anwendungsbereiche der PLC-Kommunikation wurden in Zusammenarbeit mit den Partnern dieses Forschungsvorhabens Pilotanlagen im Verteilnetz der MVV errichtet. Die Anlage in Mannheim Luzenberg soll Erkenntnisse über die Anwendung von PLC im Bereich der EVU Dienstleistungen liefern und außerdem der Erforschung des Parallelbetriebes mit IGBT gesteuerten Umrichtern dienen. Die Anlage in Mannheim Niederfeld ist für den Bereich Telekommunikation und Datenaustausch mit dem Internet ausgelegt. Hier wurden lediglich EMV relevante Messungen durchgeführt.

4.1 PLC für EVU – Dienstleistungen

Das von der ABB Utility Automation GmbH entwickelte Datenübertragungssystem soll der Übertragung energieverbrauchsrelevanter Informationen dienen. Das System DartNet[®] ist eine Lösung zur Datenübertragung über das vorhandene Verteilnetz. Dabei gibt es angepaßte Lösungen sowohl für die Mittel- als auch die Niederspannungsnetze. Für die Niederspannungsebene (0,4 kV) wurde ein besonderes Kommunikationsverfahren für echtzeit-nahe Aufgaben entwickelt: das Frequency-Hopping-Kommunikationsverfahren.

Nachrichtentechnisch ist das Niederspannungsnetz ein ungünstiger Übertragungskanal für den verwendeten Frequenzbereich (A-Band gemäß EN 50065 [3]). Hierzu gibt es folgende Gründe:

- Die Netze sind für den 50-Hz-Energiefluß und nicht für Datenübertragung optimiert.
- Die Kanaldämpfung ist lastabhängig und nimmt mit steigender Frequenz zu.
- Der Störelag ist auch lastabhängig, nimmt jedoch mit steigender Frequenz ab.
- Die Netzimpedanz ist relativ niederohmig, besonders am Ortsnetztransformator.
- Änderungen der Netzwerktopologie beeinflussen die Kanaleigenschaften.
- Durch ständiges Zu- und Abschalten von Verbrauchern mit unterschiedlichen Eigenschaften wird die Übertragungsqualität permanent beeinflusst.

Das von ABB entwickelte Kommunikationsverfahren für die Niederspannungsebene begegnet diesen Schwierigkeiten mit folgenden Eigenschaften:

- Verwendung eines Frequency-Hopping-Modulationsverfahrens (FH) mit Nutzung mehrerer Frequenzen (vier) im für EVU reservierten A-Band nach EN 50065 [3]
- Optimierter Empfangsteil und AGC-Regler.
- Integrierte kostenoptimierte Hardwarelösung (ASIC).
- Industriell gefertigtes Serienprodukt.

Das Frequency-Hopping-Modulationsverfahren (FH) erhöht die Störresistenz deutlich. Bei dieser Modulationsart stehen nicht - wie bei FSK- oder SFSK-Verfahren üblich - nur zwei, sondern vier verschiedene Trägerschwingungen zur Signalisierung eines Symbols zur Verfügung. Die Frequenzen werden als serielle Chip`s übertragen, wobei die Reihenfolge der Chip`s das entsprechende Symbol darstellt. Es genügen vier unterschiedliche Symbole, um alle Bit eines Protokolls sicher zu übertragen.

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, daß die Übertragungssicherheit auch dann noch gewährleistet ist, wenn eine bis maximal drei Trägerschwingungen gestört sind. Dabei können die erkannten Frequenzen pro Symbol verschieden sein. Die Synchronisation zwischen Sender und Empfänger während der Protokollübertragung basiert auf der Netzfrequenz.

Technische Daten:

- Frequenzbereich: gem. EN 50065: A-Band, 9 bis 95kHz, darin 4 feste Frequenzen genutzt (52,8 kHz, 62,4 kHz, 72,0 kHz, 86,4 kHz)
- Datenrate: 1.2 kbit/s bzw. 2,4 kchip/s
- Modulation: Frequency Hopping
- Codierung: CRC (Cyclic Redundancy Check)
- Kopplung: Kapazitiv auf eine Phase
- Übertragungsmedien: Kabel und Freileitungen

4.2 PLC für Telekommunikation

Ist das FH-Verfahren für die langsame Datenübertragung im Bereich der DIN EN 50065 noch geeignet, so erfordert die Bereitstellung von Internet und Telefonie über das Energienetz andere leistungsfähigere Übertragungsverfahren. In Deutschland setzen die Anbieter der PLC-Technik für den hochbitigen Bereich auf die Übertragungsverfahren OFDM und DS-SS. So setzt die MVV Energie AG, als eines der führenden Unternehmen, was die Implementierung der PLC-Technik anbetrifft, mit ihrem israelischen Partner MAINET, auf das DS-SS-Verfahren.

Das DS-SS-Verfahren hat gegenüber dem FH-Verfahren den Vorteil, daß nicht nur die Auswirkungen von schmal- sondern auch die von breitbandigen Störungen auf die Übertragungsqualität deutlich reduziert sind. DS-SS ermöglicht aufgrund seiner hervorragenden Störresistenz den gleichzeitigen Betrieb unterschiedlicher Teilnehmerverbindungen im gleichen Frequenzband. Die Teilnehmertrennung wird dann durch Codemultiplex, d.h. durch Nutzung unterschiedlicher Spreizcodes verwirklicht. Diese Lösung eignet sich aufgrund der EMV-Problematik bei PLC hervorragend als effiziente Zugriffstechnik im Uplink [5].

5 Messung und Beurteilung von Störaussendungen

Der Betrieb von PLC Geräten in Niederspannungsnetzen, verursacht durch die Modulation der Netzspannung mit seinen hochfrequenten Nutzsignalen, eine „Verunreinigung“ dieser Netzspannung. Dies hat zur Folge, daß die von den nicht geschirmten elektrischen Betriebsmitteln abgestrahlten Felder zu Funkstörungen führen können. Deshalb ist einerseits die erlaubte Größe der eingekoppelten hochfrequenten Spannungen und andererseits der erlaubte Pegel der Störaussendung in gesetzlichen Bestimmungen und Normen festgeschrieben.

5.1 Gesetzliche Bestimmungen und Normen

Das in Frage kommende Frequenzband für die Powerline Kommunikation reicht von 9 kHz bis 30 MHz. Bislang gibt es nur für den Frequenzbereich von 9 kHz bis 148,5 kHz unterhalb des Langwellen-Funkbandes Nutzungsvorschriften in Form der europäischen Norm EN 50065.

Die Norm EN 50065 regelt die Frequenznutzung und die zulässigen Einspeisepegel zur Kommunikation über Stromnetze unterhalb des Langwellen-Rundfunkbereiches. Im vorliegenden Fall ist nur das Frequenzband A (9...95 kHz) das der Nutzung durch EVU vorbehal-

ten ist, von Interesse. Der maximale Einspeisepegel liegt im Bereich 134..120 dB μ V (frequenzlogarithmisch linear fallend).

In der Mitteilung 1/1999 der Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (RegTP) wurde der Entwurf der Frequenzzuweisungsplanverordnung (FreqBZPV [6]) in Form einer Neufassung der Nutzungsbestimmung 30 (NB 30 [1]) veröffentlicht. Diese schreibt die Einhaltung festgelegter Grenzwerte der Funkstörpegel **Bild 6** vor.

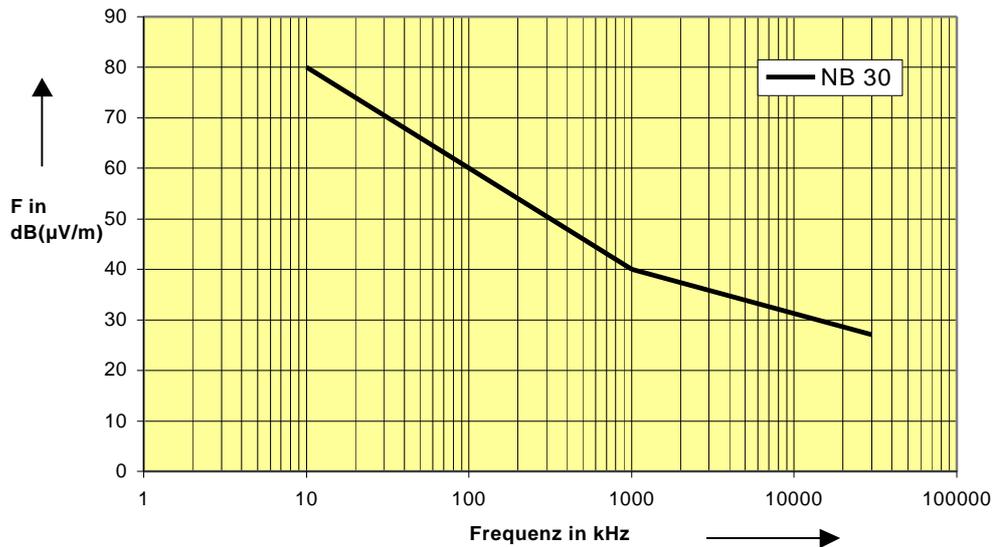


Bild 6 Grenzwerte für Funkstörpegel nach NB 30

Beispielsweise darf bei einer Frequenz der PLC von 20 kHz die Feldstärke von 19 mV/m im Abstand von 3 m von der Leitung und von 0,05 mV/m im Abstand von 30 m nicht überschreiten. Diese Begrenzung bedingt, daß die für die PLC verwendete Spannung auf den Freileitungen der Energieübertragung sehr klein und im Mittel- und Hochspannungsnetz deutlich unter 1 % der Nennspannung des Netzes liegen muß.

Zur Messung von Störfeldern hat die Regulierungsbehörde für Telekommunikation der Post z. Z. einen Entwurf der Meßvorschrift "PDM-Meßvorschrift für Messung von Störfelder an Anlagen und Leitungen der Telekommunikation im Frequenzbereich 9 kHz bis 3 GHz" ausgegeben. Diese Meßvorschrift Reg TP 322 MV 05 liegt im 3. Entwurf von Januar 2000 vor und gilt auch für Energieleitungen und Energieanlagen, wenn diese für die Datenübertragung und Telekommunikation genutzt werden.

Die Anforderung der Meßgeräte und Einrichtungen zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit sind in der EDIN VDE 0876 Teil 16-1: Mai 1998 beschrieben [7].

5.2 Bestimmung des Funkstörpegels F

Zur Bestimmung des Funkstörpegel F wird zunächst aus den gemessenen Komponenten E_X , E_Y , E_Z der elektrischen Feldstärke die Gesamtfeldstärke E_{ges} nach folgender Beziehung errechnet.

$$E_{ges} = \sqrt{E_X^2 + E_Y^2 + E_Z^2} \quad E_X, E_Y, E_Z \text{ und } E_{ges} \text{ in } \mu\text{V/m} \quad (5.1)$$

Hieraus ergibt sich der Funkstörpegel F

$$E_0 = 1 \frac{\text{mV}}{\text{m}} \quad (5.2)$$

$$F = 20 \log \frac{E_{ges}}{E_0} \quad F \text{ in dB}(\mu\text{V/m}) \quad (5.3)$$

Zur Berechnung des um den Grundpegel bereinigten Funkstörpegels eines Störers (hier PLC Gerät) müssen von den gemessenen elektrischen Feldstärken der einzelnen Polarisations-ebenen die jeweiligen Feldstärken subtrahiert werden, die ohne Betrieb des Störers gemessen wurden. Diese Methode ist nur dann anwendbar, wenn die Signalpegel der elektrischen Feldstärken das Eigenrauschen des Meßempfängers deutlich überschreiten und mindestens 2 dB über dem Grundpegel liegen. Bei der Berechnung kommen folgende Formeln zur Anwendung:

$$\Delta E_{X_{PLC}} = E_{X_E} - E_{X_A} \quad (5.4)$$

$$\Delta E_{Y_{PLC}} = E_{Y_E} - E_{Y_A} \quad (5.5)$$

$$\Delta E_{Z_{PLC}} = E_{Z_E} - E_{Z_A} \quad (5.6)$$

$$E_{ges_{PLC}} = \sqrt{\Delta E_{X_{PLC}}^2 + \Delta E_{Y_{PLC}}^2 + \Delta E_{Z_{PLC}}^2} \quad (5.7)$$

Bedeutung der Indizes:

E = Powerline-Geräte eingeschaltet
A = Powerline-Geräte ausgeschaltet.

5.3 Messungen im Frequenzbereich 9 kHz – 150 kHz

5.3.1 Meßgeräte und Verfahren

Die Messungen zur Ermittlung der Funkstörpegel im Frequenzbereich von 9 kHz – 150 kHz wurden mit dem hier als Störspannungsmeßgerät 1 bezeichneten Gerät durchgeführt. Das Gerät mißt den Quasi-Spitzenwert der induzierten Spannung des magnetischen Feldes und zeigt das Ergebnis in dB(μ V) an.

Störspannungsmeßgerät 1:

- Bezeichnung: Störspannungsmessempfänger
- Hersteller: Siemens AG
- Typ: B 83600-A70
- Seriennr.: C06-020
- Meßbereich: 10...150kHz
- Bandbreite: 200 Hz
- Anzeige: dB (0 dB = 1 μ V)
- Antenne: Rahmenantenne (kreisförmig mit d = 60 cm, N = 8 Windungen)
Meßbereich bis 3MHz
2m Koaxialkabel (Wellenwiderstand 150 Ohm)

Zur Ermittlung des Funkstörpegels F wurde das Meßverfahren für magnetische Feldstärken im Frequenzbereich bis 30 MHz nach der Meßvorschrift Reg TP 322 MV 05 angewendet. Als Messbandbreite sind 200 Hz für Band A und 9 kHz für Band B vorgeschrieben.

Zur Ermittlung der elektrischen Störfeldstärke E wird zunächst die magnetische Feldstärke H berechnet und daraus die elektrische Feldstärke E. Es kommen folgende Formeln zur Anwendung.

Berechnung der magnetische Feldstärke H:

$$u_i = 10^{(U_{\text{Stör}}/20)} \cdot mV \quad (5.8)$$

$$u_i = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{mit } \Phi = B \cdot A \quad (5.9)$$

$$u_i = -N \frac{d(B \cdot A)}{dt} \quad \text{mit } B = \hat{B} \cdot \cos \nu t \quad (5.10)$$

$$u_i = -NA \frac{d(\hat{B} \cos \mathbf{v}t)}{dt} \quad (5.11)$$

$$u_i = \hat{B} \bullet N \bullet A \bullet \mathbf{v} \bullet \sin \mathbf{v}t \quad (5.12)$$

$$\hat{U} = \hat{B} \bullet N \bullet A \bullet \mathbf{v} \quad (5.13)$$

$$\hat{H} = \frac{\hat{B}}{\mathbf{m}_0} \quad \text{mit } \mathbf{m}_0 = 1,257 \bullet 10^{-6} \frac{V}{Am} \text{ für Ausbreitung in Luft} \quad (5.14)$$

$$\hat{H} = \frac{\hat{U}}{N \bullet A \bullet \mathbf{v} \bullet \mathbf{m}_0} \quad (5.15)$$

Berechnung der elektrischen Störfeldstärke E.:

$$E = H \bullet Z_0 \quad \text{mit } Z_0 = 377\Omega \text{ für den Freiraumwellenwiderstand} \quad (5.16)$$

Messung und Berechnung müssen für jede Polarisationssebene separat durchgeführt werden. Die Ermittlung der elektrischen Störfeldstärke E_{ges} und des Funkstörpegels F aus den Messungen der jeweiligen Polarisationssebenen erfolgt nach den Gleichungen (5.1) und (5.3). Zur Verifizierung der Meßergebnisse wurde das Meßgerät im Frequenzbereich 40...100 kHz kalibriert.

5.3.2 Kalibrierung der Meßeinrichtungen

Kalibrierung bedeutet in diesem Fall, einen Vergleich zwischen Messung und Berechnung von magnetischen Feldern. Der Vergleich dient zur Verifizierung der durchgeführten Störfeldstärkemessungen im Frequenzbereich von 40...100 kHz. Zu dieser Kalibrierung wurde eine 25 m lange Freileitung aus Kupferdraht (Durchmesser 1,8 mm) mit Hin- und Rückleitung in einem freien Feld aufgebaut. Der senkrechte Abstand zwischen den Leitern betrug 0,45 m und der senkrechte Abstand des untersten Leiters zur Erde 0,55 m. Das Freileitungsende war mit $R = 50 \Omega$ abgeschlossen. Die Eingespeisung des sinusförmigen Wechselstromes in die Freileitung erfolgte mit einem kalibrierten Signalfrequenzgenerator ($Z_e = 50 \Omega$).

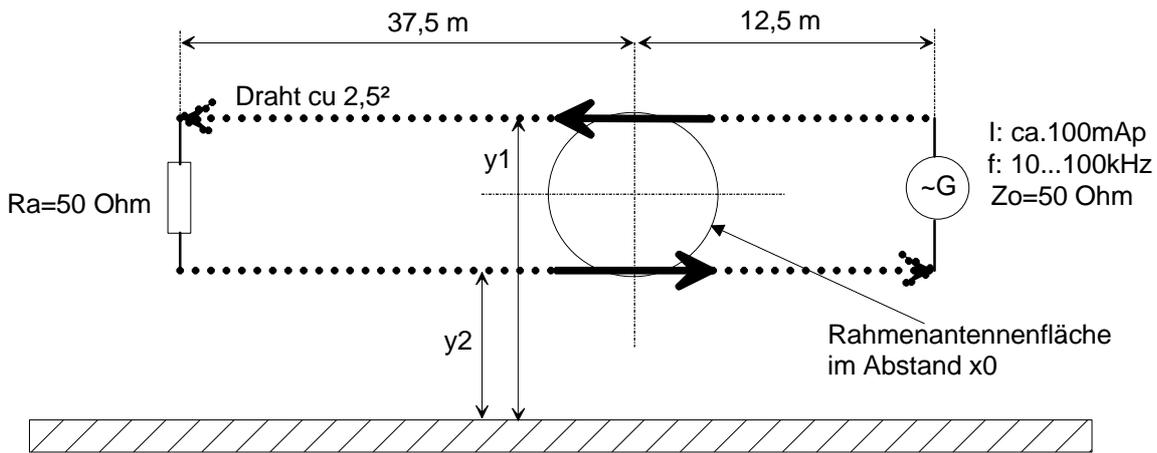


Bild 7 Schaltbild zur Kalibrierung

Berechnet wird die magnetischen Feldstärke (H) für folgende Abstände zur Festlegung der Antennen- und Freileitungsposition: $x_0 = 3 \text{ m}$, $y_1 = 1 \text{ m}$ und $y_2 = 0,55 \text{ m}$. Siehe **Bild 7** und **Bild 8**. Durch die Verwendung einer Rahmenantenne mit kreisförmiger Fläche ist der Antennenbezugspunkt die Antennenmitte.

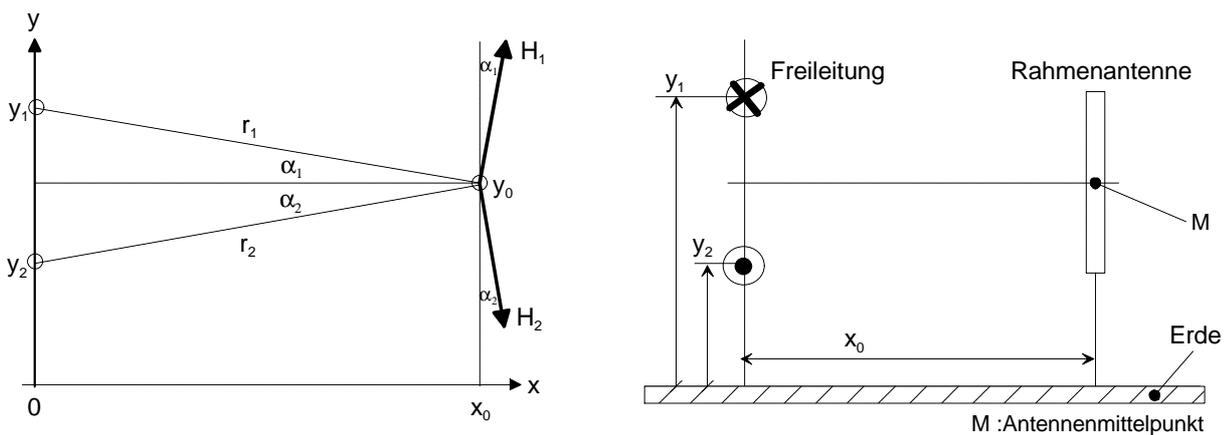


Bild 8 Geometrische Anordnung der Antenne zur Freileitung und die Vektordarstellung der magnetischen Feldstärke

Die Berechnung der magnetischen Feldstärke erfolgt mit Hilfe folgender Formeln:

$$r_1 = \sqrt{x_0^2 + (y_1 - y_0)^2} ; r_2 = \sqrt{x_0^2 + (y_2 - y_0)^2} \quad 5.17$$

$$H_x = H_1 \sin \alpha_1 + H_2 \sin \alpha_2 \quad 5.18$$

$$H_y = H_1 \cos \alpha_1 + H_2 \cos \alpha_2 \quad 5.19$$

$$H_x = \frac{I}{2p} \left(\frac{y_1 - y_0}{x_0^2 + (y_1 - y_0)^2} + \frac{y_0 - y_2}{x_0^2 + (y_2 - y_0)^2} \right) \quad 5.20$$

$$H_y = \frac{I}{2p} \left(\frac{x_0}{x_0^2 + (y_1 - y_0)^2} - \frac{x_0}{x_0^2 + (y_0 - y_2)^2} \right) \quad 5.21$$

Setzt man $H_y = 0$ so erhält man

$$H_x = \frac{I}{2p} \left(\frac{y_1 - y_2}{x_0^2 + \frac{1}{4}(y_1 - y_2)^2} \right) \quad 5.22$$

Da mit dem Störspannungsmeßgerät 1 nur der Quasi-Spitzenwert der induzierten Feldspannung gemessen werden kann, muß anschließend unter Zuhilfenahme der Antennendaten (Windungen und Fläche siehe **Tabelle 1**) die magnetische Feldstärke für die Ausbreitung in Luft berechnet werden (**Gleichung 5.15**). Aus der magnetischen Feldstärke und dem Freiraumwellenwiderstandes Z_0 wird dann die elektrische Feldstärke ermittelt (**Gleichung 5.16**)

Feldkoordinaten		Antennenkenndaten	
x_0 (m)	3	d (m)	0,6
y_1 (m)	1	A (m ²)	0,28274
y_2 (m)	0,55	N (Wdg)	8

Tabelle 1 Feldkoordinaten und Antennenkenndaten

Die Ergebnisse von Messung und Rechnung sind in **Tabelle 2** zusammengefaßt.

Frequenz f (kHz)	Strom \hat{I} (A)	Rechnung			Messung		magnetische Feldstärke H (A/m)
		magnetische Feldstärke H (A/m)	Störspannung		Störspannung		
			U (µV)	U dB(µV)	U dB(µV)	U (µV)	
100	0,109	8,625E-04	1540,9	63,8	61,0	1122,0	6,281E-04
90	0,103	8,151E-04	1310,5	62,3	60,0	1000,0	6,220E-04
80	0,098	7,755E-04	1108,3	60,9	59,5	944,1	6,606E-04
70	0,091	7,201E-04	900,5	59,1	59,0	891,3	7,127E-04
60	0,085	6,726E-04	721,0	57,2	57,5	749,9	6,996E-04
50	0,081	6,410E-04	572,5	55,2	57,0	707,9	7,926E-04
40	0,081	6,410E-04	458,0	53,2	55,0	562,3	7,869E-04

Tabelle 2 Ergebnisse aus Messung und Rechnung

Ein Vergleich der Störspannungen U dB(μ V) aus Rechnung und Messung zeigen eine hinreichende Übereinstimmung. Die maximale Differenz der Werte aus der Rechnung und Messung beträgt +2,8 dB(μ V) bzw -1,8 dB(μ V). Hier liegt man nahe an der Auflösungsgrenze des Meßgerätes die mit ± 2 dB angegeben wird.

5.4 Messungen im Frequenzbereich 3 MHz – 30 MHz

5.4.1 Meßgeräte und Verfahren

Für die Messungen im Frequenzbereich 3 MHz – 30 MHz wurde der hier als Störspannungsmeßgerät 2 bezeichnete Störspannungsmessempfänger in Verbindung mit einem digitalen Speicheroszilloskop verwendet.

Störspannungsmeßgerät 2:

- Bezeichnung: Störspannungsmessempfänger
- Hersteller: Siemens AG
- Typ: B83600-B80
- Seriennr.: 188
- Meßbereich: 0,135...30MHz
- Bandbreite: 9 kHz
- Antenne: Rahmenantenne (kreisförmig mit $d = 60$ cm, $N = 1$ Windung
Meßbereich 3 ... 30 MHz
Anpassungsgerät für 30 MHz-Antenne
5m Koaxialkabel (Wellenwiderstand 60 Ohm)

Digital-Speicheroszilloskop:

- Hersteller: Tektronix
- Typ: 2440
- Seriennr.: H700257

Am ZF-Ausgang wird aus dem Quasi-Spitzenwert der induzierten Spannung des magnetischen Feldes, direkt der elektrischer Feldstärkenpegel \hat{E} mit dem Oszilloskop in (mV) gemessen. Die Pegel der elektrischen Feldstärken müssen unter zur Hilfenahme der in **Bild 9** dargestellten Kalibrierkurve für den ZF-Ausgang umgerechnet werden. Hierzu wird die Geradengleichung (5.24) der Ausgleichsgeraden verwendet. Die umgerechneten Werte sind in dB(μ V/m) kalibriert.

$$\hat{U} = 20 \frac{mV}{dB} \cdot A_{ZF} + 115mV \quad A_{ZF} = \text{ZF-Ausgang in dB} \quad (5.23)$$

$$A_{ZF} = \frac{\hat{U} - 115mV}{20mV/dB} \quad (5.24)$$

Der elektrische Feldstärkepegel E_{dB} in $db(\mu V/m)$

$$E_{dB} = AN + HF + A_{ZF} \quad (5.25)$$

mit:

- AN = Antennenfaktor in dB
- HF = Eingangsdämpfung des Empfängers in dB
- A_{ZF} = geicher Zwischenfrequenzgang in dB
- Die elektrische Feldstärke $E_{\mu V/m}$ in $\mu V/m$

$$E_{\mu V/m} = 10^{E_{dB}/20} \quad (5.26)$$

Messung und Berechnung müssen für jede Polarisationssebene separat durchgeführt werden. Die Ermittlung des elektrischen Störfeldstärke E_{ges} und des Funkstörpegels F aus den Messungen der jeweiligen Polarisationssebenen erfolgt nach Gleichung (5.1 und 5.3)

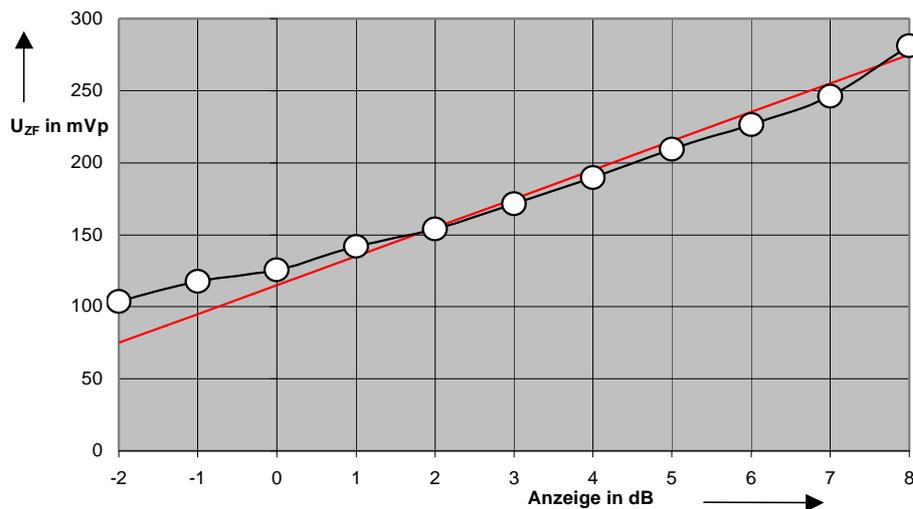


Bild 9 Kalibrierkurve für den ZF-Ausgang des Störspannungsmessempfängers

5.5 Spannungsmessungen

5.5.1 Aufzeichnung und Auswertung

Zur Messung, Aufzeichnung und Auswertung von Spannungen wurde der digitale Scope-Corder[®] DL 708E der Firma YOKOGAWA beschafft. Dieser ist bestückt mit 6 isolierten 12 Bit Modulen mit folgenden Eigenschaften:

- Abtastrate max: 10 Ms/s
- Frequenzgang: DC bis MHz
- vertikale Empfindlichkeit: 5mV/div bis 20V/div
- 50mV/div bis 200V/div (bei Verwendung eines 10:1 Tastkopfes)

Aufzeichnungslänge: 1M Worte.

Aufzeichnungen können auf der internen Festplatte gespeichert werden. Der DL 708E bietet zahlreiche Funktionen zur Analyse der aufgenommenen Kurven.

5.5.2 Meßfilter für die Netzspannung

Da die zu messenden Nutzsignale der PLC-Geräte sehr klein sind im Verhältnis zur Netzspannung, ist die Auflösung der Eingangsmodule des DL 708 nicht ausreichend für eine Analyse dieser Signale. Deshalb wurde für diese Messungen ein Hochpaßfilter verwendet, dessen Übertragungsfunktion in **Bild 10** dargestellt ist.

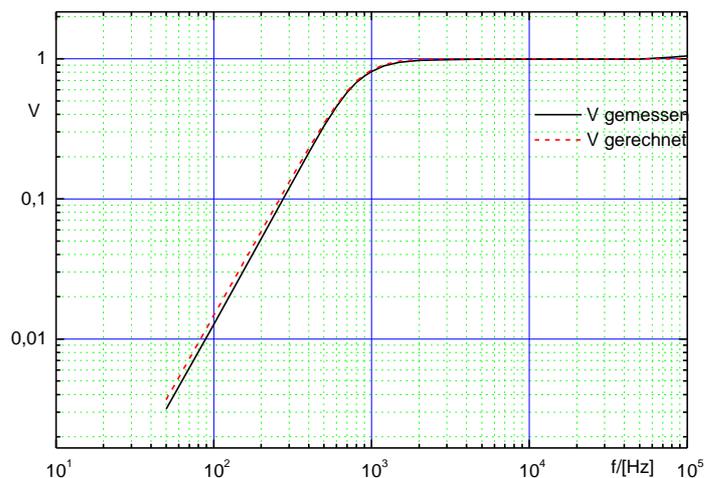


Bild 10 Übertragungsfunktion des Hochpasses zu PLC Spannungsmessung

6 Messung in der Anlage MA-Luzenberg

Die Pilotanlage ist mit Prototypen (DartNet®) der ABB Utility Automation GmbH aufgebaut, die an das Niederspannungsnetz der MVV Energie AG angeschlossen sind. Als Netz ist ein Teilnetz der Stadt Mannheim, Stadtteil Luzenberg, ausgewählt. Die Struktur des ausgewählten Netzes entspricht der Versorgung eines Mischgebiets aus Gewerbe- und Wohngebiet und wird aus dem 20-kV-Netz der MVV Energie AG versorgt. Die Auswahl des Netzes sichert zu, daß die im Normalbetrieb ohne zusätzliche IGBT-Umrichter auftretenden Störungen der Datenübertragung durch Haushaltsgeräte und Einrichtungen des Gewerbes erfaßt werden. Aus dem **Bild 11** werden die Einbauorte der PLC-Geräte als auch die Meßorte für die Messung der Funkstörpegel ersichtlich .

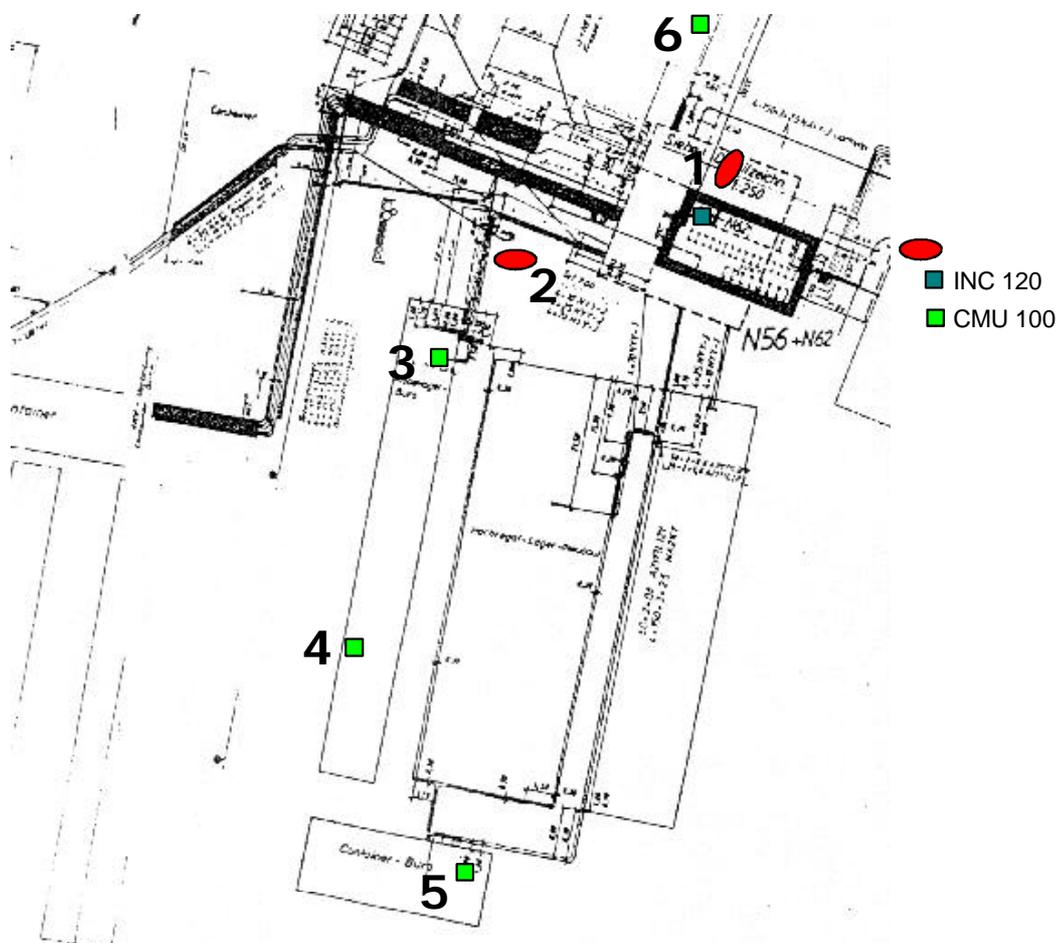


Bild 11 Lageplan der Pilotanlage MA-Luzenberg

Dies sind im einzelnen:

- | | |
|---------------------|---------------------------------------|
| 1. Netzstation N62 | Knotencontroller INC 120 und Meßpunkt |
| 2. Kabeltrasse | Meßpunkt |
| 3. Kabellagerkeller | Teilnehmer CMU 100 |
| 4. Kabellager | Teilnehmer CMU 100 |
| 5. Containerbüro | Teilnehmer CMU 100 |
| 6. Straßenverteiler | Teilnehmer CMU 100 |

Für die Untersuchung wird eine Kommunikationskonfiguration eingesetzt, die es erlaubt, die Übertragungsqualität an verschiedenen Punkten des Niederspannungsnetzes zu überwachen. Hierzu wird an der Transformatorstation (N62) ein Knotencontroller INC120 installiert, der über das integrierte Niederspannungsmodem DLL100 mit den 4 im Netz eingebauten Teilnehmern vom Typ CMU100 zyklisch per Polling kommuniziert.

Hierzu werden die Teilnehmer vom INC120 per Statusabfrage aufgerufen und senden ihren Status zurück. Für jeden Teilnehmer wird dabei statistisch mitgezählt, wie oft er aufgerufen wurde und wie oft er geantwortet hat. Diese Zählerstände werden von einem zusätzlich angeschlossenen PC ausgelesen. Somit können gezielt statistische Erkenntnisse über die Zuverlässigkeit der Kommunikation resp. Störeinflüsse anderer Betriebsmittel gewonnen werden.

6.1 PLC Geräte im Alleinbetrieb

Orientierende Spannungsmessungen an den Anschlußpunkten der PLC-Geräte des Dartnet[®] Systems führten zu der Erkenntnis, daß eine detaillierte Auswertung der Meßergebnisse nur für eine CMU 100 und den Knotencontroller INC 120 durchgeführt werden muß. Dieser ist direkt an der 400 V Sammelschiene der Station N 62 angeschlossen. Die Einspeisung von N 62 erfolgt vom 20 kV Netz über einen 620 kVA Transformator ($u_k = 4\%$). Weitere Informationen über die Impedanz des Netzes am Anschlußpunkt sind nicht verfügbar. Die Messungen an einer CMU 100 wurden im Kabellager, (Siehe **Bild 11**) durchgeführt.. Auch für diesen Anschlußpunkt liegen Informationen über die Netzimpedanz nicht vor.

Zunächst wurde das Verhalten der PLC-Geräte im Alleinbetrieb untersucht, d.h. der IGBT-Umrichter ist ausgeschaltet. **Bild 12** zeigt das Sendesignal des Knotencontrollers und das empfangene Signal einere CMU 100, gemessen in N 62, unter Verwendung des in Kapitel 5.5.2 beschriebenen Hochpaßfilters (Man erkennt die unvollständige Unterdrückung des netzfrequenten Anteils der Sammelschienenenspannung.)

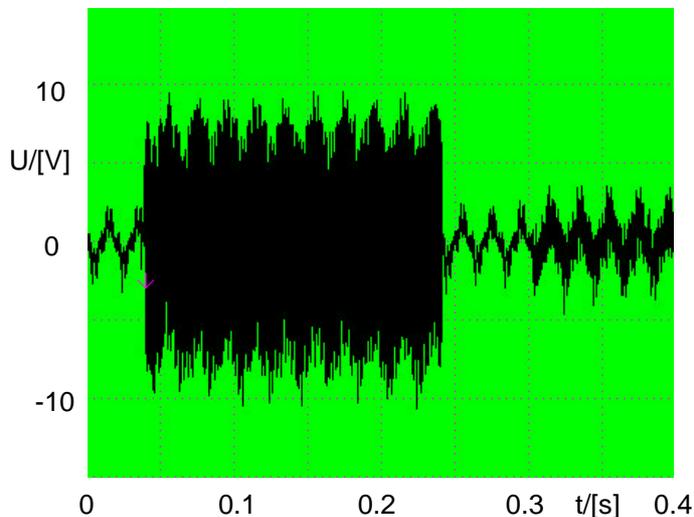


Bild 12 PLC Sende- und Empfangssignal in N 62

Man erkennt im Bereich von ca. 0,05 bis 0,25 s ein Sendetelegramm und im Bereich von ca. 0,3 bis 0,4 s das Antworttelegramm einer CMU 100. Nähere Erkenntnisse liefert die Fourieranalyse des Zeitsignals, deren Ergebnis in **Bild 13** und **Bild 14** dargestellt ist.

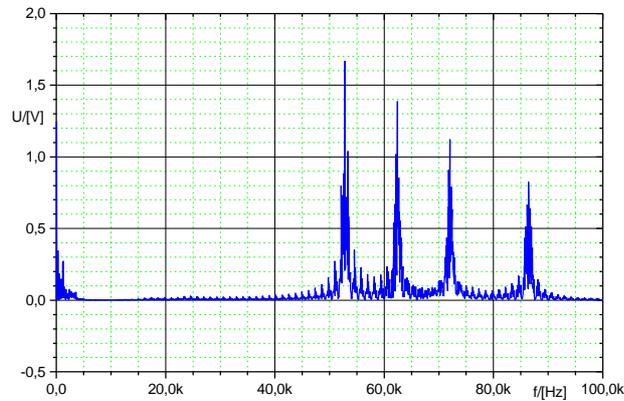


Bild 13 **Fourieranalyse des gesendeten Signals**

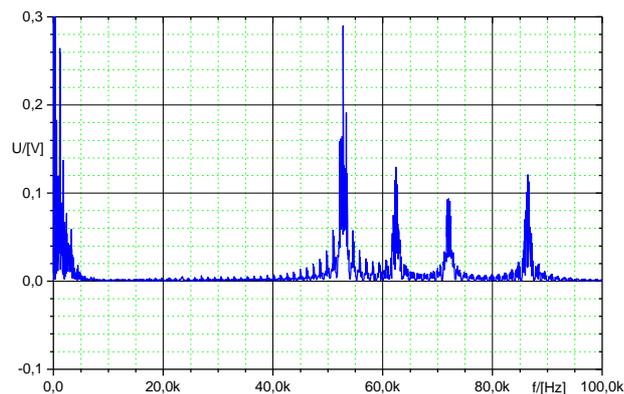


Bild 14 **Fourieranalyse des empfangenen Signals**

Man erkennt deutlich die Anteile bei den für die Kommunikation genutzten Frequenzen. Es ist anzumerken daß die solchermaßen bestimmten Signalamplituden nicht deren wirklicher Größe entsprechen. Die Ursache hierfür ist in einer Eigenschaft der zur Fourieranalyse verwendeten Methode, der FFT, begründet. Man erhält nur dann die korrekte Amplitude eines Signalanteils mit einer bestimmten Frequenz, wenn diese Frequenz über die gesamte Länge des gewählten Zeitfensters T enthalten ist. Ist diese Frequenz nur während der Zeit T_1 enthalten, so liefert die FFT das Ergebnis $A \cdot T_1 / T$, wobei A der wirklichen Amplitude entspricht. Die Norm EN 50065 schreibt für die Messung breitbandiger Signale mit Frequenzen > 5 kHz eine Bandbreite von 200 Hz vor. Aus dieser Vorgabe resultiert ein Zeitfenster von 5 ms. Die Übertragungsgeschwindigkeit der PLC- Geräte beträgt 1200 bps bzw 2400 chips/s. Hieraus ergibt sich eine Chip Dauer von 0,416 ms. In 5 ms werden also 12 chips gesendet. Bei vier genutzten Frequenzen ergibt sich die Verweildauer für eine Frequenz folglich zu 5/4 ms. Die FFT liefert daher nur 1/4 der wirklichen Signalamplituden. Dieser Tatbestand wird von den DartNet[®] Geräten ausgenutzt, größtmögliche Sendesignale verwenden zu können. **Bild 15**

zeigt den Vergleich der Sendepiegel mit den Grenzwerten nach EN 50065 in logarithmischer Darstellung und verdeutlicht auch, daß die Sendepiegel die vorgeschriebenen Grenzwerte nicht überschreiten.

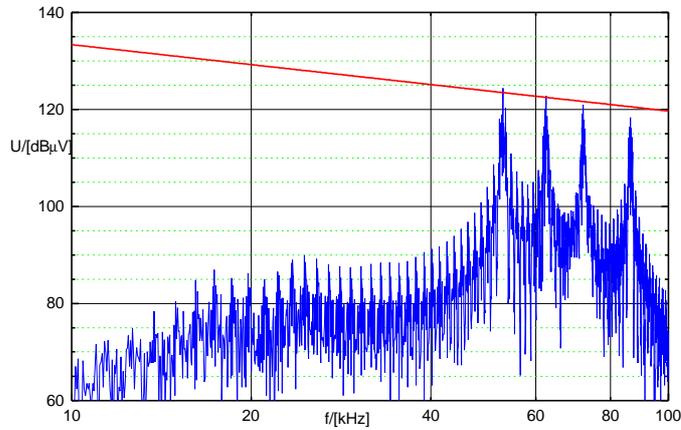


Bild 15 Sendepiegel und Grenzwertkurve nach EN 50065

Zur Ermittlung der wirklichen Amplituden des gesendeten PLC Signals wurde außerdem eine FFT mit einem Zeitfenster $T < 0,415$ ms jeweils für eine Frequenz durchgeführt. Das Ergebnis ist in **Bild 16** dargestellt.

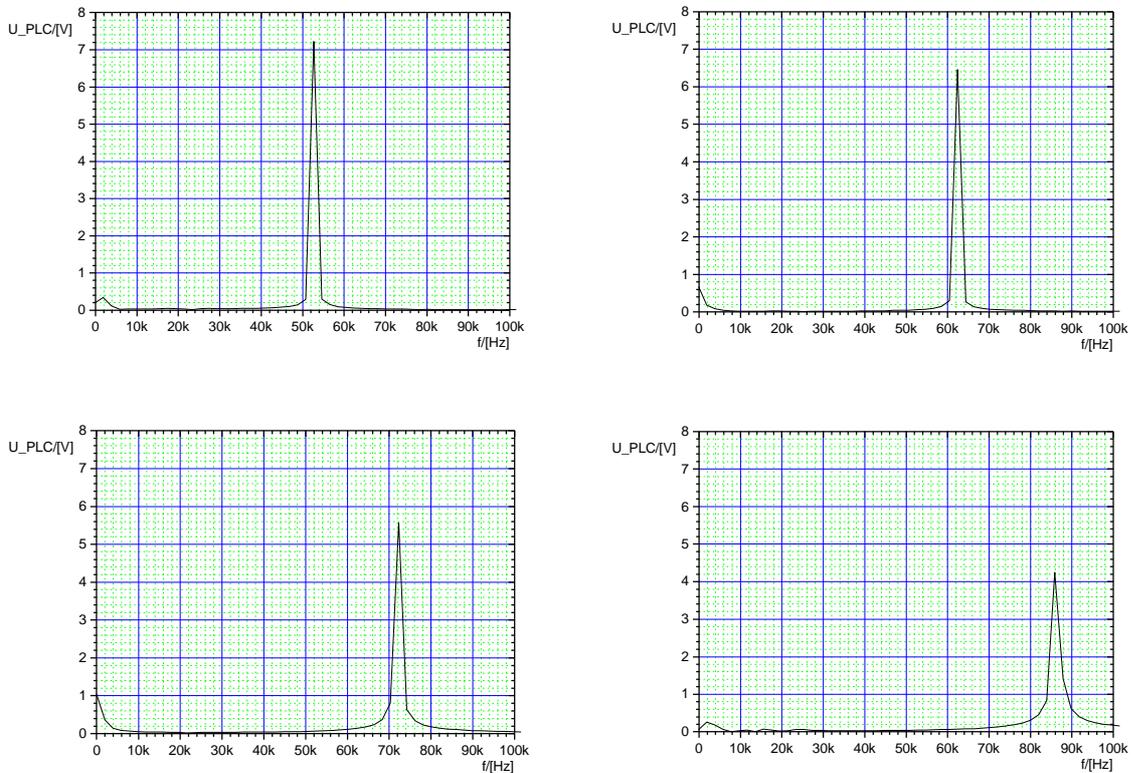


Bild 16 Wirkliche Amplituden des gesendeten PLC Signals

Des weiteren wurden Spannung und eingespeister Strom einer CMU 100 im Kabellager gemessen. **Bild 17** zeigt das Ergebnis der Fourieranalyse. Auch hier ist anzumerken, daß aufgrund der vorgegebenen Bandbreite von 200 Hz die wirklichen Amplituden vier mal so groß sind.

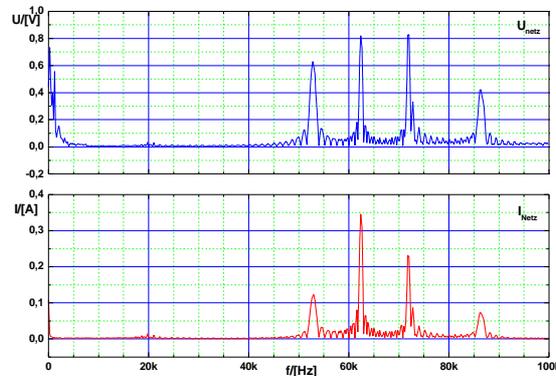


Bild 17 Spektrum der Signalspannung und des eingespeisten Stromes einer CMU 100

6.2 Parallelbetrieb von PLC und Umrichter

Die Untersuchung des gleichzeitigen Betriebs von Umrichter und PLC Kommunikation an einem Netzknoten hoher Kurzschlußleistung wie in N 62 wurde von vorne herein als nicht ergiebig eingeschätzt. Daher wurden die Versuche im Kabellager zusammen mit einer CMU 100 durchgeführt. Um einen Überblick zu gewinnen, welche „Verunreinigung“ der Netzspannung durch Umrichter-Betrieb und PLC Kommunikation verursacht wird, wurden die (gefilterte) Spannung am Anschlußpunkt und der Umrichterstrom im Parallelbetrieb aufgezeichnet und einer Fourieranalyse unterworfen. **Bild 18** zeigt den zeitlichen Verlauf und **Bild 19** das Ergebnis der FFT.

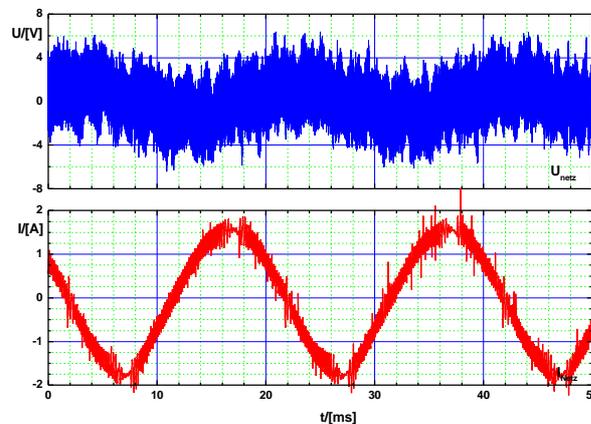


Bild 18 Zeitlicher Verlauf der gefilterten Spannung und des Umrichterstromes

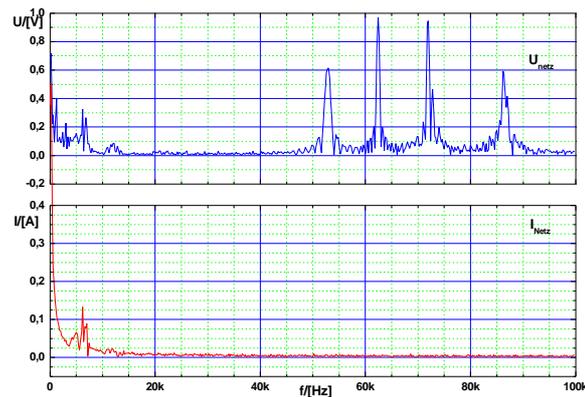


Bild 19 Spektrum der Anschlußspannung und des Umrichterstromes

In **Bild 19** sind deutlich zu erkennen das Sendesignal der CMU 100 und die Störsignale des Umrichters. In dieser Auflösung ist nicht zuerkennen ob der Umrichter Frequenzen im Bereich 50-90kHz erzeugt und damit in der Lage ist empfangene Telegramme zu stören.

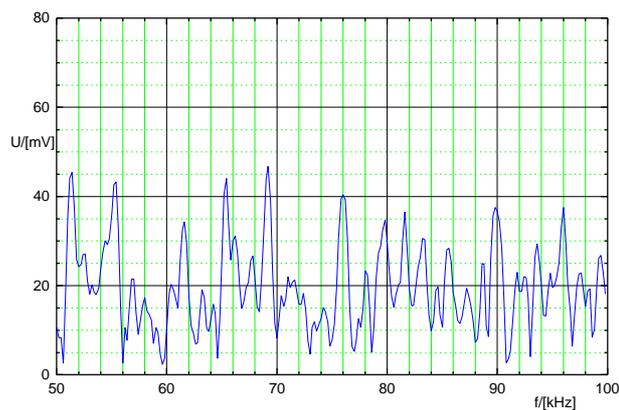


Bild 20 Spektrum der Netzspannung in starker Vergrößerung

Die Ausschnittvergrößerung des Spektrums **Bild 20** zeigt jedoch durchaus Störsignale in diesem Bereich. Mit etwas Phantasie ist auch ein PLC Signal zu erkennen bei 52kHz und 62kHz.

Zur Beurteilung der Übertragungsqualität der PLC Kommunikation wurde, wie oben beschrieben, für den Parallelbetrieb mit Umrichter die Anzahl der als fehlerhaft erkannten Telegramme ermittelt und daraus mit Hilfe der Gesamtheit aller gesendeten Telegramme die Fehlerrate bestimmt. Auch dieses Ergebnis zeigt, daß die Kommunikation durch den Umrichterbetrieb praktisch nicht gestört werden konnte. Zweimal wurden im Beobachtungszeitraum 100 Telegramme gesendet und einmal ein einziges empfangenes Telegramm als fehlerhaft erkannt. Dies entspricht einer Fehlerrate von 1/200. Aufgrund dieses Ergebnisses wurden keine weiteren Erhebungen durchgeführt.

Die hier vorgestellten Ergebnisse dürfen keinesfalls verallgemeinert werden, da sie nur mit dieser Konfiguration erzielt wurden. Man sollte also nicht zu dem Schluß kommen, daß PLC Kommunikation durch den Betrieb von Umrichtern keineswegs gestört werden kann.

6.3 Messungen von Störaussendungen

Aufgrund der gegebenen räumlichen Verhältnisse konnten die Störfeldmessungen nicht in der Nähe aller installierten PLC-Geräte durchgeführt werden. Für die Ermittlung der Funkstörpegel wurden daher zwei Meßorte ausgewählt. Dies sind die Netzstation N 62 (Meßpunkt 1) und eine Kabeltrasse (Meßpunkt 2). Weiterhin wurde, um die Auswirkung unterschiedlicher Ankopplung der PLC-Geräte an das Niederspannungsnetz zu erkunden, das Nutzsinal zum einen zwischen Leiter-Erde (L/E)- und zum anderen zwischen Leiter-Leiter (L/L)-eingekoppelt. Die Messungen wurden mit dem Störspannungsmeßgerät 1 durchgeführt.

Um zu einer Aussage zu gelangen welcher Funkstörpegel allein durch den Betrieb von PLC-Geräten verursacht wird, wurde an jedem Meßort der Störpegel ohne und mit PLC Betrieb (Grundpegel, Gesamtpegel) ermittelt. Für die Aufnahme der Grundpegel konnten leider keine optimalen Bedingungen geschaffen werden, da es aus betrieblichen Gründen nicht möglich war, das im Containerbüro installierte CMU 100 abzuschalten oder von der elektrischen Versorgung zu trennen. Die Meßergebnisse sind in **Bild 21** und **Bild 22** graphisch dargestellt

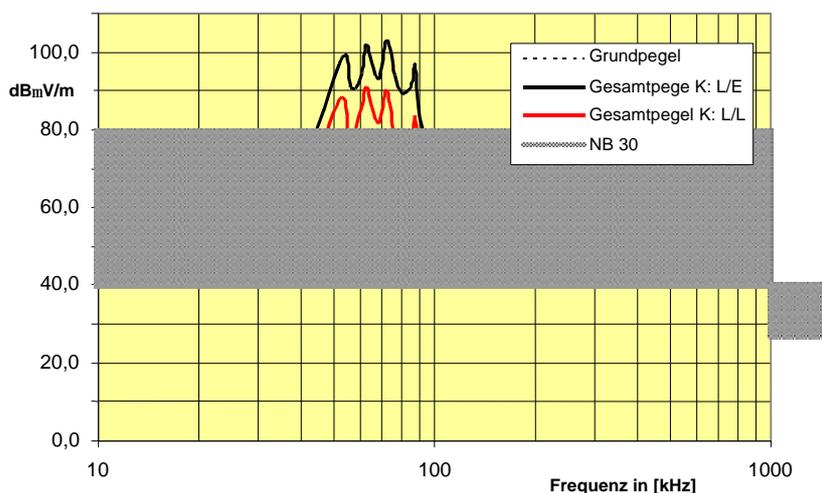


Bild 21 Funkstörpegel bei N62 Meßpunkt 1
PLC-Ankopplung Leiter/Erde (L/E) und Leiter/Leiter (L/L)

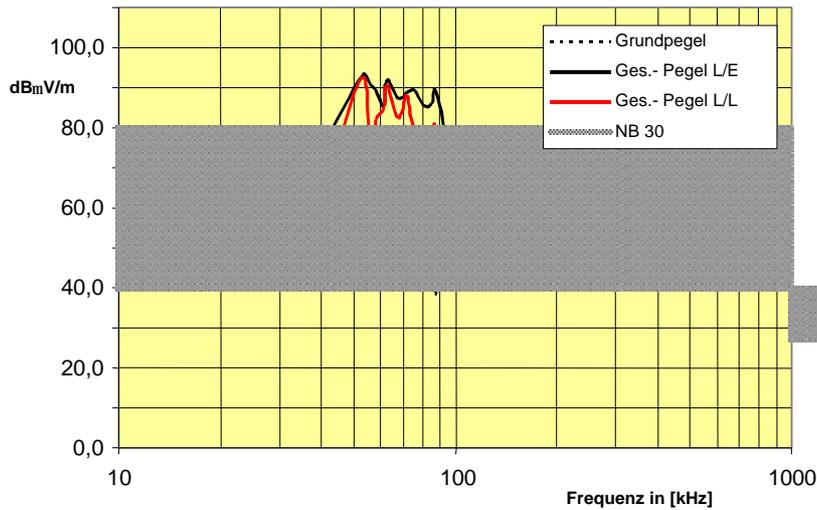


Bild 22 Funkstörpegel bei Kabeltrasse Meßpunkt 2
PLC-Ankoppung Leiter/Erde (L/E) und Leiter/Leiter (L/L)

In **Bild 23** ist detaillierter Plan der Netzstation N62 dargestellt. Der Meßpunkt ist durch die rote Ellipse dargestellt. Es ist zu erkennen, daß die Antenne genau über den Kabeln positioniert war. An der Netzstation war es aus baulich gegebenen Gründen nicht möglich 3 m Abstand von der Station einzuhalten, ohne in der Nähe oder über den Kabeln zu messen.

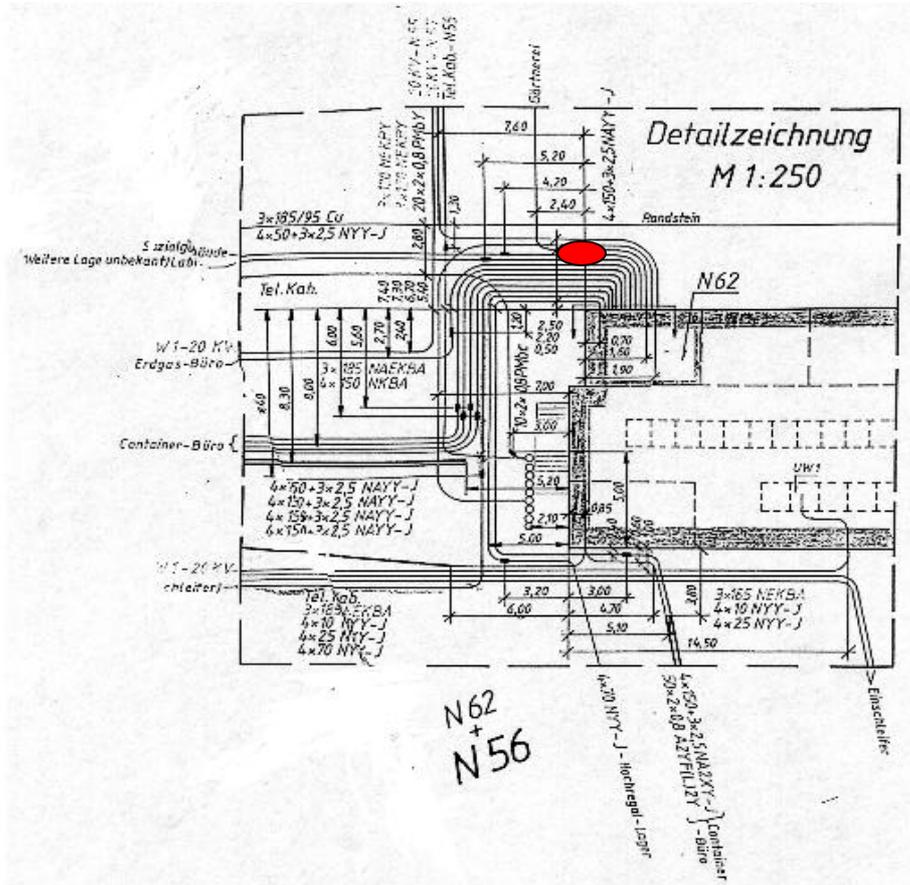


Bild 23 Detailplan der Netzstation N62

In der BRD führt bei dem Betreiben einer TK-Anlage momentan kein Weg an der NB 30 vorbei. Im Hinblick auf den zukünftigen Einsatz der DartNet®-Geräte sollten die Meßergebnisse kritisch überprüft werden. Die abgestrahlte Störfeldstärke steht in einem kausalen Zusammenhang mit dem sich einstellenden Strom. Der Strom ist abhängig von der Netzimpedanz und der Signalspannung. Unter der Annahme, daß die Netzimpedanz für den Betrachtungszeitraum konstant ist gilt $E \sim U$.

Basierend auf den in Kapitel 6.1 ermittelten Einspeisespannungen läßt sich mit der oben angegebenen Proportionalität die notwendige Einspeisesignalspannung, die zur Einhaltung der NB 30 erforderlich ist, bestimmen. Die Ergebnisse für die vier genutzten Frequenzen sind in der **Tabelle 3** dargestellt.

Signal- frequenz f [kHz]	max. Signal- spannung \hat{U}_{ist} [V]	NB 30 Störfeldstärke		gemessene Störfeldstärke E_M [μ V/m]	Faktor k	Signal- spannung \hat{U}_{soll} [V]
		Pegel F [dB(μ V/m)]	E_{NB30} [μ V/m]			
53	7,2	98,4	1887	46125	24,4	0,295
63	6,5	101,8	1587	38925	24,5	0,265
72	5,6	103,1	1389	26976	19,4	0,288
87	4,3	96,6	1149	31175	27,1	0,159

Tabelle 3 Erforderliche Signalspannungen \hat{U}_{soll} zur Einhaltung der NB 30

Die Berechnung der erforderlichen Signalspannung wurde mit folgenden Formeln durchgeführt

$$E_{NB30} = 10^{F/20} \cdot mV / m \quad (6.1)$$

$$k = \frac{E_M}{E_{NB30}} \quad (6.2)$$

$$\hat{U}_{soll} = \frac{\hat{U}_{ist}}{k} \quad (6.3)$$

ABB muß sich der Herausforderung stellen, die DartNet®-Komponenten NB 30 konform umzurüsten. Wenn die Geräte auf die oben bestimmten Signalspannungen eingestellt würden, ist keine Datenübertragung über das Energienetz mehr möglich. Aber das Problem ist an einem ganz anderen Punkt anzusiedeln: Der NB 30 Grenzkurve. Wenn man die Meßergebnisse für den Grundpegel sowohl am Kabel, als auch an der Station im Versuchnetz Luzenberg betrachtet, fällt auf, daß selbst dieser über der NB 30 liegt. Dies läßt den Rückschluß zu, daß die Grenzkurve ein Betreiben von Powerline in dem Frequenzbereich zwischen 9 kHz und 150 kHz auf Niederspannungsebene im Versuchsnetz nahezu unmöglich macht [5].

Mit dem IGBT-Umrichter wurde das Niederspannungsnetz während des Betriebes mit Dart-Net-Powerline-Geräten am lokalen CMU im Kabellager gestört, indem der Umrichterstrom als kapazitiver Strom eingekoppelt wurde. Der eingekoppelte Strom wurde in 2 Stufen variiert. Stufe 1 mit $I(>) = 1,7 \text{ A}$ und $I(<) = 1 \text{ A}$. Zur Messung dieser zusätzlichen Störaussendung im Niederspannungsnetz wurde die Kabeltrasse als Meßort für die Störabstrahlung ausgewählt. An der Kabeltrasse konnten deutlich im Frequenzbereich 10....29 kHz Störfeldstärken gemessen werden. In **Bild 24** sind die gemessenen Funkstörpegel angegeben.

Frequenz f [kHz]	Antennen- ebene	Spannung Uz [µV]	Störfeld el. Feldstärke Ez [µV/m]	Pegel F [dB(µV/m)]
IGBT-Umrichter "Aus"				
10	Y	1,122	2367,8	67,5
17	Y	1,122	1392,8	62,9
29	Y	1,122	816,5	58,2
IGBT-Umrichter "Ein" I(>)				
10	Y	7,079	14939,8	83,5
17	Y	2,512	3118,1	69,9
29	Y	1,778	1294,0	62,2
IGBT-Umrichter "Ein" I(<)				
10	Y	3,162	6673,3	76,5
17	Y	1,778	2207,5	66,9
29	Y	1,413	1027,9	60,2

Tabelle 4 Meßwerte

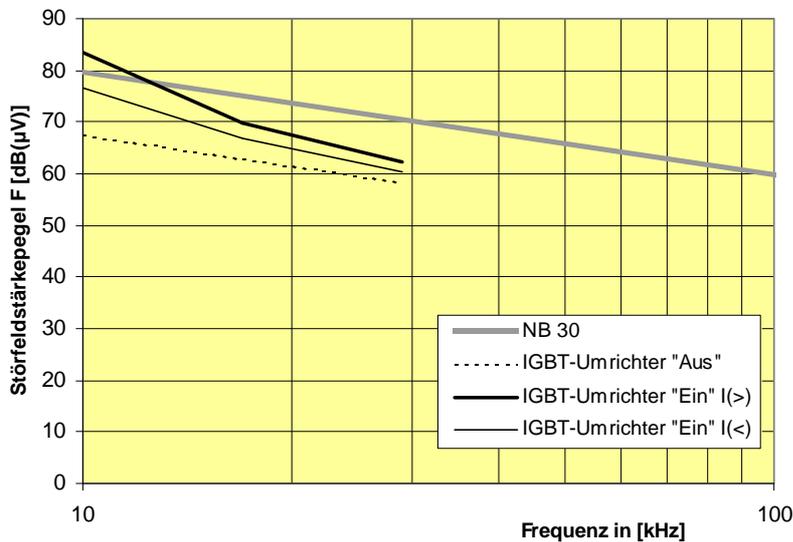


Bild 24 Funkstörpegel bei IGBT Umrichter Betrieb

Aus den Meßwerten der Störfeldmessungen läßt sich die magnetische Feldstärke für die jeweilige Meßfrequenz nach Gleichung (5.4) berechnen. Nach Gleichung (5.6) ist es möglich den frequenzanteiligen Strom und die daraus resultierende magnetische Feldstärke mit den geometrischen Abmessungen zu berechnen. Alle Störfeldmessungen an Kabeln wurden in

einem Abstand von $x_0 = 3$ m gemessen. Verwendet man einen Leiterabstand von $d = 2,5$ cm, so vereinfacht sich die Gleichung (7). Durch Umformung der Gleichung (5.6) für Leiterabstand $d = (y_1 - y_2)$ und $d \ll x_0$ erhält man folgende Näherungsgleichung.

$$H = \frac{I}{2p} \left(\frac{d}{x_0^2} \right) \tag{6.4}$$

$$I = 2p \cdot H \left(\frac{x_0^2}{d} \right) \tag{6.5}$$

Frequenz f [kHz]	Spannung Uz [µV]	Störfeld		Strom Ip [A]
		el. Feldstärke Ez [µV/m]	magn. Feldstärke H [A/m]	
IGBT-Umrichter "Aus"				
10	1,122	2367,8	6,281E-06	0,0142
17	1,122	1392,8	3,694E-06	0,0084
29	1,122	816,5	2,166E-06	0,0049
IGBT-Umrichter "Ein" I(>)				
10	7,079	14939,8	3,963E-05	0,0896
17	2,512	3118,1	8,271E-06	0,0187
29	1,778	1294,0	3,432E-06	0,0078
IGBT-Umrichter "Ein" I(<)				
10	3,162	6673,3	1,770E-05	0,0400
17	1,778	2207,5	5,855E-06	0,0132
29	1,413	1027,9	2,726E-06	0,0062

Tabelle 5 Meßergebnisse und berechneter Strom

7 Messungen in der Anlage MA-Niederfeld

7.1 Pilotanlage MA-Niederfeld

Der Stadtteil Niederfeld wurde für den großen Feldversuch ausgewählt, da es dort optimale Voraussetzungen für die Implementierung der Powerline-Technik gibt. Mannheim-Niederfeld ist ein Stadtteil, der sowohl Mietkomplexe, als auch Reihenhaussiedlungen und alleinstehende Einfamilienhäuser bietet. Diese Konstellation ist vor allem für den Gewinn reichhaltiger Erfahrungen für folgende Powerline-Gebiete von großer Bedeutung.

In der Pilotanlage Niederfeld waren Zurzeit der Messung vier Testgeräte installiert und ein Kunde angeschlossen. Dies sind:

- Mastermodem in der Netzstation F129 und Meßpunkt
- Meßpunkt Kabeltrasse
- Modem im Straßenverteiler F0404 und Meßpunkt
- Meßpunkt Zuleitungskabel zum Hausverteiler
- Modem im Hausverteiler Wolframstr.
- Modem beim Kunden in der Wolframstr.

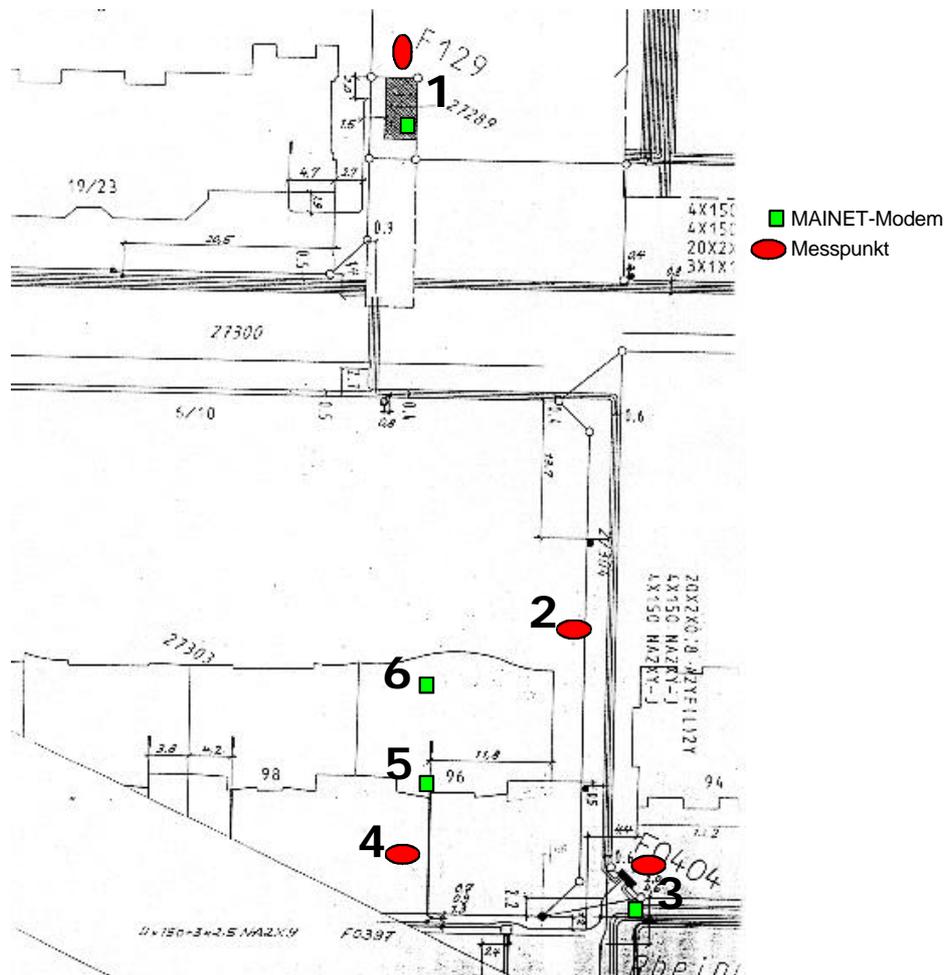


Bild 25 Lage- und Kabelplan Mannheim-Niederfeld, Wolframstrasse

7.2 Messung von Störaussendungen in Niederfeld

Im Rahmen des Powerline-Pilotprojektes wurden mit MAINET-Geräten Messungen in Mannheim-Luzenberg (orientierend) und Mannheim Niederfeld **Bild 25** durchgeführt. Die Standorte

der PLC Geräte und die Meßorte sind in den Kabelplänen für MA-Luzenberg **Bild 11** bzw. MA-Niederfeld **Bild 25** gekennzeichnet.

Für orientierende Messungen in Mannheim Luzenberg wurden Netzstation und Kabeltrasse ausgewählt. Die Ankopplung an das Niederspannungsnetz erfolgte zwischen Leiter und Erde. Die hierbei eingesetzten Geräte waren:

- Master-Modem in der Netzstation N62
- 1 Modem in Netzverteilung im Kabellagerkeller

PL-Telekommunikation:			PLC - Modem von MAINET		
Messung Nr.	Meßort	Störpegel	Einschaltzustand	Netzankopplung an Leiter	eingesetzte Einheiten
8	Netzstation N62	Grund	aus	Leiter-Erde	1 Master-Modem, 1 Modem
9		Gesamt	ein		
	Kabeltrasse (4 Kabel)				
11		Gesamt	ein		

Tabelle 6 Übersicht über der orientierenden Messungen in MA-Luzenberg
 *) aus zeitlichen Gründen konnte der Grundpegel an der Kabeltrasse nicht gemessen werden.

Die Ergebnisse der orientierenden Messungen in MA-Luzenberg sind in Bild 26 und Bild 27 graphisch dargestellt.

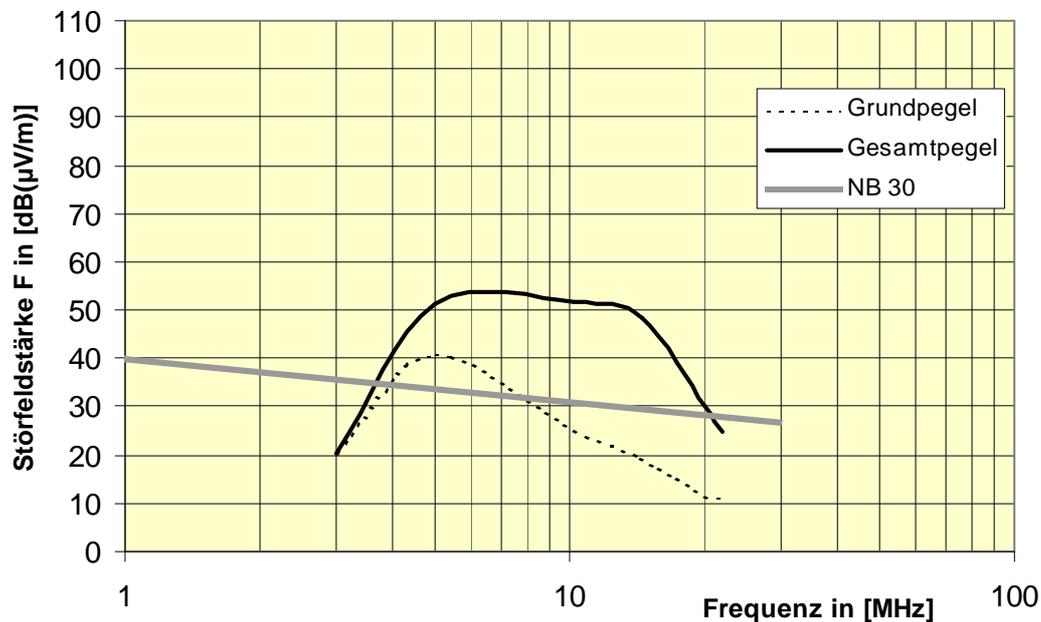


Bild 26 Funkstörpegel in MA-Luzenberg in der Netzstation N62

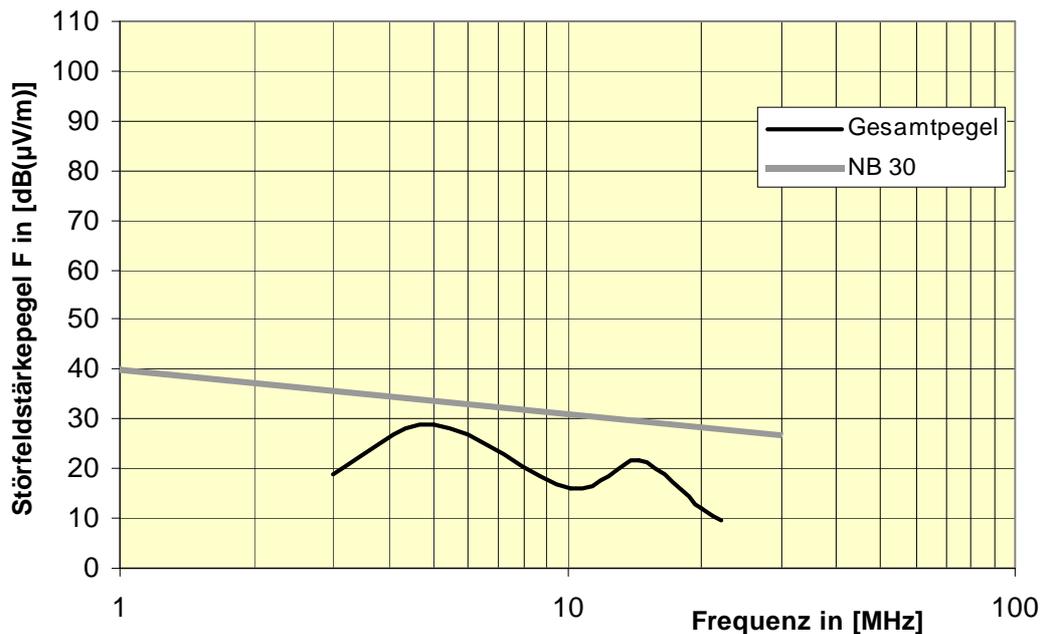


Bild 27 Funkstörpegel in MA-Luzenberg in der Nähe einer Kabeltrasse

Die Messung an der Netzstation N62 ergab, ebenfalls wie bei den DartNet-Geräten, ein deutliches Überschreiten der Grenzwerte nach NB 30. Diese hohen Meßwerte an der Netzstation sind auf diesen Meßort zurückzuführen. Die Antenne war genau über Kabel positioniert die alle Powerline-Signale führten.

An der Kabeltrasse war es aus zeitlichen Gründen nicht möglich, den Grundpegel mit ausgeschalteten MAINET-Geräten zu messen. Aufgrund der deutlichen Unterschreitung der Grenzkurve NB 30 und in Anbetracht der weiteren durchgeführten Messungen im Niederfeld, konnte auf diese Messung verzichtet werden.

Für die Ermittlung der Störfelder in MA-Niederfeld wurden als Meßorte eine Netzstation, Kabeltrasse, Straßenverteiler und eine Zuleitung zum Hausanschluß ausgewählt. Die Powerline-Modems wurden bei sämtlichen Messungen mit dem größtmöglichen Pegel betrieben. Es waren folgende Geräte eingesetzt:

- Master-Modem in der Netzstation F129
- 1 Modem im Straßenverteiler F0404
- 1 Modem am Hausanschluß Wolframstr.
- 1 Modem Kunde Wolframstr.

PL-Telekommunikation:			PLC - Modem von MAINET		
Messung Nr.	Meßort	Störpegel	Einschaltzustand	Netzankopplung an Leiter	eingesetzte Einheiten
12	Netzstation F129	Grund	aus	Leiter-Erde	1 Master-Modem, 3 Modems
13		Gesamt	ein		
14	Kabeltrasse (2 Kabel)	Grund	aus		
15		Gesamt	ein		
16	Straßenverteiler	Grund	aus		
17		Gesamt	ein		
18	Hauszuleitung	Grund	aus		
19		Gesamt	ein		

Tabelle 7 Übersicht über die durchgeführten Messungen in MA-Niederfeld

Die Ergebnisse der Störfeldmessungen in MA-Niederfeld sind in Bild 26 bis Bild 27 graphisch dargestellt.

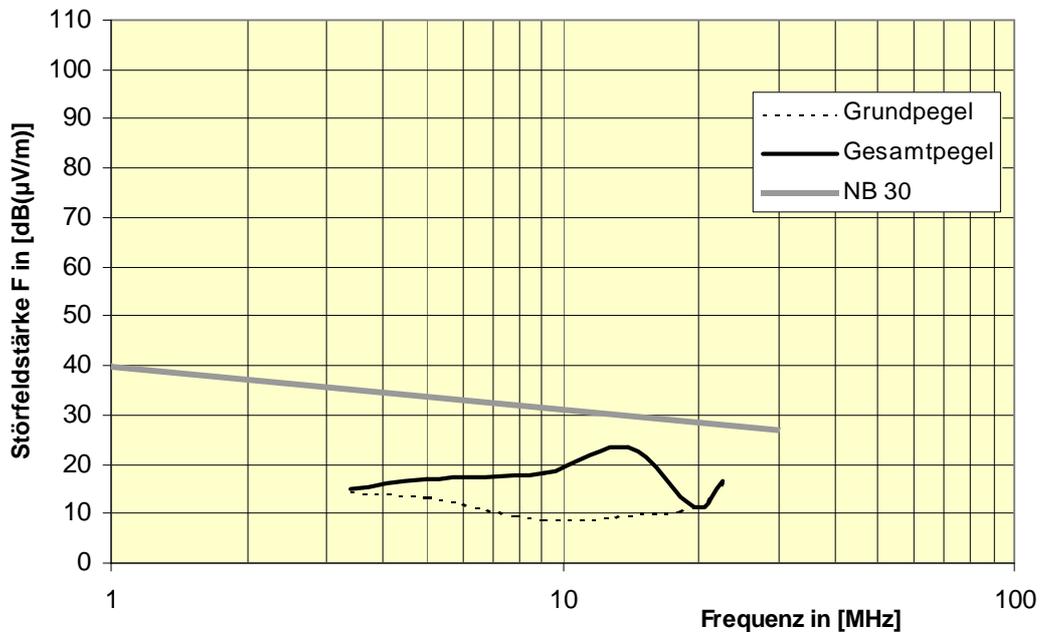


Bild 28 Funkstörpegel in MA-Niederfeld Netzstation F129

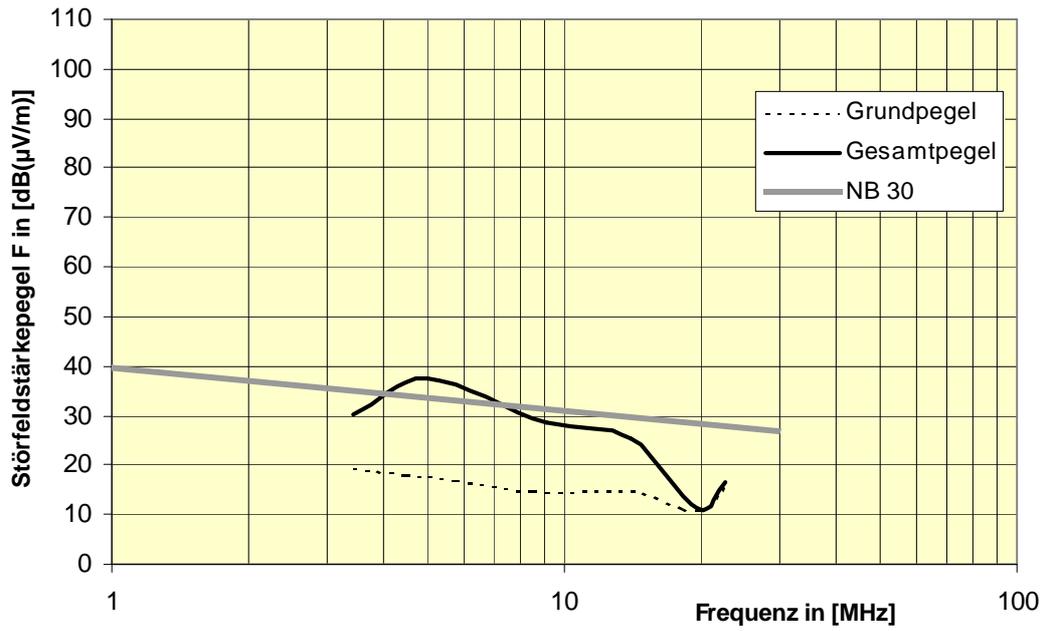


Bild 29 Funkstörpegel in MA-Niederfeld Kabeltrasse

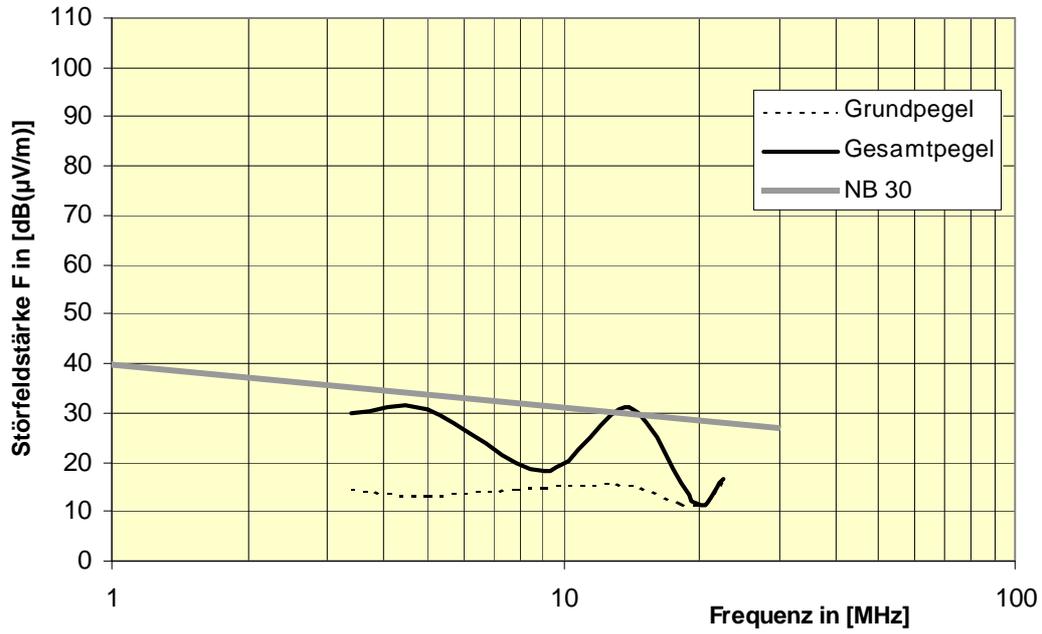


Bild 30 Funkstörpegel in MA-Niederfeld Straßenverteiler F0404

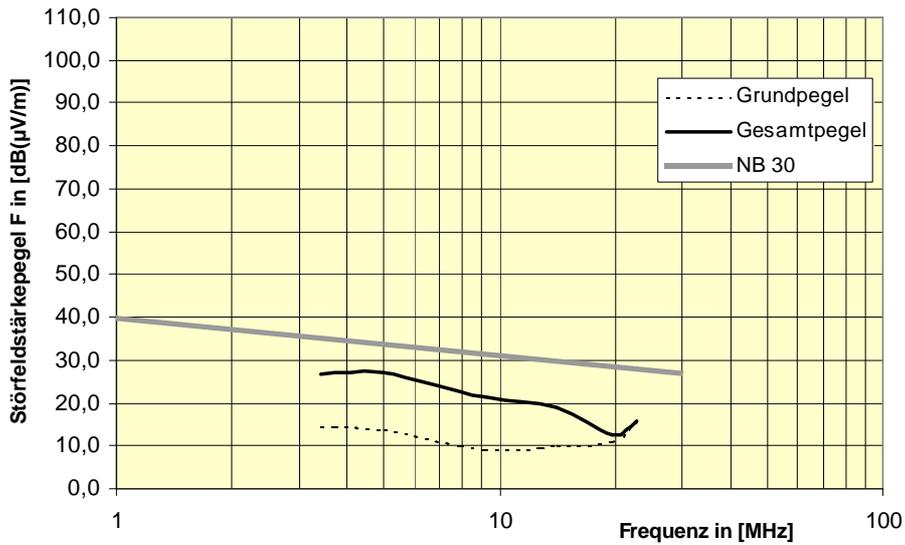


Bild 31 Funkstörpegel in MA-Niederfeld Hauszuleitungskabel Wolframstr

Nach den ersten orientierenden Messungen in Luzenberg, konnte das Meßverfahren hinsichtlich des Meßvorganges und des Auswerteverfahrens für die Messungen im Niederfeld modifiziert werden.

Zur Beurteilung wurden die reinen Powerline-Störfeldstärken ermittelt (Gleichung 5.3) und in **Bild 32** dargestellt. Es wird deutlich, daß die Störaussendung an der Kabeltrasse mit 2 Kabeln am größten ist. Die Meßwerte am Straßenverteilers erreichen lediglich in einem Punkt den Grenzwert nach NB 30.

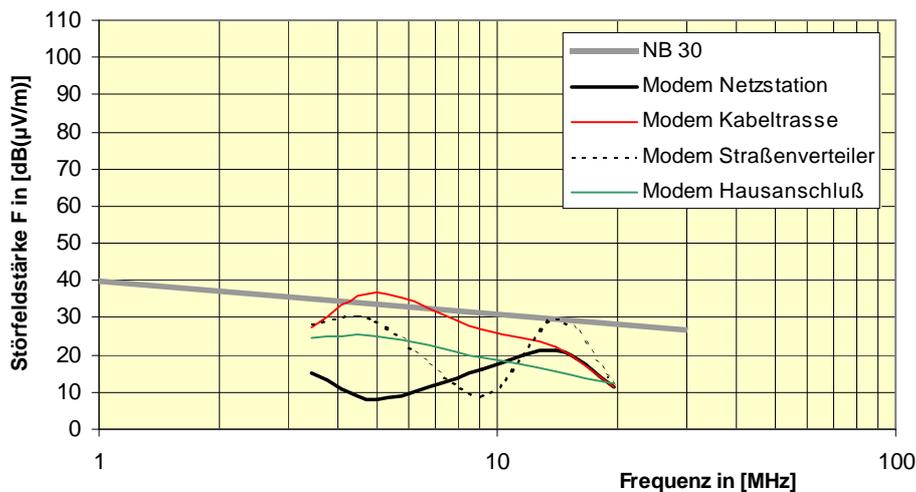


Bild 32 Vergleich der nur durch PLC-verursachten Funkstörpegel

In der von der RegTP in Auftrag gegebenen Powerline-Studie [1.2] wurden Studien hinsichtlich des Abstrahlverhaltens von verdrehten Leitungen betrachtet. Eine Kernaussage ist, wenn das Powerline-Signal gleichphasig auf mehrere parallele Leitungen aufgeprägt wird, steigt proportional mit der Anzahl der Leitungen die Abstrahlung.

Es kann zwar nicht davon ausgegangen werden, daß das Abstrahlverhalten von verdrehten Leitungen, die auf die hochfrequente Datenübertragung optimiert sind, analog auf die Energiekabel übertragen werden können, aber die Meßergebnisse in Mannheim-Niederfeld zeigen, daß ähnliche Verhältnismäßigkeiten zum Tragen kommen. Um allgemeingültige Aussagen treffen zu können, müßten eine Vielzahl von Messungen an diversen Kabeltrassen durchgeführt werden.

Die neueren Netzstationen (wie die F129) stellen bei der Powerline-Technologie den ersten Einschätzungen nach kein Problem dar. Sie haben durch ihre Stahlbetonbauweise eine Schirmwirkung. Da die Stahlarmierung mit dem Potentialausgleich verbunden ist, hat man im günstigsten Fall einen Faraday'schen Käfig.

Die oben beschriebenen strahlungsdämpfenden Eigenschaften erklären die niedrigen Strahlungswerte an der Netzstation F129 im Niederfeld. Bei der Station F129 handelt es sich um einen aus Stahlbeton gefertigten Container.

In der von dem Bundesamt für Post und Telekommunikation in Auftrag gegebenen Studie über EMV-Störmodelle [2.2] wurde festgestellt, dass Störfeldstärken durch in Mauern verlegte Leitungen bei Frequenzen im MHz-Bereich um 10 bis 20 dB zusätzlich gedämpft werden. Nun tritt bei der Installation der Powerline-Modems in einer Netzstation die gleiche Wirkung auf, nur mit dem Unterschied, dass für die Dämpfung die gesamte Wandstärke zur Verfügung steht.

Dies bedeutet, dass auch Stationen älterer Bauart eine dämpfende Wirkung auf die abgestrahlten Felder haben können. Um hier detailliertere Aussagen treffen zu können, müßten an solchen Stationen nochmals Messungen durchgeführt werden.

In der Literatur [1.1/Seite 296] werden die Netzstationen und Hausanschlüsse als die kritischsten Stellen herausgestellt. Die Messungen, die im Rahmen dieses AIF-Projektes und einer Diplomarbeit durchgeführt wurden, kommen zu einem anderen Ergebnis. Bei den Messungen im Niederfeld strahlte die Kabeltrasse mit 2 Energiekabeln am stärksten. Legt man die oben erwähnte Verhältnismäßigkeit zu Grunde, dann ist ein Betreiben von Powerline an einer Kabeltrasse mit mehr als 2 Kabeln unter Einhaltung der vorgeschriebenen Grenzwerte, äußerst kritisch.

Weitere Fragen wirft das Abstrahlverhalten des Straßenverteilers F0404 auf. Wie in Abbildung 4.24 zu erkennen ist, handelt es sich um einen konventionellen Straßenverteiler, an dem keine besonderen Abschirmmaßnahmen gegen HF-Strahlung vorgenommen sind. Trotzdem wird die Grenzkurve nicht überschritten.

Die Messungen im Niederfeld haben gezeigt, dass es sehr wohl möglich ist, die NB 30 einzuhalten. Allerdings sind viele Fragen offen geblieben, die während des großangelegten Feldversuches in Mannheim-Niederfeld geklärt werden sollten.

Es müssen Messungen über den ganzen Tag verteilt an einem Meßpunkt durchgeführt werden, damit die Abhängigkeit des Abstrahlverhaltens von der Netzimpedanz, die ja wie in Kapitel 4.1 erläutert frequenz- und lastabhängig ist, geklärt werden kann.

Ebenso wird ein verändertes Abstrahlverhalten erwartet, wenn eine Vielzahl von Powerline-Usern über das Energiekabel surft. Die Störstrahlung ist abhängig von dem sich einstellenden Strom und der wiederum von der Netzimpedanz und der Anzahl der User. MAINET Powerline-Modem

8 Verzeichnis der Abkürzungen

DLC	Distribution Line Carrier	3
FFT	Fast Fourier Transformation	25
GTO	Gate Turn Off Thyristor	5
IGBT	Insulated Gate BipolarTtransistor	3
PLC	Power Line Carrier	4
PLL	Phase Locked Loop	8
VCO	voltage controlled oscillator	8

9 Literaturverzeichnis

- [1] Nutzungsbestimmung 30 der Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post

- [2] DIN VDE 850 : Ankopplungseinrichtungen zur Trägerfrequenz-Nachrichtenübertragung auf Hochspannungsleitungen (TFH-Anlagen).
VDE-Vorschrift 1980

- [3] EN 50065-1: Signalling on low voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148.5 kHz.
Europannorm CENELEC.

- [4] K. Dostert: Power line – Neue Dienste auf Energieversorgungsleitungen
ETG-Fachbericht 73, S.121 - 129

- [5] S. Hamm Einsatzmöglichkeiten der Powerline Communication unter Berücksichtigung der elektromagnetischen Verträglichkeit pulsmodulierter Umrichter
Diplomarbeit Hochschule für Technik, Wirtschaft und Gestaltung Trier

- [6] Frequenzbereichzuweisungsplanverordnung (FreqBZPV)
Bundesratsdrucksache 745/99

- [7] VDE 0876 Teil 16-1 Anforderungen an Geräte und Einrichtungen sowie Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen und Störfestigkeit).
Deutsche Norm Entwurf 05. 1998

- [8] RegTP 322 MV 05: Meßvorschrift zur Messung von Störfeldern in Anlagen und Leitungen der Telekommunikation im Frequenzbereich 9 kHz bis 3 GHz
3. Entwurf, Jan 2000