



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

Verbundvorhaben:

Fühler im Netz –

Analyse der Signal-/Kanalcharakteristik bei der Datenübertragung über Stromnetze (Breitband-Powerline), als Sensoren für eine preiswerte Zustandsanalyse und zur Ermittlung von Betriebsführungsdaten und Störungen technischer Netze/Anlagen

Schlussbericht zum Teilprojekt:

Fühler im Netz –

Wissenschaftliche Analyse und Laborversuche zu Detektionsmöglichkeiten von Netzzuständen

Förderkennzeichen 03EK3540B



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Wuppertal den 28. Mai 2018

STROMNETZE

Forschungsinitiative der Bundesregierung

Nikolai Hopfer, Prof. Dr.-Ing. Markus Zdrallek
Bergische Universität Wuppertal
Gaußstraße 20, 42119 Wuppertal

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	II
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	III
TABELLENVERZEICHNIS	V
1 KURZE DARSTELLUNG	1
1.1 AUFGABENSTELLUNG.....	1
1.2 VORAUSSETZUNGEN, UNTER DENEN DAS PROJEKT DURCHFÜHRT WURDE.....	2
1.3 PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS	3
1.4 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND, AN DEN ANGEKNÜPFT WURDE	4
1.5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN	6
2 EINGEHENDE DARSTELLUNG	7
2.1 VERWENDUNG DER ZUWENDUNG UND DAS ERZIELTE ERGEBNIS IM EINZELNEN MIT GEGENÜBERSTELLUNG DER VORGEgebenEN ZIELE.....	7
2.1.1 <i>Arbeitspaket 0: Projektleitung</i>	7
2.1.2 <i>Arbeitspaket 1: Relevante Netzzustände</i>	7
2.1.3 <i>Arbeitspaket 2: Erfassungsmethodik zur Zustandsbewertung der Netz- und Anlagenzustände</i>	8
2.1.4 <i>Arbeitspaket 3: Netzzustandserfassung anhand der Übertragungseigenschaften des Energienetzes</i> .	26
2.1.5 <i>Arbeitspaket 4: Erfassung über zusätzliche Sensorik im BPL-System</i>	28
2.1.6 <i>Arbeitspaket 5: Ankopplungslösungen für die Messsensorik an das Mittelspannungsnetz</i>	29
2.1.7 <i>Arbeitspaket 6: Einbindung der erfassten Netzzustände in die Netzbetriebsführung</i>	31
2.1.8 <i>Arbeitspaket 7: Einbindung der erfassten Netzzustände in das Asset-Management</i>	34
2.1.9 <i>Arbeitspaket 8: Laborversuche zur Zustandsanalyse von Kabeln, Muffen, Garnituren</i>	36
2.1.10 <i>Arbeitspaket 9: Demonstrationsaufbau und Feldtests</i>	50
2.1.11 <i>Arbeitspaket 10: Technisch-wirtschaftliche Bewertung und Leitfaden</i>	71
2.1.12 <i>Arbeitspaket 11: Regulatorischer Rahmen</i>	72
2.2 WICHTIGSTE POSITIONEN DES ZAHLENMÄRIGEN NACHWEISES	74
2.3 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEITEN	75
2.4 VORAUSSICHTLICHER NUTZEN UND VERWERTBARKEIT DES ERGEBNISSES	75
2.4.1 <i>Wirtschaftliche Verwertbarkeit</i>	75
2.4.2 <i>Wissenschaftliche und/oder technische Verwertbarkeit</i>	75
2.5 BEKANNT GEWORDENER FORTSCHRITT AUF DEM GEBIET DES VORHABENS BEI ANDEREN STELLEN	77
2.6 ERFOLGTE UND GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNGEN	77
2.6.1 <i>Erfolgte, projektbezogene Veröffentlichungen</i>	77
2.6.2 <i>Geplante, projektbezogene Veröffentlichungen</i>	78
3 LITERATURVERZEICHNIS	79

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: IKT-EBENE IN MS- UND NS-NETZEN DURCH DIE BPL-TECHNOLOGIE	2
ABBILDUNG 2: PROJEKTPLANUNG	4
ABBILDUNG 3: PROJEKTSTRUKTUR.....	4
ABBILDUNG 4: ALLGEMEINES KOMMUNIKATIONSMODELL [8].....	12
ABBILDUNG 5: DIFFERENTIELLES LEITUNGSELEMENT DER LEITUNGSTHEORIE	14
ABBILDUNG 6: BEITRAG DER VERLUSTE IN LEITERN UND DIELEKTRIKUM ZU DEN GESAMTVERLUSTEN [13].....	15
ABBILDUNG 7: EINFLUSS EINER ALLGEMEINEN DISKONTINUITÄT AUF DIE DÄMPFUNG [21]	18
ABBILDUNG 8: SPEKTRALE EFFIZIENZ BESTEHENDER BPL-LINKS.....	24
ABBILDUNG 9: PROTOTYPISCHE MESSBOX („FIN-MESSBOX“).....	29
ABBILDUNG 10: SKIZZE DER SCHNITTSTELLEN UND EINBINDUNG EINES ZUSTANDSÜBERWACHUNGSSYSTEMS.....	34
ABBILDUNG 11: LÄNGENBEZOGENE DÄMPFUNG EINES THERMISCH GEALTERTEN VPE-KABELS	40
ABBILDUNG 12: LÄNGENBEZOGENE DÄMPFUNG EINES PAPIER-MASSE-KABELS MIT MASSEVERARMUNG.....	41
ABBILDUNG 13: LÄNGENBEZOGENE DÄMPFUNG EINES TEMPERIERTEN VPE-KABELS, DAS 700 H GEALERT IST	42
ABBILDUNG 14: LÄNGENBEZOGENE DÄMPFUNG EINES PAPIER-MASSE-KABELS MIT UNTERSCHIEDLICHEN STROMSTÄRKEN.....	43
ABBILDUNG 15: REFLEKTOGRAMM EINES VPE-KABELPRÜFLINGS MIT 13 M LÄNGE UND UNTERBROCHENEN SCHIRMDRÄHTEN.....	44
ABBILDUNG 16: S-PARAMETER EINES VOLLSTÄNDIG UNTERBROCHENEN KABELSCHIRMS	45
ABBILDUNG 17: REFLEKTOGRAMM (AUSSCHNITT) EINES VPE-KABELPRÜFLINGS MIT 13 M LÄNGE UND EINER SUKZESSIONEN QUETSCHUNG ÜBER EINE LÄNGE VON 2 CM.....	46
ABBILDUNG 18: REFLEKTIONSFAKTOR EINER SUKZESSIONEN QUETSCHUNG.....	47
ABBILDUNG 19: TE-PATTERN EINER KEGELBOHRUNG IN EINEM VPE-KABEL BEI 9 kV, 12 kV UND 15 kV.....	48
ABBILDUNG 20: SNR-MESSERGEBNISSE UNTER DEM EINFLUSS VON TE	49
ABBILDUNG 21: SPANNUNGSMESSUNG (MIT HUCKEPACK-ANSCHLUSS) SOWIE BPL-KOPPLUNG (MIT PIERCING-ANSCHLUSS) IN EINER NS- VERTEILUNG.....	51
ABBILDUNG 22: SPANNUNGS- UND STROMMESSUNG SOWIE INDUKTIVE BPL-KOPPLUNG IN EINER MS-SCHALTANLAGE (<i>MEDIUM VOLTAGE</i> (MV))	52
ABBILDUNG 23: VISUALISIERUNG EINER BPL-VERBINDUNG IN DER MODELLREGION NBSO (MS-NETZ) ÜBER EINEN ZEITRAUM VON MEHR ALS 7 MONATEN	56
ABBILDUNG 24: VISUALISIERUNG EINER BPL-VERBINDUNG IN DER NS-EBENE IN DER MODELLREGION BISMARCKSTRASSE MIT ZYKLISCHEN MUSTERN ÜBER EINEN ZEITRAUM VON CA. 7 TAGEN	57
ABBILDUNG 25: FOURIER-ANALYSE DER BPL-VERBINDUNG MIT ZYKLISCHEN MUSTERN, DIE IN ABBILDUNG 24 VISUALISIERT WURDE.....	58
ABBILDUNG 26: VISUALISIERUNG EINER BPL-VERBINDUNG IN DER NS-EBENE IN DER MODELLREGION NBSO (NS-NETZ) MIT LANGFRISTIGEN ÄNDERUNGEN ÜBER EINEN ZEITRAUM VON MEHR ALS 7 MONATEN	59
ABBILDUNG 27: LOKALISIEREN VON STÖRERN DURCH VERGLEICH VON BPL-VERBINDUNGEN.....	60
ABBILDUNG 28: SPANNUNGS- (OBEN) UND STROMSTÄRKEVERLAUF IM MS-NETZ IN DER MODELLREGION NBSO (MS-NETZ)	61
ABBILDUNG 29: VERLAUF DER SPANNUNG ENTLANG EINES NS-STRANGS IN DER MODELLREGION BISMARCKSTRASSE	62
ABBILDUNG 30: EINFLUSS VON SCHALTHANDLUNGEN AN EINER MS-SCHALTANLAGE AUF EINE ANLIEGENDE BPL-VERBINDUNG IN DER MODELLREGION NBSO (MS-NETZ), DARGESTELLT: 02.05.2017 VON 0 BIS 24 UHR	63

ABBILDUNG 31: EINFLUSS AUSGELÖSTER SICHERUNGEN UND OFFENER TRENNSTELLEN AUF EINE BPL-VERBINDUNG IN DER MODELLREGION BISMARCKSTRASSE	64
ABBILDUNG 32: AUSLÖSEN EINZELNER NH-SICHERUNGEN (EINZELNE PHASEN) IM VERLAUF VON SNR UND TONEMAP EINER BPL-VERBINDUNG IN DER MODELLREGION BISMARCKSTRASSE	65
ABBILDUNG 33: TRENDANALYSE DES SNR EINER BPL-VERBINDUNG IN DER MS-EBENE IN DER MODELLREGION NBSO (MS-NETZ)	67
ABBILDUNG 34: KORRELATIONSANALYSE ZWISCHEN SNR UND SPANNUNG FÜR EINE BPL-VERBINDUNG IN DER MS-EBENE IN DER MODELLREGION QUETTINGEN	69
ABBILDUNG 35: SPANNUNGSMESSUNG (OBEN: L1, MITTIG: L2, UNTEN: L3) AN EINER NS-VERTEILUNG ÜBER EINEN ZEITRAUM VON CA. 7 TAGEN IN DER MODELLREGION BISMARCKSTRASSE	70
ABBILDUNG 36: SPANNUNG, NETZFREQUENZ UND STROMSTÄRKE AN EINEM MS-SCHALTFELD IN DER MODELLREGION NBSO (MS-NETZ) ÜBER EINEN ZEITRAUM VON 6 TAGEN	71

Tabellenverzeichnis

TABELLE 2-1: KONVENTIONELLE MESSGRÖßEN FÜR ZUSTÄNDE VON KABELN	10
TABELLE 2-2: KONVENTIONELLE MESSGRÖßEN FÜR OPERATIVE NETZZUSTÄNDE	10
TABELLE 2-3: NOTWENDIGE BEDINGUNGEN FÜR EINE ERFASSUNG VON KABELZUSTÄNDEN	22
TABELLE 2-4: NOTWENDIGE BEDINGUNGEN FÜR EINE ERFASSUNG VON OPERATIVEN NETZZUSTÄNDEN	23
TABELLE 2-5: MODULATIONSARTEN DER VERWENDETEN BPL-MODEMS	27
TABELLE 2-6: VERGLEICH ZWISCHEN TE-PRÜFSPANNUNG (BZW. TE-PATTERN) UND BPL-DATENRATE	48
TABELLE 2-7: UMFANG INSTALLIERTER HARDWARE IN DER NS-EBENE	52
TABELLE 2-8: UMFANG INSTALLIERTER HARDWARE IN DER MS-EBENE.....	53
TABELLE 2-9: DATENBESTAND VOR DER DATENAUFBEREITUNG	54

1 Kurze Darstellung

In diesem Kapitel werden die Aufgabenstellung, die Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde, die Planung und der Ablauf des Vorhabens, der wissenschaftliche und technische Stand, an den angeknüpft wurde, sowie die Zusammenarbeit mit anderen Stellen in Kurzform dargestellt.

1.1 Aufgabenstellung

Das primäre Ziel dieses Projekts war die systematische Feststellung und Untersuchung der Nutzbarkeit eines Sekundäreffekts der Breitband-Powerline-(BPL)Kommunikation in Mittelspannungs-(MS-) und Niederspannungs-(NS-)netzen, um neben der eigentlichen Kommunikationsaufgabe dieser Technologie mit geringem Kosteneinsatz wertvolle Rückschlüsse auf den Zustand des zur Datenübertragung genutzten Netzes sowie der dort befindlichen Anlagen ziehen zu können. Dabei sollten auch zusätzliche, kostengünstige Sensoren sowie Ankopplungslösungen (nur MS-Ebene) einbezogen werden, um zusätzliche Messdaten, die mit der BPL-Kommunikation nicht erhoben werden können, zu generieren. Ergänzend sollte ein Analysetool entwickelt werden, um die generierten Sensor- und BPL-Daten hinsichtlich der Zustandserfassung auf Basis der bis dahin gewonnenen Erkenntnisse auswerten zu können.

Bei der anfänglichen Definition und Priorisierung relevanter kritischer Netz- und Anlagenzustände und der Analyse der Auswirkungen auf die Netzbetriebsführung wurden neben den herkömmlichen bereits auch zukünftige Netzstrukturen betrachtet. Auf diesen Grundlagen wurde differenziert und auf Basis theoretischer Analysen untersucht, welche Netz- und Anlagenzustände anhand der Datenübertragungseigenschaften der BPL-Kommunikation grundsätzlich erfasst werden können und welche dieser Zustände eine zusätzliche, kostengünstige Messsensorik erfordern. Die Ankopplung der Hardware an die vorhandenen Netzelemente sowie die Einbindung der erfassten Netzzustände den Netzbetrieb waren ebenfalls Bestandteil dieses Projekts. Wesentliche Zusammenhänge zwischen den BPL-Datenübertragungseigenschaften und den Zuständen wurden zudem im Rahmen von ausgedehnten Laborversuchen und in einem Feldtest u. a. mit Hilfe eines Analysetools in ausgewählten Netzteilen der Energieversorgung Leverkusen GmbH & Co. KG aufgezeigt.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde

Um den Herausforderungen der Energiewende zu begegnen, rücken Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) in den elektrischen Verteilungsnetzen zunehmend in den Fokus der öffentlichen Wahrnehmung und Forschung. Als ein wichtiger IKT-Baustein wird dabei die BPL-Kommunikation angesehen, welche die kommunikationstechnische Vernetzung über die vorhandenen Kabelstrecken in den MS- und NS-Netzen realisiert und den Wandel zu Smart Grids mitgestaltet. Abbildung 1 visualisiert die IKT-Ebene, wie diese im MS- und NS-Netz etabliert werden kann, um dort ein Kommunikationsnetzwerk aufzuspannen.

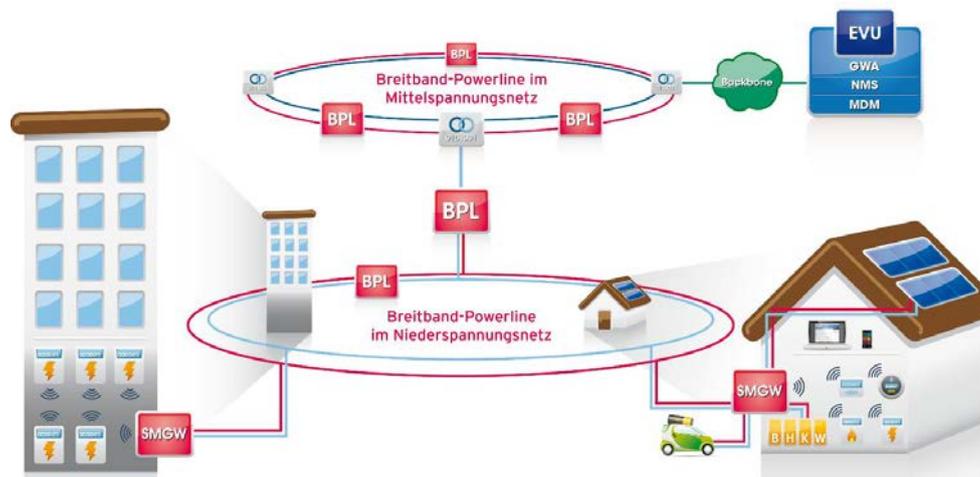


Abbildung 1: IKT-Ebene in MS- und NS-Netzen durch die BPL-Technologie

Im laufenden Betrieb der BPL-Kommunikation werden die Datenübertragungseigenschaften jeder Verbindung permanent analysiert, sodass auf Änderungen des Übertragungskanal automatisch in Echtzeit reagiert werden kann (z. B. durch einen Wechsel der Modulationsart) und somit eine robuste Datenübertragung ermöglicht wird. Die Erfahrungen aus zuvor realisierten Projekten (z. B.: iNES – intelligentes Verteilnetzmanagement-System), in denen die BPL-Kommunikation eingesetzt wurde, deuteten auf einen möglichen Sekundäreffekt der BPL-Kommunikation hin. Der angenommene Sekundäreffekt bezieht sich darauf, dass in den Datenübertragungseigenschaften der BPL-Kommunikation bereits viele Zustandsinformationen vorliegen, die Rückschlüsse auf Netz- und Anlagenzustände im Netz zulassen. Darüber hinaus war bereits bekannt, dass defekte Erzeugungsanlagen und nicht EMV-konforme Gleich-/Wechselrichter im Netz Störungen aussenden können, die sich negativ auf die Datenübertragungseigenschaften naheliegender BPL-Kommunikation auswirken können.

Das Verbundvorhaben wurde in enger Zusammenarbeit des Lehrstuhls für Elektrische Energieversorgungstechnik der Bergischen Universität Wuppertal mit folgenden Konsortialpartnern bearbeitet:

- Power Plus Communications AG, Mannheim
- Nexans Power Accessories Germany GmbH, Hof an der Saale
- Energieversorgung Leverkusen GmbH & Co. KG

Die Power Plus Communications AG war Konsortialführer. Zudem war Nexans S.A., Frankreich, Paris als assoziierter EU-Partner den Konsortialpartnern zur Seite gestellt.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Forschungsprojekt Fühler im Netz wurde in zwölf Arbeitspakete (AP) unterteilt:

- AP 0: Projektleitung
- AP 1: Relevante Netzzustände
- AP 2: Erfassungsmethodik zur Zustandsbewertung der Netzzustände
- AP 3: Netzzustandserfassung anhand der Übertragungseigenschaften des Energienetzes
- AP 4: Erfassung über zusätzliche Sensorik im BPL-System
- AP 5: Ankopplungslösungen für die Messsensorik an das Mittelspannungsnetz
- AP 6: Einbindung der erfassten Netzzustände in die Netzbetriebsführung
- AP 7: Einbindung der erfassten Netzzustände in das Asset-Management
- AP 8: Laborversuche zur Zustandsanalyse von Kabeln, Muffen, Garnituren
- AP 9: Demonstrationsaufbau und Feldtests
- AP 10: Technisch-wirtschaftliche Bewertung und Leitfaden
- AP 11: Regulatorischer Rahmen

Es wurden vier wesentliche Punkte im Projektfortschritt als Meilensteine (M) definiert:

- M 1: AP 1 wurde abgeschlossen.
- M 2: AP 2 wurde abgeschlossen.
- M 3: AP 3 bis einschließlich AP 7 wurden abgeschlossen.
- M 4: AP 8 wurden abgeschlossen.

Die Projektlaufzeit betrug drei Jahre. Der Bearbeitungszeitraum des Projekts war wie geplant und bewilligt vom 01.11.2014 bis zum 31.10.2017. Abbildung 2 zeigt die zeitliche Aufteilung der einzelnen Arbeitspakete und die Meilensteine in der Projektplanung.

AP	2014		2015												2016												2017									
	Monat		Monat												Monat												Monat									
	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	M1		M2												M3												M4									
1																																				
2																																				
3																																				
4																																				
5																																				
6																																				
7																																				
8																																				
9																																				
10																																				
11																																				

Abbildung 2: Projektplanung

Gemäß der Projektstrukturierung wurden einige Arbeitspakete sukzessive aufeinander aufbauend und andere parallel bearbeitet. Die Bearbeitung von AP 0 und AP 11 fand zudem begleitend statt. Abbildung 3 zeigt die Projektstruktur.

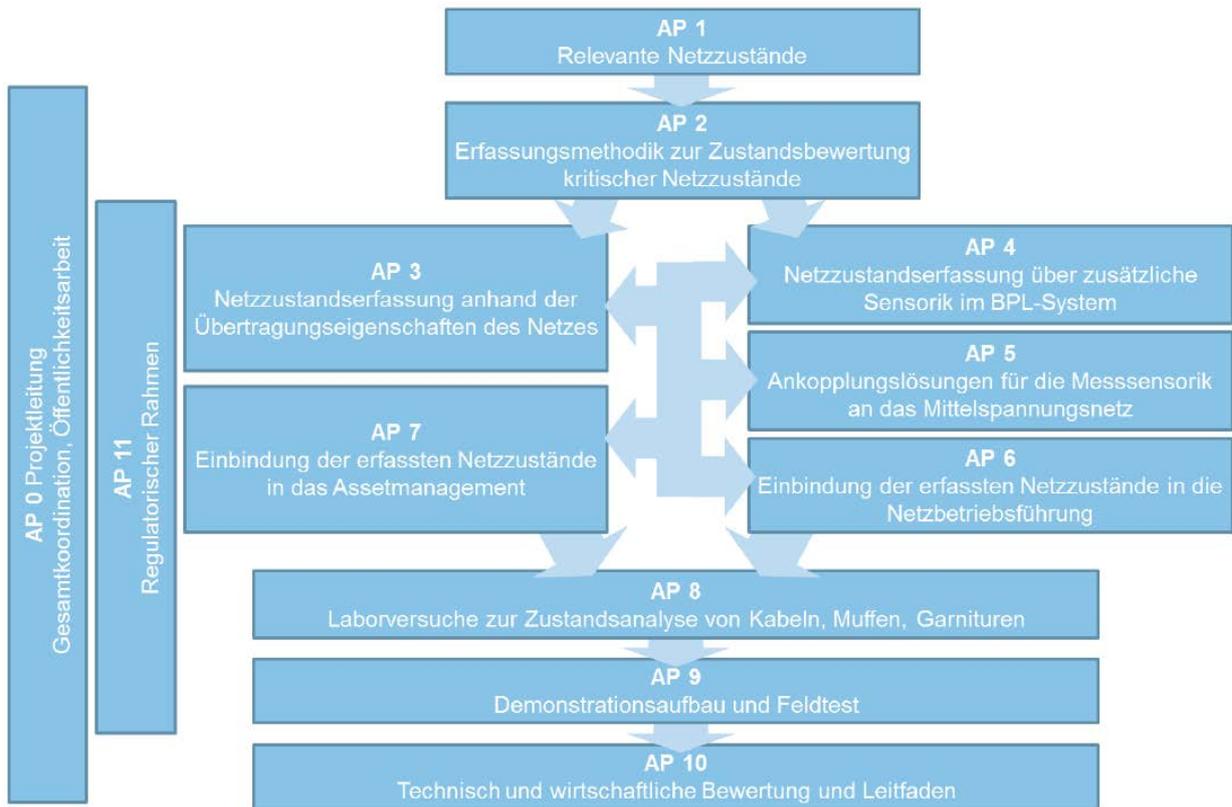


Abbildung 3: Projektstruktur

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Aus der Diagnostik elektrischer Betriebsmittel höherer Spannungsebenen, in denen ein hoher Aufwand zur Zustandserfassung gerechtfertigt ist, sind Messverfahren, die auch im

Bereich hoher Frequenzen wie der der BPL-Kommunikation arbeiten, verbreitet. Das bedeutet, dass Anlagenzustände prinzipiell mit Hilfe hochfrequenter Messmethoden abgebildet werden können. In den MS- und NS-Netzen – bedingt durch die große Anzahl und den geringen Einzelwert der dort eingesetzten elektrischen Betriebsmittel und Anlagen – werden Anlagenzustände nur selten messtechnisch erfasst. Insbesondere der tatsächliche Zustand erdverlegter Kabel ist daher meist unbekannt, da diese i. d. R. nicht visuell inspiziert werden können. Auch der tatsächliche Netzzustand (z. B. vorhandene Spannungsbandverletzungen) ist in diesen Spannungsebenen meist nicht fernüberwacht und daher meist unbekannt. Die BPL-Kommunikation und Nutzung zusätzlicher, einfacher Sensoren bietet daher ein großes Potential, Netz- und Anlagenzustände messtechnisch und zugleich kostengünstig mit Hilfe zu erfassen.

Es konnten keine anderen breit aufgestellten Untersuchungen dieses Sekundärnutzens der BPL-Kommunikation in Kombination mit kostengünstiger Messsensorik einschließlich theoretischer sowie praktischer Anwendung (Labor- und Feldtests) festgestellt werden. Dennoch konnte in den einzelnen Bearbeitungsphasen auf zahlreiche Grundlagenuntersuchungen zurückgegriffen werden. Die Modellierung von Energiekabeln für hochfrequente Signale war für die Arbeitsschritte in diesem Projekt eine wichtige Grundlage für die theoretischen Betrachtungen. Zudem waren auch Messmethoden (Messgeräte, Adaption, Auswertelgorithmen) von hochfrequenten Übertragungseigenschaften der Energiekabel, welche im Rahmen der Laborversuche eingesetzt wurden, verfügbar. Weiterhin wurden bereits bekannte Fehlstellen und Alterungsmechanismen in Energiekabeln zugrunde gelegt. Als Fachliteratur wurden überwiegend Veröffentlichungen und Normen der folgenden Standardisierungs- und Veröffentlichungsgremien genutzt:

- IEEE
- CIGRE/CIGRE
- VDE/ETG

Als Dokumentationsdienste dienten diesem Projekt die folgenden:

- IEEE Xplore Digital Library (<https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>)
- PLC DocSearch (<http://www.isplc.org/docsearch/>)

Weiterhin wurde auf folgende Dissertationen zurückgegriffen:

- N. Neusel-Lange, „Dezentrale Zustandsüberwachung für intelligente Niederspannungsnetze (Neue Energie aus Wuppertal, Band 1)“, Berlin: epubli GmbH, 2013.
- G. Mugala, “High Frequency Characteristics of Medium Voltage XLPE Power Cables“, Doctoral Thesis, KTH Royal Institute of Technology, 2005.

- K. Steinbrich, „Untersuchungen zum frequenzabhängigen Übertragungsverhalten von Energiekabeln,“ Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2005.
- G. Schmidt, „Differenzierte Schädigungs- und Alterungsdiagnose als Grundlage für ein zielgerichtetes Asset-Management im polymerisierten Mittelspannungskabelnetz“, Köln: Kölner Wissenschaftsverlag, 2009.
- G. Hoff, „Optimierung und Grenzen der technischen Diagnostik am Beispiel der Alterungsbestimmung polymerisierter Mittelspannungskabel“, Aachen: Shaker Verlag, 2003.
- P. C. J. M. van der Wielen, “On-line Detection and Location of Partial Discharges in Medium-Voltage Power Cables“, Dissertation, Technische Universität Eindhoven, 2005.
- P. Wagenaars, “Integration of Online Partial Discharge Monitoring and Defect Location in Medium-Voltage Cable Networks“, Dissertation, Technische Universität Eindhoven, 2005.

Alle in diesem Bericht zitierten Quellen einschließlich der genannten Dissertationen sind im Literaturverzeichnis gelistet (siehe Kapitel 3).

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit beschränkte sich auf das Projektkonsortium. Eine Zusammenarbeit mit anderen Stellen fand nicht statt.

2 Eingehende Darstellung

In diesem Kapitel wird über das Projekt eingehend berichtet. Dazu werden die Verwendung der Zuwendung und das erzielte Ergebnis im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele, die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises, die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten, der voraussichtliche Nutzen und die Verwertbarkeit des Ergebnisses, der bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen sowie die erfolgten und geplanten Veröffentlichungen dargestellt.

2.1 Verwendung der Zuwendung und das erzielte Ergebnis im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

2.1.1 Arbeitspaket 0: Projektleitung

Das AP 0 diente dazu, einen strukturierten Rahmen für das Projekt zu gewährleisten und erreichte dabei folgende Ziele:

- Koordination der Bearbeitung der Arbeitspakete
- Koordination von regelmäßigen Konsortialtreffen
- Koordination der Berichtspflichten und der Außendarstellung der Projektinhalte gegenüber dem Projektträger Jülich, dem Bundesministerium für Bildung und Forschung und der Öffentlichkeit (siehe auch Veröffentlichungen in Kapitel 2.6)

2.1.2 Arbeitspaket 1: Relevante Netzzustände

In AP 1 wurden die relevanten Netzzustände unter Berücksichtigung zukünftiger Technologien in MS- und NS-Netzen formal definiert, ihre Auswirkungen auf den Netzbetrieb untersucht und – daraus abgeleitet – einer Klassifizierung und Priorisierung unterzogen. Die wichtigste Definition in AP 1 ist die Differenzierung zwischen Anlagen- und (operativen) Netzzuständen aus Sicht des Verteilungsnetzbetreibers, die in den folgenden Abschnitten definiert werden. Zusätzlich wurde auch die Kundensicht betrachtet.

2.1.2.1 Anlagenzustände

Unter einem Anlagenzustand (bspw. Kabelzustand, Zustand der Schaltanlage etc.) wird der technische Zustand einer Anlage im Sinne der verbleibenden Lebensdauer bis zu einem Ausfall (i. d. R. mit einer Versorgungsunterbrechung von Kunden verbunden) verstanden. Verschiedene Alterungsprozesse und äußere Einflüsse können den Zustand einer Anlage beeinflussen. Die Kenntnis und damit die Erfassung von Anlagenzuständen ist für die Instandhaltungs- und Erneuerungsaufgaben entscheidend und damit für das Asset-Management eines Verteilungsnetzbetreibers von großer Bedeutung, um auch langfristig die

Versorgungszuverlässigkeit sicherstellen zu können. Eine besondere Stellung unter den Anlagen nehmen dabei die Kabel ein, da diese i. d. R. nicht turnusmäßig gewartet werden können und meist einer ereignisorientierten Instandhaltungsstrategie unterliegen. Im Bereich der Anlagenzustände wurde die Zustandserfassung von Kabeln hoch priorisiert.

2.1.2.2 Operative Netzzustände

Ein operativer Netzzustand berücksichtigt dagegen die Kenngrößen, die für den Netzbetrieb (insbesondere die Netzzustandsüberwachung) entscheidend sind. Dieser zeichnet sich durch die Spannungsqualität, Strombelastungen von Betriebsmitteln sowie den Schaltzustand von Schaltgeräten und Sicherungen im Netz aus. Der Netzzustand, seine Kenngrößen und insbesondere Abweichungen vom vorgegebenen üblichen Netzzustand sind für die Netzbetriebsführung von großer Bedeutung, um die Versorgungsqualität zu wahren. Solche Abweichungen (z. B. Spannungsbandverletzungen oder Überlastungen) werden zudem aus heutiger Sicht in zukünftigen Netzen durch den verstärkten Einsatz von Elektromobilität und dezentralen Energieerzeugungsanlagen tendenziell zunehmen und insbesondere die MS- und NS-Netze betreffen. Da gerade in diesen Spannungsebenen mit heutigem Stand nur in seltenen Ausnahmefällen eine Fernüberwachung (die Fernüberwachung endet meistens in den MS-Schaltfeldern der Umspannwerke von 110 kV auf die MS-Ebene) stattfindet, wurde die Erfassung des operativen Netzzustands bzw. der Abweichungen vom vorgegebenen Netzzustand hoch priorisiert. Dazu zählen die Spannungsqualität, die Strombelastung von Betriebsmitteln und Schaltzustände.

2.1.2.3 Kundensichtweise

Die Kunden haben Interesse und Bedarf an einer hohen Versorgungsqualität, welche die Spannungsqualität, die durch den operativen Netzzustand beschrieben wird, und die Versorgungszuverlässigkeit, welche durch die Anlagenzustände mitbestimmt wird, einschließt.

2.1.3 Arbeitspaket 2: Erfassungsmethodik zur Zustandsbewertung der Netz- und Anlagenzustände

Das AP 2 behandelte die Erfassungsmethodik zur Zustandsbewertung der Netzzustände. Dazu wurden insbesondere die Messanforderungen abgeleitet, die Auswirkungen auf die BPL-Kommunikation analysiert und abschließend ein Anforderungskatalog erstellt.

2.1.3.1 Definition der Messanforderungen zur Erfassung der definierten Netz- und Anlagenzustände

In diesem Abschnitt wurden prinzipielle Erfassungsmöglichkeiten und Messgrößen zur Erfassung definierter Netzzustände dargestellt. Daraus wurden methodisch erste Messanforderungen definiert.

2.1.3.1.1 Prinzipielle Erfassungsmöglichkeiten

Eine Erfassung der Zustände mit hochsensibler und damit kostenintensiver Messtechnik wurde weder als Bestandteil des Projekts geplant noch in der Bearbeitungsphase fokussiert. Entsprechende Messverfahren sind grundsätzlich verfügbar (z.B. Spannungs-/Stromwandler oder Kabeldiagnoseverfahren), wobei deren Einsatz in MS- und NS-Netzen aktuell zumeist unwirtschaftlich und daher selten ist. So sind gängige diagnostische Messungen (wie z. B. in [1] beschrieben) von Kabeln meist nur offline möglich [2] [3]. Die Erfassung des operativen Netzzustandes findet in Verteilungsnetzen, insbesondere in NS-Netzen historisch bedingt aktuell ebenfalls selten statt [4]. Für eine Erfassung der Netz- und Anlagenzustände waren deswegen unter Berücksichtigung der Projektorientierung zwei Möglichkeiten realisierbar:

- Erfassung über die Analyse der BPL-Datenübertragungseigenschaften
- Erfassung über zusätzliche, kostengünstige Messsensorik

2.1.3.1.1.1 Erfassung über die Analyse der BPL-Datenübertragungseigenschaften:

Für diejenigen Zustände, die Datenübertragungen zwischen BPL-Modems beeinflussen können, sollten die Messgrößen aus den BPL-Datenübertragungseigenschaften abgeleitet werden. Dazu war eine Modifikation der BPL-Modem-Firmware in AP 3 (siehe Kapitel 2.1.4) absehbar, da diese andernfalls ausschließlich für Kommunikationsaufgaben und nicht für Messwertaufzeichnungen (Aufzeichnung der BPL-Datenübertragungseigenschaften) ausgelegt war. Auf diese Weise sollten bereits vorhandene bzw. einfach zu generierende Parameter der BPL-Datenübertragungseigenschaften, die bisher verworfen bzw. nicht erhoben wurden, als Messgrößen erzeugt werden. Diese Messgrößen sollten Rückschlüsse auf diese Zustände erlauben.

2.1.3.1.1.2 Erfassung über zusätzliche, kostengünstige Messsensorik:

Sofern Zustände nicht anhand der BPL-Datenübertragungseigenschaften hinreichend erfasst werden konnten, wurde zusätzliche, kostengünstige Messsensorik an oder bei der BPL-Hardware eingesetzt. Dazu waren insbesondere eine Ergänzung der Baugruppen und Schnittstellen der BPL-Hardware und/oder deren Modifikation notwendig. Dies wird in AP 4 (siehe Kapitel 2.1.5) und AP 5 (siehe Kapitel 2.1.6) beschrieben.

2.1.3.1.2 Anforderungen an Genauigkeit und Zeitintervalle:

Eine permanent installierte BPL-Infrastruktur eröffnet die Möglichkeit, potentielle Messgrößen (der BPL-Datenübertragungseigenschaften oder der zusätzlichen Messsensorik) im Rahmen der eigentlichen Kommunikationsaufgabe unmittelbar weiterzuleiten. Daher wurden sowohl für die BPL-Datenübertragungseigenschaften als auch für die zusätzliche, kostengünstige Messsensorik Messungen im Sinne eines Online-Monitorings (siehe [2]) angestrebt, die kontinuierlich – oder mit relativ kurzen Zeitintervallen – während des normalen Netzbetriebs stattfinden. Auf diese Weise wurden frühzeitig hohe Messanforderungen an die zeitlichen Intervalle der Messungen gestellt, gemäß der Projektorientierung jedoch nicht zwingend an die Genauigkeit.

2.1.3.1.3 Konventionelle Messgrößen zur Erfassung der Netz- und Anlagenzustände

Je nach Zustand existieren verschiedene und teilweise mehrere konventionelle Messverfahren und dazugehörige Messgrößen, die einen Zustand beschreiben können. Daraus ließen sich die Messanforderungen ableiten. Dabei wurden Anlagenzustände (im Folgenden als Zustände von Kabeln bezeichnet) und operative Netzzustände unterschieden. Zugehörige konventionelle Messanforderungen wurden recherchiert und diejenigen Zustände, auf die sich im Laufe des Projekts fokussiert wurde, sind in den folgenden Tabellen 2-1 und 2-2 dargestellt.

Tabelle 2-1: Konventionelle Messgrößen für Zustände von Kabeln

Zustände von Kabeln	Konventionelle Messgröße (Beispiel)
Lokale Fehlstellen des Dielektrikums	Scheinbare Ladung
Globale Alterung des Dielektrikums	Dielektrischer Verlustfaktor
Mantelschäden am Kabelaußenmantel	Ableitströme

Tabelle 2-2: Konventionelle Messgrößen für operative Netzzustände

Operative Netzzustände	Konventionelle Messgröße
Spannungsqualität	Spannung
Strombelastung	Stromstärke oder ggf. Temperatur
Schaltzustand von Lasttrennschaltern in der MS-Ebene	Meldung durch Kunden (Stromausfall), Personal (Arbeiten vor Ort) oder in seltenen Fällen durch Fernüberwachung
Auslösen von NH-Sicherungen in der NS-Ebene	

2.1.3.1.4 Unkonventionelle Messgrößen der BPL-Datenübertragungseigenschaften

Die in diesem Projekt eingesetzte BPL-Kommunikation ist nach IEEE 1901 durch das Orthogonale Frequenzmultiplexverfahren (OFDM), welches eine Implementierung zur

Mehrträger-Modulation darstellt, realisiert. OFDM-Signalspektrum weist Frequenzen zwischen 1,8 und 30 MHz auf und beruht auf der Fast Fourier Transformation (FFT) [5]. Aus Gründen der elektromagnetischen Verträglichkeit werden definierte Frequenzen nicht zur Kommunikation genutzt, sodass effektiv 917 unabhängige Trägerfrequenzen zur Kommunikation zur Verfügung stehen [6]. Jeder Träger wird abhängig von den Übertragungseigenschaften (Dämpfung des Signals und Rauschen am Empfänger) im Bereich der zugehörigen Frequenz mit sieben unterschiedlich hochwertigen, d.h. spektral-effizienten Stufen (BPSK, QPSK, 8-QAM, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM oder 1024-QAM) moduliert. Zur korrekten Interpretation der übertragenen Daten am Empfänger muss der Einfluss des Übertragungskanal, d. h. die Übertragungsfunktion, für jeden Träger herausgerechnet werden [7]. Es sind folglich am Empfänger Parameter zu den BPL-Datenübertragungseigenschaften vorhanden, welche durch Modifikationen automatisch extrahiert und somit für weitere Analysen nutzbar gemacht werden müssen. Bisher konnte für die Analyse der BPL-Datenübertragungseigenschaften nur die Modulationsstufe (bzw. spektrale Effizienz) je Träger ausschließlich mittels manueller Abfragen in Momentaufnahmen bereitgestellt werden.

Wenn die BPL-Datenübertragungseigenschaften als Messgrößen betrachtet und zur Erfassung von Netzzuständen hinzugezogen werden, stellen diese nach einem Vergleich mit den etablierten, konventionellen Messgrößen zur Erfassung der jeweiligen Zustände unkonventionelle Messgrößen dar. Die BPL-Messgrößen stehen dabei prinzipiell nicht in direkter Beziehung zu den konventionellen Messgrößen, sondern lassen potentiell Rückschlüsse auf die zugehörigen Zustände zu. Es ist zudem keine kostengünstige Messtechnik bekannt, welche den technischen Zustand von Kabeln umfassend und ausreichend beschreiben kann. Im Rahmen der Projektfokussierung sollte daher der technische Zustand von Kabeln, welche zudem das wichtigste Übertragungsmedium der BPL-Kommunikation in MS- und NS-Netzen darstellen, über die BPL-Datenübertragungseigenschaften (unkonventionell) erfasst werden. Zusätzliche Messsensorik als alternative Erfassungsmöglichkeit der Zustände von Kabeln konnte ausgeschlossen werden. Für die Erfassung operativer Netzzustände konnten dagegen zunächst beide Verfahren (BPL-Kommunikation und zusätzliche Messsensorik) in Betracht gezogen werden.

2.1.3.1.5 Zwischenfazit

Die Messanforderungen zur Zustandserfassung wurden – bis hierhin rein methodisch betrachtet – unter Berücksichtigung der Projektorientierung und auf Basis bekannter Messverfahren und -größen wie folgt definiert:

- Zur Erfassung der Zustände von Kabeln werden ausschließlich BPL-Datenübertragungseigenschaften als unkonventionelle Messgrößen verwendet.
- Zur Erfassung operativer Netzzustände werden entweder die BPL-Datenübertragungseigenschaften (unkonventionelle Messgrößen) oder zusätzliche, kostengünstige Messsensorik verwendet. Die endgültige Entscheidung je Zustand gemäß Tabelle 2-2 hängt von den tatsächlichen Auswirkungen der Netzzustände auf die BPL-Kommunikation ab.

2.1.3.2 Analyse der Auswirkungen der Netz- und Anlagenzustände auf die BPL-Kommunikation im Energienetz, theoretische Grundlagenrecherche

Auf Basis theoretischer Grundlagenrecherchen und Simulationen wurden die Auswirkungen der Zustände auf die BPL-Datenübertragungseigenschaften in diesem Teil des AP2 untersucht.

2.1.3.2.1 Definition der notwendigen Bedingungen für die Erfassung über die BPL-Datenübertragungseigenschaften

Zur Definition der notwendigen Bedingung für die Erfassung der Zustände über die BPL-Datenübertragungseigenschaften ist das allgemeine Kanalmodell der Kommunikationstechnik heranzuziehen, wie es in Abbildung 4 dargestellt ist [8]. Im Allgemeinen, wie auch bei der BPL-Kommunikation, übermittelt ein Sender (hier: ein BPL-Modem) die Signale in einem bestimmten Frequenzbereich über einen Übertragungskanal. Dieser weist als wesentliche Eigenschaft die frequenzabhängige, komplexe Übertragungsfunktion $H(f)$ auf, welche die Signaldämpfung und den Phasengang beschreibt. Zusätzlich zu den Nutzsignalen ist stets ein überlagertes Rauschen $N(f)$ vorhanden, das ebenfalls die Datenübertragung beeinflusst. Je höher die Dämpfung zwischen Sender und Empfänger und je stärker das Rauschen am Empfänger sind, desto schlechter sind die Datenübertragungseigenschaften.

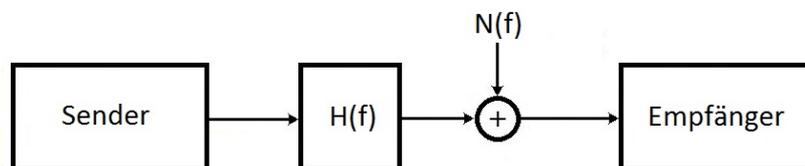


Abbildung 4: Allgemeines Kommunikationsmodell [8]

Drei Dämpfungsmechanismen als Teil der Übertragungsfunktion $H(f)$ sind für alle Signale im Übertragungskanal einer BPL-Kommunikation wirksam und lassen sich aus dem Modell der Leitungstheorie herleiten [8]:

1. Leistungsverluste:

Signale werden während einer Übertragung mit zunehmender Leitungslänge und zunehmender Frequenz stärker gedämpft (Tiefpass-Charakteristik elektrischer Leitungen) als bei kurzen Leitungslängen und niedriger Frequenz. Die Ursache ist die Verlustleistung zum einen in den Leitern und zum anderen in den Dielektrika.

2. Diskontinuitäten:

Die Stellen eines Übertragungsmediums, an denen die Wellenimpedanz abweicht beziehungsweise springt (sog. Diskontinuitäten), rufen Teilreflexionen eines Signals hervor. Der transmittierende Restsignalanteil ist in seinem Pegel dann vor allem ohne Betrachtung von Mehrfachreflexionen um den reflektierten Anteil vermindert und folglich gedämpft. Bspw. jeder Betriebsmittelübergang ist hier als Diskontinuität der Wellenimpedanz oder Inhomogenität der Materialien und Geometrien zu berücksichtigen [9].

3. Mehrwegausbreitung:

Aufgrund der Topologie insbesondere in NS-Netzen handelt es sich i. d. R. nicht um Direktverbindungen ohne Diskontinuitäten zwischen Sendern und Empfängern. Die Signale erfahren eine Mehrwegausbreitung, die sich ebenfalls dämpfend auswirkt. Denn in Kombination mit Mehrfachreflexionen, die durch mehr als eine Diskontinuität entstehen, können sich die resultierenden Echos am Empfänger dem Anteil des direkten Signalpfades überlagern und je nach Phasenverschiebung destruktiv auswirken (Fading). Dies ist insbesondere in der NS-Ebene mit vielen Abzweigen (Hausanschlüsse) ein wichtiger Aspekt [10].

Das Rauschen $N(f)$ in MS- und NS-Netzen setzt sich aus fünf verschiedenen Rauscharten zusammen [11]:

- farbiges Hintergrundrauschen
- Schmalbandrauschen
- periodisches Impulsrauschen synchron zur Netzfrequenz
- periodisches Impulsrauschen asynchron zur Netzfrequenz
- asynchrones Impulsrauschen

Die Zustände können die Datenübertragungseigenschaften der BPL-Kommunikation nur beeinflussen und folglich anhand dieser erkannt werden, wenn sie mindestens eine der folgenden notwendigen Bedingungen erfüllen:

- Variation der Übertragungsfunktion $H(f)$ im BPL-Frequenzbereich, z. B. der Dämpfung ($|H(f)|$) über einen Einfluss eines der drei Dämpfungsmechanismen
- Emission von Rauschen mit Anteilen im BPL-Frequenzbereich, d.h. eine Erhöhung von $N(f)$

2.1.3.2.2 Zustände von Kabeln

Um den Einfluss des Zustands von Kabeln auf die BPL-Datenübertragungseigenschaften zu analysieren, musste deren Übertragungsverhalten untersucht werden. Zur Beschreibung des Übertragungsverhaltens eines Kabels muss aufgrund der kleinen Wellenlängen, die die BPL-Frequenzen aufweisen, die Leitungstheorie angewandt werden [12]. Auf dieser Basis kann unter anderem die längenbezogene Dämpfung sowie die Wellenimpedanz eines homogenen Kabels ermittelt sowie insgesamt dessen Übertragungsverhalten beschrieben werden.

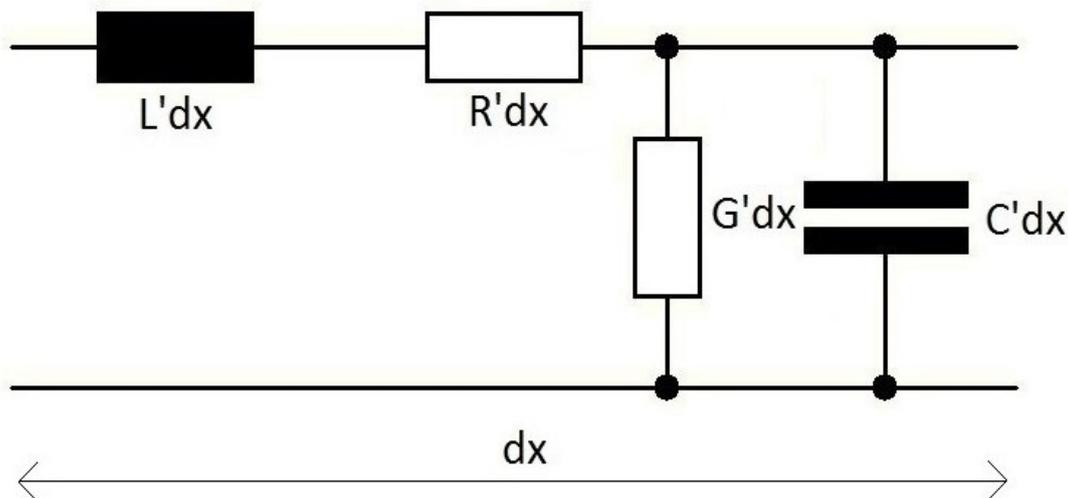


Abbildung 5: Differentielles Leitungselement der Leitungstheorie

Um den speziellen Aufbau verschiedenster Kabeltechnologien zu berücksichtigen, werden erweiterte und teilweise mehrdimensionale Modelle verwendet, um bspw. auch den Einfluss von Leitschichten in Verbindung mit der Isolation auf eine hochfrequente Signalübertragung als geschichtetes Dielektrikum beschreiben zu können. Dazu werden die vier Leitungsbeläge – der Induktivitätsbelag L' , der Widerstandsbelag R' , der Ableitungsbelag G' sowie der Kapazitätsbelag C' nach Abbildung 5 – unter Berücksichtigung des Kabelaufbaus, des Skin-Effekts und der Materialkenngrößen substituiert und parametrisiert. Zur Erläuterung dessen wird auf die umfangreiche Literatur, z. B. [13], [14] und [15] verwiesen.

2.1.3.2.2.1 Globale Alterung

Dielektrische Diagnoseverfahren zur globalen Alterungsbestimmung basieren im Allgemeinen auf der Beschreibung der Leitfähigkeit und der Polarisierungseffekte in Kabelndielektrika bzw. der Veränderung dieser Größen [2]. Auch im BPL-Frequenzbereich gilt dabei für die dielektrischen Verluste als Teil der Leitungsverluste des ersten Dämpfungsmechanismus (gemäß Abschnitt 2.1.3.2.1), dass sie durch die Leitfähigkeiten und die Polarisierungseffekte im Kabelndielektrikum verursacht werden. Bei niedrigeren Frequenzen bis in den kHz-Bereich ist die Dämpfung in Energiekabeln überwiegend auf die ohmschen Verluste im Leiter und im Schirm – verstärkt durch den Skin-Effekt –

zurückzuführen. Bei den hohen BPL-Trägerfrequenzen überwiegen dagegen die dielektrischen Verluste [13]. Die Ursache dafür ist, dass diese im Allgemeinen proportional zur Frequenz, die ohmschen Verluste wegen des Skin-Effekts aber nur proportional zur Quadratwurzel der Frequenz steigen. Die folgende Gleichung zeigt, wie sich die Dämpfungskonstante, abgeleitet aus dem Modell der Leitungstheorie in Abhängigkeit der Frequenz f darstellt [12] [15].

$$\alpha(f) = \frac{1}{2} \left(\frac{R'(f)}{\sqrt{\frac{L'(f)}{C'(f)}}} + G'(f) \sqrt{\frac{L'(f)}{C'(f)}} \right) [Np/m] \text{ mit } R'(f) \sim \sqrt{f} \text{ und } G'(f) \sim f$$

Abbildung 6 zeigt exemplarisch die Verteilung der Verluste und damit der Dämpfung auf die einzelnen Kabelelemente eines VPE-MS-Kabels.

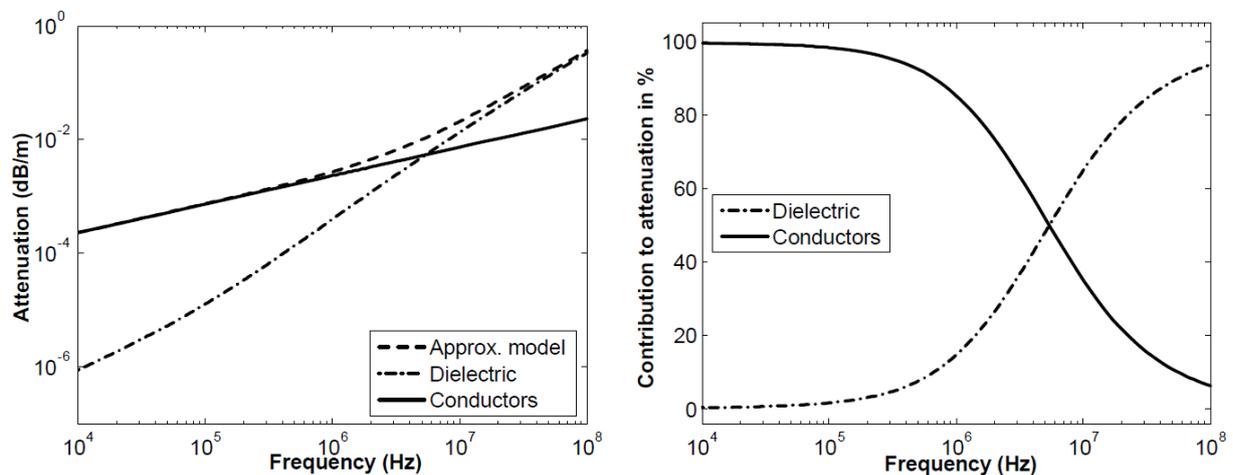


Abbildung 6: Beitrag der Verluste in Leitern und Dielektrikum zu den Gesamtverlusten [13]

Dadurch, dass die dielektrischen Eigenschaften, die auch Gegenstand konventioneller diagnostischer Messverfahren sind, einen großen Einfluss auf die Übertragungseigenschaften von Kabeln haben, liegt ein Einfluss auf die BPL-Datenübertragungseigenschaften durch eine alterungsbedingte Änderung dieser Eigenschaften nahe.

Der dielektrische Anteil der längenbezogenen Dämpfung eines Kabels wird, erkennbar anhand eines erweiterten Modells [13], durch die komplexen Permittivitäten und Leitfähigkeiten der halbleitenden Schichten, die Permittivität und den Verlustfaktor der Isolierung und zudem durch die geometrischen Maße dieser Bestandteile bestimmt. Darüber hinaus sind diese Materialkenngrößen überwiegend frequenzabhängig und temperaturabhängig.

Alterungsbedingte Änderungen dieser Materialkenngrößen äußern sich demnach in einer Änderung der Dämpfung pro Längeneinheit. Daher bietet sich prinzipiell die Möglichkeit, über die Dämpfung von BPL-Signalen Rückschlüsse auf den Zustand eines Kabeldielektrikums zu ziehen. Da die BPL-Datenübertragungseigenschaften durch die gesamte Dämpfung zwischen zwei Modems (und nicht durch die längenbezogene Dämpfung) bestimmt werden, sind die Auswirkungen umso deutlicher, je länger ein von einer solchen Änderung betroffener Kabelabschnitt ist.

Damit ist die notwendige Bedingung zur Erfassung von globaler Alterung in Kabeldielektrika über die Datenübertragungseigenschaften der BPL-Kommunikation anhand des ersten Dämpfungsmechanismus erfüllt (gemäß Abschnitt 2.1.3.2.1), wenn sich im Kabeldielektrikum

- die Leitfähigkeit der halbleitenden Schichten,
- die Permittivität der halbleitenden Schichten,
- der dielektrische Verlustfaktor der Isolation oder
- die Permittivität der Isolation

alterungsbedingt ändert. Durch die genannten Abhängigkeiten kann folgender funktionaler Zusammenhang definiert werden:

$$\alpha = \alpha(f, T, A)$$

Die Dämpfung ist somit nicht nur von der Frequenz, sondern auch von der Temperatur T und dem Effekt der Alterung A abhängig. Weiterhin sind vergleichbare Einflüsse auf den Phasengang, als zweiter Bestandteil einer komplexen Übertragungsfunktion, durch alterungsbedingte Änderungen möglich. Informationen über den Phasengang konnten jedoch nicht aus den Datenübertragungseigenschaften ausgelesen werden (vgl. Abschnitt 2.1.3.4.1.1 und Kapitel 2.1.4) und werden nicht weiter betrachtet.

2.1.3.2.2.2 Lokale Fehlstellen

Lokale Fehlstellen können eine veränderte Geometrie (z. B. Quetschung) oder eine veränderte Materialeigenschaft bedeuten, welche räumlich konzentriert ist [3]. Das heißt für den Ansatz des zweiten Dämpfungsmechanismus, dass sich über die betroffene, im Allgemeinen sehr kurze Kabellänge andere Übertragungseigenschaften ausprägen. Da diese Fehlstellen in der Realität extrem kurze Kabellängen einnehmen, können erhöhte Leitungsverluste (1. Dämpfungsmechanismus) vernachlässigt werden, solange die leitenden Materialien noch Strom führen können, also nicht vollständig unterbrochen sind. Da jedoch auch die Wellenimpedanz beeinflusst wird, kann es an diesen Stellen zu Reflexionen kommen (2. Dämpfungsmechanismus), was in diesem Abschnitt untersucht wurde. Die Wellenimpedanz ist im Allgemeinen eine komplexe Größe. Ihr Imaginärteil ist jedoch für hier relevante Frequenzen vernachlässigbar [12]. Die Wellenimpedanz wird überwiegend durch

die Reaktanz des Induktivitäts- und die Admittanz des Kapazitätsbelags bestimmt, sofern der Widerstands- und der Ableitungsbelag im Verhältnis klein sind.

Eine lokale Fehlstelle wird für die Analyse dieses Effekts als kurzer homogener Kabelabschnitt betrachtet, der aufgrund von veränderten Eigenschaften eine andere Wellenimpedanz Z_1 als der ungeschwächte Kabelrest (Z_0) aufweist. Denkbar ist bspw. eine Quetschung eines Kabels, lokaler Wassereindrang oder andere Fehlstellen [3] [16] [17] [18], die durch Veränderung der Materialkenngrößen oder Geometrien den Kapazitäts- und/oder Induktivitätsbelag beeinflussen und damit auch die Wellenimpedanz wie folgt verändern können [19]:

$$Z_1 = kZ_0 \quad \text{mit } k > 0$$

Das Modell bedient sich der S-Parameterdarstellung und wurde für Simulationen in MATLAB verwendet. Nach [20] kann dazu folgender Zusammenhang dargestellt werden [21]:

$$S_{21} = \frac{2k}{2k \cosh(\gamma L) + (k^2 + 1)\sinh(\gamma L)}$$

S_{21} ist der Transmissionskoeffizient, L die Länge des geschwächten und in der Praxis kurzen Kabelabschnitts mit der um Faktor k veränderten Wellenimpedanz. γ ist die Ausbreitungskonstante des Kabels und wurde auf Basis der Literaturrecherche aus einer Dämpfung von 0,08 dB/m (ca. 0,01 Np/m) und einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von 160 m/ μ s zusammengesetzt [13] [15]. Diese Werte haben sich bei den späteren Laborversuchen, die in Kapitel 2.1.9 behandelt werden, bestätigt. Für die Verstärkung g (in dB) von Signalen gilt (negative Werte entsprechen einer Dämpfung anstatt einer Verstärkung):

$$g = 20 \log_{10} |S_{21}|$$

Die folgende Abbildung 7 zeigt den Zusammenhang auf einer doppelt-logarithmischen Skala. In dem Diagramm wird über die Abszissenachse der Faktor k zwischen den Werten 10^{-3} und 10^3 variiert. Auf der Ordinatenachse ist der Quotient aus der Wellenlänge λ und der Länge des geschwächten kurzen Kabelabschnitts L bis zu einem Wert von 0,25 dargestellt. Die Farbkodierung zeigt die Dämpfung durch diese Fehlstelle für die jeweiligen Abszissen- und Ordinatenwerte an. Je stärker der Faktor k vom Wert 1 abweicht sowie je größer die Länge L und je kleiner die Wellenlänge λ sind, desto höher wird die Dämpfung. Diese steigt jedoch nur sehr langsam an. Die geringste Wellenlänge liegt bei den höchsten Frequenzen vor, sodass sich bei einer maximalen BPL-Frequenz von 30 MHz und der o. g. Ausbreitungsgeschwindigkeit eine Wellenlänge von ca. 5,3 m ergibt. Da der Faktor k in realen Fehlstellen nur geringfügig vom Wert 1 abweicht, zeigen realistische Fehlstellen mit einer Größenordnung von wenigen Milli- oder Zentimetern (L) in dieser Simulation keinen

signifikanten Einfluss. Sie sind im dunkelblauen Bereich sehr geringer Dämpfung einzuordnen.

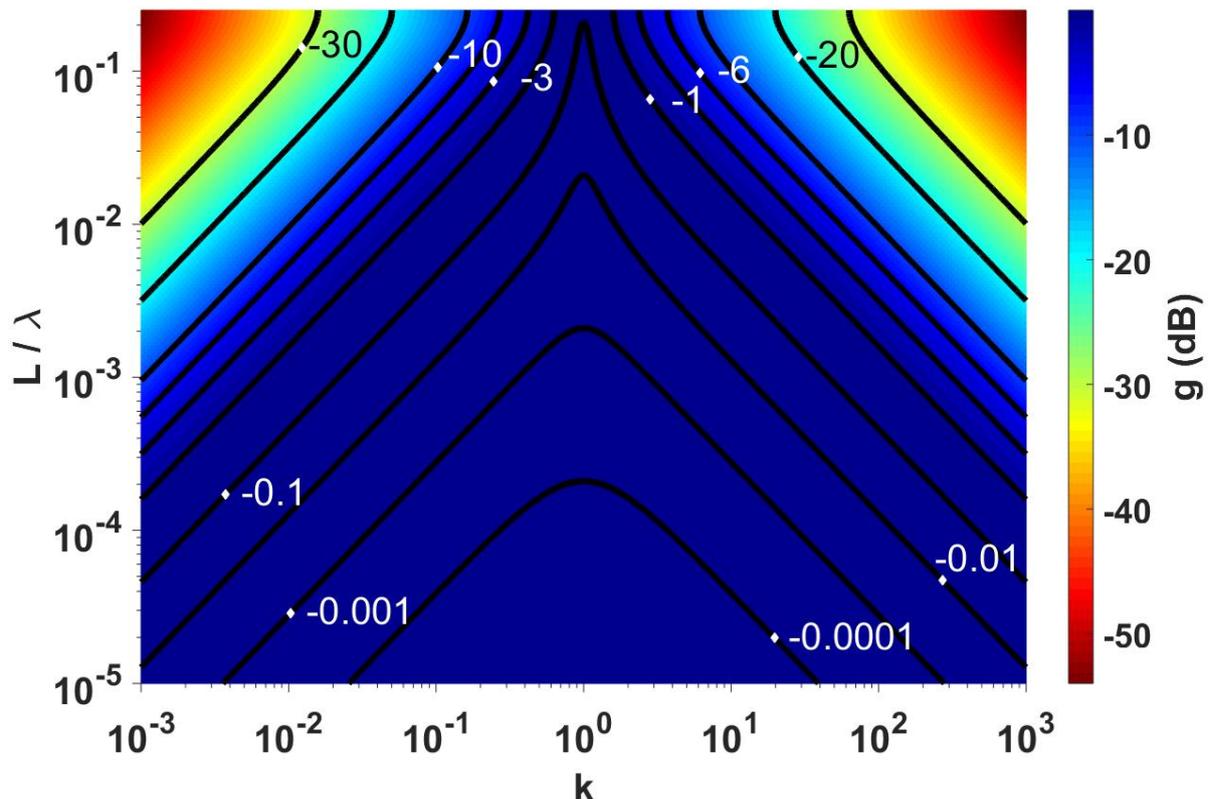


Abbildung 7: Einfluss einer allgemeinen Diskontinuität auf die Dämpfung [21]

Anhand der Simulation kann gezeigt werden, dass auf Basis dieses Modells die Dämpfung (negative Verstärkung in dB) umso größer ist,

- je höher die Frequenz bzw. je geringer die Wellenlänge λ ist,
- je länger der geschwächte Kabelabschnitt (L) ist und
- je stärker die Wellenimpedanz Z_1 von Z_0 bzw. k vom Wert $k = 1$ abweicht.

Somit war zu erwarten, dass dieser Effekt bei den oberen BPL-Frequenzen am besten erkannt werden kann, wobei die Ausprägung von Reflexionen, d. h. des abstrakten Faktors k , und die damit verbundene Dämpfung durch die Art, Form und Ausprägung der lokalen Fehlstelle bestimmt werden.

Aufgrund dieser Simulation war davon auszugehen, dass solche lokalen Fehlstellen die notwendige Bedingung für eine Erfassung über die BPL-Datenübertragungseigenschaften nicht hinreichend erfüllen. Es konnte zudem simuliert werden, dass einzelne lokale Fehlstellen, selbst bei relativ hoher Abweichung des Faktors k vom Wert 1 und unter Einbeziehung einer je nach Fehlstellenart möglichen Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit innerhalb der Fehlstelle keinen signifikanten Einfluss auf die

BPL-Datenübertragungseigenschaften haben, solange die leitenden Materialien noch Strom führen können. Bei unterbrochenen Innenleitern (offenes Ende) ergeben sich ebenso wie bei einem sehr niederohmigen bzw. satten Kurzschluss zwischen Innenleiter und Schirm (Erdschluss) dagegen nahezu Totalreflexionen an der Fehlstelle [12]. Diese würden die BPL-Kommunikation somit extrem stark beeinflussen oder sogar unterbinden, bedeuten jedoch auch, dass das Kabel wegen einer solchen Fehlstelle bereits ausgefallen und eine Zustandserfassung als präventive, ausfallvorbeugende Maßnahme nicht möglich ist.

Da lokale Fehlstellen im Betrieb mit hohen Spannungen durch Teilentladungen behaftet sein können [1] [2] [3], wurden teilentladungsbehaftete Fehlstellen separiert betrachtet und sind in Abschnitt 2.1.3.2.2.3 dargestellt.

2.1.3.2.2.3 Teilentladungen

Teilentladungen (TE) können in der MS-Ebene ein Indikator für lokale Fehlstellen in Betriebsmitteln sein [1]. Sie sind aufgrund ihrer Eigenschaften aus der Sicht der BPL-Kommunikation prinzipiell als impulsives Rauschen aufzufassen. Das Amplitudenspektrum $I(f)$ eines TE-Impulses hängt unter anderem von seiner TE-Ladung q_{TE} und seinem Zeitverlauf ab. Es verliert zwar mit steigender Frequenz an Intensität, weist aber dennoch häufig nennenswerte Anteile vor allem im unteren BPL-Frequenzbereich bis ca. 10 MHz auf [22] [23].

Aus dem Amplitudenspektrum lässt sich das Energiedichtespektrum ESD eines TE-Impulses berechnen. Über die Telegraphengleichung ist außerdem bekannt, dass Strom und Spannung über die Wellenimpedanz (hier konstant angenommen) am Entstehungsort gekoppelt sind. Daraus folgt:

$$ESD(f) = |I(f)|^2 \cdot Z_W$$

Die Voraussetzung für das Erkennen von TE ist, dass durch diese das Hintergrundrauschen am Empfänger (BPL-Modem) verstärkt wird. Dabei spielt es zunächst keine wesentliche Rolle für eine Erfassung von TE, ob diese aus einem Kabel oder bspw. einer Schaltanlage stammen. Für die Leistung des Rauschens am Empfänger gilt folgender Zusammenhang [19] [24]:

$$P_n = P_g + P_i = P_g \left(1 + \frac{P_i}{P_g} \right)$$

P_n ist die gesamte Rauschleistung, P_g die Leistung des Hintergrundrauschens und P_i hier die Impulsrauschleistung der TE. Sobald P_i in der Größenordnung des Hintergrundrauschens P_g oder darüber liegt, wird das gesamte Rauschen P_n maßgeblich verstärkt.

Die mittlere Wiederholungsrate λ_{TE} von TE gibt die Anzahl an TE-Impulsen pro Sekunde an [24]. Die mittlere Rauschleistungsdichte PSD_i entspricht dem mittleren Energiedichtespektrum einer einzelnen TE am Modemeingang:

$$PSP_i = \lambda_{TE} \cdot ESD_{TE}$$

Die Rauschleistung bzw. Rauschleistungsdichte der TE-Impulse im BPL-Frequenzbereich ist folglich umso höher,

- je breiter das Spektrum bzw. je kürzer die TE-Impulse im Zeitverlauf sind,
- je größer ihre Ladung q_{TE} ist und
- je häufiger sie auftreten, d.h. je größer ihre Wiederholungsrate λ_{TE} ist.

Zu beachten ist dabei, dass TE aufgrund ihrer hochfrequenten Eigenschaften während ihrer Ausbreitung den gleichen Übertragungseigenschaften wie die BPL-Signale unterliegen. TE-Signale werden ebenfalls gedämpft, weshalb ihr potentieller Einfluss bei steigender Fehlerentfernung kontinuierlich abnimmt. Damit ist der nutzbare Einfluss durch TE beim Empfang von BPL-Signalen bei den untersten Trägerfrequenzen am ehesten zu erwarten, weil die Dämpfung der TE-Signale dort am geringsten (Tiefpass-Eigenschaften) und ihre Rauschleistungsdichte am höchsten ist. Zu beachten ist jedoch, dass auch das Hintergrundrauschen im unteren Frequenzbereich am stärksten ausgeprägt ist [11], was die Detektionsfähigkeit wiederum negativ beeinflusst. Die BPL-Datenübertragungseigenschaften verschlechtern sich nur, wenn die Impulsrauschleistung der TE P_i in der gleichen Größenordnung des übrigen Rauschens P_g oder darüber liegt. Des Weiteren weist die kapazitive (oder auch induktive) Kopplung der BPL-Modems ans MS-Netz im Bereich der untersten BPL-Frequenzen Hochpass-Eigenschaften auf, um die hohe elektrische Spannung mit Netzfrequenz zu filtern und die BPL-Hardware vor dieser zu schützen [25]. Deshalb sollte nach TE im Bereich bis zu 10 MHz gesucht werden, was eine andere Untersuchung ebenfalls als Richtwert zur Online-TE-Detektion bestätigt [26].

2.1.3.2.2.4 Mantelschäden

Der äußere Schutzmantel eines Kabels befindet sich außerhalb des Dielektrikums und außerhalb der metallischen Umhüllung (Schirm) eines Kabels. Deshalb haben dessen Eigenschaften keinen Einfluss auf das Übertragungsverhalten von Kabeln. Der Schutzmantel wird aus diesem Grund bei der Modellierung von Kabeln mit Hilfe der Leitungstheorie nicht berücksichtigt. Mantelschäden haben deshalb keinen Einfluss auf die BPL-Datenübertragungseigenschaften und können nicht erkannt werden.

2.1.3.2.3 Operative Netzzustände

In diesem Abschnitt wurden die Auswirkungen von Spannungsqualität, Strombelastungen von Kabeln (Stromstärke oder Temperatur) und Schaltzuständen, welche als operative

Netzzustände definiert wurden, analysiert. Stromstärke und Spannung wirken bei Netzfrequenz (50 Hz). Die Netzfrequenz einschließlich der Oberschwingungen liegt weit unterhalb der BPL-Frequenzen. Ein Einfluss als Rauschen kann daher ausgeschlossen werden. Zudem wird in der MS-Ebene durch die kapazitive oder induktive Kopplung der BPL-Modems an das Netz die Netzfrequenz gedämpft. Im Folgenden wird näher beschrieben, welche Auswirkungen diese Zustände auf die BPL-Datenübertragungseigenschaften aufweisen.

2.1.3.2.3.1 Spannungsqualität

Prinzipiell existieren nichtlineare Materialien, die eine Abhängigkeit der dielektrischen Eigenschaften von der elektrischen Feldstärke und damit von der Spannung aufweisen. Eine Spannungsänderung bzw. Spannungsbandverletzung kann in diesem Fall daher theoretisch einen Einfluss auf hochfrequente Signale haben. Die Effekte sind jedoch in den üblichen Materialien entweder nicht vorhanden oder als gering einzustufen. Zudem ist die Spannung selbst bei Verletzungen des zulässigen Spannungsbandes stets in der gleichen Größenordnung ausgeprägt, weshalb ein Einfluss auf die BPL-Datenübertragungseigenschaften bei weiteren Betrachtungen vernachlässigt werden kann. Eine notwendige Bedingung wird daher nicht erfüllt. Die BPL-Datenübertragungseigenschaften eignen sich nicht als unkonventionelle Messgrößen zur Beurteilung der Spannungsqualität, da die notwendige Bedingung nicht hinreichend erfüllt wird. Deshalb müssen zusätzliche, kostengünstige Spannungssensoren zur Erfassung dieses Zustands verwendet werden.

2.1.3.2.3.2 Strombelastung von Kabeln

Die Permeabilität eines Materials kann von der magnetischen Feldstärke (vor allem bei ferromagnetischen Stoffen in der Sättigung oder durch die Hysterese) abhängig sein. Damit besteht ein theoretischer Zusammenhang zwischen der Stromstärke, die das magnetische Feld verursacht, und den hochfrequenten Eigenschaften eines Materials. Dieser Effekt ist jedoch ebenfalls als gering einzustufen, da die relevanten Materialien nur eine äußerst geringfügige Magnetisierung aufweisen. So sind in [27] nicht-magnetische Werkstoffe für metallene Umhüllungen gefordert. Die dazu verwendeten Materialien sind ebenso wie die Innenleiter (Aluminium oder Kupfer) als auch die nicht-metallischen Isoliermaterialien folglich nur geringfügig dia- oder paramagnetisch und in dieser Eigenschaft von der magnetischen Feldstärke nur sehr geringfügig abhängig. Ein direkter Zusammenhang zwischen den BPL-Datenübertragungseigenschaften und der Stromstärke kann daher vernachlässigt werden. Die BPL-Datenübertragungseigenschaften eignen sich nicht als unkonventionelle Messgrößen um Rückschlüsse auf die Stromstärke zu ziehen.

Zu berücksichtigen ist aber, dass die Kenngrößen von Kabelmaterialien, wie in Abschnitt 2.1.3.2.2.1 erwähnt, temperaturabhängig sind. Ein Temperaturanstieg, bspw. vor allem im Überlastfall, ist wiederum durch die Stromstärke bedingt. Die Auswirkungen der Temperatur

sind mit denen globaler Alterung (siehe Abschnitt 2.1.3.2.2.1) vergleichbar und im Zuge der Recherchen konnte zudem bestätigt werden, dass vergleichbare Auswirkungen auf die Datenübertragungseigenschaften durch einen Temperaturanstieg der Kabelmaterialien vorhanden sind. Deshalb wird die erste notwendige Bedingung für den Zustand Strombelastung nur über die Korrelation zwischen Temperatur und Stromstärke erfüllt. Die notwendige Bedingung zur direkten Erfassung der Stromstärke wird nicht hinreichend erfüllt. Daher eignen sich zusätzliche, kostengünstige Stromsensoren zur direkten Erfassung der Stromstärke sowie theoretisch zusätzlich andererseits die BPL-Datenübertragungseigenschaften, um Rückschlüsse auf die Temperatur zu ermöglichen.

2.1.3.2.3.3 Schaltzustand

Die Änderung eines Schaltzustands ist ein Eingriff in die wirksame Topologie eines Netzes. Daraus resultiert der dritte Dämpfungsmechanismus und die notwendige Bedingung ist durch diesen Zustand ebenfalls erfüllt. Einflüsse der Topologie können ganz erheblich sein [10]. Zudem liegt es nahe, dass die Übertragungseigenschaften von NH-Sicherungen, die in NS-Netzen auch zur Signaltransmission verwendet werden, sich nach Sicherungsauslösung deutlich verschlechtern. Daher eignen sich die BPL-Datenübertragungseigenschaften prinzipiell zur Erfassung von Schaltzuständen.

2.1.3.2.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich anhand der Recherchen und Simulationen festhalten, welche Zustände potentiell über die BPL-Datenübertragungseigenschaften erkannt werden können, wie die folgenden Tabellen darstellen.

Tabelle 2-3: Notwendige Bedingungen für eine Erfassung von Kabelzuständen

Zustand von Kabeln	Notwendige Bedingungen (grün: erfüllt, rot: nicht erfüllt)
Lokale Fehlstellen	2. Dämpfungsmechanismus ist vernachlässigbar
Teilentladungen	Rauschen
Globale Alterung	1. Dämpfungsmechanismus
Mantelschäden	Kein Einfluss auf die Übertragungseigenschaften von Kabeln

Tabelle 2-4: Notwendige Bedingungen für eine Erfassung von operativen Netzzuständen

Operativer Netzzustand		Notwendige Bedingungen (grün: erfüllt, rot: nicht erfüllt)
Spannungsqualität		Einfluss auf feldstärkeabhängige Permittivitäten vernachlässigbar
Strombelastung	Stromstärke	Einfluss auf feldstärkeabhängige Permeabilitäten vernachlässigbar
	Temperatur	1. Dämpfungsmechanismus
Schaltzustand		3. Dämpfungsmechanismus

2.1.3.3 Ableiten der Identifikationsmöglichkeiten der Netz- und Anlagenzustände anhand der BPL-Datenübertragungseigenschaften des Energienetzes, erster Verifikationsschritt durch Auswertung vorhandener BPL-Installationen

Von der Power Plus Communications AG wurden exemplarisch die Verbindungseigenschaften von drei Links zur Analyse bereitgestellt. Die Informationen wurden noch mit unmodifizierten Modems gewonnen. Es stand deshalb nur ein Parameter – die Modulationsstufe – als grobes Abbild der Übertragungseigenschaften zur Verfügung. Die Modulationsstufen bilden die spektrale Effizienz ab. Je höher der SNR ist, desto höher ist die spektrale Effizienz. Grundsätzliche Gesetzmäßigkeiten und bereits bekannte Effekte wie der Einfluss der Kabellänge und des Rauschens konnten bestätigt werden. Da es sich um jeweils eine Momentaufnahme handelt und die Eingangsdatenlage zu gering war, konnten jedoch keine Zustände identifiziert werden. Es werden drei verschiedene Übertragungslinks (Link 2, 3 und 4) in der MS-Ebene auf ihre Datenübertragungseigenschaften untersucht:

- Link 2 über eine 1191 m lange VPE-Kabelstrecke ohne bekannte Muffen
- Link 3 über eine 295 m lange VPE-Kabelstrecke ohne bekannte Muffen
- Link 4 über eine 191 m lange VPE-Kabelstrecke mit zwei bekannten Muffen

Abbildung 8 zeigt die spektrale Effizienz dieser Links. Die aus Gründen der elektromagnetischen Verträglichkeit nicht verwendeten Träger (vgl. Abschnitt 2.1.3.1.4) sind in Abbildung 8 ausgeblendet und haben folglich unabhängig von den Kanaleigenschaften immer eine spektrale Effizienz von 0 Bit/(s*Hz).

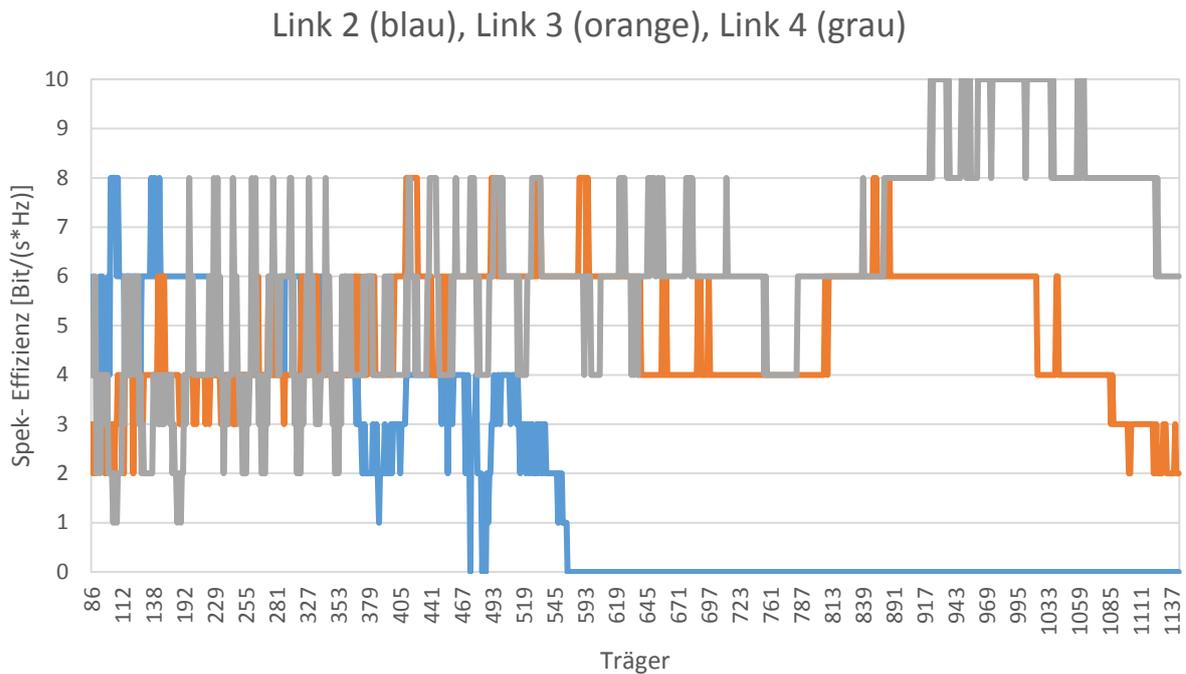


Abbildung 8: Spektrale Effizienz bestehender BPL-Links

Weitere Daten wie z. B. das Alter oder der Querschnitt der Kabel standen hierbei nicht zur Verfügung. Als Eingangsdaten standen lediglich die Modulationsstufen bzw. spektralen Effizienzen für jeden Träger dieser drei Links zu einem nicht spezifizierten Zeitpunkt zur Verfügung. Einflüsse durch Netzzustände oder durch Zustände der Kabel und Muffen konnten weder bestätigt noch widerlegt werden. Dennoch können ohne weitere Maßnahmen aus diesen Daten grundlegende Übertragungseigenschaften bestätigt werden. Die Ergebnisse dieser Analyse deuten darauf hin, dass bei kurzen MS-Kabeln alle nicht-maskierten Träger für das Projektvorhaben interessant sein können. Bei unbekanntem Kabelzustand war auf allen Trägern der Links 3 und 4 eine Übertragung möglich. Bei langen Kabelstrecken (Link 2) ist die Übertragung mit hohen BPL-Frequenzen nicht möglich, weshalb je nach Kabellänge bestimmte Frequenzen für weitere Analysen ausscheiden.

2.1.3.4 Anforderungskatalog: Welche Netz- und Anlagenzustände lassen sich potentiell anhand der Datenübertragungseigenschaft identifizieren und welche erfordern zusätzliche Messsensorik

Die relevanten Netz- und Anlagenzustände lassen sich konventionell anhand bestimmter Parameter messen und beschreiben. Wie in Abschnitt 0 beschrieben ist, gilt es, Parameter im Rahmen des Projekts einerseits über kostengünstige Messsensorik, andererseits über die BPL-Datenübertragungseigenschaften, die Rückschlüsse auf die Zustände zulassen, zu erfassen oder abzubilden. Dabei sind im Rahmen von einer brauchbaren Aussagekraft, der kostengünstigen Orientierung und von normativen Vorgaben bestimmte Randbedingungen einzuhalten, die sich nach dem Anwendungsbereich orientieren. Auf Basis der Ergebnisse

dieses Arbeitspakets wurde ein Anforderungskatalog erstellt, dessen Inhalte hier in diesem Abschnitt zusammengefasst werden und die Ergebnisse der vorherigen Teilarbeitspakete beinhalten. Dieser Katalog stellt zugleich ein Lastenheft für die weiteren AP dar, wobei auf die Berichterstattung zu AP 3 (Kapitel 2.1.4) und AP 4 (Kapitel 2.1.5) verwiesen wird.

2.1.3.4.1 Hardwareanforderungen

2.1.3.4.1.1 Modifikationen der BPL-Hardware

Bisher sind die Modulationsstufen als grobes Abbild der Verbindungseigenschaften in einzelnen Abfragen in den BPL-Modems verfügbar (siehe Abschnitt 2.1.3.1.4). Für eine genauere Messung bietet sich eine Auswertung der Übertragungsfunktion (Dämpfung und Phasengang) und des Rauschens sowie des SNR für jeden Träger und der Datenübertragungsrate einer Verbindung an. Die notwendigen Modifikationen fielen in den Bereich des AP 3 (siehe Kapitel 2.1.4). Bereits im Rahmen der Arbeiten in AP 2 stellte sich früh heraus, dass systembedingt neben den Modulationsstufen (Abbild der spektralen Effizienz) nur der SNR als weiterer Parameter aus den BPL-Modems der Power Plus Communications AG zur Verfügung gestellt werden kann. Beide Parameter beinhalten keine Informationen über den Phasengang, sondern nur hinsichtlich der Dämpfung, weshalb die weiteren Untersuchungen sich darauf fokussieren. Sie wurden im Rahmen des Feldtests automatisch und regelmäßig von den installierten Modems aufgezeichnet, während bisher nur die Modulationsstufe in einzelnen, manuellen Abfragen zur Verfügung stand. Insbesondere im Rahmen von Feldtests galt es, Analysen in kleinen, geeigneten Zeitintervallen (als Monitoring) durchzuführen und Rückschlüsse auf Zustände zu erhalten.

2.1.3.4.1.2 Zusätzliche, kostengünstige Messsensorik

In der NS-Ebene (siehe Kapitel 2.1.5), wo die Installation einer BPL-Infrastruktur verhältnismäßig günstig ist, weil keine kapazitive oder induktive Kopplung notwendig ist, sondern die BPL-Modems direkt galvanisch mit dem Netz verbunden werden können, wird nur eine Spannungsmessung realisiert. Die jeweiligen Sensoren sind auf die gleiche Art und Weise in den NS-Verteilungen zu installieren (parallel zu den Modems). Da die Spannung im NS-Netz häufig unsymmetrisch ist, findet diese Messung an allen drei Phasen statt. Auf eine Strommessung wird wegen der komplexeren Ankopplung verzichtet. In der MS-Ebene (siehe Kapitel 2.1.6), wo ohnehin eine Ankopplungslösung notwendig ist, werden Strom- und Spannungsmessungen realisiert. Da die MS-Ebene im Normalbetrieb annähernd symmetrisch belastet und betrieben wird, finden die jeweiligen Messungen hier jedoch nur an einer Phase statt. Zudem werden hier die Netzfrequenz sowie die Wirk-, Blind- und Scheinleistung gemessen, da diese Parameter ohnehin durch die eingesetzte Messtechnik erhoben werden können.

2.1.3.4.2 Zustände von Kabeln

Die Erfassungsmöglichkeiten für Zustände von Kabeln beschränken sich auf die Analyse der BPL-Datenübertragungseigenschaften.

Anzeichen für eine globale Alterung sollen (z. B. durch eine Trendanalyse der Datenübertragungseigenschaften) vor allem im oberen BPL-Frequenzbereich ermittelt werden. Für (Schaltzustände und) lokale Schäden wird ein Gradient im Zeitverlauf der BPL-Datenübertragungseigenschaften erwartet. Sollten sich lokale Fehlstellen entgegen der Simulationen als detektierbar erweisen, wird hier die gleiche Strategie verfolgt. TE sind im unteren Frequenzbereich zu suchen und können mit der Spannung korrelieren (z. B. setzen TE erst bei einer bestimmten Spannung ein, der so genannten TE-Einsatzspannung). Diese Korrelation soll ebenfalls untersucht werden.

2.1.3.4.3 Operative Netzzustände

Zusätzliche Messsensoren und Ankopplungslösungen für die MS-Ebene fallen in den Bereich des AP 4 (siehe Kapitel 2.1.5) bzw. AP 5 (siehe Kapitel 2.1.6). Dabei werden die operativen Netzzustände der Strombelastung von Kabeln durch Stromsensoren und die Spannungsqualität (Unsymmetrien, Spannungsbandverletzungen) durch Spannungssensoren erfasst. Die Erfassung der Strom- und Spannungswerte dient auch zur Korrelationsanalyse mit den BPL-Datenübertragungseigenschaften. Temperatureinflüsse auf die Übertragungseigenschaften von Kabeln sind zwar im selben Frequenzbereich wie die globale Alterung von Kabeln zu finden, lassen jedoch eine Korrelation mit der Stromstärke und überdies ein tageszyklisches Verhalten erwarten.

2.1.4 Arbeitspaket 3: Netzzustandserfassung anhand der Übertragungseigenschaften des Energienetzes

Ein Schwerpunkt des Projekts war die kontinuierliche Erfassung der Datenübertragungseigenschaften der BPL-Kommunikation. Jedes BPL-Modem analysiert permanent diese Eigenschaften zu allen "Nachbarn", d.h. zu allen BPL-Modems, die kommunikativ erreichbar sind, wie in Kapitel 1.2 bereits beschrieben wurde.

In AP 3 wurde von der Power Plus Communications AG eine neue Firmware entwickelt und in die Modems implementiert, um zwei Kenngrößen der Datenübertragungseigenschaften – den Signal-Rausch-Abstand (SNR) und die Modulationsstufe (Tonemap) – zu extrahieren und nutzbar zu machen. Beide Kenngrößen können die Informationsbasis für eine Zustandserfassung anhand der BPL-Kommunikation bilden. Weitere Parameter zu den Datenübertragungseigenschaften (z. B. der Phasengang oder die Dämpfung) konnten nicht bereitgestellt werden.

Der SNR stellt ein Maß für die Datenübertragungsqualität zu einem bestimmten Nachbarn in Empfangsrichtung (RX) dar. Der SNR wird in dB angegeben. Je höher sein Wert ist, desto schneller ist die Datenübertragung. Der SNR wird dabei für jeden der 917 nach IEEE 1901 [5] genutzten Träger separat bestimmt. Basierend auf dem SNR wird ebenfalls für jeden Träger eine diskrete Modulationsstufe gewählt. Die Modulationsstufe legt die spektrale Effizienz eines Trägers fest. Höhere Modulationsstufen ermöglichen höhere Datenraten, setzen allerdings einen hohen SNR voraus. Umgekehrt erlauben niedrige Modulationsstufen auch bei geringem SNR eine stabile Datenübertragung mit geringeren Datenraten. Es können insgesamt sieben verschiedene Modulationsstufen ausgewählt werden (siehe Tabelle 2-5). Die Modulationsstufe ist ein diskreter Parameter, der aus dem SNR automatisch abgeleitet wird, während der SNR eine kontinuierliche Kenngröße darstellt. Daher ist der SNR als Eingangsgröße für weitere Untersuchungen besser geeignet.

Tabelle 2-5: Modulationsarten der verwendeten BPL-Modems

Modulationsstufe	Modulation	Spektrale Effizienz [Bit/s/Hz]
1	BPSK	1
2	QPSK	2
3	8-QAM	3
4	16-QAM	4
5	64-QAM	6
6	256-QAM	8
7	1024-QAM	10

In einem festgelegten Intervall (alle 15 Minuten) werden die Parameter SNR und Modulationsstufe je Träger automatisch auf jedem einzelnen Modem abgefragt und an ein Serversystem geschickt. Dieses Serversystem wurde im Rahmen dieses Projekts durch mehrere Messcomputer realisiert, die sich vor Ort in den Ortsnetzstationen der Energieversorgung Leverkusen GmbH & Co. KG befanden und von der Power Plus Communications AG konfiguriert wurden. Die Parameter liegen als csv-Dateien vor und werden durch einen SFTP-Server bereitgestellt. Von da aus können die csv-Dateien an beliebige Systeme übertragen werden, die Zugang zum selben virtuellen privaten Netzwerk (VPN) haben.

Eine Datengrundlage zur Zustandserfassung anhand der BPL-Datenübertragungseigenschaften war damit geschaffen. Um die große Datenmenge handhaben zu können, wurde diese per VPN-Verbindung der Bergischen Universität Wuppertal zugänglich gemacht, die notwendigen Datenabrufe und -aufbereitungen durch diese programmgestützt weitgehend automatisiert und ein Analysetool zur Visualisierung

und Auswertung entwickelt. Die weiteren Bearbeitungen hierzu zählen zu AP 9 und werden dementsprechend in Kapitel 2.1.10 eingehender behandelt.

2.1.5 Arbeitspaket 4: Erfassung über zusätzliche Sensorik im BPL-System

In AP 4 wurde ein Konzept zur Integration einfacher Messsensorik in die BPL-Kommunikationstechnik entwickelt. Das Ziel war ein System, das preiswert in die BPL-Kommunikationstechnik einzubinden ist. Der Fokus dieses AP lag auf der Lösungsentwicklung für das NS-Netz. Die Messsensorik für die MS-Ebene wurde im Zuge von AP 5 zusammen mit neuen Ankopplungslösungen entwickelt (siehe Kapitel 2.1.6).

Für die Entwicklung zusätzlicher Messsensorik im BPL-System wurde entschieden, die Netzzustandsgröße Spannung kontinuierlich und dreiphasig zu erfassen. Eine dreiphasige Messung ist im NS-Netz sinnvoll, da anders als in höheren Spannungsebenen Unsymmetrien häufig vorhanden sind.

Auf eine Erfassung der Stromstärke und damit der Strombelastung von Betriebsmitteln im NS-Netz wurde verzichtet. Diese ist zwar eine wichtige operative Netzzustandsgröße, kann jedoch unter Wahrung einer kostengünstigen Projektorientierung nicht erfasst werden. Im Gegensatz zur Netzspannung, die in einer NS-Verteilung in einer Ortnetzstation oder in einem Kabelverteilerschrank nur an einem Punkt je Phase (an der Sammelschiene oder an einem beliebigen Kabel) gemessen werden muss, müsste der Strom an jedem Kabel je Phase einzeln gemessen werden. Eine Spannungsmessung wurde zudem mit Hilfe einer galvanisch verbundenen, einfach gehaltenen Messleitung realisiert, während für die Strommessung (viele) Kabelumbauwandler oder ähnliche Stromwandler notwendig gewesen wären. Hinzu kommt die Beurteilung des Netzzustandes aus Kundensicht: Für den Kunden ist die Versorgungsqualität relevant – in Form von Spannungsqualität und Verfügbarkeit der elektrischen Energieversorgung. Ein wichtiges Kriterium der Spannungsqualität ist die Einhaltung des zulässigen Spannungsbandes am Kundenanschlusspunkt. Die Höhe der Stromstärke im benachbarten Netz ist aus Kundensicht uninteressant, solange der Zugang zu elektrischer Energie nicht beeinträchtigt wird.

Innerhalb des Projektzeitraums wurde von der Power Plus Communications AG eine prototypische Messbox zur Erfassung der Spannung (dreiphasig) im NS-Netz entwickelt, getestet und erfolgreich in der Modellregion Leverkusen eingesetzt. Der Anschluss dieser Messbox (auch FiN-Messbox genannt) an L1, L2, L3 und PEN erfolgt mithilfe der Standard-Anschlusskits der Power Plus Communications AG, d. h. mit „Piercing“ oder „Huckepack“, je nach Kabelverteilerschrank und NS-Verteilung. In Abbildung 9 ist eine solche FiN-Messbox mit Huckepack-Anschluss zu sehen.

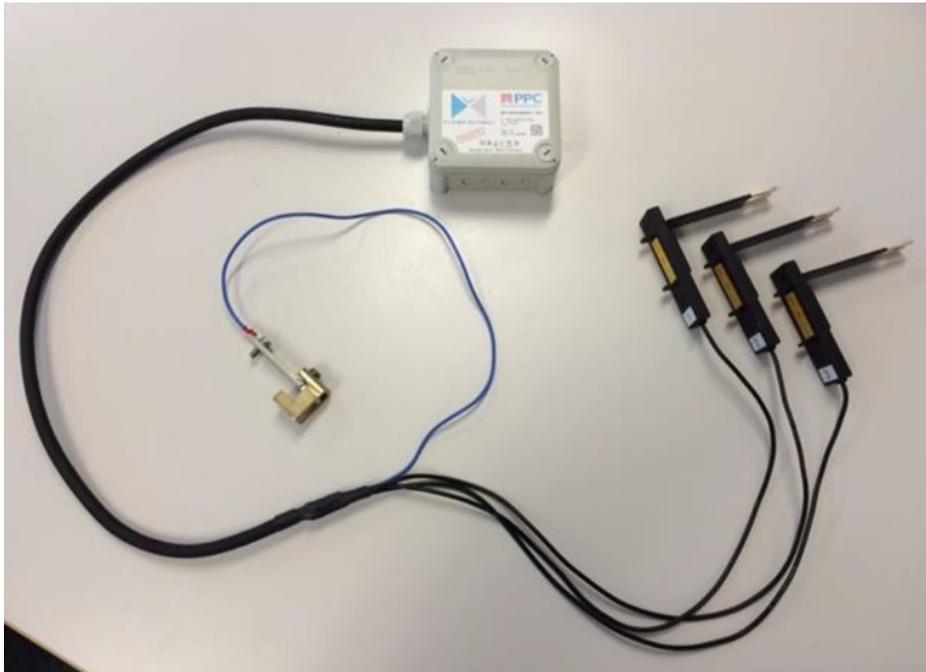


Abbildung 9: Prototypische Messbox („FiN-Messbox“)

Alle 10 Sekunden werden die Spannungen der drei Phasen (0 bis 250 V mit einer Genauigkeit von 1 V) gemessen. Die Power Plus Communications AG stellte die Messwerte ebenso wie die BPL-Parameter (SNR und Modulation) als csv-Dateien zur Verfügung. Der Datenaustausch erfolgte hier jedoch nicht über einen Zugriff auf die Messcomputer, sondern über einen manuellen, wöchentlich routinierten Datenaustausch. Die Daten flossen der Datenaufbereitung und -analyse der Bergischen Universität Wuppertal zu, was in Kapitel 2.1.10 eingehender beschrieben wird.

2.1.6 Arbeitspaket 5: Ankopplungslösungen für die Messsensorik an das Mittelspannungsnetz

In AP 5 wurden Ankopplungslösungen für die Messsensorik an das MS-Netz entwickelt. Basierend auf den bisherigen Ergebnissen sind die folgenden Parameter als Abbild der operativen Netzzustände im MS-Netz über zusätzliche Messsensorik zu erfassen:

- Effektivwerte der Leiter-Erde-Spannung
- Effektivwerte der Leiter-Ströme
- Phasenwinkel, beziehungsweise Leistungsfaktor, aus dem auch die Richtung des Stroms bzw. das Vorzeichen des Strombetrags abgeleitet werden kann
- Wirk- und Blindleistung
- Netzfrequenz (Sollwert: 50 Hz)

Um diese Netzzustände ermitteln zu können, wurden Stromstärke und Spannung als Hauptparameter über die Sensoren erfasst. Die restlichen Parameter ließen sich dann daraus über eine elektronische Messbaugruppe ableiten und ermitteln.

Durch die in diesem Projekt kombinierte Betrachtung aus den Datenübertragungseigenschaften der BPL-Kommunikation und Messwerten zusätzlicher Sensorik, wurden im MS-Netz gemäß den Definitionen in AP 1 und AP 2 folgende Komponenten eingesetzt:

- BPL-Modem
- Spannungssensor
- Stromsensor

Wegen des hohen Spannungsniveaus in der MS-Ebene müssen diese Komponenten – anders als in der NS-Ebene – speziell angekoppelt werden, um das hohe elektrische Potential von den sensiblen Bauteilen der genannten Komponenten fernzuhalten und daraus resultierende Gefahren abzuwenden. Prinzipiell sind zur Ankopplung Wandler, Filter und Teiler geeignet. Zur Ankopplung von BPL-Modems existieren bereits kapazitive sowie induktive Koppler, die gleichzeitig der elektrischen Belastung durch die Spannung des MS-Netzes widerstehen und als Hochpass-Filter wirken, d.h. für die hochfrequenten BPL-Signale leitend sind, während das Potential der MS-Ebene bei 50 Hz zum BPL-Modem gesperrt wird.

Die Nexans Power Accessories Germany GmbH entwickelte im Rahmen dieses AP mehrere Ankopplungslösungen und die Strom- und Spannungssensoren, die sich abhängig von Eigenschaften (Isolierung, Platzangebot) der MS-Schaltanlagen und -Kabel(-garnituren) unterscheiden. Die Strommessung wurde über einen ferromagnetischen Ringkern-Wandler, die Spannungsmessung über einen kapazitiven Spannungsteiler realisiert. Prinzip bedingt übernehmen beide sowohl die Funktion der Ankopplung und als auch des eigentlichen Sensors. Am Ausgang der jeweiligen Komponenten ist das hohe Potential der MS-Ebene getrennt und eine gegenüber der eigentlichen Messgröße verringerte, proportionale Größe wird bereitgestellt. Diese analogen Signale wurden in einer von der Nexans Power Accessories Germany GmbH entwickelten elektronischen Messbaugruppe verarbeitet und zwischengespeichert.

Zudem wurde eine IP-basierte Verbindung zu dieser elektronischen Messbaugruppe realisiert. Sie hat damit auch den Charakter einer Remote Terminal Unit (RTU). Diese RTU betreibt einen FTP-Server, von dem die Messdaten, die alle 15 Sekunden erhoben wurden, direkt über die bestehende BPL-Kommunikation über eine VPN-Verbindung abgerufen werden können. Die Daten flossen der Datenaufbereitung und -analyse der Bergischen Universität Wuppertal zu, was in Kapitel 2.1.10 eingehender beschrieben wird.

Die Messdaten liegen als komprimierte Textdateien vor (*.txt.gz). Die Messungen in der MS-Ebene wurden vor dem Hintergrund der kostengünstigen Projektorientierung nur auf einer Phase realisiert, da anders als im NS-Netz im fehlerfreien Fall (d. h. kein Erdschluss) eine nahezu symmetrische Belastung auf allen drei Phasen angenommen wird.

2.1.7 Arbeitspaket 6: Einbindung der erfassten Netzzustände in die Netzbetriebsführung

Die Netzbetriebsführung ist die Überwachung und Regelung des Stromnetzbetriebes mit Hilfe von Netzleitsystemen zur Erhaltung des Leistungsflusses und des Gleichgewichts zwischen Energieerzeugung und -verbrauch. In diesem AP werden zunächst die aktuelle und die zukünftige Rolle der Netzzustandsüberwachung beschrieben. Folgend wird beschrieben, was eine Zustandsüberwachung, ergänzt um Informationen aus der BPL-Kommunikation, leisten und wie Schnittstellen zur Einbindung in die Netzbetriebsführung aussehen könnten.

2.1.7.1 Aktuelle und zukünftige Rolle der Netzzustandsüberwachung

Das deutsche Energieversorgungssystem besteht heute aus im Laufe des letzten Jahrhunderts gewachsenen Strukturen. Dabei ist das elektrische Energieversorgungsnetz gebaut worden, um die zentral in großen Kraftwerken erzeugte Energie mit klar definierter Stromflussrichtung zu den Verbrauchern zu transportieren und zu verteilen. Für die MS- und NS-Netze bedeutet das einen beherrschbaren Spannungsabfall und gleichzeitig einen abnehmenden Strom auf dem Weg von der Quelle bis zum Verbraucher. Die Quelle bezeichnet in diesem Fall den Transformator im Umspannwerk.

Aufgrund der eindeutigen Energieflussrichtung lassen sich die relevanten Größen, vornehmlich Stromstärke und Spannung, in Abhängigkeit der Lastsituation für jeden Knoten im Netz relativ leicht berechnen. Die aus heutiger Sicht historische Netzzustandsüberwachung musste lediglich folgende Anforderungen gewährleisten:

- Regelung der Spannung an der Quelle auf einen festen Wert
- Einhaltung der maximalen Betriebsmittelauslastung

Durch die Energiewende kommt es in Zukunft und teilweise auch schon heute zu immer häufigeren bidirektionalen Energieflüssen. Diese sorgen dafür, dass die Netze nicht mehr mit gleichen einfachen Mitteln berechnet und dimensioniert werden können, wie es früher der Fall war, und erfordert einen höheren Planungsaufwand und eine veränderte Netzzustandsüberwachung.

Insbesondere in ländlichen Netzen kann es aufgrund der Einspeisung von DEA (viel Wind, viel Sonne und kaum Verbrauch) an bestimmten Stellen zu Spannungsbandverletzungen und Betriebsmittelüberlastungen kommen. Für diese wenigen Extremsituationen ist der konventionelle Netzausbau (i. d. R. Kabel mit höherem Querschnitt) in vielen Fällen unwirtschaftlich. Um den konventionellen Netzausbau in solchen Fällen zu vermeiden, sind eine Reihe von innovativen Technologien (darunter auch innovative Betriebsmittel) einsetzbar, die es ermöglichen, auch im Rahmen der neuen Herausforderung (bidirektionale Lastflüsse, DEA, neuartige Verbraucher) für MS- und NS-Netze die Spannungshaltung im

zulässigen Band zu gewährleisten und die Betriebsmittelauslastungen auf tolerierbare Höchstmaße zu begrenzen. Im Folgenden wird eine kurze Übersicht über die innovativen Technologien/Betriebsmittel gegeben, die zukünftig eine voraussichtlich bedeutende Rolle bei der Netzzustandsüberwachung und damit der Netzbetriebsführung einnehmen werden [28]:

- Regelbarer Ortsnetztransformator (rONT)
- Einzelstrangregler (ESR)
- Optimierte Spannungsregelung am Umspannwerk
- Netzdienlicher Energiespeicher
- Dezentrales Netzautomatisierungssystem (DNA)
- Blindleistungsmanagement (BLM)
- Statisches Einspeisemanagement (SEM)
- Dynamisches Einspeisemanagement (DEM)
- Regionaler Flexibilitätsmarkt

Diese Technologien/Betriebsmittel sind sehr vielseitig und wirken basierend auf der Kenntnis von kritischen Netzzuständen, welche über geeignete Sensorik (Spannungs- und Stromsensoren) erlangt werden kann. Zum anderen ist neben dieser Überwachung für die Beseitigung eines kritischen Netzzustands eine geeignete Eingriffsmöglichkeit in Form von Aktorik notwendig. Darüber hinaus stellt die IKT-Ebene die notwendige Schnittstelle (z. B. BPL-Kommunikation) dar. Durch die innovativen Technologien, die zusätzliche Intelligenz in Form von IKT, Sensorik und Aktorik in Verteilungsnetzen schaffen, wachsen die Möglichkeiten zu Eingriffen an. Durch den steigenden Anteil von DEA sind diese in einem solchen zu erwartenden Szenario langfristig erforderlich, um die Systemdienstleistungen zu erbringen. Die Frequenzhaltung (Wirkleistungsregelung im Verbundnetz), die aktuell im Wesentlichen durch Großkraftwerke realisiert wird und zukünftig auch durch DEA in Verteilungsnetzen getragen werden muss, um die Energiewende erfolgreich zu vollziehen, ist als Beispiel zu nennen. Damit wird ein Verteilungsnetzbetreiber die Möglichkeiten auch für sein Last- und Verbrauchsmanagement erheblich erweitern können und müssen. Dazu sind neue innovative Technologien (IKT, Sensorik, Aktorik, Intelligenz) in Verteilungsnetzen maßgeblich. Beispielsweise werden mit der Etablierung eines regionalen Flexibilitätsmarkts ganz neue Möglichkeiten für das Last- und Verbrauchsmanagement eröffnet.

Da die MS- und NS-Ebene historisch bedingt kaum mit der dazu erforderlichen Sensorik (Spannungs- und Stromsensoren) und IKT durchdrungen sind, ist der Integration von Messsensorik in die BPL-Technologie daher ein hoher Mehrwert zuzuschreiben. Auf diese Weise kann die BPL-Technologie als Kommunikationstechnologie im MS- und NS-Netz nicht nur die IKT-Ebene realisieren, sondern nach den Fortschritten dieses Projekts auch die erforderliche Messsensorik (zumindest teilweise) bereitstellen und somit ein zentraler

Zuspieler für die Aktorik und Regelungssysteme der innovativen Technologien/Betriebsmittel in zukünftigen Netzen sein.

2.1.7.2 Leistungsbeschreibung neues Zustandsüberwachungssystem

Aus der Rolle der Netzzustandsüberwachung resultieren unmittelbar die Leistungsanforderungen, die an ein neues Zustandsüberwachungssystem gestellt werden. Spannungsbandverletzungen könnten mit zusätzlicher Messsensorik festgestellt und an die Leitstelle gemeldet werden. Dies wäre technisch voraussichtlich problemlos umsetzbar. Bei der Entscheidungshilfe, ob ein Betriebsmittel stark ausgelastet bzw. überlastet ist, kann in der MS-Ebene ebenfalls die zusätzliche Messsensorik genutzt werden. Zudem könnten über den in AP 2 festgestellten Zusammenhang zwischen der Temperatur und den Übertragungseigenschaften von Kabeln Rückschlüsse auf hohe Auslastungen durch die BPL-Datenübertragungseigenschaften gezogen werden. Ist ein Betriebsmittel bereits unplanmäßig außer Betrieb, könnten die Daten der BPL-Kommunikation im Hinblick auf die Detektionsfähigkeiten von Schaltzuständen genutzt werden, um den Fehler grob zu orten. Bei einem drohenden Ausfall eines Betriebsmittels – wenn Ausfälle erst wenige Stunden vor ihrem Eintreten vorsehbar sein sollten, wäre diese Kenntnis für die Netzzustandsüberwachung entscheidend, damit diese sofort handeln kann und eine Versorgungsunterbrechung durch Schutzauslösung vermieden wird. Bei längeren Zeithorizonten ist das Asset-Management (siehe AP 7) zuständig, da nicht kurzfristig ein Ausfall droht und der Normalbetrieb für eine ausreichend lange Zeit möglich ist, um Instandhaltungs- oder Erneuerungsarbeiten sorgfältig zu planen und durchzuführen.

2.1.7.3 Schnittstellen

Das neue Netzzustandsüberwachungssystem stellt ein neues System der Netzbetriebsführung dar und hat die Aufgabe, die BPL- und Sensordaten einzusammeln, zu verarbeiten, zu archivieren und mit den übrigen System über geeignete Schnittstellen, die hier nur rein prinzipiell dargestellt werden können, zu interagieren. Bei der Energieversorgung Leverkusen GmbH & Co. KG bspw. liegen gegenwärtig vier Systeme vor, die zur Netzbetriebsführung genutzt werden:

- Betriebsmitteldatenbank/Betriebsmittelinformationssystem (BIS)
- Netzleitsystem (NLS) auf der Leitstelle
- Netzberechnungssystem
- Geografisches Informationssystem (GIS)

Eines dieser vier ist das führende System. Daher sollte es prinzipiell genügen, eine Schnittstelle vom neuen Netzzustandsüberwachungssystem zum führenden System herzustellen, da die weiteren Schnittstellen vom führenden System zu den anderen Systemen in der Regel schon vorhanden sind. Dies kann auf einem zentralen oder mehreren

dezentralen Rechenservern realisiert werden. Denkbar ist zudem, dass ein DNA-System vorhanden ist, das ebenfalls als Akteur im Netz eine Rolle spielt und bei der Schnittstellendefinition berücksichtigt werden sollte, damit nicht zwei Systeme, mit sich teilweise überschneidendem Funktionsumfang, parallel und ggf. sogar kontraproduktiv agieren, sondern sich sinnvoll ergänzen. Die folgende Abbildung 10 skizziert mögliche Schnittstellen und Interaktionen.

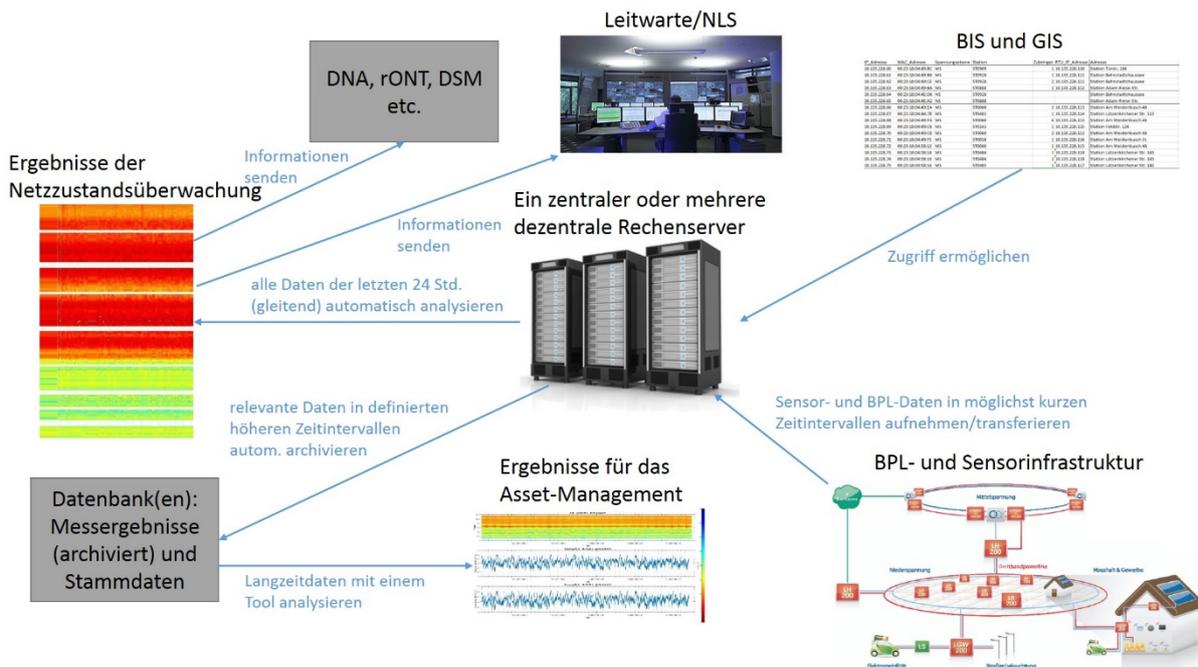


Abbildung 10: Skizze der Schnittstellen und Einbindung eines Zustandsüberwachungssystems

2.1.8 Arbeitspaket 7: Einbindung der erfassten Netzzustände in das Asset-Management

Im Asset-Management werden die Anlagen im Netz verwaltet und für diese z. B. eine Ausbauplanung oder Instandhaltungsstrategien vorgegeben. In diesem AP wird beschrieben, wie das Asset-Management hinsichtlich Instandhaltung und Ausbau der Netze mit einer Zustandserfassung basierend auf der BPL-Kommunikation optimiert werden könnte.

2.1.8.1 Instandhaltungsoptimierung

Als Instandhaltungsstrategien wird zwischen den nachfolgenden unterschieden:

- Ereignisorientierte Instandhaltung
- Zeitorientierte Instandhaltung
- Zustandsorientierte Instandhaltung
- Zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung
- Risikoorientierte Instandhaltung

Neben der zustandsorientierten basieren auch die zuverlässigkeits- und risikoorientierten Instandhaltungsstrategien auf einer Zustandsbewertung. Die Auswahl einer Strategie hängt von verschiedenen Randbedingungen ab. Als Ergebnis werden die meisten Betriebsmittel (z. B. Stationen oder Kabelverteilerschränke) der zeit- oder zustandsorientierten Instandhaltung zugeordnet. Für erdverlegte Betriebsmittel wie Kabel gestaltet sich die Erfassung des Zustands jedoch schwierig. Visuelle Inspektionen sind nicht möglich und aufwändige Zustandsermittlungen mit Messtechnik werden nur selten durchgeführt. Deshalb wird bei Kabeln sehr oft die ereignisorientierte Instandhaltung umgesetzt.

Mit der Zustandserfassung anhand der BPL-Kommunikation kann eine zustands-, zuverlässigkeits- oder risikobasierte Instandhaltungsstrategie auch bei Kabeln umgesetzt, d. h. mit realen Messdaten hinterlegt werden. Eine neuartige Strategie ergibt sich daraus zwar nicht, bisher wurden diese Strategien jedoch bei Kabeln meist entweder nicht angewandt oder die Bewertung des Zustands erfolgte häufig nur anhand von Stammdaten und Störungshistorien. Dabei wird der Ist-Zustand auf Basis von korrelierten Annahmen bewertet. Eine durch BPL-Daten ergänzte Zustandsbewertung liefert durch die Datenbasis in Form realer Messdaten realitätsgerechte Zustandsdaten und verhilft damit zu fundierten Entscheidungen. Durch die BPL-Zustandserfassung wird zudem kontinuierlich der Zustand der Kabel erfasst.

Da davon auszugehen ist, dass zumindest nicht alle Kabelstrecken mit der BPL-Kommunikation und folglich dem neuen Netzzustandsüberwachungssystem erschlossen werden, können die Erkenntnisse gemessener Kabelstrecken auf vergleichbare andere Kabelstrecken ausgedehnt werden. Dazu könnten die Kabelstrecken in mehrere Cluster mit gleichartigen Eigenschaften eingeteilt werden. Unterscheidungskriterien wären zum Beispiel die Betriebsbelastung, das Alter und die Technologie. Damit wären Rückschlüsse von vielen gemessenen Kabeln auf viele weitere ähnliche möglich – d. h. eine Übertragung der Messergebnisse auf gleichwertige nicht überwachte Kabel. Auf diese Weise ist also prinzipiell auch eine verbesserte Zustandsbewertung vieler Kabel denkbar, die nicht selbst gemessen und überwacht werden.

2.1.8.2 Ausbauoptimierung

Durch die Analyse von Sensordaten können Netzgebiete bzw. Kabelstrecken ermittelt werden, in denen ein Netzausbau wegen häufiger Spannungsbandverletzungen oder wenig Kapazitätsreserven hinsichtlich der Strombelastbarkeit notwendig wird. Diese Erkenntnis ist sonst nur durch Netz(-über-)planungen einschließlich Lastflussberechnungen zu gewinnen und könnte auf diese Weise auch mit realen Messdaten hinterlegt werden.

Die unmittelbare Folge zustandsbasierter Instandhaltungsstrategien, die durch die Analyse von BPL-Daten sinnvoll ermöglicht werden, ist die Optimierung des Netzausbaus. Aus den

Zustandsbewertungen können technische Nutzungsvorräte von Kabelstrecken bestimmt und gezielt genutzt werden, um Investitionen zu verschieben und den optimalen Investitionszeitpunkt zu finden. Bisher wird bei ereignisorientierten Strategien korrektiv (zu spät) gehandelt. Es kommt zu einer Versorgungsunterbrechung und das betroffene Betriebsmittel ist bereits ausgefallen. Bei zeitorientierten Strategien wird eine gewisse Alterung vorausgesetzt, ohne den tatsächlichen Zustand zu kennen, weshalb womöglich viel zu früh gehandelt wird. In beiden Fällen ist die Bewirtschaftung daher suboptimal.

Die kombinatorische Analyse von Sensor- und BPL-Daten ermöglicht darüber hinaus prinzipiell die Analyse eines potentiell notwendigen Netzausbaus aus zwei Perspektiven:

- mangelnde Kapazitätsreserven (z.B. wegen dezentraler Energieerzeugungsanlagen)
- schlechter Zustand

Auf diese Weise kann weiteres Optimierungspotential geschöpft werden, wenn bspw. wegen des DEA-Zubaus inzwischen hoch belastete Kabelstrecken getauscht werden, wenn sie gleichsam in schlechtem Zustand sind. Ist ihr Zustand einwandfrei, ist vielleicht der Einsatz eines innovativen Betriebsmittels die bessere Lösung. Somit wären differenzierte Vorgehensweisen und Strategien beim Netzausbau umsetzbar.

2.1.9 Arbeitspaket 8: Laborversuche zur Zustandsanalyse von Kabeln, Muffen, Garnituren

In AP 8 wurden die Laborversuche hinsichtlich der Zustände von Kabeln (lokale Fehlstellen, TE, globale Alterung) im Hinblick auf die Ergebnisse, die in Tabelle 2-4 festgehalten wurden, konzipiert und durchgeführt sowie Verbesserungspotentiale für weitere Untersuchungen aufgezeigt.

Die Untersuchung der operativen Netzzustände wurde in AP 8 insofern zusätzlich berücksichtigt, dass das Temperaturverhalten der Übertragungseigenschaften von Kabeln untersucht wurde. An dieser Stelle sei noch vorweg genommen, dass bei Laborversuchen, bei denen variable Stromstärken oder Spannungen eingesetzt wurden, kein messbarer Einfluss auf die Übertragungseigenschaften von Kabeln durch diese beiden Parameter festzustellen war. Dies bestätigt die Ausführungen in Kapitel 2.1.3.2.3. Ebenfalls waren Mantelschäden wie zu erwarten (siehe Kapitel 2.1.3.2.2.4) in keiner Weise detektierbar. Des Weiteren wurde der Einfluss von Schaltzuständen im Zusammenhang mit Topologieänderungen im Labor nicht untersucht, da keine realistischen Topologien im Labor reproduziert werden können. Für diesen Zustand beschränkten sich die Untersuchungen auf den Feldtest, der in AP 9 (Kapitel 2.1.10) durchgeführt wurde.

2.1.9.1 Konzeption von Versuchsständen

Für die unterschiedlichen durchzuführenden Messungen wurden mehrere Versuchsstände konzipiert. Die unterschiedlichen Versuchsstände dienten einerseits dazu, den Einfluss globaler Alterung, lokaler Fehlstellen, TE sowie den Einfluss einer erhöhten Temperatur (z. B. durch Strombelastung) bei Kabeln hinsichtlich der Auswirkungen auf die Übertragungseigenschaften zu messen, und andererseits der Konditionierung der Kabel, d. h. um Zustände künstlich herzustellen. Im Folgenden werden die aufgebauten Versuchsstände sowie die damit verfolgten Ziele erläutert:

Versuchsstand „TDR“: Mit Hilfe von eigens hergestellten Adaptern wurden übliche Labormessleitungen (BNC 50 Ohm) mit einem Energiekabel verbunden. Bei einadrigen Kabeln wurden Innenleiter und Schirm darüber kontaktiert, sodass eine Verbindung zwischen Messsystem und Kabelprüfling hergestellt werden konnte. Unter Verwendung eines Funktionsgenerators/Impulsgenerators und eines Oszilloskops konnte somit ein Reflektogramm (TDR: time domain reflectometry) aufgezeichnet werden. Bei dreiadrigen Kabeln wurde nur eine Ader für den Anschluss an das Messsystem genutzt. Da diese Kabel eine symmetrische Geometrie aufweisen, reichten Messungen an einer Ader aus. Aus einem Reflektogramm ließ sich mit Hilfe der Software MATLAB und angepasster Algorithmen die Wellenimpedanz, die Ausbreitungsgeschwindigkeit und die Dämpfung eines Energiekabels bestimmen. Weiterhin waren Reflexionen an Störstellen erkennbar, sofern sie einen ausreichend hohen Reflexionsfaktor aufwiesen. Dieser Versuchsstand diente der Messung der globalen Alterung, den Einflüssen der Temperatur sowie von Reflexionen an lokalen Fehlstellen im Zeitbereich an entsprechend konditionierten Kabelprüflingen. In der Literatur ist dieses Verfahren beschrieben [29]. Ein alternatives, ebenfalls recherchiertes und in diesem Projekt angewandtes Verfahren arbeitet nicht im Zeit-, sondern im Frequenzbereich (siehe Versuchsstand „VNA“).

Versuchsstand „VNA“: Hier wurden ebenfalls eigens hergestellte Adapter verwendet, um die Energiekabel mit den Messleitungen (N 50 Ohm) zu verbinden. Der Aufbau ist vergleichbar mit dem Versuchsstand „TDR“. Hier erfolgten Messungen der S-Parameter eines Kabels im Frequenzbereich mittels eines Vektor-Netzwerk-Analysators (VNA). Mit Hilfe von MATLAB konnten die Eigenschaften der Energiekabel aus den S-Parametern isoliert und bestimmt werden. Dieser Versuchsstand war als alternatives Messverfahren zur „TDR“ anzusehen. Die Verfahren weisen jeweils andere Vor- und Nachteile auf, z. B. bei der Genauigkeit, der Auflösung des Frequenzspektrums oder der Zeitskalierung. In der Literatur ist dieses Verfahren ebenfalls ausführlich beschrieben [30].

Versuchsstand „Erwärmung im Klimaschrank“: Um die Einflüsse von Temperatur und thermischer Alterung untersuchen zu können, wurden kunststoffisolierte einadrige

Kabelprüflinge mit einer definierten Länge von 13 m (Kompromiss aus Handhabbarkeit und Messgenauigkeit) in einem Klimaschrank temperiert. Messleitungen konnten in den Klimaschrank hineingeführt werden, um ein vorzeitiges Abkühlen der Prüflinge zu verhindern. Dieser Versuchstand diente der Konditionierung der Kabel, nicht der eigentlichen Messung. Um Probleme bei der Adaption einadriger Kabel und damit der Messgenauigkeit zu vermeiden, können diese nicht über einen Stromtransformator erwärmt werden. Die Konfektion des Kabelendes für die korrekte Messung der Übertragungseigenschaften ist völlig verschieden zu der Konfektion für den korrekten Anschluss an den Stromtransformator. Im Gegensatz zum Versuchsstand „Erwärmung mittels Stromtransformator“ wurde hier die Wärme von außen dem Kabel zugeführt.

Versuchsstand „Erwärmung mittels Stromtransformator“:

Dreiadrige Papier-Masse-isolierte Kabel wurden zur Alterung sowie für die Variation der Temperatur über einen Stromtransformator erwärmt. Zwei Adern wurden vom Strom durchflossen, um das Kabel zu temperieren. Die dritte Ader wurde für die Messung der Übertragungseigenschaften konfektioniert. Auf diese Weise existierten die Probleme bei der Adaption des Prüflings hinsichtlich späterer Messungen im Gegensatz zu einadrigen Kabeln nicht.

Versuchsstand „TE“: Hier wurden in einem Prüfkreis unter Verwendung von Hochspannung verschiedenartige TE mit unterschiedlichen Intensitäten an definierten Stellen erzeugt. Dabei wurde insbesondere der direkte Einfluss von TE auf eine BPL-Kommunikation zweier Modems untersucht, indem die TE mit Hilfe eines kapazitiven BPL-Kopplers auf den Übertragungsweg der BPL-Modems eingekoppelt wurden und als Störsignale/Rauschen wirkten. Parallel wurden die TE-Pattern mit einem konventionellen TE-Messgerät aufgezeichnet. Es sei anzumerken, dass die kapazitiven BPL-Koppler relative ähnliche Eigenschaften wie der Verbund aus Koppelkondensator und Ankopplungsvierpol des konventionellen TE-Messprüfkreises aufweist, weshalb er hier für beide Messungen eingesetzt werden konnte.

2.1.9.2 Fehlstellen- und Störszenarienkonzeption und Auswahl verschiedener Kabel

Als Kabelprüflinge wurden neue MS-Kabel zur Verfügung gestellt – sowohl VPE- (durch die Nexans Power Accessories Germany GmbH) als auch Papier-Masse-isolierte Kabel (durch die Energieversorgung Leverkusen GmbH & Co. KG):

- NA2XSY: Isolierung: VPE, Nennspannung: 10 kV, Querschnitt: 150 mm², Länge: 13 m
- NKBA, Isolierung: Papier-Masse, Nennspannung: 10 kV, Querschnitt: 35 mm², Länge: 20 m

Die Zustände wurden in die Kabel in Form von lokalen Fehlstellen, globaler Alterung und Temperatur ausschließlich künstlich eingebracht (Konditionierung der Kabel). Folgende Untersuchungen wurden durchgeführt:

- Messung der Übertragungseigenschaften vor und nach Alterung
- Messung der Übertragungseigenschaften bei verschiedenen Temperaturen
- Messung der Reflexionen von verschiedenen lokalen Fehlstellen (Bohrungen, Eindringen von Fremdkörpern, Quetschungen, sukzessives Durchtrennen der Schirmdrähte von VPE-Kabeln)
- Messung des Einflusses von TE auf eine BPL-Datenübertragung

2.1.9.3 Durchführung der geplanten Laboruntersuchungen an einzelnen Kabeln und Auswertung der Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der durchgeführten Laboruntersuchungen im Hinblick auf die verschiedenen Zustände dargestellt

2.1.9.3.1 Globale Alterung

2.1.9.3.1.1 VPE-Kabel

Die Alterung von VPE-Kabeln wurde als Konditionierungsmaßnahme bei der maximal zulässigen Betriebstemperatur von 90 °C im Versuchsstand „Erwärmung im Klimaschrank“ durchgeführt. Dies stellt die maximale Betriebstemperatur dieses Kabeltyps dar. Messungen erfolgten im Rahmen der Untersuchung der Alterungseffekte immer erst nach Abkühlen auf Raumtemperatur. Die folgende Abbildung 11 zeigt den Verlauf der Dämpfung für verschiedene Alterungsstufen, wie er im Versuchsstand „TDR“ ermittelt wurde.

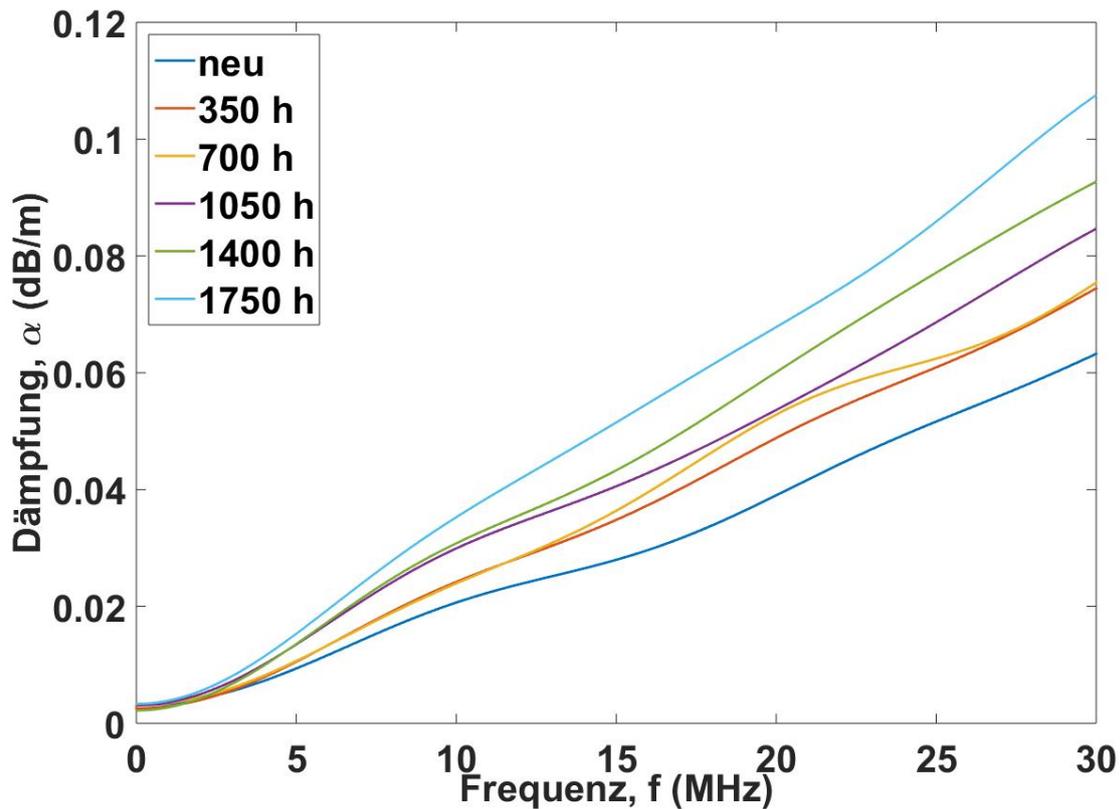


Abbildung 11: Längenbezogene Dämpfung eines thermisch gealterten VPE-Kabels

Es zeichnet sich ein Trend zur Dämpfungszunahme bei fortschreitender thermischer Alterung des Dielektrikums ab. Bereits eine Dämpfungszunahme von 0,01 dB/m bedeutet bei einer im realen Netz nicht unüblichen Länge von 300 m eine Dämpfung von 3 dB. Dies entspricht bereits einer Halbierung der empfangenen Leistung.

2.1.9.3.1.2 Papier-Masse-Kabel

Die Alterung von Papier-Masse-Kabeln wurde hinsichtlich der Masseverarmung untersucht. Dazu wurde der Versuchsstand „Erwärmung mittels Stromtransformator“ verwendet. Nach 80 h waren auf einem ca. 20 m langen homogenen Kabel ca. 2 Liter Masse ausgetreten. Der Masseausfluss stagnierte von da an. Abbildung 12 zeigt den Einfluss auf die Dämpfung. Abweichend von den Untersuchungen an VPE-Kabeln, hat sich hier die Alterung als dämpfungsmindernd erwiesen. Das gemischte Dielektrikum aus Papier und Masse unterliegt bei Masseverlust einer Veränderung der hier wirksamen dielektrischen Eigenschaften.

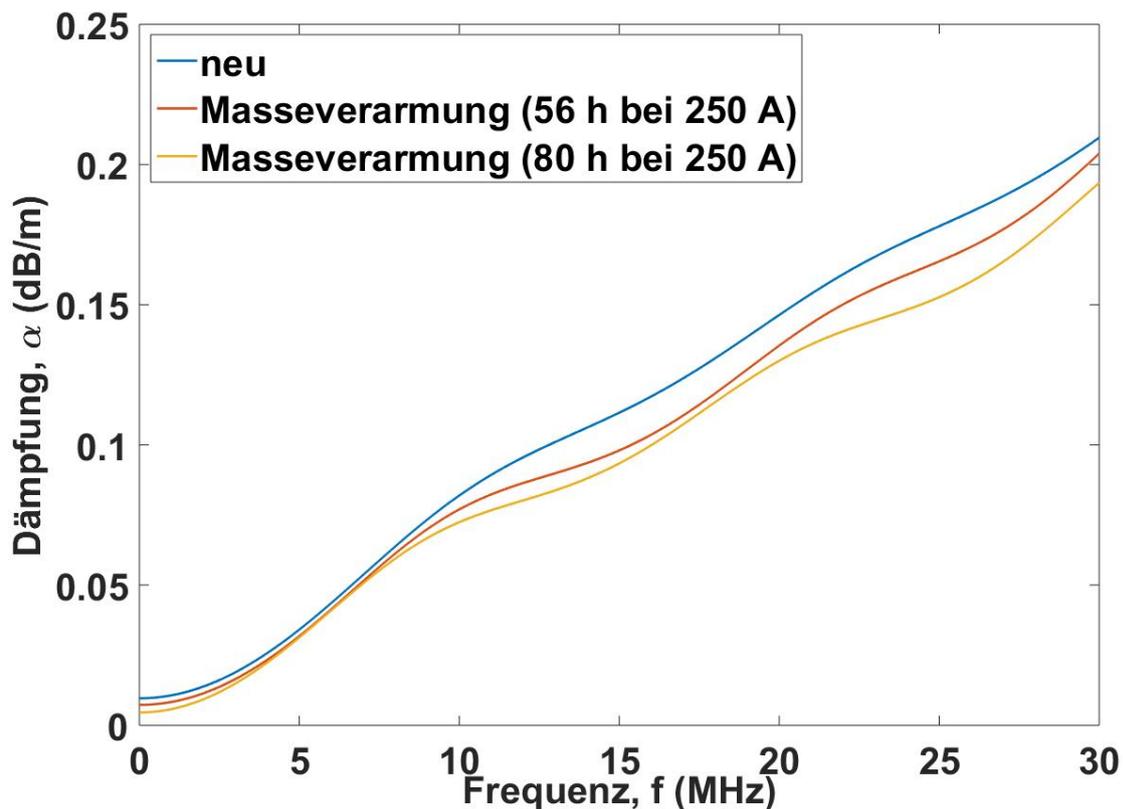


Abbildung 12: Längenbezogene Dämpfung eines Papier-Masse-Kabels mit Masseverarmung

Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass dies sich ebenfalls in einer Verringerung der Kapazität um ca. 10 % äußert. Damit einhergehend hat sich die Phasengeschwindigkeit erhöht.

2.1.9.3.2 Temperatur

2.1.9.3.2.1 VPE-Kabel

Die Messungen fanden analog zu den Alterungsversuchen statt, Dabei befanden sich die Kabel jedoch in einem temperierten Zustand. Während der Erwärmung zur Untersuchung des Temperatureinflusses findet zwangsläufig Alterung statt. Im Rahmen der Erwärmungsversuche wurde eine Dämpfungszunahme festgestellt, die insbesondere bei den oberen BPL-Frequenzen angesiedelt ist. Nach der Abkühlung auf Raumtemperatur ist jedoch alterungsbedingt gegenüber dem Ursprungszustand eine Erhöhung wider Erwarten verblieben. Diese war bei neuen, nicht-gelalterten Kabeln nicht vernachlässigbar. Bei weiterer Alterung schwächt sich dieser Effekt jedoch ab. Nach weiteren Recherchen ist die wahrscheinlichste Ursache ein thermischer „Eingewöhnungseffekt“ der Leitschichten im Kabel, der sich insbesondere innerhalb der ersten Stunden thermischer Beanspruchung abspielt und dann an Wirkung verliert [31]. Folgende Abbildung 13 zeigt die Dämpfung an einem 700 h lang gelalterten Kabel bei 20 °C und bei 90 °C.

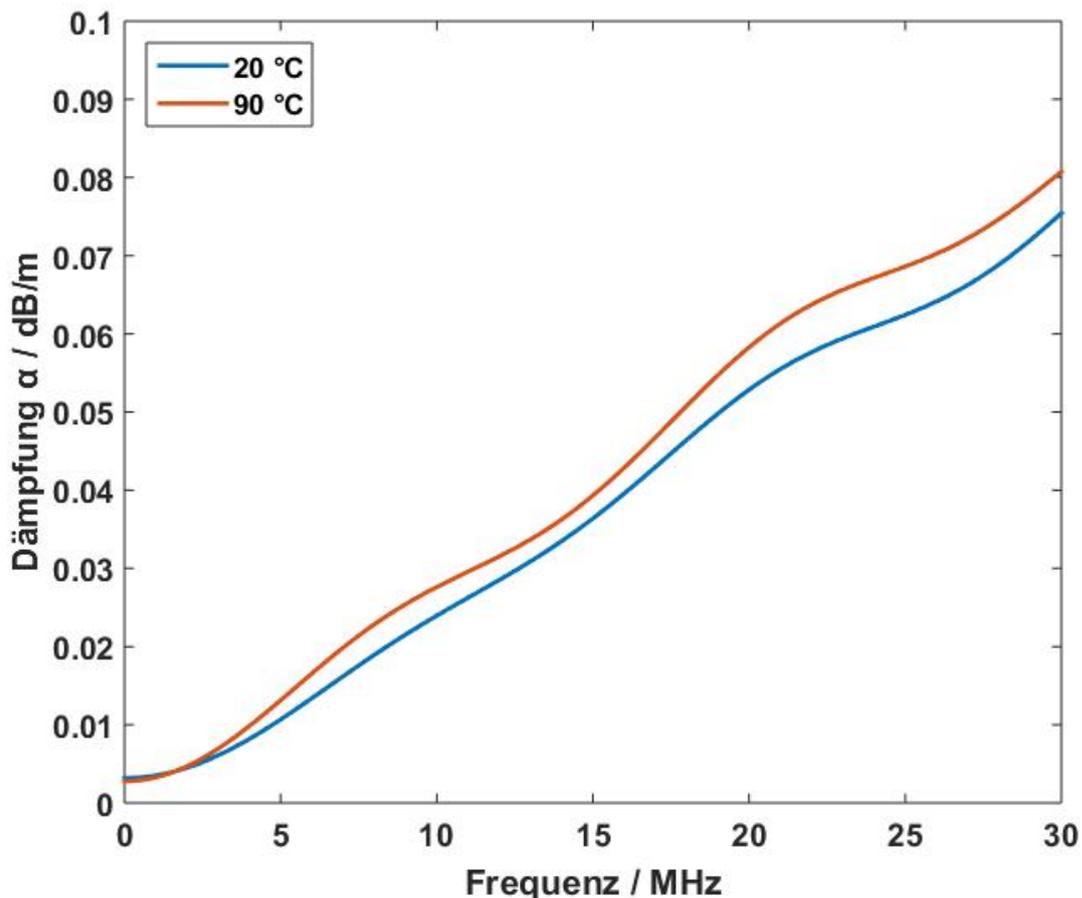


Abbildung 13: Längenbezogene Dämpfung eines temperierten VPE-Kabels, das 700 h gealtert ist

Die Dämpfungszunahme beträgt weniger als 0.01 dB pro Meter Kabel und ist bei den oberen BPL-Frequenzen stärker ausgeprägt. Temperatur und thermische Alterung können aufgrund des genannten Zusammenhangs nicht streng voneinander getrennt betrachtet werden. Die Tendenzen zur Dämpfungszunahme sind in beiden Fällen gleichartig vorhanden. In realen Netzen ist die Dämpfungszunahme durch thermische Alterung voraussichtlich anhand eines Langzeittrends von der Dämpfungszunahme durch Temperatur anhand eines Kurzzeittrends (Belastung, zyklischer Lastgang) ggf. unter Berücksichtigung einer Hysterese zu unterscheiden.

2.1.9.3.2.2 Papier-Masse-Kabel

Das Temperaturverhalten von Papier-Masse-Kabeln wurde ebenfalls untersucht. Dazu wurde der Versuchsstand „Erwärmung mittels Stromtransformator“ verwendet. Die Kabel wurden mit einer definierten Stromstärke über einen Zeitraum von 6 h temperiert. Anschließend erfolgten die Messungen der Dämpfung. Abbildung 14 zeigt den Einfluss verschiedener Stromstärken auf das Dämpfungsverhalten. Der thermische Grenzstrom liegt für dieses Kabel mit 35 mm² bei ca. 130 A.

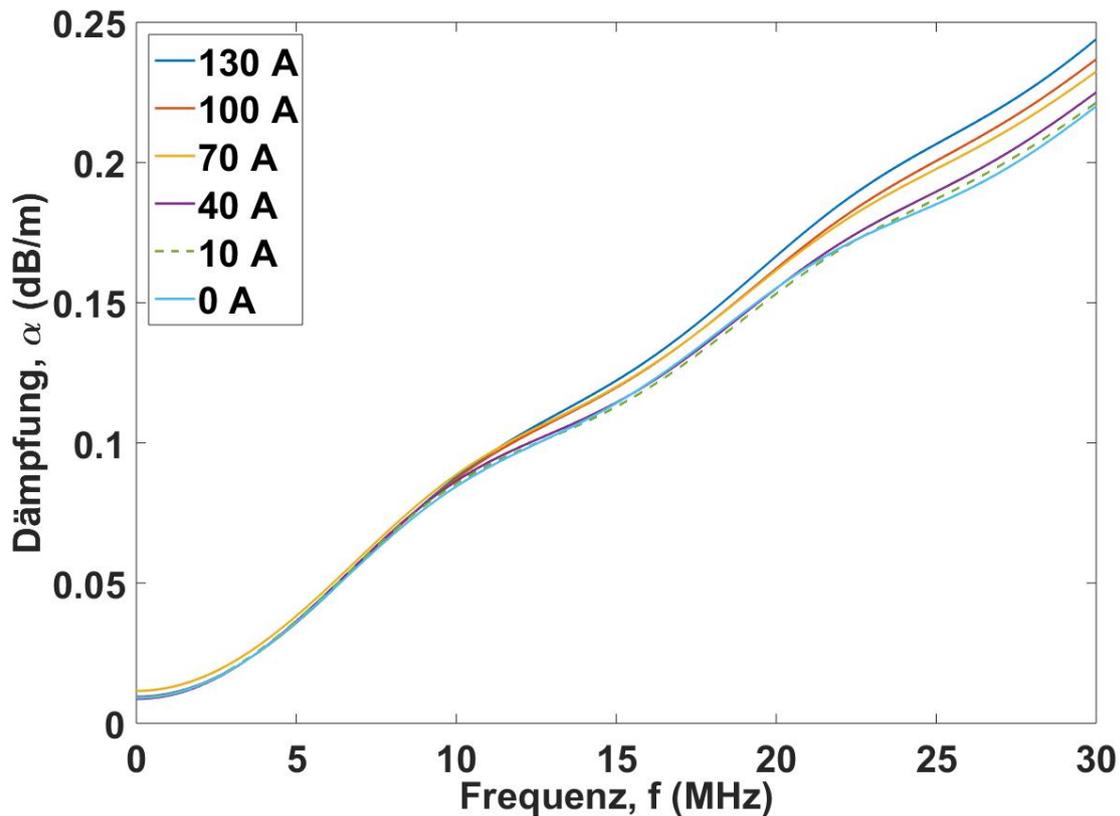


Abbildung 14: Längenbezogene Dämpfung eines Papier-Masse-Kabels mit unterschiedlichen Stromstärken

Damit ist das Temperaturverhalten vergleichbar zu demjenigen von VPE-Kabeln.

2.1.9.3.3 Lokale Fehlstellen

Im Versuchsstand „TDR“ wird für jede lokale Fehlstelle ein individuelles Reflektogramm erzeugt. Sofern eine Fehlstelle einen signifikanten Reflexionsfaktor aufweist kann dieser rechnerisch aus dem Reflektogramm ermittelt werden. Von den untersuchten Fehlstellen weisen lediglich sukzessive unterbrochene Schirmdrähte und Quetschungen messbare Reflexionen auf. Übrige Fehlstellen wie Bohrungen oder das Eindringen von Fremdkörpern waren nicht anhand eines Reflektogramm detektierbar. Da dieses Verfahren empfindlicher als die SNR-Messung der BPL-Kommunikation ist, können diese Zustände darüber ebenfalls nicht erkannt werden.

Die folgende Abbildung 15 zeigt das Reflektogramm für unterbrochene Schirmdrähte in einem VPE-Kabelprüfling:

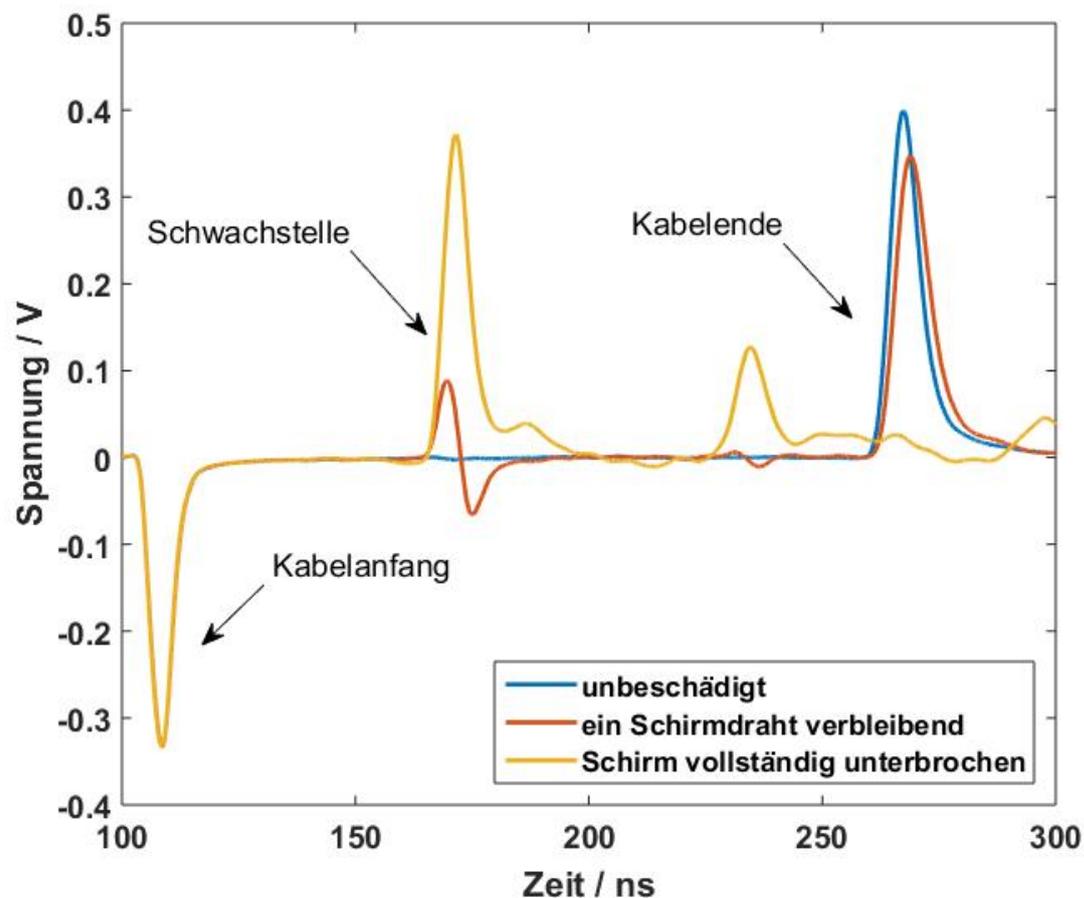


Abbildung 15: Reflektogramm eines VPE-Kabelprüflings mit 13 m Länge und unterbrochenen Schirmdrähten

Der Eingangsimpuls ist ausgeblendet. Die Reflexionen am Kabelanfang beruhen auf der Wellenimpedanzänderung zwischen der 50 Ohm Messleitung und des Kabelprüflings mit geringerer Wellenimpedanz. Eine lokale Fehlstelle zwischen Kabelanfang und -ende führt zu einer weiteren Reflexion. Selbst wenn nur einer der in diesem Fall insgesamt 42 Schirmdrähte eines VPE-Kabelprüflings verbleibt, bildet sich nur ein Reflexionsfaktor von 0,16 bei 30 MHz aus. Das lässt sich in eine sehr geringe Dämpfung des transmittierenden Signals von ca. 0,1 dB umrechnen. Je geringer die Frequenz, desto kleiner sind zudem diese Faktoren. Ein solcher Wert ist nur mit sensibler Messtechnik nachzuweisen.

Erst bei einem vollständig unterbrochenen Schirm, bildet sich eine massivere Reflexion aus. Diese ist sogar so stark ausgeprägt, dass aus dem Reflektogramm kein Reflexionsfaktor bestimmt werden kann. Ursache hierfür ist die im Algorithmus notwendige Quotientenbildung aus Fehlstellenreflexion und Reflexion am Kabelende, die in diesem Fall nicht möglich ist, da letztere zu sehr verzerrt wird und zu schwach ausgeprägt ist.

Nach weiterer Recherche konnte ermittelt werden, dass das Verhalten eines vollständig unterbrochenen Schirms einer Antenne ähnelt [32]. Es ergeben sich stark frequenzabhängige Reflexionen. Zudem werden nicht nur Signalanteile reflektiert und

transmittiert, sondern auch in erheblichem Maß in Form von Oberflächenwellen und Strahlung aus dem Kabelinneren herausgetragen. Mit Hilfe des VNA konnte an einem kurzen Kabelstück ohne Schirm ermittelt werden, dass eine Schirmunterbrechung je nach Frequenz eine Dämpfung ca. zwischen 2 und 15 dB hervorrufen kann. Abbildung 16 zeigt dazu gemessene S-Parameter.

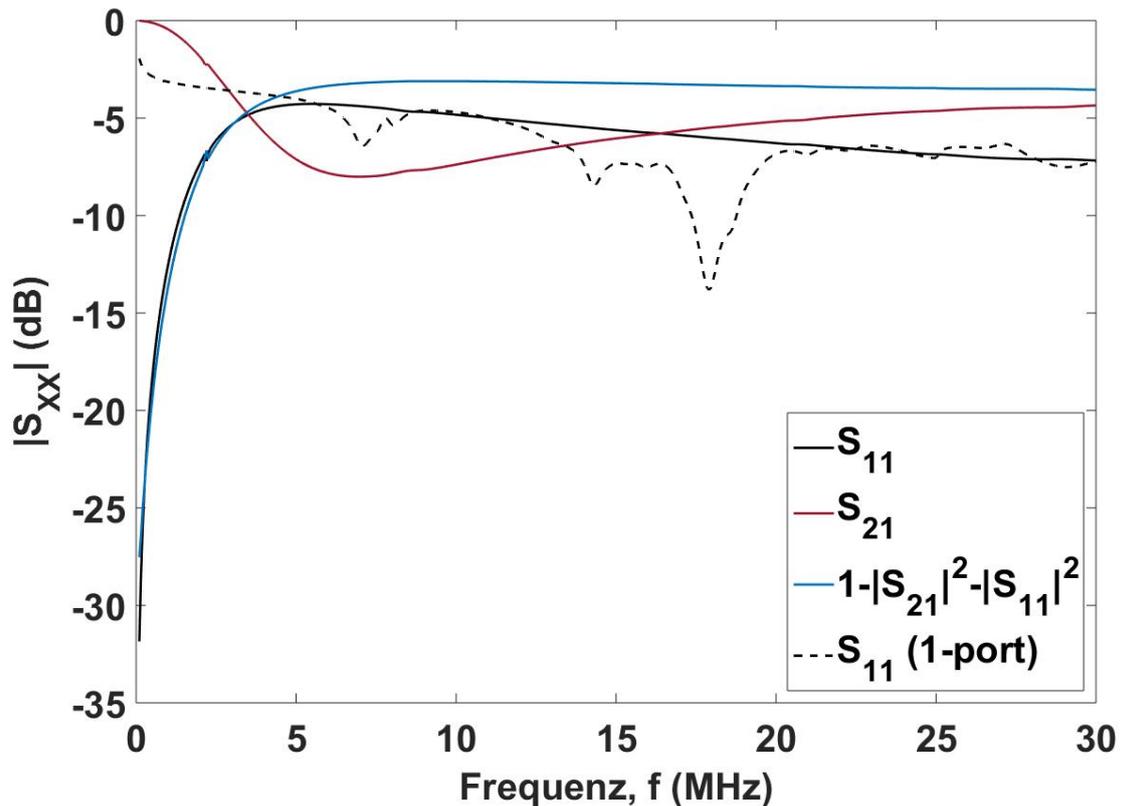


Abbildung 16: S-Parameter eines vollständig unterbrochenen Kabelschirms

S_{11} ist die Reflexion, S_{21} die Transmission. Der blaue Graph zeigt die Verlustleistung. Da unterbrochene Schirmdrähte erhebliche ohmsche Anteile in diese Anordnung einbringen, ist die Verlustleistung insbesondere bei höheren Frequenz hoch. Die (elektrischen) Massen der beiden Messports des VNA sind intern miteinander verbunden, weshalb es bei dieser Messung stets einen alternativen Strompfad für den Stromfluss, der eigentlich über den Schirm geführt werden müsste, gibt. Dies ist im Bereich nahe 0 MHz zu erkennen. Hier ist eine Abstrahlung bei dieser kleinen Anordnung unwahrscheinlich, d. h. es dürfte keine Leistung durch die Fehlstelle transmittieren. Dennoch ist S_{21} bei 0 dB ungedämpft. Daher wurde in einer zusätzlichen Messung der zweite Messport durch eine isolierte Abschlussimpedanz von ebenfalls 50 Ohm ersetzt. Mit nur einem Messport kann jedoch nur die Reflexion S_{11} gemessen werden. Hier ist zu erkennen (gestrichelte Linie), dass nennenswerte Anteile reflektiert werden, sich qualitativ jedoch anders verhalten.

Ein vollständig unterbrochener Schirm führt anders als ein Kurzschluss oder ein unterbrochener Innenleiter allein nicht unmittelbar zu einem Ausfall der betroffenen Kabelstrecke. Aufgrund von einhergehenden Feldinhomogenitäten kann jedoch langfristig ein Durchschlag der Isolation begünstigt werden. Des Weiteren ist die Fähigkeit des Schirms Erdschlussströme zu führen einseitig beschränkt. Eine vollständige Schirmunterbrechung ist zwar theoretisch gut mittels einer BPL-Kommunikation zu erfassen, stellt jedoch allein vermutlich keine häufige (wenn auch eine ernsthafte) Fehlstelle in realen Kabelstrecken dar.

Die folgende Abbildung 17 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt des Reflektogramms an einer sukzessiven Quetschung des Kabels über 2 cm Länge:

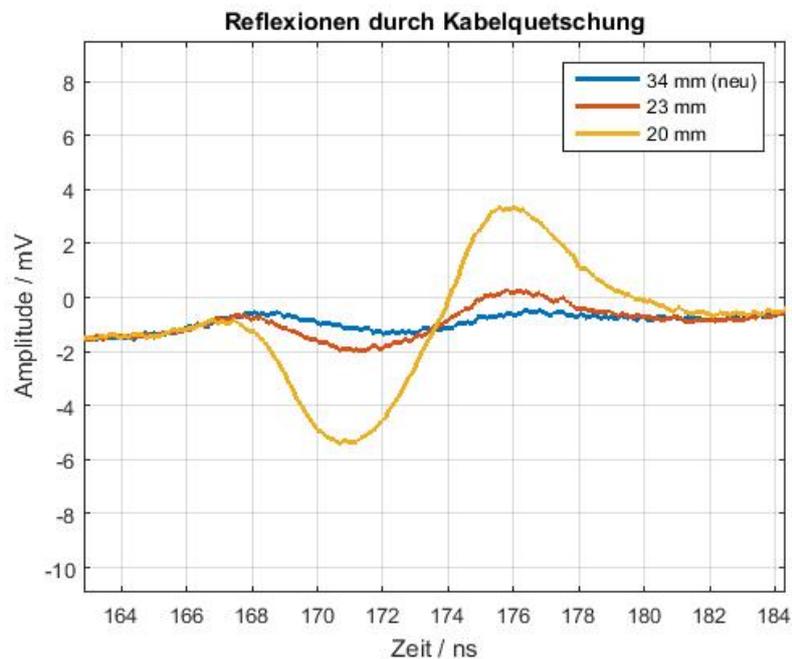


Abbildung 17: Reflektogramm (Ausschnitt) eines VPE-Kabelprüflings mit 13 m Länge und einer sukzessiven Quetschung über eine Länge von 2 cm

Im Vergleich zu unterbrochenen Schirmdrähten sind die Reflexionen deutlich schwächer. Die folgende Abbildung 18 zeigt die Ergebnisse der Auswertungen:

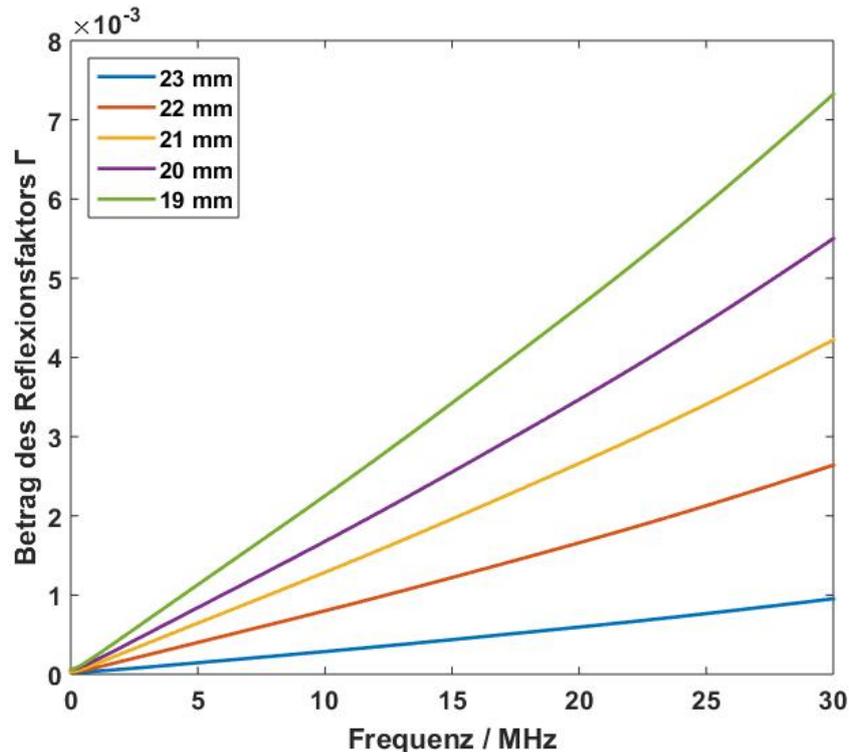


Abbildung 18: Reflexionsfaktor einer sukzessiven Quetschung

Selbst bei einer Quetschung des Kabelquerschnitts von 34 mm auf 19 mm über eine Länge von ca. 2 cm liegt der Reflexionsfaktor bei 30 MHz bei ca. 0,007. Das entspricht einer sehr geringen Dämpfung von ca. 0,0002 dB des transmittierenden Signals. Es besteht hier keine Möglichkeit, einen solch sensiblen Messwert in einem realen Netz zu erfassen und Rückschlüsse auf diese Fehlstelle zuzulassen.

Mittels TDR konnten unter Anwendung von Rauschunterdrückungsmaßnahmen selbst extrem geringe Reflexionen bestimmt werden, die im praktischen BPL-Betrieb keine Auswirkungen haben. Lediglich der vollständig unterbrochene Schirm ist hier vielversprechender. Alle anderen untersuchten Fehlstellen waren zudem selbst mittels TDR und angewandter Rauschunterdrückungsmaßnahmen zumindest im relevanten Frequenzbereich nicht detektierbar.

2.1.9.3.4 Teilentladungen

Im Gegensatz zu allen anderen Effekten, die insbesondere bei den oberen BPL-Frequenzen ausgeprägt sind, ist aufgrund des typischen Frequenzspektrums von TE der Einfluss eher bei den unteren Frequenzen vorhanden. Je nach Rauschpegel, sind TE entsprechender Stärke als zusätzliches Impulsrauschen erkennbar. Während die BPL-Modems für schwache TE mit Ladungen < 100 pC nahezu unempfindlich sind, üben stärkere TE einen sichtbaren Einfluss auf die Übertragungsrate der BPL-Kommunikation aus. Die folgende Abbildung 19

zeigt ein konventionell gemessenes TE-Pattern einer Kegelbohrung bei unterschiedlichen Prüfspannungen.

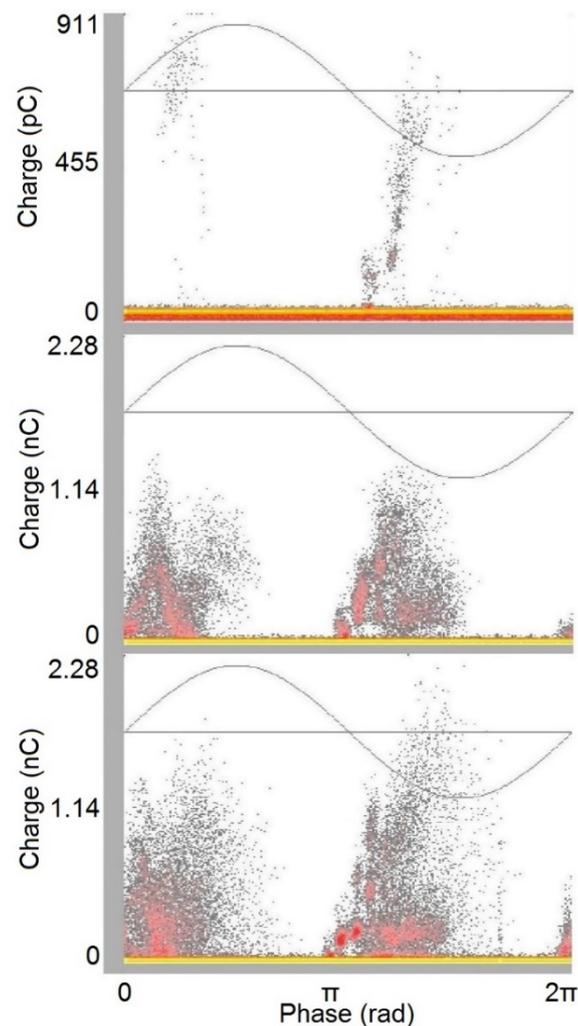


Abbildung 19: TE-Pattern einer Kegelbohrung in einem VPE-Kabel bei 9 kV, 12 kV und 15 kV

Die Prüfspannung diente bei diesen Versuchen auch dazu, die TE-Intensität zu variieren. Je höher die Prüfspannung ist, desto intensiver können die TE (höhere Ladung und häufigeres Einsetzen der TE-Impulse) werden. Tabelle 2-6 zeigt die zugehörigen Datenraten, die beim Einkoppeln der TE erzielt wurden.

Tabelle 2-6: Vergleich zwischen TE-Prüfspannung (bzw. TE-Pattern) und BPL-Datenrate

TE-Prüfspannung [kV]	BPL-Datenrate [Mbit/s]
0 (keine TE)	32,7
9 (schwache TE)	30,8
12 (mittlere TE)	25,6
15 (starke TE)	23,5

Die Datenrate steht in engen Zusammenhang mit dem SNR und dem Rauschpegel auf einer Datenübertragungsstrecke. Bei 0 kV herrscht Teilentladungsfreiheit, wogegen mit steigender

Prüfspannung respektive steigender TE-Intensität die Datenrate sinkt. Spektraluntersuchungen zeigen, dass die TE insbesondere im Frequenzbereich bis 10 MHz (bis ca. Träger 400) additiv störend auf die jeweiligen Träger des BPL-Empfängers wirken, sich jedoch auf darüber hinaus erstrecken können (vgl. Kapitel 2.1.3.2.2.3). Abbildung 20 verdeutlicht das Verhalten des SNR bei Einfluss mittlerer und starker TE.

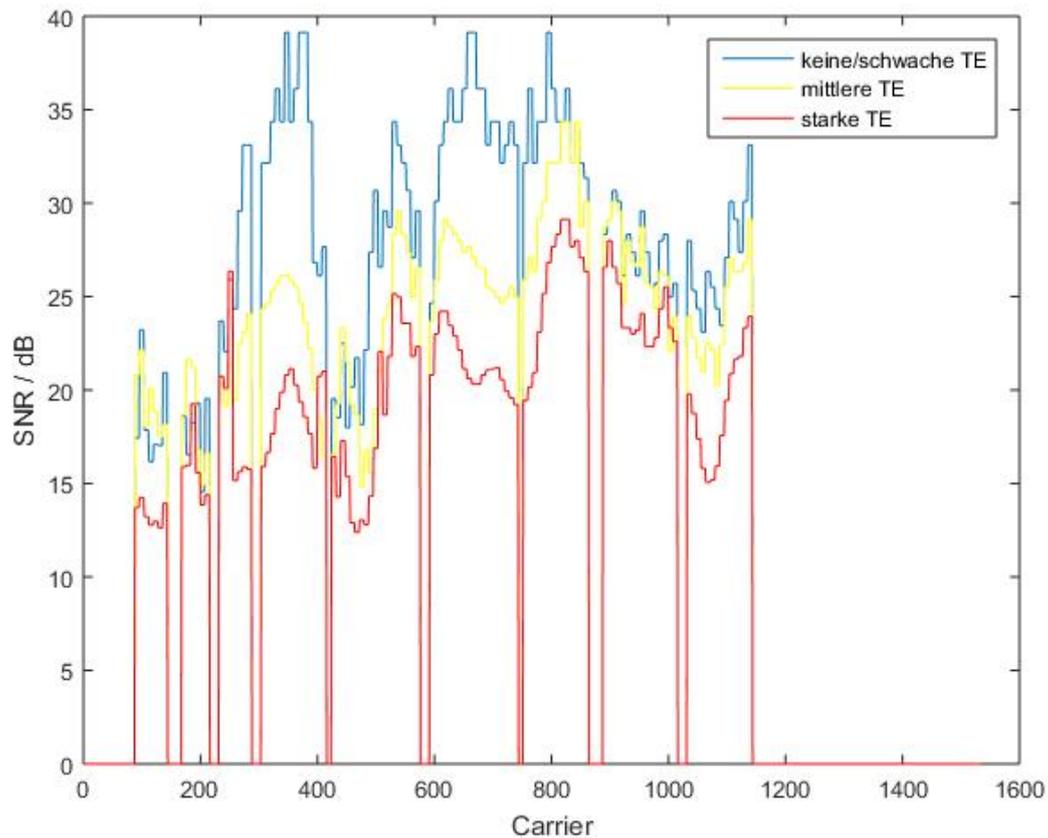


Abbildung 20: SNR-Messergebnisse unter dem Einfluss von TE

Die aus TE resultierende Rauschleistung nimmt mit der Impulsrate (Häufigkeit der TE-Impulse) und der Impulsamplitude (Ladung der TE-Impulse) zu. Die Beeinflussung einer BPL-Kommunikation ist nicht auf TE in Energiekabeln beschränkt. Auch andere Betriebsmittel, bspw. Komponenten einer MS-Schaltanlage, können eine Ursache und Entstehungsort für TE sein. Die Möglichkeit der für die TE-Diagnostik wichtigen Ortung besteht über die Analyse der BPL-Datenübertragungseigenschaften nicht. Im anstehenden Feldtest werden auf Basis der Erkenntnisse der Laboruntersuchungen vor allem die unteren Frequenzen der BPL-Kommunikation hinsichtlich Teilentladungsaktivitäten näher untersucht. Zudem werden Korrelationen zwischen Spannungswerten und SNR gesucht.

2.1.9.4 Aufzeigen von Verbesserungspotentialen

Das Thema Diagnostik und Alterungsverhalten von Kabeln ist ein sehr weites Feld mit vielen vergangenen und aktuellen Untersuchungen. Die Ausprägung unterschiedlicher Alterungsmechanismen und Fehlstellen kann entsprechend sehr umfangreich sein. Im Rahmen dieses Projekts war es daher nicht möglich, alle relevanten Alterungsmechanismen zu untersuchen. So könnte bspw. eine Untersuchung des Einflusses von water trees in VPE-Kabeln auf die BPL-Datenübertragungseigenschaften lohnenswert sein.

Ein Problem bei den Laboruntersuchungen ist die extrem unterschiedliche Adaption von Kabelenden je nach Anwendungsfall. Für sensible Hochfrequenzmessungen wie in den Versuchsständen „TDR“ und „VNA“ muss ein möglichst kleiner Adapter mit definierten Geometrien verwendet werden, um parasitäre Effekte des Adapters weitgehend zu eliminieren oder rechnerisch berücksichtigen zu können. Sind diese Effekte bekannt und gering genug, können Sie mittels Kalibrierung und Algorithmen bei der Auswertung (z. B. in MATLAB) berücksichtigt werden. Für die Aufprägung einer Hochspannung sind dagegen vergleichsweise sehr große Kabelendverschlüsse notwendig, die einen Durchschlag am Kabelende verhindern. Insbesondere die notwendige räumliche Trennung von Schirm und Innenleiter macht jede empfindliche hochfrequente Messung an einem Kabelendverschluss für anschließende Auswertungen unbrauchbar. Demzufolge waren die Untersuchungen an Garnituren wie Endverschlüsse eingeschränkt und nur am Versuchsstand „TE“ möglich.

Bei der Dämpfungsmessung hinsichtlich Alterung und Temperatur besteht das Problem, lange Kabel nur schwierig zu transportieren und insbesondere zu konditionieren sind. Zu kurze Kabel weisen dagegen nur eine extrem geringe Dämpfung im relevanten Frequenzbereich auf – wegen der natürlichen Tiefpass-Eigenschaften insbesondere im unteren BPL-Frequenzbereich. Es musste daher ein Kompromiss aus Handhabbarkeit und Messgenauigkeit gefunden werden.

2.1.10 Arbeitspaket 9: Demonstrationsaufbau und Feldtests

Das Ziel von Arbeitspaket 9 war, die im Laufe des Projekts entwickelten Hardware und Ideen in einem Feldtest zusammenzuführen und umzusetzen. Zunächst erfolgt eine Beschreibung der ausgewählten Modellregionen sowie des Aufbaus und der Inbetriebnahme der BPL-Infrastruktur und der Sensorik. Es folgt eine Beschreibung der Verarbeitung und Auswertung der Messwerte. Abschließend werden in diesem Kapitel alle Ergebnisse und Erkenntnisse des Feldtests, die anhand der eigens dafür entwickelten Software ausgewertet wurden, präsentiert.

2.1.10.1 Modellregionen

Zusätzlich zu den Labortests wurden im Netzgebiet der Energieversorgung Leverkusen GmbH & Co. KG vier Modellregionen eingerichtet, in denen die Feldtests stattfanden.

- Bismarckstraße im NS-Netz: Bestandswohngebiet (Entstehungszeitraum zwischen 1950 und 1970) mittlerer Bebauungsdichte (Einfamilienhäuser und mehrgeschossige Wohnblöcke)
- Neue Bahnstadt Opladen (NBSO) im NS-Netz: Neubauwohngebiet (Entstehungszeitraum zwischen 2010 und 2017) mittlerer bis geringer Bebauungsdichte (nur Ein- und Mehrfamilienhäuser)
- NBSO im MS-Netz: Neue Kabelstrecken (ab 2010 verlegt) zur Versorgung der Modellregion NBSO im NS-Netz
- Quettingen (MS-Netz): Bestandskabelstrecken (größtenteils zwischen 1950 und 1970 verlegt)

2.1.10.2 Aufbau und Inbetriebnahme der BPL-Infrastruktur und der Sensorik

Für jede der Modellregionen wurde ein Einbauplan erstellt und umgesetzt. Der Aufbau und die Inbetriebnahme der Modellregionen waren erfolgreich. In den NS-Verteilungen der Kabelverteilerschränke und Ortsnetzstationen in der Modellregion der Bismarckstraße sowie in der Modellregion NBSO (NS-Netz) wurden die in AP 4 entwickelten FiN-Messboxen zur Spannungsmessung eingesetzt, wie es in Abbildung 21 exemplarisch dargestellt ist.



Abbildung 21: Spannungsmessung (mit Huckepack-Anschluss) sowie BPL-Kopplung (mit Piercing-Anschluss) in einer NS-Verteilung

Die folgende Tabelle 2-7 erläutert den Umfang installierter Hardware in den einzelnen Modellregionen der NS-Ebene:

Tabelle 2-7: Umfang installierter Hardware in der NS-Ebene

Modellregion	Bismarckstraße	NBSO (NS-Netz)
BPL-Modems in NS-Verteilungen	16	5
BPL-Modems in Hausanschlusskästen	3	0
BPL-Verbindungen	44	10
FiN-Messboxen zur Spannungsmessung	15	5

Alle BPL-Modems in der NS-Ebene wurden in jeweils unterschiedlichen NS-Verteilungen oder Hausanschlusskästen installiert, um ein Kommunikationsnetzwerk aufzuspannen, und beinhalteten die Modifikationen aus AP 3. Die FiN-Messboxen zur Spannungsmessung aus AP 4 wurden parallel zu fast allen BPL-Modems, die in NS-Verteilungen (Ortsnetzstation oder Kabelverteilerschrank) eingesetzt wurden, installiert. In der NS-Ebene ist prinzipiell die Kommunikation eines BPL-Modems mit mehr als einem „Partner“ möglich (vermaschtes Kommunikationsnetzwerk), weshalb die Anzahl der BPL-Verbindungen die Anzahl der BPL-Modems deutlich übersteigt.

In den MS-Schaltanlagen der Ortsnetzstationen, d. h. in der Modellregion NBSO (MS-Netz) sowie in der Modellregion Quettingen, wurden die in AP 5 entwickelten Strom- und Spannungsmesseinrichtungen eingebaut, wie in Abbildung 22 dargestellt ist.

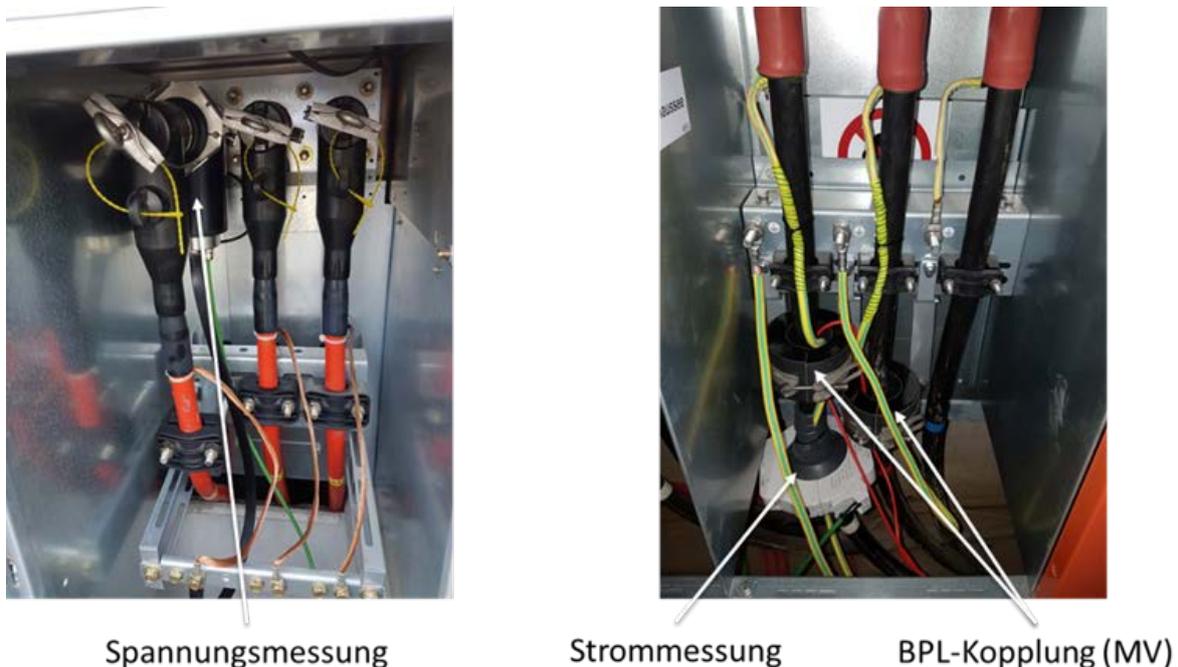


Abbildung 22: Spannungs- und Strommessung sowie induktive BPL-Kopplung in einer MS-Schaltanlage (medium voltage (MV))

Die folgende Tabelle 2-8 erläutert den Umfang installierter Hardware in den einzelnen Modellregionen der MS-Ebene:

Tabelle 2-8: Umfang installierter Hardware in der MS-Ebene

Modellregion	NBSO (MS-Netz)	Quettingen
BPL-Modems in MS-Schaltfeldern	4	10
Ortsnetzstationen	3	6
BPL-Verbindungen	4	10
Messeinrichtungen zur Spannungsmessung	3	6
Messeinrichtungen zur Strommessung	4	10

Alle BPL-Modems in der MS-Ebene wurden in jeweils unterschiedlichen MS-Schaltfeldern installiert. In der Modellregion NBSO (MS-Netz) wurden von einer Ortsnetzstation zwei parallele MS-Schaltfelder, von zwei weiteren Ortsnetzstationen jeweils ein MS-Schaltfeld verwendet. In der Modellregion Quettingen wurden von einer Ortsnetzstation vier parallele, von einer weiteren Ortsnetzstation zwei parallele MS-Schaltfelder und von den übrigen vier Ortsnetzstationen jeweils ein MS-Schaltfeld genutzt. Anders als in der NS-Ebene handelt es sich hier bedingt durch die Topologie in der MS-Ebene nicht um ein vermaschtes Kommunikationsnetzwerk, sondern um Punkt-zu-Punkt-Verbindungen. Da jedes BPL-Modem einen eigenen „Partner“ benötigt, kann es in der MS-Ebene erforderlich sein, mehr als ein BPL-Modem je Station zu installieren (Installationsort ist in der MS-Ebene am Kabelendverschluss, d. h. vor dem Lasttrennschalter). Zur in der MS-Ebene erforderlichen Ankopplung der BPL-Modems wurden sowohl induktive als auch kapazitive Koppler verwendet. Die Messeinrichtungen waren wie in AP 5 beschrieben einphasig konzipiert und stets mit der Phase L1 verbunden. In jeder Ortsnetzstation wurde die Spannung an einem Punkt der MS-Schaltanlage gemessen, wogegen die Stromstärke an jedem von der BPL-Kommunikation genutzten MS-Schaltfeld (Kabelstrecke) gemessen wurde.

2.1.10.3 Notwendigkeit einer softwarebasierten Auswertung

Um die Analyse der Messwerte der BPL- und Sensor-Installationen im Rahmen des Feldtests auswerten zu können, war ein im Wesentlichen einheitlich formatiertes, jedoch sehr hohes Datenaufkommen zu betrachten. Deshalb wurden sowohl ein Skript, welches die Datenaufbereitung beinhaltet, als auch ein Analysetool für die Auswertung der aufbereiteten Daten entwickelt. Die Programmierung wurde in MATLAB realisiert.

2.1.10.4 Eingangsdaten

Zu den Eingangsdaten zählen gemäß Tabelle 2-9:

Tabelle 2-9: Datenbestand vor der Datenaufbereitung

	BPL- Datenübertragungs- eigenschaften	Sensordaten aus der NS-Ebene	Sensordaten aus der MS-Ebene
Dateityp	csv	csv	txt
Messintervalle	15 min.	10 sek.	15 sek.
Umfang	68 BPL- Verbindungen	20 NS-Verteilungen	9 MS-Schaltanlagen bzw. 14 MS- Schaltfelder
Volumen	2 csv-Dateien pro BPL-Verbindung und pro Messung	1 Datei pro Woche	1 Datei pro MS- Schaltanlage, jeweils mindestens 1 Datei pro Stunde
Parameter der Messergebnisse	SNR je Träger und Modulationsstufe je Träger mit Zeitstempel	Spannung an allen drei Phasen mit Zeitstempel	Spannung, Strom, Netzfrequenz, Wirk-, Blind- und Scheinleistung an einer Phase mit Zeitstempel
Gesamtheit aller Messungen <u>pro</u> <u>Woche</u>	91.392 csv-Dateien Ca. 4 Gigabyte	1 csv-Datei Ca. 350 Megabyte	Ca. 3.000 txt-Dateien Ca. 33 Megabyte

Die Eingangsdaten lagen in verschiedenen Rohformaten in Form von vielen einzelnen Dateien vor. Im Rahmen des Projekts kumulierte sich dadurch ein Datenbestand von rund 3,4 Mio. Dateien mit einem Volumen von ca. 105 Gigabyte. Bereits zu Beginn war daher absehbar, dass diese großen Datenmengen ohne weiteres nur mit hohen Laufzeiten ausgewertet werden können und eine Datenaufbereitung daher zwingend erforderlich wurde. Insbesondere die sehr hohe Anzahl vieler kleiner Dateien würde viele Dateizugriffe bedeuten und dadurch jede Auswertung erheblich verlangsamen.

2.1.10.5 Datenaufbereitung

Für die Datenaufbereitung wurde ein eigens entwickeltes Kommandozeilenskript auf der Basis der Softwares MATLAB und WinSCP verwendet, das permanent und automatisch die vielen einzelnen Dateien von den jeweiligen Messcomputern (BPL-Daten) und RTUs (MS-Sensordaten) im Feldtestgebiet über eine VPN-Verbindung regelmäßig und automatisch herunterlädt und aufbereitet. Dieses Skript wurde dazu speziell auf die Datenstrukturen der

Eingangsdaten angepasst. Die Daten der FiN-Messboxen (NS-Sensordaten) wurden aufgrund ihrer relativ geringen Anzahl an Dateien manuell übertragen. Das Ergebnis der Datenaufbereitung dieses Skripts ist, dass die Messdaten der vielen einzelnen Rohdateien in sehr wenige Dateien überführt wurden. Diese wurden zudem laufend um neue Messdaten ergänzt. Auf diese Weise konnte eine effiziente Datenbank erstellt werden, die alle Messdaten und relevanten Zusatzinformationen enthält.

Die Auswertung der Daten aus dem Feldtest erfolgte mit dem Analysetool. Dieses diente zur Visualisierung und Analyse der BPL-Datenübertragungseigenschaften und Sensordaten. Da die Auswertung mit dem Analysetool ebenfalls in MATLAB realisiert wurde, boten sich mat-Dateien als Zielformat der Datenaufbereitung an, da dieses Format einen hohen Kompressionsfaktor aufweist und zum anderen vor allem in geringer Zahl sehr schnell geladen werden kann. Deshalb wurden alle Messwerte aus den Rohdaten wie folgt zu insgesamt 142 mat-Dateien zusammengefasst und darin laufend ergänzt:

- 68 BPL-Dateien: 1 Datei je BPL-Verbindung
- 60 NS-Sensordateien: 1 Datei je vermessener NS-Verteilung und je Phase
- 14 MS-Sensordateien: 1 Datei je vermessenes MS-Schaltfeld

Das Datenvolumen wurde dabei erheblich auf insgesamt ca. 6 GB reduziert. Bei der Analyse einer BPL-Verbindung mussten durch das Analysetool in Folge dessen nur noch eine Datei für die zugehörigen BPL-Daten und eine (MS-Ebene) bzw. drei (NS-Ebene, je 1 Datei pro Phase) Sensordateien geöffnet werden. Dies war innerhalb weniger Sekunden möglich. Zusätzlich enthielt ein Excel-Dokument relevante, unveränderliche Zusatzinformationen und Verweise zu den Installationen im Feldtest (Stammdaten der Stationen und Kabel, IP- und MAC-Adressen der BPL-Modems, Bezeichnungen der Ortsnetzstationen, Kabelverteilerschränke und Hausanschlusskästen) und wird ebenfalls vom Analysetool geladen.

2.1.10.6 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Analysen mit dem Analysetool dargestellt.

2.1.10.6.1 Allgemeine Erkenntnisse

2.1.10.6.1.1 BPL-Kommunikation

Bei einer Visualisierung des Zeitverlaufs wie in Abbildung 23, die mit Hilfe des Analysetools erzeugt wurde, ist auf der Abszissenachse der Zeitpunkt der Messung und auf der Ordinatenachse der Träger von einer BPL-Verbindung aufgetragen. Über eine Farbkodierung sind die SNR-Werte je Zeitpunkt und Träger abgebildet. Die Skala der Farbkodierung reicht von 0 dB (dunkelrot) bis 40 dB (dunkelblau).

Die Ergebnisse zeigen, dass die untersuchten BPL-Datenübertragungseigenschaften in der MS-Ebene einen stabilen Zeitverlauf aufweisen, wie exemplarisch in Abbildung 23 dargestellt ist. Eine Erklärung hierfür ist, dass in den untersuchten Modellregionen keine Anlagen direkt an das MS-Netz angeschlossen waren, wo sie zeitvariantes hochfrequentes Rauschen verursachen könnten. Das Rauschen, das von Anlagen stammt, die in der NS-Ebene angeschlossen sind, wird durch den Ortsnetztransformator so stark gedämpft, dass es auf der MS-Ebene nicht mehr im BPL-Signal nachweisbar ist. Im Gegensatz zu den meisten NS-Kabeln besitzen MS-Kabel zudem durchweg einen Schirm, der das Kabel von elektromagnetischen Störsignalen (Rauschen) im BPL-Frequenzbereich abschirmt. Aus diesem Grund deuten insbesondere plötzliche, deutliche Veränderungen des SNR in der MS-Ebene auf besondere Ereignisse hin.

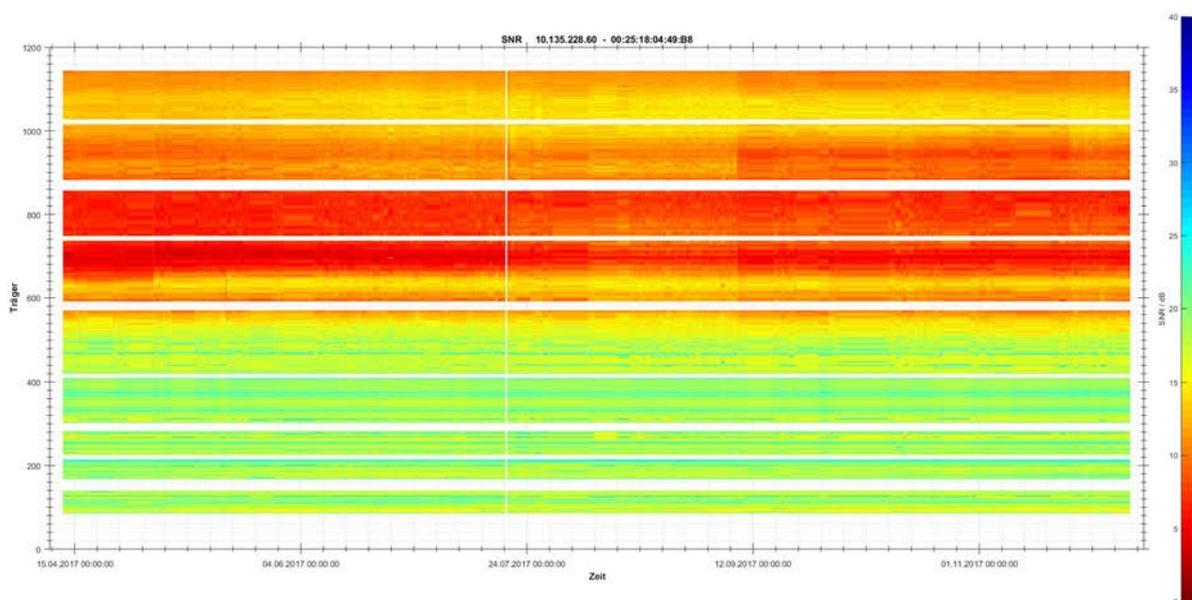


Abbildung 23: Visualisierung einer BPL-Verbindung in der Modellregion NBSO (MS-Netz) über einen Zeitraum von mehr als 7 Monaten

Im Zeitverlauf sind also gemäß Abbildung 23 nur sehr geringfügige Änderungen zu verzeichnen. Auch ist das natürliche Tiefpass-Verhalten von Kabeln im SNR, der hier mit zunehmender Trägerfrequenz sinkt, wiederzuerkennen. Zu erwähnen ist, dass der SNR und damit dieses Muster vom individuellen Rauschen vor Ort sowie von der Kabeldämpfung und damit von der Kabellänge abhängig sind. Die BPL-Datenübertragungseigenschaften bei hohen Trägerfrequenzen sind daher nur grundsätzlich (wie hier), aber nicht zwingend geringwertiger als bei niedrigen.

In der NS-Ebene zeigte sich, dass die BPL-Datenübertragungseigenschaften weniger stabil als in der MS-Ebene, sondern eher volatil sind. In der NS-Ebene können viele Störquellen (verschiedene Verbraucher und Anlagen der Kunden) vorhanden sein, die sich negativ auf den SNR auswirken. Dabei wurden sowohl zyklische (siehe Abbildung 24) als auch

langfristige Muster (siehe Abbildung 26) detektiert. Da der Ortsnetztransformator hochfrequente Signale weitgehend blockiert, wirken sich diese selbst in direkter Umgebung nicht bzw. nicht erkennbar auf die BPL-Kommunikation in der MS-Ebene aus. Auch in der NS-Ebene bestätigt sich das grundsätzliche Tiefpassverhalten.

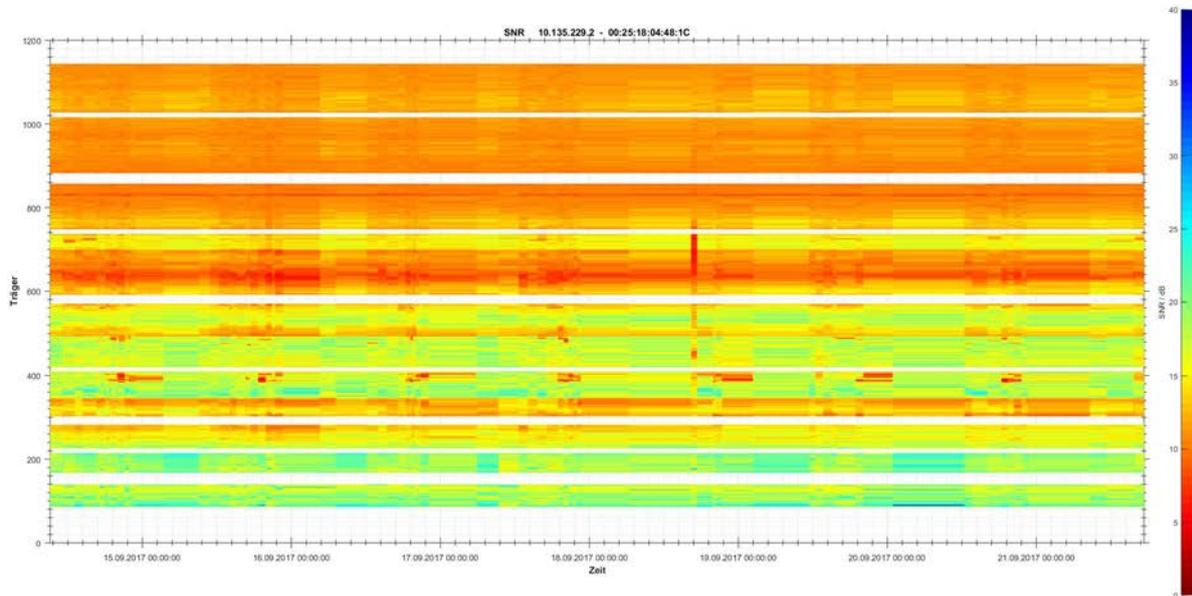


Abbildung 24: Visualisierung einer BPL-Verbindung in der NS-Ebene in der Modellregion Bismarckstraße mit zyklischen Mustern über einen Zeitraum von ca. 7 Tagen

Abbildung 24 zeigt bei mehreren Trägern täglich wiederkehrende, zyklische Muster, die sich in einer Verschlechterung des SNR zeigen. Zyklische Muster konnten mit einer Fourier-Analyse bestätigt werden. Die folgende Abbildung 25 zeigt im oberen Diagramm die Spitze-Spitze-Werte der zyklischen Schwingungen als Farbkodierung des SNR je Träger. Die Träger sind über der Ordinatenachse aufgetragen. Auf der Abszissenachse ist die Anzahl der Zyklen pro Woche dieser Schwingungen aufgetragen. Im mittleren und unteren Diagrammteil sind die Schwingungen (nun auf der Ordinatenachse) des SNR mit ca. 7 Zyklen bzw. mit ca. 1 Zyklus pro Woche für jeden Träger (Abszissenachse) hervorgehoben. Es zeigt sich, dass bspw. in naher Umgebung von Träger 400 (ca. 10 MHz) zyklische Störungen auftreten, die zu Schwingungen des SNR mit einer Periodendauer von 7 Zyklen pro Woche führen. Die Ursache sind vermutlich Störsignale elektrischer Anlagen oder Geräte, welche täglich wiederkehren. Diese können nicht sehr weit vom BPL-Modem entfernt sein, da die Störsignale selbst einer Dämpfung unterliegen und ihre Auswirkung auf eine BPL-Datenübertragung, zumindest bei einer einzigen Störquelle, räumlich begrenzt ist.

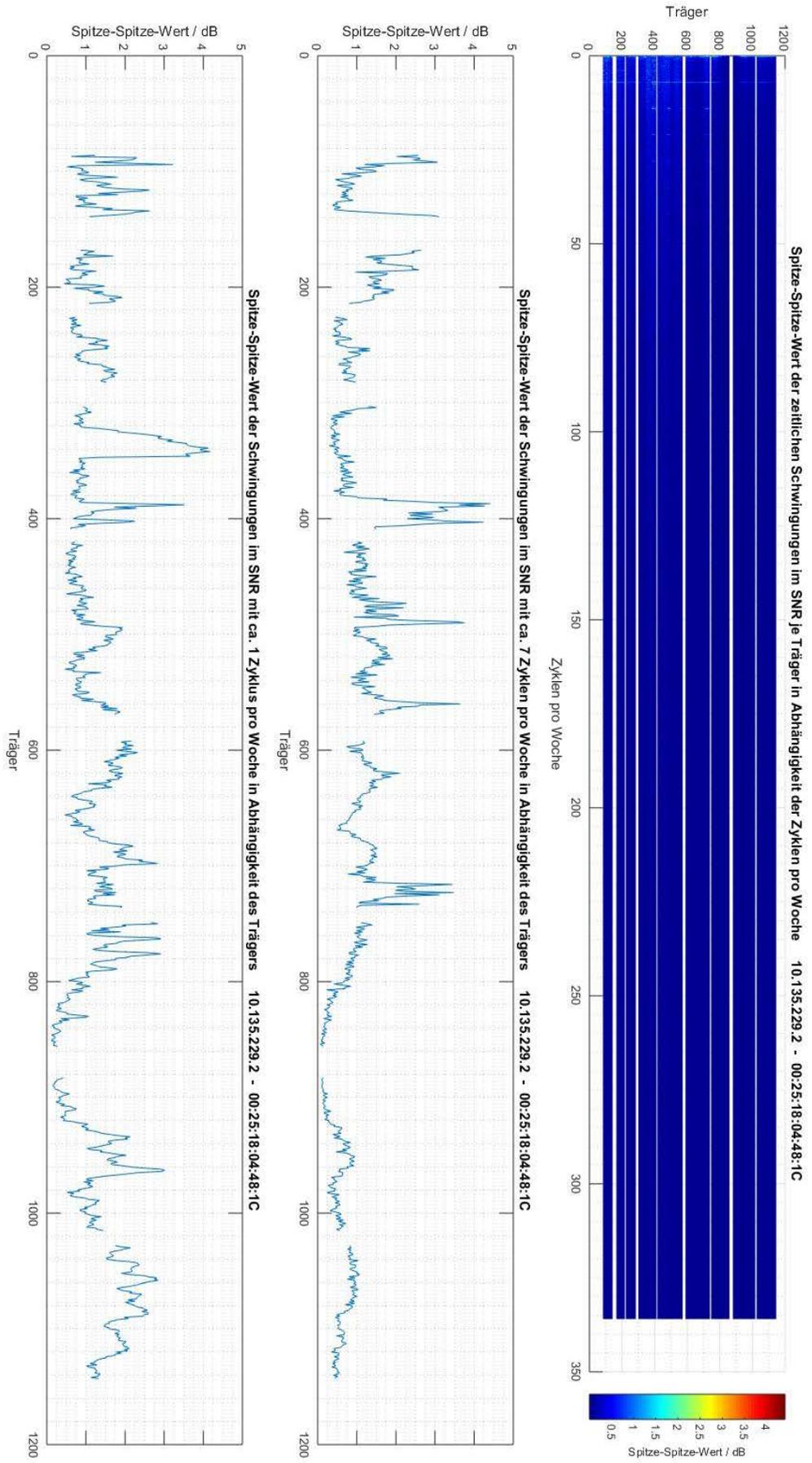


Abbildung 25: Fourier-Analyse der BPL-Verbindung mit zyklischen Mustern, die in Abbildung 24 visualisiert wurde

Abbildung 26 zeigt dagegen eine BPL-Verbindung mit langfristigen Mustern. Über einen Zeitraum von mehreren Monaten kam es zu einer breiten, aber vorübergehenden Verringerung des SNR. Störungen in der NS-Ebene scheinen daher auch saisonalen Charakter zu haben und nicht nur ein zyklisches Tagesgangverhalten.

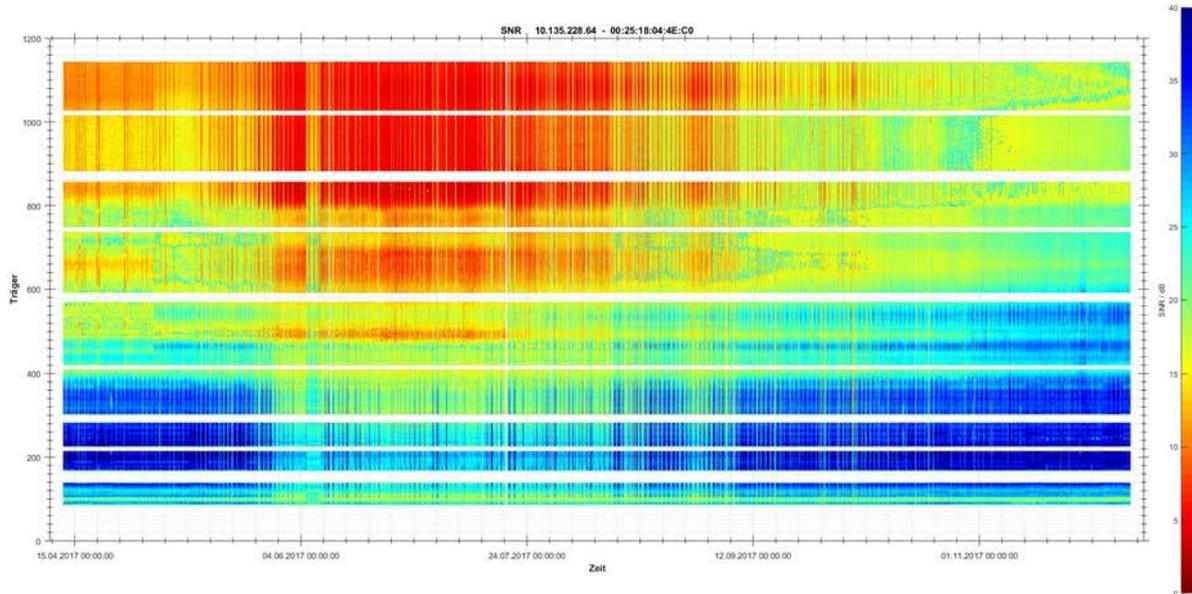


Abbildung 26: Visualisierung einer BPL-Verbindung in der NS-Ebene in der Modellregion NBSO (NS-Netz) mit langfristigen Änderungen über einen Zeitraum von mehr als 7 Monaten

Die wesentliche Erkenntnis ist, dass solche Effekte innerhalb der NS-Ebene zukünftig auf eine geeignete Weise berücksichtigt werden müssen, da sie für eine Detektion der in diesem Projekt definierten Zustände hinderlich sind. Bei einem großflächigen Einbau von BPL-Modems ist es jedoch möglich, den Entstehungsort der Störungen mit Hilfe der BPL-Datenübertragungseigenschaften zu lokalisieren, wie in Abbildung 27 schematisch dargestellt ist.

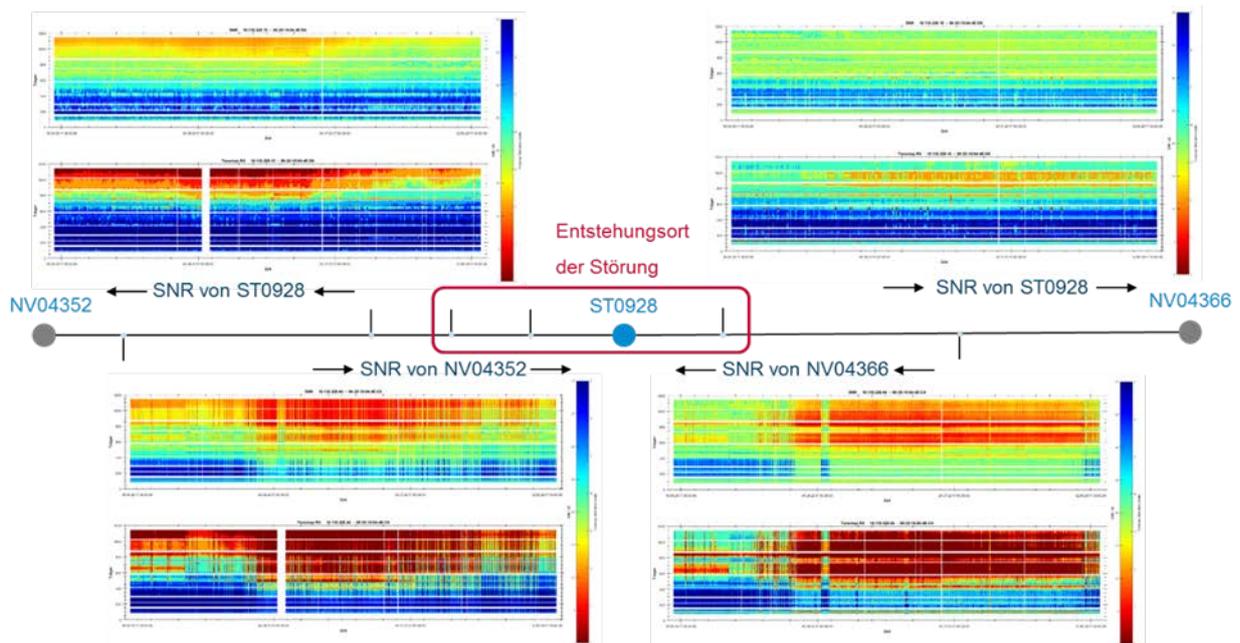


Abbildung 27: Lokalisieren von Störern durch Vergleich von BPL-Verbindungen

In Abbildung 27 sind vier BPL-Verbindungen aus der Modellregion NBSO (NS-Netz) – NV04352 nach ST0928 und zurück sowie von ST0928 nach NV4366 und zurück – dargestellt. Die zwischen diesen NS-Verteilungen abgehenden Hausanschlüsse sind als kleine, rechtwinklig abzweigende Linien skizziert. Insgesamt gibt es vier SNR- (jeweils oberer Diagrammteil) bzw. Tonemap-Zeitreihen (jeweils unterer Diagrammteil) je BPL-Verbindung. In jeder der Zeitreihen, die eine Zeitspanne von ca. vier Monaten abdecken, sind in der oberen Hälfte des Frequenzbandes Beeinträchtigungen im SNR bzw. in der Tonemap erkennbar – allerdings mit deutlich unterschiedlicher Intensität. Vergleicht man die Intensität der Beeinträchtigung des SNR bzw. der Tonemap unter Berücksichtigung, dass Störsignale ebenfalls mit zunehmender Kabellänge gedämpft werden, lässt sich der Entstehungsort der Störungen auf die in Abbildung 27 eingekreisten Hausanschlüsse eingrenzen. Wenn beim bevorstehenden Rollout der intelligenten Messsysteme als IKT die BPL-Kommunikation eingesetzt wird, kommen zu den BPL-Modems in den Kabelverteilerschränken noch weitere BPL-Modems in den Smart-Meter-Gateways (SMGW) der Hausanschlüsse hinzu. Durch die höhere Dichte an BPL-Modems wäre damit in Zukunft eine noch genauere Lokalisierung solcher Störer möglich.

2.1.10.6.1.2 Sensorik

Generell zeigte sich beim Feldtest, dass das Konzept der günstigen Messsensorik in Kombination mit einer BPL-Infrastruktur funktioniert und zuverlässig eine kontinuierliche Überwachung des lokalen Netzzustands ermöglicht. In Abbildung 28 ist ein typischer Spannungs- und Stromstärkeverlauf innerhalb der Modellregion NBSO (MS-Netz) dargestellt, wobei die Sensorwerte auf der Ordinate über die Messzeitpunkte auf der Abszissenachse dargestellt sind.

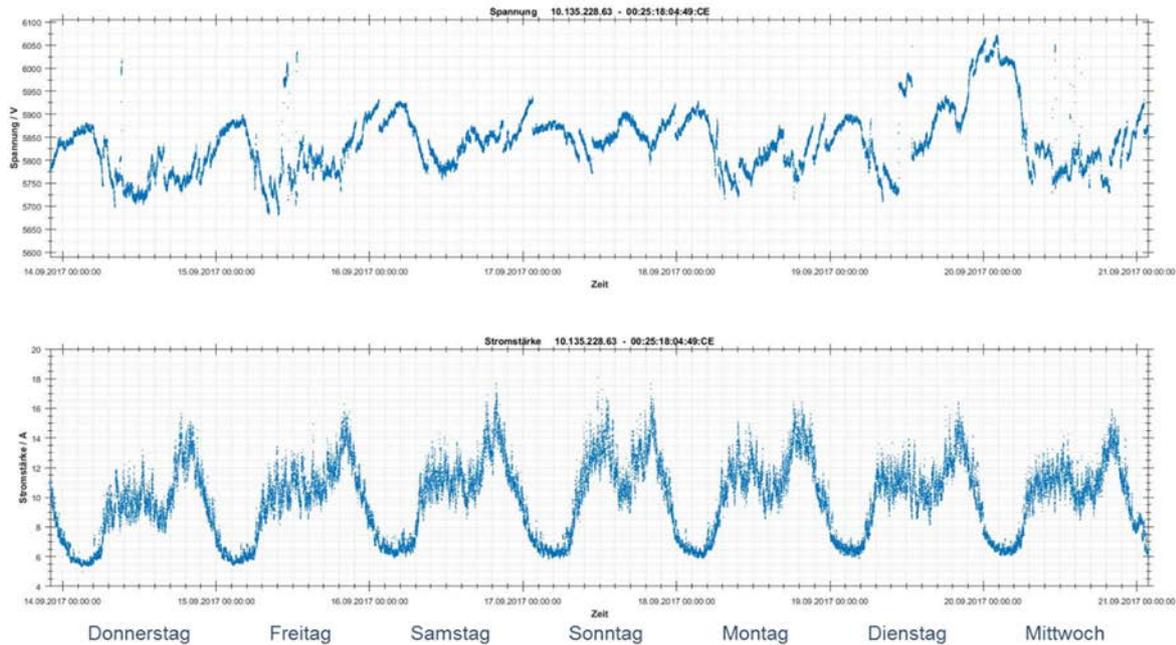


Abbildung 28: Spannungs- (oben) und Stromstärkeverlauf im MS-Netz in der Modellregion NBSO (MS-Netz)

Wie zu erwarten ist der Strom nachts niedriger als tagsüber, mit einer ausgeprägten Spitze in den Abendstunden jedes Wochentags und einer weniger stark ausgeprägten Spitze in den Morgenstunden. Insgesamt ist die über dieses MS-Kabel fließende Stromstärke mit Spitzenwerten kleiner als 20 A sehr niedrig. Bei einer Nennstromstärke des Kabels von 300 A liegt die Auslastung damit deutlich unter 10 %. Diese geringe Auslastung ist für den Feldtest charakteristisch.

In der NS-Ebene werden mithilfe der FiN-Messboxen kontinuierlich die Spannungswerte aller drei Phasen (L1, L2 und L3) alle 10 Sekunden erhoben und versendet. Mithilfe der Spannungsmessungen ist es möglich, die Umschaltungen des Stufenstellers im Leistungstransformator des speisenden Umspannwerks nachzuvollziehen. In Abbildung 29 ist dies im linken oberen Diagramm gut sichtbar, insbesondere die Spannungsstufungen zwischen 18 und 24 Uhr (rechtes Viertel des Diagramms).

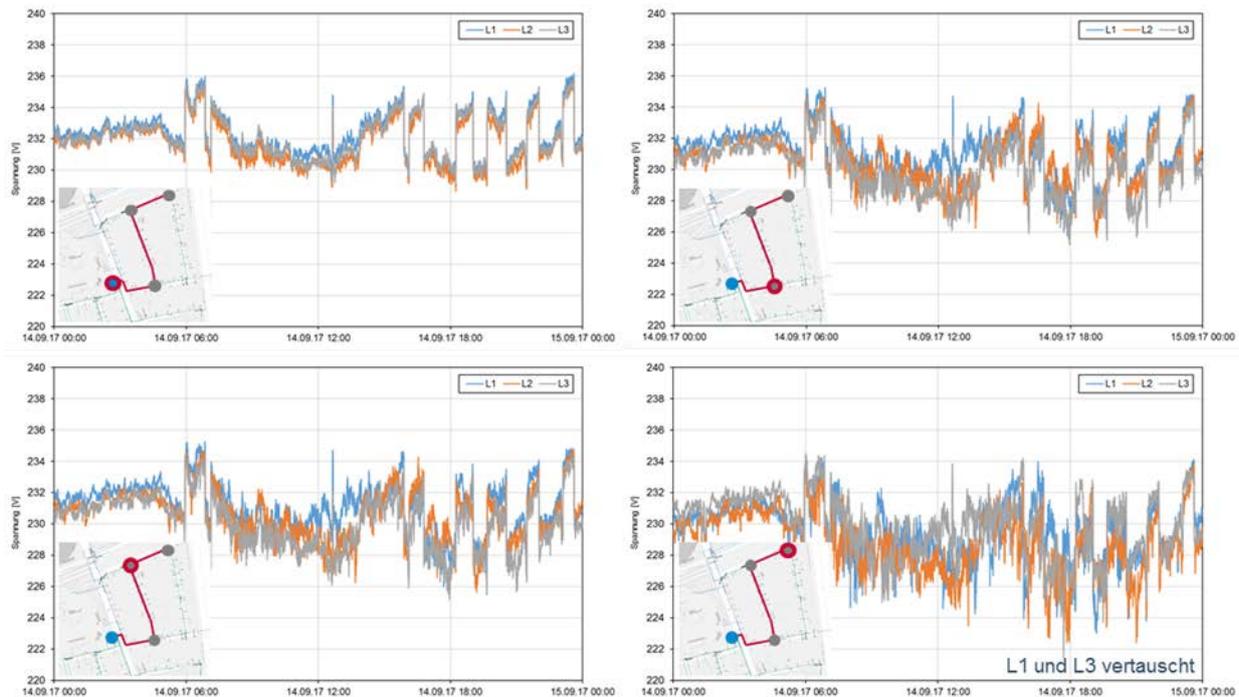


Abbildung 29: Verlauf der Spannung entlang eines NS-Strangs in der Modellregion Bismarckstraße

Durch die Spannungsmessung in mehreren Kabelverteilerschränken ist darüber hinaus der Spannungsabfall entlang eines NS-Strangs nachvollziehbar (Reihenfolge entlang des NS-Strangs in Abbildung 29 ist von links nach rechts und von oben nach unten). Diese Erkenntnis kann theoretisch dazu genutzt werden, um Schalthandlungen im Umspannwerk in Zukunft in Abhängigkeit der echten Spannungswerte zu optimieren.

Dadurch, dass die Spannungen der drei Phasen separat erhoben werden, ist es mithilfe der FiN-Messboxen zudem möglich, Unsymmetrien der Phasen zu detektieren. Solche Unsymmetrien können durch einphasig angeschlossene Erzeuger (z.B. einphasige PV-Wechselrichter) oder aber durch einphasig angeschlossene (große) Verbraucher (z.B. Wallbox für Elektrofahrzeuge) entstehen. Durch die kontinuierliche und flächendeckende dreiphasige Spannungsmessung wäre es möglich, netzanschluss-scharf Vorgaben für den Anschluss einphasiger Erzeuger oder Verbraucher zu machen und somit eine hohe Symmetrie der Phasen zu gewährleisten.

2.1.10.6.2 Schaltzustand

Die im vorherigen Abschnitt 2.1.10.6.1.1 beschriebenen Muster durch Störquellen zeichnen sich dadurch aus, dass der SNR sich von einer Messung zur nächsten (also innerhalb von 15 Minuten) bei den meisten Trägerfrequenzen nur geringfügig, sein Mittelwert über alle Träger noch weniger ändert. Durch Änderungen der Schaltzustände von Schaltern oder Sicherungen (das Auslösen einer Sicherung wird hier als „Schalten“ und damit als Änderung des Schaltzustands angesehen) ergeben sich in logischer Konsequenz veränderte

Signalpfade für die BPL-Kommunikation. Diese Veränderung kann daher über eine parametrisierte Gradientendetektion des SNR wiedererkannt werden. Der Gradient des SNR zwischen zwei Messungen kann, wenn in der Zeit Änderungen des Schaltzustands vorliegen, erheblich größer ausfallen, als das bei üblichen Schwankungen festgestellt wurde. Die Abbildung 30 zeigt, dass wegen arbeitsbedingter Umschaltungen im MS-Netz, die an der Station, an der gemessen wurde, zu dieser Zeit (zwischen 8 und 11 Uhr am 02.05.2017) dokumentiert sind, solche erhebliche Änderungen des SNRs detektiert wurden. Die BPL-Modems waren während der Arbeiten weiterhin mit Spannung versorgt, da auch das NS-Netz weiterversorgt wurde. Nachdem der Standardschaltzustand am Ende der Arbeiten wiederhergestellt wurde, stellten sich nahezu die gleichen Werte für den SNR ein. Die Analyse der BPL-Datenübertragungseigenschaften ist daher potentiell nutzbar, um Schalthandlungen in der MS-Ebene festzustellen und damit Änderungen der Topologie zu erkennen und einzugrenzen.

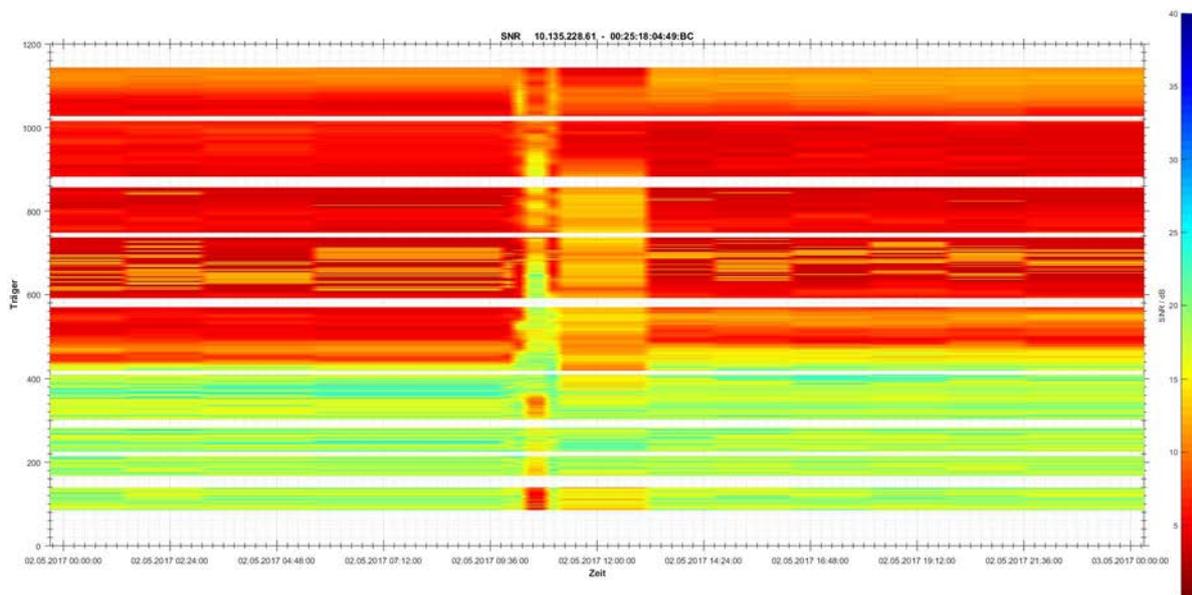


Abbildung 30: Einfluss von Schalthandlungen an einer MS-Schaltanlage auf eine anliegende BPL-Verbindung in der Modellregion NBSO (MS-Netz), dargestellt: 02.05.2017 von 0 bis 24 Uhr

Zu einem ähnlichen Effekt kam es in der NS-Ebene. Mit Hilfe der BPL-Kommunikation können ausgelösten NH-Sicherungen im NS-Netz bzw. darauf basierend eine automatisierte Topologieerkennung ermöglicht werden. In der Modellregion Bismarckstraße befand sich innerhalb einer BPL-Verbindung zwischen zwei Modems in einer NS-Verteilung eine offene Trennstelle, d. h. ein Kabelabgang, der nicht mit NH-Sicherungen bestückt war. Dennoch war es möglich, über diese offene Trennstelle eine Kommunikation zwischen den BPL-Modems zu etablieren (siehe Abbildung 31, links). Der Verlauf des SNR bzw. der Tonemap über die Träger hinweg unterscheidet sich allerdings vom üblichen Tiefpass-Verhalten des SNR bzw. der Tonemap. Es ist nur eine elektromagnetische Kopplung vorhanden, ohne dass eine galvanische Verbindung besteht. Daher sind insbesondere die niedrigen Frequenzen

stark gedämpft. Der übliche Verlauf von SNR bzw. Tonemap über die Träger hinweg ist in Abbildung 31, rechts zu sehen. Die zuvor in diesem Kabelverteilerschrank offene Trennstelle wurde hierfür mit einem Koppel-Kondensator geschlossen. Der eingesetzte Koppel-Kondensator stellt einen Hochpassfilter dar, der nur Signale oberhalb der Grenzfrequenz von 1 MHz passieren lässt. Auf diese Weise wird die Trennstelle nur für die BPL-Signale geschlossen, bleibt aber energietechnisch offen – d. h. es kann weiterhin kein Strom bei 50 Hz fließen. Zwischenzeitlich wurden zu Testzwecken in die offene Trennstelle defekte NH-Sicherungen eingesetzt (siehe Abbildung 31, mittig), wodurch sich zeigte, dass defekte NH-Sicherungen durch offene Trennstellen simuliert werden können, weil sie sich im SNR- bzw. Tonemap-Verlauf kaum unterscheiden.

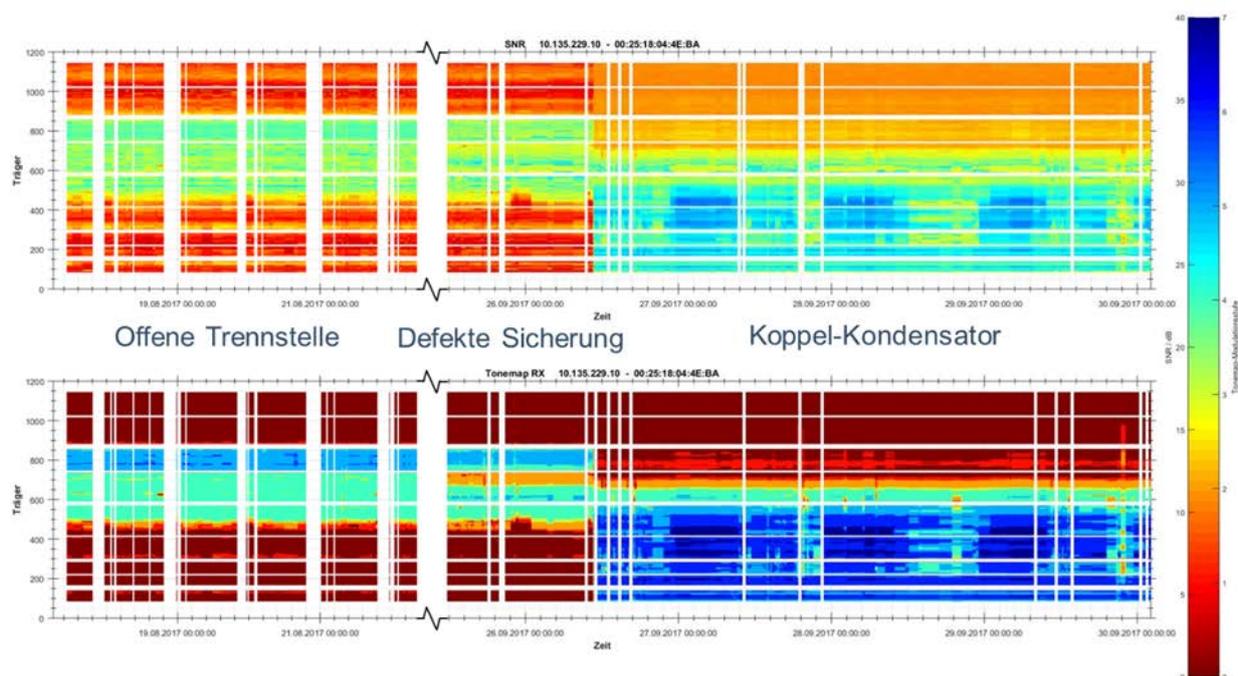


Abbildung 31: Einfluss ausgelöster Sicherungen und offener Trennstellen auf eine BPL-Verbindung in der Modellregion Bismarckstraße

In einem weiteren Test konnte für diese BPL-Verbindung zudem gezeigt werden, dass nicht nur das Auslösen aller drei NH-Sicherungen (aller drei Phasen) gleichzeitig, sondern auch das Auslösen einzelner NH-Sicherungen im SNR und in der Tonemap deutliche Muster hinterlässt (siehe Abbildung 32).

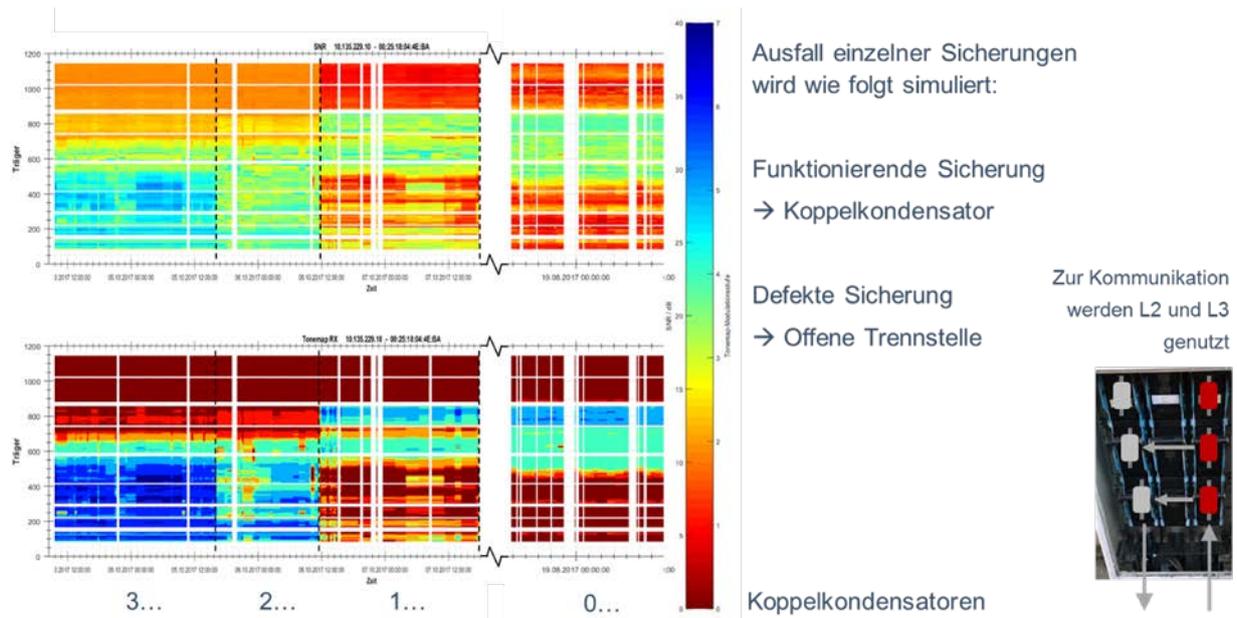


Abbildung 32: Auslösen einzelner NH-Sicherungen (einzelne Phasen) im Verlauf von SNR und Tonemap einer BPL-Verbindung in der Modellregion Bismarckstraße

Bei diesem Test wurde die Erkenntnis genutzt, dass eine funktionierende NH-Sicherung durch einen Koppel-Kondensator und eine defekte NH-Sicherung durch eine offene Trennstelle hinsichtlich der Übertragungseigenschaften simuliert werden kann. In Abbildung 32 sind die folgenden vier Bereiche zeitlich unterteilt:

- 3 Koppel-Kondensatoren / 0 offene Trennstellen:
NH-Sicherungen auf allen 3 Phasen intakt
- 2 Koppel-Kondensatoren / 1 offene Trennstelle:
NH-Sicherung auf 1 Phase defekt
- 1 Koppel-Kondensator / 2 offene Trennstellen:
NH-Sicherungen auf 2 Phasen defekt
- 0 Koppel-Kondensatoren / 3 offene Trennstellen:
NH-Sicherungen auf allen 3 Phasen defekt

Die Simulation im Feldtest wurde zudem an einem Abgang einer NS-Verteilung durchgeführt, an dem im Normalbetrieb keine NH-Sicherungen eingesetzt sind. Auf diese Weise blieben die Lastflüsse zum Kunden im Rahmen dieses Feldversuchs unverändert und die Versorgungssicherheit im Rahmen dessen gewahrt.

2.1.10.6.3 Globale Alterung

Die Trendanalyse wurde genutzt, um die fortschreitende Alterung des Kabels zu ermitteln. Alterungsmechanismen wirken sehr langsam, weshalb der lineare Trend (Steigung auf der Ordinatenachse) des SNR über einen Zeitraum von mehreren Monaten für jeden einzelnen der 917 Träger (Abszissenachse) dargestellt ist (siehe Abbildung 33, oben). Um

Fluktuationen, die in der MS-Ebene zwar gering, aber nicht auszuschließen sind, vernachlässigen zu können, wurden dabei die Maximalwerte pro Monat für jeden Träger genutzt. Dem steht der Ansatz zugrunde, dass der SNR maximal ist, wenn das Rauschen durch Störungen und damit deren parasitäre Einflüsse minimal sind. Im Optimalfall wäre in Zukunft hier eine Analyse der Übertragungsfunktion vorteilhaft, da der SNR über die Quotientenbildung separate Informationen über Rauschen und Übertragungsfunktion verliert. Dieser Parameter der BPL-Datenübertragungseigenschaften konnte jedoch im Rahmen dieses Projekts nicht extrahiert werden (vgl. Kapitel 2.1.4), da er geräteintern nach seiner Verwendung sofort wieder verworfen wird. Zur weiteren Veranschaulichung wurden die SNR-Werte aller Träger zu neun Trägergruppen zusammengefasst (siehe Abbildung 33, unten) – als Mittelwerte (in blau) und als Maximalwerte (in gelb) und für diese neun Trägergruppen der lineare Trend ebenfalls auf die beschriebene Weise ermittelt. Es zeigt sich sowohl für die einzelnen als auch für die Gruppentrends, dass ein negativer Trend des SNR hier insbesondere bei den oberen Trägerfrequenzen zu verzeichnen ist. Dies untermauert die Aussage, dass eine zunehmende Alterung zu einer Zunahme der Dämpfung bzw. Abnahme des SNR führt. Das Ergebnis der Trendanalysen ist jedoch aufgrund der relativ kurzen Zeitdauer der Messwertaufzeichnung im Rahmen des Feldtests statistisch nicht signifikant, d. h. ein statistischer Signifikanztest wurde nicht bestanden und der zugehörige P-Wert ist nicht kleiner als 0,05. Da nur die SNR-Werte während des Feldtests über mehrere Monate zur Verfügung stehen, konnte die Alterung nur mit Hilfe einer Trendanalyse untersucht werden. Um die Alterung eines Kabels aus den SNR-Bildern direkt ablesen zu können (Fingerprints), fehlen die Erfahrungswerte.

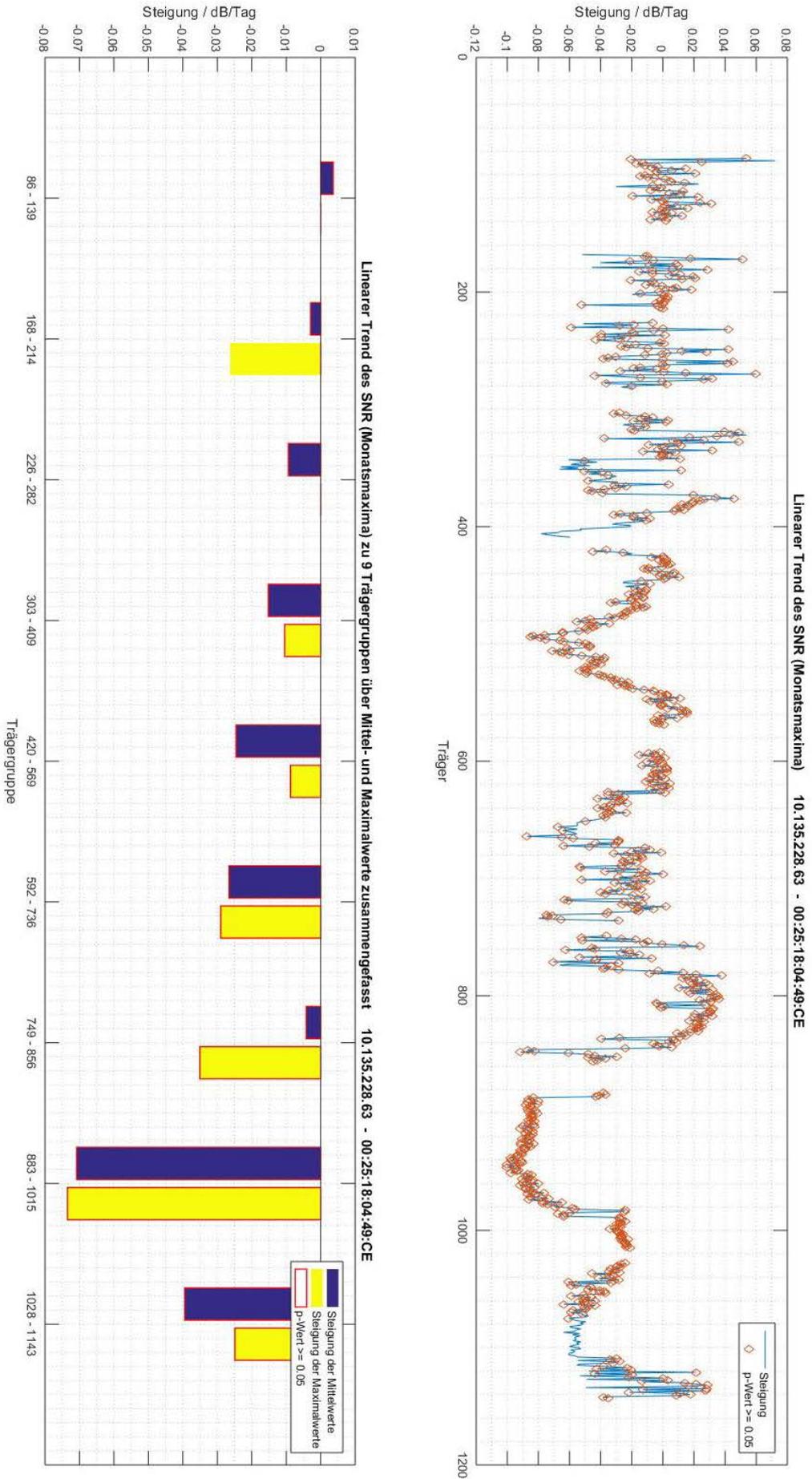


Abbildung 33: Trendanalyse des SNR einer BPL-Verbindung in der MS-Ebene in der Modellregion NBSO (MS-Netz)

2.1.10.6.4 Teilentladungen

Es wurde bei einer BPL-Verbindung in der Modellregion Quettingen, die ein Papier-Masse-Kabel zur Kommunikation nutzt, eine negative Korrelation des SNR-Verlaufs mit dem Verlauf der Spannung festgestellt. Dieses Muster passt zu der Erwartung an TE, welche in Papier-Masse-Kabeln häufig auftreten. TE werden tendenziell intensiver, je höher die Spannung ist. Je intensiver die TE sind, desto geringer wird folglich der SNR (fallender SNR bei steigender Spannung wegen stärker werdenden TE). Daher kommt es zu einem negativen Korrelationskoeffizienten (siehe Abbildung 34, oben), der mit einem Wert von ca. $-0,1$ – aufgetragen auf der Ordinatenachse – zwar einen geringen Betrag aufweist, jedoch auffällig stabil im erwarteten, unteren Frequenzbereich (untere Träger auf der Abszissenachse) ist und zudem einen statistischen Signifikanztest besteht (P-Wert ist kleiner als $0,05$). Bei der Korrelationsanalyse wurde allgemein zusätzlich ein „Optimierungsproblem“ gelöst, was nach den maximalen Korrelationskoeffizienten je Träger zwischen dem SNR- und dem Spannungsverlauf (bzw. dem Stromstärkeverlauf) sucht, wenn eine variable Zeitverschiebung des Spannungsverlaufs (bzw. des Stromstärkeverlaufs) von -12 bis $+12$ Stunden in 15 Minuten-Intervallen angesetzt wird (siehe Abbildung 34, mittig). Dies resultierte daraus, dass eine Stromstärkeänderung eine zeitverzögerte Wirkung auf die Temperaturänderung eines Kabeldielektrikums zur Folge hat. Die Intensität von TE ist gegenüber der Spannung jedoch nicht zeitverzögert, weshalb bei der Korrelationsanalyse zwischen SNR und Spannung hinsichtlich TE eine Zeitverschiebung der Spannung von 0 (siehe Abbildung 34, unten, Ordinatenachse) als Ergebnis des „Optimierungsproblems“ zur Detektion von TE im Bereich der unteren Träger zu erwarten war und sich bestätigte. Dies ist also ein Hinweis auf TE.

Die Korrelationsanalyse zwischen SNR und Spannung wurde in der NS-Ebene nicht durchgeführt, da TE in der NS-Ebene nicht auftreten.

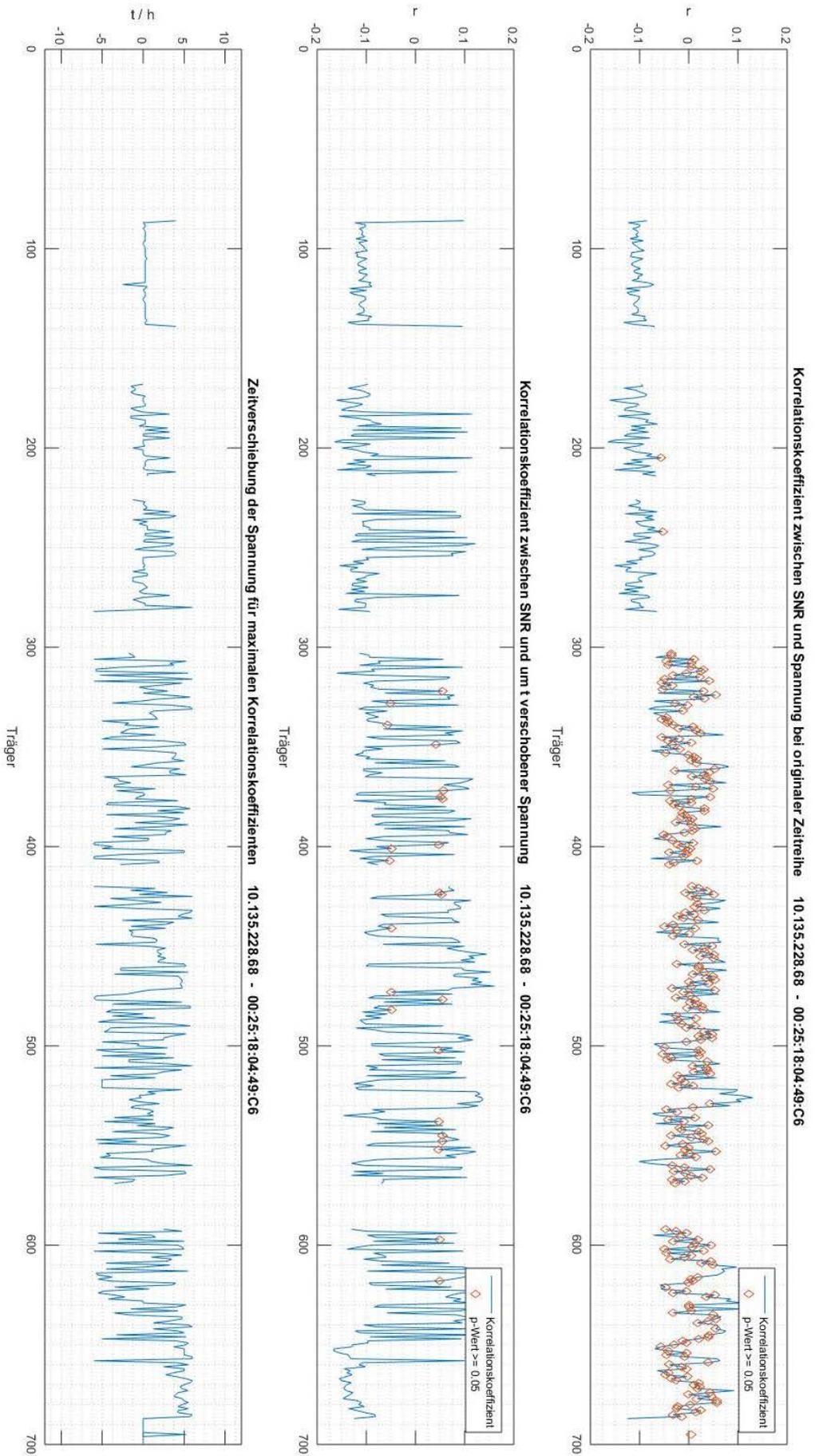


Abbildung 34: Korrelationsanalyse zwischen SNR und Spannung für eine BPL-Verbindung in der MS-Ebene in der Modellregion Quettingen

2.1.10.6.5 Spannungsqualität

Die Spannungsmessungen sind bereits völlig losgelöst von den BPL-Datenübertragungseigenschaften betrachtet, insbesondere in der NS-Ebene, in der im Rahmen des Projekts alle drei Phasen vermessen wurden, interessant. Auf diese Weise können unerwünschte Unsymmetrien (Schieflasten) und Spannungsbandverletzungen detektiert werden. Zu solchen Zuständen kam es jedoch im Bereich des Feldtests nicht. Die folgende Abbildung 35 veranschaulicht dazu die Spannungsmessung in der NS-Ebene. Dort ist in allen drei Diagrammteilen der Sensorwert auf der Ordinatenachse über der Zeit auf der Abszissenachse aufgetragen.

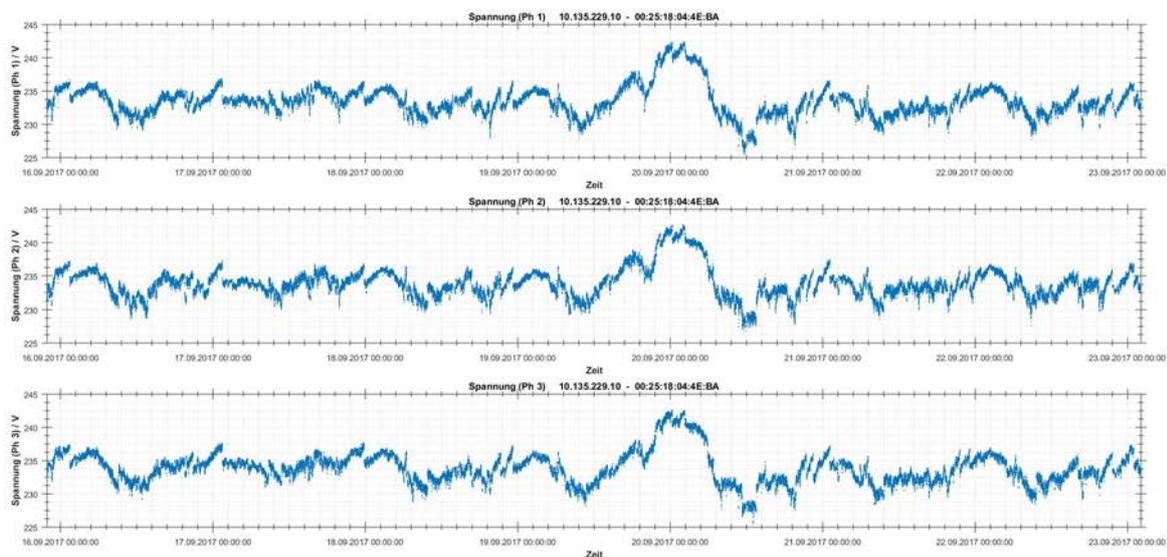


Abbildung 35: Spannungsmessung (oben: L1, mittig: L2, unten: L3) an einer NS-Verteilung über einen Zeitraum von ca. 7 Tagen in der Modellregion Bismarckstraße

In der MS-Ebene wurde nur einphasig (an L1) gemessen. Dennoch können anhand der Messwerte mit einfachen Mitteln Hinweise auf Spannungsbandverletzungen (Spannungssensoren) und zusätzlich auch auf Überlastungen (Stromsensoren) gewonnen werden. Unter Berücksichtigung der Annahme, dass Unsymmetrien im MS-Netz weitaus weniger verbreitet sind als im NS-Netz, können diese Messwerte mit einem Unsicherheitsfaktor auf die übrigen Phasen im Normalbetrieb (nicht bei Erdschlüssen) übertragen werden. Die Abbildung 36 zeigt exemplarisch den Verlauf von Spannung, Netzfrequenz und Stromstärke an einem MS-Schaltfeld.

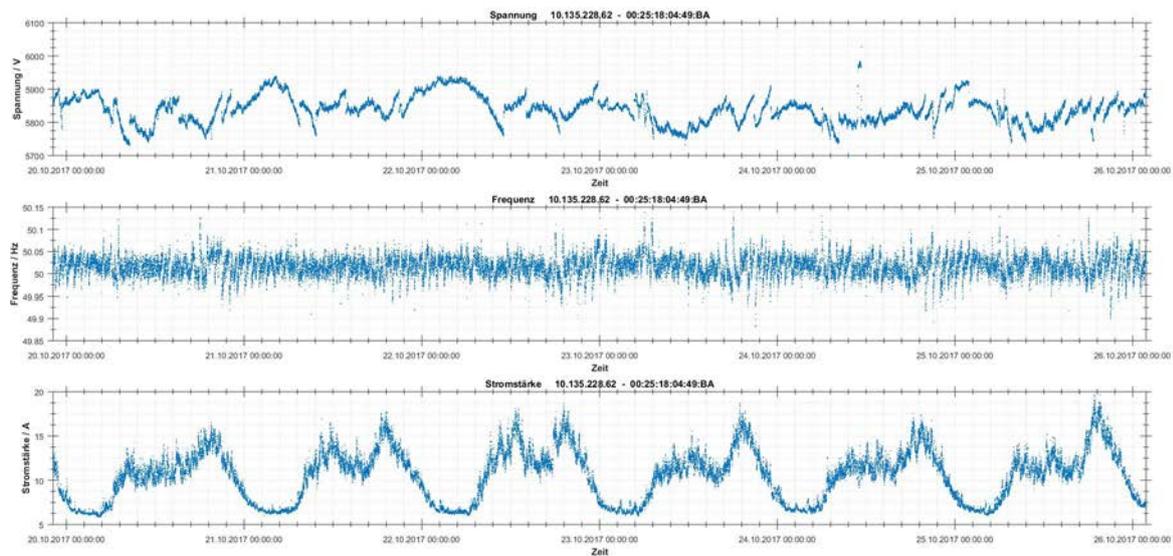


Abbildung 36: Spannung, Netzfrequenz und Stromstärke an einem MS-Schaltfeld in der Modellregion NBSO (MS-Netz) über einen Zeitraum von 6 Tagen.

2.1.10.6.6 Überlastung

Korrelationen mit der Stromstärke konnten in der MS-Ebene im Rahmen des Feldtests nicht nachgewiesen werden. Dies kann jedoch damit begründet werden, dass die Stromstärke stets sehr geringe Werte von nur bis zu 20 A annahm. In diesem Bereich ist die Erwärmung nur extrem gering. Zu beachten ist dabei, dass die Stromwärmeverlustleistung und damit auch die Temperaturerhöhung des Kabels quadratisch von der Stromstärke abhängig sind. Korrelationen zwischen BPL-Verbindungen und der Stromstärke können daher nur in Szenarien hoher Last/Einspeisung und den damit verbundenen hohen Temperaturänderungen erwartet werden. Wie in Kapitel 2.1.9.3.2 gezeigt wird, ist der Einfluss der Temperatur auf die Dämpfung und damit den SNR zu gering, um Änderungen von wenigen Grad Celsius zu detektieren, die mit geringen Stromstärken weit unterhalb des thermischen Grenzstroms einhergehen. Die Korrelation zwischen den BPL-Datenübertragungseigenschaften und der Stromstärke konnte in der NS-Ebene mangels Stromsensoren nicht untersucht werden. Zyklische Muster, wie sie in Abschnitt 2.1.10.6.1 im SNR detektiert wurden, werden zumindest was den Zeitverlauf anbelangt auch vom natürlichen Lastgang und damit von abwechselnd niedrigen und hohen Stromstärken erwartet. Der Einfluss auf den SNR sollte also ebenfalls zyklisch, aber homogener im Frequenzbereich verteilt sein, als das in Abbildung 25 (Fourier) der Fall ist, und im oberen Frequenzbereich tendenziell zunehmen.

2.1.11 Arbeitspaket 10: Technisch-wirtschaftliche Bewertung und Leitfaden

In diesem AP wurde die technische-wirtschaftliche und wissenschaftliche Verwertung und Veröffentlichung der Projektergebnisse behandelt. Für die technisch-wirtschaftliche

Verwertung wird auf das Kapitel 2.4 verwiesen. Die wissenschaftliche Verwertung mündete in mehreren Veröffentlichungen, weshalb hierzu zusätzlich auf Kapitel 2.6 verwiesen wird.

2.1.12 Arbeitspaket 11: Regulatorischer Rahmen

Das AP 11 schaffte einen Überblick über den geltenden regulatorischen Rahmen. Die Unterscheidung zwischen der „Analyse der aktuellen regulatorischen Rahmenbedingungen zur Erfassung von Netzzuständen“ im ersten Teil dieses AP 11 und der „Aufarbeitung von regulatorischen Datenschutz- und Datensicherheitsbestimmungen“ als zweites Teilarbeitspaket soll dazu dienen, einerseits einen Überblick über derzeit geltendes Recht zu geben und andererseits die Anforderungen des BSI-Schutzprofils an Datenschutz und Datensicherheit aufzuzeigen.

2.1.12.1 Analyse der aktuellen regulatorischen Rahmenbedingungen zur Erfassung von Netzzuständen

Grundlage der Recherche bildeten die folgenden Gesetze, Vorschriften, Richtlinien und Normen:

- Energiewirtschaftsgesetz (EnGW)
- Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)
- Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende (GDEW)
- Messstellenbetriebsgesetz (MsbG) (entspricht Artikel 1 des GDEW)
- Unfallverhütungsvorschrift (DGUV Vorschrift 2, ehemals BGV A3)
- DIN VDE V 0109-1 Vornorm-Entwurf von 2013-08-12.

Insbesondere im GDEW und dem EnGW werden die Netzzustandserfassung am Zähler, sowie die Zählerdatenerfassung präzise geregelt. So bestimmt das GDEW beispielsweise in § 52 (Allgemeine Anforderungen an die Datenkommunikation), dass „[aus] intelligenten Messsystemen stammende personenbezogenen Daten, Stammdaten und Netzzustandsdaten [nur] zwischen Teilnehmern an der Smart-Metering-Public-Key-Infrastruktur des Bundesamtes für Sicherheit in der Informationstechnik kommuniziert werden [dürfen]“. Darüber hinaus wird geregelt, dass die Kommunikation und die Übertragung von Daten stets im Wissen des Smart-Meter-Gateway-Administrators (GWA) zu erfolgen hat. Bevor Daten von Verteilungsnetzbetreibern, Energielieferanten und sonstigen Dritten angefordert, verarbeitet oder verwendet werden können, müssen dem GWA alle Informationen bereitgestellt werden, die für den Betrieb des SMGWs erforderlich sind. Insbesondere gehören dazu Informationen über die Berechtigung der Kommunikationsanfrage.

Auch die Erhebung von Netzzustandsdaten ist im GDEW geregelt. So besagt § 56 GDEW, dass diese nur in drei begründeten Fällen und vom Messstellenbetreiber nur im Auftrag des

Verteilungsnetzbetreibers erfasst werden dürfen. Ansonsten ist eine Erhebung ausschließlich dann erlaubt, wenn sie keine personenbezogenen Daten im Sinne des Bundesdatenschutzgesetzes darstellen. § 64 GDEW legt darüber hinaus fest, dass die vom Messstellenbetreiber erhobenen Netzzustandsdaten „automatisiert und zeitnah nach Maßgabe von § 56“ an den Verteilungsnetzbetreiber weitergegeben und im Falle von personenbezogenen Daten nach erfolgreicher Übermittlung umgehend gelöscht werden müssen.

Über die Erfassung von Anlagenzuständen durch den Verteilungsnetzbetreiber gibt es in den oben genannten Texten keine konkrete Formulierung. Die Erhebung technischer Anlagenzustände ist vor einem Ausfall der Anlagen nicht zwingend erforderlich. Der Verteilungsnetzbetreiber trägt lediglich die Verantwortung für die Festlegung von Instandhaltungsgrundsätzen und deren Überprüfung und Anpassung auf Grundlage von Erfahrungen aus dem Betrieb. Zwar reguliert die DIN VDE V 0109-1 als Vornorm die Instandhaltung energietechnischer Anlagen unter dem Gesichtspunkt der Verkehrssicherungspflicht, der Funktionssicherheit und des Werterhalts, allerdings sind keine Rahmenbedingungen bekannt, welche die Erfassung von Anlagenzuständen im Hinblick auf die Erhebung, Aufbereitung und Verwendung von Daten regeln.

Ebenso hat die Recherche ergeben, dass für die Erfassung des Netzzustands im Stromnetz keine Einschränkungen oder Regularien existieren. Der Verteilungsnetzbetreiber ist lediglich dazu verpflichtet, eine gewisse Versorgungsqualität zu gewährleisten. Anforderungen an die Erfassung von Zuständen sind dagegen regulatorisch nicht vorgegeben. Speziell in der NS-Ebene besteht aktuell nicht die Verpflichtung einer Überwachung bzw. Erfassung des Netzzustands. Es ist dem Verteilungsnetzbetreiber jedoch freigestellt, bspw. in Ortsnetzstationen Messeinrichtungen anzubringen, um die Versorgungsqualität mithilfe der gewonnenen Daten zu verbessern. Die Netzzustandserfassung am Kundenanschlusspunkt ist jedoch nur unter Berücksichtigung der oben erwähnten Gesetze (EEG, EnWG, GDEW, MsbG) möglich.

Auch für die Erfassung innerhalb von Ortsnetzstationen liegen keine Richtlinien oder Gesetze vor. Die jeweils geltenden Sicherheitsbestimmungen (z.B. DGUV Vorschrift 3) sind jedoch in allen aufgeführten Fällen zwingend einzuhalten.

2.1.12.2 Aufarbeitung von regulatorischen Datenschutz- und Datensicherheitsbestimmungen

Das BSI Schutzprofil (BSI-CC-PP-0073), sowie die Technische Richtlinie (TR-03109) stellen hohe Anforderungen, sowohl an den Datenschutz, als auch an die Datensicherheit für die Kommunikationseinheit eines intelligenten Messsystems, das sog. SMGW. Das GDEW fordert von allen beteiligten Marktakteuren die Einhaltung gewisser Sicherheitsstandards.

Da die im Rahmen von diesem Projekt erfassten Daten personenbezogene Informationen beinhalten können, die über gemessene Spannungen auf defekte Kundenanlagen oder Lastverläufe schließen lassen, ist es von besonderer Bedeutung, die Technische Richtlinie und das Schutzprofil in der jeweils gültigen Fassung einzuhalten. Demnach dürfen laut den §§ 19, 21 und 22 des MsbG als Messsysteme nur solche eingesetzt werden, die unter anderem eine sichere Kommunikationsverbindung nutzen, sowie die sichere Administration ermöglichen. Diese Funktionalität wird im Rahmen einer Zertifizierung durch das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik überprüft und eine Übersicht über die erfolgreich zertifizierten Geräte auf der Homepage des BSI veröffentlicht.

Die Technische Richtlinie (TR-03109) beschreibt einen Anwendungsfall zur Erfassung von Netzzustandsdaten und sieht dort die Bereitstellung von Statusinformationen von am SMGW angeschlossenen Zählern vor. Diese können entweder zyklisch oder beim Eintritt definierter Ereignisse an berechnete Marktteilnehmer versendet werden. Als berechnete Marktteilnehmer kommen im Rahmen dieses Anwendungsfalles insbesondere Verteilungsnetzbetreiber in Frage, die Daten zur Erfassung des Netzzustands erheben möchten. Vor der Übertragung findet zum Schutz der Letztverbraucher eine Pseudonymisierung der Daten statt, die bei entsprechender Zweckbindung allerdings auch umgangen werden kann. Zur Gewährleistung einer wirksamen Pseudonymisierung müssen die zunächst verschlüsselten und signierten Daten vom SMGW zunächst an den SMGW-Administrator versendet werden. Dieser entfernt die Signatur und leitet die weiterhin verschlüsselten Daten an den externen Marktteilnehmer weiter.

Für den Fall einer ereignisgetriebenen Übermittlung von Daten müssen vom SMGW mindestens die folgenden Ereignisse als Auslöser eines Sendevorgangs unterstützt werden:

- Veranlassung durch den SMGW-Administrator
- Schwellwertüberschreitung eines bestimmten Messwertes
- Schwellwertunterschreitung eines bestimmten Messwertes
- Statusinformationen von angeschlossenen Zählern, die die Übermittlung von Daten zur Folge haben. Es dürfen dabei nur solche Statusinformationen an externe Marktteilnehmer gesendet werden, die vom SMGW interpretiert werden können.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Insgesamt sind Ausgaben in Höhe von 395.515,93 € entstanden, wobei die Ausgaben gemäß Gesamtfinanzierungsplan in Höhe von 422.388 € nicht überschritten wurden.

Es wurden 247.272,11 € an Personalmitteln verwendet, wodurch die ursprünglich geplanten Personalausgaben in Höhe von 248.021 € nicht überschritten wurden.

Zur Erweiterung der für die Laborversuche erforderlichen Messtechnik im Hochspannungslabor der BUW wurden Messgeräte für insgesamt 128.264,21 € angeschafft, wodurch die ursprünglich geplanten Investitionen (Inland) in Höhe von 136.571 € ebenfalls nicht überschritten wurden.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Im Projekt wurden die Grundlagen einer neuen Möglichkeit zur Analyse von Netz- und Kabelzuständen einschließlich der preiswerten, kontinuierlichen Erfassung von dazugehörigen und deshalb betrieblich relevanten Daten gelegt und deren Umsetzung demonstriert. Die Forschungs- und Entwicklungsergebnisse erschließen die Verwendung der bei der BPL-Kommunikation vorhandenen Datenübertragungseigenschaften sowie kostengünstiger Sensoren und eröffnen eine neue und nachhaltige Infrastrukturlösung zur Zustandsdatenerfassung in NS- und MS-Netzen als Grundlage für die Netzbetriebsführung und das Asset-Management. Im Rahmen des Projekts wurde vielschichtig (Konzeption, Theorie, Laboruntersuchungen, Feldtest, Rahmenbedingungen) der Grundstein gelegt, diesen Sekundärnutzen der BPL-Technologie weiterzuentwickeln und die Forschungsarbeiten daran auszubauen. Der Verlauf der Arbeit im Projekt folgte der im Projektantrag formulierten Planung. Die durchgeführten Forschungsarbeiten sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da alle wesentlichen im Projektantrag formulierten Aufgaben bearbeitet wurden und keine zusätzlichen Ausgaben über den Gesamtfinanzierungsbedarf hinaus erforderlich waren.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

2.4.1 Wirtschaftliche Verwertbarkeit

Durch die Ergebnisse des Projekts ergeben sich weitere Ausgestaltungsmöglichkeiten im Bereich der Zustandsbewertung elektrischer Betriebsmittel in Zusammenarbeit mit Verteilungsnetzbetreibern, welche den Zustand von Kabeln mit konventioneller, kostenintensiver Messtechnik (wenn überhaupt) bisher nur in geringen Teilen ihrer Netze erfassen. Durch die Nutzung des Sekundäreffekts der BPL-Kommunikation und der Einbindung einfacher Sensoren im Rahmen dieses Projekts ist ein hohes Einsparungspotential anhand der kostengünstigen Auslegung zu erkennen, insbesondere wenn ohnehin der Einsatz von BPL-Kommunikation (zum Zweck der eigentlichen Kommunikation in einem Verteilungsnetz) geplant ist.

2.4.2 Wissenschaftliche und/oder technische Verwertbarkeit

Das Projekt zeigt erstmalig, dass ein Sekundärnutzen der Breitband-Powerline-Kommunikation zur Zustandserfassung genutzt werden kann. Die Laborversuche belegen,

dass die Alterung von Kabeln, TE sowie Temperatureinflüsse einen signifikanten Einfluss auf die Datenübertragungseigenschaften einer Breitband-Powerline-Kommunikation aufweisen und aus der Kommunikation heraus erkannt werden können. Bereits in einem (verglichen mit einer breiten Anwendung) kleinen Feldtest wurden massenhaft Daten gesammelt, was bei einer breiten Anwendung dieses Verfahrens – einschließlich dessen Einbindung in die Themenkomplexe der Netzzustandsüberwachung und des Asset-Managements eines Verteilungsnetzbetreibers – in Zukunft berücksichtigt werden muss. Die Feldtestergebnisse deuten darauf hin, dass eine zukünftig breitere Anwendung dieses Verfahrens auch dazu führen kann, weitere signifikante Erfahrungen, d. h. insbesondere weitere charakteristische Muster in den BPL-Datenübertragungseigenschaften zu ermitteln, da kritische Zustände grundsätzlich ein seltenes Phänomen darstellen. Zudem wurde die Integration von einfacher Messsensorik im Feldtest ebenfalls erfolgreich umgesetzt, mit der eine geeignete Möglichkeit zur Fernüberwachung und Erfassung kritischer Netzzustände in den MS- und NS-Netzen gegeben ist. Diese ist in den genannten Spannungsebenen aktuell selten gegeben, aber nimmt im Hinblick auf die Entwicklung hin zu zukunftsfähigen elektrischen Energieversorgungsnetzen an Wichtigkeit zu.

Mit diesem Projekt konnten neue Erkenntnisse vor allem in Bezug auf die Erfassung von Zuständen von Energiekabeln gewonnen werden. Die wissenschaftlichen Ergebnisse werden auch nach Projektende publiziert und fließen weiterhin in die Lehrveranstaltungen der Bergischen Universität Wuppertal am Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungstechnik ein. Die wissenschaftliche Verwertung mündete in mehreren Veröffentlichungen, weshalb hier zusätzlich auf Kapitel 2.6 dieses Dokuments verwiesen wird.

Damit die Ergebnisse zielorientiert genutzt werden, sollten an diese in weiteren Schritten angeknüpft werden. Dazu können die in diesem Projekt geschaffenen Erkenntnisse und Laboraufbauten genutzt werden, um z. B. in einem nachfolgenden Projekt mit dem Ziel einer breiten Anwendung des neuen Verfahrens neue Bewertungssystematiken für Instandhaltungs-, Erneuerungs- und Ausbaustrategien für das Asset-Management zu entwickeln. Dazu wäre bspw. die Entwicklung eines Expertensystems denkbar, das charakteristische Muster in den BPL-Datenübertragungseigenschaften aufnehmen, analysieren und auswerten kann.

Weiterhin würde sich eine Weiterentwicklung der Breitband-Powerline-Technologie anbieten, die es ermöglicht, weitere wichtige Parameter der Datenübertragungseigenschaften neben dem Signal-Rausch-Abstand und der Modulationsart zu extrahieren.

Hinsichtlich der gezeigten Detektionsfähigkeit kritischer Netzzustände bietet sich die Integration der Breitband-Powerline-Technologie einschließlich der kostengünstigen

Sensorik in die bestehenden Systeme zur Netzzustandsüberwachung an. Dabei sollte zukunftsweisend auch die Einbindung in dezentrale Netzautomatisierungssysteme angestrebt werden.

2.5 Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die Informationsrecherchen ergaben, dass einige Studien und Veröffentlichungen von dritter Stelle sich ebenfalls mit einem netzdienlichen Sekundärnutzen einer Breitband- (1,8 bis 30 MHz) bzw. auch Schmalband-Powerline-Kommunikation (10 bis 490 kHz) in Form von Simulationen und Modellierungen befassen:

- Fehlstellen in Niederspannungskabeln mit Hilfe von Kanalschätzungen in Schmalband-Powerline-Modems detektieren:
A. M. Lehmann, K Raab, F. Gruber, E. Fischer, R. Müller, J. B. Huber, A Diagnostic Method for Power Line Networks by Channel Estimation of PLC Devices, IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm): Communications, Networks and Architectures to Enable the Smart Grid, 2016.
- Water-treeing in VPE-Kabeln anhand der Übertragungsfunktion einer Breitband-Powerline-Kommunikation erkennen:
L. Förstel, L. Lampe, Grid Diagnostics: Monitoring Cable Aging Using Power Line Transmission, IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC), 2017.

Es sind jedoch keine Fälle bekannt geworden, dass Arbeiten – parallel zu den in diesem Projekt durchgeführten – mit vergleichbaren Umfängen und Resultaten (Theorie, Laborversuche, Feldtest) bei anderen Stellen durchgeführt wurden.

2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

2.6.1 Erfolgte, projektbezogene Veröffentlichungen

- Hopfer, N.; Beerboom, D.; Zdrallek, M.; Raquet, C.; Ronczka, M.; Dietzler, U.; Krampf, M.: **Einfluss von Kabelzuständen auf die Breitband-Powerline-Kommunikation in der Mittelspannungsebene**, Tagungsband zur VDE-Fachtagung „Hochspannungstechnik“, Berlin (2016)
- Auer, J.; Freudenmann, C.; Raquet, C.; Ronczka, M.; Hopfer, N.; Beerboom D.; Zdrallek, M.: **Fühler im Netz: Identifikation von Netz- und Anlagenzuständen mittels Analyse der Kanalcharakteristik der Breitband-Powerline Datenübertragung auf dem Stromnetz**, Tagungsband 4. OTTI-Konferenz „Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien“, Berlin (2017)

- Hopfer, N.; Zdrallek, M.; Dietzler, U.; Krampf, M.; Raquet, C.; Ronczka, M.; Rezaei, H.: **New approach for medium voltage power cable assessment using broadband powerline communications**, The 20th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2017), Buenos Aires, Argentina (2017)
- Hopfer, N.; Zdrallek, M.; Dietzler, U.; Krampf, M.; Raquet, C.; Ronczka, M.; Rezaei, H.: **Identification of Power Cable Conditions Based on Broadband Powerline Communication Characteristics in Distribution Grids**, Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering (ELEKTROENERGETIKA 2017), Stará Lesná, Slovakia (2017)

2.6.2 Geplante, projektbezogene Veröffentlichungen

- Hopfer, N.; Zdrallek, M.; Dietzler, U.; Krampf, M.; Raquet, C.; Karl, F.; Ronczka, M.; Rezaei, H.: **Breitband-Powerline-Technologie zur Zustandserfassung in Verteilungsnetzen**, Tagungsband zur VDE-Fachtagung „Hochspannungstechnik“, Berlin (2018)
- Hopfer, N.; Zdrallek, M.; Raquet, C.; Karl, F.; Dietzler, U.; Rezaei, H.: **Überwachung von Netz- und Anlagenzuständen durch Powerline**, ew – Magazin für die Energiewirtschaft, voraussichtlich Ausgabe 06/2018
- Rezaei, H.; Hopfer, N.; Zdrallek, M.; Krampf, M.; Dietzler, U.; Raquet, C.: **New Approach for Online Monitoring of Power Cable Condition in Distribution Networks Using Broadband Powerline**, Proceedings of the XI Conference on Electricity Distribution of Serbia (CIRED Serbia), Kopaonik, Serbia (2018)

3 Literaturverzeichnis

- [1] Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN), „Inbetriebnahmeprüfung von Mittelspannungskabelanlagen: Technischer Hinweis,“ Berlin, 2013.
- [2] A. Küchler, Hochspannungstechnik: Grundlagen - Technologie - Anwendungen, 3. Auflage, Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [3] Natational Electric Energy Testing Research & Applications Center (NEETRAC), „Diagnostic Testing of Underground Cable Systems (Cable Diagnostic Focused Initiative),“ USA, Atlanta, 2010.
- [4] N. Neusel-Lange, Dezentrale Zustandsüberwachung für intelligente Niederspannungsnetze (Neue Energie aus Wuppertal, Band 1), Berlin: epubli GmbH, 2013.
- [5] IEEE Standards Association, „IEEE Std 1901-2010 - IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications,“ 2010.
- [6] Latchman, H. et al., Homeplug AV and IEEE 1901, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- [7] K.-D. Kammeyer, Nachrichtenübertragung, 4. Auflage, Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2008.
- [8] H. Philipps, „Performance Measurements of Powerline Channels at high Frequencies,“ Proceedings 1998 International Symposium on Power-line Communications and its Applications (ISPLC), Tokio, Japan, 1998.
- [9] Li, Y. et al., „Power Cable Joint Model: Based on Lumped Components and Cascaded Transmission Line Approach,“ International Journal on Electrical Engineering and Informatics. Vol. 4, No. 4, 2012.
- [10] J. Anatory und N. Theethayi, Broadband Power-line Communication Systems: Theory and Applications, Southampton, UK: WIT Press, 2010.
- [11] S. Lee, D. Shin, Y. Kim, J. Lee und K. Eom, „Measurments and Modelling of Noise on 22.9-kV Medium-Voltage Underground Power Line for Broadband Power Line Communication,“ Proceedings Security-Enriched Urban Computing and Smart Grid

- (SUCoS, Korea, Daejon, 2010), Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 2010.
- [12] O. Zinke und H. Brunswig, Hochfrequenztechnik 1: Hochfrequenzfilter, Leitungen, Antennen, 6. Auflage, Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2000.
- [13] G. Mugala, „High Frequency Characteristics of Medium Voltage XLPE Power Cables,“ Doctoral Thesis, KTH Royal Institute of Technology, 2005.
- [14] K. Steinbrich, „Untersuchungen zum frequenzabhängigen Übertragungsverhalten von Energiekabeln,“ Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2005.
- [15] A. Cataliotti, A. Daidone und G. Tiné, Power Line Communication in Medium Voltage Systems: Characterization of MV Cables, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23. No. 4, 2008.
- [16] G. Schmidt, Differenzierte Schädigungs- und Alterungsdiagnose als Grundlage für ein zielgerichtetes Asset-Management im polymerisierten Mittelspannungskabelnetz, Köln: Kölner Wissenschaftsverlag, 2009.
- [17] Y. Li, P. Wouters, P. Wagenaars, P. van der Wielen und E. Steenis, „Detection of Water Ingress in PILC Cable Based on Change in Characteristic Impedance,“ Proceeding of The 19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2015), Tschechische Republik, Pilsen, 2015.
- [18] G. Hoff, Optimierung und Grenzen der technischen Diagnostik am Beispiel der Altersbestimmung polymerisierter Mittelspannungskabel, Aachen: Shaker Verlag, 2003.
- [19] N. Hopfer, D. Beerboom, M. Zdrallek, C. Raquet, M. Ronczka, U. Dietzler und M. Krampf, „Einfluss von Kabelzuständen auf die Breitband-Powerline-Kommunikation in der Mittelspannungsebene,“ Tagungsband zur VDE-Fachtagung "Hochspannungstechnik", Berlin, 2016.
- [20] K. Gupta, R. Garg und R. Chadha, Computer-Aided Design of Microwave Circuits, USA, Massachusetts, Dedham: Artech House, 1981.
- [21] N. Hopfer, M. Zdrallek, U. Dietzler, M. Krampf, C. Raquet und M. Ronczka, „New Approach for medium voltage power cable assessment using broadband powerline communications,“ Proceedings of The 20th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2017), Argentinien, Buenos Aires, 2017.

- [22] D. König und R. Y. N., Teilentladungen in Betriebsmitteln der Energietechnik, Berlin: VDE-Verlag GmbH, 1993.
- [23] R. Porzel, E. Neudert und M. Sturm, Diagnostik der Elektrischen Energietechnik, Renningen-Malmsheim: expert verlag, 1996.
- [24] Y. Ma, P. So und E. Gunawan, „Performance Analysis of OFDM Systems for Broadband Power Line Communications Under Impulsive Noise and Multipath Effects,“ IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 20, No. 2, 2005.
- [25] H. C. Ferreira, L. Lampe, J. Newbury und T. G. Swart, Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband an Broadband Communications over Power Lines, UK, Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2010.
- [26] F. Garnacho, A. Khamlichi, J. Ortego und F. Álvarez, „PD Approach for On-line PD Monitoring of Cable Systems Using the Minimum Number of PD Sensors,“ Proceedings of The 20th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2017), Argentinien, Buenos Aires, 2017.
- [27] „DIN VDE 0276-620:2010-11,“ 2010.
- [28] S. Harnisch, P. Steffens, H. H. Thies, J. Monscheidt, L. Münch, C. Böse, B. Gemsjäger und M. W. Zdrallek, Planungs- und Betriebsgrundsätze für landliche Verteilungsnetze – Leitfaden zur Ausrichtung der Netze an ihren zukünftigen Anforderungen (Neue Energie aus Wuppertal, Band 8), 2016.
- [29] R. Papazyan und R. Eriksson, Calibration for Time Domain Propagation Constant Measurements on Power Cables, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol. 52, No. 2, 2003.
- [30] R. Papazyan, P. Petterson, H. Edin, R. Eriksson und U. Gäfvert, Extraction of High Frequency Power Cable Characteristics from S-Parameter Measurements, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 11, No. 3, 2004.
- [31] R. Heinrich, S. Bönisch, D. Pommerenke, R. Jobava und W. Kalkner, Broadband Measurement of the Conductivity and the Permittivity of Semiconducting Materials in High Voltage XLPE Cables, Eighth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications (IEE Conf. Publ. No. 473), 2000.
- [32] J. Wait und D. Hill, On the Electromagnetic Field of a Dielectric Coated Coaxial Cable with an Interrupted Shield, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. Ap-23,

No. 3, pp. 470-479, 1975.

[33] E. Kuhnert und F. Wiznerowicz, Eigenschaften von Energiekabeln und deren Messung, 3. Auflage, Frankfurt am Main: EW Medien und Kongresse GmbH, 2012.

[34] N. Hopfer, M. Zdrallek, U. Dietzler, M. Krampf, C. Raquet und M. Ronczka, „Identification of power cable conditions based on broadband powerline communication characteristics in distribution grids,“ ELEKTROENERGETIKA, Slowakei, Stará Lesná, 2017.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Fühler im Netz – Wissenschaftliche Analyse und Laborversuche zu Detektionsmöglichkeiten von Netzzuständen	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Hopfer, Nikolai Univ.-Prof. Dr.-Ing Zdrallek, Markus	5. Abschlussdatum des Vorhabens Oktober 2017
	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Bergische Universität Wuppertal, Gaußstraße 20, 42119 Wuppertal	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 03EK3540B
	11. Seitenzahl 82
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 34
	14. Tabellen 9
	15. Abbildungen 36
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Das primäre Ziel dieses Projekts war die systematische Feststellung und Untersuchung der Nutzbarkeit eines Sekundäreffekts der Breitband-Powerline-(BPL)Kommunikation in Mittel- und Niederspannungsnetzen, um neben der eigentlichen Kommunikationsaufgabe dieser Technologie mit geringem Kosteneinsatz wertvolle Rückschlüsse auf den Zustand des zur Datenübertragung genutzten Netzes sowie der dort befindlichen Anlagen ziehen zu können. Dabei wurden auch zusätzliche, kostengünstige Sensoren sowie Ankopplungslösungen entwickelt, um zusätzliche Messdaten, die mit der BPL-Kommunikation nicht erhoben werden können, zu generieren. Ergänzend wurde ein Analysetool entwickelt, um die generierten Sensor- und BPL-Daten hinsichtlich der Zustandserfassung auf Basis der bis dahin gewonnenen Erkenntnisse auswerten zu können. Bei der anfänglichen Definition und Priorisierung relevanter kritischer Netz- und Anlagenzustände und der Analyse der Auswirkungen auf die Netzbetriebsführung wurden neben den herkömmlichen bereits auch zukünftige Netzstrukturen betrachtet. Auf diesen Grundlagen wurde differenziert und auf Basis theoretischer Analysen untersucht, welche Netz- und Anlagenzustände anhand der Datenübertragungseigenschaften der BPL-Kommunikation grundsätzlich erfasst werden können und welche dieser Zustände eine zusätzliche, kostengünstige Messsensorik erfordern. Die Ankopplung der Hardware an die vorhandenen Netzelemente sowie die Einbindung der erfassten Netzzustände in den Netzbetrieb waren ebenfalls Bestandteil dieses Projekts. Wesentliche Zusammenhänge zwischen den BPL-Datenübertragungseigenschaften und den Zuständen wurden zudem im Rahmen von ausgedehnten Laborversuchen und in einem Feldtest u. a. mit Hilfe eines entwickelten Analysetools in ausgewählten Netzen der Energieversorgung Leverkusen GmbH & Co. KG aufgezeigt.	
19. Schlagwörter Breitband-Powerline-Kommunikation, Sensoren, Zustandserfassung, Netzzustand, Anlagenzustand, Kabel, Verteilungsnetz	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) report
3. title Fühler im Netz – Wissenschaftliche Analyse und Laborversuche zu Detektionsmöglichkeiten von Netzzuständen	
4. author(s) (family name, first name(s)) Hopfer, Nikolai Univ.-Prof. Dr.-Ing Zdrallek, Markus	5. end of project October 2017
	6. publication date planned
	7. form of publication report
8. performing organization(s) (name, address) Bergische Universität Wuppertal, Gaußstraße 20, 42119 Wuppertal	9. originator's report no.
	10. reference no. 03EK3540B
	11. no. of pages 82
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 34
	14. no. of tables 9
	15. no. of figures 36
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract <p>The primary objective of this project was to systematically identify and investigate the usefulness of a secondary effect of broadband powerline (BPL) communication in medium and low voltage grids, in addition to the communication task of this technology, to draw valuable conclusions in a cost effective manner about the state of the grid and the conditions of assets that are located there and used for data transmission. Furthermore, additional low-cost sensors and coupling solutions have been developed to generate additional measurement data that cannot be obtained with BPL communication. In addition, an analysis tool was developed in order to evaluate the generated sensor and BPL data with regard to the condition detection on the basis of the knowledge gained so far.</p> <p>In the initial definition and prioritization of relevant critical grid states and asset conditions the analysis of their effects on distribution grid operation management in conventional and future grid structures were considered. On the basis of theoretical analyzes, it was differentiated which grid states and asset conditions can be detected by means of the data transmission properties of the BPL communication and which of those require additional, cost-effective sensors for measuring. The coupling of the hardware to the existing grid as well as the integration of the detected grid states and asset conditions into different topics of grid operation were also part of this project. Significant correlations between the BPL data transfer properties and the asset conditions have also been found in extensive laboratory tests and field tests and with the support of a developed analysis tool in selected parts of the distribution grid in Leverkusen, Germany (Energieversorgung Leverkusen GmbH & Co. KG).</p>	
19. keywords broadband power-line communication, sensors, state detection, grid state, asset condition, power cable, distribution grid	
20. publisher	21. price