

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 Außenhauskommunikation | 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 Dämpfungsscharakteristik 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 Farbige 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 Δf | 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 Impulsauslöschung 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 Impulsauslöschung 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 differentielltem 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 |