

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Kommunikation auf Energieversorgungsnetzen	4
1.3 Stand der Technik	6
1.4 Ziele und Gliederung der Arbeit	9
2 Analyse der Kanaleigenschaften des Energieversorgungsnetzes	13
2.1 Kanalmodell	14
2.2 Übertragungsdämpfung von Niederspannungsleitungen	15
2.2.1 Eigenschaften der Energieversorgungskabel	16
2.2.2 Untersuchung der Netzzugangsimpedanz	19
2.2.3 Amplitudengang	24
2.3 Störumgebung	25
2.3.1 Farbiges Hintergrundrauschen	27
2.3.2 Schmalbandstörer	28
2.3.3 Impulsstörer	29
2.4 Simulationsmodell der Kanaleigenschaften	36
2.4.1 Modellierung der Übertragungsfunktion von PLC-Kanälen	36
2.4.2 Modellierung des Störszenarios	38
2.4.3 Referenzszenarien	46
2.5 Emulation der Netzeigenschaften	47
2.6 Zusammenfassung	49
3 Regulierung und Normierung	51
3.1 Die CENELEC-Norm EN 50065	52
3.1.1 Normierung der Frequenzbänder	52
3.1.2 Klassifizierung der Betriebsmittel	54
3.1.3 Störgrenzwerte	58
3.2 Analyse der Norm EN 50065	59
3.2.1 Netznachbildung und Zugangsimpedanz	59
3.2.2 Bandbreite, Ausgangspegel und resultierende Leistung	60
3.3 Zusammenfassung	62
4 Entwurf eines OFDM-basierten PLC-Systems	65
4.1 Physikalische Nachrichtenübermittlung	66

4.2	Das Mehrträgerverfahren OFDM	69
4.2.1	Struktur von OFDM-Sender und -Empfänger	71
4.2.2	Intersymbol- und Interkanalinterferenz	75
4.2.3	Zyklische Schutzintervalle	76
4.2.4	Übertragungsrate und spektrale Effizienz	78
4.2.5	Modulation der Unterträger	80
4.3	Synchronisation	82
4.3.1	Methoden der Symbolsynchronisation	83
4.3.2	Klassische Verfahren der Symboltaktückgewinnung	85
4.3.3	Nulldurchgangsdetektion	89
4.4	Konzeption eines neuartigen PLC-Systems	106
4.4.1	OFDM-basierter digitaler Systementwurf	108
4.4.2	Analoges Frontend und Sendeendstufe	117
4.5	Zusammenfassung	119
5	Konzeption einer automatischen Verstärkungsregelung	121
5.1	Grundstruktur der AGC	122
5.2	Erweiterung der Grundstruktur	127
5.3	Simulation der automatischen Verstärkungsregelung	130
5.4	Implementierung und Test der AGC	134
5.5	Zusammenfassung	137
6	Untersuchung von Kanalcodierungs- und ARQ-Verfahren	139
6.1	Kanalbedingte Fehlermuster	140
6.1.1	Untersuchung der Fehlermuster	140
6.1.2	Einfluss der Parameter des Kommunikationssystems	141
6.1.3	Einfluss des Störszenarios	143
6.2	Grundlagen der Kanalcodierung	146
6.2.1	Blockcodes	147
6.2.2	Faltungscodes	150
6.2.3	Interleaving-Verfahren	153
6.3	ARQ-Verfahren	154
6.4	Simulationsergebnisse	158
6.4.1	Uncodiertes OFDM-System	159
6.4.2	BCH-codiertes OFDM-System	160
6.4.3	Faltungscodiertes OFDM-System	163
6.4.4	Interleaving-Verfahren	167
6.4.5	OFDM-System und ARQ-Verfahren	170
6.4.6	Vergleich von FEC- und ARQ-Verfahren	173
6.5	Zusammenfassung	175

7 Analyse der Prototypen des PLC-Systems	177
7.1 Implementierung der Prototypen	178
7.2 Parameter des Testsystems und Referenzkanäle	181
7.3 Ergebnisse der Messreihen	184
7.4 Zusammenfassung	188
8 Zusammenfassung	191
9 Literaturverzeichnis	195
Anhang A: Messung und Untersuchung der Netzzugangsimpedanz	207
Anhang B: Parameter der Störklassen	211
Anhang C: CORDIC-Algorithmus	215
Anhang D: Verzeichnis der Formelzeichen	219
Anhang E: Abkürzungsverzeichnis	225