

DIPLOMARBEIT

Smartmeter Powerlinekommunikation

Einfluss von Störquellen auf die Kommunikation im CENELEC-A- und
FCC-Frequenzband, sowie Möglichkeiten zu deren Detektion

*Eingereicht zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing. oder DI)*

Ausgeführt von:
Ing. Johann Anton Stocker, BSc

Betreuung durch:
Dipl.-Ing. Dr. Rudolf Mörk-Mörkenstein
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gawlik

Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe

Technische Universität Wien

Wien, 4. August 2022

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit gemäß dem Code of Conduct – Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis (in der aktuellen Fassung des jeweiligen Mitteilungsblattes der TU Wien), insbesondere ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel, angefertigt wurde. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder in ähnlicher Form in anderen Prüfungsverfahren vorgelegt.

Wien, 4. August 2022

Kurzfassung

In dieser Diplomarbeit wird der Einfluss von Störquellen auf die Smart Meter Power Line Communication (SM-PLC) und sowie Möglichkeiten zu deren Detektion untersucht. Dafür wurde ein Testplatz mit einer Anschlussleistung von 44 kW nach hochfrequenztechnischen Gesichtspunkten aufgebaut. Mittels messtechnischer Analysen werden Zugangsimpedanzen, Störpegelquellen und der Übertragungskanal untersucht, um ein vollständiges Bild der Störeinflüsse auf die SM-PLC im Frequenzbereich CENELEC-A und FCC von 0 – 500 kHz zu liefern. Die Messung von Netzzugangsimpedanzen und die daraus errechneten Kabelimpedanzen zeigen ein Bild der besseren Entkopplung von Störquellen in Kundenanlagen in den höheren Frequenzen von FCC. Mittels einer Langzeitstörpegelmessung konnten verschiedene Störquellen am Niederspannungsnetz detektiert und analysiert werden. Diese sind z.B. Ladezyklen von Elektroautos, eine Klimaanlage, ein Switch und kleine Schaltnetzteile. Diese Störquellen werden an einer Netznachbildung detailliert untersucht. Es zeigt sich der Vorteil des FCC-Frequenzbandes für die SM-PLC im Vergleich zum CENELEC-A-Frequenzband, bei dem eine unzureichende Normungssituation starke Störpegelquellen am Niederspannungsnetz erlaubt. Bei Kanalmessungen in verschiedenen Untersuchungsszenarien mit diesen Störquellen ergibt sich dadurch eine deutlich bessere Performance im FCC-Frequenzband. Da zukünftig die Anzahl an Elektroautos und Schaltnetzteilen im Niederspannungsnetz zunehmen wird, ist auch mit einer Zunahme von Störemissionen zu rechnen. Dies ist insbesondere in CENELEC-A-Frequenzband zu erwarten. Insgesamt kann festgestellt werden, dass das FCC-Frequenzband für die Smart Meter Power Line Communication langfristig eine geeignetere Übertragungs Umgebung darstellt als CENELEC-A.

Abstract

In this diploma thesis the influence of disturbance effects on the smart meter power line communication and possibilities for detecting them are investigated. For this purpose, a test station with an electric power capability of 44 kW was set up with consideration of high-frequency aspects. Measurements of access impedances, noise level sources and the transmission channel are used to provide a complete picture of the influences on the SM-PLC in the frequency range CENELEC-A and FCC from 0 – 500 kHz. The measurement of network entry point impedances and the thus calculated cable impedances show a picture of better decoupling of noise sources in customer installations in the higher frequencies of FCC. By means of a long-term noise level measurement, noise sources on the low-voltage grid could be detected and analysed. These are the charging cycles of electric cars, an air conditioner, a switch and small switching power supplies. These sources of noise are examined in detail on a line impedance stabilization network. From the acquired data the advantage of the FCC frequency band for Smart Meter Power Line Communication is shown in comparison to the CENELEC-A frequency band, where an insufficient standardisation situation allows strong noise levels on the low-voltage grid. Channel measurements in various test scenarios with these noise source result in significantly better performance in the FCC frequency band.

As more electric cars and IT devices will be added to the grid in the future, the noise levels on the grid will also increase. This is to be expected especially in CENELEC-A. Overall, it can be concluded that in long term the FCC frequency band is a more suitable for transmission of smart meter power line communication than the CENELEC-A frequency band.

Citation

Copyright (C) 2022 by Johann Anton Stocker

If you find this work useful, please cite it using the following BibTeX entry:

```
@Thesis{Stocker_2022,
  type      = {Master's Thesis},
  author    = {Johann Stocker},
  title     = {Detection and description of disturbance effects on Smart
               Meter Power Line Communication},
  school    = {Vienna University of Technology (TU Wien)},
  year      = {2022},
  address   = {Gusshausstrasse 25/29/370, 1040 Wien},
  month     = {07},
}
```

Contact us:

j.stocker@young.ove.at

Abkürzungsverzeichnis

8PSK	Oktal Phase Shift Keying
AMI	Advanced Metering Infrastructures
ARIB	Association of Radio Industries and Businesses
AWGN	additives weißes gaußsches Rauschen
BB-PLC	Broadband Band-PLC
BER	Bitfehlerrate
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CEN-A	CENELEC-A
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Électrotechnique
CISPR	Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access mit Collision Avoidance
DC	Gleichstrom
DG	Datengateway
DK	Datenkonzentrator
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
DUT	Device Under Test
EN	Europäische Normen
EMV	Elektromagnetischen Verträglichkeit
FCC	Federal Communications Commission
G3	G3-PLC Alliance
GMK	Group Master Key
HAK	Hausanschlusskasten
IEC	International Electrotechnical Commission
IMD	Impedance Measurement Device
IT	Informationstechnologien
ITU	International Telecommunication Union
LISN	Line Impedance Stabilization Network
NB-PLC	Narrow Band-PLC

NSHV Niederspannungshauptverteilung
OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OVE Österreichische Verband für Elektrotechnik
PAN Personal Area Network
PLC Powerline Communication
PSK Pre Shared Key
PSU Power Supply Unit
RBW Resolution Bandwidth
ROBO Robust OFDM
RSSI Received Signal Strength Indicator
QPSK Quadrature Phase Shift Keying
SG Smart Grid
SM Smart Meter
SNR Signal to Noise Ratio
SWT Sweep Time
TNR Ton-Frequenz-Rundsteuerung
TST Trafostation
VBW Video Bandwidth

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	7
Abstract	7
Abkürzungsverzeichnis	1
1 Einleitung und Motivation	5
1.1 Zielsetzung dieser Arbeit	5
1.2 Allgemeine Rahmenbedingungen für die Netzbetreiber	5
1.3 Bedarfsgerechte Netzdimensionierung	6
2 Theoretische Grundlagen	7
2.1 SM PLC Grundlagen	7
2.2 Einkoppelung der SM-PLC ins Netz	8
2.2.1 Einphasige Einkopplung	9
2.2.2 Dreiphasige Einkopplung mit Sender in einem Sternpunkt	10
2.2.3 Dreiphasige Einkopplung über phasenetrennte Signalwege	11
2.3 Aufbau des Niederspannungsnetzes aus Sicht der PLC-Übertragung	11
2.4 G3 PLC OSI Schichtenmodell	13
2.4.1 Physikalische Schicht	14
2.4.2 Protokollebene	17
3 Normen	19
3.1 CISPR 16-1 und EN 55016-2-1	20
3.2 ÖVE/ÖNORM EN 50065-1	20
3.3 ÖVE/ÖNORM EN 50065-2-3+A1	21
3.4 ÖVE/ÖNORM EN 61000-2-2	21
3.4.1 Ausgabe 2003-04-01	22
3.4.2 Ausgabe 2019-07-01	22
3.4.3 Ausgabe 2020-06-01	22
3.5 ÖVE/ÖNORM EN 61000-6-3	23
3.5.1 Ausgabe 2022-07-01	23
3.6 ÖNORM EN 12015	23
3.7 Zusammenfassung der Verträglichkeitspegel und Störaussendepegel	24
4 Einflüsse auf die Übertragung	26
4.1 Netztopologie	26
4.2 Impedanzen des Netzes und von Leitungen	28
4.2.1 Geeignete Ersatzschaltung	29
4.2.2 Impedanzmessung in der elektrischen Energietechnik	31
5 Smart Meter Testaufbau zur Überprüfung der Kommunikation	33
5.1 Schaltung Testaufbau Netzzugangsseite	33

5.2	Schaltung Testaufbau-Abgänge für die SM	34
5.3	Verwendung des SM-Aufbaus	35
6	Messungen	39
6.1	Impedanzen von Netzelementen	39
6.1.1	Methodik: Messaufbau Impedanzmessung	39
6.1.2	Methodik: Messung der Impedanzen von Kabeln	40
6.1.3	Impedanzen im Anschlusspunkt am SM-Messaufbau	44
6.1.4	Niederspannungshauptverteilung	46
6.1.5	Ladesäule für Elektroautos	47
6.1.6	Kabel mit $2 \times 4 \times 95 \text{ mm}^2 + 1 \times 95 \text{ mm}^2$ (Erdungskabel)	49
6.1.7	Kabel mit $5 \times 16 \text{ mm}^2$	50
6.1.8	Kabeltrommel mit $5 \times 10 \text{ mm}^2$	55
6.1.9	Kabel starr mit $3 \times 6 \text{ mm}^2$	56
6.1.10	Zusammenfassung Impedanzmessungen	57
6.2	Aktiv einspeisende Störquellen	58
6.2.1	Langzeitstörquellen	58
6.2.2	Dreiphasige Verbraucher an LISN	61
6.2.3	Messungen mit Narda Probe SHC-1-1000 am Netz	67
6.2.4	Einphasige Verbraucher mit LISN	68
6.2.5	Diskussion der aktiv einspeisenden Störquellen	70
6.3	Kanalmessungen	71
6.3.1	Methodik: Kanalmessungen	71
6.3.2	Kanalmessung in einem Bürogebäude	73
7	Conclusio	82
	Literatur	88
8	Anhang	92
8.1	Prüfprotokoll SM-Testaufbau	92
8.2	Impedanzmessgerät	93
8.3	Spektrumanalysator	100
8.4	Netznachbildung	103
8.5	Störpegelmessung und Kanalmessung nBox	105
8.6	Installationstester	108
8.7	Mobiles Ladegerät JUICE BOOSTER 2	113
8.8	Narda Probe SHC 1 1000	114

1 Einleitung und Motivation

1.1 Zielsetzung dieser Arbeit

Im Rahmen dieser Masterarbeit soll der Einfluss von Störquellen auf die Smart Meter (SM)-Powerline Communication (PLC) und sowie Möglichkeiten zu deren Detektion untersucht werden. Es soll ein Überblick über die aktuellen Normung erstellt und mögliche Querverbindungen zu deren Auswirkungen aufgezeigt werden. Aus den Erkenntnissen einer Literaturrecherche sollen Testszenarien und Messungen festgelegt werden, die Einfluss von Leitungslängen, verschiedenartiger elektrischer Betriebsmittel (Lasten) etc. feststellen. Weiters soll der Aufbau eines Testnetzwerkes im Labor, bestehend aus PLC-Sendern und Empfängern und ausgewählten Lasten, durchgeführt werden und eine Auswertung und Dokumentation der Testszenarien erfolgen. Im Abschluss werden Test-Messungen im Niederspannungsnetz stattfinden und die Erkenntnisse der Labormessungen bei Messungen im Niederspannungsnetz angewendet werden. Es soll die Frage beantwortet werden ob eine SM-PLC besser in CENELEC-A (CEN-A) oder in Federal Communications Commission (FCC) möglich ist. Die Messungen dafür wurden im Labor der IES Institut für Elektrotechnik und Sicherheitswesen Ziviltechniker GmbH in einer Kooperation mit dem Institut für Energiesysteme und elektrische Antriebe der TU Wien abgewickelt.

1.2 Allgemeine Rahmenbedingungen für die Netzbetreiber

Die Europäische Union hat bereits mit der Modernisierung und Umstellung auf eine klimaneutrale Wirtschaft begonnen. Der langfristige Plan ist es, Europa zur ersten großen Volkswirtschaft der Welt zu entwickeln, die bis 2050 klimaneutral wird. Um den Übergang der europäischen Wirtschaft von einem zentralisierten, starren, auf fossilen Brennstoffen basierenden Energiesystem hin zu einem flexiblen, dezentralen und kohlenstoffarmen Energiesystem zu fördern, hat die Europäische Union ihre politischen und rechtlichen Rahmen kontinuierlich verbessert. Dementsprechend wurde das Paket „Clean Energy for all Europeans Package“ als zentraler Pfeiler der Strategie für die Zukunft der Energieunion konzipiert. Da die Digitalisierung eine der wichtigsten Voraussetzungen für die Entwicklung eines widerstandsfähigen und sicheren Netzes der Zukunft ist, besteht die Notwendigkeit einer groß angelegten Einführung intelligenter elektrischer Energiezähler [1], [2]. Es wurde daher beschlossen, 80% der Haushalte in Europa bis 2020 mit SM auszustatten, was sich aufgrund technischer Probleme jedoch verzögert. Konkret sollen in Österreich 95% der Haushalte bis 2022 mit einem SM ausgestattet werden [3]. Die Verteilnetzbetreiber sind für die Koordination der SM-Installation und Inbetriebnahme (Rollout) verantwortlich. PLC steht für die Kommunikation mit höheren Frequenzen über das elektrische Energieversorgungsnetz. Diese Informationsübertragung über elektrische Energieversorgungsleitungen existiert seit über 120 Jahren. 1898 wurde dazu das erste Patent angemeldet [4]. Seit 1920 wird mittels Trägerfrequenztechnik Information auf den Hochspannungsnetzen übertragen.

Die Ton-Frequenz-Rundsteuerung (TNR) wird bis heute im Stromnetz zur Steuerung von Tonschalteneinrichtungen verwendet [5]. Ende 1991 kam die europäische Comité Européen de Normalisation Électrotechnique (CENELEC) Norm EN 50065 zur Anwendung. Diese regelt die Nutzung des Frequenzbereiches von 3 kHz bis 148,5 kHz und brachte Fortschritte in der Entwicklung der automatischen Zählerauslesung [5]. Die Informationstechnologien (IT) sind der Grundstein für die intelligenten elektrischen Energienetze, auch Smart Grid (SG) genannt, und ermöglichen erst Smart Metering und Advanced Metering Infrastructures (AMI). Die PLC hat den großen Vorteil, bereits vorhandene Stromnetze zu verwenden und stellt eine potenziell kostengünstige Lösung dar, um eine Kommunikation zu ermöglichen. Zu den Anwendungsszenarien gehören Heimvernetzung, Heimautomatisierung, Breitbandinternetzugang, automatische Zählerablesung und Smart Grid Dienste.

1.3 Bedarfsgerechte Netzdimensionierung

Nur mit zuverlässigen Prognosen und bestmöglichem Wissen über die elektrische Energiebezugssituation können die elektrischen Energienetze dauerhaft stabil gehalten und nicht nötige Kosten vermieden werden. Sollte dem Netzbetreiber dieser Einblick fehlen, bleiben als Alternative nur ein weiterer Ausbau und Überdimensionierungen der elektrischen Energienetze, um Reserven für alle Eventualitäten als Puffer zu haben. Dies ist mit zusätzlichen Investitionen verbunden, die sich letztlich bei allen Verbrauchern in Form höherer Netzentgelte bemerkbar machen würden. SM bieten zusätzliche Steuerungsmöglichkeiten sowie eine neue Qualität und Quantität an Daten. So ist es möglich, mit Hilfe der Messdaten der SM Verbrauchsspitzen zu glätten und vorhandene Speicherkapazitäten besser einzusetzen. Ein weiterer Vorteil der SM liegt in der täglichen Übermittlung der Zählerstände an den Netzbetreiber, sodass ein manuelles Ablesen nicht mehr nötig ist [1]. Die elektrischen Energienetze sollen damit effizienter gemanagt werden und stellen für die Netzbetreiber wichtige Bausteine für die elektrischen Energiesysteme der Zukunft dar [6]. Durch die intelligenten Technologien kann allerdings auch die steigende Menge dezentral erzeugter elektrischer Energie, wie beispielsweise durch Photovoltaik oder Wind, volkswirtschaftlich optimiert in das Netz eingebunden werden. SM haben den zusätzlichen Vorteil gegenüber traditionellen Ferraris-Zählern bei der Messung der Eigenerzeugung durch z.B. Photovoltaikanlagen, für die bisher ein zweiter Zähler notwendig war [7].

Die Stromnetze wurden jedoch nicht für die Kommunikation mit höheren Frequenzen ausgelegt und sind einem großen Spektrum an Störeinflüssen ausgesetzt. Diese können z.B. aktive Störquellen, wie die leitungsgebundene und nichtleitungsgebundene Einkoppelung von Störleistungen sein. Weitere Einflüsse sind ständige Änderungen der Eigenschaften des Übertragungsmediums, wie z.B. durch das Zu- und Wegschalten von Impedanzen [8]. Diese Störungen der lokalen Impedanz können den Kommunikationskanal sowohl blockieren als auch die Signalleistung an unerwünschte Stellen ableiten. Diese Störeinflüsse limitieren gegenwärtig einen breiteren Einsatz der PLC-Technologie im privaten und gewerblichen Sektor der österreichischen Energiewirtschaft.

2 Theoretische Grundlagen

PLC-Systeme werden in zwei Klassen kategorisiert: Die schmalbandige PLC, auch Narrow Band-PLC (NB-PLC) genannt und die Broadband Band-PLC (BB-PLC). NB-PLC-Systeme arbeiten in einem niedrigeren Frequenzbereich unter 500 kHz und bieten nur eine geringe Datenrate von bis zu 500 kbps. NB-PLC ist hauptsächlich für Steuer- und Regelaufgaben, sowie für SG Anwendungen gedacht, die ein höheres Maß an Zuverlässigkeit und Robustheit benötigen und bei denen weniger die Datenrate im Vordergrund steht. Im Gegensatz dazu arbeiten BB-PLC-Systeme im Spektrum 1,8 – 86 MHz. BB-PLC wird hauptsächlich für die Heimvernetzung verwendet, bei der hohe Datenraten von bis zu 200 MBit/s benötigt werden, wie z.B. für Multimedia-Anwendungen [5].

2.1 SM PLC Grundlagen

Die SM-PLC Grundlagen beschränken sich im Folgenden auf die in Europa üblichen Frequenzbänder für die SM-PLC-Kommunikation [9] für das CEN-A- und FCC-Frequenzband. Siehe Tabelle 1.

Band	Niedrigste Frequenz	Höchste Frequenz
CEN-A	3 kHz	95 kHz
FCC	9 kHz	490 kHz

Tabelle 1: Frequenzbänder PLC in Europa

Die Tabelle 2 zeigt grundlegende Unterschiede der beiden verwendeten Frequenzbänder für die SM-Kommunikation nach G3-PLC-Standard in CEN-A und FCC auf [10]. G3-PLC ist ein offener, internationaler Standard, der von der International Telecommunication Union (ITU) veröffentlicht wurde. Dabei kann es bei der Anzahl verfügbarer Trägerfrequenzen regional zu Unterschieden kommen, da gewisse Frequenzbereiche ausgeblendet werden müssen, um Störungen durch Funkabstrahlung über die elektrischen Energieversorgungsleitungen, die mögliche parasitäre Langwellenantennen sein können, zu vermeiden. Würde dieses auf Englisch genannte „Notching“ nicht angewandt, könnte die PLC-Kommunikation sonst z.B. mit der Flugsicherung oder mit dem Amateurfunk interferieren. Es wird regional bestimmt, auf welche Frequenzen Notching angewendet werden muss. Besonders wichtig ist das Notching bei den höheren Frequenzen des FCC-Bandes.

Eigenschaften	CEN-A	FCC
Trägerfrequenzen PLC Europa	35,9 – 90,6 kHz	154,7 – 487,5 kHz
Bandbreite	54,7 kHz	332,8 kHz
Anzahl der Träger	36	72
Anzahl Subbänder	6	24
Träger je Subband	6	3
Max. Bitrate (Oktal Phase Shift Keying (8PSK))	46,044 kbp/s	234,321 kbp/s

Tabelle 2: Grundlegende Eigenschaften von CEN-A und FCC in der SM-Kommunikation

Tabelle 2 verdeutlicht die Vorteile von FCC, wie eine um 278,1 kHz größere Bandbreite, eine höhere Anzahl an Trägern/Subbändern und eine höhere theoretisch maximal mögliche Bitrate. Die höhere Anzahl an Trägern/Subbändern in FCC ermöglicht bei Störeinflüssen ein leichteres Ausweichen auf ungestörte Frequenzen und die höhere Bitrate ermöglicht ein häufigeres Auslesen der Daten.

2.2 Einkoppelung der SM-PLC ins Netz

Für die Einkoppelung ins elektrische Energieversorgungsnetz existieren verschiedene Konzepte. Diese unterscheiden sich in der Impedanz der PLC-Ankopplung, der Impedanz der internen Versorgung und dem verwendeten Signalpfad. Die SM werden dabei einphasig und die Datengateway (DG)/Datenkonzentrator (DK) dreiphasig an das Netz angeschlossen. Die interne Spannungsversorgung der SM wird in allen vorgestellten Fällen über eine Diodenbrücke, einem Glättungskondensator und einem Gleichstrom (DC)-DC-Wandler hergestellt.

2.2.1 Einphasige Einkopplung

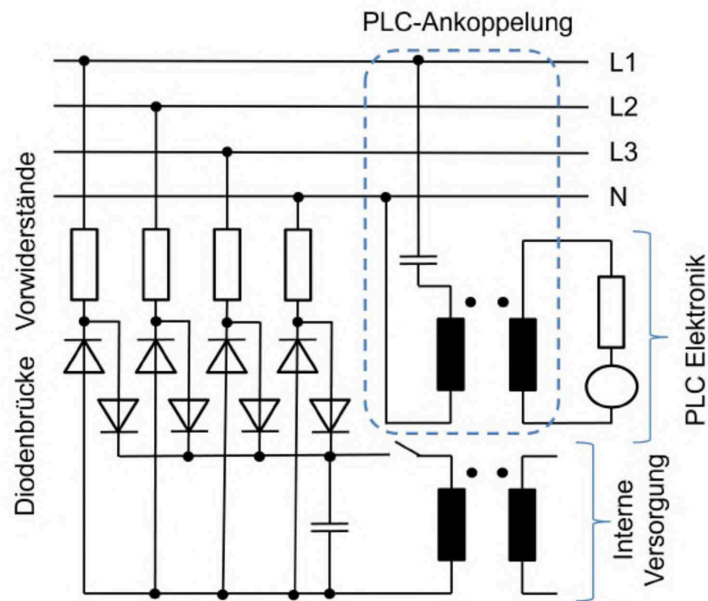


Abbildung 1: Einphasige PLC-Einkopplung über Koppelkondensator

Abbildung 1 zeigt das einphasige Einkoppelungsprinzip eines SM an das Netz. Das PLC-Signal wird mit galvanischer Trennung über einen Übertrager und über Kapazitäten in die Phase L1 eingespeist [11]. Die PLC-Einkopplung kann aus Kostengründen auch nur kapazitiv ohne Übertrager erfolgen [12]. Der Vorteil dieses Prinzips liegt in den Kosten und Aufwand der Schaltung. Nachteil dieses Prinzips ist die Beschränkung auf die Phase L1 als Übertragungsweg, wodurch sich Störbeeinflussungen auf dieser Phase besonders schlecht auf die Kommunikation auswirken können.

2.2.2 Dreiphasige Einkopplung mit Sender in einem Sternpunkt

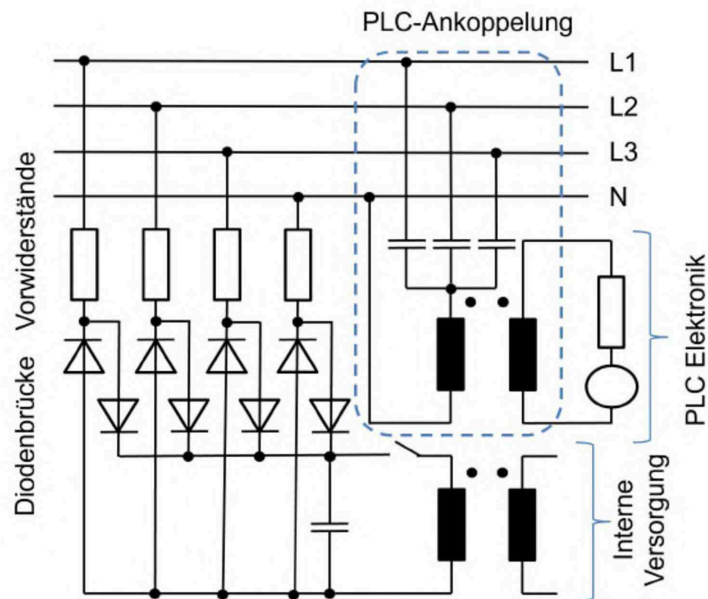


Abbildung 2: Dreiphasige PLC-Einkopplung über Koppelkondensator in Sternschaltung

Abbildung 2 zeigt eine technologisch ältere Umsetzung der dreiphasigen Ankopplung eines DG/DK an das Netz dar. Die Schaltung der Einkopplung ähnelt dem Prinzip, wie in Abbildung 1 zu sehen, allerdings mit dem Unterschied des dreiphasigen Signalpfades mit L1-N, L2-N und L3-N. Die Koppelkondensatoren sind dafür über einen Übertrager mit dem Sternpunkt im N-Leiter verbunden [13]. Diese Art der Kopplung weist den Nachteil auf, dass mögliche Störpegel auf die anderen Phasen übergekoppelt werden können. Der Vorteil besteht allerdings darin, dass durch die Aufteilung der Kommunikation auf alle drei Phasen nun nicht mehr eine zufällige Abhängigkeit von einer ungestörten Phase, wie im einphasigen Einkopplungsprinzip, der Fall ist.

2.2.3 Dreiphasige Einkopplung über phasengetrennte Signalwege

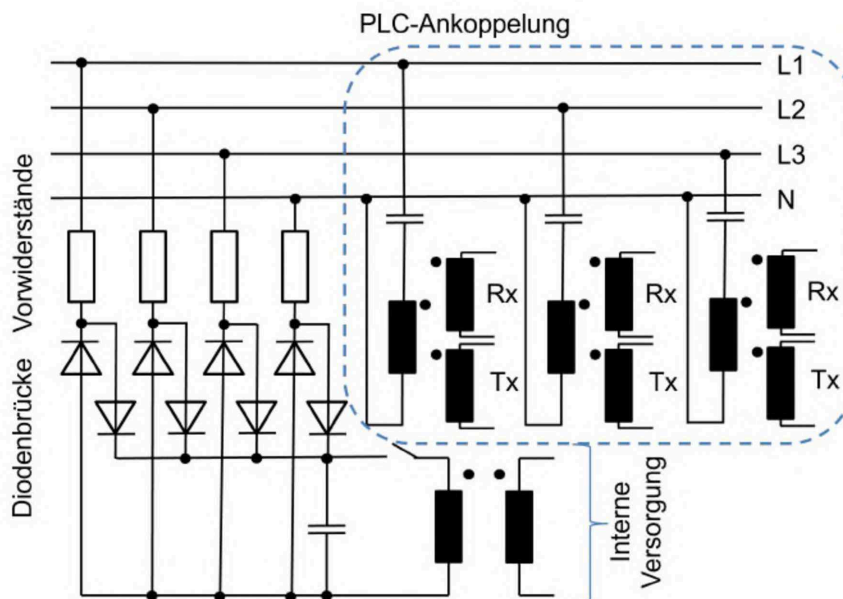


Abbildung 3: Dreiphasige PLC-Einkopplung mit phasengetrennter Einkopplung

Die Einkopplung nach Abbildung 3 zeigt ein Prinzip, bei dem die drei Signalpfade getrennt sind. Diese Umsetzung stellt ein moderneres Prinzip der dreiphasigen Ankoppelung eines DG/DK an das Netz dar. Jeder Pfad ist über einen Koppelkondensator mit einem seriellen Übertrager mit dem N-Leiter verbunden. Die Sende-/Empfangelektronik ist dabei abschaltbar. Diese Art der Kopplung hat wie die Einkopplung mit Sender in einem Sternpunkt den Vorteil, dass nun nicht mehr eine zufällige Abhängigkeit von einer ungestörten Phase besteht. Zusätzlich kommt der Vorteil hinzu, dass nun auch die Störpegel einzelner Phasen nicht mehr auf die anderen Phasen übergekoppelt werden.

2.3 Aufbau des Niederspannungsnetzes aus Sicht der PLC-Übertragung

Die öffentlichen Niederspannungsverteilnetze werden immer als TN-C-Netz, d.h. 4-adrig mit L1, L2, L3 und PEN betrieben. Der Neutraleiter ist sowohl in der Trafostation (TST) als auch an den Netzausläufern sowie in den Kundenanlagen geerdet (Schutzmaßnahme Nullung). Die Verteilungsnetze werden in Form von Stickleitungen betrieben, d.h. es liegt ein an einer Stelle offen gelassener Ring-Netz der Mischform TN-C-S vor [14]. Siehe Abbildung 4. Das DG/DK, wird direkt nach einem Transformator, der die Mittelspannung auf die Niederspannung transformiert, an ein „Niederspannungsgerüst“ angeschlossen, wie in Abbildung 5 dargestellt. Als „Niederspannungsgerüst“ bezeichnet man die Niederspannungsabgänge (NH-Lasttrennschalter) eines Trafos. Von hier aus

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek



TU
WIEN

Bibliothek
Your knowledge hub

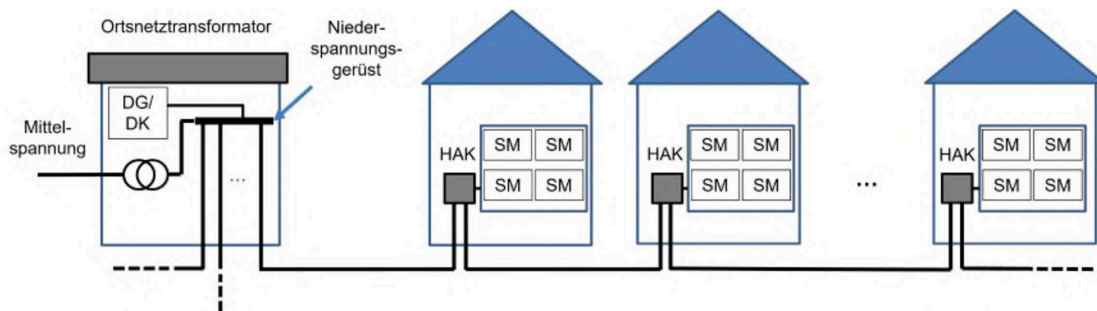


Abbildung 5: Struktur einer Ortsnetzzelle in städtischen Netz

In einigen Fällen, wenn die Konnektivität der PLC kaum oder gar nicht gegeben ist, werden die SM mit Mobilfunkmodulen ausgestattet und so die Daten übermittelt. Sekundärseitig sind an den Zähler verschiedene volatile Betriebsmittel, d.h. Geräte mit volatilen Lasten, angeschlossen, die die PLC-Kommunikation maßgebend beeinflussen können, z.B. durch Einflussnahme auf die lokale Netzimpedanz oder durch Einbringung leitungsgebundener Störungen.

2.4 G3 PLC OSI Schichtenmodell

Die SM-PLC-Kommunikation ist in einem Schichtenmodell nach Abbildung 6 organisiert. Dabei ist im Rahmen dieser Arbeit die unterste Schicht relevant. Die Protokollebene wird, da sie für einen Aufbau eines Kommunikationskanals wichtig ist, nur der vollständigerweise erwähnt.

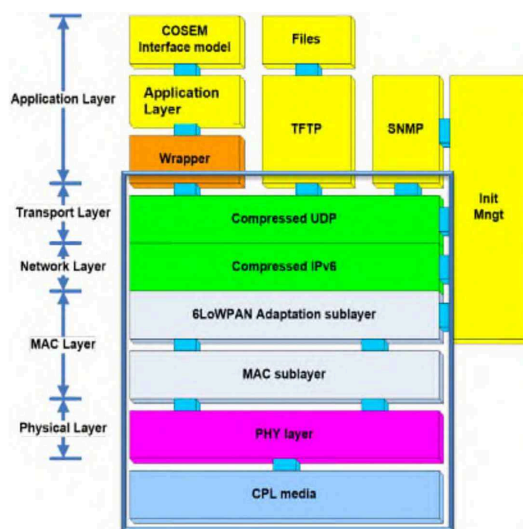


Abbildung 6: G3-OSI-Schichtenmodell, Quelle: G3-PLC-Alliance [15]

2.4.1 Physikalische Schicht

Ein 50Hz-Niederspannungsnetz stellt für eine PLC eine sehr kommunikationsfeindliche Umgebung dar.

Kanalverhalten

Die Kanalcharakteristik variiert mit der Frequenz, der Zeit, der Örtlichkeit und je nach den Verbrauchern, die im Netz angeschlossen sind. Dabei zeigt sich, dass hauptsächlich Frequenzen von 10 – 200 kHz von Störungen betroffen sind [16]. Auf Grund von im Netz auftretenden Impedanzen, z.B. durch Kundenanlagen, ist die Bidirektionalität zwischen Sender und Empfänger an einem Kanal nicht gegeben [17]. Weiters ist der PLC-Kanal sehr frequenzselektiv, da neben dem Hintergrundrauschen zusätzlich breitbandige Störer, schmalbandige Impulsstörungen und Gruppenverzögerungen von bis zu mehreren hundert Mikrosekunden auftreten können. Das Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) ist eine spezielle Implementierung der Vielfachträgermodulation und wird verwendet, um die Robustheit gegen diese Störungen zu erhöhen. Die zu übertragenden Daten mit einer zunächst höheren Datenrate werden auf mehrere Teildatenströme mit niedriger Datenrate aufgeteilt. Jeder dieser Teildatenströme wird dann auf mehrere orthogonale Träger aufmoduliert. Die Orthogonalität wird dadurch erreicht, dass das Maximum eines Trägers bei seinen Nachbarträgern jeweils auf einem Nulldurchgang liegt und bewirkt eine Reduktion des Übersprechens benachbarter Träger. Zusätzlich wird ein Zeit- und Frequenz-Verschachtelungsschema (time frequency interleaving scheme) verwendet, um die Korrelation des empfangenen Rauschens am Eingang des Decoders mit dem Datenstrom zu verringern und so zusätzliche Robustheit gegen Burststörungen zu schaffen[16].

Kollisionsvermeidung

Der Kanalzugriff erfolgt über eine Trägererkennung für multiplen Zugriff mit dem Kollisionsvermeidungsmechanismus Carrier Sense Multiple Access mit Collision Avoidance (CSMA/CA) unter Verwendung einer zufälligen Rückhaltezeit, in der noch gewartet wird bis zum Starten einer Übertragung. Der zufällige Rückhaltemechanismus verteilt die Zeit, über die die Stationen versuchen zu senden und es wird dadurch die Wahrscheinlichkeit von Kollisionen verringert. Jedes Mal, wenn ein Gerät Daten übertragen möchte, muss es diese zufällige Zeitspanne abwarten. Wird der Kanal nach der zufälligen Rückhaltezeit als frei befunden, sendet das Gerät seine Daten. Wird der Kanal nach der zufälligen Rückhaltezeit als belegt festgestellt, wartet das Gerät eine weitere Zufallsperiode ab, bevor es erneut versucht, auf den Kanal zuzugreifen[16].

Modulationsarten und Bitfehlerraten

Für die SM Datenübertragung wird das PLC-Signal mittels Phasenumtastung moduliert. Das Binary Phase Shift Keying (BPSK) stellt dabei die robusteste Modulationsart unter allen möglichen Modulationsarten in der Digitaltechnik dar [18].

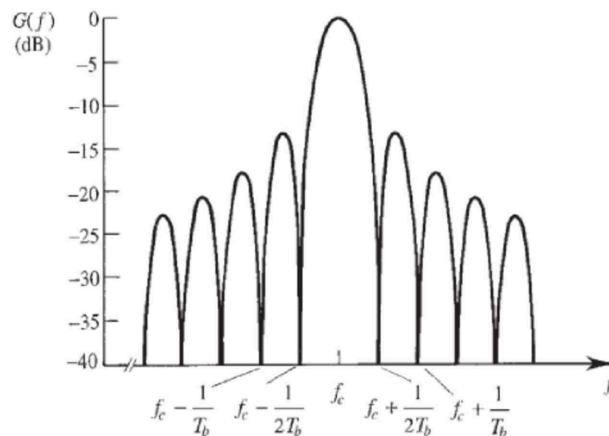


Abbildung 7: QPSK Leistungsspektrum in logarithmischer Darstellung, Quelle: [19] S.423, Bild 11.26 b)

Abbildung 7 zeigt beispielhaft die spektrale Leistungsdichtefunktion im logarithmischen Maßstab für Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) [19]. Die spektrale Effizienz von QPSK ist doppelt so hoch wie die von BPSK. Bei gleicher Datenrate nehmen die Symbole in jedem Quadraturkanal zwar den gleichen spektralen Raum ein wie bei BPSK, es wird aber nur die halbe spektrale Breite benötigt. Illustriert wird dies in Form von orthogonalen Spannungsspektren in Abbildung 8.

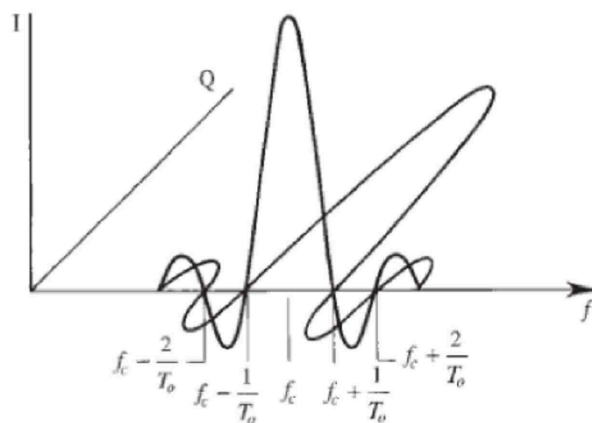


Abbildung 8: QPSK Spannungsspektrum für orthogonale Inphase(I) und Quadratur (Q), Quelle: [19] S.424, Bild 11.27

Wegen des kommunikationsfeindlichen Mediums wurde für SM-Anwendungen das BPSK noch um einen robusteren Modus erweitert. In diesem so genannten Robust OFDM (ROBO)-Modus werden die Information vierfach redundant und mit maximaler Leistung gesendet [20]. Verwendete Modulationsarten der SM-Kommunikation sind nach aufsteigender Datenrate und absteigender Robustheit folgende: ROBO, BPSK, QPSK, 8PSK [16]. Je nach vorhandenen Störeinflüssen wählen die Teilnehmer eines SM-Kommunikationsnetzes eigenständig die beste Modulationsart in einem Kanal zu einem anderen Teilnehmer. Die Feststellung der gewählten Modulationsart lässt somit Rückschlüsse über die Qualität der Übertragung zu. Neben der Modulationsart wird die Kommunikation zusätzlich mittels Austausch von Tonemaps optimiert. In diesen Tonemaps wird in einem Übertragungskanal spezifiziert, welche Subbänder geeignet und welche ungeeignet für die Übertragung von Daten sind und es erfolgt eine dementsprechende Optimierung. Tabelle 3 zeigt verschiedene Modulationsarten mit den zugehörigen Datenraten bei optimalen Bedingungen.

Frequenzband	CEN-A Datenrate	FCC Datenrate
ROBO	4,500 kbp/s	21,000 kbp/s
BPSK	14,640 kbp/s	62,287 kbp/s
QPSK	29,285 kbp/s	124,575 kbp/s
8PSK	43,928 kbp/s	186,863 kbp/s

Tabelle 3: Theoretische Datenraten CEN-A und FCC in der SM-Kommunikation

Anders als bei analogen Modulationsverfahren ist das Verhältnis der Signal to Noise Ratio (SNR) nicht der einzige Qualitätsindikator der Signalübertragung, um erfolgreich eine Übertragung zu erkennen, sondern es ist weiters die Bitfehlerrate (BER) bei einer gegebenen SNR zu betrachten. Die BER stellt die Anzahl der verlorenen Bits bei einer Übertragung dar. Eine sinnvolle Grenze der Signalübertragung ist somit nicht ein minimal detektierbares Signal, sondern eine maximal tolerierbare BER [19]. In Abbildung 9 wird die Abhängigkeit der BER von der SNR und der Modulationsart in einem Kanalmodell mit Hinzugabe durch additives weißes gaußsches Rauschen (AWGN) dargestellt. Für einen Vergleich mehrerer Modulationsverfahren ist eine BER von 0,01% ein akzeptables Leistungsniveau. Eine BER von 0,01% entspricht einem verlorenem Bit pro 10.000 übertragenen Bits. Bei dieser BER ist zu erkennen, dass der ROBO-Modus einen Codierungsgewinn von etwa 4 dB gegenüber BPSK aufweist, der wiederum einen Codierungsgewinn von etwa 3 dB gegenüber QPSK hat. Der Nachteil ist, dass die Datenrate im ROBUST-Modus weniger als ein Drittel gegenüber BPSK aufweist. Bei den anderen verwendeten Modulationsverfahren QPSK und 8PSK sind die Unterschiede noch beträchtlicher [21], [22].

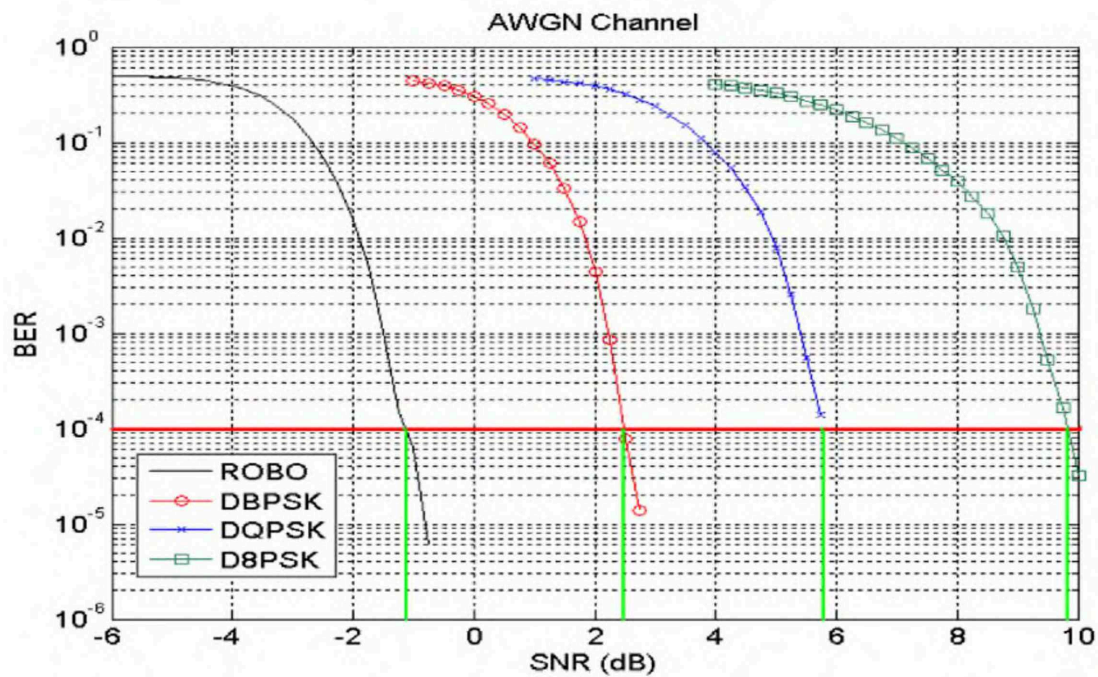


Abbildung 9: BER in Abhängigkeit von SNR und Modulationsart, Quelle: G3-PLC Alliance Präsentation [21]

2.4.2 Protokollebene

Im G3-OSI-Schichtenmodell liegt die Protokollebene über der der physikalischen Protokollebene.

Codierung

Die Implementierung von Datenwiederherstellungsschemata, wie z.B. Reed Solomon und Faltungscodierung, bieten die PLC Redundanzbits, die dem Empfänger die Wiederherstellung der Bits ermöglichen, die durch Hintergrund- und Impulsrauschen verloren gegangen sind. Mit diesem und anderen Mechanismen ist es möglich, Information trotz negativen SNR zu übertragen.

Routing

Ein PLC-Kommunikationskanal wird dynamisch über Routen aufgebaut. Jeder Teilnehmer kann dabei als Repeater interagieren. Eine Route kann sich über bis zu 14 Hops zu

anderen Teilnehmern erstrecken[16]. Diese Arbeit beschränkt sich auf Punkt-zu-Punkt-Verbindungen, um die Komplexität und die Vielfalt der möglichen Beobachtungsvarianten einzuschränken.

Verschlüsselung

Für die SM-PLC ist es wichtig, ausreichend Schutz vor Angriffen von außen zu bieten, da über das elektrische Energieversorgungsnetz und durch die einfache Zugänglichkeit der SM, ein leichter Zugriff auf das Netzwerk möglich ist [23][24]. Aus diesem Grund implementiert SM-PLC die Spezifikation der ITU [16], in der ein Sicherheitskonzept mit wechselnden Sicherheitsschlüsseln beschrieben ist. Nach Spezifikation der ITU ist der Pre Shared Key (PSK) ein eindeutiger Sicherheitsschlüssel eines Endgerätes, d.h. eines SM oder DG/DK. Ist dieser Sicherheitsschlüssel in der Liste des Personal Area Network (PAN)-Koordinators vorhanden, so kann sich ein Teilnehmer mit dem PAN-Netzwerk (DG/DK-Netzwerk) verbinden und bekommt einen weiteren Sicherheitsschlüssel, den Group Master Key (GMK), mitgeteilt. Der GMK ermöglicht es, mit einem Empfänger zu erfassen, welche Systemdaten (Datentransfer oder Verbindungsmanagement) in einem PLC-Netz gesendet werden. Mit dem GMK kann der Zweck, d.h. die Art der aufgezeichneten Frames festgestellt bzw. dekodiert werden, wodurch die Interpretation von Routing-Vorgängen ermöglicht wird. Diese Sicherheitsschlüssel unterliegen bei den Netzbetreibern einer hohen Geheimhaltungsstufe. Im Rahmen dieser Arbeit konnte keiner dieser Sicherheitsschlüssel erhalten werden und daher wird dieser Themenbereich ausgeklammert.

3 Normen

Das genaue Frequenzspektrum, das von PLC verwendet wird, hängt vom Kontinent und von dem Land ab, in dem es eingesetzt wird. Diese Bandpläne werden definiert durch die lokal zuständigen Normungskomitees, wie z.B. CENELEC in der EU, FCC in den USA und Association of Radio Industries and Businesses (ARIB) (Verband der Radioindustrien und -unternehmen) in Japan. CENELEC definiert beispielsweise für NB-PLC vier Bänder im 3 – 148,5 kHz-Spektrum. FCC NB-PLC ist hingegen definiert im Spektrum 9 – 490 kHz und ARIB im Spektrum von 10 – 450 kHz. Die lokalen Komitees legen Vorschriften für die Einhaltung der elektromagnetischen Kompatibilität und der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) fest.

Elektrische Geräte senden nun gewollt oder ungewollt Störsignale ins Stromnetz und können andere Teilnehmer, wie z.B. die PLC, beeinflussen. Um Fehlfunktionen zu vermeiden, werden in den EMV-Vorschriften eine Reihe von Emissions- und Störfestigkeitsgrenzen definiert, die jedes elektrische Gerät erfüllen muss. Für die PLC sind diese Emissionsgrenzwerte wichtig, da sie unter anderem die maximalen Pegel des übertragenen Kommunikationssignals beschränken. Im Zusammenhang zwischen diesen EMV-Vorschriften und der PLC spielt das Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (CISPR) eine grundlegende Rolle. CISPR ging aus der International Electrotechnical Commission (IEC) hervor und definiert EMV-Messvorschriften und Emissionslimitationen. CISPR hat in der europäischen Union nicht den Status einer direkt anzuwendenden CENELEC-Norm. CENELEC verwendet die Standards des CISPR als Grundlage für einzelne Europäische Normen (EN). Diese Harmonisiert CENELEC-Normen und Standards werden dann von den lokalen Komitees der EU-Mitglieder übernommen. Diese sind z.B. der Österreichische Verband für Elektrotechnik (OVE) in Österreich oder die Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (DKE) in Deutschland. Als Beispiel können zwei der grundlegend relevantesten EMV-Normen CISPR 22 und FCC Teil 15 mit Auswirkungen auf PLC genannt werden. Diese Normen legen EMV-Grenzwerte fest. Die FCC Teil 15 gilt für vermarktete Handelsprodukte in den USA. CISPR 22 ist für kommerzielle Produkte bestimmt, die außerhalb der USA vermarktet werden. Für die EU wurde CISPR 22 von CENELEC adaptiert und daraus die gültige Norm EN55022 erstellt [24]. Die EN55022 wurde mit 2018-9-1 zurückgezogen und durch andere ersetzt. Es sind mit Stand Juni 2022 mehrere Normen in Kraft, welche sich mit Produkteigenschaften von PLC-Betriebsmitteln sowie mit den EMV-Anforderungen an Geräten befassen. Diese sind jedoch alle gemäß ihrem Anwendungsbereich nicht für die Eigenschaften von elektrischen Energieversorgungsnetzen anwendbar. Im Folgenden wird nun detaillierter auf jene Normen eingegangen, welche im eigentlichen Sinn für diese Arbeit relevant sind.

3.1 CISPR 16-1 und EN 55016-2-1

Damit ein Messaufbau reproduzierbare und vor allem untereinander vergleichbare Ergebnisse bezüglich der konduktiven Emissionen liefert, werden Vorgaben bezüglich der Netzzugangsimpedanz und des Rauschens am Netz gemacht. Im CISPR 16-1-Standard wird der Aufbau einer Messung beschrieben. Die *EN 55016-2-1: Anforderungen an Geräte und Einrichtungen sowie Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit Teil 2-1: Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit – Messung der leitungsgeführten Störaussendung* basiert auf dem CISPR 16-1-Standard [25].

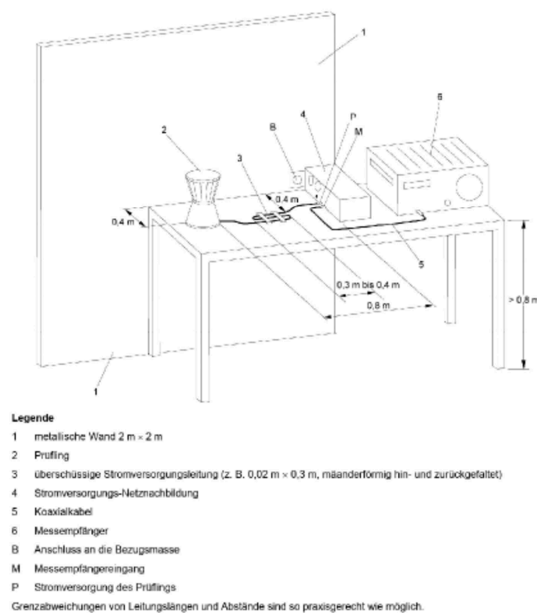


Abbildung 10: Prüfaufbau für Prüflinge, an die nur eine Stromversorgungsleitung angeschlossen ist, Quelle: EN 55016-2-1 [25] S.46, Bild 11

Dafür wird das zu prüfende Gerät, auch Device Under Test (DUT) genannt, an eine definierte Netznachbildung, kurz Line Impedance Stabilization Network (LISN), angeschlossen und mittels eines Spektrumanalysators gemessen. Die LISN hat dabei die Aufgabe, eine konstante Impedanz für das DUT zur Verfügung zu stellen und das Rauschen vom elektrischen Energieversorgungsnetz zu unterdrücken [24].

3.2 ÖVE/ÖNORM EN 50065-1

Zum Schutz vor Störungen und zur Gewährleistung der elektromagnetischen Verträglichkeit regelt die *ÖVE/ÖNORM EN 50065-1:2012 03 01 Signalübertragung auf elektrischen Niederspannungsnetzen im Frequenzbereich 3 kHz bis 148,5 kHz - Teil*

1: *Allgemeine Anforderungen, Frequenzbänder und elektromagnetische Störungen* [26] die Kommunikation über Stromnetze im Frequenzbereich von 3 – 148,5 kHz. Diese Norm beschreibt die korrekte Messung von maximal zugelassenen Signalpegeln der PLC-Übertragung und Grenzwerte der Störleistung mittels eines normierten Aufbaues einer LISN. Für SM-PLC ist der Fall von schmalbandigen Signalen zutreffend und es wird in den Grenzwerten unterschieden zwischen Geräten der Klasse 122, die für den allgemeinen Gebrauch sind und Geräten der Klasse 134, die mit höheren Grenzwerten im industriellen Bereich, vorgesehen sind. Für SM und DGs/DKs wird zusätzlich zwischen ein- und dreiphasigen Einrichtungen unterschieden. Im Detail fallen die SM in den Bereich von dreiphasigen Einrichtungen mit Übertragung auf einer Phase, während sich die DGs/DKs im Bereich von dreiphasigen Einrichtungen mit gleichzeitiger Übertragung zwischen Neutralleiter und allen Phasen befinden. Im Kapitel 7 der Norm sind Störgrenzwerte von 89 dB μ V bis 66 dB μ V (28 mV bis 3 mV) angegeben, diese gelten aber ausdrücklich für jene Frequenzen außerhalb des Teilfrequenzbandes, in dem das Gerät betrieben wird. D.h. sie gelten als maximal zulässige Störpegel in den an die PLC angrenzenden Frequenzbändern und begrenzen daher den Störeinfluss von außen her. Die ÖVE/ÖNORM EN 50065-1 ist daher für die Beurteilung von Störpegelwerten in Niederspannungsverteilnetzen nicht anwendbar.

3.3 ÖVE/ÖNORM EN 50065-2-3+A1

Ähnliches wie in der ÖVE/ÖNORM EN 50065-1 gilt auch für die *ÖVE/ÖNORM EN 50065-2-3+A1:2006 07 01 Signalübertragung auf elektrischen Niederspannungsnetzen im Frequenzbereich 3 kHz bis 148,5 kHz - Teil 2-3: Störfestigkeitsanforderungen an Netz-Datenübertragungsgeräte und -systeme, die im Frequenzbereich 3 kHz bis 95 kHz betrieben werden und für den Gebrauch durch Stromversorgungs- und -verteilungsunternehmen bestimmt sind* [27]. Auch die in dieser Norm genannten Anforderungen an Störgrenzwerte gelten für Frequenzen außerhalb des Teilfrequenzbandes, in dem das Gerät betrieben wird. Die ÖVE/ÖNORM EN 50065—2-3 ist daher ebenfalls für die Beurteilung von Störpegelwerten in Niederspannungsverteilernetzen nicht anwendbar.

3.4 ÖVE/ÖNORM EN 61000-2-2

Die maßgebliche Norm zur Beurteilung von Störgrößen im Niederspannungsnetz ist die *ÖVE/ÖNORM EN 61000-2-2 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 2-2: Umgebungsbedingungen - Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen und Signalübertragung in öffentlichen Niederspannungsnetzen* [28]. Es werden Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen und Signalübertragung in öffentlichen Niederspannungsnetzen definiert. Für diese Norm sind drei Ausgaben zu diskutieren, welche im Folgenden auszugsweise zitiert werden. Die Verträglichkeitspegel von Netzkommunikationssystemen werden allerdings in den verschiedenen Ausgaben der Norm unterschiedlich d.h. erst in den späteren Ausgaben

2019 und 2020 geregelt. Da im elektrischen Energieversorgungsnetz ältere Verbraucher existieren, die den alten Versionen der Norm entsprechen, ist die historische Entwicklung der Norm von Interesse.

3.4.1 Ausgabe 2003-04-01

Die Ausgabe 2003-04-01 war bis Juli 2017 noch in Kraft. Diese Version der Norm legte damals keinerlei Grenzwerte oder Verträglichkeitspegel für die Störaussendungen im Frequenzbereich von 3 kHz bis 150 kHz fest. Es wird ausdrücklich für das betroffene CEN-A-Frequenzband für 3 kHz bis 20 kHz sowie 20 kHz bis 148,5 kHz angemerkt: "Verträglichkeitspegel sind in Beratung".

3.4.2 Ausgabe 2019-07-01

Das Ausgabedatum war 2017-06 und das Zurückziehungsdatum der Ausgabe 2003 in 2020 08-01, d.h. die Ausgabe aus 2003 war bis 17.05.2022 noch immer in Kraft. In dieser Ausgabe wird erstmals ein Verträglichkeitspegel für symmetrische Spannungsverzerrungen oberhalb der 40. Oberschwingungsordnung bis 9 kHz, sowie von 9 kHz bis 30 kHz festgelegt. Tabelle 4 zeigt diesen Sachverhalt.

Frequenz	Werte	Anmerkung
3 bis 9 kHz	1,4% – 0,65%	3,22 V – 1,5 V
9 bis 30 kHz	129,5 auf 122 dB μ V	2,99 V auf 1,26 V
30 bis 150 kHz	keine	weiterhin „in Beratung“

Tabelle 4: EN 61000-2-2 Ausgabe 2019-07-01

3.4.3 Ausgabe 2020-06-01

Das Ausgabedatum der für die Ausgabe 2020-06-01 zugrunde liegenden IEC-Norm ist 2018-05. Das Zurückziehungsdatum der OVE-Ausgabe von 2019 war 2022-05-17. Erst die Ausgabe 2020 legt nun Verträglichkeitspegel für symmetrische Spannungsverzerrungen für das gesamte CEN-A fest. Siehe Tabelle 5.

Frequenz	Werte	Anmerkung
30 bis 50 kHz	122 auf 119 dB μ V	1,26 V auf 0,89 V
50 bis 150 kHz	113 auf 89 dB μ V	0,446 V auf 0,028 V

Tabelle 5: EN 61000-2-2 Ausgabe 2020-06-01

3.5 ÖVE/ÖNORM EN 61000-6-3

Der aktuell vorliegende Normenentwurf für die EN 61000-6-3 sieht vor, dass nun auch für das CEN-A maximal zulässige Störaussendepiegel eingeführt werden und zwar mit einem vergleichsweise geringen Abstand von nur 9 dB zum Verträglichkeitspegel [29]. Die *ÖVE/ÖNORM EN 61000-6-3 Die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Teil 6-3: Fachgrundnormen – Störaussendung für Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereiche sowie Kleinbetriebe* [30] gilt für jene Fälle, in denen keine andere Produktnorm einen maximalen Störaussendepiegel festlegt. Sollte z.B. der Störaussendepiegel von Aufzügen, Fahrtreppen oder Fahrsteigen festgestellt werden, gilt die dafür zutreffende Norm *ÖVE/ÖNORM EN 12015 Elektromagnetische Verträglichkeit — Produktfamilien-Norm für Aufzüge, Fahrtreppen und Fahrsteige Störaussendung*.

3.5.1 Ausgabe 2022-07-01

In der aktuellen Ausgabe wurden die maximal zulässigen Störaussendepiegel bis 150 kHz, d.h. im CEN-A-Frequenzband, noch nicht übernommen [31]. Dies bedeutet für die öffentlichen Verteilnetzbetreiber, dass weitere Betriebsmittel zugelassen und ans Netz angeschlossen werden, die die SM-PLC stören können. Diese zusätzlichen und auch die bereits bestehenden Betriebsmittel werden über ihre Lebensdauer im Netz verbleiben, was auch langfristig zu Störbeeinflussungen führen wird.

3.6 ÖNORM EN 12015

Die erlaubten Störaussendungen von Liften regelt die *Önorm EN 12015 Elektromagnetische Verträglichkeit — Produktfamilien-Norm für Aufzüge, Fahrtreppen und Fahrsteige Störaussendung*. Sie legt somit gesondert von ÖVE/ÖNORM EN 61000-6-3 andere erlaubte Störaussendepiegel fest. Nach den Festlegungen in dieser Norm darf jeder Lift 100 dB_μV bei 150 kHz aussenden. Dieser Wert passt mit dem bereits übermittelten Normenentwurf der EN61000-6-3 zusammen, in der der zukünftige Grenzwert für den Störaussendepiegel nur 9 dB unter dem Verträglichkeitspegel liegen wird. Die in der bereits bestehenden Norm EN 12015 festgehaltenen Grenzwerte für Störaussendungen durch Liftantriebe (100 dB_μV) liegt deutlich oberhalb des in der ÖVE/ÖNORM EN 61000-6-3 festgelegten Wertes mit 66 dB_μV sowie auch oberhalb des Verträglichkeitspegels von 89 dB_μV [32].

3.7 Zusammenfassung der Verträglichkeitspegel und Störaussendepiegel

Die Normungssituation mit Stand Juni 2022 sieht für CEN-A und FCC folgendes vor:

- CEN-A, 9 kHz – 150 kHz: Verträglichkeitspegel sind genormt und keine Störaussendepiegel werden geregelt.
- FCC, 150 kHz – 500 kHz: Verträglichkeitspegel sind nicht in Normen festgelegt und Störaussendepiegel sind nur für bestimmte Gerätegruppen implementiert. Die Störaussendepiegel allgemein sind erst in Entwicklung.

Abbildung 11 zeigt den Sachverhalt grafisch. Die schwarze Kurve zeigt den zulässigen maximalen Sendepiegel eines SM. Die gelbe Kurve zeigt die maximal zulässigen Störaussendepiegel im Normenentwurf der EN 61000-6-3 [29]. Die graue Kurve zeigt den aktuell geltenden Verträglichkeitspegel nach ÖVE/ÖNORM EN 61000-2-2. Der Abstand von 9 dB μ V des Störaussendepiegel im Normenentwurf zum Verträglichkeitspegel soll den parallelen Betrieb mehrerer Geräte gleichzeitig am Netz ermöglichen, da die Störaussendepiegel nur für je ein einzelnes Gerät gelten.

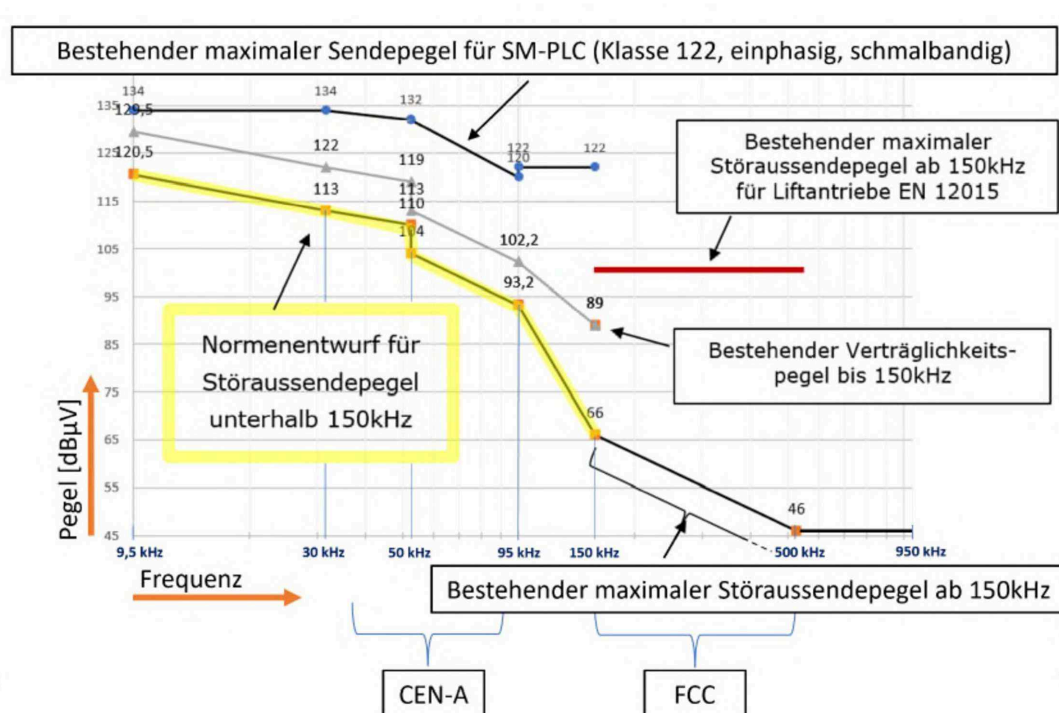


Abbildung 11: SM-PLC Sende-, Stör- und Verträglichkeitspegel aus den Normen

Zusammenfassend kann hier festgehalten werden, dass sich die Normensituation stetig weiterentwickelt. Mit der Festlegung von Störemissionsgrenzwerten in CEN-A wird es

zwar eine normative Regelung für Betriebsmittel (Geräte) in Kundenanlagen geben, aber der geringe Abstand von nur 9 dB zum Verträglichkeitspegel wird eine Herausforderung für den SM-PLC-Betrieb darstellen. Bei der kommenden Umsetzung der Neuerungen im Normenentwurf sind jedoch nicht bereits bestehenden Geräte betroffen, deren Störungen über die Lebensdauer im Netz weiter bestehen bleiben. Zusätzlich wird es auch Übergangsfristen für Lagerbestände usw. geben. Es muss daher leider erwartet werden, dass es zu einer Zunahme an Störbeeinflussungen im Niederspannungsnetz im CEN-A-Frequenzband kommen wird. Für die öffentlichen Verteilnetzbetreiber bedeutet die aktuelle Normungssituation, dass für die normative Beurteilung von Störeinflüssen auf die SM-PLC in CEN-A eine derzeit noch ungenügende Basis zur Verfügung steht.

4 Einflüsse auf die Übertragung

Es wird im Folgenden der Begriff „Störquellen“ differenziert betrachtet, da je nach Sichtweise aus der Telekommunikation oder aus der Energietechnik ein anderes Verständnis auftreten kann. Es wird stattdessen der Begriff Einflüsse auf die PLC verwendet. Mögliche Einflüsse auf die Übertragung von PLC-Signalen lassen sich in die Kategorien:

- aktiv einspeisende Störquellen
- Impedanzprobleme
- Dämpfung
- Funkabstrahlung/Interferenz

einteilen [33], [34]. In dieser Arbeit werden nur leitungsgebundene Signale, d.h. die ersten beiden Kategorien Impedanzprobleme (und zwar ohne Berücksichtigung der Subzyklusimpedanzprobleme [35]) und aktiv einspeisende Pegelquellen betrachtet. Zu den aktiven Quellen zählen jede Art von aktiv einspeisenden Pegelquellen oder leitungsgebundenen Störemissionen. Diese können unter anderem von Schaltnetzteilen, Leuchtmittel (LED), Wechselrichtern und diversen anderen Betriebsmitteln ausgehen. Die passiven Störquellen bezeichnen jede Art von Impedanzproblemen und Dämpfung. Deren Auswirkungen sind häufig Probleme mit der Netzimpedanz, die ein Signal durch Ableitung in ungewünschte Pfade oder durch Blockierung eines gewünschten Signalpfades dämpfen. Dies impliziert die Notwendigkeit, Signalpfade bidirektional zu messen, da es zu richtungsabhängig unterschiedlichen Dämpfungen kommen kann.

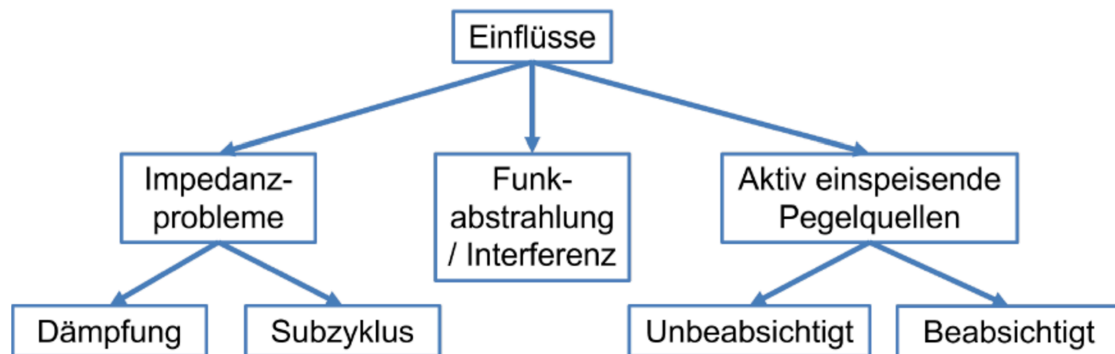


Abbildung 12: Einflüsse am Netz auf die PLC-Übertragung

4.1 Netztopologie

Neben den im Netz angeschlossenen Lasten hat auch die lokale Topologie des Netzes großen Einfluss auf die Impedanzverhältnisse im Netz und somit auf die Übertragungsqualität der PLC. Hierbei sind Leitungslängen und Querschnitte sowie die Anzahl an Verzweigungen und die örtliche Netztopologie maßgebend. Zudem ist die genaue Platzierung der SM,

DGs und aktiv einspeisenden Störpegelquellen in diesen Typologien von großer Bedeutung für die PLC-Kommunikationsqualität.

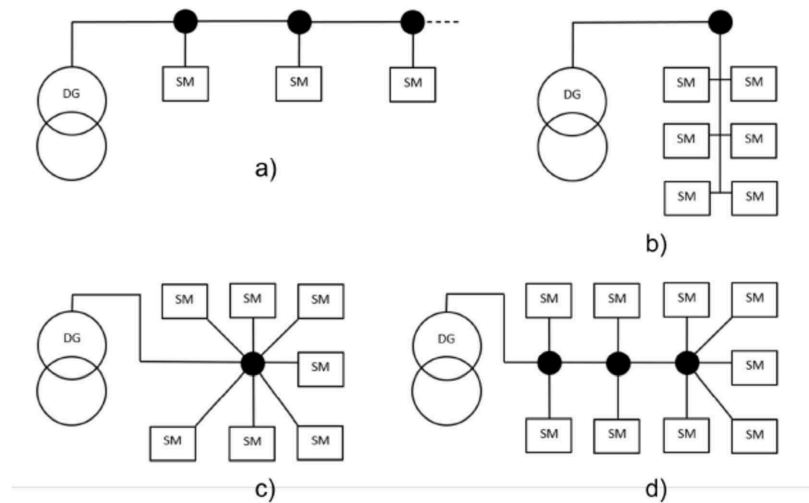


Abbildung 13: Prinzipien von Netztopologien

Die Kabel und die Struktur eines Niederspannungsnetzes werden betreffend der Eigenschaften zur elektrischen Energieverteilung ausgelegt. Es werden keine zusätzlichen Maßnahmen getroffen, um mögliches Übersprechen oder andere Störeinflüsse im Bereich höherer Frequenzen abzumindern. Die PLC verwendet im Vergleich zur Energieversorgung, die mit hohen Spannungen und niedrigen Frequenzen arbeitet, niedrige Spannungen und hohe Frequenzen. Diese Tatsache und ein volatiles Lastverhalten am Netz wirken sich daher auf die Datenübertragung der SM durch unterschiedliche Effekte im Rauschen und in der Dämpfung aus[4]. Folglich ist zu erörtern, welcher Einfluss in einem einzelnen Haushalt und darüber hinaus im Niederspannungsnetz das SM Signal so stark beeinflussen oder abschwächen kann, dass eine einwandfreie Kommunikation nicht mehr gewährleistet ist.

Abbildung 13 zeigt einige Beispiele verschiedener Netztopologien. Eine Perlenkettentopologie, siehe Abbildung 13 a), entsteht durch serielle aneinander Schaltung von Leitungen und Kundenanlagen z.B. in einer Gegend mit Einfamilienhäusern. Die Weintrauben-, Abbildung 13 b), und Sterntopologie, Abbildung 13 c), entstehen durch Zusammenschaltung an einem gemeinsamen Punkt, wobei bei der Weintraubentopologie die SM nahe beieinander in einem gemeinsamen Zählerraum und an einem von der Niederspannungshauptverteilung (NSHV) und vom Transformator weiter entfernten Punkt, wie einem Verteilerkasten, sitzen. Dies ist z.B. vorzufinden in großstädtischen Versorgungsstrukturen. Bei der Sterntopologie befinden sich die SM an den einzelnen Abgängen der NSHV. Eine Baumtopologie, siehe Abbildung 13 d), die eine Kombination aus Perlenketten-, Weintrauben- und Sterntopologie darstellt, liegt beispielsweise bei einer

Verkabelung in Steigleitungen zu Stockwerksverteilern vor. Neben diesen Grundarten gibt es auch Mischformen, wie z.B. eine Perlenkette mit angeschlossener Baumtopologie.

Die Unterscheidung dieser Topologietypen ist insofern wichtig, da bestimmte Grundeigenschaften der SM-PLC-Systematik je nach Art der Netztopologie besser oder aber auch schlechter zur Wirkung kommen können. Als Beispiel sei hier die Repeaterfunktionen eines SM genannt, welche bei einer Sternentopologie weniger nützlich wirksam ist.

4.2 Impedanzen des Netzes und von Leitungen

Die technischen Eigenschaften des elektrischen Energieversorgungsnetzes sind meist nicht beeinflussbar und die sogenannte Netzimpedanz zeigt sich als eine maßgebliche Größe, welche die Qualität der PLC-Übertragung seitens des Netzes bestimmt. Insgesamt bestehen elektrische Energieversorgungsnetze aus einer großen Ansammlung von Elementen, wie von Widerständen, Spulen und Kondensatoren. Die resultierende Netzimpedanz kann theoretisch zwar sehr genau bestimmt und dargestellt werden, in der Praxis allerdings kann sie auf Grund der Komplexität des Zusammenwirkens verschiedener Einflüsse vor allem bei höheren Frequenzen nicht genau berechnet werden. Es sind daher Messungen der einzige Weg, um hier genauere Kenntnisse zu erlangen [36]. Die Netzimpedanz ist:

- frequenzabhängig,
- tageszeitabhängig,
- örtlich stark unterschiedlich (50 m sind hier bereits eine vergleichsweise große Distanz) und
- je nach Abnehmertopologie und Betriebsmittel in den Kundenanlagen sehr stark verschieden.
- Außerdem zeigen sich noch starke Abhängigkeiten von nichtlinearen Betriebsmitteln, wie z.B. PV-Einspeisung und hier wiederum sehr stark Abhängigkeiten vom tageszeitlichen Verlauf der Sonneneinstrahlung.

4.2.1 Geeignete Ersatzschaltung

Für die Definition der zu untersuchenden Impedanzen ist im ersten Schritt ein geeignetes Bild einer Ersatzschaltung zu finden. Abbildung 14 zeigt ein einfaches Modell einer Doppelleitung für ein kurzes Leitungsstück mit der Länge dz [37].

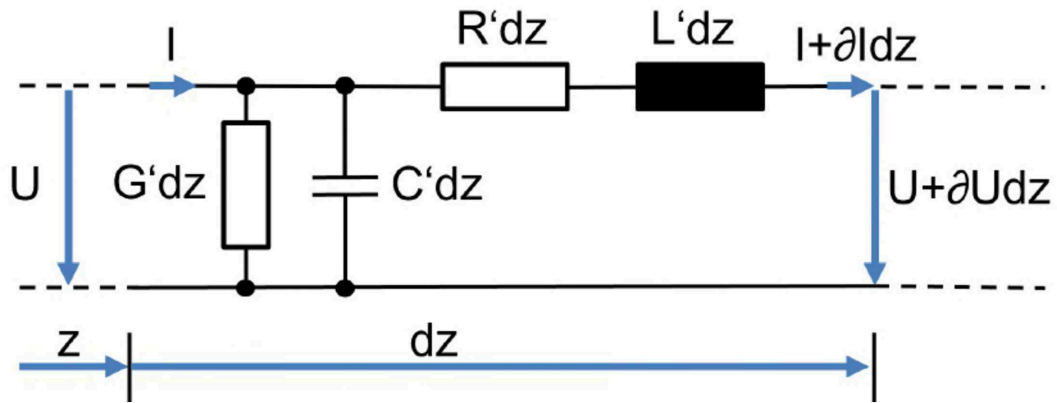


Abbildung 14: Leitungsgleichungen einer Doppelleitung

Da man im Niederspannungsnetz bei der PLC häufig 5-polige Kabel auffindet, ist dieses klassische Modell für die Betrachtung nicht zielführend. Besser geeignet ist das Modell wie in Abbildung 15 eines symmetrischen Elementar-Querachtpols [38].

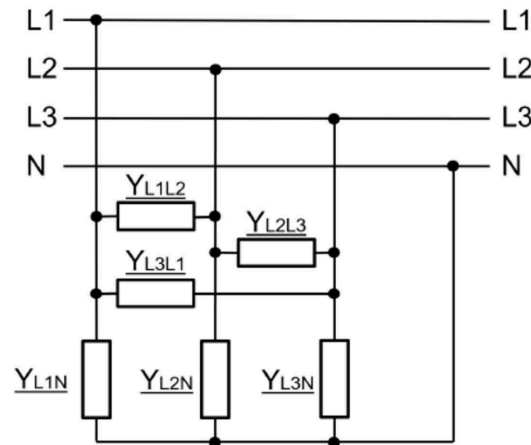


Abbildung 15: Symmetrische Admittanzkomponenten eines symmetrischen Elementar-Querachtpols

Jedoch hat selbst dieses Modell Probleme, da mögliche Querkopplungen zum umgebenden Medium, wie z.B. bei Verlegung in der Erde, nicht berücksichtigt werden. Abbildung 16

zeigt das Problem der Thematik mit Einschränkung der Betrachtung der auftretenden Kabelkapazitäten gegen die Erde.

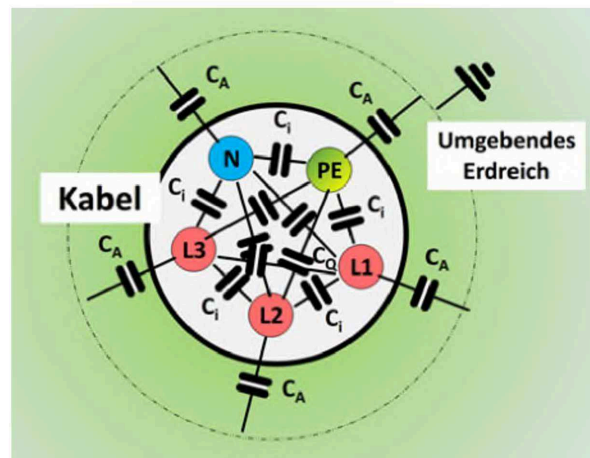


Abbildung 16: Beispielhafte Darstellung der möglichen parasitäre Kapazitäten eines 5-poligen Kabels im Erdreich

Nach der Graphentheorie [39] erhält man die Anzahl möglicher Kopplungen für n-polige Kabel über Gleichung 1

$$\frac{n \cdot (n - 1)}{2} \quad (1)$$

Bei Kabeln ist das umgebende Medium als zusätzlicher Leiter zu zählen und es wird mit $n + 1$ gerechnet.

Anzahl der Pole	Anzahl der Kopplungen mit umgebenden Medium
5	15
4	10
3	6
2	3

Tabelle 6: Anzahl der Kopplungen mit umgebendem Medium für verschiedenpolige Kabel

Tabelle 6 gibt eine Übersicht über die Anzahl von Kopplungen für verschiedenpolige Kabel. Für eine umfassende Beschreibung des Systems eines 5-poligen Kabels mit umgebendem Erdreich müsste dessen komplexe $(n + 1) \times (n + 1)$ -Streumatrix (engl.

scattering-matrix oder einfach S-Matrix) berechnet werden [19].

$$\underline{S} = \begin{pmatrix} \underline{S}_{11} & \underline{S}_{12} & \underline{S}_{13} & \underline{S}_{14} & \underline{S}_{15} & \underline{S}_{16} \\ \underline{S}_{21} & \underline{S}_{22} & \underline{S}_{23} & \underline{S}_{24} & \underline{S}_{25} & \underline{S}_{26} \\ \underline{S}_{31} & \underline{S}_{32} & \underline{S}_{33} & \underline{S}_{34} & \underline{S}_{35} & \underline{S}_{36} \\ \underline{S}_{41} & \underline{S}_{42} & \underline{S}_{43} & \underline{S}_{44} & \underline{S}_{45} & \underline{S}_{46} \\ \underline{S}_{51} & \underline{S}_{52} & \underline{S}_{53} & \underline{S}_{54} & \underline{S}_{55} & \underline{S}_{56} \\ \underline{S}_{61} & \underline{S}_{62} & \underline{S}_{63} & \underline{S}_{64} & \underline{S}_{65} & \underline{S}_{66} \end{pmatrix}$$

Dieses System ist praktisch unter Netzspannung nicht ermittelbar. Eine Wellenbetrachtung ist angesichts der Dimensionen eines Niederspannungsnetzes und dessen Dämpfung auch nicht nötig. Es wird deswegen auf die mit einem Impedance Measurement Device (IMD) messbaren Impedanzen eingeschränkt.

4.2.2 Impedanzmessung in der elektrischen Energietechnik

Als 50-Hz-Netzimpedanz wird die Impedanz, die ein Installationstester misst, definiert. Diese Messung geschieht durch Aufbringen einer ohmschen Last und ermittelt nur die seriellen Elemente im Messkreis [40]. Der Begriff der Netzimpedanz muss nun differenzierter betrachtet werden. Aus Sicht des Anschlusspunktes, d.h. des Zugangspunktes, eines SM findet dieses eine Parallelschaltung aller Netzelemente vor. Dies wird mit einem neuen Begriff die Zugangsimpedanz genannt. Die Zugangsimpedanz wird von darauf spezialisierten Impedanzmessgeräten mit unterschiedlichen Messprinzipien erfasst, nicht jedoch von einem 50-Hz-Netzimpedanzmeßgerät.

Parallelschaltung gleicher Impedanzen

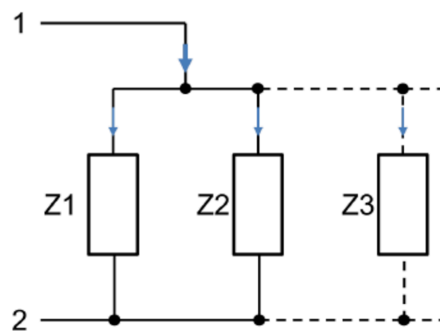


Abbildung 17: Einflüsse von Impedanzen in der Parallelschaltung

Abbildung 17 zeigt die Parallelschaltung von Impedanzen, wie sie z.B. in einer Niederspannungshauptverteilung oder in den Zählerräumen vorliegt. Je mehr Impedanzen

parallel geschaltet sind, um so mehr Signalleistungsaufteilung entsteht in den einzelnen Abzweigen. Um diesen Einfluss in Dezibel abzuschätzen, werden in Tabelle 7 Beispiele der Berechnungen der Aufteilung zweier Impedanzen mit unterschiedlichen Verhältnissen aufgezeigt.

Z1	Z2	Leistung/Ströme im Abzweig mit höherer Impedanz bei Parallelschaltung
1	1	-3 dB
1	5	-7 dB
1	10	-10 dB
1	100	-20 dB

Tabelle 7: Einfluss von Impedanzverhältnissen

Bei einem Verhältnis von Z1 zu Z2 mit 1 zu 1 ist zu sehen, dass man einen Signalleistungsverlust von -3 dB in jedem der beiden Abzweige hätte. Hätte man mehr als zwei Impedanzen mit denselben Werten parallel, würde dieser Signalleistungsverlust im Abzweig mit höherer Impedanz mit ansteigen. Ein Beispiel mit Z1 aus 1 und Z2 aus 99 parallelen Impedanzen desselben Wertes wie Z1 zeigt einen Signalleistungsverlust im Abzweig mit höherer Impedanz um -20 dB. Dieser Einfluss ist, im Vergleich zu den maximal nach Norm möglichen Pegeln von bis zu 134 dB_{μV}, nicht sehr hoch. Kommen nun aktiv einspeisende Störquellen dazu, so kann es sein, dass eine Kombination beider Einflüsse zu niedrigeren SNR führt und die Kommunikation im schlechtesten Fall verhindert wird.

5 Smart Meter Testaufbau zur Überprüfung der Kommunikation

Für Messungen im Labor wurde ein Messplatz geplant und konstruiert. Er soll mit einer großen Anschlussleistung von 44 kW die Möglichkeit bieten, dementsprechend große Lasten betreiben und untersuchen zu können. Solche großen Leistungen treten unter anderem beim Laden von Elektroautos oder beim Betrieb großer Kapazitäten über den Testaufbau auf. Weiters wird durch die großen benötigten Querschnitte für die hohe Anschlussleistung, die Zugangsimpedanz und somit die Dämpfung bis zur NSHV in der Trafostation für folgende Kanalmessungen gering gehalten. Der Testaufbau wurde nach hochfrequenztechnischen Anforderungen mit definierten Leitungslängen und Abständen implementiert, um ein möglichst ideales Kommunikationsmedium für die PLC zu schaffen, in das gezielt Netzelemente eingebracht werden können. Er ist mit schutztechnischen Elementen wie Sicherungen, Notaus, Fehlerstromschutzschaltern und Leistungsschutzschaltern ausgestattet, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Für den Betrieb kommen die ÖVE/ÖNORM Normen EN50110 Betrieb elektrischer Anlagen regelt und die ÖVE/ÖNORM Norm EN50191 Errichten und Betreiben elektrischer Prüfanlagen zur Anwendung. Der ganze Aufbau wurde mittels Installationstesters, siehe Anhang 8.6, auf Isolationsfehler und auf das sichere Auslösen der Fehlerstrom- und Leistungsschutzschalter getestet und es wurde ein entsprechendes Prüfprotokoll, siehe Anhang 8.1, erstellt.

5.1 Schaltung Testaufbau Netzzugangsseite

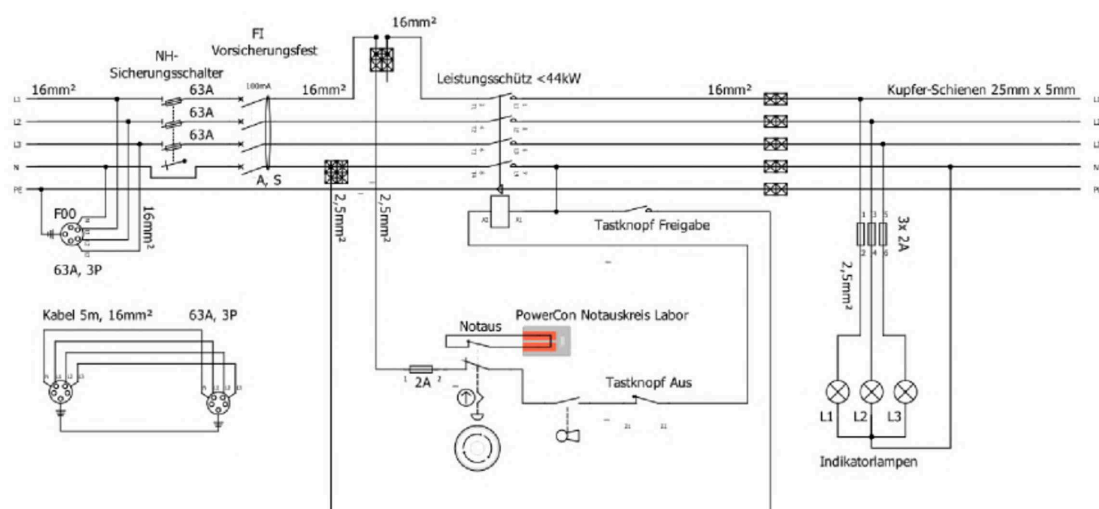


Abbildung 18: SM-Testaufbau Netzzugangsseite

In der Schaltung in Abbildung 18 ist der erste Teil des Testaufbaues mit dem Leistungseingang dargestellt. Am Leistungseingang in den SM-Testaufbau, der über eine 63 A CEE-Dose erfolgt, befinden sich schaltbare NH-Sicherungen. Direkt danach befindet sich ein vorsicherungsloser Fehlerstromschutzschalter der Type A, S mit einem Bemessungsfehlerstrom von 100 mA. Über eine Ansteuerung bestehend aus je einem Tastschalter für In- und einen für Außerbetriebnahme des Testaufbaues wird ein Leistungsschutz geschaltet. Ein Schlüsselschalter verhindert eine unbeabsichtigte Inbetriebnahme. Drei Indikationslampen zeigen die Versorgung der nachfolgenden Elemente mit Spannungen auf den drei Phasen an. Die drei Phasen sind nach Vorbild eines Zählerraumes mit Kupferschienen von 25 mm x 5 mm ausgeführt, an denen mit Schraubsicherungen von 40 A die einzelnen Abgänge, zu den SM angeschlossen sind. Siehe Abbildung 19.

5.2 Schaltung Testaufbau-Abgänge für die SM

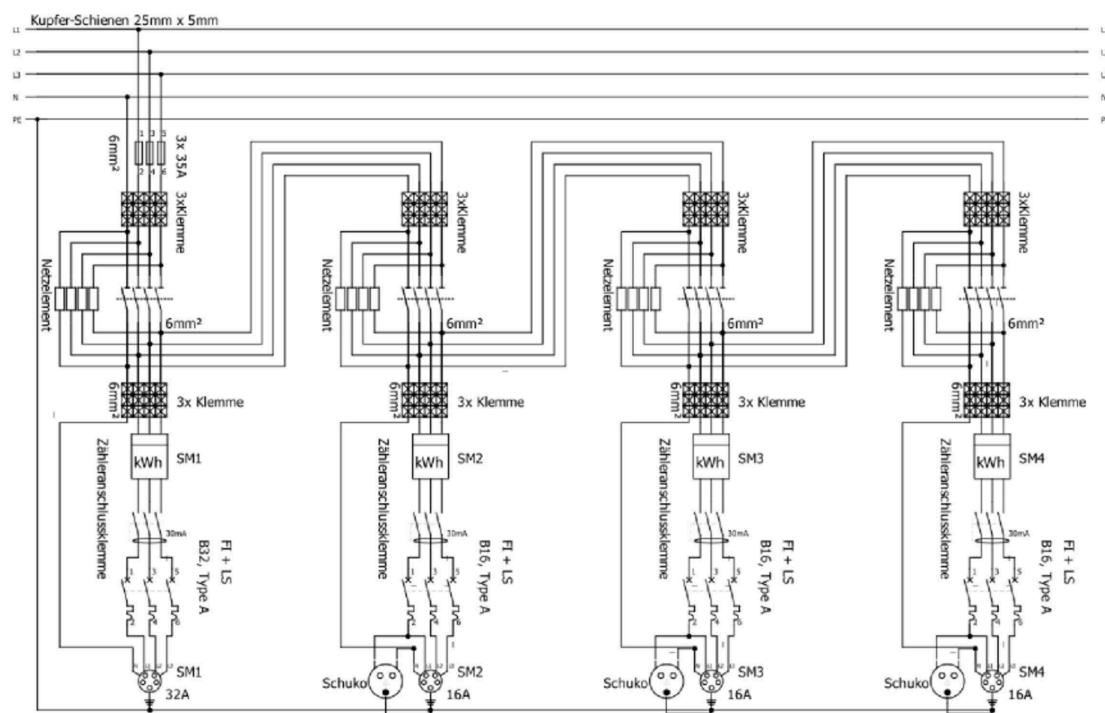


Abbildung 19: SM-Testaufbau Abgänge

Es besteht die Möglichkeit bis zu zwölf SM gleichzeitig mit dazwischen gekoppelten Netzelementen zu betreiben, um unterschiedliche Szenarien für Messungen abbilden und untersuchen zu können. Die Netzelemente lassen sich hierbei unterbrechungsfrei hinzu- oder wegschalten. Dies hat den Vorteil, auf einfache Art den Effekt von Netzelementen

durch Zu- und Wegschalten zu registrieren. Die Schaltung aus Abbildung 19 ist in gleicher Art und Weise für die SM 5 – 8 und SM 9 – 12 fortgesetzt, wobei jede dieser Reihen auch am Messplatz so zu finden ist und eine Perlenstruktur darstellt, in der die Netzelemente seriell eingebracht werden können. Siehe dazu auch Abbildung 22.

5.3 Verwendung des SM-Aufbaus

Bei Messungen von Netzelementen ist zu beachten, dass diese bei hohen Frequenzen nicht mehr als konzentrierte Bauelemente betrachtet werden können und bei jedem verwendeten Element Resonanzerscheinungen in den betrachteten Frequenzen bis 500 kHz auftreten können, wie im Kapitel Ersatzschaltbilder für Induktivitäten und Kapazitäten 6.1.2 erläutert werden wird. Die Vorteile der Verwendung des Testaufbaues zeigen sich z.B. in der Möglichkeit der Messung von Kabeln an einem definierten Anschlusspunkt und das einfache Einbringen einer dreiphasigen LISN als Netzelement zur Herstellung einer ungestörten Umgebung und zum Messen diverser Lasten.



Abbildung 20: SM-Testaufbau Frontansicht mit offenem Verteilerkasten



Abbildung 21: SM-Testaufbau Seitenansicht



Abbildung 22: SM-Testaufbau Rückseite

6 Messungen

6.1 Impedanzen von Netzelementen

Die PLC der SM wird zwischen Phase-Neutralleiter eingekoppelt und die Messung der Impedanzen von Netzelementen ermöglicht Rückschlüsse über das Verhalten der Einkopplung sowie über die Aufteilung von Signalströmen. Die Messung von Phase-Phase-Impedanzen hingegen zeigt mögliches Überkoppeln der PLC zwischen einzelnen Phasen und deren Transmission über alternative Signalpfade. Diese wird besonders in höheren Frequenzen relevant.

6.1.1 Methodik: Messaufbau Impedanzmessung

Bei dreiphasiger Betrachtung wird die Messung Phase-Neutralleiter als Messung im Stern bezeichnet und bei Messung Phase-Phase als Messung im Dreieck. Im Folgenden werden Impedanzmessungen von 1 Hz bis 500 kHz mittels eines IMD nach dem resistiven Shunt-On Prinzip [41] durchgeführt, siehe Abbildung 23. Beim verwendeten IMD ONIS-690V der Firma morEnergy, siehe 8.2, tritt bei den Messergebnissen knapp vor -180° Phasenwinkel bei Schwankungen des Messsignals der Effekt auf, dass das Gerät plötzlich 180° anzeigt bzw. umgekehrt. In den Phasendiagrammen der Messungen können so Sprünge zwischen 180° und -180° auftreten. Diese sind der über die Messungen einheitlichen Darstellung geschuldet und keine Messfehler. Der große Vorteil des IMD ONIS-690V ist das Alleinstellungsmerkmal als erhältliches Gerät am Markt zu sein, dass bis 500 kHz messen zu kann. Somit können auch Messungen für das FCC durchgeführt werden.

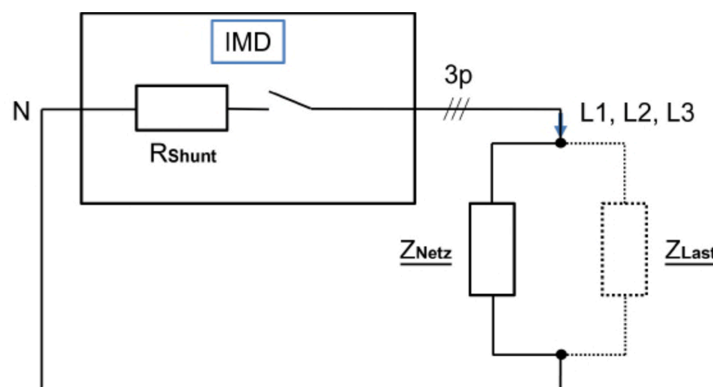


Abbildung 23: Messprinzip IMD

6.1.2 Methodik: Messung der Impedanzen von Kabeln

Für die Messungen an verschiedenen Kabeln wird, wie in Abbildung 24 dargestellt, an beiden Enden des DUT die Gesamtimpedanz im Anschlusspunkt ein- oder dreiphasig gemessen und danach mittels komplexer Differenzbildung das Netzelement dazwischen bestimmt. Ein Ende der zu messenden Netzelemente befindet sich dabei jeweils im Leerlauf. Anhand von Abbildung 15 und 16 ist ersichtlich, dass bei der Messung im Stern und bei der Messung im Dreieck andere Impedanzverläufe zu erkennen sind. Bei Belastung der Kabel mit kapazitiven oder induktiven Lasten würden sich die Resonanzstellen in den Bildern dementsprechend verschieben.

Es wurde versucht, den Einfluss von Lasten auf die lokale Netzimpedanz, wie in Abbildung 23 rechts angedeutet, zu messen. Diese Ergebnisse stellen sich als wenig aussagekräftig heraus, da aufgrund der bereits niedrigen Netzimpedanz im Anschlusspunkt weitere dazu parallele Lasten kaum Einfluss zeigen oder auf Grund der dann zu großen benötigten Ströme für eine Messung nicht möglich ist.

Für die Messungen wurden die Parameter nach Tabelle 8 gewählt.

Parametertyp	Parameterwert	Beschreibung
Modus der Messung	Fast Mode	Anregung mit breitbandigem Laststrom
Zyklusanzahl	20 Zyklen	Einzelne Zyklen-Messergebnisse werden zu einem Messergebnis zusammengefasst
Schrittweite	50 Hz	Frequenzabstand der einzelnen Messpunkte

Tabelle 8: Gewählte Parameter für Impedanzmessungen

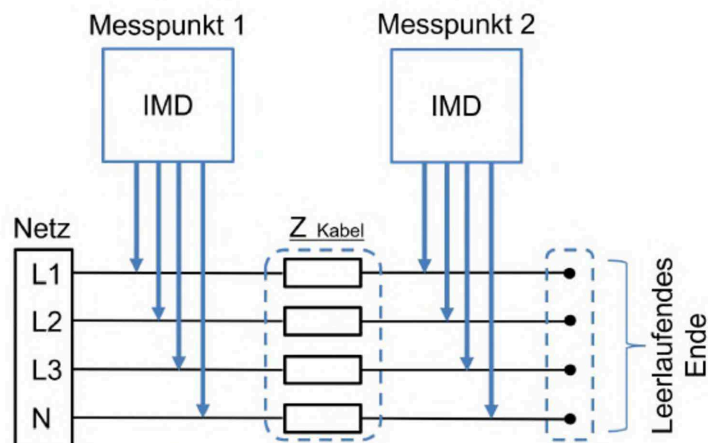


Abbildung 24: Kabelmessprinzip IMD

Ersatzschaltbilder für Induktivitäten und Kapazitäten

Impedanzmessungen bis 500 kHz ergeben, dass bei höheren Frequenzen keine konzentrierten Bauelemente mehr vorliegen. Es sind deshalb die entsprechenden Ersatzschaltbilder zu verwenden. Diese besitzen serielle und parallele Resonanzstellen. Die Abbildungen 25 bis 28 zeigen die aus einer Simulation generierten Betrags- und Phasengänge eines Modells einer real auftretenden Kapazität, siehe Abbildung 25 und einer real auftretenden Induktivität, siehe Abbildung 27, die die Kommunikation in der PLC beeinflussen können.

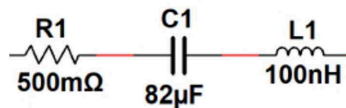


Abbildung 25: Ersatzschaltbild einer realen Kapazität

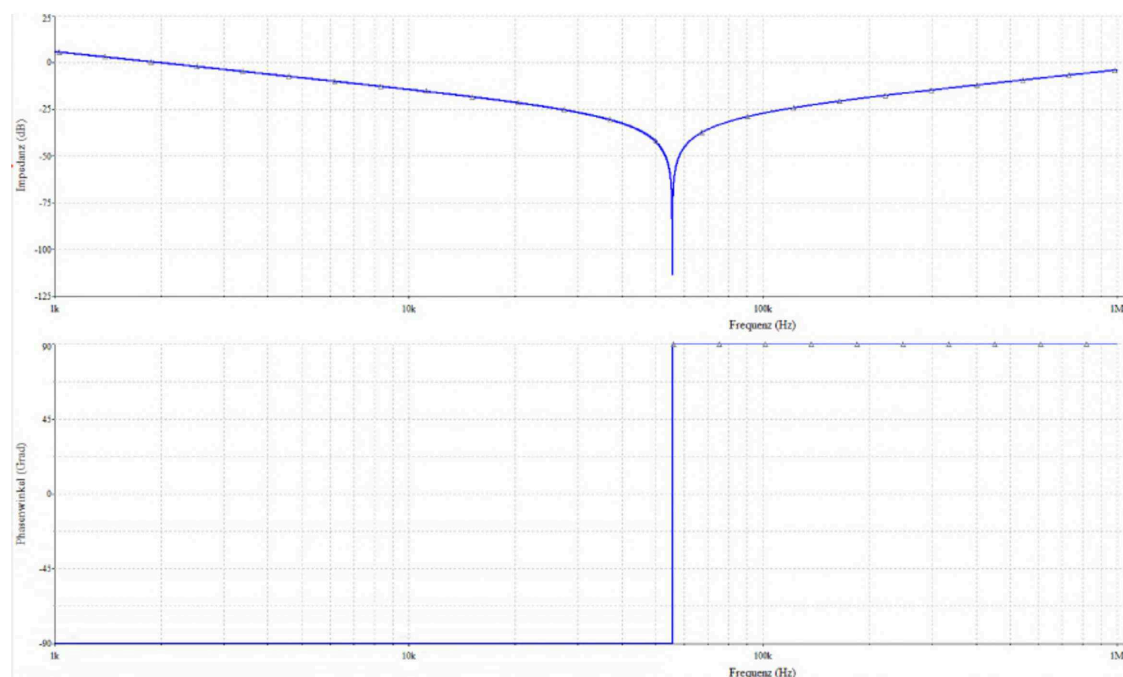


Abbildung 26: Bodediagramm der Impedanz des Ersatzschaltbildes einer realen Kapazität

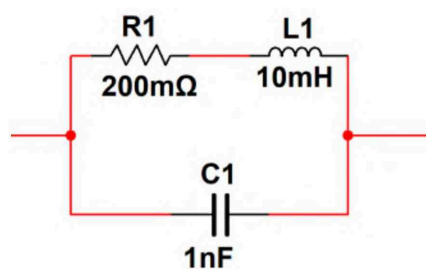


Abbildung 27: Ersatzschaltbild einer realen Induktivität

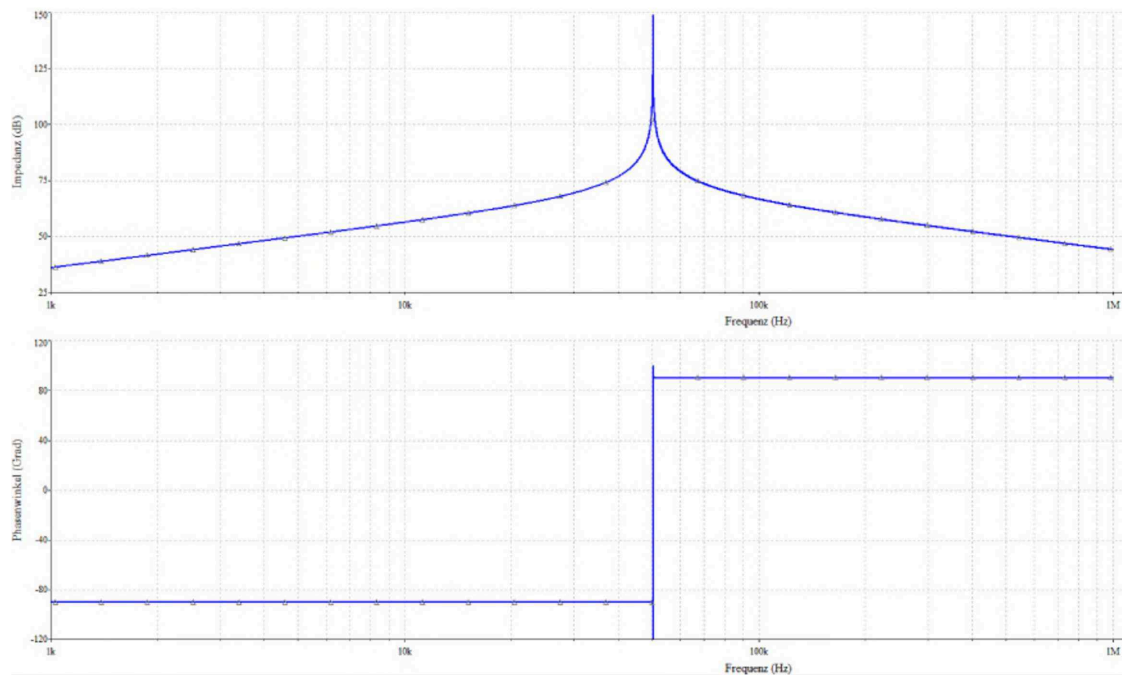


Abbildung 28: Bodediagramm der Impedanz des Ersatzschaltbildes einer realen Induktivität

Stromverdrängung

Eine höhere Induktivität bei höheren Frequenzen, wie sie in den Messungen dieses Kapitels vorkommen, kann erklärt werden durch die Stromverdrängung, die unter dem Begriff des Skin效ekts bekannt ist [42]. Der Strom verteilt sich bei den höheren Frequenzen nicht mehr gleichmäßig über den Querschnitt des Kabels, sondern fließt im Wesentlichen in der Randzone des Leiters mit einer Eindringtiefe δ , gemäß der Gleichung:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma \cdot \mu}} \quad (2)$$

Es ergibt sich bei 50 Hz eine Eindringtiefe von 10mm und bei 500 kHz eine Eindringtiefe von 0,1 mm. Dadurch entsteht bei einer größeren Gesamtfläche eines runden Querschnitts von 95 mm² im Vergleich zu einem Querschnitt von 16 mm² eine bessere Leitfähigkeit für Signale höherer Frequenzen. Es ist jedoch unterschiedlich zu betrachten, ob es sich um eine starre oder eine feindrähtige Ausführung des Kabel handelt, da sich dementsprechend der Skin effekt anders auswirkt.

6.1.3 Impedanzen im Anschlusspunkt am SM-Messaufbau

Abbildung 29 und Abbildung 30 zeigen eine Messung der Impedanzen am Netzanschlusspunkt des SM-Messplatzes. Zwischen dem Anschlusspunkt und dem Transformator zur 20 kV Mittelspannung liegen parallel zwei ca. 100 m lange Kabel der Type H07RN-F 4G95 mit $4 \times 95 \text{ mm}^2$ und einem separaten Erdungskabel mit $1 \times 95 \text{ mm}^2$. Zur Zeit der Messung sind im Labor keine Geräte angeschlossen, welche die Messung beeinflussen können. Das Labor befindet sich in einem dreistöckigen „ruhigen“ Bürogebäude mit vergleichsweise geringer Personenfrequenz. Die Einflüsse anderer Betriebsmittel im Gebäude können durch den Direktanschluss an der TST näherungsweise vernachlässigt werden.

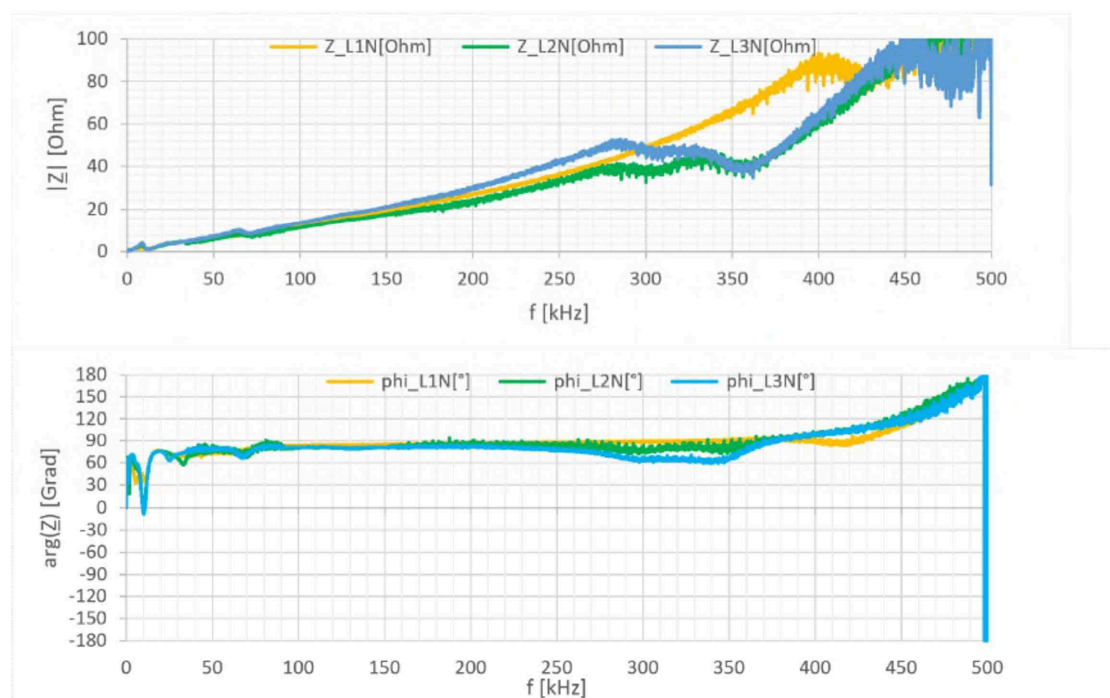


Abbildung 29: Phase-Neutraleiter-Impedanzen im Anschlusspunkt am SM-Messplatz

Abbildung 29 zeigt den Verlauf der Phase-Neutraleiter-Zugangsimpedanzen und Abbildung 30 zeigt den Verlauf der Phase-Phase-Zugangsimpedanzen an diesem Anschlusspunkt. Die Messwerte am vermessenen Anschlusspunkt werden teilweise verwendet, um die Impedanzen angeschlossener Kabel rückzurechnen. Die gelbe Kurve in Abbildung 29 zeigt den Verlauf des Betrags der Impedanz und den dazugehörigen Phasengang auf der Phase L1 gegen den Neutraleiter. Zu sehen sind Impedanzbetragsmaxima bei allen Phase-Neutraleiter-Impedanzen zwischen 250 kHz und 350 kHz. Unter 250 kHz zeigt sich der typische induktive Verlauf eines Transformators.

Über 350 kHz und je näher man der oberen Grenze von 500 kHz kommt, um so stärker zeigt sich ein kapazitives Verhalten. Ab 430 kHz ist ein Rauschen auf allen Phase-Neutralleiter-Impedanzen zu erkennen, das laut dem Hersteller des Messgerätes erfahrungsgemäß von Schaltvorgängen am Netz kommen kann.

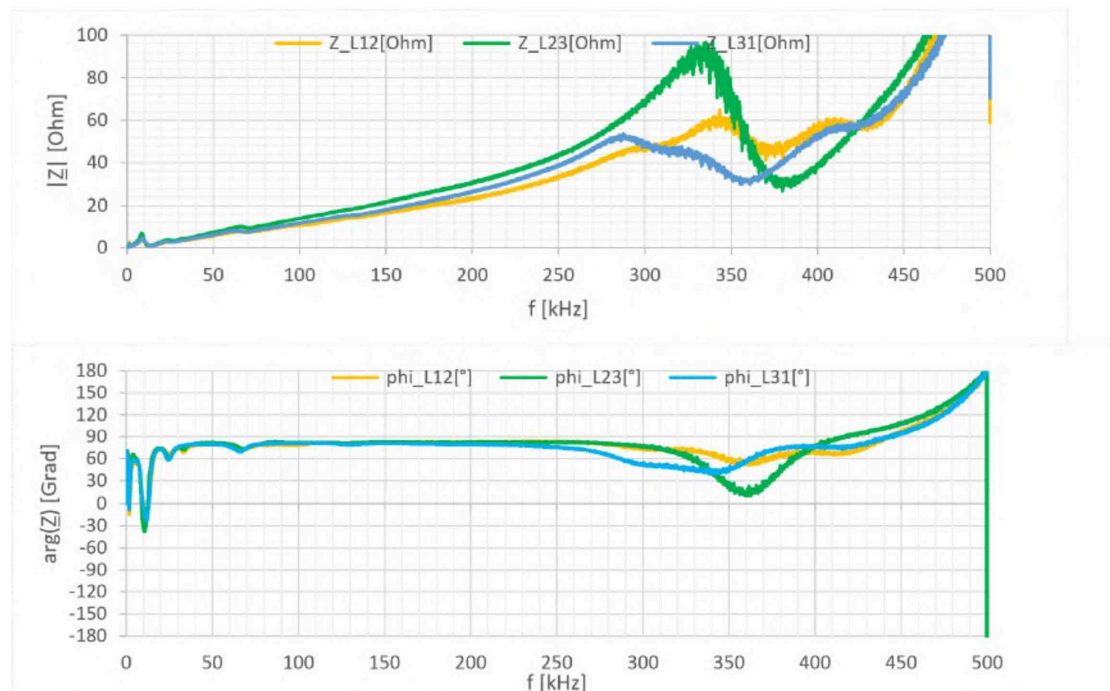


Abbildung 30: Phase-Phase-Impedanzen im Anschlusspunkt am SM-Messplatz

Die gelbe Kurve in Abbildung 30 zeigt den Verlauf des Betrags der Impedanz und den dazugehörigen Phasengang auf der Phase L1 gegen Phase L2. Auffällig bei allen Phase-Phase-Impedanzen sind Impedanzbetragsmaxima zwischen 250 kHz und 350 kHz. Unter 250 kHz zeigt sich, wie bei den Phase-Neutralleiter-Messergebnissen, der typische induktive Verlauf eines Transformators. Ab 350 kHz und je näher man der oberen Grenze von 500 kHz kommt, um so ausgeprägter ist ein kapazitives Verhalten sichtbar. Allerdings sind hier weitere lokale Impedanzbetragsminima zwischen 400 kHz und 450 kHz zu erkennen. Bei Frequenzen unter 50 kHz wäre eine Kopplung zwischen den Phasen gut möglich.

Für ein SM zeigt sich aus den Impedanzen eine geringere Dämpfung und besseres Übersprechen zwischen den Phasen im CEN-A-Frequenzband als in FCC am Anschlusspunkt des SM-Messaufbaus. Ab 430 kHz ist die Dämpfung sehr hoch und damit erwartete Übertragungsqualität bis in die TST gering anzunehmen.

6.1.4 Niederspannungshauptverteilung

In Abbildung 31 und Abbildung 32 wurde an der NSHV des Bürogebäudes direkt beim Netztransformator gemessen. Bei den Messungen zeigt sich das überwiegend induktive Verhalten des Transformators. Der Betrag steigt auf allen Phasen annähernd linear von 1 Hz bis 150 kHz an. Ab 300 kHz wird der Anstieg größer. Auffällig sind die Impedanzbetragsmaxima bei 500 kHz bei den Phase-Neutralleiter- und Phase-Phase-Impedanzen bei denen anhand des Phasenganges sichtbar ist, wie das induktive Verhalten in ein kapazitives Verhalten übergeht.

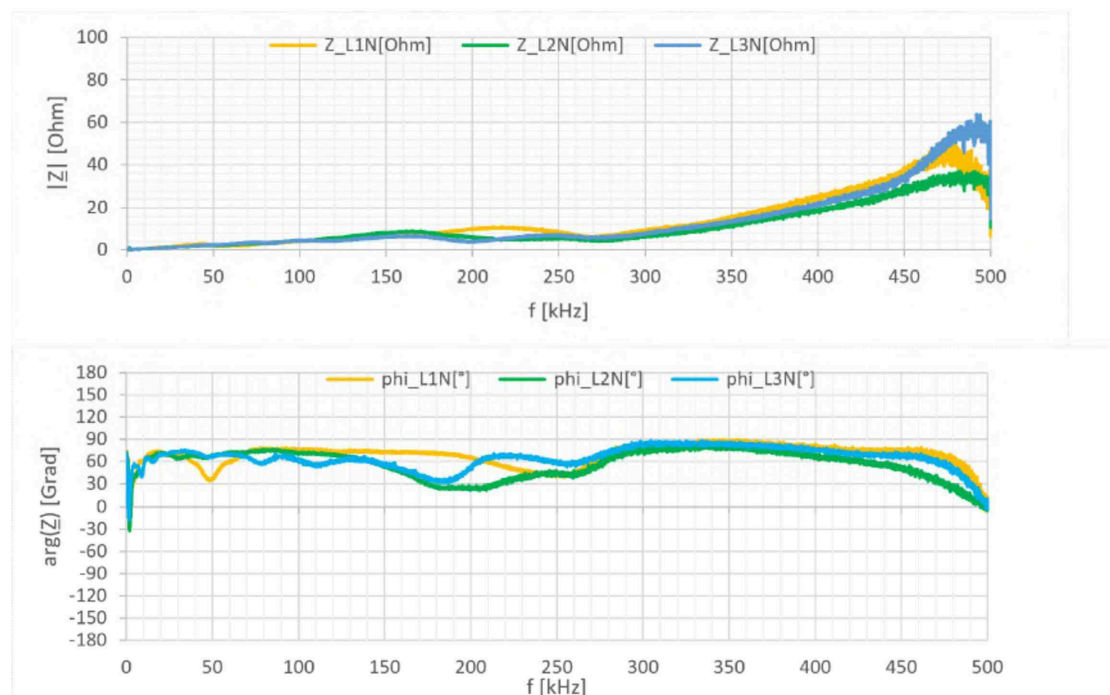


Abbildung 31: Phase-Neutralleiter-Impedanzen in der Niederspannungshauptverteilung

Bei den Phase-Neutralleiter-Impedanzen erreicht der Betrag in der Resonanzstelle einen maximalen Wert von 30 – 60 Ohm. Bei den Phase-Phase-Impedanzen liegt der maximale Wert des Betrages bei 35 – 80 Ohm. Dies liegt wohl an der speziellen Leitungsführung. Es sind bei den Phase-Neutralleiter-Impedanzen zusätzlich über die Potentialausgleichsschiene ein Erdkabel bzw. die Erde wirksam. Dieser Effekt fehlt bei der Phase-Phase Messung und deswegen sind die Impedanzverläufe ausgeprägter.

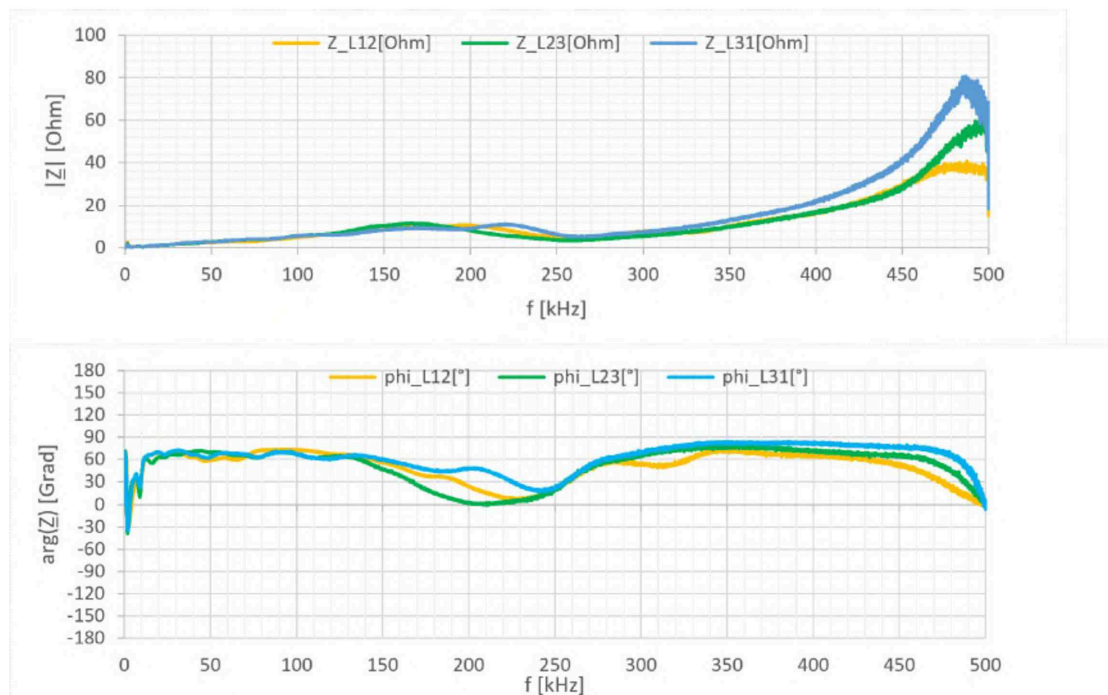


Abbildung 32: Phase-Phase-Impedanzen in der Niederspannungshauptverteilung

6.1.5 Ladesäule für Elektroautos

Im Anschlusspunkt einer leerlaufenden Ladesäule für Elektroautos in einer Entfernung von ca. 30 m nahe zu dem SM-Messplatz zeigen sich stärkere Resonanzerscheinungen bei den Phase-Neutraleiter-Impedanzen bei Frequenzen unter 150 kHz, siehe Abbildung 33, als bei den Phase-Phase-Impedanzen, siehe Abbildung 34. Es zeigt sich in den Messergebnissen der Phase-Neutraleiter-Impedanz L1-N eine ausgeprägte Spitze im Betrag mit maximal 32,76 Ohm bei einem Argument von 172,76° bei 76,7 kHz.

Bei 76,55 kHz ist ein lokales Impedanzbetragsminimum mit 1,91 Ohm mit einem Argument von 87,83° zu erkennen. Es könnte hier ein Zusammenhang mit dem Verbraucher Switch im folgenden Kapitel 6.2.4 bestehen. Dieser zeigt ein Maximum der Störaussendepegel bei 76,719 kHz mit 98,48 dB μ V. Der Switch wurde im Zuge der Impedanzmessungen verbaut. Da die Ladesäule chronologisch als letztes vermessen wurde, zeigt sich dieses Verhalten nur in den Messungen der Ladesäule. Interessant ist bei L1-N auch die sehr geringe Netzimpedanz von 0,11 Ohm bei 193,9 kHz. Diese entspricht fast den Werten bei 50 Hz auf allen Phasen. Die Phase-Neutraleiter-Impedanz L3-N hat bei 500 kHz den höchsten Wert mit 82,066 Ohm bei einem stark kapazitiven Winkel. Bei dieser Frequenz eigen sich auch die anderen Phasen kapazitiv.

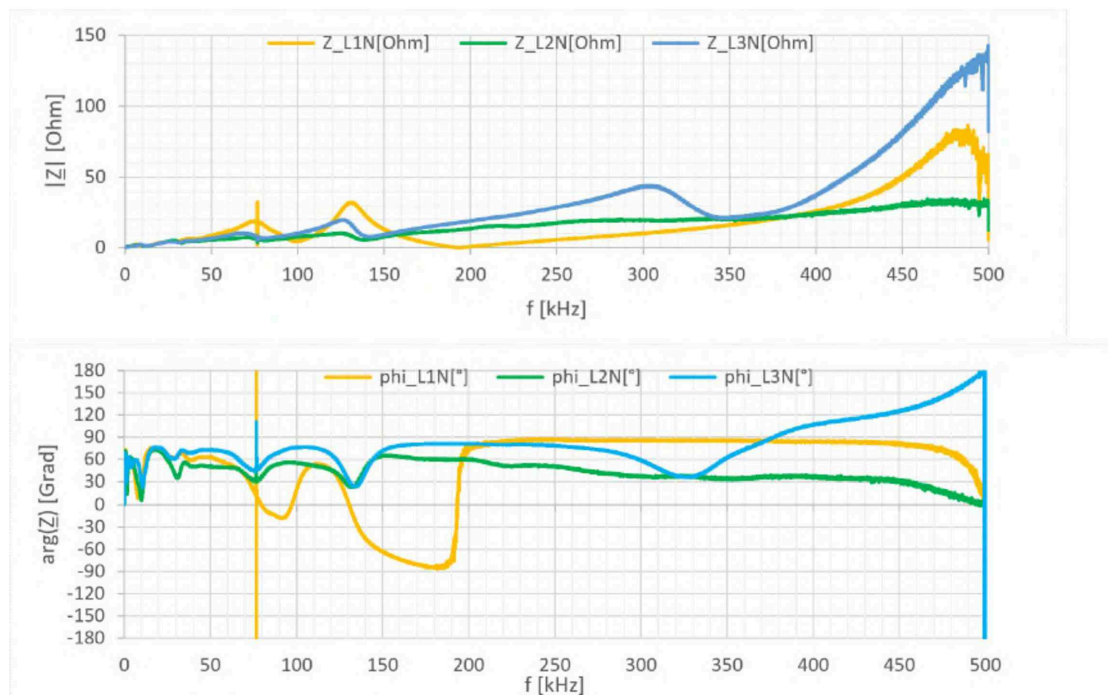


Abbildung 33: Phase-Neutralleiter-Impedanzen an einem Ladeanschlusspunkt für Elektroautos

Die Phase-Phase-Impedanzen zeigen ein sehr ähnliches Verhalten wie die Phase-Neutralleiter-Impedanzen. Die Resonanzstellen sind annähernd an den gleichen Stellen, nur nicht so ausgeprägt in Betrag und Phase. Die ausgeprägten Werte in Betrag und Phase der Phase-Neutralleiter-Impedanz L1-N zwischen 76,55 kHz und 76,7 kHz sind nur in den Phase-Phase-Impedanzen L2-L3 in abgeschwächter Form erkennbar.

Für die SM-PLC bedeutet dies Probleme in der Kommunikation im CEN-A-Frequenzband in der Nähe der auftretenden starken Resonanzerscheinungen zwischen 76 und 77 kHz. In FCC zeigen sich eine stärkere Dämpfung in der Phase L3. Die geringe Phase-Neutralleiter-Impedanz L1-N bei 193,9 kHz kann ein Hinweis auf einen Verbraucher am Netz geben, der das PLC-Signal „absaugt“ und somit die Kommunikation negativ beeinflusst.

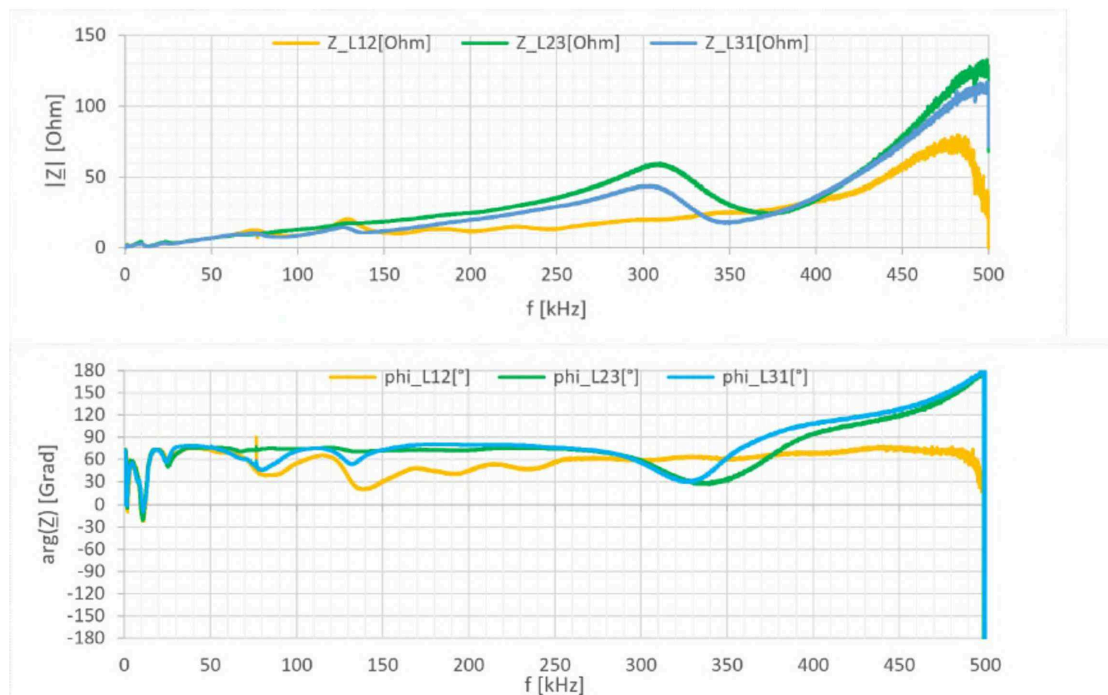


Abbildung 34: Phase-Phase-Impedanzen an einem Ladeanschlusspunkt für Elektroautos

6.1.6 Kabel mit $2 \times 4 \times 95 \text{ mm}^2 + 1 \times 95 \text{ mm}^2$ (Erdungskabel)

Aus den beiden Messungen der Phase-Neutralleiter-Impedanz in der NSHV und am Messplatz im Labor wurde versucht über eine komplexe Rechnung auf das dazwischenliegende Kabel rückzurechnen. Dies sollte möglich sein, da sich das Ende der Leitung im Labor im Leerlauf befindet. Es handelt sich bei den verlegten Kabeln um die Type H07RN-F 4G95, welche feindrätig und als Gummischlauchleitung ausgeführt sind und eine Länge von 100 m haben. Abbildung 35 zeigt das Ergebnis der Rückrechnungen über die gemessenen Frequenzen grafisch dargestellt. Interessant für PLC ist das Verhalten der Phase-Neutralleiter-Impedanzen, da sich hier die Dämpfung am Übertragungsweg zeigt.

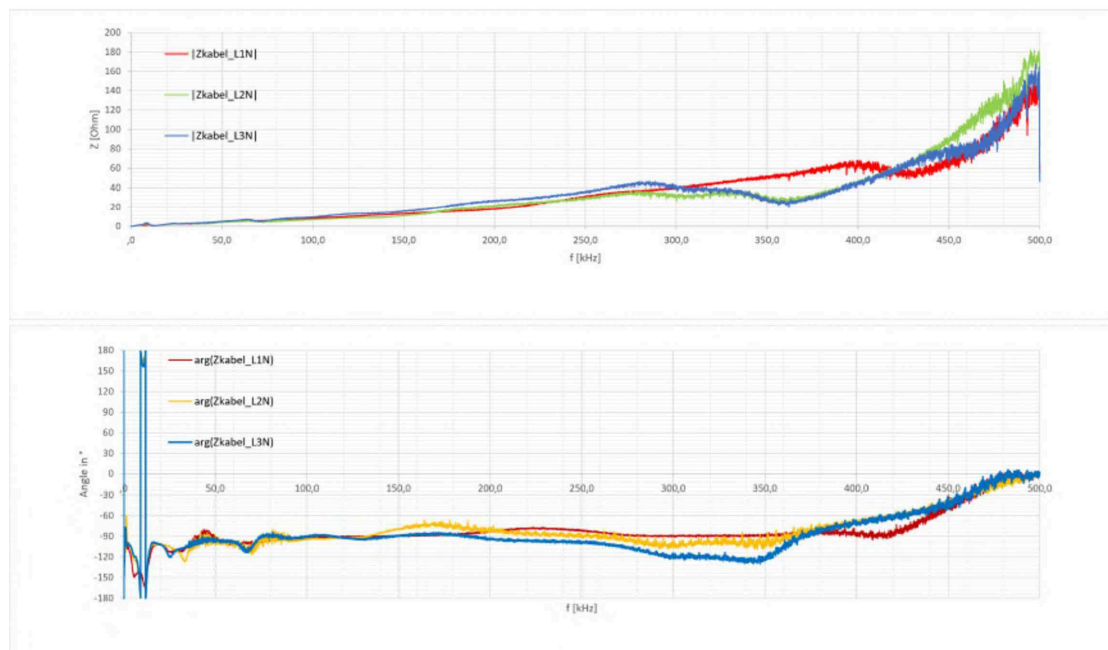


Abbildung 35: Phase-Neutralleiter-Impedanzen Kabel NSHV-Labor 2x4x95 mm²+1x95 mm²

Die verlegten Kabel zeigen ein weitgehend erwartetes kapazitives Verhalten. Bei 500kHz heben sich der induktive und der kapazitive Anteil auf und es bleibt ein hoher rein ohmscher Anteil von 120 – 180 Ohm übrig. Der Betrag zeigt einen weitgehend linearen Anstieg über den gesamten Messbereich. Es zeigt sich, dass diese Kabelinstallation in FCC eine höhere Dämpfung als in CEN-A hat.

6.1.7 Kabel mit 5x16 mm²

Um weitere Kabel zu spezifizieren und somit Rückschlüsse über das Zusammenwirken im Netzwerk ziehen zu können, wurden weitere Messungen durchgeführt. Im Folgenden wurde ein Kabel der Type XYMM-J5X16 K35 für 63 A und mit einer Länge vom 45 m vermessen. Bei den Messungen zeigten sich unterschiedliche Verläufe der Impedanzen, je nach Verlegeart. Aus diesem Grund wurde in weiterer Folge das Kabel auf verschiedene Untergründe gebracht und auch in aufgerolltem Zustand vermessen. Um Messfehler auszuschließen, wurden die Ergebnisse auf Reproduzierbarkeit geprüft. Im Folgenden werden die ausgeprägtesten Effekte gezeigt und beschrieben.

Phase-Neutralleiter-Impedanzen aufgerollter Zustand im Vergleich zu ausgerollt

Abbildung 36 und 37 zeigen die Unterschiede zwischen einem aufgerollten und auf dem Laborboden ausgelegten Zustand. Die Resonanzstelle auf L1-N hat sich im ausgelegten Zustand im Vergleich von 34,9 kHz auf 384,5 kHz verschoben. Zusätzlich ist das Maximum des Betrages um 64 Ohm geringer geworden und auf 181,45 Ohm gesunken. Der Grund für diesen ausgeprägteren Effekt auf L1-N könnte die Nähe zum besser leitenden Boden sein. Bei den anderen Phase-Neutralleiter-Impedanzen ist der Effekt weniger stark, aber dennoch sichtbar.

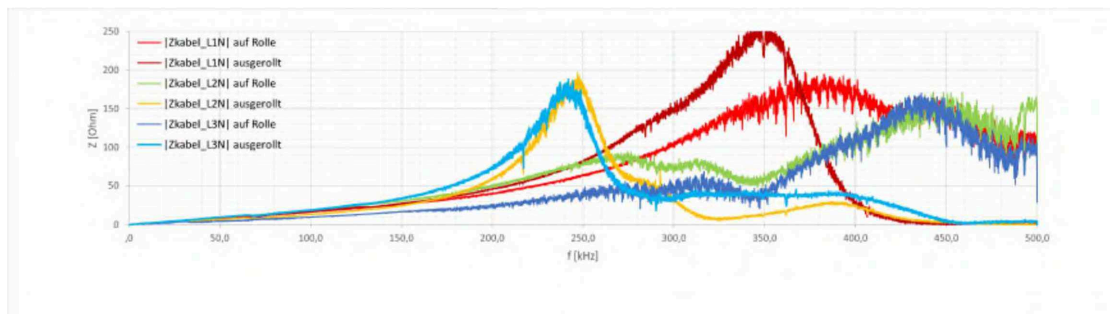


Abbildung 36: Phase-Neutralleiter-Impedanzen Kabel 16 mm² Betrag im aufgerollten Zustand im Vergleich zum ausgerollten Zustand

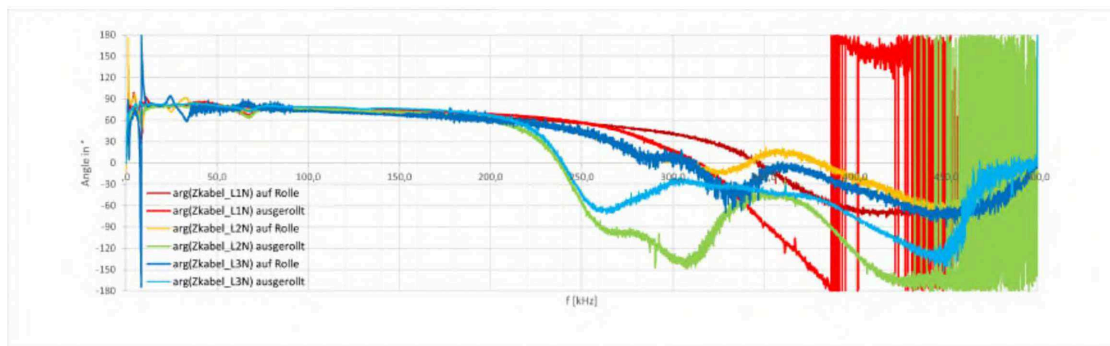


Abbildung 37: Phase-Neutralleiter-Impedanzen Kabel 16 mm² Argument im aufgerollten Zustand im Vergleich zu ausgerollten Zustand

Im Phasengang ist für Frequenzen kleiner 239 kHz ein induktives Verhalten auf allen Phasen zu erkennen. Dieses wechselt bei höheren Frequenzen zu einem kapazitiven Verhalten. In Abbildung 37 rechts deutlich zu sehen sind die unerwünschten, in der Einleitung beschrieben, Effekte des Sprungs zwischen -180° und 180° . Die Unterschiede vom ausgelegten Zustand im Vergleich zum auf der Kabelrolle aufgewickelten zeigen sich auf allen Phasen. Die Spitze auf L3-N im aufgerollten Zustand bei 8,5 kHz ist

unbekannten Ursprungs und wurde nicht genauer untersucht, da sie sich außerhalb der Frequenzbänder der PLC befindet.

Phase-Phase-Impedanzen aufgerollter Zustand im Vergleich zum ausgerollten Zustand

Die größten Unterschiede zeigen sich zwischen den Phase-Phase-Impedanzen L2-L3 in den Abbildungen 38 und 39. Die Resonanzstelle bei 357,85 kHz ist ausgeprägter im ausgerollten Zustand. Die Phase-Phase-Impedanzen L2-L3 sind ausgeprägter mit höheren Werten des Betrags und des Phasengangs.

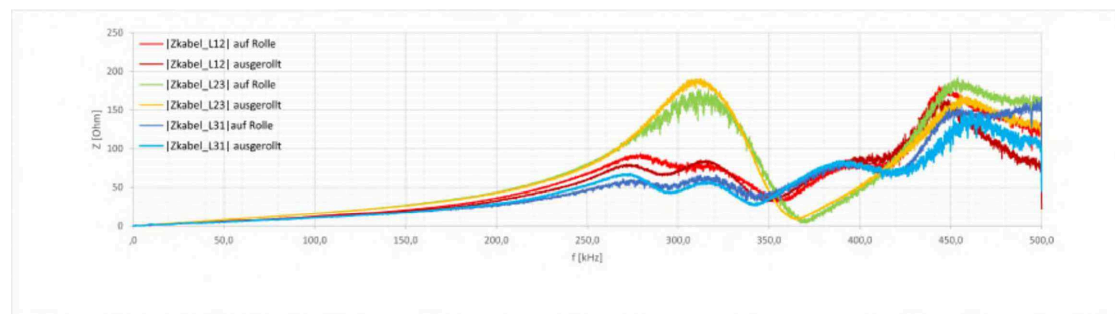


Abbildung 38: Phase-Phase-Impedanzen Kabel 16 mm² Betrag aufgerollt im Vergleich zum ausgerollten Zustand

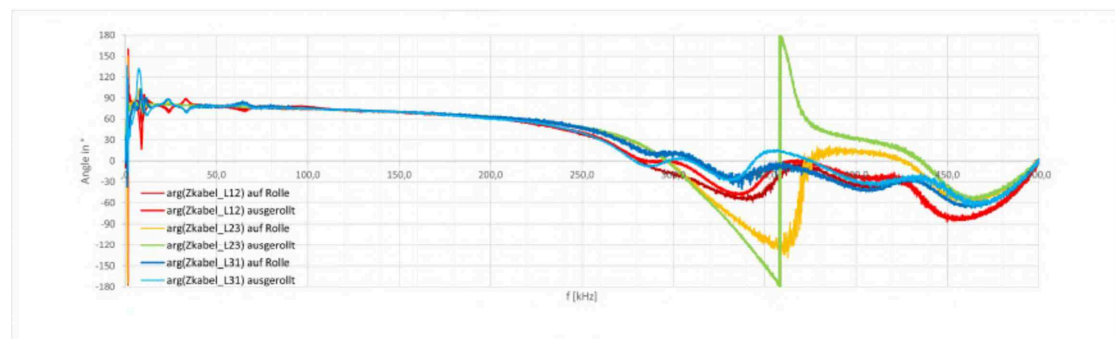


Abbildung 39: Phase-Phase-Impedanzen Kabel 16 mm² Argument aufgerollt im Vergleich zum ausgerollten Zustand

Phase-Phase-Impedanzen ausgerollter Zustand am Parkplatz im Vergleich zum ausgerollten auf einer Wiese

Auf der Wiese sind die Maxima des Betrages der Phase-Phase-Impedanzen größer ausgeprägt. Andererseits sind die Minima bei 304,85 kHz mit 0,9 Ohm am Parkplatz kleiner und die Resonanzstelle im Phasengang zeigt einen höheren Phasenunterschied. Die Maxima des Argumentes bei L2-L3 am Parkplatz zwischen 280 kHz und 313 kHz sind Messfehler und vermutlich durch Schaltvorgänge im Netz entstanden. Für das Argument L1-L2 am Parkplatz und auf der Wiese gilt ab 462 kHz vermutlich dasselbe.

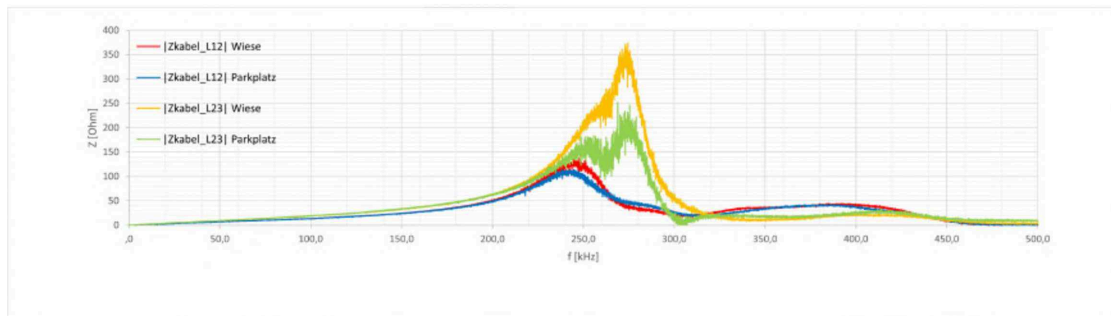


Abbildung 40: Phase-Phase-Impedanzen Kabel 16 mm² Betrag ausgerollt am Parkplatz im Vergleich zu ausgerollt auf einer Wiese

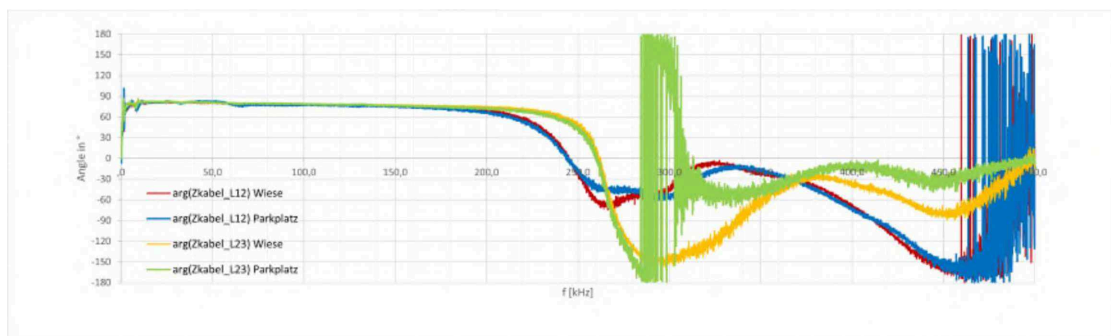


Abbildung 41: Phase-Phase-Impedanzen Kabel 16 mm² Argument ausgerollt am Parkplatz im Vergleich zu ausgerollt auf einer Wiese



Abbildung 42: Kabel mit $5 \times 16 \text{ mm}^2$ ausgerollt am Parkplatz



Abbildung 43: Kabel mit $5 \times 16 \text{ mm}^2$ ausgerollt auf einer Wiese

Beschreibung zu Abbildung 43

- W2: Einspeisepunkt des Netzes
- W3: IMD-Messgerät mit Auswertecomputer
- W4: Leerlaufendes Ende des Kabels

6.1.8 Kabeltrommel mit $5 \times 10 \text{ mm}^2$

Gemessen wurde eine Kabeltrommel mit flexiblem $5 \times 10 \text{ mm}^2$ dreiphasigem fünf-poligem Kabel für bis zu 16 A. Für die Impedanzmessung wurde das Kabel im Labor auf einem Betonboden ausgerollt.

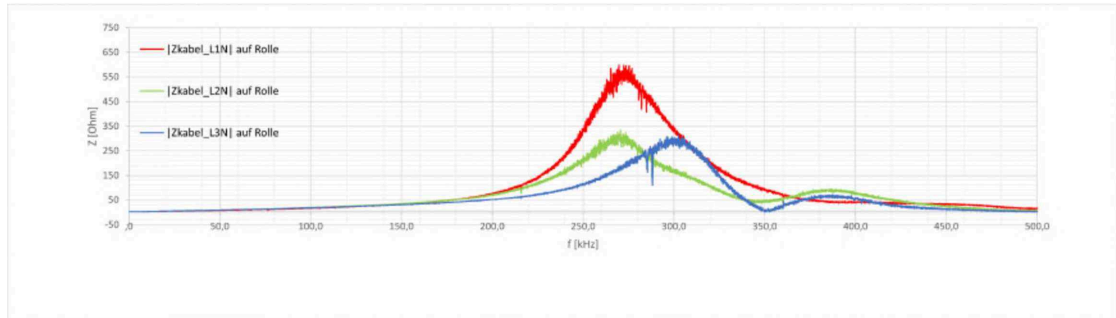


Abbildung 44: Phase-Neutralleiter-Impedanzen Kabel $5 \times 10 \text{ mm}^2$ Betrag ausgerollt

Erkennbar sind Resonanzstellen zwischen 270 – 300 kHz mit einem maximalen Betrag von 560 Ohm. Diese Resonanz würde ein PLC-Signal und eventuelle Störquellen gut abblocken. Der Phasengang zeigt ein kapazitives Verhalten von 1 Hz bis 260 kHz. Darüber wird das Verhalten induktiv.

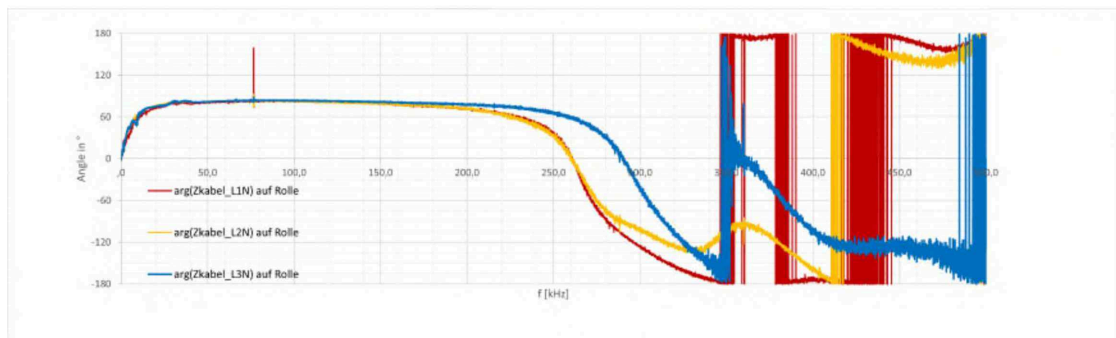


Abbildung 45: Phase-Neutralleiter-Impedanzen Kabel $5 \times 10 \text{ mm}^2$ Argument ausgerollt

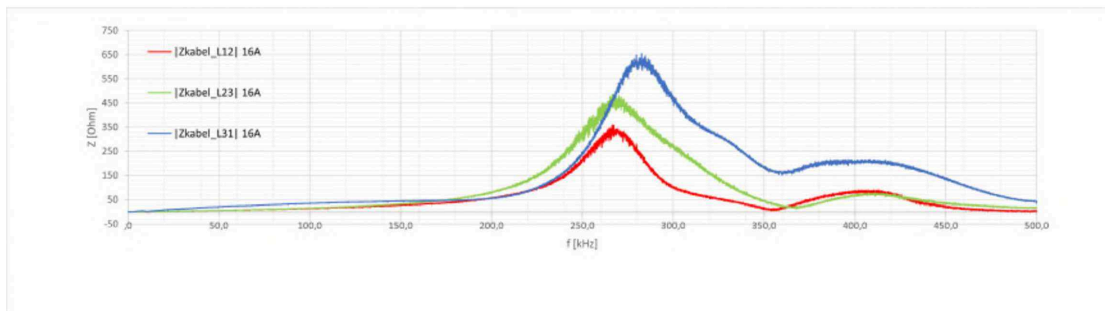


Abbildung 46: Phase-Phase-Impedanzen Kabel 10 mm² Betrag ausgerollt

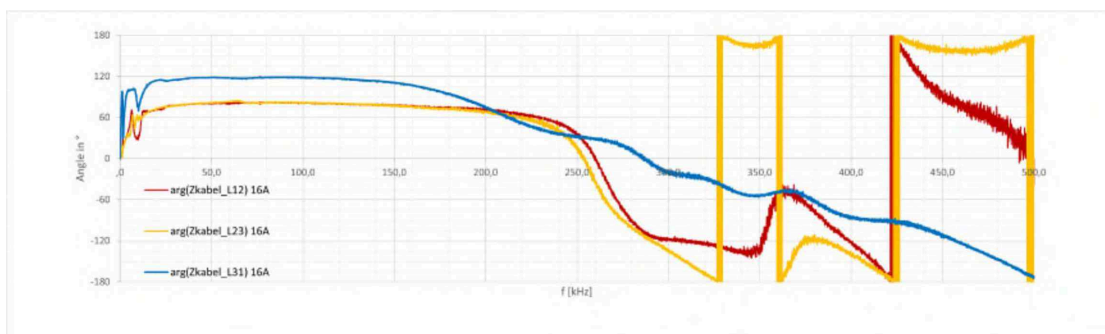


Abbildung 47: Phase-Phase-Impedanzen Kabel 10 mm² Argument ausgerollt

6.1.9 Kabel starr mit 3x6 mm²

Der Impedanzverlauf ähnelt dem des 3x10 mm² Kabel. Das 3x6 mm² Kabel wird in Hausinstallationen verwendet. Es ist ein einphasiges dreipoliges Kabel mit Phase, Neutraleiter und Erdung.

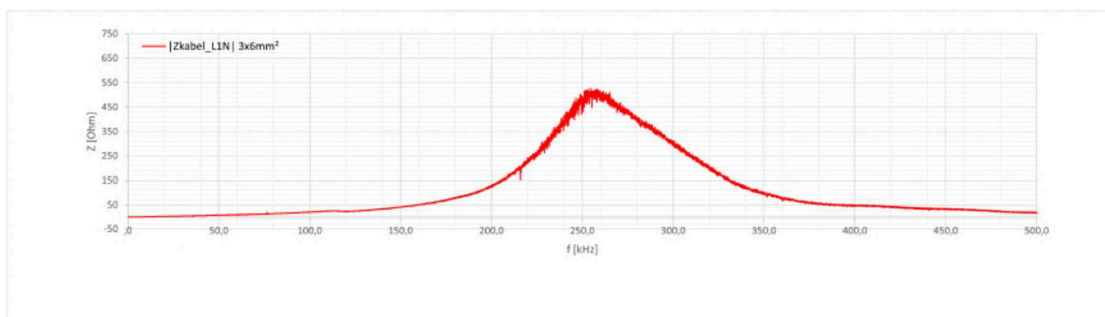


Abbildung 48: Phase-Neutraleiter-Impedanzen Kabel 6 mm² Betrag ausgerollt

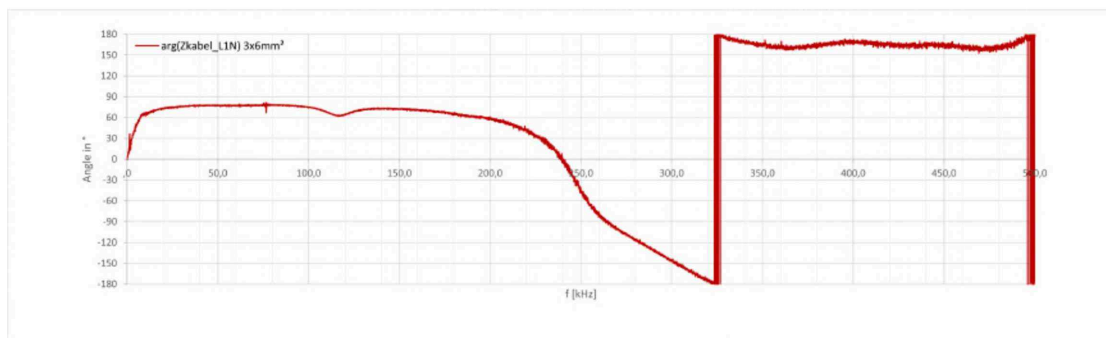


Abbildung 49: Phase-Neutralleiter-Impedanzen Kabel 6 mm² Argument ausgerollt

Erkennbar ist ein Impedanzbetragsmaximum bei 260 kHz mit einem maximalen Betrag von 500 Ohm. Dieses Maximum würde ein PLC-Signal und eventuelle Störquellen gut abblocken. Der Phasengang zeigt ein kapazitives Verhalten von 1 Hz bis 240 kHz. Darüber wird das Verhalten induktiv.

6.1.10 Zusammenfassung Impedanzmessungen

Die Netzelemente zeigen unterschiedliches Verhalten je nach Type und Phase, aber auch je nach Verlegeart. Es fällt ein höherer Wert der Impedanzen im hohen Frequenzbereich und Resonanzerscheinungen im mittleren Frequenzbereich in der Nähe von 300 kHz in den meisten Messungen auf. Daraus zeigen sich andere Effekte der Auswirkungen der gemessenen Impedanzen in CEN-A und FCC. Die gemessenen Kabel mit weniger Querschnitt haben höhere Impedanzen als die mit höherem Querschnitt. Daraus folgt ein besseres Übertragungsverhalten je höher der Querschnitt. Überträgt man diese Ergebnisse auf ein Niederspannungsnetz, so würde sich eine höhere Dämpfung von Störungen durch Kundenanlagen und eine bessere Übertragung der PLC, je näher man sich beim Transformator befindet, ergeben. Dies ist gut zu sehen, wenn man die Messung der Kabel vergleicht. Ein Kabel mit 5x16 mm² dämpft Signale bei höheren Frequenzen besser als ein Kabel mit 2x4x95 mm². Da ein 5x16 mm² Kabel einer Steigleitung entsprechen kann, könnten Stör-Signale von angeschlossenen Verbrauchern in höheren Frequenzen besser gedämpft werden. Dagegen werden die PLC-Signalpegel von einem Sender der zwischen Steigleitung und Hauptanspeisungskabel (im Zählerraum) sitzt, weniger gedämpft. Interessant wäre hier eine weitere Untersuchung der Auswirkung von Querschnittserhöhungen durch Parallelführung. Die Kabelmessungen sollten mit einem zweiten Messgerät überprüft werden, das die Signalströme separat von den Spannungen messen kann und somit zuverlässige Ergebnisse liefert. Zum Zeitpunkt der Messung war ein solches Gerät nur mit Frequenzen bis 200 kHz verfügbar und es konnten die Messungen nur in diesem Bereich nachgeprüft werden.

6.2 Aktiv einspeisende Störquellen

Verbraucher im Netz speisen teilweise unabsichtlich Störleistungen ins Netz ein. Aus den Erkenntnissen der aktuell gültigen Normensituation in Abbildung 11 werden geringere Störsendepegel in den höheren Frequenzen von den Verbrauchern erwartet. Die nachfolgenden Messungen sollen zeigen, ob und wie die gegebenen Grenzwerte eingehalten werden und ob hauptsächlich Frequenzen von 10 – 200 kHz, wie im Standard [10] angemerkt, betroffen sind. Im Artikel [24] wird das Laden von Elektroautos als signifikante aktiv einspeisende Störpegelquelle identifiziert und deshalb im Folgenden darauf geachtet, ob dies bestätigt werden kann.

6.2.1 Langzeitstörquellen

Zur Detektion von aktiv einspeisenden Störpegelquellen ist es von Vorteil lange Zeiträume zu betrachten, da so auch besser von der Tageszeit abhängige volatile Lasten erfasst werden. Im Folgenden wird versucht, durch Messung mit dem Messgerät nBox (siehe nachfolgendes Kapitel 6.3.1 und Anhang 8.5) diese zu erfassen und zu identifizieren. Das Messgerät erfasst dabei jede Sekunde die Störpegelwerte bei gleichzeitiger logischer Ausfilterung von PLC und bildet daraus Mittelwerte für eine Langzeitmessung. Die Abbildungen 50 und 51 zeigen die verwendeten Skalen für die Langzeitmessungen. Abbildung 52 zeigt 60-minütige Mittelwerte von Störpegeln einer Woche, speziell auf den einzelnen Trägern in CEN-A und FCC. Der Anschluss des Messgerätes ist dreiphasig in der NSHV eines Bürogebäudes und das dargestellte Spektrum ist die Summe der Störpegel aller drei Phasen. Erkennbar sind von der Tageszeit abhängige Störpegelquellen einer Type am Montag, Dienstag und Mittwoch. Diese korrelieren mit den Zeiten, an denen am Firmengelände Elektroautos geladen werden. Eine zweite Type von Störpegelquellen scheint im Beobachtungszeitraum immer in der Nacht zwischen 21:00 und 4:00 eingeschaltet zu sein. Diese konnten nicht eindeutig zugeordnet werden. Eine dritte halbstündlich regelmäßig auftretende Type ist in FCC zu erkennen. Diese konnte ebenso nicht eindeutig zugeordnet werden.



Abbildung 50: Skala für CEN-A Störpegel

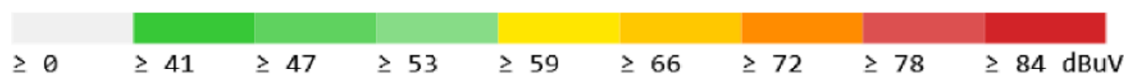


Abbildung 51: Skala für FCC Störpegel

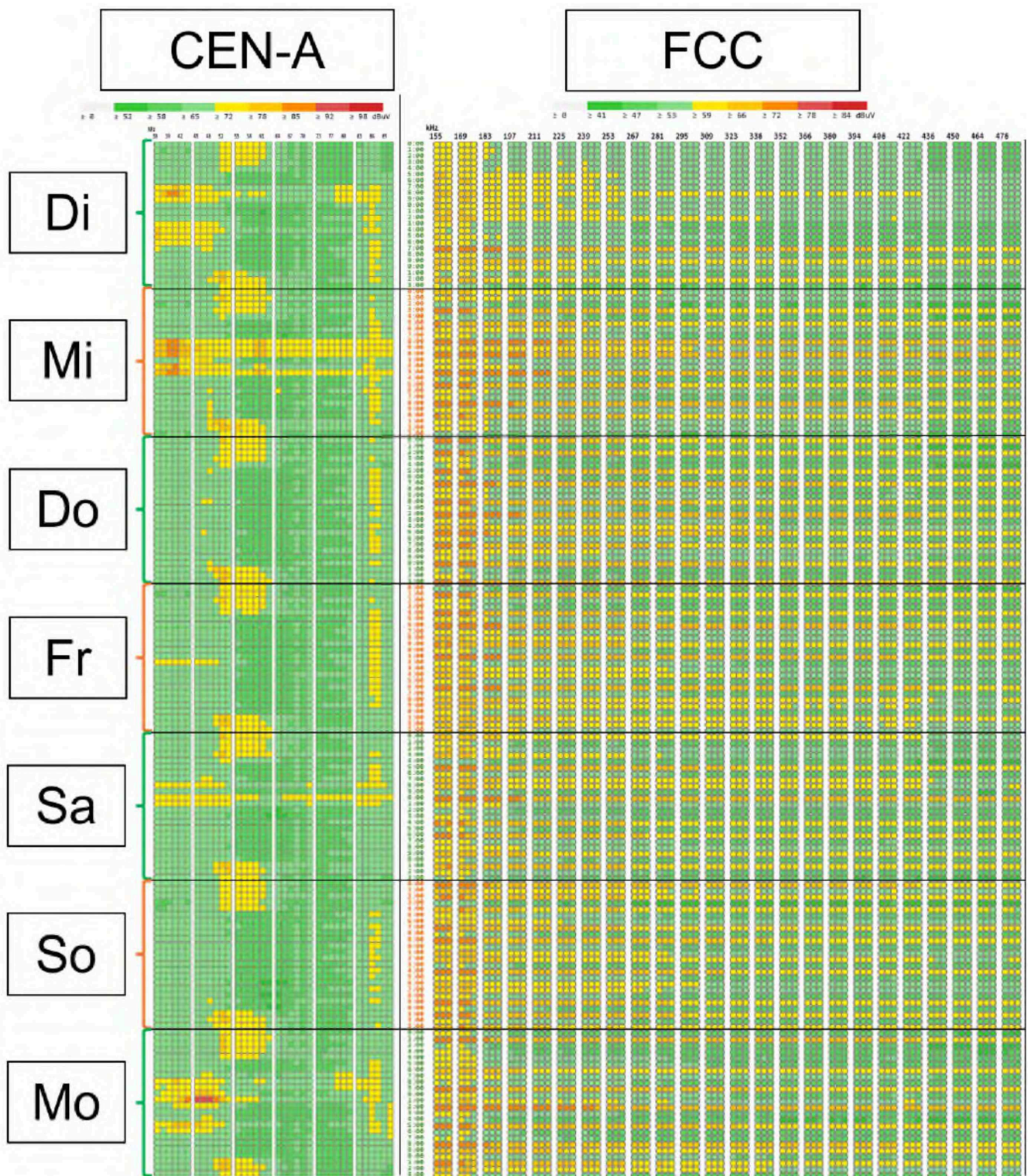


Abbildung 52: NSHV 60-minütige Mittelwerte zu Störungen im Netz in CEN-A und FCC

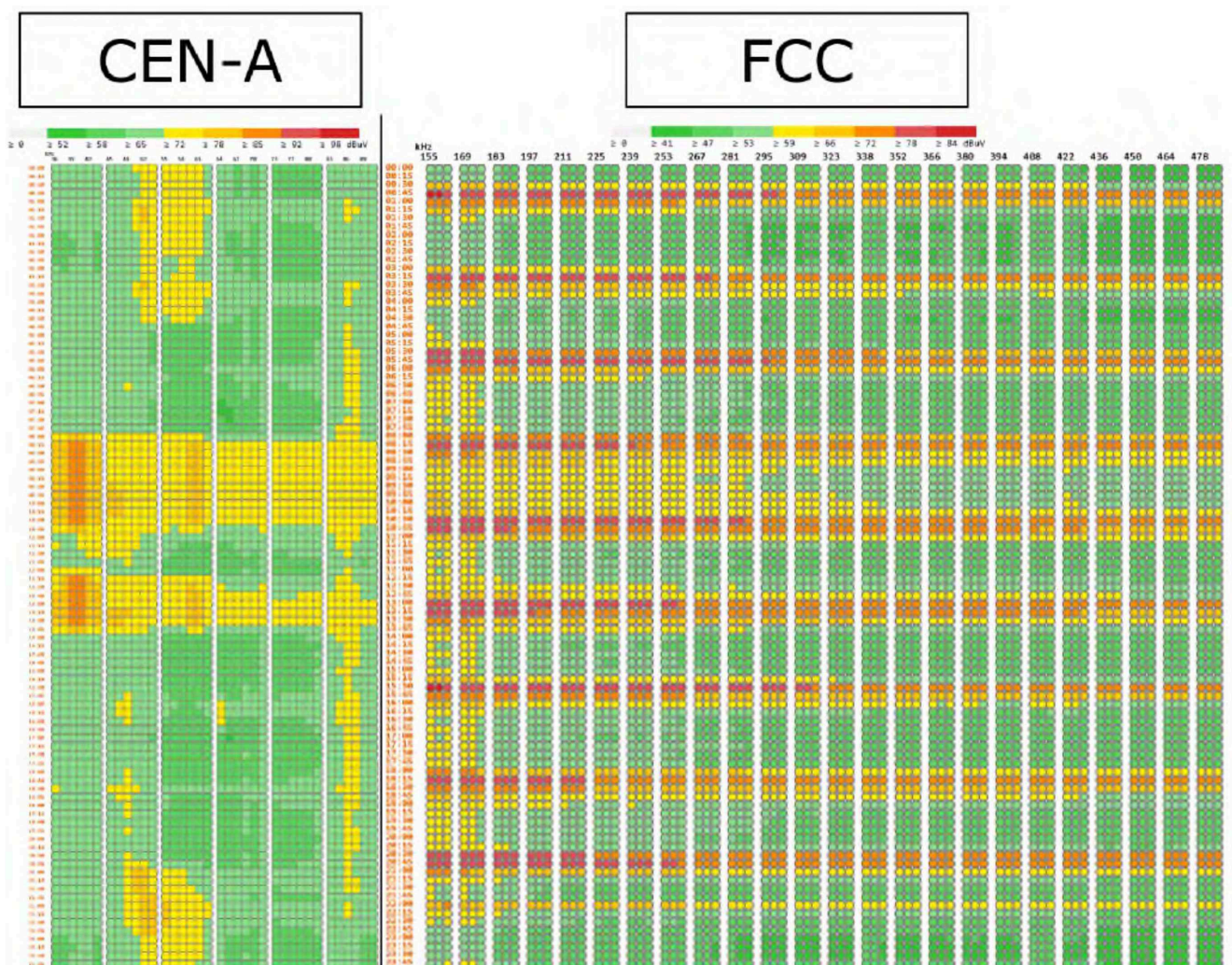


Abbildung 53: NSHV 15-minütige Mittelwerte zu Störungen am Mittwoch im Netz in CEN-A und FCC

In Abbildung 53 sind die 15-minütigen Mittelwerte der Störpegel von Mittwoch der Messung von Abbildung 52 dargestellt. Der Ladezyklus eines Elektroautos beginnt um 8:00 und endet mit der Inbetriebnahme des Fahrzeugs durch einen Mitarbeiter um 10:45. Um 12:00 ist die Signatur des selben Elektroautos wiederzuerkennen. Die Störpegel sind bei Frequenzen von 36 kHz bis 267 kHz zu erkennen. Sie treten somit in CEN-A und FCC auf und würden eine Kommunikation beeinflussen. Zur weiteren Analyse werden die identifizierten Lasten im folgenden Abschnitt genauer untersucht.

6.2.2 Dreiphasige Verbraucher an LISN

Für die Messung dreiphasiger Verbraucher wurde eine 150 Ohm-LISN, wie in Abbildung 54 zu sehen, mit vier Kanälen als Netzelement in den SM-Aufbau integriert. Die drei Phasen und der Neutralleiter wurden dabei durch die LISN gefiltert. Für die Messung von Elektroautos wurde an einer der CEE-Dosen des SM-Aufbau ein mobiles Ladegerät JUICE BOOSTER 2 der Firma Juice Technology AG für Elektroautos angeschlossen. An diesem wurde ein Ladestrom von 16 A für die Elektroautos eingestellt und danach die Autos angeschlossen. In den anderen Fällen wurde der Verbraucher direkt an der LISN angeschlossen.

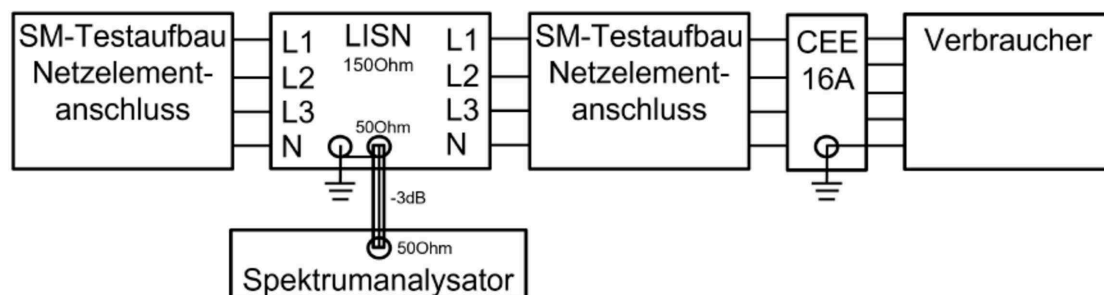


Abbildung 54: Messschaltung mit LISN für dreiphasige Verbraucher

Die LISN wurde eingemessen und die Messwerte dementsprechend korrigiert. Die Dämpfung zwischen den Phasen und dem Messempfänger beträgt gemittelt 14,3 dB in CEN-A und 13,5 dB in FCC. Um den Messempfänger von zu großen auftretenden Spannungen zu schützen, wurde ein Dämpfungsglied mit über den Messbereich konstanten 3 dB zwischen ihm und die LISN eingefügt. Für das Dämpfungsglied werden im Messgerät Korrekturwerte hinterlegt, die das Messgerät automatisch auf die Messungen anwendet. Die Messungen wurden bestmöglich nach ÖVE/ÖNORM EN 50065 und nach der Methodik aus dem Paper [43] durchgeführt. Für die Messungen im Bereich von 9 kHz bis 150 kHz werden eine Resolution Bandwidth (RBW) von 100 Hz und eine Video Bandwidth (VBW) von 300 Hz angewendet. Bei den Messungen im Messbereich von 0 kHz bis 500 kHz wird eine RBW von 1kHz und eine VBW von 1kHz angewendet. In allen Fällen wurde eine Sweep Time (SWT) von 15 s verwendet.

Ladegerät für Elektroautos JUICE BOOSTER 2

Dieses Ladegerät, siehe Abbildung 55, ist für die mobile Ladung von Elektroautos an CEE-Dosen gedacht. Die Störemissionen haben eine Spitze bei 79,01 kHz mit einem maximalen Wert von 42,15 dB μ V auf der Phase L1. Die interne Elektronik scheint sich über diese Phase zu versorgen. Über 150 kHz und somit im FCC-Band

konnten keine Störungen festgestellt werden und deshalb wurde auf eine diesbezügliche Abbildung verzichtet. Da das mobile Ladegerät nur die Funktion der Kommunikation der Ladeparameter mit dem Elektroauto hat und die Phasen nur durchschaltet zwischen einer CEE-Dose und dem Ladestecker, ist kaum ein Unterschied im belasteten im Vergleich zum unbelasteten Zustand zu erwarten.



Abbildung 55: JUICE BOOSTER 2 Ladegerät

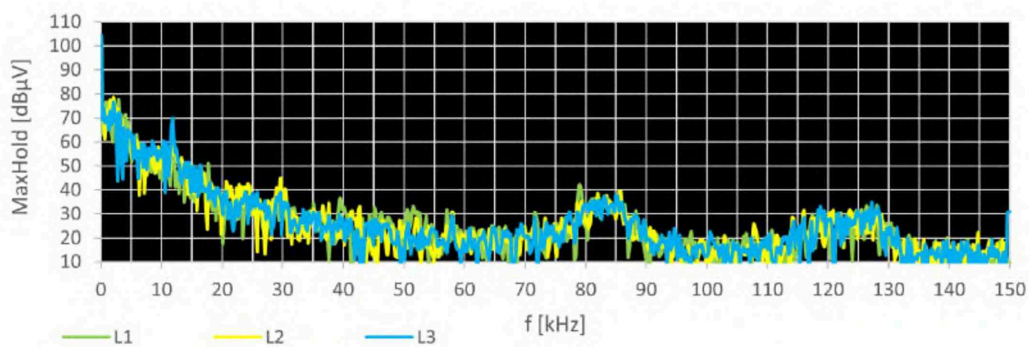


Abbildung 56: Spektrum JUICE BOOSTER 2

Hyundai Kona

Gemessen wurde ein Hyundai Kona Baujahr 2019 mit 64 kWh Akkumulator. Die Ladeströme bei der Messung sind in Tabelle 9 angeführt.

L1	L2	L3
14,87 A	14,93 A	15,11 A

Tabelle 9: Ladeströme Hyundai Kona

Die Störemissionen haben eine Spitze bei 78,308 kHz mit einem maximalen von Wert 81,1 dB μ V auf der Phase L1 und können bereits die PLC in CEN-A negativ beeinflussen. Auf den anderen Phasen liegen die Emissionsspitzen in einem annähernd ähnlichen Bereich und es wurden auch ähnliche Kurvenverläufe festgestellt. Über 150 kHz und somit im FCC-Band konnten keine Störungen festgestellt werden und deshalb wurde auf eine Abbildung verzichtet.

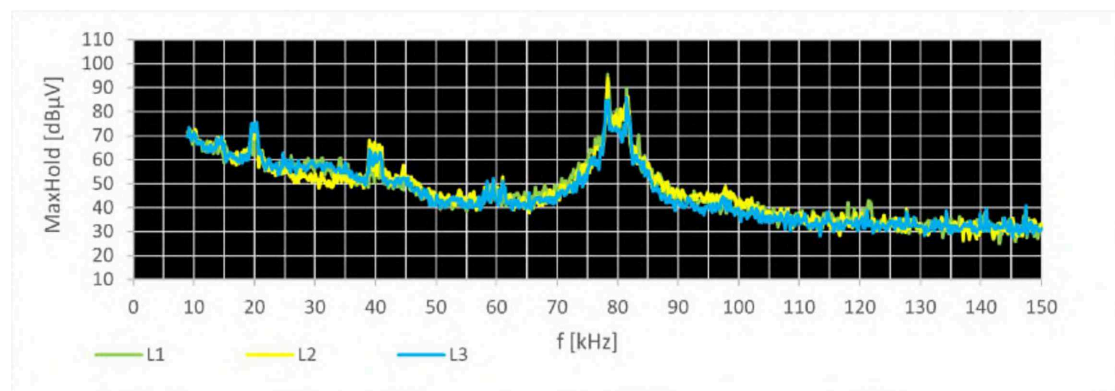


Abbildung 57: Spektrum Hyundai Kona Normmessung 9 kHz – 150 kHz

Kia EV6

Gemessen wurde ein Kia EV6 Baujahr 2021 mit 77,4 kWh Akkumulator. Die Ladeströme bei der Messung sind in Tabelle 10 angeführt. Es zeigen sich breitbandige Störemissionen zwischen 60 und 70 kHz mit einer Spitze auf der Phase L3 mit 71 dB μ V. Im SM-FCC-Frequenzband zeigt sich eine geringe Störemissionsspitze bei 425 kHz mit 45 dB μ V. Die Störemissionen zwischen 120 und 150 kHz sind außerhalb der SM-PLC von CEN-A und FCC. Das Spektrum der Störemissionen fällt mit seinen Pegeln am geringsten unter den gemessenen Elektroautos aus.

L1	L2	L3
16,07 A	16,09 A	15,78 A

Tabelle 10: Ladeströme Kia EV6

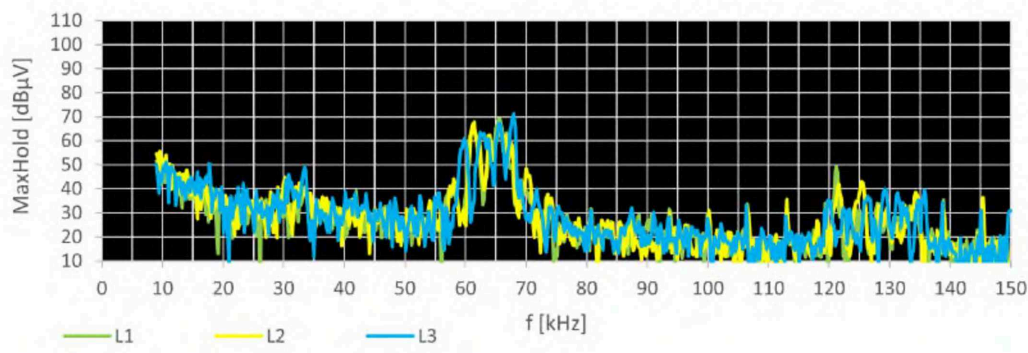


Abbildung 58: Spektrum Kia EV6 Normmessung 9 kHz – 150 kHz

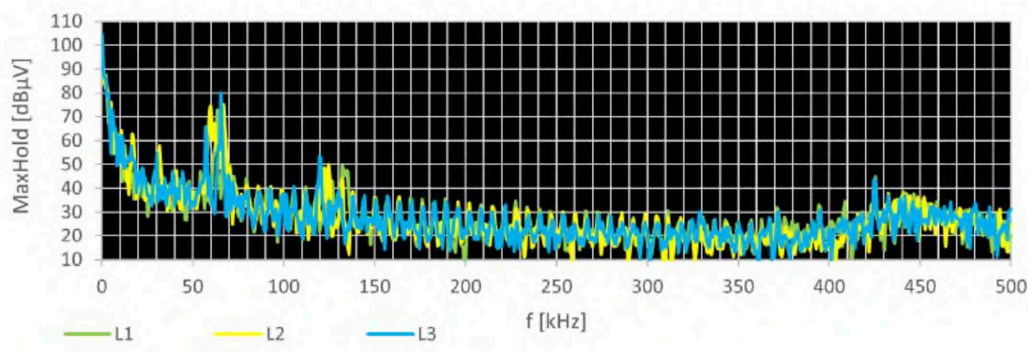


Abbildung 59: Spektrum Kia EV6 bis 500 kHz

BMW I3

Gemessen wurde ein BMW I3 Baujahr 2019 mit 42,2 kWh Akkumulator. Die Ladeströme bei der Messung sind in Tabelle 11 angeführt. Auffallend sind die höheren Störemissionen in Blau auf der Phase L3 zwischen 30 kHz und 60 kHz. Es befindet sich eine Spitze mit 79,5 dB μ V auf 38,03 kHz und somit im Frequenzband CEN-A. Bei Frequenzen größer 150 kHz treten nur verschwindend geringe Störpegel auf, die die PLC in FCC kaum beeinflussen würden .

L1	L2	L3
15,73 A	15,67 A	14,56 A

Tabelle 11: Ladeströme BMW I3

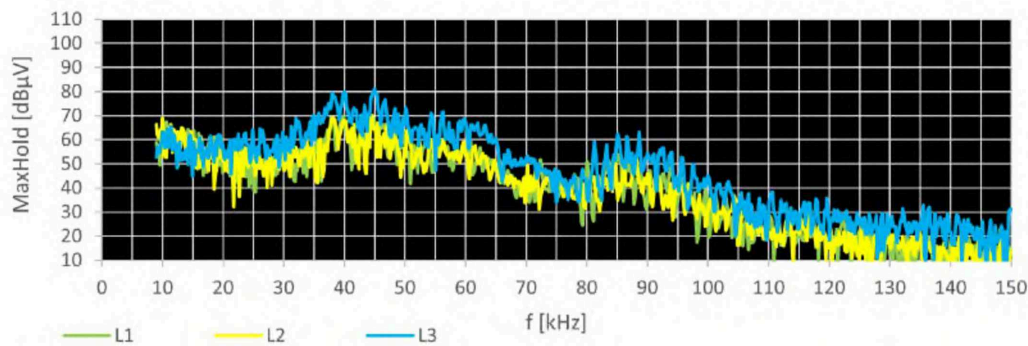


Abbildung 60: Spektrum BMW I3 Normmessung 9kHz – 150kHz

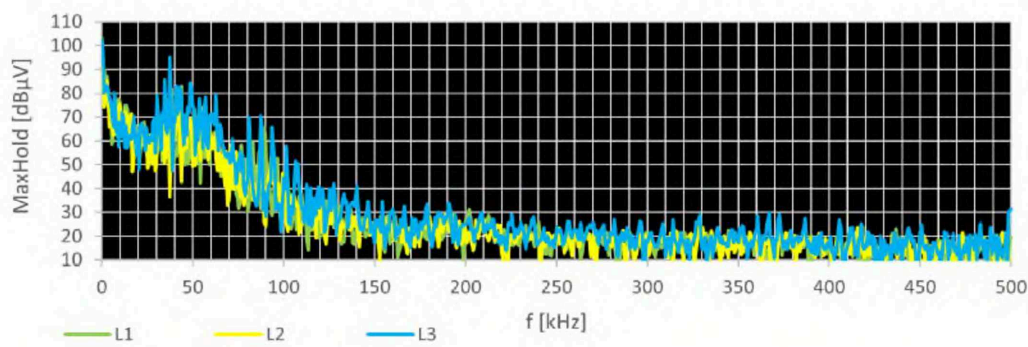


Abbildung 61: Spektrum BMW I3 bis 500kHz

Klimaanlage

Im Zuge der im Kapitel 6.3 getätigten Kanalmessungen wurde ein starker aktiv einspeisender Störer festgestellt. Dieser konnte nach einer Störquellensuche durch Abschalten aller Abgänge im Labornetz als die Klimaanlage identifiziert werden. Auffallend sind die Oberwellenstöremissionsspitzen mit einem Frequenzabstand von ca. 6 kHz zueinander. Diese sind nur in CEN-A sichtbar. Die höchste Spitze in CEN-A ist bei 59 kHz mit 59 dB μ V. In FCC sind Störemissionen kaum vorhanden.

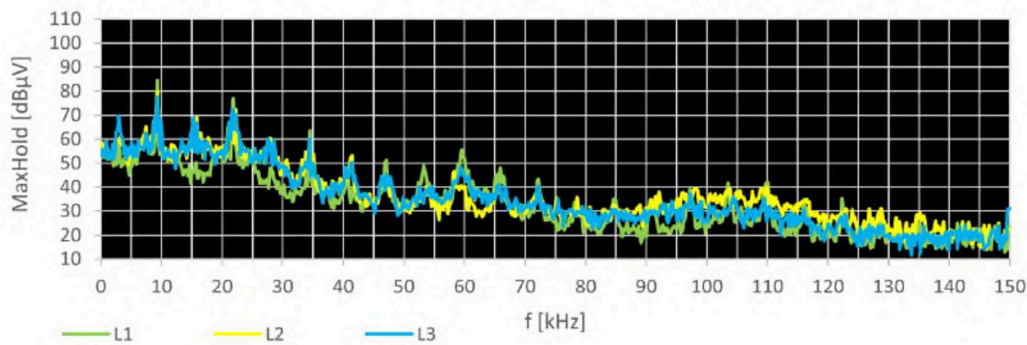


Abbildung 62: Spektrum Klimaanlage Normmessung 9 kHz – 150 kHz

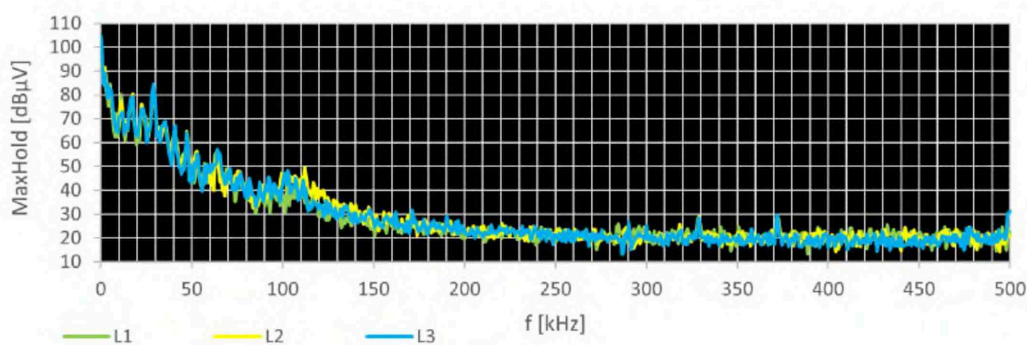


Abbildung 63: Spektrum Klimaanlage bis 500 kHz

6.2.3 Messungen mit Narda Probe SHC-1-1000 am Netz

Diese Messmethode mit einem Spannungsabgriffkopf zwischen dem Netz und dem Messgerät hat den Vorteil, einfach Störungen am Netz zu sehen und auffinden zu können. Leider kann durch diese Methode eine Störquelle nicht eindeutig identifiziert werden im Vergleich zum gefilterten Netz an einer LISN, da hier viele Verbraucher gleichzeitig Störpegel emittieren können. Dies erklärt auch das im allgemeinen hohe gefundene Störpegelniveau. Zusätzlich gehen durch die relativ hohe Dämpfung mit 35 dB des Messkopfes zum Teil auftretende Störungen im Rauschen des Messempfängers unter.

Lift in einem Bürogebäude

Für die Messung eines Liftes wurde dieser öfters in das letzte Stockwerk geschickt und wieder in den Keller gerufen. Im Keller befindet sich neben dem Lift ein Wartungsraum mit der Liftansteuerung, an der gemessen wurde. Der Lift wird mit einer dreiphasigen elektrischen Maschine mit den Daten nach Abbildung 64 betrieben.

	160 MW 140 4 / 18 B	85
3-Mot	50 Hz	Nr 666655
Locarno	Δ/Y 220 / 380	V cos φ 0,74
5,4 KW	24/14	A 1500 / min
1,2 KW	27/16	A 333 / min
78,5 Kg	IA/IN	TA/TN
S5	F/h	%ED
CEI 34-1	IP 21	KI F
Id. Nr. 950893	SWISS	MADE

Abbildung 64: Liftmotor Typenschild

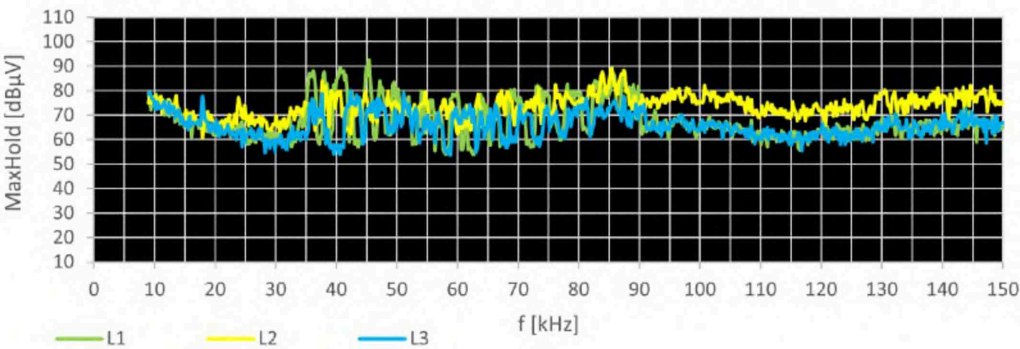


Abbildung 65: Spektrum am Netz mit Narda Probe SHC-1-1000 für Lift in einem Bürogebäude 9 kHz - 150 kHz

Die in Abbildung 65 zu erkennenden Schwingungen zwischen 30kHz und 90kHz korrelieren mit der Inbetriebnahme des Liftes. Die höchste Spitze auf der Phase L1 mit 92,57 dB μ V bei 45,342 kHz kann die PLC in CEN-A deutlich negativ beeinflussen. Ebenso gilt dies für die restlichen zahlreich auftretenden Spitzen. In Frequenzen höher 150 kHz waren keine mit dem Lift zusammenhängenden Störpegel erkennbar und deswegen wurde auf eine diesbezügliche Abbildung verzichtet. Der Lift erfüllt somit die Norm EN 12015 aus Kapitel 3.6 mit den angeführten erlaubten Störaussendungen von Liften.

6.2.4 Einphasige Verbraucher mit LISN

Zur Messung einphasiger Verbraucher wurde eine LISN R&S EN216 verwendet.

Switch MikroTik CRS328-24P-4S+RM

Im Zuge der im Kapitel 6.3 getätigten Kanalmessungen wurde ein starker aktiv einspeisender Störer festgestellt. Dieser konnte als Switch MikroTik CRS328 nach einer Störquellensuche durch Abschalten aller Abgänge im Labornetz identifiziert werden. Für die Messung wurde dieser vom Netz getrennt und an einer einphasigen LISN ENV216 vermessen.

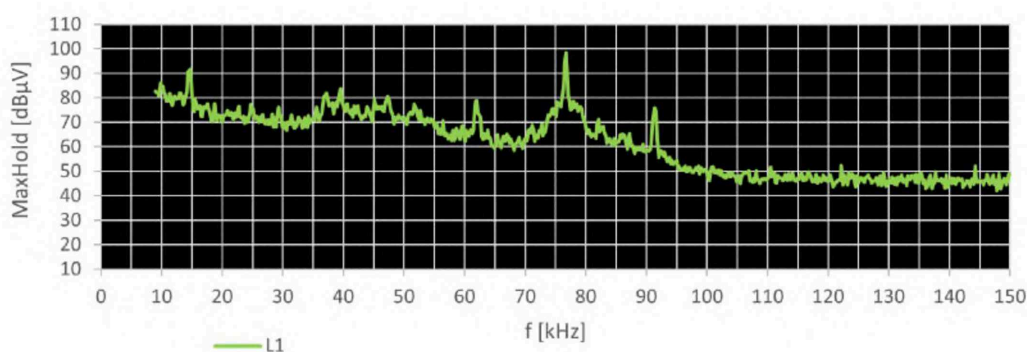


Abbildung 66: Spektrum Switch MikroTik CRS328-24P-4S+RM Normmessung 9 kHz – 150 kHz

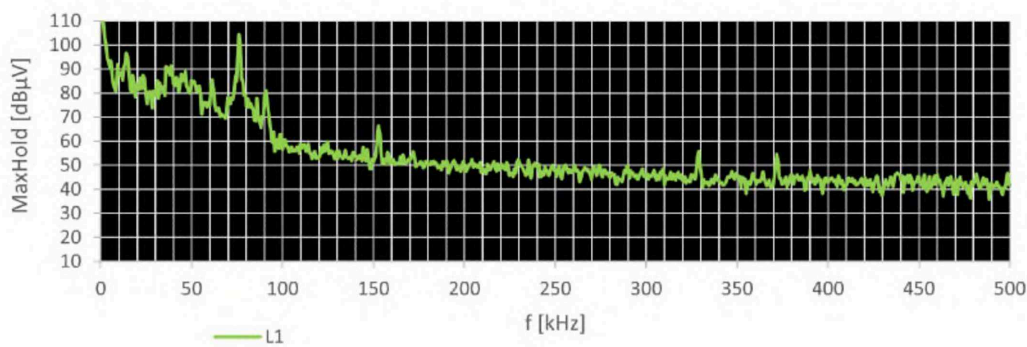


Abbildung 67: Spektrum Switch MikroTik CRS328-24P-4S+RM bis 500 kHz

Abbildung 66 zeigt die Vermessung nach Norm bis 150kHz. Der Switch erfüllt sehr knapp die Grenzwerte aus Abbildung 11 für Störemissionen nach ÖVE/ÖNORM EN 61000-2-2: 2020-06-01. Nach dem neuen Normenentwurf würden die Störaussendegrenzwerte nicht mehr eingehalten werden mit der Spitze bei 76,719 kHz mit 98,48 dBµV.

Die Spitzen bei 152,817 kHz mit einer Höhe von 66,47 dBµV, bei 328,873 kHz mit 55,75 dBµV und bei 371,830 kHz mit 54,40 dBµV sind ebenfalls knapp an der Grenze der geltenden Norm. Es fällt bei diesem Gerät ebenfalls ein breitbandiger hoher Störpegel auf.

Verschiedene Verbraucher im Vergleich

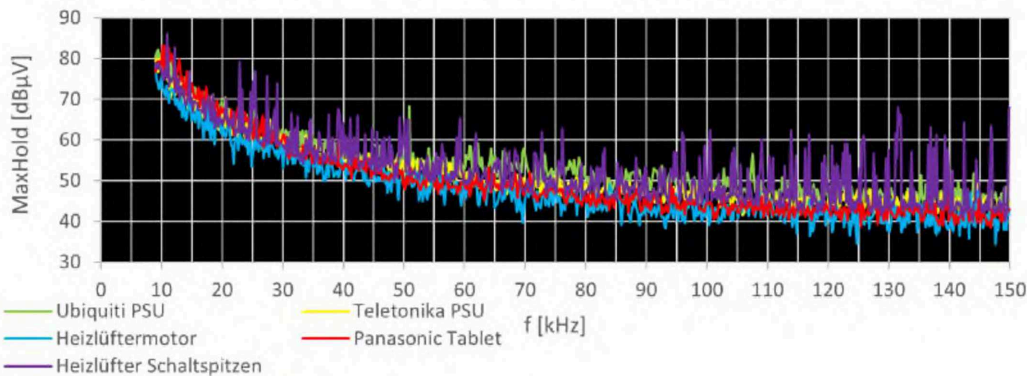


Abbildung 68: Spektrum verschiedener Verbraucher im Vergleich Normmessung 9 kHz - 150 kHz

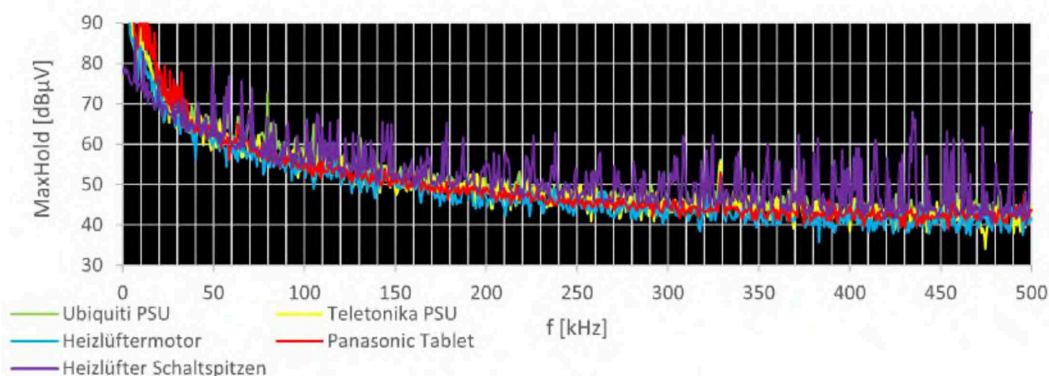


Abbildung 69: Spektrum verschiedener Verbraucher im Vergleich bis 500kHz

In Abbildung 68 und 69 werden verschiedene Verbraucher gemessen und verglichen. Die Power Supply Unit (PSU)s von Ubiquiti, Teletonika und dem Panasonic Tablet stellen weitere im Labor aufgefundene störende Verbraucher dar. Diese verursachen zwar weniger hohe Störpegel als der Switch aus Kapitel 6.2.4, sind aber in Summe am Netz dennoch deutlich sichtbar. Besonders interessant ist das aktive Schalten der Bedienung des Heizlüfters. Durch dieses können hohe breitbandige Störpegel erzeugt werden, die bis in einen hohen Frequenzbereich sichtbar sind. Diese breitbandigen Schaltspitzen sind auch öfters in Messungen am Netz erkennbar.

6.2.5 Diskussion der aktiv einspeisenden Störquellen

Die Messung von Störquellen an einer LISN bringt den Vorteil der Isolierung einzelner Geräte, jedoch entspricht dies nur näherungsweise den emittierten Störpegeln im Netz. Die Netzimpedanz unterscheidet sich von jener der LISN und die emittierten Störpegel fallen in der Praxis öfters höher aus. Zur Vergleichbarkeit einzelner Verbraucher ist diese Form der Messung aber bestens geeignet. Es konnten Unterschiede in den Störaussendepiegeln verschiedener Geräte gezeigt werden. Im höheren Frequenzbereich des FCC fallen die Störpegel in allen untersuchten Fällen deutlich geringer aus und waren zum Teil gar nicht feststellbar. Grund dafür könnte die normative Restriktion von Störaussendepiegeln in diesem Bereich sein, sodass die Industrie bei der der Herstellung von Geräten grundsätzlich Störemissionen oberhalb von 150 kHz zu vermeiden trachtet.

Die Hypothese, dass Elektroautos [24] starke Störquellen darstellen, konnte ausdrücklich bestätigt werden. Überraschenderweise können auch Geräte mit vergleichsweise geringen Leistungen, wie z.B. kleine Schaltnetzteile oder ein Switch, starke Störpegel verursachen. Da zukünftig mehr Elektroautos und IT-Geräte neu zum Netz dazukommen werden, werden auch die Störungen am Netz zunehmen und dies ist insbesondere in CEN-A zu erwarten.

6.3 Kanalmessungen

Einflüsse auf die PLC sind am besten erkennbar durch die Messung von Punkt-zu-Punkt-Verbindungen. Bei diesen fließen alle Einflüsse wie aktiv einspeisende Störquellen, Impedanzprobleme und auch ebenfalls noch unbekannte Einflüsse mit in das Messergebnis ein. Auf Basis der im Kapitel 6.2 und im Kapitel 6.1 gefundenen Ergebnisse wird in den folgenden Messungen ein deutlicher Unterschied in der PLC in den Frequenzbändern CEN-A und FCC erwartet. Es wird ebenfalls eine höhere Übertragungsqualität für Phasenkoinzidenz, d.h. konduktive Verbindung ohne Übersprechen zwischen den Phasen, erwartet. Zusätzlich wird aus den Erkenntnissen der Impedanzmessungen im Kapitel 6.1 ein vermehrtes Übersprechen zwischen den Phasen erwartet. Der Einfluss von in diversen Szenarien eingebrachten aktiven Störpegelquellen sollte eine Verschlechterung der Übertragungsqualität bewirken. Es wird auch erwartet, dass FCC trotz theoretisch höherer Dämpfung in den höheren Frequenzen weitere Reichweiten als CEN-A erzielt.

6.3.1 Methodik: Kanalmessungen

Für die Messungen wurde das Messgerät nBox 8.5, zu sehen in Abbildung 70, verwendet.



Abbildung 70: Neuron nBox-Tool G3-plc, Quelle: Neuron 8.5

Dieses ist nach dem Prinzip in Schaltung in Abbildung 2 ausgeführt. Die auf Maximum eingestellten Sendepiegel sind in den Abbildungen 71 und 72 dargestellt. In beiden Bildern sind die Träger der PLC gut erkennbar. Die Pegel wurden an einer einphasigen LISN gemessen. Am Netz werden sich diese Pegel je nach den vorherrschenden Impedanzverhältnissen unterscheiden [43]. Der einphasige Betrieb wird sich ebenfalls

vom dreiphasigen unterscheiden, bei dem sich die Signalleistung, je nach den jeweiligen vorherrschenden Zugangsimpedanzen, auf den Phasen aufteilen wird.

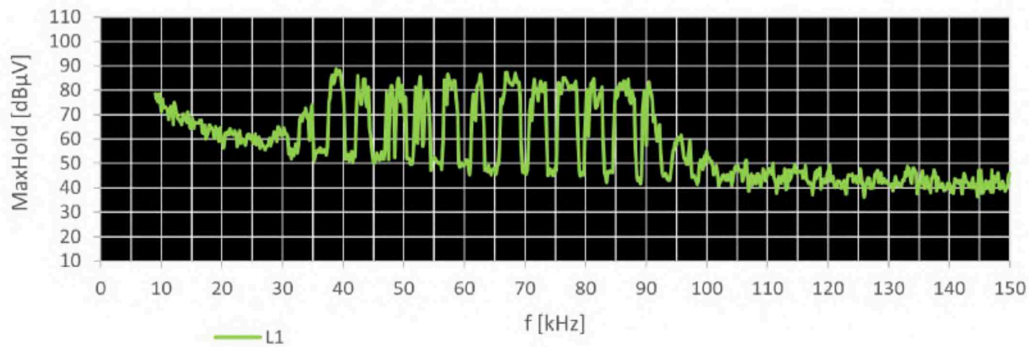


Abbildung 71: Neuron nBox 1067 Sendepegel in CEN-A für 9 kHz – 150 kHz

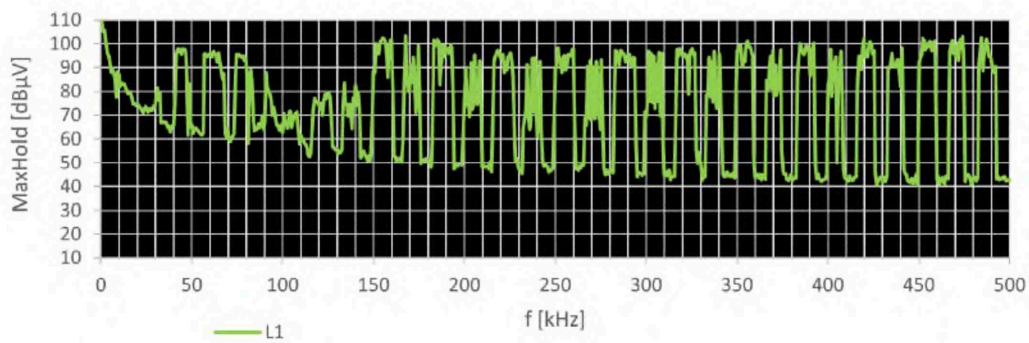


Abbildung 72: Neuron nBox 1067 Sendepegel in CEN-A und FCC bis 500 kHz

Die nBox sendet nach einem vordefinierten Muster in allen Modulationen und falls, wie im vorliegenden Fall, kein Notching eingestellt ist, auch in allen Frequenzen von CEN-A oder FCC. Es kann daher der Anteil der empfangenen Datenpakete (RX-Rate) ausdrücklich als ein Indikator der Übertragungsqualität verwendet werden.

- Die RX-Rate gibt auch Rückschluss über die möglichen Datenraten im Kanal, da zuerst die höheren Modulationsarten wegen deren höheren Anforderungen an das SNR bei gleichem BER, wie in Abbildung 9 dargestellt, ausfallen.
- Als weiterer Indikator dient der im G3-PLC Standard [10] definierte Received Signal Strength Indicator (RSSI). Die empfangene Signalstärke RSSI ist ein Maß für die inkohärente (rohe) HF-Leistung in einem Kanal.

- Der Wert „Noise [dB μ V]“ ist der gemessene Störpegel (Noise) in dB μ V. Dieser zeigt die höchste aktiv einspeisende Störquelle im Frequenzband auf einem oder mehreren Trägern, unabhängig von der genauen Frequenz, auf.

In den nachfolgenden Messergebnissen ist die Phasenbezeichnung stets auf die TST bezogen. Für die Messungen wurde das nötige Messequipment mittels eigener USV versorgt, um Selbstbeeinflussungen zu minimieren. Eine Messung in beide Richtungen mit Wechsel von Sender und Empfänger ist nötig, da die Übertragungsqualität einer Strecke stark richtungsabhängig ist, je nach den Impedanzverhältnissen am Netz. So kann es sogar sein, dass bei guter Signalübertragung in eine Richtung keine Übertragung in die Gegenrichtung möglich ist.

6.3.2 Kanalmessung in einem Bürogebäude

Die Sende- und Empfangseinheit der nBoxen sind für diese Messung nur einphasig angeschlossen und ermöglichen so kein Übersprechen durch die Querkopplung der Phasen über die in der Schaltung in Abbildung 2 angeführten Kondensatoren. Dies ist insbesondere wichtig, um den Einfluss von Störquellen nicht zusätzlich auf andere Phasen aufzuteilen. In den Messungen soll der Einfluss auf eine in der Praxis auftretende Kommunikationsstrecke zwischen einem SM und einem DG/DK ermittelt werden, wie in Abbildung 73 dargestellt. Das SM empfängt daher nur auf der Phase L1 nach dem Prinzip aus Abbildung 1 und das DG/DK sendet je auf einer Phase separat ähnlich dem Prinzip aus Abbildung 3. Dafür wurden die beiden nBoxen entsprechend der einzelnen gemessenen Kommunikationsstrecken verdrahtet. Bei den Messungen wurde sichergestellt, dass keine anderen Lasten, wie andere Elektroautos und Einrichtungen im Labor, aktiv sind. Dies kann allerdings nicht realisiert werden für die anderen Abgänge der NSHV, von der die anderen Büros gespeist werden.

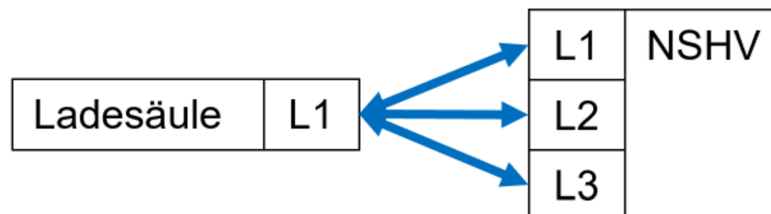


Abbildung 73: Phasenprinzip der Kanalmessung in einem Bürogebäude

Kanalmessung nach Störquellenbereinigung

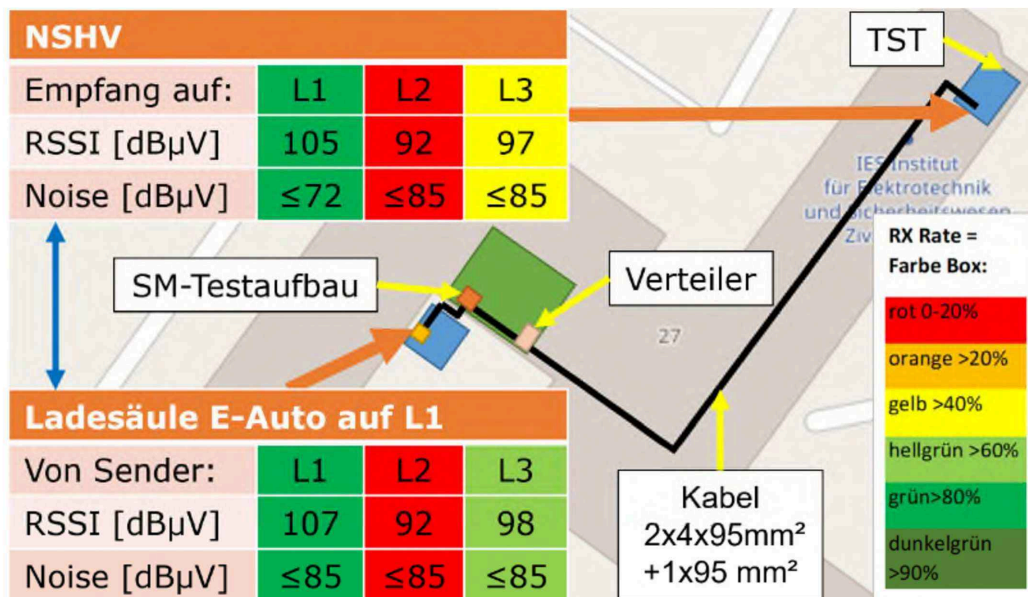


Abbildung 74: Bidirektionale Kanalmessung nach Störquellenbereinigung im Labor in CEN-A

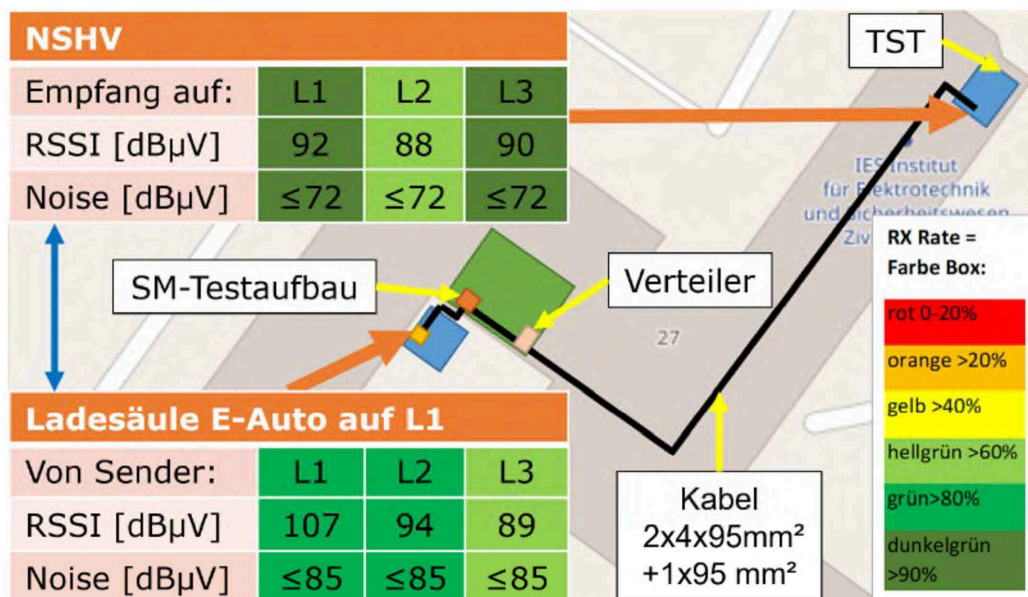


Abbildung 75: Bidirektionale Kanalmessung nach Störquellenbereinigung im Labor in FCC

Um Einflüsse auf einen Kommunikationskanal beurteilen zu können, wird dieser ohne

Störquellen durchgemessen, um eine Referenz zu erhalten. Diese Störquellen sind die im Kapitel 6.2 aktiv einspeisende Störquellen angeführte Klimaanlage und der Switch. Diese wurden im Rahmen der Kanalmessungen entdeckt und für die weiteren Kanalmessungen vom Netz genommen.

In Abbildung 74 und 75 sind die Messungen des Kanals von der NSHV zur Ladesäule in CEN-A und FCC aufbereitet ¹. In Abbildung 74 sind deutliche Probleme beim Empfang der PLC auf L2 in CEN-A in beiden Transmissionsrichtungen zu sehen. Dies liegt unter anderem daran, dass hier ein Überkoppeln vom Sender auf der Phase L2 auf die Phase L1 beim Empfang beobachtet wird. Somit sind erwartungsgemäß auf der konduktiven Phase L1 die RX-Rate und das RSSI am höchsten. Die Phase L3 weist ähnliche Auswirkungen wie die Phase L2 auf, nur nicht so ausgeprägt und sie besitzt ein besseres Verhalten im Übersprechen mit höherem RSSI. In FCC in Abbildung 75 ist das Problem auf der Phase L2 im Vergleich zu CEN-A nicht so stark sichtbar. Die RX-Rate ist auf den Phasen L1 und L2 am höchsten mit Werten über 90 % beim Empfang an der Ladesäule. Es zeigt sich jedoch eine Richtungsabhängigkeit auf der Phase L1 bei der RX-Rate und beim RSSI. Das empfangene RSSI ist in der NSHV geringer als bei der Ladesäule. Die Störpegel am Netz sind in der NSHV, vor allem in FCC, ebenfalls geringer als an der Ladesäule. Die empfangenen RSSI-Werte an der Ladesäule auf der konduktiven Phase L1 von 106 dB μ V in CEN-A und 107 dB μ V in FCC sind nahe an der oberen möglichen Grenze. Das Signal wird auf dieser Strecke kaum gedämpft. In die Gegenrichtung von der Ladesäule L1 in die NSHV zeigt sich wieder, dass die beste Verbindung konduktiv ist. Dennoch ist auf L3 das Übersprechen in FCC fast genau so gut in der RX-Rate und im RSSI wie im konduktiven Fall. In CEN-A zeigen sich schlechtere Werte im Übersprechen als in FCC. Die Phänomene der geringeren Störpegel und des geringeren RSSI können mit den geringen vorgefundenen Impedanzen in der NSHV, zu sehen in Abbildung 31 und 32, zu tun haben. Im Vergleich zu den Impedanzen an der Ladesäule in Abbildung 33 und Abbildung 34 fallen diese in der NSHV geringer aus und ermöglichen über die Phase-Phase-Impedanzen eine bessere Verteilung der Pegel auf die drei Phasen.

Die in Abbildung 31 zu sehen geringeren Phase-Neutralleiterimpedanzen in der NSHV erzeugen vermutlich geringere Spannungspegel in dB μ V, da bei gleicher Signalleistung mehr Strom fließen kann.

¹Allgemeines zu den aufbereiteten Grafiken: In den aufbereiteten Bildern wurde die Kommunikationsstrecke von der NSHV über das Kabel mit 2x4x95 mm²+1x95 mm²(Erdungskabel) über 100 m und der weiteren Verteilung im Labor bis hin zur Ladesäule angeführt. In der Legende ist die RX-Rate dargestellt. Die jeweiligen Phasen wurden anhand dieser gefärbt, um die Qualität der Übertragung leicht erkennbar zu machen und um für einen einfacheren Vergleich der Messungen untereinander zu sorgen.

Kanalmessung im Feld mit Störquellen im Labor

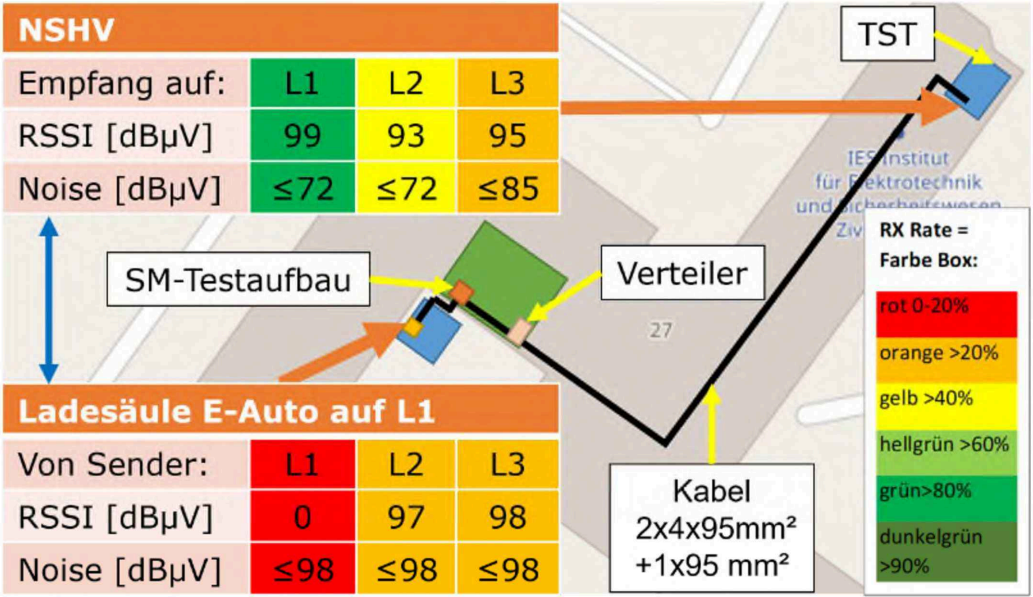


Abbildung 76: Bidirektionale Kanalmessung mit Störquellen Klimaanlage und Switch in CEN-A

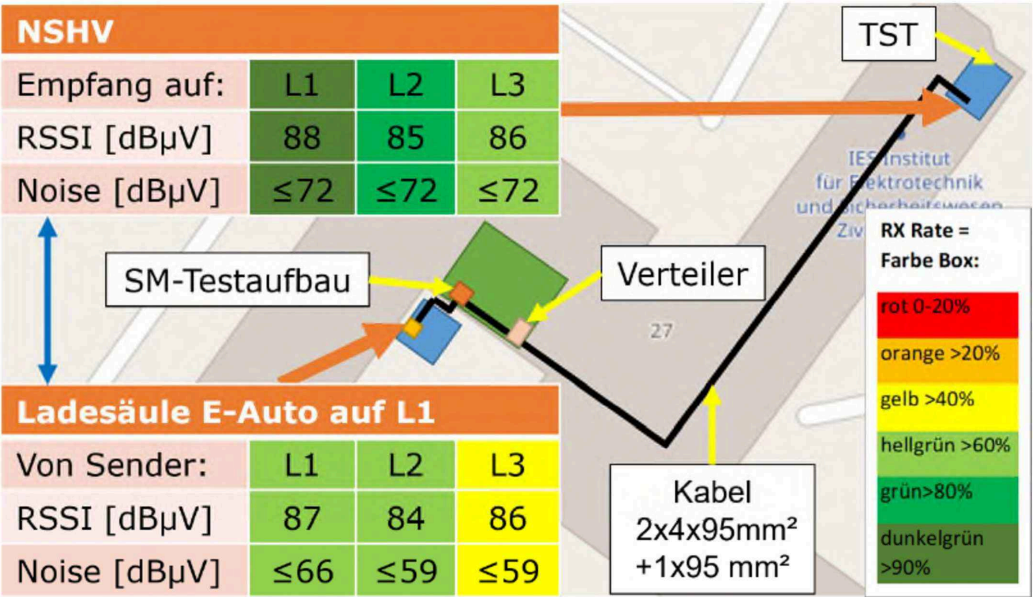


Abbildung 77: Bidirektionale Kanalmessung mit Störquellen Klimaanlage und Switch in FCC

In diesem Szenario zu sehen in Abbildung 76 und 77 sind die aktiv einspeisenden

Störquellen Klimaanlage (Kapitel 6.2.2) und Switch (Kapitel 6.2.4) im Labor aktiv. Diese sind elektrisch näher zur Ladesäule, von der aus gemessen wird. Erwartet wird eine deutliche Verschlechterung der PLC auf der Phase L1 durch den Einfluss des Switches in CEN-A. Die Klimaanlage sollte eine Verminderung der Übertragungsqualität auf allen drei Phasen bewirken.

Im Vergleich zu den Messungen mit der Störquellenbereinigung zeigt sich mit den Störquellen im Labor beim Empfang an der Ladesäule in CEN-A, dass auf der Phase L1 keine PLC mehr festgestellt werden kann. Dies liegt unter anderem an den stark gestiegenen Störpegeln auf allen Phasen. Diese sind mit bis zu 98 dB μ V auf allen drei Phasen im Messbereichsmaximum des Messgerätes. Auf der Phase L2 ist durch ein vermutlich besseres Übersprechen die RX-Rate leicht gestiegen mit höheren Werten des RSSI. Auf L3 ist eine deutliche Verschlechterung zu erkennen mit gleich gebliebenen RSSI. Beim Empfang in der NSHV in CEN-A zeigen sich ähnliche Werte im RSSI und bei den Störpegeln wie bei der Messung mit der Störquellenbereinigung. Bei der RX-Rate zeigte sich eine Verbesserung auf das Doppelte auf L2 und eine Verschlechterung um eine Stufe der Skala von auf der Phase L3.

In FCC sind im Vergleich zu den Messungen mit der Störquellenbereinigung die RSSI-Werte auf allen Phasen beim Empfang an der Ladesäule und in der NSHV gesunken und die RX-Rate ist leicht zurückgegangen. Außergewöhnlicherweise sind die Störpegel ebenfalls auf allen Phasen geringer geworden.

Kanalmessung mit Störquelle Hyundai Kona

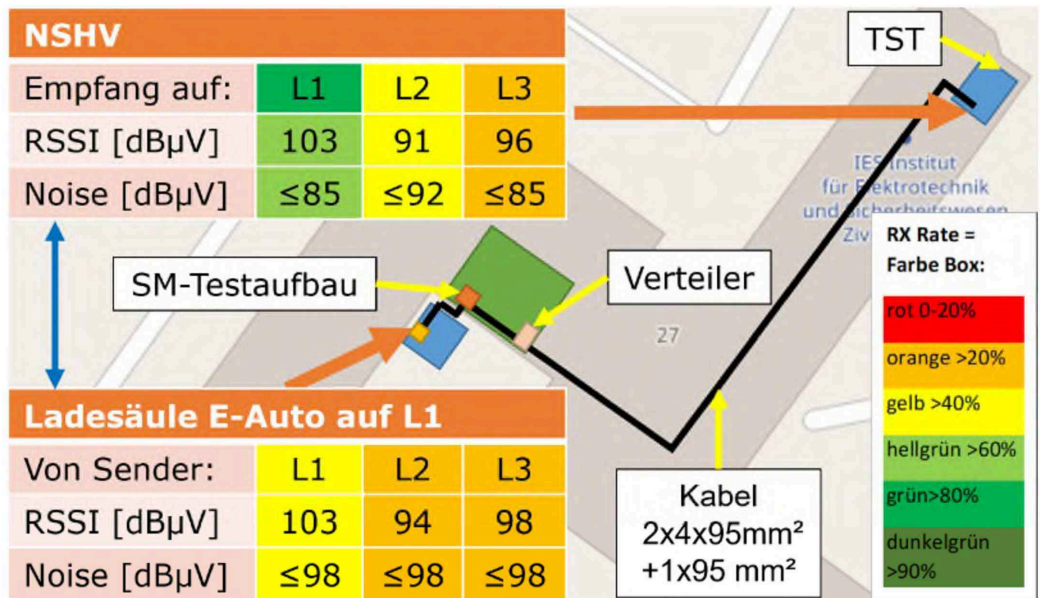


Abbildung 78: Bidirektionale Kanalmessung bei einem Ladezyklus des Hyundai Kona mit 16A und deaktivierten Störquellen Klimaanlage und Switch in CEN-A

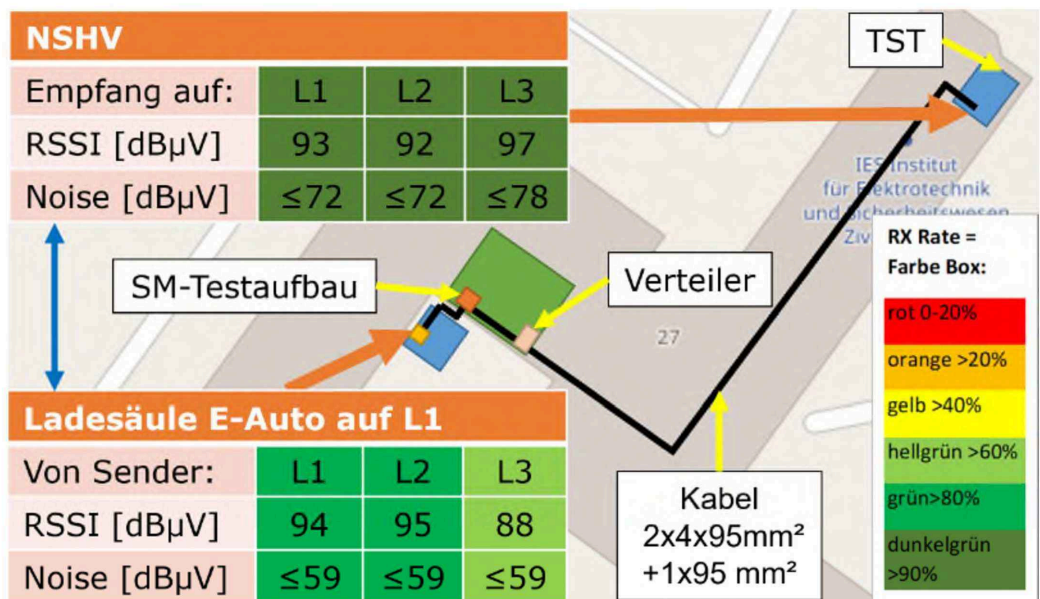


Abbildung 79: Bidirektionale Kanalmessung bei einem Ladezyklus des Hyundai Kona mit 16A und deaktivierten Störquellen Klimaanlage und Switch in FCC

Um die Auswirkungen des Ladens eines Elektroautos auf die PLC zu erfassen wurde ein Szenario mit Störquellenbereinigung und dem Laden eines Hyundai Kona implementiert. Der Hyundai Kona lädt mit den Strömen, wie in Tabelle 9 und erzeugt dabei ähnliche Störpegel wie in Abbildung 57 zu sehen. Die auftretenden Störpegel treten dabei hauptsächlich in CEN-A auf. In FCC war bei diesem Elektroauto nichts messbar. Es wird eine deutliche Verschlechterung der PLC in CEN-A erwartet.

In CEN-A in der Abbildung 78 sind ähnliche Werte des RSSI aufgetreten, wie bei der Kanalmessung mit Störquellenbereinigung zu sehen. Die Werte der RX-Rate zeigen Fluktuationen. Auf L1 und auf L3 sind in beiden Richtungen die RX-Raten gesunken. Dies ist deutlich zu sehen vor allem beim Empfang an der Ladesäule. Auf L2 hingegen ist eine Verbesserung der RX-Rate zu erkennen. Die Störpegel an der Ladesäule sind auf sehr hohe Werte im Messbereichsmaximum des Messgerätes gestiegen. In FCC in der Abbildung 78 zeigten sich kaum ein Unterschied in den RX-Raten und beim RSSI.

Kanalmessung mit Störquellen im Labor und Laden des Kia EV6

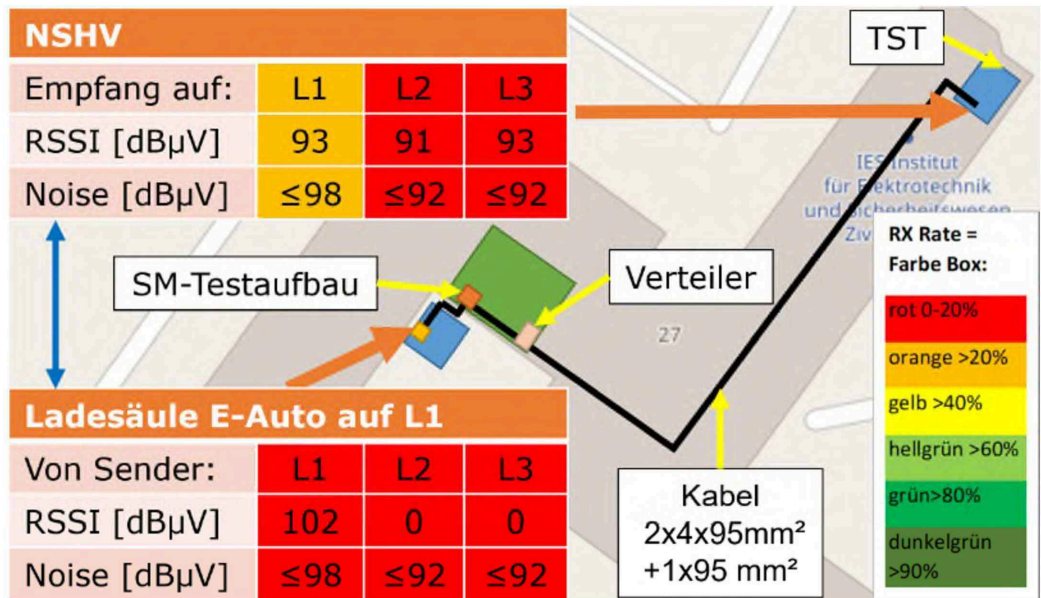


Abbildung 80: Bidirektionale Kanalmessung bei einem Ladezyklus des Kia EV6 mit 16A und aktiven Störquellen Klimaanlage und Switch in CEN-A

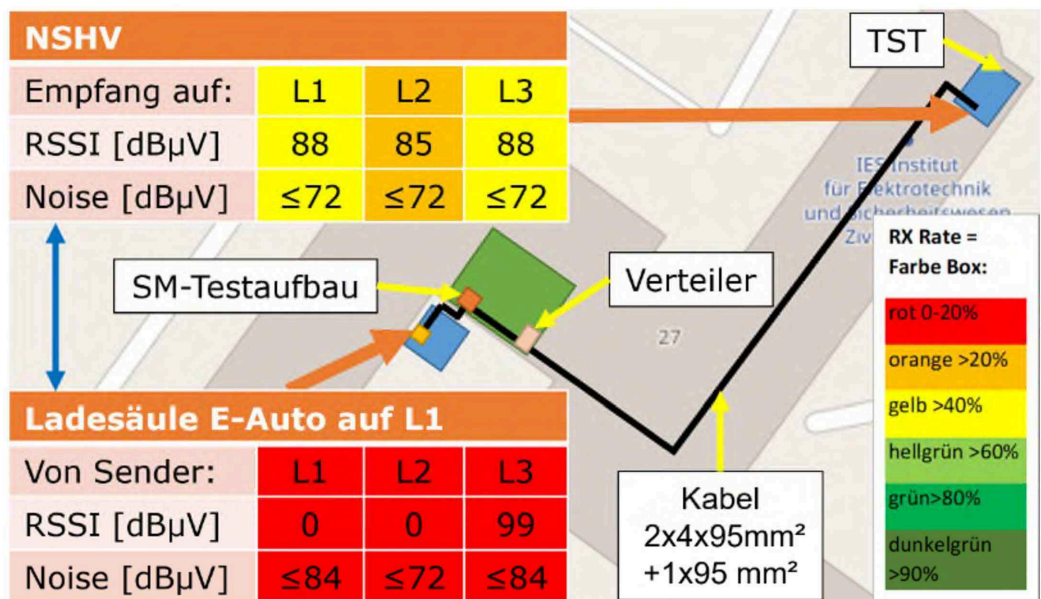


Abbildung 81: Bidirektionale Kanalmessung bei einem Ladezyklus des Kia EV6 mit 16A und aktiven Störquellen Klimaanlage und Switch in FCC

Der Ladezyklus des Kia EV6 mit den in Tabelle 10 angegebenen Ladeströmen zeigte Pegelstörungen bis in die unteren FCC-Frequenzen, zu sehen in Abbildung 59. In CEN-A addieren sich die Störungen des Ladens des Elektroautos, des Switches und der Klimaanlage im Labor. Diese Kombination zeigt gut ein real auftretendes zukünftiges Szenarium im Netz, in dem mehrere Einflüsse durch Verdichtung der IT und durch erhöhtes Ladeaufkommen von Elektroautos gleichzeitig wirken. In dieser Messung wird der schlechteste Fall und somit die geringste Übertragungsqualität der PLC festgestellt.

In CEN-A ist ein starker Rückgang der RX-Raten im Vergleich zu den vorherigen Messungen in beiden Richtungen zu erkennen. Bei der Ladesäule ist kein Empfang der übersprechenden PLC-Signale von L2 und L3 möglich und somit wurde ein RSSI auf 0 gesetzt. Die anderen RSSI-Werte sind bis auf auftretende Schwankungen gleich geblieben wie in den vorhergehenden Messungen. Somit ist kein Einfluss von einer Impedanzveränderung am Netz erkennbar. Konduktiv ist auf L1 eine Verbindung in beide Richtungen mit schlechter RX-Rate möglich. Die Störpegel sind mit 92 dB μ V und 98 dB μ V bereits am Messbereichsmaximum des Messgerätes und erklären die schlechten RX-Raten. In FCC konnte überraschenderweise nur von der nichtkonduktiven Phase L3 an der Ladesäule ein PLC-Signal registriert werden. Die RX-Raten sind auch hier, wie erwartet, stark zurückgegangen. Somit konnte gezeigt werden, dass diese Problematik auch in FCC zu massiven Einschränkungen in der PLC führen kann.

7 Conclusio

Die Smart Meter Power Line Communication (SM-PLC) ist eine äußerst ausgefeilte moderne Technologie, die mittels robuster Modulationsart, Fehlerkorrekturalgorithmen, einer optimierten Einkoppelung ins Netz und einem sehr fortschrittlichen Routingkonzept versucht, den Herausforderungen von unerwünschten Einflüssen auf die PLC am elektrischen Energieversorgungsnetz zu entgegenen.

Die aktuellen Normenentwürfe werden fortlaufend nachgebessert, um die Störpegel auch im CENELEC-A-(CEN-A)-Frequenzband zu regulieren und somit die auftretenden Störemissionen im Niederspannungsnetz zu begrenzen. Mit Anpassungen ist hier erst mit frühestens Anfang des Jahres 2023 zu rechnen. Bei der kommenden Umsetzung dieser Anpassungen sind jedoch nicht bereits bestehenden Geräte betroffen, deren Störungen über deren Lebensdauer im Netz weiter bestehen bleiben und zusätzlich wird es Übergangsfristen für Lagerbestände usw. geben müssen. Es muss daher erwartet werden, dass es zu einer weiteren Zunahme an Störbeeinflussungen im Niederspannungsnetz im CEN-A-Frequenzband kommen wird. Das höherfrequente FCC-Frequenzband ist hier klar im Vorteil mit den dort strengeren normativen Begrenzungen. Für die öffentlichen Verteilnetzbetreiber bedeutet die aktuelle Normungssituation, dass für die normative Beurteilung von Störeinflüssen auf die SM-PLC in CEN-A eine derzeit noch ungenügende Basis zur Verfügung steht. Die Auswirkungen der fehlenden Beschränkungen von Störaussendungen sind in den Messungen klar zu sehen.

Für die durchgeführten Messungen wurde ein leistungsstarker SM-Teststand mit bis zu 44kW Anschlussleistung aufgebaut. Dieser SM-Teststand mit Nachbildung eines Zählerraumes bietet den Vorteil flexibler Messmöglichkeiten, d.h. eine gute Anschlussmöglichkeit mit relativ konstanter Zugangsimpedanz und eine sichere Messumgebung mit den notwendigen elektrischen Schutzeinrichtungen für Messungen. Dies zeigt sich z.B. in der Möglichkeit der Messung von Kabeln an einem definierten Anschlusspunkt und das einfache Einbringen einer dreiphasigen Netznachbildung (LISN) als Netzelement zur Herstellung einer ungestörten Umgebung und für Vergleichsmessungen diverser Lasten.

Die Messung von Zugangsimpedanzen mittels Impedanzmessgerät (IMD) und die daraus errechneten Kabelimpedanzen zeigen ein Bild der besseren Entkopplung von Störquellen in Kundenanlagen in den Frequenzen von FCC durch serielle Kabelstücke. Es fällt ein höherer Wert der Impedanzen im hohen Frequenzbereich und Resonanzerscheinungen im mittleren Frequenzbereich in der Nähe von 300 kHz in den meisten Messungen auf. Die Unterschiede in den gemessenen Impedanzwerten lassen Rückschlüsse auf die Eigenschaften des Übertragungskanals für CEN-A und FCC zu. Die Netzelemente zeigen auch unterschiedliches Verhalten je nach Kabeltype und Phase L1/L2/L3, aber auch je nach Verlegeart. Die gemessenen Kabel mit geringerem Querschnitt haben erwartungsgemäß auch für PLC im höherfrequenten Bereich mit der Frequenz ansteigende Impedanzen als die mit größerem Querschnitt. Überträgt man diese Ergebnisse auf ein öffentliches Niederspannungsnetz, so erklärt sich eine höhere Dämpfung von Störungen durch Kundenanlagen und eine bessere Übertragung der PLC, je näher man sich beim

Transformator befindet. Da ein $5 \times 16 \text{ mm}^2$ Kabel einer Steigleitung entspricht, können Störsignale von in Kundenanlagen angeschlossenen Verbrauchern in höheren Frequenzen besser gedämpft werden. Die PLC-Signalpegel dagegen werden von einem Sender, der im Zählerraum im Kellergeschoß sitzt, weniger gedämpft. Interessant wäre hier eine weitere Untersuchung der Auswirkung von Querschnittserhöhungen durch Parallelführung von Kabeln. Die Impedanzmessungen sind allerdings nicht so zielführend wie jene von Störpegelquellen am Netz, da die Zugangsimpedanz sich in einem praxisnahen Netz als sehr volatil herausstellt. Dennoch sind aus den Messungen der Zugangsimpedanz in einem Bürogebäude Rückschlüsse für Erscheinungen möglich, die in vielfältigen Kanalmessungen festgestellt werden können.

Eine Langzeitmessung in einem Bürogebäude zur Identifikation von aktiv einspeisenden Störpegelquellen bringt einen guten Überblick der Situation vor Ort und ermöglicht gezielt die Nachverfolgung und Detektion der Störpegelquellen. In der Nachverfolgung können eine Vielzahl an unterschiedlichen Störpegelquellen detektiert und analysiert werden. Diese sind z.B. das Laden von Elektroautos, neu installierte IT-Infrastruktur, einzelne besondere Betriebsmittel, wie eine Klimaanlage oder Frequenzumrichter in Liftantrieben und diverse kleine Schaltnetzteile.

Bei Störpegelmessungen an einer leistungsstarken dreiphasigen LISN konnte die Hypothese, dass Elektroautos starke Störquellen darstellen, ausdrücklich bestätigt werden. Überraschenderweise können auch Geräte mit vergleichsweise sehr geringen Leistungen, wie z.B. kleine Schaltnetzteile oder ein Switch, starke Störpegel verursachen. Da zukünftig mehr Elektroautos und IT-Geräte neu zum Netz hinzukommen werden, ist mit einer Zunahme der Störungen am Netz, insbesondere in CEN-A, zu erwarten. Die höheren Frequenzen sind hier deutlich im Vorteil, da aktiv einspeisende Störquellen in den Messungen nur bis zu Frequenzen von bis zu maximal 200 kHz beobachtet werden. Bei PLC-Kanalmessungen konnte der starke negative Einfluss von aktiv einspeisenden Störpegelquellen vor allem in CEN-A gezeigt werden. Diese Störungen können zwar auch vereinzelt bis in die höchsten Frequenzen der FCC reichen und generell eine PLC stark beeinträchtigen, sind jedoch überwiegend in CEN-A zu beobachten. Dies gilt vor allem für den Empfang der PLC in der Nähe von aktiv einspeisenden Störpegelquellen, da hier das PLC-Signal ausgehend vom Sender über die Strecke beim SM bereits gedämpft ankommt und der Signalrauschabstand (SNR) dementsprechend niedrig ausfallen kann. Aus den Messungen der aktiv einspeisenden Störpegelquellen an einer LISN lassen sich diese Einflüsse gut vorhersagen. Sollten künftig vermehrt Elektroautos am Netz angeschlossen sein, so ist mit einem vermehrten Auftreten dieser Probleme zu rechnen. In allen Szenarien der Kanalmessungen, die möglichst praxisnahe in einem realen Netz erfolgten, konnte FCC als deutlich PLC freundlicher als CEN-A beurteilt werden.

Es zeigt sich über alle Messungen hinweg eine deutlich bessere Qualität der Übertragung in FCC, was vor allem Datenraten, Reichweite und den Einfluss von aktiv einspeisenden Störpegelquellen betrifft. Insgesamt kann festgestellt werden, dass das FCC-Frequenzband für die SM-PLC langfristig eine geeignetere Übertragungs Umgebung darstellt als CEN-A und somit auch die Hypothesen vieler anderer Arbeiten bestätigt werden können.

Abbildungsverzeichnis

1	Einphasige PLC-Einkopplung über Koppelkondensator	9
2	Dreiphasige PLC-Einkopplung über Koppelkondensator in Sternschaltung	10
3	Dreiphasige PLC-Einkopplung mit phasenetrennter Einkoppelung	11
4	TN-C-S-Netz	12
5	Struktur einer Ortsnetzzelle in städtischen Netz	13
6	G3-OSI-Schichtenmodell, Quelle: G3-PLC-Alliance [15]	13
7	QPSK Leistungsspektrum in logarithmischer Darstellung, Quelle: [19] S.423, Bild 11.26 b)	15
8	QPSK Spannungsspektrum für orthogonale Inphase(I) und Quadratur (Q), Quelle: [19] S.424, Bild 11.27	15
9	BER in Abhängigkeit von SNR und Modulationsart, Quelle: G3-PLC Alliance Präsentation [21]	17
10	Prüfaufbau für Prüflinge, an die nur eine Stromversorgungsleitung angeschlossen ist, Quelle: EN 55016-2-1 [25] S.46, Bild 11	20
11	SM-PLC Sende-, Stör- und Verträglichkeitspegel aus den Normen	24
12	Einflüsse am Netz auf die PLC-Übertragung	26
13	Prinzipien von Netztopologien	27
14	Leitungsgleichungen einer Doppelleitung	29
15	Symmetrische Admittanzkomponenten eines symmetrischen Elementar- Querachtpols	29
16	Beispielhafte Darstellung der möglichen parasitäre Kapazitäten eines 5- poligen Kabels im Erdreich	30
17	Einflüsse von Impedanzen in der Parallelschaltung	31
18	SM-Testaufbau Netzzugangsseite	33
19	SM-Testaufbau Abgänge	34
20	SM-Testaufbau Frontansicht mit offenem Verteilerkasten	36
21	SM-Testaufbau Seitenansicht	37
22	SM-Testaufbau Rückseite	38
23	Messprinzip IMD	39
24	Kabelmessprinzip IMD	41
25	Ersatzschaltbild einer realen Kapazität	41
26	Bodediagramm der Impedanz des Ersatzschaltbildes einer realen Kapazität	42
27	Ersatzschaltbild einer realen Induktivität	42
28	Bodediagramm der Impedanz des Ersatzschaltbildes einer realen Induktivität	43
29	Phase-Neutralleiter-Impedanzen im Anschlusspunkt am SM-Messplatz . .	44
30	Phase-Phase-Impedanzen im Anschlusspunkt am SM-Messplatz	45
31	Phase-Neutralleiter-Impedanzen in der Niederspannungshauptverteilung .	46
32	Phase-Phase-Impedanzen in der Niederspannungshauptverteilung	47
33	Phase-Neutralleiter-Impedanzen an einem Ladeanschlusspunkt für Elektroautos	48
34	Phase-Phase-Impedanzen an einem Ladeanschlusspunkt für Elektroautos .	49

35	Phase-Neutralleiter-Impedanzen Kabel NSHV-Labor 2x4x95 mm ² +1x95 mm ²	50
36	Phase-Neutralleiter-Impedanzen Kabel 16 mm ² Betrag im aufgerollten Zustand im Vergleich zum ausgerollten Zustand	51
37	Phase-Neutralleiter-Impedanzen Kabel 16 mm ² Argument im aufgerollten Zustand im Vergleich zu ausgerollten Zustand	51
38	Phase-Phase-Impedanzen Kabel 16 mm ² Betrag aufgerollt im Vergleich zum ausgerollten Zustand	52
39	Phase-Phase-Impedanzen Kabel 16 mm ² Argument aufgerollt im Vergleich zum ausgerollten Zustand	52
40	Phase-Phase-Impedanzen Kabel 16 mm ² Betrag ausgerollt am Parkplatz im Vergleich zu ausgerollt auf einer Wiese	53
41	Phase-Phase-Impedanzen Kabel 16 mm ² Argument ausgerollt am Parkplatz im Vergleich zu ausgerollt auf einer Wiese	53
42	Kabel mit 5x16 mm ² ausgerollt am Parkplatz	54
43	Kabel mit 5x16 mm ² ausgerollt auf einer Wiese	54
44	Phase-Neutralleiter-Impedanzen Kabel 5x10 mm ² Betrag ausgerollt	55
45	Phase-Neutralleiter-Impedanzen Kabel 5x10 mm ² Argument ausgerollt	55
46	Phase-Phase-Impedanzen Kabel 10 mm ² Betrag ausgerollt	56
47	Phase-Phase-Impedanzen Kabel 10 mm ² Argument ausgerollt	56
48	Phase-Neutralleiter-Impedanzen Kabel 6 mm ² Betrag ausgerollt	56
49	Phase-Neutralleiter-Impedanzen Kabel 6 mm ² Argument ausgerollt	57
50	Skala für CEN-A Störpegel	58
51	Skala für FCC Störpegel	58
52	NSHV 60-minütige Mittelwerte zu Störungen im Netz in CEN-A und FCC	59
53	NSHV 15-minütige Mittelwerte zu Störungen am Mittwoch im Netz in CEN-A und FCC	60
54	Messschaltung mit LISN für dreiphasige Verbraucher	61
55	JUICE BOOSTER 2 Ladegerät	62
56	Spektrum JUICE BOOSTER 2	62
57	Spektrum Hyundai Kona Normmessung 9 kHz – 150 kHz	63
58	Spektrum Kia EV6 Normmessung 9 kHz – 150 kHz	64
59	Spektrum Kia EV6 bis 500 kHz	64
60	Spektrum BMW I3 Normmessung 9kHz – 150kHz	65
61	Spektrum BMW I3 bis 500kHz	65
62	Spektrum Klimaanlage Normmessung 9 kHz – 150 kHz	66
63	Spektrum Klimaanlage bis 500 kHz	66
64	Liftmotor Typenschild	67
65	Spektrum am Netz mit Narda Probe SHC-1-1000 für Lift in einem Bürogebäude 9 kHz - 150 kHz	67
66	Spektrum Switch MikroTik CRS328-24P-4S+RM Normmessung 9 kHz – 150 kHz	68
67	Spektrum Switch MikroTik CRS328-24P-4S+RM bis 500 kHz	69

68	Spektrum verschiedener Verbraucher im Vergleich Normmessung 9 kHz - 150 kHz	69
69	Spektrum verschiedener Verbraucher im Vergleich bis 500kHz	70
70	Neuron nBox-Tool G3-plc, Quelle: Neuron 8.5	71
71	Neuron nBox 1067 Sendepiegel in CEN-A für 9 kHz – 150 kHz	72
72	Neuron nBox 1067 Sendepiegel in CEN-A und FCC bis 500 kHz	72
73	Phasenprinzip der Kanalmessung in einem Bürogebäude	73
74	Bidirektionale Kanalmessung nach Störquellenbereinigung im Labor in CEN-A	74
75	Bidirektionale Kanalmessung nach Störquellenbereinigung im Labor in FCC	74
76	Bidirektionale Kanalmessung mit Störquellen Klimaanlage und Switch in CEN-A	76
77	Bidirektionale Kanalmessung mit Störquellen Klimaanlage und Switch in FCC	76
78	Bidirektionale Kanalmessung bei einem Ladezyklus des Hyundai Kona mit 16A und deaktivierten Störquellen Klimaanlage und Switch in CEN-A	78
79	Bidirektionale Kanalmessung bei einem Ladezyklus des Hyundai Kona mit 16A und deaktivierten Störquellen Klimaanlage und Switch in FCC .	78
80	Bidirektionale Kanalmessung bei einem Ladezyklus des Kia EV6 mit 16A und aktiven Störquellen Klimaanlage und Switch in CEN-A	80
81	Bidirektionale Kanalmessung bei einem Ladezyklus des Kia EV6 mit 16A und aktiven Störquellen Klimaanlage und Switch in FCC	80
82	Prüfprotokoll SM-Testaufbau	92

Tabellenverzeichnis

1	Frequenzbänder PLC in Europa	7
2	Grundlegende Eigenschaften von CEN-A und FCC in der SM-Kommunikation	8
3	Theoretische Datenraten CEN-A und FCC in der SM-Kommunikation . .	16
4	EN 61000-2-2 Ausgabe 2019-07-01	22
5	EN 61000-2-2 Ausgabe 2020-06-01	22
6	Anzahl der Kopplungen mit umgebendem Medium für verschiedenpolige Kabel	30
7	Einfluss von Impedanzverhältnissen	32
8	Gewählte Parameter für Impedanzmessungen	40
9	Ladeströme Hyundai Kona	63
10	Ladeströme Kia EV6	64
11	Ladeströme BMW I3	65

Literatur

- [1] F. Tounquet, M. Linden, P. Mandatova u. a., *Supporting country fiches accompanying the report Benchmarking smart metering deployment in the EU-28*. Luxembourg: Publications Office of the European Union: Publications Office of the European Union, 2020 EUROPEAN COMMISSION Directorate-General for Energy Directorate B — Internal Energy Market Unit B.3 — Retail markets; coal & oil, März 2020, Bd. 349, S. 17, 21–22, ISBN: 978-92-76-17300-7. DOI: doi/10.2833/728829 (siehe S. 5, 6).
- [2] C. Alaton und F. Tounquet, *Benchmarking smart metering deployment in the EU-28 : final report*. Luxembourg: Publications Office of the European Union: Publications Office of the European Union, 2020 EUROPEAN COMMISSION Directorate-General for Energy Directorate B — Internal Energy Market Unit B.3 — Retail markets; coal & oil, März 2020, Bd. 142, S. 16–17, ISBN: 978-92-76-17295-6. DOI: 10.2833/492070 (siehe S. 5).
- [3] *Fakten Smart Meter*, <https://oesterreichsenergie.at/smart-meter>. (besucht am 22.05.2021) (siehe S. 5).
- [4] J. Routin und C. Brown, *Improvements in and relating to eletricity meters*, Britisch Patent GB 189 724 833 (1898/01/10), 1898 (siehe S. 5).
- [5] L. Lampe, A. M. Tonello und T. G. Swart, *Power Line Communitions: Principles, Standards and Applications from Multimedia to Smart Grid*, 2. Aufl. United Kingdom: John Wiley und Sons Ltd., 1991, Bd. 624, ISBN: 978-11-18-67668-4 (siehe S. 6, 7).
- [6] *Smart Meter – die intelligenten Zähler*, <https://www.e-control.at/konsumenten/smart-meter/warum-brauchen-wir-smart-meter>. (besucht am 22.05.2021) (siehe S. 6).
- [7] *Smart Meter*, https://www.bmk.gv.at/themen/energie/energieversorgung/smart_meter.html. (besucht am 22.05.2021) (siehe S. 6).
- [8] G. López, J. Matanza, D. Vega u. a., »The Role of Power Line Communications in the Smart Grid Revisited: Applications, Challenges, and Research Initiatives,« *IEEE Access*, Jg. PP, S. 1–1, Juli 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2928391 (siehe S. 6).
- [9] M. Girotto und A. M. Tonello, »EMC Regulations and Spectral Constraints for Multicarrier Modulation in PLC,« *IEEE Access*, Jg. 5, S. 4954–4966, 2017. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2676352 (siehe S. 7).
- [10] ITU-T, *Narrowband orthogonal frequency division multiplexing powerline communication transceivers for G3-PLC networks0*, ITU, Hrsg., <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9903-201708-I/en>, 2017. (besucht am 22.09.2021) (siehe S. 7, 58, 72).
- [11] *Datasheet AFE032 - Power-Line Communications Analog Front-End*, Texas Instruments Incorporated, 2013. (besucht am 30.10.2021) (siehe S. 9).

- [12] *Datasheet ATPL250A-EK Kit User Manual*, Atmel Corporation 1600 Technology Drive - San Jose - CA 95110 USA, 2016. (besucht am 30.10.2021) (siehe S. 9).
- [13] *Datasheet EV8600 Single-Chip Dual Modem PLC+RF SoC*, Semtech Corporation Smart Grid Products Division, 2015. (besucht am 30.10.2021) (siehe S. 10).
- [14] A. J. Schwab, *Elektroenergiesysteme*, 3. Aufl. Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg, 2012, Bd. 1051, ISBN: 978-3-642-21958-0. DOI: 10.1007/978-3-642-21958-0 (siehe S. 11).
- [15] G3-PLC-Alliance, *G3-PLC User Guidelines*, <https://g3-plc.com/download/84/presentations/908/g3-plc-alliance-technical-presentation.pptx>, 2020. (besucht am 20.07.2022) (siehe S. 13).
- [16] ITU-T, *Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers – Power spectral density specification*, ITU, Hrsg., <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9901/en>, 2017. (besucht am 22.09.2021) (siehe S. 14, 16, 18).
- [17] I. Fernández, A. Arrinda, I. Angulo, D. De La Vega, N. Uribe-Pérez und A. Llano, »Field Trials for the Empirical Characterization of the Low Voltage Grid Access Impedance From 35 kHz to 500 kHz,« *IEEE Access*, Jg. 7, S. 85 786–85 795, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2924253 (siehe S. 14).
- [18] R. Mäusl und J. Göbel, *Analoge und digitale Modulationsverfahren*, 1. Aufl. Heidelberg: Hüthig Verlag Heidelberg, 2002, Bd. 398, ISBN: 3-7785-2886-6 (siehe S. 15).
- [19] P. M. G. Ian A. Glover, *Digital Communications*, 3. Aufl. Heidelberg: Pearson Education Limited, 2010, Bd. 1073, ISBN: 978-0-273-71830-7 (siehe S. 15, 16, 31).
- [20] eRDF, *PLC G3 PHYSICAL LAYER SPECIFICATION*, <https://g3-plc.com/g3-plc/specifications-user-guidelines/>, 2020. (besucht am 16.05.2021) (siehe S. 16).
- [21] K. R. Jean Vigneron, *G3-PLC Powerline Communication Standard for Today's Smart Grid*, <https://g3-plc.com/download/84/presentations/908/g3-plc-alliance-technical-presentation.pptx>, 2012. (besucht am 16.05.2021) (siehe S. 16, 17).
- [22] S. Robson und A. M. Haddad, »Analysis of the Performance of G3 Power Line Communication Synchronisation,« in *2021 56th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2021, S. 1–6. DOI: 10.1109/UPEC50034.2021.9548246 (siehe S. 16).
- [23] P. Eder-Neuhauser, T. Zseby und J. Fabini, »Resilience and Security: A Qualitative Survey of Urban Smart Grid Architectures,« *IEEE Access*, Jg. 4, S. 839–848, 2016. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2531279 (siehe S. 18).

- [24] G. López, J. Matanza, D. De La Vega u.a., »The Role of Power Line Communications in the Smart Grid Revisited: Applications, Challenges, and Research Initiatives,« *IEEE Access*, Jg. 7, S. 117 346–117 368, 2019, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2928391 (siehe S. 18–20, 58, 70).
- [25] OVE, *Norm 55016-2-1, Anforderungen an Geräte und Einrichtungen sowie Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit Teil 2-1: Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit – Messung der leitungsgeführten Störaussendung*, <https://shop.ove.at/product/ove-en-55016-2-1-2019-12-01>, 2019. (besucht am 20.07.2022) (siehe S. 20).
- [26] OVE, *Norm 50065-1, Signalübertragung auf elektrischen Niederspannungsnetzen im Frequenzbereich 3 kHz bis 148,5 kHz – Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Frequenzbänder und elektromagnetische Störungen*, <https://www.ove.at/shop/de/product/-ve-norm-en-50065-1-2012-03-01>, 2012. (besucht am 10.10.2021) (siehe S. 21).
- [27] OVE, *Norm 50065-2-3, Signalübertragung auf elektrischen Niederspannungsnetzen im Frequenzbereich 3 kHz bis 148,5 kHz – Teil 2-3: Störfestigkeitsanforderungen an Netz-Datenübertragungsgeräte und -systeme, die im Frequenzbereich 3 kHz bis 95 kHz betrieben werden und für den Gebrauch durch Stromversorgungs- und -verteilungsunternehmen bestimmt sind*, <https://www.ove.at/shop/de/product/-ve-norm-en-50065-2-3-a1-2006-07-01>, 2012. (besucht am 10.10.2021) (siehe S. 21).
- [28] OVE, *Norm 61000-2-2, Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 2-2: Umgebungsbedingungen - Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen und Signalübertragung in öffentlichen Niederspannungsnetzen*, <https://www.ove.at/shop/de/product/ove-en-61000-2-2-a2-2017-12-15>, 2020. (besucht am 10.10.2021) (siehe S. 21).
- [29] J.-H. Kwon, *Amendment 1/Fragment 2: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 6-3: Generic standards - Emission standard for equipment in residential environments, PROJECT NUMBER: IEC 61000-6-3/AMD1/FRAG2 ED3*, https://documents.iec.ch/ords/f?p=700:610:::P610_DOCUMENT_FILE_ID:2959205, 2022. (besucht am 26.07.2022) (siehe S. 23, 24).
- [30] OVE, *Norm 61000-6-3, Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 6-3: Fachgrundnormen - Störaussendung für Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereiche sowie Kleinbetriebe*, <https://www.ove.at/shop/de/product/-ve-norm-en-61000-6-3-2011-10-01>, 2020. (besucht am 24.06.2022) (siehe S. 23).
- [31] OVE, *Norm OVE EN IEC 61000-6-3, Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 6-3: Fachgrundnormen - Störaussendung für Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereiche sowie Kleinbetriebe*, <https://shop.ove.at/de/product/ove-en-iec-61000-6-3-2022-07-01>, 2022. (besucht am 20.07.2022) (siehe S. 23).

- [32] *ÖNORM EN 12015, Elektromagnetische Verträglichkeit - Produktfamilien-Norm für Aufzüge, Fahrtreppen und Fahrsteige - Störaussendung*, Austrian Standards, Austrian Standards International, 2020. (besucht am 20.07.2022) (siehe S. 23).
- [33] G. López, J. I. Moreno, E. Sánchez, C. Martínez und F. Martín, »Noise Sources, Effects and Countermeasures in Narrowband Power-Line Communications Networks: A Practical Approach,« *Energies*, Jg. 10, Nr. 8, 2017, ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en10081238. Adresse: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/8/1238> (siehe S. 26).
- [34] G. Mauron, *G3-PLC in Stromnetzen mit Niederspannung*, https://www.bulletin.ch/de/news-detail/g3-plc-in-stromnetzen-mit-niederspannung.html?file=files/content/news-articles/B_Artikel/2017/1712/B_1712_mauron/65-69_1712_Mauron_d.pdf, 2017. (besucht am 19.07.2022) (siehe S. 26).
- [35] R. Stiegler, J. Meyer, P. Schegner und D. Chakravorty, »Measurement of network harmonic impedance in presence of electronic equipment,« in *2015 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*, 2015, S. 49–54. DOI: 10.1109/AMPS.2015.7312737 (siehe S. 26).
- [36] L. Capponi, I. Fernández, D. Roggo, A. Arrinda, I. Angulo und D. De La Vega, »Comparison of Measurement Methods of Grid Impedance for Narrow Band-PLC up to 500 kHz,« in *2018 IEEE 9th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*, 2018, S. 1–6. DOI: 10.1109/AMPS.2018.8494853 (siehe S. 28).
- [37] K. O. Papailiou, *Springer Handbook of Power Systems*, 1. Aufl. Austria, Vienna: Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2021, 2021, Bd. 1264, S. 279–280, ISBN: 978-981-32-9938-2. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-32-9938-2>. Adresse: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-32-9938-2> (siehe S. 29).
- [38] V. Crastan, *Netzelemente, Modellierung, stationäres Netzverhalten, Bemessung, Schalt- und Schutztechnik*, 3. Aufl. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2012, Bd. 658, ISBN: 978-3-642-22346-4. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22346-4>. Adresse: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-06956-1> (siehe S. 29).
- [39] G. Strang, *Linear Algebra and Its Applications*, 4. Aufl. USA, New York: Academic Press, Inc., 1980, Bd. 542, ISBN: 978-0534422004 (siehe S. 30).
- [40] *Bedienungsanleitung Installationstester C.A 6116N C.A 6117*, Chauvin Arnoux, 2022. (besucht am 21.07.2022) (siehe S. 31).
- [41] C. J. Kikkert und S. Zhu, »Resistive Shunt On-line Impedance Analyzer,« in *2016 International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC)*, 2016, S. 150–155. DOI: 10.1109/ISPLC.2016.7476269 (siehe S. 39).
- [42] A. Prechtel, *Vorlesungen über die Grundlagen der Elektrotechnik*, 2. Aufl. Austria, Vienna: Springer Vienna, 2007, Bd. 499, ISBN: 978-3-211-72455-2. DOI: 10.1007/978-3-211-72456-9. Adresse: <https://doi.org/10.1007/978-3-211-72456-9> (siehe S. 43).

- [43] S. Avram, »Power line communication channel noise source detection using smart meters,« in *2016 12th IEEE International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)*, 2016, S. 103–106. DOI: 10.1109/ISETC.2016.7781067 (siehe S. 61, 71).

8 Anhang

8.1 Prüfprotokoll SM-Testaufbau

Bezeichnung der Anlage:		Mobiler Smart Meter Prüfaufbau													
Nennspannung:		230V/400V TN-S-System													
Nennstrom:		63A (6h)													
Erbauer:		Hans Stocker (IES-ZT)													
Inbetriebnahme am:		08.04.2021													
Messgerät zur Eurotest KD M31155 V1.5.6 (Metrel)															
Erstprüfung erfolgte am:		08.04.2021													
Inbetriebnahme durch:		Mailits Thomas, Stocker Hans													
Sichtprüfung:		OK													
Durchgängigkeit PE:		OK													
Isolationsprüfung:		OK (sämtliche Messungen ergaben Werte über 800 MΩhm)													
Funktionsprüfung (Taster, Si OK)															
Anmerkung:		Sämtliche Messungen welche im Betrieb erfolgen mussten, wurden angesteckt an 1F4 CEE (DEG Labor, Gasgebase 27) über ein 5m 16mm² 2 CEE Verlängerungskabel durchgeführt. Wird der Aufbau an anderen 63A CEE genutzt, so ist die Installation neu zu prüfen. Die Isolationsmessungen erfolgen unter händischer Betätigung des Schützes.													
Sonstige Hinweise:		Bei dem Aufbau handelt es sich um einen Versuchsaufbau der nicht von Laien bediebt werden darf. Der ordnungsgemäße und sichere Betrieb liegt im Sinne des Versuchsverantwortlichen bei Hrn. Stocker Hans. Sämtliche Arbeiten am und mit dem Aufbau müssen mit Hrn. Stocker Hans abgesprochen sein und dürfen nur von Elektrofachkräften oder unterwiesenen Personen durchgeführt werden. Bei Betrieb im Labor (IES_ZT, Raum DEG E_Labor) ist der Notausaster am Versuchsaufbau mit dem Notauskreis des Labors zu verbinden.													

Messungen			LINE					LOOP					RCD					Isolationsprüfung	Phasendrehung
Schaltkreis	FI-Bezeichnung	Dose	Z L1-N in Ohm	L1 ik in kA	Z L2-N in Ohm	L2 ik in kA	Z L3-N in Ohm	L3 ik in kA	Z L1-PE in Ohm	L1 ik in kA	Z L2-PE in Ohm	L2 ik in kA	Z L3-PE in Ohm	L3 ik in kA	FI taus in ms	FI Uc in V	R in Mohm	rechts	
UV-SM	B63	100mA Sammelchiene													198,7	0,1 L1	>900	OK	
UV-SM	B63	100mA Sammelchiene													196	0,1 L2	>900	OK	
UV-SM	B63	100mA Sammelchiene													195	0,1 L3	>900	OK	
SM01	B32	30mA CEE	0,19	1,22	0,2	1,15	0,19	1,24	0,14	1,15	0,13	1,77	0,15	1,57	10,9	0,1 L3	>900	OK	
SM01	B32	30mA Schuko N.C.																	
SM02	B16	30mA CEE	0,24	0,968	0,24	0,971	0,23	1	0,24	0,985	0,25	0,93	0,17	1,36	128	0,1 L3	>900	OK	
SM02	B16	30mA Schuko	0,26	0,89					0,21	1,1					128	0,1 L1	>900	OK	
SM03	B16	30mA CEE	0,23	0,99	0,24	0,96	0,24	0,96	0,2	1,2	0,19	1,2	0,17	1,4	119	0,1 L3	>900	OK	
SM03	B16	30mA Schuko	0,26	0,87					0,19	1,2					118	0,1 L1	>900	OK	
SM04	B16	30mA CEE	0,26	0,99	0,25	0,91	0,25	0,93	0,2	1,14	0,2	1,16	0,18	1,3	118	0,1 L3	>900	OK	
SM04	B16	30mA Schuko	0,27	0,84					0,23	0,98					117	0,1 L1	>900	OK	
SM05	B32	30mA CEE	0,2	1,15	0,2	1,18	0,19	1,2	0,21	1,21	0,22	1,1	0,2	1,15	11,6	0,1 L3	>900	OK	
SM05	B32	30mA Schuko N.C.																	
SM06	B16	30mA CEE	0,24	0,96	0,23	0,98	0,24	0,98	0,25	0,91	0,18	1,3	0,24	0,97	118	0,2 L2	>900	OK	
SM06	B16	30mA Schuko	0,26	0,9					0,21	1,1					118	0,1 L1	>900	OK	
SM07	B16	30mA CEE	0,25	0,94	0,24	0,97	0,24	0,97	0,23	0,98	0,24	0,96	0,17	1,4	129	0,1 L3	>900	OK	
SM07	B16	30mA Schuko	0,27	0,86					0,21	1,1					119	0,1 L1	>900	OK	
SM08	B16	30mA CEE	0,27	0,86	0,26	0,88	0,26	0,89	0,23	1	0,24	0,97	0,24	0,95	137	0,3 L2	>900	OK	
SM08	B16	30mA Schuko	0,28	0,8					0,24	0,97					136	0,1 L1	>900	OK	
SM09	B32	30mA CEE	0,19	1,22	0,19	1,24	0,18	1,3	0,15	1,5	0,19	1,23	0,19	1,18	10,4	0,1 L3	>900	OK	
SM09	B32	30mA Schuko N.C.																	
SM10	B16	30mA CEE	0,23	0,98	0,22	1,1	0,22	1,1	0,2	1,1	0,19	1,2	0,19	1,2	118	0,1 L2	>900	OK	
SM10	B16	30mA Schuko	0,26	0,89					0,22	1					118	0,1 L1	>900	OK	
SM11	B16	30mA CEE	0,23	0,89	0,22	1	0,22	1	0,24	0,96	0,15	1,5	0,14	1,6	129	0,1 L3	>900	OK	
SM11	B16	30mA Schuko	0,26	0,87					0,23	0,99					118	0,1 L1	>900	OK	
SM12	B16	30mA CEE	0,24	0,94	0,23	0,99	0,23	0,99	0,16	1,4	0,22	1	0,2	1,2	119	0,3 L1	>900	OK	
SM12	B16	30mA Schuko	0,27	0,84					0,23	0,99					117	0,1 L1	>900	OK	

Abbildung 82: Prüfprotokoll SM-Testaufbau

8.2 Impedanzmessgerät



ONIS-690V

Online Network Impedance Spectrometer



Bedienungsanleitung

- Versuchen Sie nicht, das Messgerät zu öffnen oder zu warten. Durch Öffnen und Entfernen von Abdeckungen können Sie gefährlichen Spannungen ausgesetzt werden. Wenn Sie versuchen, das Messgerät selbst zu warten, erlischt die Garantie. Das Messgerät enthält keine durch den Benutzer reparablen Bauteile. Reparatur und Service kann nur durch qualifiziertes Personal der morEnergy GmbH erfolgen.
- Reinigen Sie das Messgerät nur mit trockenen oder leicht feuchten Tüchern. Verwenden Sie keine Flüssig- oder Sprühreiniger. Entfernen Sie vor dem Reinigen sämtliche spannungsführenden Leitungen vom Messgerät.
- Um Schäden am Messgerät zu verhindern, transportieren Sie das Messgerät nur in der für das Messgerät vorgesehenen Transportbox.
- Lassen Sie das Verpackungsmaterial nicht achtlos liegen, dieses könnte für Kinder zu einem gefährlichen Spielzeug werden.
- Für technischen Service und Support wenden Sie sich bitte an die morEnergy GmbH.

Die morEnergy GmbH haftet in keinem Fall für Schäden an Personen und Material, welche durch Nichtbeachtung der in dieser Bedienungsanleitung enthaltenen Sicherheitshinweise entstehen. Alle technischen Angaben und Informationen entsprechen dem Stand der Drucklegung und wurden nach bestem Wissen ermittelt.

2.3 Entsorgungshinweis



WEEE, Waste Electrical and Electronic Equipment (EG-Richtlinie zur Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten). Verwenden Sie für die Entsorgung dieses Messgeräts bitte die entsprechend örtlichen Rücknahmesysteme und beachten Sie alle ansonsten zutreffenden Anforderungen. Das Messgerät darf nicht im Hausmüll entsorgt werden. Zur kostenfreien Entsorgung kann das Messgerät jederzeit an die morEnergy GmbH zurückgegeben werden.

3 Technische Daten

Spannungsbereich an den <i>Load</i> - und <i>Sense</i> -Anschlüssen (Phase-Phase-Spannung)	±70 bis 700 V _{peak}
Netznominalfrequenz	50 Hz
Maximale Ströme der <i>Load</i> -Anschlüsse	6,6 A _{peak}
Frequenzbereich der Netzimpedanzmessung	DC bis 150 kHz
Messgenauigkeit der Spannungsmessung	Klasse A
Abtastfrequenz bei Spannungsmessungen	bis zu 1 MHz
Versorgungsspannung	110-240 V~ 50/60 Hz
Betriebsumgebung	IP 20, 0-40 °C, ≤ 75 % rH

Höhe	≤ 2000 ü. NN
Abmessungen (L x B x H)	54 cm x 45 cm x 14,5 cm
Gewicht ONIS-690V	12,5 kg
Gewicht ONIS-690V im Transportkoffer	23 kg

3.1 Systemvoraussetzungen zur Verwendung des Benutzerprogramms ONIS-Control-Center

Komponente	Empfohlene Systemanforderungen	Minimale Systemanforderungen
Prozessor	Quad Core 3 GHz	Dual Core 2 GHz
RAM	8 GB	4 GB
Bildschirmauflösung	2560 x 1440 (WQHD)	1920 x 1080 (Full-HD)
USB-Anschluss	2 Stück USB 2.0	2 Stück USB 2.0
Betriebssystem	Windows 10	Windows 7
Bildschirmdiagonale	17 Zoll	15 Zoll
Skalierungseinstellung	100 %	100 %

4 Lieferumfang

- ONIS-690V Netzimpedanzmessgerät
- Sicherheits-Transportkoffer
- Bedienungsanleitung
- Kurzanleitung
- Mess- und Bediensoftware ONIS-Control-Center in der Version 2.1.1 (Beta) auf dem Bedienlaptop
- 2 Stück USB-Kabel, Stecker Typ A auf Stecker Typ B
- Kaltgeräte-Kabel
 - Stecker-Typ F auf C-13 Kaltgeräte-Steckverbindung
- Messleitungen mit 4 mm Laborsteckverbindungen
 - vier per Schmelzsicherung (32 x 6,3 mm, 3 A, Flink) abgesicherte Messleitungen der Messkategorie CAT IV 1000 V
- vier Messbrücken der Messkategorie CAT II 1000 V 32 A

5 Grundsätzliche Funktionsweise des ONIS-690V

Das ONIS-690V wird zur messtechnischen Bestimmung von frequenzabhängigen Netz- und Anlagenimpedanzen und zur Analyse von Netzspannungen eingesetzt. Für die Impedanzmessungen ist eine anliegende Netz- bzw. Anlagenspannung Voraussetzung. Zur

Bestimmung der frequenzabhängigen Impedanz wird das am Messgerät anliegende Netz durch Lastströme angeregt. Diese Ströme verursachen in Abhängigkeit der Netzimpedanz geringe Spannungsänderungen am Anschlusspunkt. Aus der Messung der erzeugten Spannungsänderung sowie des erzeugten Laststroms wird die frequenzabhängige Netz- bzw. Anlagenimpedanz berechnet.

6 Durchführen von einfachen Messungen



Wichtig: Beachten Sie beim Anschließen und Arbeiten mit dem *ONIS-690V* alle vorangegangenen Warnungen, Hinweise und Informationen.

In diesem Abschnitt wird das einfache Ausführen von Messungen mit dem *ONIS-690V* beschrieben. Dabei wird die Verwendung des Benutzerprogramms *ONIS-Control-Center* wenig detailliert beschrieben. Die genaue Beschreibung des Funktionsumfangs des *ONIS-Control-Centers* erfolgt in Abschnitt 8 ab Seite 12.

Bevor mit dem *ONIS-690V* Messungen ausgeführt werden können, muss die Installation des *ONIS-Control-Centers* und der notwendigen Treiber auf einem Computer erfolgreich abgeschlossen sein (siehe dazu die Hinweise in Abschnitt 3.1 auf Seite 6). Zum Ausführen von Messungen sollte folgende Vorgehensweise befolgt werden:

- Messgerät und Messleitungen per Sichtkontrolle auf Beschädigungen überprüfen.
- Abschalten des auf der Vorderseite mit *Fuse* beschrifteten Geräteschutzschalters (roter Schalter betätigt).
- Herstellen der USB-Verbindung und der Energieversorgung des Messgeräts nach folgendem Anschluss-Schema:

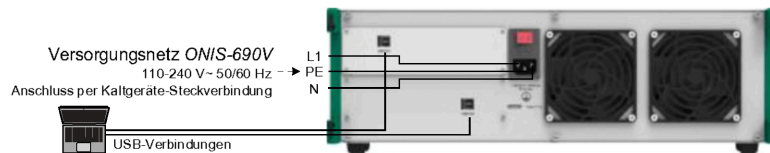


Abbildung 1: Rückseitiges Anschluss-Schema des *ONIS-690V*

- Sobald das *ONIS-690V* durch das Versorgungsnetz mit Spannung versorgt wird, schalten sich die Lüfter auf der Geräterückseite ein.
- Wenn das *ONIS-Control-Center* auf dem Mess- und Bediencomputer gestartet ist, verbindet sich das Messgerät bei bestehender USB-Verbindung automatisch mit dem *ONIS-Control-Center*. Das erfolgreiche Herstellen der Verbindung wird im Statusbereich durch die Ausgabe der Firmware- und Seriennummer gezeigt. Wenn keine Verbindung hergestellt werden konnte, erscheint die Schaltfläche

Connect unten rechts im Anzeigefenster des *ONIS-Control-Centers*. Durch Verwendung der Schaltfläche *Connect* kann die USB-Verbindung manuell hergestellt werden.

- Verbinden des *ONIS-690V* unter Beachtung der fünf Sicherheitsregeln mit dem zu messenden Netz nach folgendem Anschluss-Schema:

(Weitere Informationen zum Anschluss an das zu messende Netz im Abschnitt 7.2 unter der Überschrift „Anschlüsse für die Spannungsmessung (Sense)“ zu finden)



Wichtig: Es dürfen nur die mitgelieferten Messleitungen mit eingesetzten Schmelzsicherungen (32 x 6,3 mm, 16 A, Flink) verwendet werden.

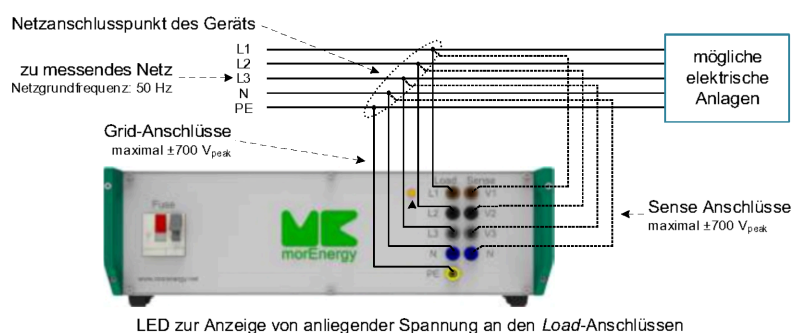


Abbildung 2: Vorderseitiges Anschluss-Schema des *ONIS-690V* unter Verwendung gesonderter Leitungen für die Spannungsmessung



Wichtig: Bei einphasigen Messungen muss die spannungsführende Phase des zu messenden Netzes mit dem Anschluss L1 am Messgerät verbunden werden.

- Ausführen von **Spannungsmessungen** über das *ONIS-Control-Center*
 - Aktivieren des Betriebsmodi *Scope Mode* über den entsprechenden Tab und starten einer Spannungsmessung durch die Verwendung der Schaltfläche *Single Run*.
 - Berechnen der *Fast Fourier Transformation* des gemessenen Spannungsverlaufs mit der Schaltfläche *Show FFT*.
- Ausführen von **Netzimpedanzmessungen** über das *ONIS-Control-Center*



Wichtig: Vor dem Zuschalten des Geräteschutzschalters und dem Ausführen von Netzimpedanzmessungen ist eine Spannungsmessung

einer Messung. Funktionen zum Speichern und Laden von Messdaten befinden sich im Bereich *Files*. Bevor Messungen ausgeführt werden, sollten in den Bereichen *Impedance Selection*, *Measurement Mode* und *Parameters* die für die Messungen gewünschten Einstellungen vorgenommen werden.

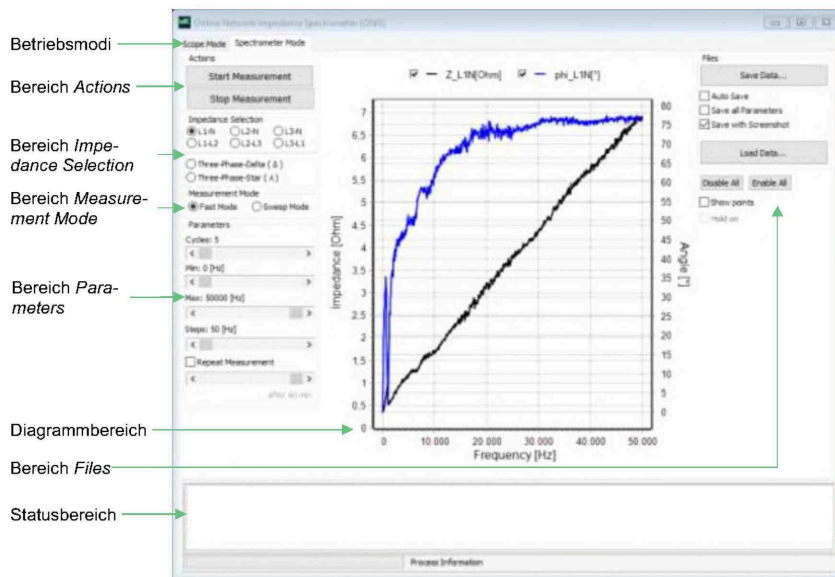


Abbildung 8: ONIS-Control-Center in der Registerkarte *Spectrometer Mode*

Impedance Selection

Im Bereich *Impedance Selection* wird die zu messende Schleifenimpedanz ausgewählt. Es kann entweder die Impedanz zwischen zwei Phasen oder zwischen einer Phase und dem Neutraleiter gemessen werden. Des Weiteren können die drei Schleifenimpedanzen in Dreieck- oder Sternverknüpfung nacheinander bestimmt werden.

Measurement Mode

Im Bereich *Measurement Mode* kann zwischen den Einstellungen *Fast Mode* und *Sweep Mode* gewählt werden. Der Unterschied zwischen *Fast* und *Sweep Mode* liegt in der Anregung, die das Messgerät in das zu vermessende Netz einprägt. Im *Fast Mode* wird das Netz mit einem breitbandigen Laststrom angeregt und die jeweilige Schleifenimpedanz von DC bis 150 kHz bestimmt. Im *Sweep Mode* können Frequenzpunkte von 5 Hz bis 2000 Hz mit einer höheren Leistung einzeln angeregt werden, wodurch eine höhere Genauigkeit erzielt wird.

Parameters

Im Bereich *Parameters* können Einstellungen zur Zyklenzahl einer Messung, zum Frequenzbereich sowie zur kontinuierlichen Wiederholung von Messungen vorgenommen werden.

Die Zyklenzahl (*Cycles*) kann zwischen den Werten 5 und 20 (*Sweep Mode*) und 5 und 50 (*Fast Mode*) variiert werden. Sie bestimmt wie viele Messzyklen das Messgerät für eine Messung vornimmt. Ein Messzyklus dauert zwischen 1 bis 3 Sekunden. Die Messergebnisse der einzelnen Zyklen werden in der Berechnung durch die Software zu einem Messergebnis zusammengefasst. In der Regel erhöht sich die Genauigkeit der Messungen durch das Erhöhen der Zyklenzahl.

Der zu untersuchende Frequenzbereich und die Schrittweite der Impedanzmessung können mit den Schieberegeln unter den Beschriftungen *Min.*, *Max.* und *Steps* eingestellt werden. Im *Fast Mode* kann der zu untersuchende Frequenzbereich im Bereich von DC bis 150000 Hz frei eingestellt werden. Die minimale und maximale Grenze ist dabei in 50 Hz Schritten veränderbar. Die Schrittweite (*Steps*) kann zwischen 5 bis 1000 Hz verändert werden. Im *Sweep Mode* kann der zu untersuchende Frequenzbereich im Bereich von 5 bis 2000 Hz frei eingestellt werden. Die minimale und maximale Grenze ist in 5 Hz Schritten veränderbar und die Schrittweite (*Steps*) kann zwischen 5 bis 1000 Hz verändert werden.

Wenn die Checkbox *Repeat Measurement* aktiviert wird, ist die kontinuierliche Wiederholung von Messungen eingeschaltet. Die Wiederholungszeit der Messungen kann in einem Bereich zwischen 1 bis 60 Minuten eingestellt werden. Ist die Wiederholungszeit beispielsweise auf eine Minute eingestellt, wird jede Minute eine neue Messung gestartet. Für den Fall, dass eine einzelne Messung länger dauert als die eingestellte Wiederholungszeit, wird keine neue Messung gestartet, sondern die laufende Messung zu Ende ausgeführt. Die nachfolgende Messung wird anschließend nicht sofort gestartet, sondern bleibt im Rhythmus der eingestellten Wiederholungszeit. Dauert eine Messung beispielsweise 1,5 Minuten¹ und die Wiederholungszeit liegt bei einer Minute, wird eine neue Messung lediglich alle zwei Minuten ausgeführt. Grundsätzlich ist es sinnvoll bei der kontinuierlichen Wiederholung von Messungen, die *Auto Save* Checkbox im Bereich *Files* zu aktivieren. Weitere Ausführungen zum automatischen Speichern sind im Unterabschnitt *Scope Options* ab Seite 13 zu finden.

Actions

Sind die gewünschten Einstellungen vorgenommen, können Messungen gestartet werden.



Achtung: Vergewissern Sie sich vor dem Ausführen von Messungen, dass sich das ONIS-690V im ordnungsgemäßen Zustand befindet und dass alle Messleitungen einwandfrei verbunden sind.

¹ Eine solche Messdauer tritt gegebenenfalls im *Sweep Mode* und einer hohen Zyklenzahl auf.

8.3 Spektrumanalysator

R&S® SPECTRUM RIDER FPH HANDHELD SPECTRUM ANALYZER

Specifications



Version 09.00, March 2020

Specifications

Frequency

Frequency range	R&S®Spectrum Rider FPH model .02	5 kHz to 2 GHz
	with R&S®FPH-B3 option installed	5 kHz to 3 GHz
	with R&S®FPH-B3 and R&S®FPH-B4 options installed	5 kHz to 4 GHz
	R&S®Spectrum Rider FPH model .06	5 kHz to 6 GHz
	with R&S®FPH-B8 option installed	5 kHz to 8 GHz
	R&S®Spectrum Rider FPH model .13	5 kHz to 13.6 GHz
	with R&S®FPH-B20 option installed	5 kHz to 20 GHz
	R&S®Spectrum Rider FPH model .26	5 kHz to 26.5 GHz
Frequency resolution	with R&S®FPH-B31 option installed	5 kHz to 31 GHz
	R&S®Spectrum Rider FPH models .06/.13/.26 with R&S®FPH-B29 option installed ¹	from 5 kHz down to 100 Hz
Frequency resolution		1 Hz

Reference frequency, internal		
Aging per year		1 × 10 ⁻⁶
Temperature drift	0 °C to +50 °C	1 × 10 ⁻⁶
Achievable initial calibration accuracy		5 × 10 ⁻⁷
Total reference uncertainty		(time since last adjustment × aging rate) + temperature drift + calibration accuracy

Frequency readout		
Marker resolution		1 Hz
Uncertainty		±(marker frequency × reference uncertainty + 10 % × resolution bandwidth + ½ (span/(sweep points – 1) + 1 Hz))
Number of sweep (trace) points		711
Marker tuning frequency step size		span/710
Frequency counter resolution		0.1 Hz
Count uncertainty	SNR > 25 dB	±(frequency × reference uncertainty + ½ (last digit))
Frequency span		0 Hz, 10 Hz to 2/3/4/6/8/13.6/20/26.5/31 GHz
Span uncertainty		nom. 1 %

Spectral purity SSB phase noise		
Carrier offset		f = 500 MHz
	30 kHz	< –88 dBc (1 Hz), typ. –95 dBc (1 Hz)
	100 kHz	< –98 dBc (1 Hz), typ. –105 dBc (1 Hz)
	1 MHz	< –118 dBc (1 Hz), typ. –125 dBc (1 Hz)

Sweep time

Sweep time	span = 0 Hz	1 ms to 1000 s
	10 Hz ≤ span ≤ 600 MHz	20 ms to 1000 s
	span > 600 MHz	20 ms × span/1600 MHz to 1000 s
Uncertainty	span = 0 Hz	nom. 1 %
	span ≥ 10 Hz	nom. 3 %

¹ For serial number ≥ 103100. Not applicable to R&S®Spectrum Rider FPH model .02.

Bandwidths

Resolution bandwidths		
Range	–3 dB bandwidth	1 Hz to 3 MHz in 1/3 sequence
Bandwidth accuracy	1 Hz ≤ RBW ≤ 300 kHz	nom. < 5 %
	300 kHz < RBW ≤ 1 MHz	nom. < 10 %
Selectivity 60 dB/3 dB		nom. < 5 (Gaussian type filters)
Video filters		
Range	–3 dB bandwidth	1 Hz to 3 MHz in 1/3 sequence

Level

Display range		displayed noise floor to +30 dBm
Maximum rated input level		
DC voltage		50 V
CW RF power		33 dBm (= 2 W)
Peak RF power	duration < 3 s	36 dBm (= 4 W)
Max. pulse voltage		150 V
Max. pulse energy	pulse width 10 µs	10 mWs
Intermodulation		
Third-order intercept (TOI)	intermodulation-free dynamic range, signal level 2 × –20 dBm, RF attenuation = 0 dB, RF preamplifier = off	
	R&S®Spectrum Rider FPH model .02	
	f = 1 GHz	+7 dBm (meas.)
	f = 2.4 GHz	+10 dBm (meas.)
	R&S®Spectrum Rider FPH models .06/.13/.26	
	f = 1 GHz	+7 dBm (meas.)
	f = 4.5 GHz	+8 dBm (meas.)
	f = 9.5 GHz	+10 dBm (meas.)
	f = 12 GHz	+9 dBm (meas.)
	f = 22 GHz	+8 dBm (meas.)
	f = 26.5 GHz	+10 dBm (meas.)
Second-harmonic intercept (SHI)	RF attenuation = 0 dB, RF preamplifier = off, signal level = –40 dBm	
	R&S®Spectrum Rider FPH model .02	
	f _m = 20 MHz to 1.5 GHz	nom. –60 dBc
	f _m = 1.5 GHz to 2 GHz	nom. –80 dBc
	R&S®Spectrum Rider FPH models .06/.13/.26	
	f _m = 20 MHz to 1.5 GHz	nom. –60 dBc
	f _m = 1.5 GHz to 4 GHz	nom. –90 dBc
	f _m = 4 GHz to 10 GHz	nom. –90 dBc
	f _m = 10 GHz to 14 GHz	nom. –90 dBc
	f _m = 14 GHz to 15.4 GHz	nom. –85 dBc
Displayed average noise level (DANL)	0 dB RF attenuation, termination 50 Ω, RBW = 1 kHz, VBW = 10 Hz, sample detector, log scaling, normalized to 1 Hz	
	R&S®Spectrum Rider FPH model .02	
	preamplifier = off	
	1 MHz to 10 MHz	< –135 dBm, typ. –142 dBm
	10 MHz to 1 GHz	< –142 dBm, typ. –146 dBm
	1 GHz to 4 GHz	< –140 dBm, typ. –144 dBm
	preamplifier = on	
	1 MHz to 10 MHz	< –150 dBm, typ. –160 dBm
	10 MHz to 3 GHz	< –158 dBm, typ. –163 dBm
	3 GHz to 4 GHz	< –156 dBm, typ. –161 dBm
	R&S®Spectrum Rider FPH models .06/.13/.26	
	preamplifier = off	
	1 MHz to 10 MHz	< –122 dBm, typ. –130 dBm
	10 MHz to 25 MHz	< –130 dBm, typ. –135 dBm
	25 MHz to 1 GHz	< –140 dBm, typ. –145 dBm
	1 GHz to 4 GHz	< –135 dBm, typ. –140 dBm
	4 GHz to 8 GHz	< –135 dBm, typ. –140 dBm
	8 GHz to 19 GHz	< –135 dBm, typ. –138 dBm
	19 GHz to 20 GHz	< –130 dBm, typ. –138 dBm
	20 GHz to 27 GHz	< –130 dBm, typ. –138 dBm
	27 GHz to 29 GHz	< –125 dBm, typ. –130 dBm
	29 GHz to 31 GHz	< –120 dBm, typ. –123 dBm

8.4 Netznachbildung

R&S® ENV216

Zweileiter-V-Netznachbildung

Für Störspannungsmessungen an einphasigen Prüflingen



Produktbroschüre | Version 05.00

Technische Daten

Technische Daten		
Frequenzbereich		9 kHz bis 30 MHz
Nachbildimpedanz	Phase und Betrag	$(50 \mu\text{H} + 5 \Omega) \parallel 50 \Omega$
Fehlergrenzen		$\pm 20\%$ (Betrag), $\pm 11,5^\circ$ (Phase), gemäß CISPR 16-1-2
Entkopplungsdämpfung ¹⁾	9 kHz bis 50 kHz	$> 0 \text{ dB}$ bis 40 dB (linear zunehmend mit dem Logarithmus der Frequenz)
	50 kHz bis 30 MHz	$> 40 \text{ dB}$
Messpfad zum Prüfling		
Netzspannung	Bei Betrieb des Prüflings bei Wechselspannungen bis 90 V und Gleichspannungen bis 50 V muss das zum Lieferumfang gehörende externe Steckernetzteil zur Versorgung der Logikschaltung verwendet werden.	0 V bis 240 V AC + 10%
Netzfrequenz		50 Hz bis 60 Hz $\pm 5\%$
Gleichspannung		0 V bis 50 V DC
Maximal zulässiger Dauerstrom	länderspezifisch	
Modell .12		16 A
Modell .13		13 A
Modell .14		16 A
Modell .15		10 A
Modell .16		15 A
Messpfad zum Messempfänger		
Maximal zulässige HF-Störleistung des Prüflings		1 W
Hochpass	integriert, schaltbar	150 kHz
Spannungsteilungsmaß zwischen Prüfling und Messempfängerport	eingebautes Dämpfungsglied, Kalibrierdaten werden mitgeliefert	10 dB
Ansprechschwelle des integrierten Impulsbegrenzers	abschaltbar	140 dB (μV)
Anschlüsse		
Netzspannungseingang	länderspezifisch	Stecker mit Schutzkontakt und 1,8 m Kabel
Netzspannungsanschluss für Prüfling	länderspezifisch	Steckdose mit Schutzkontakt
HF-Ausgang		N-Buchse, 50 Ω
Fernsteuereingang		25-polige Sub-D-Buchse
Eingang für Handnachbildung		4-mm-Buchse mit Rändelklemme
Bezugsmasse		Masseschiene mit drei M4-Gewinden
Schutzerde		Gewindebolzen M6
Externe Stromversorgung	auf Rückwand, durch mitgeliefertes Steckernetzteil	DC-Hohlstecker $\varnothing 5,5 \text{ mm}$, 2,1 mm, 10 V bis 18 V DC, 250 mA
Allgemeine Daten		
Betriebstemperaturbereich		+5°C bis +45°C
Lagertemperaturbereich		-40°C bis +70°C
Abmessungen	B x H x T	219 mm x 147 mm x 350 mm
Gewicht		5,5 kg
Elektrische Sicherheit	Hinweise im Handbuch beachten	gemäß EN 61010
EMV		gemäß IEC/EN 61326
Emission		Klasse B, erfüllt die Anforderungen an Wohnbereich
Störfestigkeit		erfüllt die Anforderungen an Industriebereich

¹⁾ Zwischen Stromversorgungs- und Messempfängeranschluss.

8.5 Störpegelmessung und Kanalmessung nBox



G-349d7a

User Guide: G3-plc nBox-Tool

Revision: 22.0
Date: 11.01.2022

5.4 Background Noise

This page presents results of the background noise measurements performed by the tool.

The term “background” refers to the fact that the tool tries to measure noise on the channel, but filtering out G3-plc frames that might be received in the meantime. This is typical issue when using a conventional spectrum analyzer, which is not able to discriminate noise from PLC traffic.

The tool performs one measurement operation every second, and if a frame is received while measurement is on-going, the measurement is cancelled.

15 minutes average are kept persistent for up to 120 days



Figure 6: Background Noise

5.5 Channel PHY testing

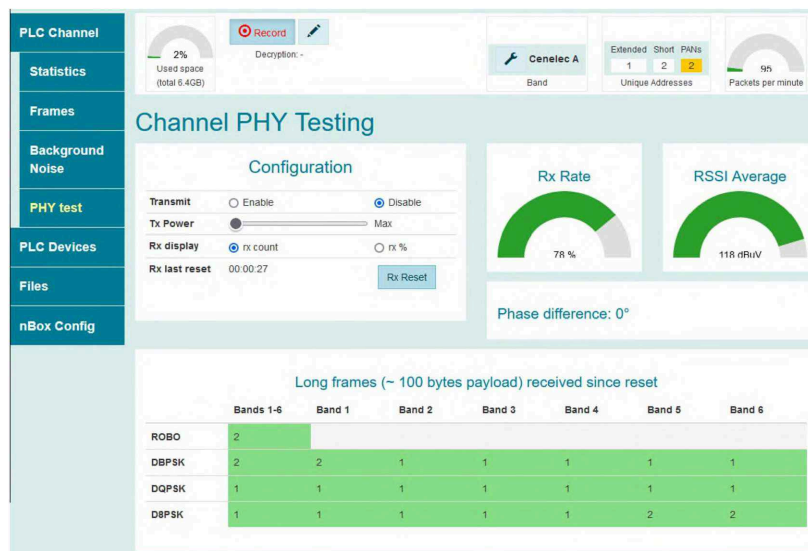
This feature offers the possibility to use two nBox-Tool devices to test communication possibilities between two points.

To perform this, the corresponding web page allows:

- To configure the nBox-Tool to transmit test frames on the channel.
 - Frames of different modulation, payload size and tone map are sent.
- Displaying statistics about test frames received (sent by another nBox-Tool)
 - Short term statistics (received rate and RSSI average)
 - Long term statistics: details of each frame type reception
 - Phase difference between transmitter and receiver

CAUTION: To minimize impact on existing G3 network, the transmission rate is moderate (2 frames per second). However, this transmission will still reduce available bandwidth and performance of a G3 network.

CAUTION: Transmission shall not be enabled on multiple nBox-Tool as transmissions are performed without CSMA and can potentially collide.



8.6 Installationstester

DE - Bedienungsanleitung



C.A 6116N C.A 6117



Installationstester

Measure up 

3.4. MESSUNG DES ISOLATIONSWIDERSTANDS

3.4.1. BESCHREIBUNG DES MESSPRINZIPS

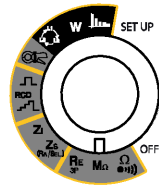
Das Gerät erzeugt zwischen den Buchsen COM und MΩ eine Prüfgleichspannung. Die Spannung hängt vom jeweils gemessenen Widerstand ab: Wenn $R \geq R_N = U_N / I$ mA, so ist die Prüfspannung $\geq U_N$, ansonsten ist sie niedriger. Der Tester misst Spannung und Strom zwischen den beiden Buchsen und errechnet daraus den Wert $R = V/I$. Dabei stellt die COM-Buchse das Bezugspotential für die Spannung dar. Buchse MΩ gibt also eine negative Spannung ab.

3.4.2. DURCHFÜHRUNG EINER MESSUNG

Bei aktiviertem Alarm wird der Anwender mit einem akustischen Signal auf Schwellwertunterschreitungen aufmerksam gemacht; man braucht die Anzeige nicht im Auge zu behalten.

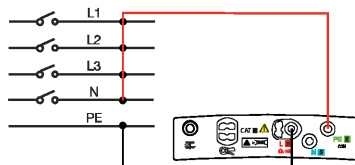
Stellen Sie den Schalter auf die Position MΩ.

Mit den Messleitungen verbinden Sie das Testobjekt mit den Buchsen COM und MΩ des Geräts. Das Testobjekt darf nicht unter Spannung stehen.



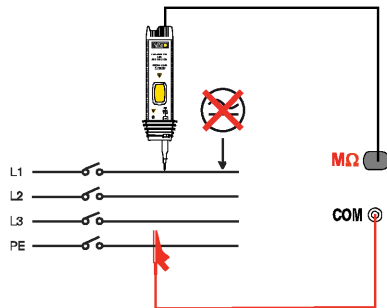
Verwenden Sie hier besser zwei einfache Messleitungen, und nicht die dreiadrige Messleitung: So vermeiden Sie die Ableitung von Fehlerströmen beim Isolationsmessen und die daraus folgende Verfälschung des Messwerts.

Im Allgemeinen wird die Isolation einer Installation zwischen Erde einerseits und dem oder den kurzgeschlossenen Außenleitern andererseits gemessen.



Bei unzureichender Isolation muss jedes der Kabelpaare einzeln gemessen werden, um den Fehler zu lokalisieren. Darum besteht die Möglichkeit, den Speicherwert mit einem der folgenden Angaben zu kennzeichnen: L-N, L-PE, N-PE, L1-PE, L2-PE, L3-PE, L1-N, L2-N, L3-N, L1-L2, L2-L3 oder L1-L3

Die optionale Sonde zur Fernbedienung ermöglicht eine einfachere Auslösung der Messung mit ihrer eingebauten TEST-Taste. Hinweise zur Verwendung dieser Sonde finden Sie in der Bedienungsanleitung der Sonde.



3.6. MESSUNG DER SCHLEIFENIMPEDANZ (Z_s)

In Installationen mit TN- und TT-Netzsystemen können aus der Schleifenimpedanz außerdem der Kurzschlussstrom sowie die erforderliche Überstromschutzeinrichtung (Sicherung oder Schutzschalter) berechnet werden.

In einer Installation mit TT-Netzsystem lässt sich über die Schleifenimpedanz die Erdungsmessung ganz einfach durchführen – ohne Hilfserde. Das Messergebnis Z_s ist die Schleifenimpedanz der Installation zwischen den Leitern L und PE. Sie ist kaum größer als der Erdungswiderstand. Die Differenz erklärt sich aus dem Widerstand der Betriebs Erde in der Trafostation und dem Kabelwiderstand, die jedoch belanglos sind.

Wenn man diesen Wert kennt, sowie den Wert der üblicherweise zulässigen Berührungsspannung (U_L) kann man damit den Bemessungsdifferenzstrom für den vorzusehenden Fehlerstromschutzschalter wie folgt berechnen: $I_{\Delta N} < U_L / Z_s$.

Diese Messung ist an Installationen mit IT-Netzsystem nicht möglich, weil dort die Erdungsimpedanz des Transformators entweder zu hoch ist oder weil dieser ganz von der Erde isoliert ist.

3.6.1. BESCHREIBUNG DES MESSPRINZIPS

Zuerst erzeugt der Installationstester Impulse (Dauer 1,1 ms, max. Amplitude 7 A) zwischen den Buchsen L und N; aus dieser ersten Messung wird Z_L abgeleitet.

Dann wird zwischen den Buchsen L und PE ein geringer Strom eingespeist. Der Anwender hat die Wahl zwischen 6, 9 und 12 mA. Dieser geringe Strom verhindert das Auslösen von Fehlerstromschutzschaltern, deren Bemessungsdifferenzstrom ≥ 30 mA ist. Aus dieser zweiten Messung wird Z_{PE} abgeleitet.

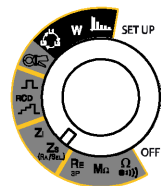
Dann berechnet der Tester den Schleifenwiderstand $Z_s = Z_{L-PE} = Z_L + Z_{PE}$ sowie den Kurzschlussstrom $I_k = U_{PE} / Z_s$.

Der Wert I_k gibt Auskunft über die ordnungsgemäße Dimensionierung der Sicherungen bzw. des Schutzschalters.

Höhere Genauigkeit erzielt man, wenn die Messung der Schleifenimpedanz Z_s mit einem hohen Prüfstrom erfolgt (TRIP-Modus) – dabei kann jedoch der Fehlerstromschutzschalter auslösen.

3.6.2. DURCHFÜHRUNG EINER MESSUNG

Wahlschalter in Stellung Z_s (R_A/S_{EL}) bringen.

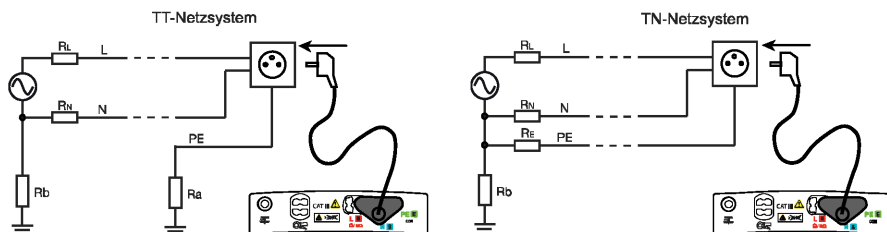


Schließen Sie die dreiadrigte Messleitung an das Gerät und an das Messobjekt an.

Wenn der Installationstester angeschlossen ist, kontrolliert er automatisch das Vorhandensein der richtigen Spannung an den Buchsen sowie die Lage des Außenleiters (L) und des Neutralleiters (N) gegenüber dem Schutzleiter (PE), und zeigt das Ergebnis an. Gegebenenfalls werden die Buchsen L und N automatisch umgepolt, sodass die Schleifenmessung auch ohne Änderungen des Geräteanschlusses möglich ist.



Wenn möglich sollten vorher alle Verbraucher vom Netz, an dem die Schleife gemessen wird, abgetrennt werden.
Wenn Sie die Messung mit einem Messstrom von 6 mA durchführen (wodurch Installationen mit 30 mA FI-Schutzschalter einen Fehlerstrom bis 9 mA tolerieren), ist das Abtrennen der Verbraucher nicht erforderlich.



i Im Trip-Modus muss die Buchse N nicht angeschlossen werden.

3.11. FEHLERSTROMSCHUTZSCHALTER-PRÜFUNG

Das Gerät prüft Fehlerstromschutzschalter in drei Tests:

- Auslöseprüfung mit Rampenfunktion
- Auslöseprüfung mit Impuls
- Nichtauslöseprüfung

Der genaue Auslösestrom des Schutzschalters wird mit Rampe getestet.

Die Auslösezeit des Schutzschalters wird im Impulsmodus ermittelt.

Bei der Nichtauslöseprüfung wird auf eventuelle Frühauslösung bei $0,5 I_{AN}$ kontrolliert. Dieser Test ist nur zufrieden stellend, wenn die Fehlerströme gegenüber $0,5 I_{AN}$ vernachlässigbar sind, daher sollten alle Verbraucher von der betreffenden Installation abgetrennt werden.

3.11.1. BESCHREIBUNG DES MESSPRINZIPI

Vor den FI-Prüfungen stellt das Gerät automatisch fest, ob der Test gefahrlos durchgeführt werden kann, das heißt es kontrolliert den Fehlerspannungswert U_F . Dieser darf 50 V (bzw. je nach U_L -Wert im SET-UP 25 V oder 65 V) nicht überschreiten. Zuerst wird wie für eine Schleifenimpedanzmessung ein niedriger Prüfstrom erzeugt ($<0,3 I_{AN}$) und Z_s gemessen.

Daraus berechnet der Tester $U_F = Z_s \times I_{AN}$ (oder $U_F = Z_s \times 2 I_{AN}$ oder $U_F = Z_s \times 5 I_{AN}$ je nach gewünschter Prüfung), also die maximale anzulegende Prüfspannung. Wenn diese Prüfspannung U_F überschreitet, wird die Prüfung nicht durchgeführt. In diesem Fall muss der Anwender den Messstrom auf $0,2 I_{AN}$ reduzieren, damit Prüfstrom + Fehlerströme in der Installation keine Spannung größer U_F erzeugen.

Höhere Genauigkeit beim Messen der Fehlerspannung erzielt man, wie bei der Erdungsprüfung unter Spannung, mit einem zusätzlichen Hilfsender. Der Installationstester misst dann R_X und berechnet $U_F = R_X \times I_{AN}$ (oder $U_F = R_X \times 2 I_{AN}$ oder $U_F = R_X \times 5 I_{AN}$ je nach gewünschter Prüfung).

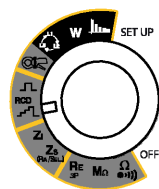
Nach diesem ersten Messabschnitt geht der Tester zum zweiten Messabschnitt über, der von der jeweiligen Prüfung abhängt.

- Prüfung mit Rampe: Das Gerät erzeugt einen Sinusstrom mit schrittweise steigenden Amplituden, ($0,3$ bis $1,06 I_{AN}$) zwischen den Buchsen L und PE für FI-Schutzschalter des Typs AC, A und F und von $0,2$ bis $2,2 I_{AN}$ für FI-Schutzschalter des Typs B, B+ und EV (nur für C.A 6117). Sobald der Fehlerstromschutzschalter den Kreis abtrennt, werden der genaue Auslösestrom und die Auslösezeit angezeigt. Die Auslösezeit ist nur ein ungefährer Wert und wahrscheinlich nicht derselbe wie im Impulsmodus. Letzterer entspricht eher den tatsächlichen Betriebsbedingungen.
- Prüfung im Impulsmodus: Das Gerät erzeugt zwischen den Buchsen L und PE während höchstens 500 ms einen Sinusstrom mit Netzfrequenz und einer Amplitude von I_{AN} , $2 I_{AN}$ oder $5 I_{AN}$ für FI-Schutzschalter des Typs AC, A und F und einer Amplitude von $2 I_{AN}$ oder $4 I_{AN}$ für FI-Schutzschalter des Typs B, B+ und EV (nur für C.A 6117). Der Installationstester misst die Auslösezeit, die kürzer als 500 ms sein muss.
- Nichtauslöseprüfung: Der Installationstester erzeugt je nach Anwenderwahl 1-2 Sekunden lang einen Strom von $0,5 I_{AN}$. Normalerweise sollte der FI-Schutzschalter dann nicht auslösen.

Danach, wenn keine Auslösung stattfand, erzeugt der Tester einen Stromimpuls zwischen den Buchsen L und N. Wenn es dabei zur Auslösung kommt, war der Schutzschalter falsch montiert (N und PE sind vertauscht).

3.11.2. DURCHFÜHRUNG EINER PRÜFUNG MIT RAMPE

Stellen Sie den Wahlschalter auf die Position RCD .



Schließen Sie die dreidrigige Messleitung an das Gerät und an eine Steckdose im zu prüfenden Kreis an.

Wenn der Installationstester angeschlossen ist, kontrolliert er automatisch die Lage des Außenleiters (L) und Neutralleiters (N) gegenüber dem Schutzleiter (PE), das Ergebnis wird angezeigt. Gegebenenfalls werden die Buchsen L und N vom Gerät automatisch umgepolt, sodass die Prüfung auch ohne Änderungen am Geräteanschluss möglich ist.



8. TECHNISCHE DATEN

8.1. ALLGEMEINE BEZUGSBEDINGUNGEN

Einflussgröße	Bezugswerte
Temperatur	20 ± 3 °C
Relative Luftfeuchte	45 bis 55 % r.F.
Stromversorgung	10,6 ± 0,2 V
Frequenz	DC und 45 bis 65 Hz
Elektrische Feldstärke	< 1 V/m
Magnetische Feldstärke	< 40 A/m
Stromversorgung	Akku (nicht ans Netz angeschlossen)

Die Angabe der **Eigenunsicherheit** gilt für die Bezugsbedingungen.

Die Angabe der **Betriebsunsicherheit** berücksichtigt die Eigenunsicherheit zuzüglich der Schwankungen verschiedener Einflussgrößen (Versorgungsspannung, Temperatur, Störungen usw.) gemäß IEC 61557.

 Das Gerät ist **nicht** für einen Betrieb mit dem Netzadapter vorgesehen. Alle Messungen müssen ausschließlich im Akkubetrieb vorgenommen werden.

8.2. ELEKTRISCHE SPEZIFIKATIONEN

8.2.1. SPANNUNGSMESSUNGEN

Spezifische Bezugsbedingungen:
Scheitelfaktor = 1,414 AC-Messung (Sinussignal)
AC-Anteil < 0,1% bei DC-Messung
DC-Anteil < 0,1% bei AC-Messung

Spannungsmessungen (L, N, PE)

Messbereich (AC oder DC)	0,2 - 399,9 V _~ 2,0 - 399,9 V _—	400 - 550 V _~
Auflösung	0,1 V	1 V
Eigenunsicherheit	± (1,5 % + 2 D)	± (1,5 % + 1 D)
Eingangsimpedanz	270 kΩ zwischen den Buchsen L, N,  and PE 530 kΩ zwischen den Buchsen L and N	
Betriebsfrequenz	DC und 15,8 bis 450 Hz	

Spannungsmessungen bei Isolationsprüfung (MΩ, PE)

Messbereich (AC oder DC)	5,0 - 399,9 V _~	400 - 550 V _~
Auflösung	0,1 V	1 V
Eigenunsicherheit	± (3,7 % + 2 D)	± (3,7 % + 1 D)
Eingangsimpedanz	145 kΩ	
Betriebsfrequenz	DC und 15,8 bis 65 Hz	

Messungen der Berührungsspannung

Messbereich (AC)	2,0 - 100,0 V
Eigenunsicherheit	± (15% + 2 D)
Eingangsimpedanz	6 MΩ
Betriebsfrequenz	15,8 bis 65 Hz

Diese Spannung wird nur angezeigt, wenn sie größer als U_L ist (25 V, 50 V oder 65 V).

8.7 Mobiles Ladegerät JUICE BOOSTER 2

JUICE BOOSTER 2
Die mobile Wallbox für überall

Adapterschloss
Zusatzschlüssel für alle Typ-2-Adapterkabel

Wallbox
Der JUICE BOOSTER 2 kann mit der Typ-2-Adapterkabelbox auch als Wandbox oder mobile Wallbox verwendet werden

JUICE CONNECTOR
Automatische Adaptererkennung mit induktiver Erkennung des Ladefahrzeugs

Mobile Ladestation
Dank der universellen Adapterboxwahl für alle Typ-2-Adapterkabel kann die Ladestation auch als mobile Ladestation verwendet werden

5 m Kabellänge
Mit Verlängerungskabel kann die Kabellänge sogar auf bis zu 25 m erweitert werden

100% kompatibel
mit allen E-Autos, die einen Typ-2-Steckanschluss haben. Auch mit Typ-1-Steckanschlüssen

5 JUICE-CELSIUS
Der in der Kabellängeneinheit integrierte JUICE-CELSIUS-Temperaturfühler überwacht die Temperatur der Kabel und schützt vor Überhitzung

Wasserdicht
IP67-schutzfähig

Individuelle LED-Beleuchtung
Die LED-Beleuchtung kann individuell auf Typ-2- oder Typ-1-Steckanschlüsse eingestellt werden

Typ-2-Kabel
Das mitgelieferte Typ-2-Kabel ist mit dem JUICE BOOSTER 2 und dem Typ-2-Adapter kompatibel. Für andere Typ-2-Adapterkabel ist ein separates Typ-2-Kabel erforderlich

Federleicht
Mit einem Gewicht von weniger als 1 kg

Integrierte Fehlerstromerkennung
Die Geräte- und Wechselstrom-Fehlerstromerkennung (RCD) erkennt überströmigen Strom und schaltet das Gerät aus

Fahrerstrom-Schutzschalter
Durch die integrierte Fahrerstrom-Schutzschaltung wird das Fahrzeug vor Überstrom geschützt

Ordnung muss sein
Kontrollieren Sie die Ladung und die Temperatur der Kabel und des Geräts

Bis zu 3 Tonnen
Ladefähigkeit für bis zu 3 Tonnen

Technische Spezifikationen

Abmessungen	Durchmesser: 70 mm, Länge: 225 mm	CE-Konformität	IEC 62700, A2700, A2701, A2702, EN 61851-1
Gewicht	1,0 kg (typisch), 1,2 kg (mit Kabel und Stecker)	Schutzart	IP67 - IEC 60529, 4 m, AC 10 m
Ladefähigkeit	1,0 kW - 22 kW AC	Sicherheit	Schutzfunktion, Temperaturüberwachung
Netztrom	~ 230 V, 50 Hz	Steuerung	Über 100 verschiedene Adapter, einstellbar
Netztromverbrauch	~ 1,0 kW (abhängig von der Leistung)	Wahlweise	Für Typ-2, Typ-1, Typ-2-Adapter, Typ-1-Adapter
Netztromverbrauch	~ 1,0 kW (abhängig von der Leistung)	Leistung	Typ-2: 11 kW, Typ-1: 7 kW
Netztromverbrauch	~ 1,0 kW (abhängig von der Leistung)	Leistung	Typ-2: 11 kW, Typ-1: 7 kW

8.8 Narda Probe SHC 1 1000



The advertisement features a blue and white background with abstract wave patterns. At the top, the text 'SHC-1/1000' and 'SHC-2/1000' is displayed in large white font, followed by 'CISPR Passive Voltage Probes' in a smaller blue font. Below this, two sets of probes are shown: one with a red handle and one with a black handle, each with a coiled cable and a red alligator clip. The 'Main Features' section lists the following:

- 9 kHz to 30 MHz frequency range
- CISPR 16-1-2 compliant
- Suitable for lines up to 1000 Vac - 1500 Vdc
- 30 or 35 dB insertion loss
- Interchangeable, robust contact tip and alligator clip

According to the main EMC standards - CISPR, MIL-STD, IEEE/ANSI, etc. - the passive voltage probes are ancillary devices specifically designed to measure conducted disturbances when a LISN cannot be used, e.g. because the EUT requires currents exceeding the capabilities of available LISNs.

As several generic and product standards may require the use of passive voltage probes, they are a must in a well equipped EMC lab and on the test bench of any design engineer.

A passive probe connected to the RF input of an EMI receiver picks up the RF disturbance signal from the line under investigation. It also provides a standardized impedance and blocks the main AC/DC voltage, while signal attenuation protects the receiver front-end from saturation and damages.

When operating the voltage probes, users must be sure to take all safety precautions relating to the AC or DC line voltages.

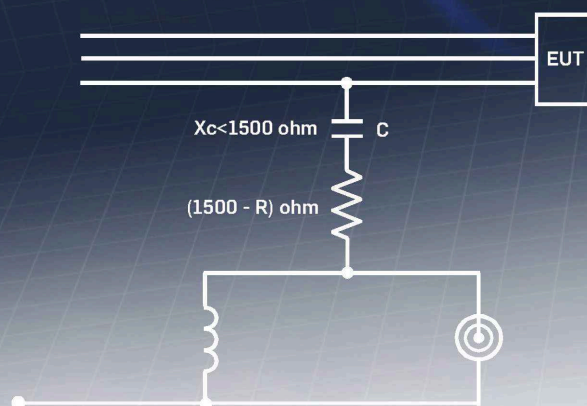


SHC-1/1000, SHC-2/1000

Passive probes

SPECIFICATIONS

Frequency range	9 kHz to 30 MHz
Input resistance	1500 $\Omega \pm 80 \Omega$
Input reactance	< 1500 Ω (< 1200 Ω typical)
Insertion loss	SHC-1/1000 35 dB $\pm$ 1.5 dB SHC-2/1000 30 dB $\pm$ 1.5 dB
RF output	BNC female, 50 Ω
Max permissible input operating voltage	1000 Vac; 1500 Vdc
EUT terminal	4 mm jack with alligator clip and probe tip
Ground connection	Alligator clip
Operating temperature	0 °C to +45 °C
Storage temperature	-25 °C to +70 °C
Dimensions WxHxD	45 x 45 x 200 mm
Weight	250 g



Ordering information:

SHC-1/1000 Passive Probe

Includes: user's manual, carrying case 170/30N, 2 m BNC-BNC cable, red alligator clip, red test probe tip and safety cap, calibration certificate.

SHC-2/1000 Passive Probe

Includes: user's manual, carrying case 170/30N, 2 m BNC-BNC cable, black alligator clip, black test probe tip and safety cap, calibration certificate.

Related products

Receivers

- 7010/01: EMI Receiver 9 kHz to 1 GHz
- 7010/02: EMI Receiver 9 kHz to 30 MHz
- 7010/03: EMI Receiver 9 kHz to 3 GHz
- ER8000/00 EMI Receiver 9 kHz to 30 MHz
- ER8000/01 EMI Receiver 9 kHz to 3 GHz
- ER9000/00 EMI Receiver 10 Hz to 30 MHz
- ER9000/01 EMI Receiver 10 Hz to 3 GHz
- 9010F: EMI Receiver 10 Hz to 30 MHz
- 9010/03P: EMI Receiver 10 Hz to 300 MHz
- 9010/30P: EMI Receiver 10 Hz to 3 GHz
- 9010/60P: EMI Receiver 10 Hz to 6 GHz
- FR4003: Field Receiver 9 kHz to 30 MHz

LISNs

- L2-16B: single phase AMN, 16 A
- L3-32: 4 lines, 3-phase AMN, 32 A
- L3-64: 4 lines, 3-phase AMN, 63 A
- L3-64/690: 4 lines, 3-phase AMN, 63 A
- L3-100: 4 lines, 3-phase AMN, 100 A
- L1-150M: single-path, 50 Ohm AMN, 150 A
- L1-150M1: single-path, 50 Ohm AMN, 150 A
- L1-500: single phase AMN, 500 A
- L3-500: 4 lines, 3-phase AMN, 500 A

RFI Filters

- FIL-L2-16F: single phase RFI Filter, 16 A
- FIL-L2-24M: single phase RFI Filter, 24 A
- FIL-L3-32M: 3-phase+neutral RFI Filter, 32 A
- FIL-L3-70M: 3-phase+neutral RFI Filter, 70 A

Sales:
Via Rimini, 22
20142 Milano - ITALY
Phone: +39 02 581881
Fax: +39 02 58188273

PM narda
A BRAND OF Safety Test Solutions

E-Mail: narda@support.narda-sts.it
Internet: www.narda-sts.it

Headquarters:
Via Bennessa, 28/B
17035 Cisano sul Neva (SV) - ITALY
Phone: +39 0182 58641
Fax: +39 0182 586400

SHC-FEN-11208 - Specifications subject to change without notice