

FORTSCHRITT-
BERICHTE

VDI

Dipl.-Ing. Matthias Karl, Ettlingen

**Möglichkeiten der
Nachrichtenübertragung
über elektrische
Energieverteilnetze
auf der Grundlage
europäischer Normen**

Reihe **10**: Informatik/

Kommunikationstechnik

Nr. **500**

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Inhaltsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Bedeutung der Nachrichtenübertragung über Energieverteilnetze	1
1.2 Historischer Überblick und Stand der Technik	2
1.3 Ziele dieser Arbeit und Inhaltsübersicht.....	9
2 Grundlagen der Nachrichtenübertragung über Energieverteilnetze	12
2.1 Strukturen der Energieverteilnetze	12
2.2 Prinzip der Nachrichtenübertragung über Energieverteilnetze.....	13
2.3 Grenzen zur Gewährleistung der elektromagnetischen Verträglichkeit	18
2.3.1 Bestimmung der maximalen Spitzenspannung eines Senders.....	18
2.3.2 Grenzwerte des Ausgangssignals	21
2.3.3 Abschätzung der maximal zulässigen Sendeleistung eines Senders	22
2.4 Störungen in Energieverteilnetzen.....	24
3 Impedanzen in Energieverteilnetzen	31
3.1 Impedanzbestimmung an beliebigen Netzanschlüssen.....	33
3.1.1 Meßprinzip zur Bestimmung der Impedanz an beliebigen Netzanschlüssen	34
3.1.2 Abschätzung des Meßfehlers bei der Messung von Anschlußimpedanzen.....	36
3.2 Impedanzen in Netzen von Kundenanlagen	37
3.2.1 Impedanzen einzelner Verbraucher	37
3.2.2 Impedanzen an Netzzugangspunkten in Gebäuden	39
3.3 Anschlußimpedanz von Kundenanlagen	42
3.4 Impedanzen von Netzen der Energieversorgungsunternehmen.....	43
4 Modellierung von Energieverteilnetzen	44
4.1 Modellierung der Netzabschlüsse.....	46
4.2 Modellierung der Koppellemente als Zweitore	47
4.2.1 Ungeschirmte Installationskabel mit mehreren Leitern.....	47
4.2.1.1 Aufbau eines ungeschirmten Installationskabels.....	47
4.2.1.2 Matrixbeschreibung einer ungeschirmten Mehrfachleitung.....	49

4.2.1.3	Bestimmung der Beläge einer schirmlosen Drei- und Fünffachleitung	51
4.2.1.4	Abschätzung der Beläge für Leiter mit größeren Nennquerschnitten	59
4.2.1.5	Leitungen in Leerrohren	60
4.2.1.6	Leistungsparameter von Kabeln der Energieversorgungsunternehmen	61
4.2.2	Ankopplung einer Kundenanlage an das Netz eines Energieversorgungsunternehmens.....	62
4.2.3	Netzentschleppfilter.....	64
4.3	Modellierung des Verteilers als Dreitor	65
4.4	Erstellung des Gesamtmodells.....	65
5	<u>Übertragungsfunktionen von Energieverteilnetzen</u>	67
5.1	Simulation einiger Übertragungsstrecken.....	67
5.2	Verzerrungsfreie Übertragung	73
5.3	Vergleich mit gemessenen Übertragungsfunktionen	77
5.3.1	Übertragungsfunktion von Netzen in Kundenanlagen	77
5.3.2	Übertragungsfunktion von Netzen der Energieversorgungsunternehmen.....	79
5.4	Einfluß von zeitvarianten Impedanzen	79
6	<u>Modulationsverfahren zur Nachrichtenübertragung über Energieverteilnetze</u>	83
6.1	Kriterien zur optimalen Wahl eines geeigneten Modulationsverfahrens.....	83
6.2	Schmalbandige Modulationsarten mit einer Trägerfrequenz.....	87
6.2.1	Amplitudentastung	88
6.2.2	Phasenumtastung	90
6.3	Schmalbandige Modulationsarten mit mehreren Trägerfrequenzen.....	92
6.4	Folgerungen für die schmalbandigen Modulationsarten	96
6.5	Redundante Modulationsverfahren.....	97
6.5.1	Direct-Sequencing	98
6.5.2	Frequency-Hopping	99
6.5.3	Phasenumtastung mit springender Trägerfrequenz	102
6.5.4	Gleichzeitige Phasenumtastung auf mehreren Trägerfrequenzen	103
6.6	Gegenüberstellung verschiedener Frequenzsprung-Modulationen.....	105
7	<u>Realisierung der Nachrichtenübertragung über Energieverteilnetze</u>	111
7.1	Architektur des Kommunikationssystems	111
7.2	Anpassung der Empfängerdynamik an das Empfangssignal	113
7.2.1	Durch die Übertragungseigenschaften vorgegebene Randbedingungen	113
7.2.2	Dynamikanpassung mittels automatischer Verstärkungsregelung	114

7.2.3 Vergleich der Auswirkungen einer Verstärkungsregelung mit Verfahren zur Signalkompression	119
7.3 Synchronisation von Sender und Empfänger.....	122
8 Experimentelle Erprobung der Nachrichtenübertragung über Energieverteilnetze	126
8.1 Nachrichtenübertragung in Energieverteilnetzen mit FSK.....	126
8.2 Übertragungseigenschaften des Energieverteilnetzes bei 2FH/PSK	131
8.3 Ein typisches Kanalmodell von Energieverteilnetzen	134
9 Verringerung der Übertragungsfehler durch Codierung	137
9.1 Fehlerüberwachung durch Codierung.....	137
9.2 Entwurf einer kanalangepaßten Codierung.....	142
9.2.1 Einfluß typischer Fehlermuster	142
9.2.2 Ergebnisse des Tests der kanalangepaßten Codierung	146
10 Zusammenfassung	151
11 Literaturverzeichnis	153
12 Verzeichnis der wichtigsten Variablen	164
13 Abkürzungsverzeichnis	169
14 Sachregister	170
