

Inhalt

1 Einleitung und Stand der Technik	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Historie und Stand der Technik	3
1.2.1 Historie	3
1.2.2 Stand der Technik	4
1.3 Struktur des Energieversorgungsnetzes	5
1.3.1 Die Ortsnetzzelle	5
1.3.2 In- und Außerhauskommunikation	6
1.4 Grundlegender Aufbau und Klassifizierung von Übertragungssystemen	7
1.5 Mögliche Mehrfachzugriffsprinzipien für die Übertragung im HF-Band	8
2 Das Stromnetz als Kommunikationskanal	11
2.1 Dämpfungscharakteristik von Niederspannungsleitungen	11
2.1.1 Aufbau von Energieversorgungskabeln	11
2.1.2 Kabeldämpfung	12
2.1.3 Reflexionen und Hausanschlussimpedanzen	13
2.1.4 Dämpfungsverlauf im NF-Band	14
2.1.5 Dämpfungsverlauf im HF-Band	17
2.2 Klassifizierung der Störungen auf dem Stromnetz	18
2.3 Farbiges Hintergrundrauschen	19
2.4 Stationäre dominante Störungen	19
2.4.1 Breit- und schmalbandiges Rauschen	20
2.4.2 Einzeltonstörer	20
2.4.3 Rundfunksender als Schmalbandstörer	21
2.4.4 Störspektren und Übertragungsqualität typischer Strecken	23
2.5 Impulsstörungen	27
2.5.1 Periodische Impulsstörungen	27
2.5.2 Aperiodische Impulsstörungen	31
2.5.3 Modell aperiodischer Impulsstörungen	31
2.6 Verteilungsdichte von Kanalstörungen im NF-Band	35
2.6.1 Interpretation der Histogramme für aperiodische Impulsstörungen	36
2.7 Zusammenfassung	37
3. Elektromagnetische Verträglichkeit	39
3.1 Norm CENELEC EN 50065	39
3.2 Sinnvolle Begrenzungen für die Funkabstrahlung von PLC-Systemen	41
3.2.1 Verfahren zur Messung der abgestrahlten Feldstärke	41
3.2.2 Zusammenhang zwischen abgestrahlter Feldstärke und Signalpegel auf der Leitung	42

3.2.3 Verwendung von speziellen Filtern	42
3.3 Einfluß der EMV-Richtlinien auf die erlaubte Sendeleistung	44
3.3.1 Begrenzung des Signalpegels	44
3.3.2 Begrenzung des Signalspektrums	45
3.3.3 Darstellung der Ergebnisse	52
3.3.4 Schlußfolgerungen	54
3.4 Zusammenfassung	54
4. Analyse der Störwirkung verschiedener Störungsarten auf einen einfachen Empfänger	55
4.1 Einzeltonstörer	55
4.1.1 Bestimmung der Bitfehlerraten für BPSK und QPSK	56
4.1.2 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse	60
4.2 Schmalbandiges Rauschen	61
4.2.1 Erster Fall: Die Störbandbreite B_f ist viel kleiner als die Symbolrate r_s	62
4.2.2 Zweiter Fall: Die Störbandbreite B_f ist viel größer als die Symbolrate r_s , und viel größer als der Frequenzabstand Δ_f	64
4.2.3 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse	65
4.3 Periodische Impulsstörung	66
4.3.1 Spezialfall: $T_s \gg T_{imp}$	69
4.3.2 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse	73
4.4 Aperiodische Impulsstörungen	74
4.4.1 Erster Fall: $T_s \gg T_{imp}$	74
4.4.2 Zweiter Fall: $T_s \ll T_{imp}$	76
4.4.3 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse	76
4.5 Zusammenfassung	78
5. Übertragung mit spektraler Redundanz	79
5.1 Übertragung mit Diversity	79
5.1.1 Mathematische Modellierung	80
5.1.2 Idealer Maximal-Ratio-Combiner für Diversity	81
5.1.3 Realer Maximal-Ratio-Combiner für Diversity	83
5.1.4 Maximal-Ratio-Combiner mit Kanalkodierung für Diversity	83
5.2 Frequency-Hopping	85
5.2.1 Mathematische Modellierung	87
5.2.2 Idealer Maximal-Ratio-Combiner für FH	88
5.2.3 Maximal-Ratio-Combiner mit Impulsauslösung für FH	89
5.3 Modifiziertes Frequency-Hopping	91
5.3.1 Mathematische Modellierung	93
5.3.2 Maximal-Ratio-Combiner für MFH	94
5.3.3 Maximal-Ratio-Combiner mit Impulsauslösung für MFH	96

5.4 Vergleich der Verfahren bei farbigem Rauschen und frequenzselektiver Dämpfung	98
5.4.1 Berechnung der Bitfehlerrate	98
5.4.2 Darstellung der Ergebnisse	101
5.5 Leistungsfähigkeit der Verfahren bei Impulsstörungen	103
5.5.1 Alternative Algorithmen zum MRC-IE für MFH	104
5.5.2 Leistungsfähigkeit von MFH bei Impulsstörungen	105
5.5.3 Leistungsfähigkeit von FH/MRC-IE bei Impulsstörungen	109
5.6 Maximale Sendeleistung gemäß Norm CENELEC EN 50065	111
5.6.1 Begrenzung des Signalpegels	112
5.6.2 Begrenzung des Signalspektrums	113
5.6.3 Darstellung der Ergebnisse	115
5.7 Zusammenfassung	116
6. Breitbandige Einzelträgerübertragung	117
6.1 Systemaufbau	117
6.2 Sendefilter	119
6.3 Empfangsfilter	119
6.3.1 Matched-Filter für farbiges Rauschen	120
6.3.2 Suboptimales Empfangsfilter	122
6.3.3 Vergleich beider Empfangsfilter	122
6.3.4 Schlußfolgerungen	126
6.4 Verfahren zur Kanalentzerrung	127
6.4.1 Grundlagen zur linearen Entzerrung	127
6.4.2 Entzerrung mit Entscheidungsrückkopplung	133
6.4.3 T- und T/2-Entzerrung	137
6.4.4 Praktische Umsetzung eines linearen Entzerrers	139
6.4.5 Praktische Umsetzung des DFE	142
6.5 Verfahren gegen Impulsstörungen	143
6.5.1 Nutzung von Kanalzustandsinformationen	143
6.5.2 Mögliche Verfahren zur Kanalkodierung	144
6.5.3 Impulsdetektor	145
6.6 Maßnahmen zur Minderung von Folgefehlern beim DFE	148
6.7 Simulationsergebnisse	150
6.7.1 Vergleich bei schmalbandigem Rauschen und verzerrungsfreiem Kanal	151
6.7.2 Einfluß der Codierung bei weißem Rauschen und verzerrungsfreiem Kanal	154
6.7.3 DFE bei weißem Rauschen und verzerrendem Kanal	155
6.7.4 DFE bei farbigem Rauschen und Impulsstörungen	155
6.8 Zusammenfassung	156

7. Multi-Träger-Übertragung	159
7.1 Grundlegender Aufbau	159
7.1.1 Aufbau eines OFDM-Senders	161
7.1.2 Aufbau eines OFDM-Empfängers	163
7.2 Intersymbol- und Interkanal-Interferenzen	164
7.2.1 Vermeidung von ISI und ICI durch ein Schutzintervall	164
7.2.2 Nachteile des Schutzintervalls	166
7.2.3 Berechnung von ISI und ICI für die Übertragung ohne Schutzintervall	167
7.3 Bandpaßübertragung	172
7.4 Systemvarianten	174
7.4.1 OFDM-System mit Adaption von Sender und Empfänger	174
7.4.2 Nicht adaptives OFDM-System mit differentiellem PSK	175
7.4.3 Empfängerseitig adaptives OFDM-System	176
7.4.4 OFDM mit Diversity	179
7.5 Maßnahmen gegen Impulsstörungen	181
7.6 Simulationsergebnisse	182
7.6.1 Vergleich der Systeme bei weißem Rauschen	183
7.6.2 Vergleich verschiedener Systemvarianten bei farbigem Rauschen	184
7.6.3 Vergleich verschiedener Systemvarianten bei weißem Rauschen und verzerrendem Kanal	186
7.6.4 Leistungsfähigkeit von MCM bei Impulsstörungen	188
7.7 Zusammenfassung und Vergleich mit SCM	189
8. Übertragungssystem für Energiemehrwertdienste	191
8.1 Systemanforderungen	191
8.2 Systemaufbau	192
8.2.1 Sendebetrieb	192
8.2.2 Empfangsbetrieb	192
8.2.3 Prototypenaufbau	194
8.3 Suboptimaler Empfänger	195
8.3.1 Einstellung der Wichtungskoeffizienten	196
8.3.2 Leistungsfähigkeit des suboptimalen Empfängers	196
8.3.3 Hardwareaufbau	197
8.3.4 Meßergebnis	198
8.4 Synchronisationskonzept	198
8.4.1 Akquisition	198
8.4.2 Rahmensynchronisation	199
8.4.3 Feinsynchronisation	202
8.4.4 Auswertung der Summensignale	203
8.4.5 Modell des Synchronisationsfehlers	203

8.4.6 Auswahl eines Regelalgorithmus	204
8.5 Kanalcodierung	207
8.6 Zusammenfassung	207
9. Zusammenfassung	209
10. Auflistung der wichtigsten Formelzeichen und Abkürzungen	213
10.1 Formelzeichen	213
10.2 Abkürzungen	217
11. Literaturverzeichnis	219
Anhang A	223
Anhang B	239
Anhang C	247
Anhang D	251