

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Smart Grids als Anwendungsbereich für Powerline Kommunikation	2
1.2	Zielsetzung und Struktur der Arbeit	3
2	Stand der Technik	7
2.1	Smart Grids – Funktionen und Dienste	7
2.1.1	Energieerzeugung	7
2.1.2	Energieverbrauch	9
2.1.3	Energieverteilung und Energiemehrwertdienste . .	10
2.1.4	Anforderungen an Kommunikationssysteme zur Vernetzung intelligenter Energiemengenzähler . .	10
2.2	PLC-Kommunikationssysteme in AMI-Systemarchitekturen	12
2.2.1	Komponenten einer AMI-Systemarchitektur und deren Interaktion	13
2.2.2	Dienste und Funktionen einer AMI-Systemarchitektur	14
2.3	Schichtenmodell und Prinzip der paketorientierten Datenübertragung	16
2.3.1	Vorschlag einer Protokoll-Struktur für PLC-Kommunikationssysteme zur Realisierung von AMI	19
2.3.2	Protokolle der Internet-Protokoll-Suite und damit verbundener zusätzlicher Übertragungsaufwand .	25
2.3.3	Mögliche Protokollstacks für AMI	30
2.3.4	Modell der Bitübertragungsschicht	33
2.4	Existierende PLC-Übertragungstechnologien	37
2.4.1	IEC 61334-5-1	41
2.4.2	PLC G3	44
2.4.3	Powerline Intelligent Metering Evolution (PRIME)	51
2.4.4	OFDM-Übertragungssystem zu Forschungszwecken	57
2.4.5	Diskussion und Vergleich der Übertragungstechnologien	60

2.5	Regulierung der Signaleinspeisung für Powerline Kommunikation	65
2.5.1	Regulierung in Europa und Deutschland	65
2.5.2	Regulierung außerhalb der EU	69
2.5.3	Für weitere Betrachtungen relevante Vorgaben zur Signaleinspeisung	71
3	Modellierung und Analyse der Eigenschaften des Übertragungs-	73
	kanals	
3.1	Topologie des Niederspannungsnetzes als Übertragungs-	73
	medium für PLC	
3.2	Modell des PLC-Übertragungskanal	74
3.2.1	Modellierung der physikalischen Parameter	75
3.2.2	Leitungseigenschaften	76
3.2.3	Netzzugangsimpedanz	77
3.2.4	Übertragungsfunktion	79
3.2.5	Additive Störsignale	80
3.3	Analyse von PLC-Störszenarien, Vergleich mit Eigenschaf-	83
	ten des AWGN-Kanals	
3.3.1	Statistische Eigenschaften des AWGN-Kanals und	83
	Vergleich mit PLC-Störszenarien	
3.3.2	Analyse der statistischen Eigenschaften exemplari-	84
	scher Realisierungen des PLC-Störszenarios	
4	Regelmäßigkeiten und Ortsabhängigkeit der Eigenschaften des	97
	PLC-Störszenarios	
4.1	Schritte bei der Verarbeitung des gemessenen Signals	98
4.1.1	Aufteilen der Messdaten	100
4.1.2	Berechnung von Störsignalleistung und Störleis-	102
	tungsdichte	
4.1.3	Segmentierung in Impuls und Hintergrundstörung	103
4.1.4	Bestimmung der Schwellwerte	104
4.1.5	Aggregation der gewonnenen Parameter	108
4.2	Langzeit-Untersuchung eines Netzes	109
4.2.1	Statistik der Signalleistung im Zeit- und Frequenz-	111
	bereich	
4.2.2	Zusammenfassung der Ergebnisse der Analyse	113
5	Grundlagen für die Parametrierung und den Vergleich von Mo-	123
	dulationsverfahren	

5.1	Grundlagen zu Modulationsverfahren	123
5.1.1	Signalraumdarstellung von Übertragungssignalen und Störsignalen	124
5.1.2	Probabilistische Beschreibung der Symbolentscheidung	125
5.1.3	Symbolenergie, Bitenergie und Signalleistung	129
5.1.4	Voraussetzungen für zuverlässige Datenübertragung	130
5.1.5	Signalübertragung im Bandpass-Bereich	130
5.2	Formale Beschreibung ausgewählter Modulationsarten	132
5.2.1	Quadratur-Amplituden-Modulation	134
5.2.2	Amplitudenumtastung	135
5.2.3	Phasenumtastung	136
5.2.4	Differentielle Phasenumtastung	137
5.2.5	Bewertungskriterien für Modulationsverfahren	140
5.3	Mehrträgermodulationsverfahren	141
5.3.1	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	143
5.3.2	Wavelet-Packet-Modulation	149
5.3.3	Datenübertragung mittels Wavelet Packets	159
5.3.4	Parametrierung der Wavelet-Packet-Modulation	162
6	Parametrierung der zu vergleichenden Mehrträger-Modulations- verfahren	167
6.1	OFDM für PLC-Übertragungssysteme	167
6.1.1	Konfiguration des realen Übertragungssystems	169
6.1.2	Konfiguration des Simulationsmodells	169
6.1.3	Leistungsdichtespektrum, mittlere Leistungsdichte und Signalenergie	170
6.2	WPM für PLC-Übertragungssysteme	173
6.2.1	Wahl der Wavelet-Familie	174
6.3	Signaldetektion und Synchronisation für OFDM	175
6.3.1	Rahmensynchronisation mittels Präambeln	179
6.3.2	Präambel-Signalform und Detektionsverfahren	180
6.3.3	Vergleich der Verfahren zur Rahmensynchronisation	186
7	Evaluation von Übertragungssystemen bei Datenübertragung über PLC-Kanäle	191
7.1	Randbedingungen für die Evaluation und Vorgehensweise	192
7.1.1	Mögliche Ansätze für die Evaluation von PLC- Systemen	192

7.2	Integriertes Datenübertragungs- und Signalerfassungs-System	194
7.2.1	Quantisierungsrauschen	197
7.3	Beschreibung des Simulationsmodells zur realitätsnahen Evaluation	199
7.3.1	Eigenschaften der betrachteten Störszenarien	203
7.4	Ergebnisse der Evaluation durch Simulation	210
7.4.1	Vergleich verschiedener Subträger-Modulationsarten für OFDM	212
7.4.2	Vergleich von OFDM und WPM	217
7.5	Ergebnisse der System-Evaluation an realen Übertragungskanälen	228
7.5.1	Vorgehensweise zur Systemverifikation am realen Netz	229
7.5.2	Eigenschaften der bei der Datenübertragung über reale Niederspannungsnetze angetroffenen Störszenarien	231
7.5.3	Bitfehler und falsch detektierte Datenrahmen	233
7.6	Parameterwahl für OFDM-Systeme zur Steigerung der Zuverlässigkeit	238
7.6.1	Kanalkapazität in Abhängigkeit von OFDM-Systemparametern	241
7.6.2	Kanalkapazität unter dem Einfluss von PLC-Störszenarien	242
7.6.3	OFDM-Parameterkonfigurationen zur Steigerung der Zuverlässigkeit der Datenübertragung	244
8	Verallgemeinertes Kriterium zur Auswahl geeigneter Modulationsverfahren	251
8.1	Formulierung des Matched-Filter-Empfängers für AWGN	252
8.2	Formulierung des Matched-Filter-Empfängers für beliebige Störleistungsdichten	253
8.2.1	Ansatz zur Optimierung des SNR	256
8.3	Alternativer Systementwurf mit Frequenzumtastung	257
8.3.1	Signalformen und Bitfehlerwahrscheinlichkeit für inkohärente Frequenzumtastung	258
8.3.2	Parameterwahl und Vergleich mit OFDM	258
9	Zusammenfassung	263

A	Detaillierte Auswertung zur Analyse des Störszenarios	269
A.1	Analyse des Störszenarios für Mess-Ort A	269
A.2	Analyse des Störszenarios für Mess-Ort B	278
A.3	Analyse des Störszenarios für Mess-Ort C	285
B	Kanalkapazität und Symbolenergie für verschiedene OFDM-Systemparameter	303
B.1	Approximation der Bandbreiten von OFDM-Symbolen und -Subträgern	304
B.1.1	Bandbreite eines OFDM-Symbols	304
B.1.2	Bandbreite eines OFDM-Subträgers	305
B.2	Abschätzung der Kanalkapazität	306
B.3	Abschätzung der Symbolenergie je Subträger	309
C	Einfluss von Störsignalen auf die Phasendifferenz	311
D	Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole	313
D.1	Lateinische Symbole	313
D.2	Griechische Symbole	322
	Literaturverzeichnis	323
	Eigene Veröffentlichungen	328
	Betreute Diplom- und Studienarbeiten	330