

**Angepasste Kommunikationssysteme
für den effizienten Einsatz
in dezentralen elektrischen
Versorgungsstrukturen**

**Dissertation zur
Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
im Fachbereich 16 Elektrotechnik / Informatik
der Universität Kassel**

von:

Dipl.-Ing. Volker Schlebusch

Eingereicht im:	Juli 2006
Datum der Disputation:	2. November 2006
1. Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmid
2. Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Zacharias

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt und andere als die in der Dissertation angegebenen Hilfsmittel nicht benutzt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder unveröffentlichten Schriften entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht. Kein Teil dieser Arbeit ist in einem anderen Promotions- oder Habilitationsverfahren verwendet worden.

Kassel, den 7. Juli 2006

Volker Schlebusch

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im FuE-Bereich Anlagentechnik und Leistungselektronik am Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) e. V., Kassel. Sie wurde im Wesentlichen durch die Projekte *Vernetzung modularer Systeme – Netzregelung zur wirtschaftlichen Optimierung dezentraler Energieversorgungsstrukturen mit hohem Anteil erneuerbarer Energiequellen* (BMU FuE-Vorhaben Nr. 0329900B) und *Thematisches Netzwerk: Optimierung des Einsatzes dezentraler Energieversorgungssysteme durch Einbindung moderner Kommunikationstechniken – Energie und Kommunikation* (BMBF FuE-Vorhaben Nr. 01SF0305) initiiert und gefördert.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Schmid, Leiter des Fachgebietes Rationelle Energiewandlung an der Universität Kassel sowie Vorstandsvorsitzender des Instituts für Solare Energieversorgungstechnik, für die Übernahme der Betreuung als erster Gutachter. Die erfolgreiche Durchführung dieser Arbeit ist wesentlich auf seine fachliche Unterstützung zurückzuführen.

Für die Übernahme der Mitberichtserstattung und das Interesse an meiner Arbeit bin ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. P. Zacharias, Leiter des Fachgebiets Elektrische Energieversorgungssysteme an der Universität Kassel und wissenschaftlicher Leiter für die Leistungselektronik im Institut für Solare Energieversorgungstechnik, zu großem Dank verpflichtet.

Auch danke ich allen Mitarbeitern des Instituts, insbesondere Herrn Dr.-Ing. Alfred Engler, Herrn Dipl.-Ing. Markus Landau und Herrn Dr.-Ing. Thomas Degner sowie Herrn Dr.-Ing. Oliver Haas (Fachgebiet Fahrzeugsysteme und Grundlagen der Elektrotechnik an der Universität Kassel) für die gute Zusammenarbeit und die Anregungen für meine Arbeit.

Bei Herrn Dipl. Inform. Helmut Giese möchte ich mich besonders für die Unterstützung bei der Realisierung des DLC-Systems bedanken.

Nicht zuletzt bin ich meiner Lebenspartnerin Frauke Topp für ihre Unterstützung und Geduld sehr dankbar.

Kassel, im Juli 2006

Volker Schlebusch

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	1
2	Dezentrale elektrische Versorgungsstrukturen	4
2.1	Abstraktion des Begriffs <i>dezentrale elektrische Versorgungsstrukturen</i>	4
2.2	Wirtschaftliche Randbedingungen dezentraler Versorgungsstrukturen	7
2.2.1	Einkommensstruktur	7
2.2.2	Elektrizitätsbedarf und prognostizierte Ausgaben	8
2.2.3	Pauschalisierte Ausgaben für Kommunikation	11
3	Entscheidungsfindungsprozess zur Auswahl von Kommunikationssystemen	13
3.1	Gesamtheitlicher Ansatz und Randbedingungen	13
3.2	Festlegung der erforderlichen Bewertungskriterien	16
3.2.1	Systempräferenz	16
3.2.1.1	Systemdienstleister	16
3.2.1.2	Schnittstellendefinition	17
3.2.1.3	Systemstandardisierung	17
3.2.1.4	Marktdurchdringung	18
3.2.2	Qualitätsmerkmale	18
3.2.2.1	Zuverlässigkeit	18
3.2.2.2	Verfügbarkeit	19
3.2.2.3	Datenintegrität	19
3.2.3	Kommunikationsaufwand	20
3.2.3.1	Nutzdatenübertragungsrate	20
3.2.3.2	Effizienz	21
3.2.4	Teilnehmerkenngrößen	21
3.2.4.1	Übertragungsdistanz	21
3.2.4.2	Teilnehmeranzahl	22
3.2.4.3	Bandbreite	22
3.2.4.4	Duty Cycle	23
3.2.4.5	Frequenznutzung	23
3.2.4.6	Topografische und morphologische Abhängigkeit	24
3.2.4.7	Klimatische Abhängigkeit	25
3.2.5	Teilnehmerinteraktion	26
3.2.5.1	Interaktionsrichtung	26
3.2.5.2	Betriebsart	27

3.2.6	Applikationsaufwand	27
3.2.6.1	Integration	27
3.2.6.2	Instandhaltung	27
3.2.6.3	Erweiterbarkeit	28
3.3	Festlegung der Bewertungstypen und Notenvergabe	28
3.3.1	Bewertungstypen und Maßstäbe für die Systempräferenz	29
3.3.2	Bewertungstypen und Maßstäbe für die Qualitätsmerkmale	30
3.3.3	Bewertungstypen und Maßstäbe für den Kommunikationsaufwand	32
3.3.4	Bewertungstypen und Maßstäbe für die Teilnehmerkenngröße	33
3.3.5	Bewertungstypen und Maßstäbe für die Teilnehmerinteraktion	37
3.3.6	Bewertungstypen und Maßstäbe für den Applikationsaufwand	38
3.4	Einordnung und Notenberechnung der zur Auswahl stehenden Kommunikationssysteme	39
3.5	Nutzenfunktion für Bewertungskriterien	39
3.6	Festlegung der Gewichtungsfaktoren	41
3.7	Berechnung des Erwartungsnutzen	45
3.8	Ökonomische Betrachtung	46
3.9	Auswahl des Bezugssystems	47
3.10	4-Quadranten-Matrix und Systemauswahl	48
4	Providerbasierte Kommunikationssysteme	53
4.1	Leitungsbasierte Carrier-Netze (öffentliches Telefonnetz)	53
4.1.1	Verfügbarkeit von leitungsbasierten Telefonnetzen in dezentralen Versorgungsstrukturen	54
4.2	Funkbasierte Carrier-Netze (öffentliches Mobilfunknetz)	56
4.2.1	Global System for Mobil Communication (GSM)	56
4.2.2	Verfügbarkeit von öffentlichen Mobilfunksystemen in dezentralen Versorgungsstrukturen	59
4.3	Nicht erdgebundene Carrier-Netze (Satellitenkommunikationssysteme)	61
5	Nicht-providerbasierte Kommunikationssysteme	65
5.1	Funkbasierte Kommunikationssysteme	65
5.1.1	Funksysteme des VHF- und UHF-Bandes	66
5.1.1.1	Packet-Radio und Betriebsfunk im VHF-Band	66
5.1.1.2	Funksysteme im ISM-Band	67
5.1.1.2.1	2,4 GHz-ISM-Band	68
5.1.1.3	Zuteilungspflichtige Funksysteme im UHF-Band	69
5.1.1.3.1	869 MHz-Band	69
5.1.1.3.2	459 MHz-Band	70

5.2	Leitungsbasierte Kommunikationssysteme	71
5.2.1	Leitungsbasierte Bussysteme	72
5.2.2	Distribution Line Carrier Systeme	73
5.2.2.1	Frequenz- und Sendeparameter für PLC-Systeme	74
5.2.2.2	Übertragungseigenschaften	76
5.2.2.3	Störszenarien	77
5.2.2.4	Modulationsarten	78
5.2.2.4.1	Single-Carrier-Systeme	79
5.2.2.4.2	Mehrträgerverfahren	79
5.2.2.4.3	Bandspreizende Mehrträgerverfahren	84
6	Exemplarische Systemauswahl	86
6.1	Festlegung des Beispielszenarios	86
6.2	Erwartungsnutzen der Beipielsysteme	89
6.3	Ökonomische Bewertung der Beispielsysteme	89
6.4	4-Quadrantenmatrix für Beispielszenario	91
7	Anpassung eines Kommunikationssystems für den Einsatz in dezentralen Versorgungsstrukturen	95
7.1	Vernetzung dezentraler Strukturen mit DLC-Systemen	95
7.1.1	Auswahl und Implementierung des Referenzsystems	95
7.1.1.1	Analyse des Übertragungsmediums	97
7.1.2	Modifikation der DLC-Kommunikationsstruktur	103
7.1.2.1	Modifikation für den Informationsaustausch zwischen DLC-Endpunkten	104
7.1.2.2	Strukturanpassung für eine TCP/IP-Übertragung	104
7.1.2.2.1	Anbindung unterlagerter Subnetze (Routing)	105
7.1.2.2.2	CSLIP zur Konvertierung der paketorientierten Übertragung	107
7.1.2.2.3	Gateway-Recheneranpassung für DLC-kompatible Formate	109
7.1.3	Praktische Erfahrungen mit modifiziertem DLC-System	111
7.1.3.1	Datenrate der DLC-Übertragung	111
7.1.3.2	Datenbankabfragen via DLC-System	112
8	Zusammenfassung und Ausblick	116
	Literaturverzeichnis	120
	Glossar	130

Formelzeichen	135
Abbildungsverzeichnis	136
Tabellenverzeichnis	138

1 Motivation

Stetig steigende Erschließungskosten für die Anbindung dezentraler Versorgungsstrukturen an öffentliche Energieversorgungsnetze führen zu Bestrebungen den Bedarf an elektrischer Energie durch den Einsatz kleiner, vernetzter und dezentraler elektrischer Energieerzeugungsanlagen vor Ort zu decken. Die elektrische Vernetzung der einzelnen Erzeuger und deren Steuerung durch ein übergeordnetes Energiemanagement lassen zusätzliche positive Synergieeffekte in Bezug auf die Versorgungszuverlässigkeit, die Bedarfsdeckung und die Minimierung der Erzeugungskosten etc. erkennen. Das übergeordnete Energiemanagement übernimmt dabei die Planung, die Koordination und die Kontrolle aller Aktivitäten mit dem Ziel einer Abdeckung und Optimierung des zur betrieblichen Leistungserstellung notwendigen Energieeinsatzes. In diesem Kontext sind Aufgaben wie z. B. das Abfragen von Messdaten zu Optimierungs- und Abrechnungszwecken, das 1/4-h-Lastmanagement, die Aktualisierung von Energiedatenbanken, der Austausch von 1/4-h-Leistungsfahrplänen usw. zu erfüllen. Die Vorgaben des Energiemanagements definieren die Randbedingungen für eine Onlinebetriebsführung der einzelnen Erzeuger auf der Anlagenebene.

Für das korrespondierende Energiemanagement ist jedoch ein Informationsaustausch mit den im Netz partizipierenden Komponenten erforderlich, der über eine Analyse und Interpretation der Netzgrößen hinausgeht. Das Zu- und Abschalten von Verbrauchern kann in einfachster Weise kommunikationslos mit Unterspannungs-, Frequenzrelais, Maximumwächter etc. erfolgen, wohingegen jedoch der Austausch von Leistungsfahrplänen, Teilnehmerstatusinformationen, Abrechnungsdaten usw. nicht durch eine Analyse oder Interpretation der Netzgrößen realisiert werden kann. Es ist daher ein dedizierter Informationsaustausch zwischen den Teilnehmern im elektrischen Versorgungsnetz notwendig.

Grundlage für diesen Informationsaustausch ist eine, wie auch immer geartete Kommunikation zwischen der Informationsquelle und der Informationssenke. Dem unterlagerten Kommunikationssystem obliegt der Transfer der auszutauschenden Informationen. Eine Interpretation oder Analyse des Informationsgehalts erfolgt nicht. Ein Kommunikationssystem ist somit lediglich eine Einrichtung für die Übermittlung von Informationen unter Verwendung unterschiedlichster Übertragungsmedien, die eine direkte oder indirekte Verbindung zwischen den Teilnehmern bereit stellt.

In öffentlichen Elektrizitätsnetzen wird der Informationsaustausch seit längerem durch historisch gewachsene und angepasste Systeme erfolgreich bewerkstelligt. Neben der Nutzung von providerbasierten Carriernetzen (Mobilfunk, Festnetztelefonie etc.) werden auch autarke, in Eigenregie betriebene Systeme wie z. B. Richtfunkssysteme oder Glasfasernetze eingesetzt [Schle 03]. Basierend auf dem weiten Erfahrungsspektrum und einer gut ausgebauten Kommunikationsinfrastruktur stellt die informationstechnische Anbindung eines Teilnehmers im öffentlichen Versorgungsnetz primär kein Hemmnis mehr dar. Anders gestaltet sich dagegen die Situation in dezentralen Versorgungsstrukturen.

Da die Elektrifizierung von dezentralen Versorgungsgebieten, mittels der Vernetzung vieler verteilter Erzeugungsanlagen und des Aufbaus von nicht an das öffentliche Elektrizitätsnetz angeschlossenen Verteilnetzen (Minigrids), erst in den letzten Jahren an Popularität gewonnen [Schmid 03] hat, sind nur wenige Projekte bis dato abgeschlossen bzw. befinden sich noch viele Projekte in der Umsetzungsphase.

Für die informationstechnische Anbindung von Teilnehmern in diesen Strukturen bedeutet dies, dass nur in einem sehr begrenzten Umfang auf Erfahrungswerte bei der Systemauswahl zurückgegriffen werden kann. Vielfach wird die Verwendung von Systemen vorgeschlagen, die aus Applikationen in den öffentlichen Elektrizitätsnetzen bekannt sind (vgl. [Wiesner 01], [Amin 04]).

Inwieweit diese Systeme allerdings für den Einsatz in dezentralen Versorgungsstrukturen als geeignet erachtet werden können oder andere Kommunikationssysteme zu wählen sind, bleibt ungeklärt. Spezifische Kriterien, die eine Bewertung der zur Auswahl stehenden Kommunikationssysteme erlauben und schlussendlich als Hilfestellungen für eine Systemauswahl herangezogen werden können, fehlen.

Es besteht daher primär die Notwendigkeit Bewertungskriterien für Kommunikationssysteme zu definieren. Eine Definition entsprechender Kriterien darf jedoch nicht losgelöst von der eigentlichen Applikation erfolgen. In diesem Sinn müssen zunächst die Eigenschaften bzw. Alleinstellungsmerkmale von dezentralen Versorgungsstrukturen herausgearbeitet werden. Anschließend können unter Beachtung dieser Eigenschaften und der in öffentlichen Elektrizitätsnetzen gesammelten Erfahrungen, Bewertungskriterien für Kommunikationssysteme abgeleitet werden.

Die definierten Kriterien bilden eine Hilfestellung für einen Systemvergleich. Dies darf aber nur als ein erster Schritt verstanden werden, da weiterhin Konzepte zur ökonomischen und nutzenbasierten Systemauswahl fehlen. Das heißt, dem Entscheider müssen Wege aufgezeigt werden, bzw. neu zu entwickelnde Werkzeuge (z. B. ein Leitfaden) bereit gestellt werden, die zukünftig eine einfache und praktikable Entscheidungsfindung basierend auf den zu erarbeitenden Bewertungskriterien erlauben.

Parallel zur Entwicklung eines entsprechenden Entscheidungsfindungsprozesses sind sowohl neue, als auch schon aus dem öffentlichen Elektrizitätsnetz bekannte Kommunikationssysteme unter Berücksichtigung der definierten Bewertungskriterien eingehender zu analysieren und ihr Potenzial bzgl. einer Verwendung in dezentralen Versorgungsstrukturen abzuschätzen. Ist eine 1:1-Übernahme entsprechender Systeme nicht möglich, so sind des Weiteren Lösungen zur Anpassung der Kommunikationssysteme für einen effizienten Einsatz in dezentralen elektrischen Versorgungsstrukturen aufzuzeigen und umzusetzen.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit *Angepasste Kommunikationssysteme für den effizienten Einsatz in dezentralen elektrischen Versorgungsstrukturen* ist die Schließung der obig identifizierten und erläuterten Lücken.

Im Rahmen dieser Arbeit werden in Kapitel 2 dezentrale elektrische Versorgungsstrukturen näher analysiert. Ziel ist hierbei zum einen die Abstraktion des Begriffs bzw. die Abgrenzung zu zentralen Versorgungsstrukturen, als auch eine für diese Arbeit gültige Begriffsdefinition. Zum anderen werden die Eigenschaften und Randbedingungen dezentraler Versorgungsstrukturen, in Bezug auf die spätere Ableitung der erforderlichen Bewertungskriterien, untersucht.

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 2 gewonnenen Kenntnisse, werden in Kapitel 3 einundzwanzig Kriterien zur Klassifizierung und Bewertung von Kommunikationssystemen abgeleitet und definiert. Themenschwerpunkt dieses Kapitels ist die Vorstellung eines gesamtheitlichen und neu entwickelten Entscheidungsfindungsprozesses (Leitfaden), der sowohl die komplexe Gegenüberstellung vieler Kriterien auf den Vergleich eines Systemwerts reduziert, als auch die Wahl eines geeigneten Kommunikationssystems für Applikation in dezentralen elektrischen Versorgungsstrukturen unterstützt. Dem Entscheidungsträger wird hierdurch ein Werkzeug zur Verfügung gestellt, das eine einfache und praktikable Entscheidungsfindung unter Beachtung der Bewertungskriterien und ökonomischer Randbedingungen erlaubt.

Im Anschluss werden in Kapitel 4 und 5 Möglichkeiten aufgezeigt und erläutert, die einen Datenaustausch mit providerbasierten und nicht-providerbasierten Kommunikationssystemen in dezentralen Versorgungsstrukturen des Fernbereichs gestatten. Neben der Analyse von funkbasierten Systemen (GSM, VSAT, UHF etc.) werden leitungsbasierte Kommunikationssysteme (Festnetztelefonie, Bussysteme) untersucht und deren Potenziale bzgl. der Verwendung in dezentralen Versorgungsstrukturen abgeschätzt. Besonderes Augenmerk wird dabei auf Distribution Line Carrier

Systeme gelegt, die die elektrischen Versorgungsleitungen zwischen den Kommunikationsteilnehmern als Übertragungsmedium verwenden.

In Kapitel 6 wird das in Kapitel 3 entwickelte Konzept zur Entscheidungsfindung anhand einer Auswahl von provider und nicht-providerbasierten Kommunikationssystemen (aus Kapitel 4 und 5) für die Fernanbindung von Kommunikationsteilnehmern in dezentralen elektrischen Versorgungsstrukturen exemplarisch verifiziert.

Basierend auf der exemplarisch durchgeführten Systemauswahl in Kapitel 6, werden in Kapitel 7 die notwendigen Arbeitsschritte zur Realisierung eines schmalbandigen DLC-Systems, als eine Variante der nicht-providerbasierten Kommunikationstechnik, für die Vernetzung dezentraler Versorgungsstrukturen im Fernbereich vorgestellt.

Neben der technischen Integration in eine Testumgebung (Mittelspannungsnetznachbildung), den erforderlichen Untersuchungen zur Anpassung und Ermittlung der Kommunikationsparameter in Abhängigkeit der in 5.2.2 erläuterten Randbedingungen, werden sowohl die erforderlichen Entwicklungsschritte des bestehenden Systems hin zu einer TCP/IP-fähigen, Endpunkt-zu-Endpunkt-Kommunikation, als auch praktische Erfahrungen bei der Datenübertragung mit dem weiterentwickelten System präsentiert.

Im Ausblick (Kapitel 8) werden die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und Optimierungspotenziale, sowohl für den Prozess der Systemauswahl, als auch für die realisierte Distribution Line Carrier Kommunikationsinfrastruktur aufgezeigt.

2 Dezentrale elektrische Versorgungsstrukturen

In diesem Kapitel wird der Begriff *dezentrale elektrische Versorgungsstrukturen* näher erläutert und die dort geltenden Randbedingungen analysiert. Neben der Abstraktion des Begriffs, der Abgrenzung zu zentralen Versorgungsstrukturen und einer, für diese Arbeit gültigen Definition, wird sowohl der zu erwartende Verbrauch an elektrischer Energie, als auch die Ausgaben für elektrische Energie anhand mehrerer Beispiele exemplarisch ermittelt und analysiert. Basierend auf den ökonomischen Randbedingungen werden die potenziell möglichen, pauschalisierten Ausgaben für Kommunikationssysteme in dezentralen Versorgungsstrukturen abgeschätzt und Schlussfolgerungen hinsichtlich der Finanzierung entsprechender Systeme aufgestellt.

2.1 Abstraktion des Begriffs *dezentrale elektrische Versorgungsstrukturen*

In dieser Arbeit werden angepasste Kommunikationssysteme für den effizienten Einsatz in dezentralen elektrischen Versorgungsstrukturen untersucht. Bevor dies jedoch in den folgenden Kapiteln detailliert geschieht, ist zu klären, was unter dem Begriff *dezentrale elektrische Versorgungsstruktur* zu verstehen ist.

Allgemein kann der Begriff *elektrische Versorgungsstruktur* als ein Gefüge bzw. gegliederter Zusammenschluss von Komponenten zur Bereitstellung, Erhaltung und Sicherstellung von Elektrizität für das Gemeinwesen definiert werden. Das zusätzliche Adjektiv *dezentral* beschreibt die räumliche Organisationsform der Versorgungsstruktur. Wichtige Funktionen werden nicht von einem Zentrum (zentral) aus ausgeführt, sondern räumlich oder funktional ausgelagert bzw. getrennt.

Dezentrale Versorgungsstrukturen bilden somit das Gegenstück zur historisch gewachsenen *öffentlichen elektrischen Versorgung*. Deren Struktur ist weitestgehend durch zentrale Großkraftwerke und einem hierarchisch unterlagerten Netz zur Übertragung und Verteilung der Energie an die Verbraucher gekennzeichnet. Im Kontext der Bereitstellung elektrischer Energie aus anderen Erzeugungseinheiten als den bekannten Großkraftwerken, fällt oft auch der Begriff *verteilte Erzeugungsanlagen*¹ bzw. verteilte Energieerzeugung. Es handelt sich jedoch hierbei um Erzeugungsanlagen, die über das Versorgungsgebiet verteilt (geografisch) sind, aber primär in das öffentliche elektrische Energieversorgungsnetz einspeisen bzw. mit diesem verbunden sind.

In Bezug auf *dezentrale elektrische Versorgungsstrukturen* ist die nicht vorhandene Kopplung mit dem öffentlichen Netz von entscheidender Bedeutung. Dezentrale Versorgungsstrukturen bilden eine autarke, primär in sich abgeschlossene und vom zentralistisch ausgelegten öffentlichen Netz getrennte Struktur. Im einfachsten Fall kann somit eine dezentrale elektrische Versorgungsstruktur aus einer Erzeugungsanlage, den erforderlichen Übertragungsleitungen und einem Verbraucher bestehen. Das heißt, ein Haushalt, der keine Verbindung zum öffentlichen Elektrizitätsnetz besitzt und mittels eines lokalen Blockheizkraftwerkes versorgt wird, stellt in diesem Zusammenhang eine dezentrale Versorgungsstruktur dar.

Natürlich ist in diesem Kontext die Frage legitim, inwieweit eine solche Struktur existiert bzw. welche Relevanz dezentrale Versorgungsstrukturen überhaupt im Rahmen der elektrischen Versorgung haben. Im Bereich des europäischen UCTE-Netzes² werden dezentrale Versorgungsstrukturen

¹ im engl. distributed energy resource

² UCTE: Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity

wohl eher eine Ausnahme und Randerscheinung sein, da hier von einer fast flächendeckenden Versorgungsstruktur ausgegangen werden kann. Eine Ausnahme bildet die Versorgung von dezentralen Objekten in ländlichen Gebieten (z. B. Alpenhütten, Einsiedlerhöfe etc.), bei denen ein Anschluss an das öffentliche Elektrizitätsnetz, aus wie auch immer gearteten Gründen, nicht möglich ist.

Maßgeblich bestimmend für den Anschluss an das öffentliche Elektrizitätsnetz sind wirtschaftliche Aspekte, da die zu erwartenden Gewinne aus dem Stromverkauf die anfallenden Aufwendungen decken müssen. Neben den Wartungs- und Instandhaltungskosten, sind primär die Installationskosten, d.h. die Kosten der Versorgungsleitung (Freileitung, Kabel, Mastanlagen etc.) bedingt durch die zu überbrückende Entfernung zum Netz als auch die erforderlichen Erdarbeiten von entscheidender Bedeutung.

Bedingt durch die anfallende Verlustleistung bei der Energieübertragung, ist eine niederspannungsseitige Anbindung bis auf 300–500 m (vgl. [Bremser 56]) begrenzt. Über diese Grenze hinausgehende Entfernungen werden mit einem Mittelspannungsnetz überbrückt. Mittelspannungsnetze sind jedoch bzgl. der Installation sehr kostenintensiv. Je nach Ausführung liegen die typischen Errichtungskosten für Netzbetriebsmittel der Mittelspannungsebene im Bereich von 26–51T €/km (MS-Freileitung) bzw. 28–92T €/km (MS-Kabel) in Deutschland (vgl. [CONS 02]). Ein Netzausbau ist nur dann sinnvoll, wenn neben einer hohen Personen- oder Haushaltsdichte, auch ein genügend großer Bedarf an elektrischer Energie besteht. Für Deutschland ist dies mit durchschnittlich ca. 3550 kWh/Jahr je Haushalt und einer Bevölkerungsdichte von durchschnittlich 231 Personen/km² im Wesentlichen gegeben (vgl. [Statistik 04], [VDEW 03]).

Es ist jedoch zu klären, wie sich die Situation bei geringerer Haushaltsdichte und geringerem Konsum verhält bzw. ab wann ein Netzanschluss oder eine dezentrale Versorgungsstruktur sinnvoll ist. Geringe Haushaltsdichten sind charakteristisch für ländliche Gebiete, so dass die Fragestellung auf ländliche Strukturen eingeschränkt werden soll. Das heißt, es ist zu klären, ab wann bei ländlichen Strukturen die Elektrifizierung durch einen Netzanschluss oder durch eine dezentrale Versorgungsstruktur erfolgt.

Gemäß [World 01] ist die Entscheidung bzgl. der Art der ländlichen Elektrifizierung, also Netzanschluss durch Netzerweiterung oder dezentrales System primär von der Entfernung abhängig. Bei Haushalten, die bis zu 5 km von einer Niederspannungsübertragungsleitung entfernt sind, ist die Elektrifizierung mittels eines Netzanschlusses durchzuführen. Haushalte, deren Distanz zu einer Mittelspannungs- oder Hochspannungsleitung kleiner 10 km beträgt, sind durch Netzerweiterung oder Anschluss zu elektrifizieren. Für alle anderen Haushalte sind dezentrale Lösungen zu bevorzugen. In [World 01] wird nur die zu überbrückende Distanz berücksichtigt, andere Einflussfaktoren werden nicht betrachtet. Abbildung 2.1 visualisiert beispielhaft in diesem Kontext einen anderen Ansatz, bei dem neben der Distanz, auch die Anzahl der zu versorgenden Personen für eine Elektrifizierung durch eine Netzerweiterung ausschlaggebend ist. Nach [OAS 03] ist eine Netzerweiterung oft die kostengünstigere Alternative der Elektrifizierung, falls die *Verbraucher-* bzw. *Abnehmerdichte* größer 5 Abnehmer/km, der Verbrauch je Abnehmer 100 kWh/Monat übersteigt und die Erweiterungsdistanz kleiner 5 km ist.

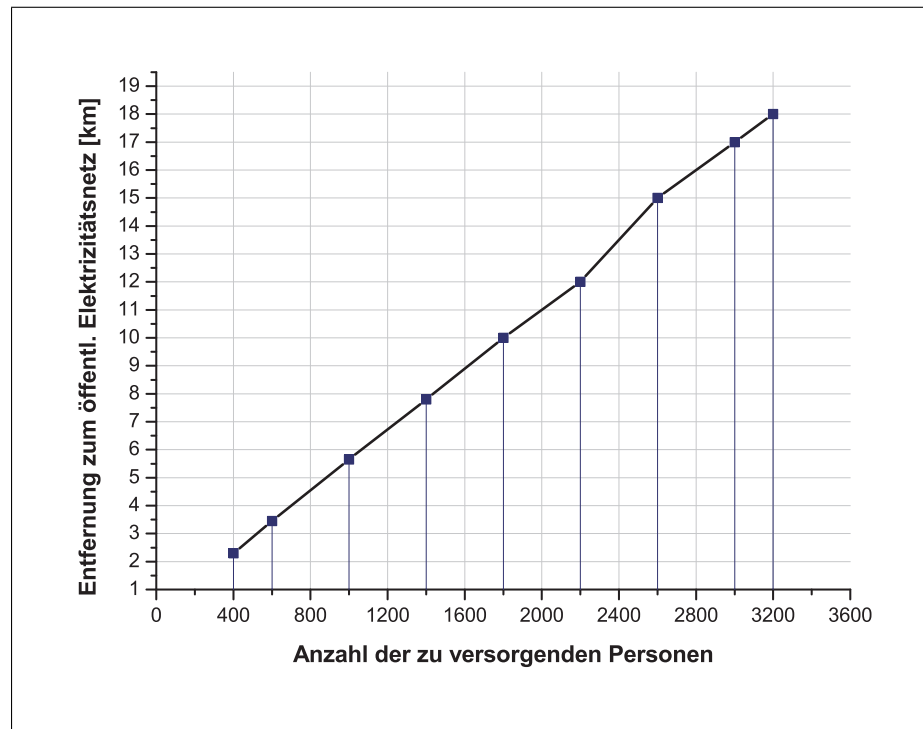


Abbildung 2.1: Zu überbrückende Entfernung (Mittelspannungsebene) zum öffentlichen Elektrizitätsnetz in Abhängigkeit der zu versorgenden Personenanzahl, Beispiel: Senegal; Datenquelle: [Dahouenon 04]

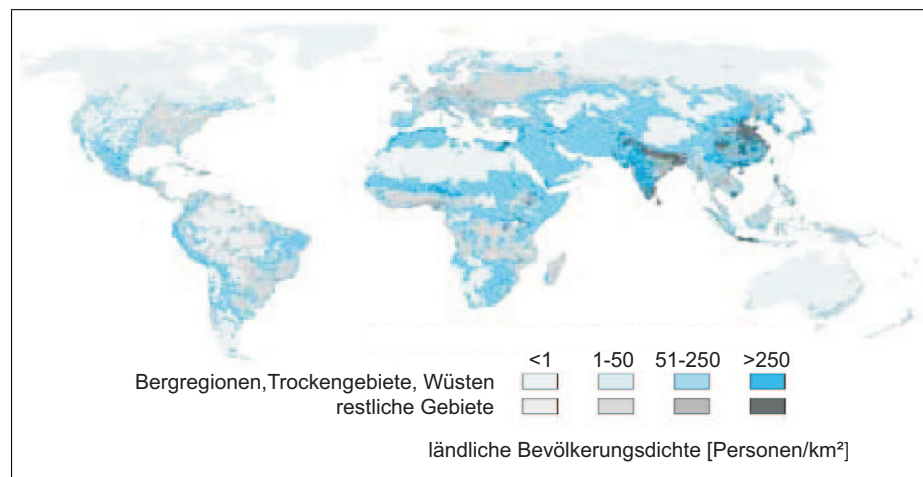


Abbildung 2.2: Verteilung der ländlichen Bevölkerungsdichte weltweit; Quelle: [World 02] (modifiziert)

Insgesamt ist festzuhalten, dass die Art und Weise wie eine Elektrifizierung ländlicher Strukturen umgesetzt wird, von der Entfernung zum bestehenden elektrischen Versorgungsnetz, der Anzahl der anzuschließenden Haushalte, des Haushaltsbedarfs an elektrischer Energie und des Budgets abhängt. Eine Entscheidung, ob dies durch eine Netzerweiterung oder durch den Aufbau einer dezentralen elektrischen Versorgungsstruktur geschieht, ist fallspezifisch zu klären. In Hinblick auf die hohe Anzahl von nicht elektrifizierten Haushalten bzw. Personen (z. B. 537 Mio. Personen in Afrika (2002), vgl. [WEO 02]) in Kombination mit der geringen Haushaltsdichte, ist ein hohes Potenzial für die Elektrifizierung durch dezentrale Versorgungsstrukturen nicht von der Hand zu weisen. Im Besonderen gilt dies für ländliche Haushalte in Entwicklungsländern, die

weder einen hohen Bedarf an elektrischer Energie aufweisen, noch über genügend Kapital (siehe Abschnitt 2.2.1, 2.2.2) verfügen, so dass geringe Anreize für eine Elektrifizierung mittels einer Netzerweiterung bestehen.

2.2 Wirtschaftliche Randbedingungen dezentraler Versorgungsstrukturen

2.2.1 Einkommensstruktur

Um einen detaillierten Überblick hinsichtlich des Elektrizitätskonsums, des verfügbaren Budget und den hieraus resultierenden Auswirkungen bzw. Zusammenhänge auf die Auswahl von Kommunikationssystemen für ländliche dezentrale Versorgungsstrukturen zu gewinnen, werden im Folgenden diese Beziehungen explizit an Entwicklungsländern der Sub-Sahara-Zone näher erläutert.

In der Sub-Sahara-Zone leben ca. 508 Mio. Menschen ohne einen Zugang zu Elektrizität, wobei hiervon ca. 77 % auf den ländlichen Bevölkerungsanteil entfallen. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass gerade einmal 8 % der ländlichen Bevölkerung in der Sub-Sahara-Zone über einen Zugang zur Elektrizität verfügen. Das obige Zahlenbeispiel veranschaulicht welches Potential die ländliche Elektrifizierung beinhaltet.

Land	Durchschnittl. Haushaltsgröße	Haushaltseinkommen
Sub-Sahara-Zone	[Personen/Haushalt]	[US\$/Jahr]
Angola	8,8	1922
Eritrea	5,5	1201
Äthiopien	5,5	1201
Kenia	4,8	1048
Madagaskar	4,5	983
Malawi	4,9	1070
Mozambique	4,4	961
Tansania	5,3	1158
Uganda	5,4	1189

Tabelle 2.1: Haushaltsgröße und Haushaltseinkommen ausgewählter Entwicklungsländer; Quelle: [unhabitat 04]

Mitunter charakterisierend für die Sub-Sahara-Zone und deren Bevölkerung, wie auch für die meisten Entwicklungsländer, ist jedoch, dass der überwiegende Bevölkerungsanteil unterhalb der 2 US\$-Armutsgrenze lebt (vgl.[Afrepren 04-1], [WEO 02]). Nach [Afrepren 04-1] belief sich z. B. das tägliche Pro-Kopf-Einkommen des ländlichen Bevölkerungsanteils Kenias auf ca. 0,55 US\$, so dass ein jährliches Pro-Kopf-Einkommen von lediglich 200 US\$ vorhanden ist. Vergleicht man diese Summe mit dem durchschnittlichen Jahreseinkommen³ von 26000 € in Deutschland, so ist sofort erkennbar, dass das reale Investitionsbudget der ländliche Bevölkerung sehr gering ist.

³ Jahreseinkommen für jede in Deutschland lebende Person, 2002, Quelle: Bundesverband Deutscher Banken.

Verallgemeinert bzw. überträgt man das Pro-Kopf-Einkommen von ca. 0,60 US\$ auf andere Staaten der Sub-Sahara-Zone unter der Voraussetzung, dass diese Staaten ein vergleichbar hohes Brutto-sozialprodukt wie Kenia aufweisen (vgl. [Afrepren 04-1]), so ergeben sich in Abhängigkeit der Personenzahl je Haushalt, ein jährliches Haushaltseinkommen von durchschnittlich 1190 US\$ (vgl. Tabelle 2.1). In diesem Zusammenhang ist von entscheidender Bedeutung, dass dieses verfügbare Haushaltsbudget alle finanziellen Verpflichtungen, also auch die zukünftigen bzw. bei schon erfolgter Elektrifizierung, die aktuellen Stromkosten decken muss.

Bezüglich der potenzieller Aufwendungen für Elektrizität ist im Vorfeld die Frage nach der Höhe des Elektrizitätskonsums und die damit verbundenen Ausgaben je Haushalt für Elektrizität zu klären, da diese mitunter die Wahl des Kommunikationssystems beeinflussen können. Die Wahl eines Kommunikationssystems wird nicht nur durch technische Anforderungen, Merkmale oder Randbedingungen festgelegt (siehe Kapitel 3). In Hinblick auf die eventuell erzielbaren Einnahmen aus einem Elektrizitätsverkauf müssen auch die wirtschaftliche Aspekte betrachtet werden. Wünschenswert wäre natürlich eine 100 % Kostendeckung aller Ausgaben, auch die der Kommunikation, durch die Elektrizitätseinnahmen unter Berücksichtigung der sozialen und ökonomischen Gegebenheiten.

2.2.2 Elektrizitätsbedarf und prognostizierte Ausgaben

In Bezug auf die Abschätzung des Elektrizitätsbedarfs ländlicher Bevölkerung können unterschiedliche Ansätze verfolgt werden. Für eine erste Bewertung werden hier zwei Varianten näher betrachtet, die zum einen aus der theoretischen Beurteilung anhand von *Verbrauchsangaben* normierter Ausstattungsvarianten und zum anderen aus der Verwendung vergleichbarer realer Messdaten bestehen.

Vorgehensweisen zur theoretischen Verbrauchsabschätzung für ländliche Strukturen in Entwicklungsländern sind im Besonderen in der technische Spezifikation *IEC 62257-2* (vgl. [IEC 01]) bzw. im Abschlussbericht der *G8 Renewable Energy Task Force* (vgl. [G8 01]) zu finden. Die IEC 62257-2 beinhaltet neben der Eingruppieren bzw. Bildung unterschiedlicher Konsumentenklassen, auch Angaben zum prognostizierten Energiebedarf einzelner Gruppen (nach Ausstattungsgrad), so dass, ähnlich eines Baukastenprinzips, der individuelle Bedarf ermittelt werden kann. Angaben bzgl. eines Mindestenergiebedarfs an elektrischer Energie zur Sicherstellung einer Basisgrundversorgung liefert IEC 62257 nicht. Der Mindestenergiebedarf muss individuell ermittelt werden.

Im Gegensatz dazu erfolgt in der G8 Studie eine quantitative Bestimmung und Aufschlüsselung des Mindestbedarfs an elektrischer Energie zur Sicherstellung einer Grundversorgung an Beleuchtung, Kommunikation, medizinischer Versorgung und Bildung. Der jährliche Pro-Kopf-Bedarf an elektrischer Energie, bezogen auf einen 5-Personenhaushalt beträgt ca. 51 kWh in der Basisversion. Ist zusätzlich auch der Betrieb von Kühlaggregaten gefordert, steigt der Energiebedarf auf ca. 103 kWh an. Basierend auf den G8 Daten wird in [WBGU 03] der Pro-Kopf-Mindestenergiebedarf für einen 5-Personenhaushalt inklusive der *Dienstleistungen* Trinkwasserbereitstellung, Beleuchtung, Kommunikation und Kühlung auf ca. 56 kWh/Jahr geschätzt.

Vergleicht man diese theoretischen Mindestenergiemengen mit dem durchschnittlichen Stromverbrauch eines Haushalts in Deutschland (ca. 3550 kWh pro Jahr), so verdeutlicht dies sehr drastisch, dass es sich bei den Mindestmengen nicht um ein Ziel, sondern um ein absolutes Minimum handelt.

Wird das zukünftige Konsumverhalten der aktuell noch nicht elektrifizierten ländlichen Bevölkerung in Entwicklungsländern in Anlehnung an die aktuellen Verbräuche der schon elektrifizierten

Bevölkerung in ländlichen Strukturen abgeschätzt, so ist auch hier nur mit einem niedrigen Verbrauchsniveau zu rechnen. Eine entsprechende Abschätzung stellt in diesem Kontext eher einen zu hohen, als einen zu geringen Anhaltswert dar. Zusätzlich ist zu beachten, dass der Energiekonsum wesentlich durch das Haushaltseinkommen mitbestimmt wird. Liegt das Haushaltseinkommen auf einem geringen Niveau, so sind die finanziellen verfügbaren Mittel, die für Elektrizität verwendet werden könnten, sehr gering. Das geringe Budget begrenzt den Konsum. Des Weiteren fehlen bei geringem Haushaltseinkommen notwendige Investitionsmittel für den Erwerb von elektrischen Geräten, Maschinen etc., so dass nur mit einer geringen Steigerungsrate des elektrischen Energiekonsums zu rechnen ist. Eine Elektrifizierung führt nicht zwangsläufig zu einer Verbesserung der wirtschaftlichen Verhältnisse eines Haushalts. Vergleicht man die aktuellen Stromverbrauchsdaten ausgewählter Entwicklungsländer der Sub-Sahara-Zone (siehe Tabelle 2.2), so ist ersichtlich, dass der Pro-Kopf-Verbrauch überwiegend den Minimalbedarf übersteigt, aber immer noch sehr gering ausfällt.

Land	Haushaltsverbrauch	Elektrizitätstarif	Aufwendungen
Sub-Sahara-Zone	[kWh/Jahr], ländlich	[US\$/kWh], ländlich	[US\$/Jahr], ländlich
Angola	776	-	-
Eritrea	325	0,170	91
Äthiopien	122	0,055	43
Kenia	898	0,076	68
Madagaskar	108	0,100	47
Malawi	300	0,033	46
Mozambique	231	0,080	55
Tansania	318	0,110	71
Uganda	965	0,074	107

Tabelle 2.2: Durchschnittliche Elektrizitätsverbrauch, pauschalisierte Tarife und Elektrizitätskosten für ausgewählte Länder der Sub-Sahara-Zone; Quelle: [Afrepren 04-1], [Afrepren 04], [ASMARA 04]

Wie schon angemerkt, können die Elektrizitätsausgaben der Konsumenten und die damit verbundenen möglichen Einnahmen der Energieversorger eine wichtige Rolle bzgl. der Wahl von Kommunikationssystemen spielen. Um einen Überblick über die mögliche Einnahmehöhe pro Haushalt zu erhalten, sind die Elektrizitätskosten näher zu betrachten.

Basierend auf den Tarifangaben im Verbundnetz und einer monatlich geschätzten Grundgebühr⁴ in Höhe von 3 US\$, ergeben sich die in Tabelle 2.2 angegebenen jährlichen Elektrizitätskosten pro Haushalt und Land. Entsprechende Preise decken sich mit den in [Zoomers 01] angegebenen Wertebereich von 0,12–0,50 US\$/kWh für die Versorgung ländlicher Strukturen.

Werden die ermittelten Kosten in das Verhältnis zum jeweiligen Haushaltseinkommen gesetzt, so ist mit einem Ausgabenanteil für Elektrizität in Höhe von 4–5 % des Gesamteinkommens zu rechnen. Dieser Betrag korreliert weitestgehend mit den in anderen Studien (vgl. [Gavalda 03], [WBGU 03]) ermittelten prozentualen Ausgabenanteilen von 5–10 % für den elementaren Energiebedarf am Gesamteinkommen.

⁴ 1998: Kenia (1,6 US\$/Monat), Tansania (3 US\$/Monat), Uganda (3 US\$/Monat)

Unter der vereinfachenden Annahme, dass das Einkommen und die Einkommensverteilung der 2,8 Mrd. Ärmsten genau 1 US\$ am Tag beträgt, darf nach [WBGU 03] bei Einhaltung der 10 % Schranke⁵, moderne Energie nicht mehr als 0,075 US\$/kWh (Strom bzw. Brennstoff) kosten.

Eine Kostenabschätzung basierend auf Tarifen des *öffentlichen Netzes* ist in Hinblick auf die Stromgestehungskosten anderer elektrischer Versorgungssysteme sehr optimistisch (gering). Erfolgt z. B. die Versorgung durch Dieselgeneratoren, unter der Annahme eines Konsumentenverhaltens nach Tabelle 2.2 (ca. 103 kWh/Jahr) und einer Konsumentenanzahl von 100 Haushalten (fünf Personen je Haushalt), so sind Gestehungskosten von ca. 0,8 US\$/kWh durchweg realistisch (vgl. Tabelle 2.3).

Technologie	Leistungsbereich	Energiekosten
	[kW]	[US\$/kWh]
Mini-Hydro	100–1000	0,05–0,10
Micro-Hydro	1–100	0,07–0,20
Pico-Hydro	0,1–1,0	0,20–0,40
Biomasse	20–5000	0,08–0,12
Windkraftanlage	0,1–100	0,15–0,40
Minigrid	10–1000	0,25–1,00
Solar-home	0,02–0,1	0,40–0,60
Dieselgeneratoren	k.A.	0,25–0,80

Tabelle 2.3: Typische Energiekosten pro Kilowattstunde aus erneuerbaren und fossilen Energiequellen, Off-Grid (ländlich); Quelle (Auszug): [REN21 05]

Setzt man dieses Ergebnis in Relation zum verfügbaren Haushaltseinkommen, so ist schnell klar, dass nur durch zusätzliche notwendige Quersubventionierungen oder soziale Transfers vertretbare wirtschaftliche Rahmenbedingungen bzw. Tarife für die Konsumenten geschaffen werden können. Erfolgt eine, wie auch immer geartete Subventionierung in Form von Investitionszuschüssen oder laufenden Ausgleichszahlungen, so werden auch implizit die in der elektrischen Versorgungsstruktur eingesetzte Sekundärtechnik inklusive der Kommunikationstechnik subventioniert.

Basierend auf den in den Abschnitten 2.1, 2.2.1 und 2.2.2 erläuterten Sachverhalten, kann zusammenfassend festgehalten werden, dass Gebiete, die entweder schon elektrifiziert sind oder noch elektrifiziert werden sollen und durch

- eine Bevölkerungsdichte kleiner als 50 Personen/km²,
- einer Entfernung zur nächst gelegenen öffentlichen Niederspannungsübertragungsleitung von größer oder gleich 5 km,
- einem zu erwartenden, jährlichen Elektrizitätsverbrauch von 56 bis 200 kWh pro Person,
- einem täglichen Pro-Kopf-Einkommen von unter 2 US\$,

charakterisiert werden können, als *dezentrale elektrische Versorgungsstrukturen* zu verstehen sind.

⁵ 10 % Schranke für die ersten 500 kWh an moderner Energie

In Hinblick auf einen steigenden Elektrizitätsbedarf, Programme zur Eindämmung von Landflucht und Einkommenssteigerungen, sind die hier getroffenen Grenzen als variabel zu betrachten, so dass durch zukünftige Entwicklungen eine Wertanpassung der Definition möglich ist. Zum aktuellen Zeitpunkt stellen die obigen Wertebereiche jedoch die charakteristischen Kennwerte von dezentralen elektrischen Versorgungsstrukturen dar.

2.2.3 Pauschalisierte Ausgaben für Kommunikation

Üblicherweise setzt sich der Elektrizitätstarif des Endkunden anteilig aus den Komponenten Energieerzeugung, Transport bzw. Verteilung, Vertrieb und Steuern inklusive eventueller Sonderausgaben zusammen. In Deutschland entfallen nach Eliminierung der Steuer- und Vertriebsanteile ca. 29 % auf die Wandlung und ca. 72 % auf den Transport und Verteilung. Aus der Summe für Transport und Verteilung werden auch anteilig die Kosten für die Netzbetriebsführung, die Sekundärtechnik etc. und der damit verbundene Aufbau und Betrieb der notwendigen Infrastruktur für den Datenaustausch, Kommunikation, usw. bestritten. Unter der Annahme, dass ca. 10 % der durch ein Netznutzungsentgelt erzielten finanziellen Einnahmen für die Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung der Sekundärtechnik verwendet wird, ergibt sich ein ca. 7 % großer Anteil am Gesamttarif.

Der postulierte 10 %-Wert beruht auf der hier getroffene Annahme, dass bzgl. der Einnahmen aus dem Netznutzungsentgeltes ein ähnlicher Prozentsatz für die Sekundärtechnik angesetzt werden kann, wie er bei Neuprojekten der Anlagentechnik im Mittel bzw. Hochspannungsnetz für den Bereich Sekundärtechnik üblich ist⁶.

Der Anteil der Transport- und Verteilungskosten an den Gesamtkosten der Energiebereitstellung variiert natürlich in Abhängigkeit der Netzkonfiguration, der Größe etc. Jedoch ist für eine erste Näherung eine Pauschalisierung des Kostenanteils von ca. 30 % an den Gesamtkosten für die Verteilungskosten der Energie legitim (vgl. [BdEv 03]). Unter Berücksichtigung des 10 %-Wertes für die Sekundärtechnik und bei 100 %-Deckung der Gesamtkosten durch den Stromtarif ergeben sich pauschalisiert 3 % vom Stromtarif für dieses Segment.

Spiegelt bzw. verifiziert man diese 3 % an den in Tabelle 2.2 geschätzten jährlichen Haushaltsausgaben für Elektrizität, so folgt ein durchschnittliches Budget von ca. 1,8 US\$ pro Haushalt und Jahr für die Sekundärtechnik. Neben der Haushaltsgröße bzw. der Haushaltsausgaben für Elektrizität ist natürlich auch die Haushaltsdichte wesentlich bestimmend für das zu erwartende Gesamtbudget der Sekundärtechnik. Da alle Abschätzungen im Kontext der ländlichen Elektrifizierung stehen und der *ländliche Raum* mitunter durch eine geringe Bevölkerungsdichte charakterisiert ist, ist der zu erwartende Multiplikator eher als gering einzustufen. Durchschnittlich liegt die Haushaltsdichte in den betrachteten Entwicklungsländern bei ca. fünf Haushalten pro Quadratkilometer⁷, so dass das zu erwartende Gesamtbudget nur auf ca. 10 US\$ pro Jahr ansteigt.

Es wichtig, sich darüber klar zu werden, dass die Sekundärtechnik nicht nur aus den Komponenten der Kommunikationstechnik (Einrichtung und Verbindung) besteht, sondern auch die Bereiche Netz-, Stationsleittechnik, Feldgeräte für die Steuerung und Schutz, Geräte zur Messwerterfassung und -auswertung abdeckt bzw. beinhaltet, so dass letztlich nur ein Bruchteil der 3 % für die Komponenten der Kommunikationstechnik verwendet werden kann. Das diesbezügliche Budget kann als noch geringer erachtet werden.

⁶ Angaben aus Gespräch mit EAM: Anlagentechnik ohne Betrachtung der Kabelanschlüsse, Wandler: Kostenanteil für Sekundärtechnik an Gesamtanlagenkosten 10–13 % (Mittelspannung) bzw. 2–5 % (Hochspannung)

⁷ Quelle: United Nations Statistics Division: Demographic Indicators

Auch wenn die hier durchgeführten Abschätzungen auf Durchschnittswerten bzw. auf pauschalisierten Werten beruhen, ist jedoch ersichtlich, dass basierend auf einem geringen Verbrauchsniveau ländlicher Strukturen und in Verbindung mit einem geringen verfügbaren Haushaltsbudget die zu erwartenden Einnahmen wohl nicht ausreichen, um die notwendigen Investitionen bzw. betrieblichen Aufwendungen für Kommunikationssysteme zu decken, so dass, wie schon im Kontext der Elektrifizierung durch Kleinanlagen erläutert wurde, auch hier eine wie auch immer geartete Subventionierung notwendig ist. Sobald die erforderlichen Aufwendungen für die Kommunikation nicht mehr bzw. nur noch geringfügig durch die Elektrizitätstarife gedeckt werden müssen, verliert der wirtschaftliche Aspekt, in Abhängigkeit des Deckungsbeitrags, als primäres Auswahlkriterium für ein Kommunikationssystem an Bedeutung.

3 Entscheidungsfindungsprozess zur Auswahl von Kommunikationssystemen

In diesem Kapitel wird ein gesamtheitlicher, neu entwickelter Entscheidungsfindungsprozess vorgestellt und erläutert, der in einfachster Weise die Wahl des am meisten geeigneten Kommunikationssystems für eine Applikation in dezentralen elektrischen Versorgungsstrukturen aus einer Vielzahl von möglichen Kommunikationssystemen erlaubt.

Basierend auf der Erarbeitung von 21 Bewertungskriterien (allgemeine, technische, regulatorische etc.) für den Einsatz von Kommunikationssystemen in dezentralen Versorgungsstrukturen (vgl. Abschnitt 3.2) und der Festlegung von Bewertungstypen und Maßstäben (vgl. Abschnitt 3.3) ist sowohl eine Zu- und Einordnung der eigentlichen Systemkenngrößen der zur Auswahl stehenden Kommunikationssysteme als auch eine Überführung, der den Bewertungskriterien zuzuordnenden Kennwerten auf eine jeweils dimensionslose Hilfsgröße möglich (vgl. Abschnitt 3.4).

Durch das Einsetzen dieser Hilfsgrößen in zuvor geeignet gewählte Nutzenfunktionen kann der Nutzwert je Bewertungskriterium und Kommunikationssystem berechnet werden (Abschnitt 3.5). Die anschließende Gewichtung (vgl. Abschnitt 3.6) und Addition der einzelnen Nutzen erlaubt die Ermittlung eines einzelnen Systemwerts, dem Erwartungsnutzen des Systems (Abschnitt 3.7). Mit dem hier gewählten Ansatz kann der Vergleich von vielen Kriterien je Kommunikationssystem auf den Vergleich der Erwartungsnutzen der verschiedenen Systeme reduziert werden.

Unter Berücksichtigung der zu erwartenden wirtschaftlichen Gesamtaufwendungen für jedes Kommunikationssystem (Abschnitt 3.8) werden Bezugssysteme ausgewählt (Abschnitt 3.9), die die Referenzwerte für die Berechnung der relativen Erwartungsnutzen- und Gesamtkostenzuwächse festlegen. Durch den Eintrag der ermittelten Wertepaare je System (relativer Erwartungsnutzenzuwachs und Gesamtkostenzuwachs) in die entwickelte 4-Quadranten-Matrix, kann schlussendlich aufgrund der Position der Wertepaare im Koordinatensystem, grafisch, das für die Applikation optimalste Kommunikationssystem, aus den zur Auswahl stehenden Systemen bestimmt werden (Abschnitt 3.10).

Mittels des in diesem Kapitel beschriebenen Ansatzes, ist ein Weg zur Entscheidungsfindung entwickelt worden, der nicht auf einen speziellen Anwendungsfall begrenzt ist, sondern bei entsprechender Modifikation der Anforderungen, Systemkenngrößen etc., eine Übertragbarkeit auf andere Applikationsanwendungen gewährleistet und daher universell anwendbar ist.

3.1 Gesamtheitlicher Ansatz und Randbedingungen

Die Vielzahl der für einen optimalen Betrieb einer elektrischen Versorgungsstruktur notwendigen Aufgaben und der hieraus resultierenden Anforderungen zeigen, dass die Auswahl eines Kommunikationssystems nur applikationsspezifisch erfolgen kann. So sind im Bereich der Schutztechnik andere Anforderungsprofile zu stellen als bei einer Verwendung für administrative Zwecke.

Unabhängig von der Struktur und Zusammensetzung der elektrischen Versorgung kann der Kommunikationsbedarf und die daraus resultierenden Anforderungsprofile an die einzusetzenden Kommunikationssysteme, wie in [Ericsson 02] beschrieben, prinzipiell in drei Klassen eingeordnet werden. Die erste Klasse umfasst hierbei alle betriebsbedingten Kommunikationen, die in Echtzeit ausgeführt werden müssen und beinhaltet im Wesentlichen den Echtzeitdatenaustausch für Teleprotektion und Netzüberwachung. Die Kommunikation innerhalb der ersten Klasse ist durch eine hohe Zeitanforderung charakterisiert. Interaktionen sind sehr schnell auszuführen, so müssen z. B.

Daten der Schutztechnik innerhalb von 10–20 ms übermittelt werden. Der Bereich der administrativen betriebsbedingten Kommunikation wird durch die zweite Klasse abgedeckt. Hierbei steht zum einen die Event- und Störfallerfassung bzw. Aufzeichnung, zum anderen auch die Anlagenverwaltung, das Handling von Abrechnungsdaten und Sicherheitssystemen im Fokus. Die nicht betriebsbedingte administrative Kommunikation kann der dritten Klasse zugeordnet werden.

Unter der Prämisse, dass eine Kommunikation zwischen modularen Energieerzeugern vorrangig unter dem Aspekt des Energiemanagements und der optimalen Anlageneinsatzes betrieben werden soll, ist der zu erwartende Kommunikationsaufwand der zweiten Klasse zuzuordnen. Das Energiemanagement umfasst in diesem Kontext die Planung, die Koordination und die Kontrolle aller Aktivitäten, deren Ziel die Abdeckung und Optimierung des zur betrieblichen Leistungserstellung notwendigen Energieeinsatzes ist. In diesem Zusammenhang sind Aktivitäten wie z. B. das Abfragen von Messdaten zu Optimierungs- und Abrechnungszwecken, das 1/4-h-Lastmanagement, die Aktualisierung von Energiedatenbanken, der Austausch von 1/4-h-Leistungsfahrplänen etc. zu nennen. Es werden keine Anforderungen bzgl. *Echtzeit* und *Onlinebetrieb* an die Kommunikation und das Kommunikationssystem gestellt. Prinzipiell können die Aktivitäten sowohl technische Maßnahmen als auch betriebswirtschaftliche Entscheidungen sein, die für die Ermittlung und Prognose der zur Verfügung stehenden elektrischen Energie in der Versorgungsstruktur sowie den Austausch von Energiefahrplänen relevant sind. Der Verzicht auf Echtzeitfähigkeit und Onlinebetrieb deckt sich mit den in [NEUK 05-1] bzw. [NEUK 05-2] abgeleiteten Kommunikationsanforderungen für ein Energiemanagement eines Niederspannungsnetzes mit hoher Durchdringung von dezentralen Energieerzeugungsanlagen (Brennstoffzellen, Windkraftanlagen, Blockheizkraftwerke etc.). Alle Funktionen und Aufgaben, die zur Steuerung, Überwachung und Betrieb der einzelnen Anlagen erforderlich sind und nicht mit den Zeitanforderungen des Energiemanagement korrelieren, werden den Komponenten direkt zugeordnet. Das heißt, die einzelnen Anlagenkomponenten arbeiten gemäß des aggregierten Fahrplans autark im Netz. Die eigentliche Komponentenbetriebsführung erfolgt somit lokal in der Anlage selbst, so dass bis auf Informationen, die dem Bereich Status / Warnmeldungen etc. zuzuordnen sind, keine weiteren betriebsführungsrelevanten Daten mit dem Energiemanagement auszutauschen sind.

In Hinblick auf das für den Applikationsbereich Energiemanagement definierte Zeitverhalten der Kommunikation lassen die restriktiven Anforderungen an das Zeitverhalten (0,3–1 s Latenzzeit für Sekundärtechnik) als auch an die aktuellen und zukünftigen Datenraten (70–4400 kbps) für den Bereich Schutztechnik [Amin 04] erkennen, dass hier entweder andere Kommunikationssysteme (Klasse 1) oder neue Schutzkonzepte erforderlich sind. Unter Berücksichtigung der eingeschränkten Auswahl an Kommunikationssystemen und der finanziellen Randbedingungen (vgl. Kapitel 2) sind im Besonderen bei der Elektrifizierung dezentraler Versorgungsstrukturen neue Schutzkonzepte notwendig, die auch mit reduzierten Anforderungsprofilen bzgl. der Kommunikation funktionieren (vgl. Abschnitt 7.1.3.2).

Die in [Ericsson 02] beschriebene Vorgehensweise ermöglicht auf einfache Weise eine Einordnung der Kommunikation und kann als ein erster Schritt in Bezug auf die Auswahl eines geeigneten Kommunikationssystems für den Anwendungsbereich des Energiemanagements gesehen werden. Recherchen ([CRISP 02], [Habieb 04], [Shahidehpour 03], [usace 94], [Wiesner 01]) zeigen jedoch, dass für den Auswahlprozess meist nur die technischen Kenngrößen der unterschiedlichen Kommunikationssysteme miteinander verglichen werden bzw. bestenfalls die Vor- und Nachteile gegenüber gestellt werden [Marihart 01]. Die Frage welches System für welche Anwendung geeignet ist bzw. warum gerade dieses System einem anderen System vorzuziehen ist, bleibt unbeantwortet. Weder eine gesamtheitliche Bewertung der Systeme noch eine strukturierte Vorgehensweise zur Systemauswahl und Entscheidungsfindung sind erkennbar. Insgesamt besteht daher die Notwendigkeit geeignete Werkzeuge zu entwickeln, die eine zukünftige Systemauswahl erleichtern.

Im Folgenden wird ein Ansatz vorgestellt, der basierend auf den Anforderungen seitens der Applikation, den Kenngrößen der zur Auswahl stehenden Kommunikationssysteme und den ökonomischen Randbedingungen eine gesamtheitliche Bewertung unterschiedlicher Systeme ermöglicht und die Entscheidungsfindung für ein Kommunikationssystem erleichtert. Wesentlicher Vorteil dieses Ansatzes ist, dass er nicht auf einen speziellen Anwendungsfall begrenzt ist, sondern bei entsprechender Modifikation der Anforderungen, Systemkenngrößen etc. eine Übertragbarkeit auf andere Applikationsanwendungen zulässt.

Der entwickelte Ansatz besteht aus zehn Schritten, die im Weiteren detailliert beschrieben werden.

- **1. Schritt: Definition der qualitativen Bewertungskriterien.**
- **2. Schritt: Festlegung des Bewertungstyps und des Bewertungsmaßstabs.**
- **3. Schritt: Notenberechnung der zur Auswahl stehenden Kommunikationssysteme.**
- **4. Schritt: Aufstellen einer Nutzenfunktion für die Bewertungskriterien.**
- **5. Schritt: Festlegung der Gewichtungsfaktoren.**
- **6. Schritt: Berechnung des Erwartungsnutzen je System.**
- **7. Schritt: Ökonomische Betrachtung.**
- **8. Schritt: Festlegung des Bezugssystems.**
- **9. Schritt: Erstellen der 4-Quadranten-Matrix.**
- **10. Schritt: Entscheidungsfindung und Systemauswahl.**

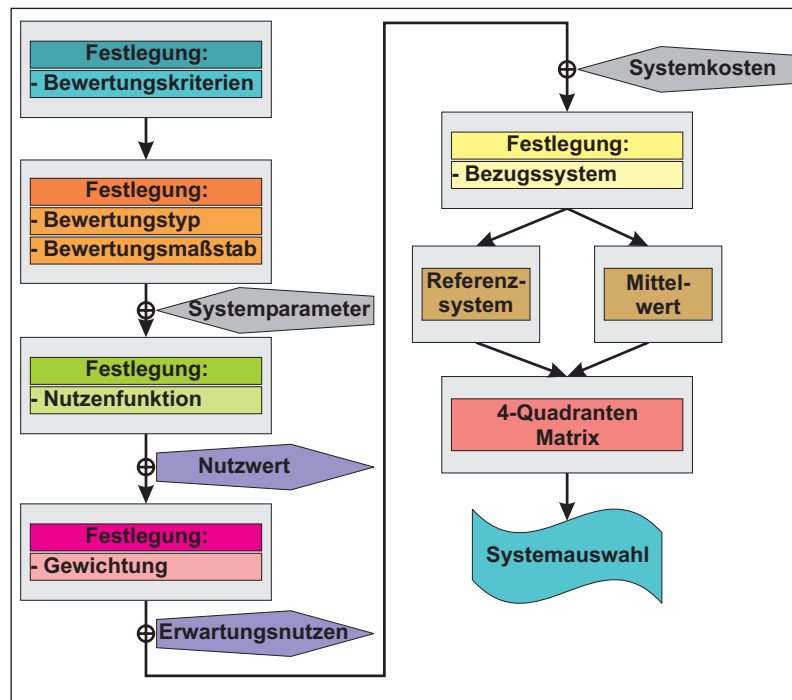


Abbildung 3.1: Flussdiagramm: Gesamtdarstellung der erforderlichen Schritte bis zur Entscheidungsfindung

3.2 Festlegung der erforderlichen Bewertungskriterien

Aufgrund der Vielzahl der zu erfüllenden Aufgaben und Randbedingungen ist es eher unwahrscheinlich, dass es ein *alleiniges Kommunikationssystem* gibt, welches unabhängig von der eigentlichen Applikation universell einsetzbar ist und somit ein *Auswahlprozess* vermieden werden kann.

Für eine Systemauswahl werden, gemäß des gewählten Ansatzes, im ersten Schritt qualitative Kriterien entwickelt, die im späteren Entscheidungsprozess eine Zu- und Einordnung der eigentlichen Systemkenngrößen der Kommunikationssysteme (z. B. BER¹) erlauben. Im Wesentlichen handelt es sich bei den Kriterien um allgemeine, technische und regulatorische Merkmale. Eine Bewertung im Kontext quantitativer Aussagen wird im ersten Schritt vermieden, da diese immer von der Applikation (Einsatz) abhängt und daher anwendungsspezifisch ist. Die hier festgelegten Kriterien sind daher eher als eine allgemeine Charakterisierung von Kommunikationssystemen zu verstehen und beschreiben grundsätzliche Anforderungen und Präferenzen, die erst später quantifiziert werden.

Insgesamt werden im Folgenden 21 Bewertungskriterien berücksichtigt, die den Hauptgruppen *Systempräferenz*, *Qualitätsmerkmale*, *Kommunikationsaufwand*, *Teilnehmerkenngröße* und *Applikationsaufwand* zugeordnet sind. Da die primäre Aufgabe eines Kommunikationssystems der Informationstransport ist, ist es nicht verwunderlich, dass einige der Kriterien auch für Applikationen gelten, die nicht direkt mit dezentralen elektrischen Versorgungsstrukturen in Verbindung gebracht werden können ([ITU 00], [VDI 02]).

3.2.1 Systempräferenz

Mit den in der Hauptgruppe *Systempräferenz* festgelegten Bewertungskriterien wird dem Präferenzverhalten des Systemnutzers in Hinblick auf den Betrieb und die Kompatibilität eines möglichen Systems Rechnung getragen.

3.2.1.1 Systemdienstleister

Das Bewertungskriterium *Systemdienstleister* ermöglicht eine generelle Klassifizierung, ob ein Kommunikationssystem in Eigenregie (Eigenbetrieb) durch den Systemnutzer oder in Fremddregie betrieben wird. Bei Wahl eines Kommunikationssystems, welches in Fremddregie betrieben wird (z. B. GSM²), kann der Systemzugang entweder über einen Netzdienstleister oder direkt mittels des Netzbetreibers erfolgen.

Der Systembetrieb in Eigenregie erlaubt einen uneingeschränkten Zugriff auf das Kommunikationssystem, so dass eine direkte Priorisierung des Informationsaustauschs im *Normalbetrieb* durch den Systemnutzer möglich ist. Diese Priorisierung ist besonders bei einem Störfall von Bedeutung, da dann der Systemnutzer aufgrund seiner zusätzlichen Kenntnis der eigentlichen Applikation abschätzen kann, welche Kommunikation in Hinblick auf den eigentlichen Applikationsprozess unmittelbar erforderlich ist und diese gegenüber anderen Kommunikationsprozessen priorisieren. Anders gestaltet sich die Situation bei einem Fremdbetrieb. Dem Betreiber obliegt hier die Priorisierung, so dass entsprechende Anforderungen nur vertraglich geregelt werden können. Ein signifikantes Beispiel hierfür ist die *Europäische Funk-Rundsteuerung*, bei der die Sendepriorisierung monitär durchführt wird.

¹ Bit Error Rate

² Global System for Mobile Communication

Im Störfall kann bei Eigenbetrieb die Störung direkt behoben werden. Ausfallzeiten werden somit reduziert. Bei einem in Fremdregie betriebenen System ist der Netzbetreiber für die Behebung zuständig. Der Systemnutzer hat daher nur eingeschränkte Eingriffsmöglichkeiten (z. B. vertraglich geregelte Höchstdauer für einen Störungsausfall) bzgl. der Störungsbehebung.

Kommunikationssysteme, die in Fremdregie betrieben werden, bieten den wesentlichen Vorteil, dass anfallende Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten des eigentlichen Übertragungssystems nicht in das Aufgabenfeld des Systemnutzers fallen und somit zu keiner Kapazitätsbindung führen. Jedoch sind auch hier Regelungen zur zeitlichen Korrelation zwischen dem Wartungs- oder Instandhaltungsprozess und der eigentlichen Applikation erforderlich. Bei Kommunikationssystemen in Eigenregie kann der Wartungs- und Instandhaltungsprozess an den Applikationsprozess angepasst bzw. diesem untergeordnet werden.

Vordergründig weisen in Eigenregie betriebene Kommunikationssysteme im Hinblick auf die notwendige Infrastruktur höhere Investitions- und Instandhaltungskosten gegenüber einem fremdbetriebenen System für den Systemnutzer auf. Bei fremdbetriebenen Systemen werden diese Kosten auf die Anzahl der Systemnutzer umgelegt (Einrichtungskosten, Grundgebühr etc.), so dass nur eine gesamtheitliche und applikationsspezifische Kostenbetrachtung Aufschluss über die finanziellen Vorteile der einzelnen Betriebsformen gibt. Eine entsprechende Analyse macht jedoch erst nach einer Eingrenzung möglicher Kommunikationssysteme für die Applikation Sinn und wird somit erst in *Schritt 8* betrachtet.

3.2.1.2 Schnittstellendefinition

Neben dem Systemdienstleister ist die Systemkompatibilität als Bewertungskriterium der Hauptgruppe Systempräferenz von entscheidender Bedeutung. Unter Kompatibilität soll hier generell die Austauschbarkeit des Kommunikationssystems bzw. die Vereinbarkeit oder Gleichwertigkeit von Eigenschaften verstanden werden. Bezüglich der Austauschbarkeit der Kommunikationssysteme und in Bezug auf die Ankopplung an ein Informationssystem sind Beschreibungen bzw. Definitionen der Schnittstelle (*Schnittstellendefinition*) unabdingbar. Neben der Definition der physikalischen Verbindung zwischen den Systemen (Stecker, Pins etc.) und der logischen Beschreibung des Übertragungsprotokolls in der physikalischen Schicht, sind Softwareschnittstellen insbesondere zur Interprozesskommunikation relevant³. Erfahrungsberichte von Pilotprojekten [Schwaegerl 05], speziell im Bereich der informationstechnischen Vernetzung von dezentralen Energieerzeugern, zeigen, dass die Problematik der Schnittstellenadaption nicht zu unterschätzen ist und mitunter eine wesentliche Barriere bei der Implementierung von Systemen darstellt (vgl. [Haas 02]).

3.2.1.3 Systemstandardisierung

Die Verwendung von standardisierten Schnittstellen bietet den Vorteil, dass Komponenten oder Module, die die gleiche Schnittstelle unterstützen und aufgrund der hieraus resultierenden Kompatibilität gegeneinander ausgetauscht werden können. Zielsetzung muss es daher sein, falls möglich, standardisierte Kommunikationssysteme für einen Einsatz zu präferieren. Durch die *Standardisierung* (Normierung) wird neben der Austauschbarkeit der Komponenten und der Vereinfachung des Informationsaustauschs auch eine Definition des Mindeststandards in Bezug auf die Fragestellung, welche Mindestanforderungen/-Kriterien das System erfüllen muss, geschaffen. Eine entsprechende Konformität entbindet zum einen den Systemnutzer bzgl. der Definition von Mindestanforderungen und bietet zum anderen einen Schutz bei nicht Einhaltung der entsprechenden Mindestanforderungen (Abweichung von Konformität). Standardisierte Systeme bieten darüber hinaus eine

³ Auch die bekannten Netzwerkprotokolle wie TCP, HTTP etc. können als IPC-Schnittstellen verstanden werden.

gewisse Sicherheit in Bezug auf die *Aufwärts- und Abwärtskompatibilität* bei einem zukünftigen Einsatz weiter entwickelter Systemkomponenten.

3.2.1.4 Marktdurchdringung

Neben des Kriteriums der Standardisierung ist die *Marktdurchdringung* des Kommunikationssystems von entscheidender Bedeutung. Ein hoher Verbreitungsgrad erlaubt Rückschlüsse auf die Funktion des Kommunikationssystems und die Kundenzufriedenheit. Hohe Marktanteile sind nur erzielbar, falls das System einwandfrei funktioniert (behobene *Kinderkrankheiten*) und die Bedürfnisse des Nutzers befriedigt. Systeme, die entsprechende Anforderungen nicht erfüllen, setzen sich auf dem Markt nicht durch und bleiben kurzfristige Randerscheinungen. Kommunikationssysteme mit einem hohen Verbreitungsgrad veranlassen weitere Hersteller mit kompatiblen Produkten am Markt partizipieren zu wollen, so dass letztlich eine Vielzahl von Lieferanten zur Verfügung steht, die eine hohe *Verfügbarkeit an Komponenten* sicherstellt. In Bezug auf die entstehende Wettbewerbssituation sind Kostenreduktionen zu erwarten.

Im Kontext strategischer Überlegungen bzgl. der Zukunftssicherheit des Systems ist die Marktdurchdringung ein wesentlicher Parameter. Bei einem aktuell hohen Marktanteil eines Systems bestehen für die Hersteller langfristige Anreize (*großer After-Sales-Markt*) auch zukünftig Komponenten bzw. Ersatzteile für die Instandhaltung und Wartung zu produzieren. Ähnliches gilt für die Weiterentwicklung von Systemen. Meist erfolgt diese nur bei Systemen, die schon über eine entsprechende Marktdurchdringung verfügen. Bei der Auswahl eines Systems ist dies zu berücksichtigen.

3.2.2 Qualitätsmerkmale

Das zweite Hauptkriterium umfasst Merkmale, die die Qualität eines Kommunikationssystems charakterisieren bzw. beschreiben. Unter Qualität ist hier gemäß [DIN 05] der Grad zu verstehen, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt. Oft fallen im Kontext von Kommunikationssystemem die Begriffe Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit bzw. *RAMS*⁴ [zintec 05].

Zur Bewertung der Qualität eines Systems werden in dieser Arbeit die Kriterien *Zuverlässigkeit*, *Verfügbarkeit* und *Datenintegrität* verwendet. Die *Instandhaltbarkeit* als ein Bewertungskriterium wird nicht den Qualitätsmerkmalen zugeordnet, sondern dem Hauptkriterium *Applikationsaufwand*, auf den später noch näher eingegangen wird.

3.2.2.1 Zuverlässigkeit

Das Bewertungskriterium *Zuverlässigkeit* ist mit der Fragestellung verbunden, wie viele Störungen, Unterbrechungen und Reparaturen auftreten, also die Anzahl der Ausfälle pro Zeiteinheit. In Analogie zu [DIN 92] kann die Zuverlässigkeit daher als die Fähigkeit eines Systems verstanden werden, die vorgesehenen Funktionen unter vorgegebenen Randbedingungen während eines gegebenen Zeitraumes zu erfüllen. Allgemein handelt es sich hierbei um eine Wahrscheinlichkeitszahl, die auf Ausfallangaben und Betriebsdauer beruht. In der Fernwirktechnik wird die Zuverlässigkeit des Systems mittels der MTBF (**m**ean **t**ime **b**etween **f**ailure), also der durchschnittlichen Zeit zwischen zwei Ausfällen bzw. der mittleren fehlerfreien Betriebszeit beschrieben. Neben MTBF wird auch häufig die Ausfallrate als Kenngröße verwendet.

⁴ aus dem englischen: reliability, availability, maintainability and safety

3.2.2.2 Verfügbarkeit

Die *Verfügbarkeit* eines Systems berücksichtigt zusätzlich zur Zuverlässigkeit die Ausfalldauer sowie die präventive Wartung des Systems. Allgemein kennzeichnet die Verfügbarkeit eines Systems die Fähigkeit, jederzeit die geforderte Funktion zu erfüllen. In diesem Kontext ist die Fragestellung, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass das System gerade dann funktioniert, wenn es von diesem verlangt wird, zu stellen und zu beantworten. Die Verfügbarkeit ist daher eine Wahrscheinlichkeitsgröße, die den Betrieb zu einem bestimmten Zeitpunkt betrifft, im Gegensatz zur Zuverlässigkeit, die den Betrieb während eines gegebenen Zeitraumes betrifft. Aussagen bzgl. der Verfügbarkeit von bereits installierten Systemen können basierend auf statistischer Erhebungen getroffen werden. Hier sind sowohl die Benutzungszeiten als auch die Ausfallzeiten über entsprechende Zeiträume dokumentiert. Angaben zur Verfügbarkeit (vorausgesagte Verfügbarkeit) von noch nicht installierten Anlagen, also auch zum Zeitpunkt der eigentlichen Systemauswahl, können gemäß [DIN 92] aus der Zuverlässigkeit und der gesamten mittleren Reparaturzeit MTTR⁵ errechnet werden:

$$A_p = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \quad \text{vorausgesagte Verfügbarkeit}$$

MTTR berücksichtigt hierbei neben der eigentlichen mittleren Reparaturzeit, die Transport- und die Verwaltungszeiten, d.h. zusätzlich das Zeitintervall von der Fehlererkennung bzw. Störung bis zum Eintreffen des Wartungspersonals mit notwendiger Ausrüstung (z. B. Ersatzteile) vor Ort.

3.2.2.3 Datenintegrität

Mittels der Verfügbarkeit und der Zuverlässigkeit kann die Zeitdauer und der Zeitpunkt des einwandfreien Betriebs eines Systems beschrieben werden. Aussagen bzgl. der Sicherstellung der Veränderbarkeit einer Nachricht während des Transports auf dem Übertragungsweg fehlen jedoch, so dass ein zusätzliches Bewertungskriterium, die *Datenintegrität* notwendig ist um Systeme bewerten zu können. Die *Datenintegrität* beschreibt in diesem Zusammenhang die Unveränderlichkeit eines Informationsgehalts zwischen dem Sender (Datenquelle) und dem Empfänger (Datensenke) der Information. Detektierte Fehler, die während einer Übertragung auftreten, stören zwar die Kommunikation und führen zu unerwünschten Übertragungswiederholungen. Sie spielen aber in Hinblick auf die resultierenden Konsequenzen eine eher untergeordnete Rolle. Unentdeckte Fehler können hingegen den Informationsgehalt verfälschen und zu kritischen Prozessen führen (z. B. Ausschaltinformation zu Vollastinformation verfälscht). Als Kenngröße für die Datenintegrität wird daher die Restfehlerwahrscheinlichkeit benutzt, also die Wahrscheinlichkeit unentdeckter Informationsverfälschung und unentdeckter Informationsverluste (vgl. [DIN 94]).

Die Restfehlerwahrscheinlichkeit ist jedoch kein Einflussfaktor auf die Sicherheit einer Übertragung. Bei der Übertragungssicherheit steht die Absicherung des Übertragungswegs bzw. der Daten gegen Manipulationen im Fokus. Hierzu gehört, neben der Authentifizierung, die Vertraulichkeit. Authentifizierung ist die Sicherstellung, dass eine Nachricht wirklich von der Informationsquelle stammt, die der Sender der Nachricht angibt. Im Gegensatz dazu ist die Vertraulichkeit die Sicherstellung, dass eine Information nur von dem Empfänger gelesen werden kann, für die die Information vom Sender bestimmt ist. Nah verwandt mit der Authentifizierung ist die Authentisierung. Die Authentisierung ist das Nachweisen einer Identität, die Authentifizierung deren Überprüfung.

⁵ aus dem englischen: mean time to restoration

3.2.3 Kommunikationsaufwand

Neben der Qualität eines Kommunikationssystems ist für eine Applikation die zu berücksichtigende Gesamtzeit für den Informationsaustausch von entscheidender Bedeutung. Je nach Anwendung kann die zulässige Zeit zwischen einigen Millisekunden und Minuten variieren (vgl. [Ericsson 02], [CRISP 02]). Die Gesamtzeit hängt hierbei im Wesentlichen von zwei Faktoren ab. Dies ist zum einen der applikationsspezifische *Kommunikationsaufwand*, der sich aus dem zu übertragenden Datenvolumen (Datenbits je Informationsaustausch), der Übertragungshäufigkeit (Anzahl der Übertragungen je Kommunikationsteilnehmer) und der Anzahl der partizipierenden Kommunikationsteilnehmer (Teilnehmer, die das selbe Übertragungsmedium verwenden) zusammensetzt. Alle drei Kriterien sind applikationsspezifisch, so dass diese vor Beginn eines Auswahlprozesses anwendungsbezogen analysiert und festgelegt werden müssen. Der zweite Faktor wird durch die das Kommunikationssystem charakterisierende Nutzdatenübertragungsrate und die Latenzzeit bestimmt.

Als Latenzzeit kann allgemein der Zeitraum zwischen einer Aktion und dem Eintreten einer Reaktion verstanden werden, d.h. das Zeitintervall vom Ende eines Ereignisses bis zum Beginn der Reaktion auf dieses Ereignis. Je nach Applikation sind unterschiedliche Anforderungen an die Latenzzeit zu stellen. Als Beispiel sei hier auf Tabelle 3.1 verwiesen.

Schutzart	Datenrate [kbps]		Latenzzeit	
	aktuell	zukünftig	Primärtechnik [ms]	Sekundärtechnik [s]
Überstromschutz	160	2500	4–8	0,3–1
Differenzialschutz	70	1100	4–8	0,3–1
Distanzschutz	140	2200	4–8	0,3–1
Lastabwurf	370	4400	0,06–0,1 s	

Tabelle 3.1: Kommunikationsaufwand in der Schutztechnik, Quelle: [Amin 04]

Bei hohen Zeitanforderungen an die Kommunikation ist neben der Latenzzeit auch die Aktivierungsverzögerung des Systems nicht zu vernachlässigen. In Bezug auf Energieeinsparpotenziale kann es sinnvoll sein Kommunikationssysteme in einen *Standby-Betrieb* bzw. *Sleep-Modus* zu versetzen und erst bei Bedarf den Betriebsmodus zu aktivieren. Da in dieser Arbeit von einer nicht zeitkritischen Kommunikation (1/4-h-Zeitraster) zwischen den Kommunikationsteilnehmern ausgegangen wird, spielen sowohl die Latenzzeit als auch die Aktivierungsverzögerung⁶ eine untergeordnete Rolle und werden daher nicht weiter betrachtet.

3.2.3.1 Nutzdatenübertragungsrate

Als Datenübertragungsrate wird die maximale Anzahl der Bits verstanden, die je Zeiteinheit übertragen werden. Diese ist somit unabhängig von der Geschwindigkeit, mit der die Signale auf der Übertragungstrecke unterwegs sind. Die Datenübertragungsrate ist nicht mit der Symbolrate bzw. Schrittgeschwindigkeit zu verwechseln, die die Anzahl der übertragenden Symbole je Zeiteinheit⁷ angibt. Über die Wertigkeit des Symbols ist die Schrittgeschwindigkeit mit der Datenrate verknüpft [Göbel 99]. Aufgrund der benötigten Informationen (Bits) zur Steuerung, Adressierung,

⁶ im Gegensatz zur Automatisierungstechnik (vgl. [VDI 02])

⁷ Einheit: Baud [Bd]

Sicherung des Datentransfers steht nur ein Teilbereich der Datenrate für den eigentlichen Informationsaustausch zur Verfügung. In diesem Zusammenhang wird daher nicht die (Brutto-) Datenübertragungsrate des Kommunikationssystems, sondern die *Nutzdatenrate* (Nettodatenrate) als Bewertungskriterium herangezogen.

3.2.3.2 Effizienz

Die Nettodatenrate alleine erlaubt noch keine Aussagen bzgl. der *Effizienz* des Kommunikationssystems. Unter Effizienz ist das Verhältnis zwischen der Größe der erbrachten Dienstleistung und der Größe des Aufwandes zu verstehen. Bezogen auf die Informationsübertragung bedeutet dies, das Verhältnis der Datenbits, die von einem Sender an einem Empfänger übermittelt und dort als gültig angenommen werden zur Gesamtzahl der Bits, die für die Übertragung aufgewendet werden müssen (vgl. [DIN 94]). Zur Berechnung der Effizienz sind somit zum einen Kenntnisse über das Übertragungsprotokoll und zum anderen Angaben zur Wahrscheinlichkeit des Empfangs unverfälschter Bits erforderlich.

Schwierig gestaltet sich die Berechnung bei *längenvariablen* Protokollen (z. B. TCP/IP), bei denen die Länge des Nutzdatenfeldes (Anzahl der Datenbits) variieren kann. Weiterhin sind entsprechende Informationen nicht immer zugänglich, speziell bei Verwendung von firmenspezifischen proprietären Protokollen, so dass im Rahmen dieser Arbeit der Begriff Effizienz anders verstanden werden soll. Zur Vereinfachung der späteren Bewertung von Kommunikationssystemen wird unter Effizienz nur das Verhältnis zwischen der Nettodatenrate und der Bruttodatenrate verstanden. Übertragungswiederholungen aufgrund verfälschter Bits, Einflüsse längenvariable Protokolle etc. bleiben unberücksichtigt.

3.2.4 Teilnehmerkenngrößen

Die zuvor festgelegten Bewertungskriterien erlauben eine spätere Klassifizierung und Bewertung der Kommunikationssysteme bzgl. der Qualität, der Effizienz, der Standardisierung etc. Die entsprechenden Kriterien sind weitestgehend unabhängig vom späteren Einsatzort des Kommunikationssystems. Das heißt, Bewertungskriterien die auch den Standort und im Speziellen die daraus resultierenden standortspezifischen Einschränkungen, Anforderungen, Eigenschaften, etc. berücksichtigen, fehlen. In der vierte Hauptgruppe, *Teilnehmerkenngrößen*, wird diesem Aspekt Rechnung getragen. Neben den standortspezifischen Kriterien werden Bewertungskriterien bzgl. der Abdeckung und der erforderlichen Interaktion definiert, so dass insgesamt sieben Bewertungskriterien der Hauptgruppe Teilnehmerkenngröße zuzuordnen sind. Unter dem Begriff Abdeckung ist die mögliche geografische Ausdehnung des Kommunikationssystems zu verstehen. In diesem Kontext spielt zum einen die Reichweite und zum anderen die maximale Anzahl der Teilnehmer eine entscheidende Rolle.

3.2.4.1 Übertragungsdistanz

Als *Übertragungsdistanz* ist hier die maximale Reichweite zwischen der Datenquelle und der Datensenke zu verstehen, die mittels des Kommunikationssystems ohne Einsatz von Zwischenstationen überbrückt werden kann. Das heißt, bei Kommunikationssystemen die zur Übertragung zusätzliche oder andere Kommunikationssysteme verwenden, wird nur die maximale Reichweite des eigentlichen Systems berücksichtigt.

Signifikantes Beispiel hierfür ist GSM. Prinzipiell unterliegt dieses System keiner Reichweitenlimitierung, solange sich die Mobilstation (GSM-Modem) innerhalb der Empfangsreichweite einer

Base Transceiver Station befindet. Von dort aus werden die Informationen über Funk bzw. drahtgebundene Kommunikationssysteme an den eigentlichen Empfänger weitergeleitet (vgl. [Jung 02]). Die *hinterlagerte* Kommunikationsinfrastruktur ermöglicht einen über die eigentliche Reichweite der Mobilfunkzelle hinausgehende Übertragungsdistanz. Wendet man die obig festgelegte Definition auf GSM an, so ist die maximale Reichweite durch den Zellradius limitiert (ca. 35 km). In Hinblick auf GSM mag die Definition im ersten Moment absurd erscheinen, doch es muss klar sein, dass z. B. eine dezentrale Windkraftanlage die sich außerhalb des Zellradiuses befindet nicht angebunden werden kann, obwohl Komponenten innerhalb des Zellradiuses *quasi weltweit* erreichbar sind. An dieser Stelle sei schon jetzt erwähnt, dass der maximale Zellradius für UMTS⁸ bei ca. 10 km liegt.

Eng verbunden mit der Übertragungsdistanz eines Systems ist die zulässige Sendeleistung (Abstrahlleistung). Allgemein gilt, je höher die Sendeleistung eines Kommunikationssystems ist, desto größere Übertragungsdistanzen sind zu erzielen. Jedoch ist die Sendeleistung bedingt durch nationale und internationale Vorschriften zur Vermeidung von Interferenzen mit anderen Systemen auch unter dem Aspekt der elektromagnetischen Verträglichkeit begrenzt, so dass einer Erhöhung der Sendeleistung zur Steigerung der Übertragungsdistanz Grenzen gesetzt werden. In diesem Zusammenhang deckt die Übertragungsdistanz somit die maximale Sendeleistung als mögliches Bewertungskriterium indirekt mit ab. Auf ein explizites Bewertungskriterium *Sendeleistung* kann daher verzichtet werden. In Hinblick auf eine ökonomische Bewertung spielt die Sendeleistung natürlich bei den Betriebskosten eine nicht zu vernachlässigende Rolle.

3.2.4.2 Teilnehmeranzahl

Neben der Reichweite beeinflusst die *Teilnehmeranzahl* die mögliche Abdeckung des Kommunikationssystems. Unter Teilnehmeranzahl ist die maximale Anzahl von Kommunikationsteilnehmern (Devices) zu verstehen, die aus technischen, legislativen oder anderen Gründen für die Nutzung des Kommunikationssystems zugelassen sind.

Bei einer Teilnehmeranzahl größer als zwei ist ein wie auch immer geartetes Verfahren zur Steuerung des Zugriffs auf das eigentliche Kommunikationsmedium erforderlich. Diese Zugriffsverfahren können in Hinblick auf die daraus resultierenden Vor- und Nachteile (z. B. nicht deterministisches Zeitverhalten bei CSMA/CD⁹) als Bewertungskriterien herangezogen werden. In Analogie zur Latenzzeit und des hier festgelegten Zeithorizonts bzgl. der Übertragung werden die Zugriffsverfahren in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Bezüglich weiterführender Informationen zu den Zugriffsverfahren ist auf die einschlägige Literatur zu verweisen ([Göbel 99], [Tanenbaum 03]).

Auch wenn bei der Auswahl eines Kommunikationssystems zunächst nur eine bestimmte Anzahl von Nutzern eingebunden werden sollen, ist in Bezug auf zukünftige Erweiterungen die Teilnehmeranzahl bzgl. der Systemgrenzen des Kommunikationssystems von entscheidender Bedeutung. Je kleiner die maximale Teilnehmeranzahl, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass zukünftig ein zusätzliches Kommunikationssystem erforderlich ist.

3.2.4.3 Bandbreite

In Abhängigkeit des Einsatzortes und des Verwendungszwecks sind die für die Kommunikationssysteme geltenden legislativen und regulatorischen Vorgaben als Bewertungskriterien zu berücksichtigen. In Bezug auf die technische Realisierbarkeit und wirtschaftlichen Randbedingungen stehen im Allgemeinen nur eingeschränkte Ressourcen bzgl. des nutzbaren Frequenzbereichs

⁸ Universal Mobile Telecommunications Systems

⁹ Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection

innerhalb des elektromagnetischen Spektrums zur Verfügung. In Hinblick auf eine effiziente Nutzung dieser Bereiche durch eine Vielzahl von Applikationen, ist daher eine Koordinierung und Verwaltung zwingend erforderlich, die in den meisten Fällen von den ortsansässigen Regulierungsbehörden der Telekommunikation unter Beachtung internationaler Abstimmungen seitens der ITU¹⁰ übernommen werden. Als wichtigste Parameter für Kommunikationssysteme, die durch die Regulierungsbehörden festgelegt werden, sind die *Bandbreite* und die *Sendeleistung* zu nennen. Beide Parameter sind nach dem Shannon-Hartley-Theorem signifikant entscheidend für die Kanalkapazität, d.h. die *Informationsmenge* die in einem bestimmten Zeitraum unter gegebenen Voraussetzungen übertragen werden kann (näheres siehe [Meyer 02], [Göbel 99]).

Als Bandbreite soll in diesem Zusammenhang die Frequenzbandbreite gelten, bei der die unterhalb ihrer unteren und oberhalb ihrer oberen Frequenzgrenzen ausgesendete mittlere Leistung einen bestimmten Prozentanteil an einer gesamten zulässigen mittleren Leistung nicht überschreitet (vgl. [Bundesnetzagentur 03], [Göbel 99]).

3.2.4.4 Duty Cycle

Aufgrund der Frequenzknappheit besteht die Möglichkeit Kommunikationssystemen nur für einen eingeschränkten Zeitraum bestimmte Frequenzen und Bandbreiten zur Verfügung zu stellen. Der *Duty Cycle* beschreibt in diesem Kontext das Verhältnis der Zeitdauer in der das Kommunikationssystem betrieben werden darf zu einer zuvor definierten Gesamtzeit. Dieses Taktverhältnis bezieht sich normalerweise auf den Zeitraum eines Tages, so dass bei einem Duty Cycle von z. B. 5 % nur ca. 1,2 h pro Tag zur Informationsübertragung zur Verfügung stehen. Wann dieser Zeitraum zur Übertragung genutzt wird, bzw. ob ein Aufteilen des Zeitraumes in kleinere Zeitintervalle möglich ist, hängt von den Festlegungen der Regulierungsbehörden ab. Insgesamt ist jedoch anzumerken, dass bei Verwendung eines Systems mit einem Duty Cycle kleiner 100 % zum einen nur eine eingeschränkte Verfügbarkeit (nur während des zugewiesenen Zeitraums) und zum anderen eine Einschränkung der Betriebszeiten (festgelegte Betriebsdauer) vorliegt. Dies ist im Besonderen im Zusammenhang mit dem zu erwartenden Kommunikationsaufkommen zu beachten.

3.2.4.5 Frequenznutzung

Die eingeschränkte Verfügbarkeit von Frequenzen zur Informationsübertragung führt zu einer Mehrfachnutzung von Frequenzbereichen für unterschiedlichste Kommunikationssysteme und Applikationsbereiche. In Analogie zur Festlegung des Duty Cycle obliegt die Entscheidung der *Frequenznutzung* auch hier den Regulierungsbehörden, die diese in Frequenznutzungsplänen (z. B. [Bundesnetzagentur 03-1]) festlegen. Bei der Nutzung von Frequenzen ist zu unterscheiden, ob die entsprechenden Frequenzen bzw. Frequenzbereiche unter bestimmten Randbedingung (z. B. Sendeleistung, Duty Cycle etc.) durch Kommunikationssysteme frei nutzbar sind oder einer Anmeldung oder einer Zuteilung bedürfen. Die Nutzung von anmeldungs- und zuteilungsfreien Frequenzen erleichtert die Implementierung des Systems, da diese bei Einhaltung der festgelegten Randbedingungen ohne Zustimmung der Regulierungsbehörde sofort betrieben werden können. Da jedoch entsprechende Frequenzen für fast jede Applikation frei zugänglich sind, kommt es zunehmend zu einer Ballung von Anwendungen, die die Frequenzen bzw. den Frequenzbereich verwenden. In diesem Zusammenhang sind gegenseitige Störungen nicht auszuschließen. Signifikantes Beispiel hierfür sind die ISM-Bänder¹¹, deren anmelde- und gebührenfreie Nutzung fast weltweit möglich ist. Aufgrund der relativ großen Bandbreite ist das dort freigegebene Frequenzband von

¹⁰ ITU: International Telecommunication Union

¹¹ ISM: Industrial, Scientific and Medical

2,4000 bis 2,4835 GHz für Datenübertragungszwecke sehr geeignet, so dass viele Systeme dieses verwenden. Neben proprietären Systemen wird das Frequenzband auch von *WLAN-Applikationen* (IEEE 802.11b) und *Bluetooth* etc. genutzt. Diese gemeinsame Nutzung kann jedoch zu Kommunikationsstörungen führen, speziell bei benachbarten Bluetooth und WLAN-Systemen (vgl. [Mim 01]).

Beim Einsatz von Systemen die einer *individuellen* Frequenzzuteilung durch die Regulierungsbehörde bedürfen, ist, bedingt durch den zusätzlichen legislativen und regulatorischen Aufwand als auch die entstehenden Kosten, von einer reduzierten Ballung entsprechender Kommunikationssysteme auszugehen. Des Weiteren sind Kommunikationsstörungen anderer Systeme fast auszuschließen, da dies bei der eigentlichen Regulierungsaufgabe, d.h. die Klärung der Fragestellung, *welches System mit welcher Sendeleistung, welcher Frequenznutzung wo genutzt wird*, berücksichtigt wird. In diesem Kontext besteht daher eine Präferenz für Systeme mit *individueller Frequenzzuteilung* gegenüber Kommunikationssystemen, die *freie* Frequenzbänder nutzen.

3.2.4.6 Topografische und morphologische Abhängigkeit

Neben den beschriebenen legislativen und regulatorischen Vorgaben ist bei der Auswahl von Kommunikationssystemen deren Funktionsweise in Bezug auf topografische Einschränkungen (Abhängigkeit) zu bewerten. Das heißt, welche Anforderungen werden seitens des Kommunikationssystems an die Topographie des Applikationsortes gestellt bzw. ist der Einsatz unabhängig von den geografischen und den *topografischen Randbedingungen* des Applikationsortes. Speziell ist dieses Kriterium bei funkbasierten Kommunikationssystemen von entscheidender Bedeutung.

In Abhängigkeit des verwendeten Frequenzbereiches ergeben sich bzgl. des Ausbreitungseffektes der abgestrahlten Leistung zwei Wellenarten, die Boden- bzw. die Raumwelle. Die Höhe des Aufteilungsgrades hängt im wesentlichen von der Sendefrequenz ab. Im Frequenzbereich von 30 bis 300 kHz erfolgt die Ausbreitung vorwiegend als Bodenwelle, wohingegen im Frequenzbereich 0,3 bis 3 MHz die Ausbreitung tagsüber in Bodenwellenform und nachts als reflektierte Raumwelle fortschreitet. Ab ca. 3 MHz findet die Ausbreitung im Wesentlichen als Raumwelle statt. Der Begriff Bodenwelle umfasst in diesem Kontext jenen Strahlungsanteil, der sich entlang der Erdoberfläche ausbreitet [Göbel 99], so dass deren Reichweite wesentlich durch die Parameter Dielektrizitätskonstante und Leitfähigkeit bestimmt ist. Bei Raumwellen wird derjenige Anteil der emittierten Strahlung berücksichtigt, deren Ausbreitung unabhängig vom Bodeneinfluss erfolgt.

Raumwellen breiten sich näherungsweise geradlinig aus und erreichen im Frequenzbereich ab ca. 30 MHz Reichweiten im optischen Bereich. Die Ausbreitung im UHF-Bereich¹² nähert sich bereits weitgehend dem gradlinigen Verhalten des Lichtes an, so dass man hier schon von *quasi*optischer Ausbreitung bzw. Wellen spricht. Für die Verwendung von Funkübertragungssystemen im *quasi*optischen Frequenzbereich ist der optische Sichtkontakt (Stichwort: Line of Sight¹³) zwischen den Funkstellen als ein erforderliches Mindestkriterium für einen optimierten Empfang somit erforderlich. Entsprechendes Verhalten ist bei einer Systemauswahl zu berücksichtigen, da z. B. bedingt durch das Geländeprofil am Applikationsort keine *LoS-Übertragung* möglich ist. Neben der Berücksichtigung des Sichtkontaktes sollte auch die 1. Fresnel-Zone frei von Hindernissen sein. Auf eine Herleitung der Berechnungsformel für die Fresnel-Zone 1. Ordnung wird hier verzichtet und auf einschlägige Fachliteratur verwiesen. Nach [Donnevert 94] kann der Abstand r_F der Ellipse zur Sichtlinie für jeden Punkt mit ausreichender Genauigkeit wie folgt berechnet wer-

¹² UHF: Ultra High Frequency, 0,3 – 3 GHz

¹³ LoS: Line of Sight

den:

$$r_F = 17,3 \cdot \sqrt{\frac{\frac{d_1}{\text{km}} \cdot \frac{d_2}{\text{km}}}{\frac{f}{\text{GHz}} \cdot \frac{d}{\text{km}}}} \quad [\text{m}]$$

wobei $d_{1,2}$ jeweils die Abstände der Transceiver zum aktuellen Betrachtungspunkt angeben, f die Frequenz und d der Abstand zwischen den Transceivern ist.

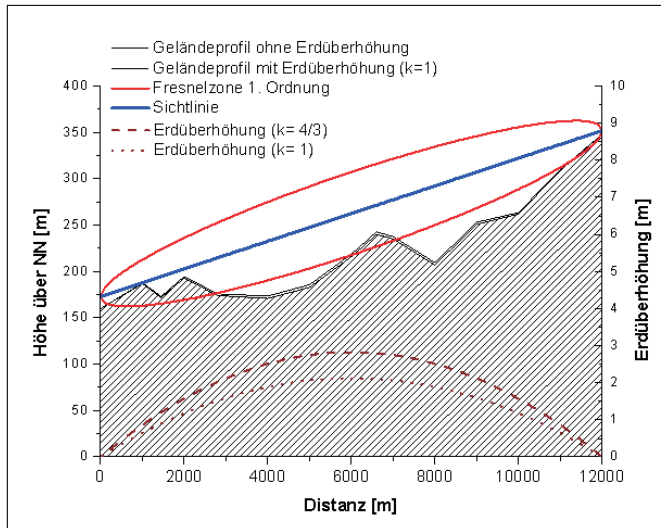


Abbildung 3.2: Beispieldarstellung: topogr. Abhängigkeit und Fresnel-Zone; Quelle [ModIII 06]

Es ist ersichtlich, dass eine Erhöhung der Frequenz ein Verschmälerung der Ellipse und eine Verlängerung der Distanz eine Verbreiterung der Ellipse bewirkt. In der Mitte der Distanz zwischen den Transceivern erreicht die Ellipse jeweils ihre maximale Ausdehnung/Abmessung. Falls die erste Fresnel-Zone frei von Hindernissen ist, wird in der Praxis von einer Freiraumausbreitung ausgegangen. Da innerhalb der ersten Fresnel-Zone der maximale Energieanteil übertragen wird, ist darauf zu achten, dass dieser Bereich frei von Hindernissen ist. Üblicher Weise kann jedoch eine hindernisfreie erste Fresnel-Zone nicht immer realisiert (vgl. Abbildung 3.2) bzw. garantiert werden (Einfluss des Applikationsortes), so dass beim Hereinragen von Hindernissen oder Abschattungen die Funkwellen gebeugt werden. Diese Beugung führt zu einer erhöhten Dämpfung der Funkwellen, die bei der Planung durch eine Zusatzdämpfung berücksichtigt werden muss. Die Höhe der Zusatzdämpfung wird in Abhängigkeit des Verletzungsgrads der Bedingung einer hindernisfreien Zone ermittelt, so dass Hindernisse, die die Sichtlinie (direkte Verbindung zwischen Sender und Empfänger) schneiden bzw. überschreiten, zu höheren Dämpfungswerten führen als Hindernisse, die nur in die untere Hälfte der Fresnel-Zone hereinragen (näheres siehe z. B. [Donnevert 94]).

Der kurze Exkurs in die Welt der Funksysteme zeigt, dass aufgrund der topografischen Abhängigkeit Kommunikationssysteme nicht überall einsetzbar sind. Dies ist daher bei der Wahl durch ein entsprechendes Bewertungskriterium zu berücksichtigen.

3.2.4.7 Klimatische Abhängigkeit

Neben den topografischen und morphologischen Einschränkungen sind auch *klimatische* bzw. wetterabhängige Abhängigkeiten der Kommunikationssysteme zu bewerten bzw. zu berücksichtigen. Erfolgt die Kommunikation leitungsbasiert, sind die entsprechenden Einschränkungen als gering zu erachten. Anders gestaltet sich jedoch wiederum die Situation bei einer funkbasierten Übertragung. In Analogie zu den topografischen Einschränkungen, ist auch hier ein frequenzabhängiges Verhalten zu erkennen.

Wassermoleküle in Form von Regen, Nebel, Hagel etc. führen bei hohen Frequenzen zur Absorption und zum Teil zu einer Änderung der Polarisation. Oberhalb von 5 GHz ist auch die Streuung

von Funkwellen an Regentropfen nicht mehr zu vernachlässigen [Heinrich 88]. Da die Intensität und die räumliche Verteilung des Regens nicht konstant sind und starken Schwankungen unterliegen, ist ein Wert für die Gesamtregendämpfung schwierig zu ermitteln. Ab ca. 100 GHz steigt die Regendämpfung nur noch gering mit zunehmender Frequenz an, da die Wellenlänge nun relativ klein im Verhältnis zum Tropfendurchmesser ist. Bei längeren Funkstrecken sind normalerweise nur Teilstrecken des Systems von Regen betroffen, so dass nicht die gesamte Regendämpfung für das Gesamtsystem betrachtet werden muss. In der Praxis wird daher mit einer effektiven (reduzierten) Funkfeldlänge (Übertragungsdistanz) gerechnet [Heinrich 88].

Ab einer Frequenz von 10 GHz wird der Einfluss der Wasserdampfdämpfung relevant. Bei ca. 22 GHz tritt eine breite Resonanzabsorption auf, so dass in diesem Frequenzbereich mit einer zusätzlichen Dämpfung von bis zu 0,03 dB pro Kilometer gerechnet werden muss (vgl. [Göbel 99]). Sauerstoffmoleküle absorbieren auf Grund ihres magnetischen Moments schon bei sehr geringen Frequenzen Energie aus dem Strahlungsfeld. Die Dämpfung ist überwiegend zeitlich konstant und steigt frequenzabhängig, wobei der Bereich des ersten Resonanzabsorptionsmaximum ab ca. 55 GHz mit einer kilometrischen Dämpfung von bis zu 4 dB pro Kilometer auftritt. Insgesamt zeigt sich, dass bei Wahl eines Kommunikationssystems auch dessen Verhalten bzgl. Klima- und Wetterabhängigkeit bewertet werden muss.

3.2.5 Teilnehmerinteraktion

3.2.5.1 Interaktionsrichtung

Das Bewertungskriterium *Interaktionsrichtung* ist neben der *Betriebsart* Bestandteil der Kriteriumsgruppe Teilnehmerinteraktion. Die *Interaktionsrichtung* beschreibt hier allgemein die Übertragungsrichtung, so dass zwischen einer unidirektionaler und einer bidirektionaler Übertragung zu unterscheiden ist. Die unidirektionale Übertragung kann prinzipiell mit der Verkehrsrichtung in einer *Einbahnstraße* verglichen werden. Wie bei einer Einbahnstraße erfolgt auch bei der unidirektionalen Übertragung der Austausch von Informationen (Verkehr) nur in eine Richtung, d.h. es besteht kein Rückkanal vom Empfänger zum eigentlichen Sender. Dies bedeutet jedoch auch, dass keine Quittierung von empfangenen Nachrichten erfolgt. Der Sender kann nur durch die Detektion von *Aktionsänderungen* innerhalb der Applikation Rückschlüsse ziehen, ob die gesendete Information beim Empfänger eingegangen und auch umgesetzt worden ist. Bekanntestes Beispiel für ein unidirektionales Kommunikationssystem ist die schon seit längerem zur Laststeuerung eingesetzte Tonfrequenzrundsteuertechnik. Sowohl bei der leitungsbasierten als auch funkbasierten Variante werden die Informationen zentral von einer Quelle an die entsprechenden Empfänger gesendet. Für den eigentlichen Empfänger besteht keine Möglichkeit Informationen an den Sender weiterzugeben. Trotz der im Alltag bewährten hohen *Zuverlässigkeit* der Systeme bzgl. der Informationsübertragung kann aufgrund der fehlenden Quittierung schlussendlich nicht davon ausgegangen werden, dass der Empfänger die Information erhalten hat, sondern nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit. Für ein Lastmanagement ist dies in Hinblick auf die hohe Anzahl an Lasten und des unkritischen Prozesses vertretbar. Dies gilt jedoch nicht für kritischere Applikationen wie z. B. eine Änderung der Erzeugungssollwertvorgabe. Hier sind Empfangsquittierungen unabdingbar, so dass eine bidirektionale Kommunikation erforderlich ist. Bei dieser Übertragung arbeitet sowohl die Quelle als auch die Senke als *Transceiver*. Dies ermöglicht zum einen die Quittierung und zum anderen die Übermittlung von Status-, Warnmeldungen, Zählwerten etc.

3.2.5.2 Betriebsart

Zusätzlich zur Interaktionsrichtung ist zu klären, welche *Betriebsarten* vom Kommunikationssystem unterstützt werden und dies bei der Auswahl als Bewertungskriterium mit zu berücksichtigen. Prinzipiell sind drei unterschiedliche Betriebsarten möglich. Bei der Betriebsart Unicast erfolgt die Übermittlung der Information gezielt nur an einen Empfänger bzw. Teilnehmer. Dem gegenüber steht die Betriebsart Broadcast (Rundruf), bei der die Informationen ohne Selektion der Empfänger an alle Teilnehmer des Kommunikationssystems übertragen werden. Die dritte Betriebsart Multicast (selektiver Rundruf) erlaubt im Gegensatz zu Broadcast eine Selektion der Empfänger, also eine gezielte Übertragung an ausgewählte Teilnehmer des Systems. Welche Betriebsart von einem Kommunikationssystem unterstützt wird ist von entscheidender Bedeutung, denn es macht einen Unterschied in Bezug auf den Kommunikationsaufwand und Zeithorizont, ob z. B. die Information *Lastabwurf* einzeln an jeden Kommunikationsteilnehmer oder an alle (Broadcast bzw. Multicast) gleichzeitig übertragen werden kann. Hinsichtlich der Betriebsart sind *Multicast-fähige Systeme* im Allgemeinen zu präferieren.

In diesem Kontext ist anzumerken, dass hier keine Unterscheidung zwischen den Begriffen *Übertragung* und *Übermittlung* gemacht wird und beide für den Prozess des Sendens von einem Ort und des Empfangs an einem bestimmten anderen Ort steht. Im engeren Sinne wird der Begriff *Übertragung* für den Prozess des Sendens von einem Ort und des Empfangs an einem beliebigen Ort (irgendwo) verwendet (vgl. [DIN 96]).

3.2.6 Applikationsaufwand

Neben den zuvor beschriebenen vier Gruppen von Hauptkriterien und den zugehörigen Bewertungskriterien, ist der erforderliche Aufwand bzgl. der Integration, der Instandhaltung und der Systemerweiterung eines Kommunikationssystems zu bewerten. Die entsprechenden Bewertungskriterien werden daher in der fünften und letzten Hauptgruppe *Applikationsaufwand* zusammengefasst. Allen diesen drei Kriterien ist gemein, dass sich eine Bewertung in Hinblick auf quantitative Aussagen als sehr schwierig gestalten, so dass die Installation, Instandhaltung und Systemerweiterung als qualitative Parameter betrachtet werden sollen.

3.2.6.1 Integration

Unter *Integration* und dem damit verbundenen Aufwand sollen hier alle erforderlichen Schritte, die bis zur Erst-Inbetriebnahme eines Kommunikationssystems erforderlich sind, verstanden werden. Dies bedeutet, dass neben allen technischen Arbeiten, wie z. B. Aufbau und Installation von Komponenten, auch Planungsaufgaben, Stellen von Frequenznutzungsanträgen etc. dem Integrationsaufwand zuzurechnen sind. Bei der Auswahl des Kommunikationssystems ist dies zu berücksichtigen, da der Aufwand vom System abhängig ist. So ist z. B. der Integrationsaufwand für ein Kommunikationssystem, welches ein vorhandenes Mobilfunknetz nutzt, um ein Vielfaches geringer als bei einem nicht-providerbasierten Funksystem, das neben der funktechnischen Planung auch einer Frequenzuteilung bedarf.

3.2.6.2 Instandhaltung

Mit dem Bewertungskriterium *Instandhaltung* sollen alle Maßnahmen, die zur Erhaltung und Wiederherstellung des Normalzustandes notwendig sind, berücksichtigt werden. In Analogie zu

[DIN 03] beinhalten diese Maßnahmen sowohl die Wartung, die Inspektion, als auch die Instandsetzung. Die Wartung umfasst im engeren Sinn alle Schritte zur Wahrung des Sollzustandes wohingegen die Inspektion, alle Handlungen zur Beurteilung des Istzustandes des Kommunikationssystems beinhaltet. Alle Maßnahmen, die zu einer Wiederherstellung des Sollzustandes führen, sind der Instandsetzung zuzuordnen.

3.2.6.3 Erweiterbarkeit

Da zum Zeitpunkt der Systemauswahl bzw. Implementierung nur eingeschränkt alle zukünftigen Anforderungen berücksichtigt werden können, ist die *Erweiterbarkeit* des Kommunikationssystems im Sinne der Fähigkeit erweitert bzw. verändert zu werden (sowohl Hard- als auch Software) von entscheidender Bedeutung. In Anlehnung an [DIN 92] kann die Erweiterbarkeit des Systems durch den erforderlichen Aufwand bzgl. der notwendigen Modifikationen, der Systemvergrößerung (zusätzliche Teilnehmer) etc. bewertet werden. Erweiterungen dürfen hierbei nur minimale Änderungen am System erfordern und in keiner Weise die Zuverlässigkeit, die Verfügbarkeit oder Sicherheit des Gesamtsystems negativ beeinflussen.

3.3 Festlegung der Bewertungstypen und Notenvergabe

Nachdem im vorherigen Abschnitt 3.2 die für eine Systemauswahl zu berücksichtigenden Bewertungskriterien definiert wurden, wird in diesem Abschnitt die notwendige Zuordnung zu entsprechenden *Bewertungstypen* inklusive der Festlegung quantitativer Bewertungsmaßstäbe erläutert. Unter Bewertungstypen sind in diesem Kontext Regeln zu verstehen, die eine Abbildung, der den Bewertungskriterien zuzuordnenden Kennwerte (dimensionsbehaftet / dimensionslos) oder qualitative Aussagen auf eine dimensionslose Hilfsgröße (Note bzw. Punkte) ermöglichen. Die eigentliche Korrelation bzw. Überführung der quantitativen Kenngrößen, respektive der qualitativen Aussagen auf die Note wird durch einen Bewertungsmaßstab festgelegt.

In diesem Kontext ist es sehr wichtig sich zu verdeutlichen, dass sowohl der Bewertungstyp als auch der zugehörige Bewertungsmaßstab jeweils in Abhängigkeit des betrachteten Bewertungskriteriums individuell zu bestimmen sind. Das heißt, es gibt keine objektiven Regeln bzgl. der Typenauswahl und Festlegung des Bewertungsmaßstabes. Beide Bereiche sind im Wesentlichen durch das subjekte Verhalten der Person, die die entsprechenden Festlegung trifft bzw. deren Einstellung zum Bewertungskriterium mit bestimmt. Im Gegensatz zu den noch objektiv begründbaren Bewertungskriterien unterliegt eine Zuordnung und Benotung der Systemwerte immer subjektiven Einflüssen und kann daher von Person zu Person verschieden sein. Im Fall eines durch Systemwerte quantifizierbares Bewertungskriterium bietet sich zwar ein Bewertungstyp basierend auf mathematischen Funktionen (z. B. Geraden-, Kurvenfunktionen etc.) an, jedoch ist die endgültige Auswahl der entsprechenden Funktion wieder eine subjektive Entscheidung. Nicht grundlegend anders gestaltet sich die Situation in Hinblick auf die Festlegung des Bewertungsmaßstabes, da auch hier die Zuordnung wesentlich subjektiv bestimmt ist. Es gibt zwar vereinfachte Ansätze den *besten Systemwert* die höchste Note bzw. Punktzahl zuzuordnen bzw. dem *schlechtesten Systemwert* die geringste Punktzahl, doch ist die Verteilung zwischen diesen beiden Werten wieder subjektiv durch die zuvor gewählte Funktion bestimmt. Falls keine quantifizierbaren Kenngrößen für die Ermittlung eines entsprechenden Bewertungstyps identifiziert werden können, muss die Benotung auf Basis qualitativer Aussagen (z. B. durch Auswahllisten) erfolgen, wobei jedoch der subjektive Einfluss noch weiter zunimmt.

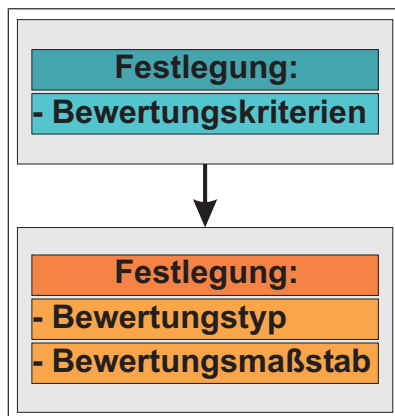


Abbildung 3.3: Flussdiagramm: Bewertungstyp (2. Schritt des Entscheidungsprozesses)

Für die im Abschnitt 3.2 festgelegten Bewertungskriterien werden im weiteren Verlauf drei Arten von Bewertungstypen verwendet. Neben einem Bewertungstyp in Kurvenform und mehreren qualitativen Auswahllisten werden zusätzliche Auswahllisten mit quantitativen Kenngrößenangaben berücksichtigt. Durch die Hinzunahme des Bewertungstyps *Auswahllisten mit quantitativen Kenngrößen* ist eine vereinfachte Klassenbildung (z. B. Treppenfunktionen) möglich.

In Hinblick auf die Nutzung des Programms *CELSIEVAL*¹⁴ zur Darstellung der Bewertungskriterien, Eingabe der Systemkennwerte bzw. Ermittlung der Noten wird in dem hier verfolgten Ansatz ein ganzzahliger Notenbereich von Null bis Zehn für den Bewertungsmaßstab verwendet. Prinzipiell sind je nach erforderlichem *Detailierungs-* bzw. *Stufungs-*

grad auch größere Notenbereiche möglich (z. B. 0–20), wobei jedoch bei einer Vergrößerung auch die Schwierigkeit der Notenvergabe für die entsprechenden Systemwerte zunimmt.

3.3.1 Bewertungstypen und Maßstäbe für die Systempräferenz

In Bezug auf die im Abschnitt 3.2.1.1 erläuterten Arten von Dienstleistern (Eigenregie, Netzbetreiber, Netzdienstleister) wird für das Bewertungskriterium *Systemdienstleister* eine Auswahlliste als Bewertungstyp gewählt. Die *Benotung* der verschiedenen Auswahlmöglichkeiten spiegelt im Wesentlichen die in Abschnitt 3.2.1.1 beschriebenen Vor- und Nachteile wieder (siehe Tabelle 3.2).

Auswahlliste	Benennung	Note
Kategorie 1	Betrieb des Kommunikationssystems durch Netzdienstleister	5
Kategorie 2	Betrieb des Kommunikationssystems durch Netzbetreiber	7
Kategorie 3	Betrieb des Kommunikationssystems in Eigenregie	10

Tabelle 3.2: Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums *Systemdienstleister*

Wie im Abschnitt 3.2.1.2 erläutert, sind neben der Definition der physikalischen Verbindung zwischen den Systemen (Stecker, Pins etc.) insbesondere die Softwareschnittstellen zur Interprozesskommunikation von entscheidender Bedeutung. Bei nicht standardisierten Schnittstellen ist mit einem erhöhten Aufwand zur Systemimplementierung zu rechnen (vgl. Abschnitt 7.1.2.2), so dass bzgl. des Bewertungstyps und Maßstabes die in Tabelle 3.3 aufgeführten Werte verwendet werden.

In Anlehnung an das Bewertungskriterium Schnittstellendefinition ist auch bei der *Systemstandardisierung* eine Auswahl zwischen proprietären und standardisierten Kommunikationssystemen zu treffen. Wie im Abschnitt 3.2.1.3 beschrieben, bieten standardisierte Kommunikationssysteme den wesentlichen Vorteil, dass entsprechende Mindestanforderungen an das System zum einen vordefiniert sind (Standard) und zum anderen der Systemhersteller diese auch garantieren bzw. die

¹⁴ CELSIEVAL V2.1.0.4

Auswahlliste	Benennung	Note
Kategorie 1	proprietäre Protokollschnittstelle	5
Kategorie 2	standardisierte Protokollschnittstelle	10

Tabelle 3.3: Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums *Schnittstellendefinition*

Konformität seiner Produkte nachweisen muss. Standardisierte System bieten somit ein gewisses Maß an *Schutz* für den Anwender.

Auswahlliste	Benennung	Note
Kategorie 1	proprietäres Kommunikationssystem	5
Kategorie 2	standardisiertes-reguliertes Kommunikationssystem	10

Tabelle 3.4: Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums *Systemstandardisierung*

Das letzte Bewertungskriterium der Hauptgruppe Systempräferenz, die *Marktdurchdringung*, ist relativ schwer zu quantifizieren. Zwar gibt es vereinzelt Angaben zu bestimmten Kommunikationssystemen, jedoch fehlen Vergleichsangaben anderer Produkte. Signifikante Beispiele hierfür sind GSM-Mobilfunksysteme und DLC¹⁵. Für GSM sind etliche Statistiken erhältlich, die einen Aufschluss über die Anzahl der Mobilfunkverträge und damit in gewisser Weise auch Anhaltswerte für die Komponentendurchdringung liefern. Es gibt jedoch keinerlei Angaben bzgl. der verkauften oder installierten DLC-Anlagen. In diesem Zusammenhang ist daher eine *qualitative* Auswahlliste (siehe Tabelle 3.5) der einzig praktikable Weg zur Bewertung der Marktdurchdringung.

Auswahlliste	Benennung	Note
Kategorie 1	geringe Marktdurchdringung des Kommunikationssystems	4
Kategorie 2	mittlere Marktdurchdringung des Kommunikationssystems	7
Kategorie 3	hohe Marktdurchdringung des Kommunikationssystems	10

Tabelle 3.5: Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums *Marktdurchdringung*

3.3.2 Bewertungstypen und Maßstäbe für die Qualitätsmerkmale

Für das Bewertungskriterium *Zuverlässigkeit* der Hauptgruppe Qualitätsmerkmale werden in Anlehnung an die Leistungsmerkmale von Fernwirkeinrichtungen bzw. Fernwirksystemen vier Zuverlässigkeitsklassen mit unterschiedlichen Anforderungen an die MTBF definiert. Bei der ursprünglichen Definition nach [DIN 92] werden aufgrund der hohen Anforderungen an Fernwirkeinrichtungen nur Systeme mit einer MTBF größer gleich 2000 Stunden berücksichtigt. Im Fall

¹⁵ DLC: Distribution Line Carrier

einer nicht sicherheitsrelevanten und zeitkritischen Übertragung können jedoch auch System mit einer MTBF kleiner 2000 Stunden betrachtet werden, so dass eine weitere Klasse (Zuverlässigkeitsklasse 1) eingeführt wird.

Auswahlliste	Wertebereich: MTBF	Note
Zuverlässigkeitsklasse 1	Systemwert < 2000 Stunden	1
Zuverlässigkeitsklasse 2	Systemwert \geq 2000 Stunden	4
Zuverlässigkeitsklasse 3	Systemwert \geq 4000 Stunden	7
Zuverlässigkeitsklasse 4	Systemwert \geq 8760 Stunden	10

Tabelle 3.6: Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums *Zuverlässigkeit*

Wie bereits bei der Zuverlässigkeit des Kommunikationssystems erfolgt auch beim Bewertungskriterium *Verfügbarkeit* eine Klasseneinteilung gemäß [DIN 92]. Zusätzlich wird auch hier eine neue Klasse, die die Verfügbarkeit von Systemen kleiner 99 % berücksichtigt (siehe Tabelle 3.7), definiert.

Auswahlliste	Wertebereich: Verfügbarkeit A	Note
Verfügbarkeitsklasse 1	Systemwert < 99,00 %	1
Verfügbarkeitsklasse 2	Systemwert \geq 99,00 %	4
Verfügbarkeitsklasse 3	Systemwert \geq 99,75 %	7
Verfügbarkeitsklasse 4	Systemwert \geq 99,95 %	10

Tabelle 3.7: Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums *Verfügbarkeit*

Abweichend von der im Abschnitt 3.2.2.3 erläuterten Definition der *Datenintegrität*, wird zur Quantifizierung des Bewertungskriteriums nicht die beschriebene Restfehlerwahrscheinlichkeit nach [DIN 94] verwendet, sondern die Bitfehlerrate. Dies liegt darin begründet, dass für die meisten noch später zu betrachtenden Kommunikationssysteme entsprechende Daten nicht vorhanden sind bzw. nur die Bitfehlerrate ohne Angaben zur Kanalkodierung, der Hammingdistanz etc. verfügbar sind. Der Vergleich der Bitfehlerraten erlaubt zwar keine direkten Rückschlüsse auf die Restfehlerwahrscheinlichkeit, kann aber als ein erstes Indiz für die Qualität der Übertragung verwendet werden. Je geringer die Bitfehlerrate, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Bit während der Übertragung verfälscht wird. Das heißt, die Gesamtmenge der möglichen fehlerbehafteten Bits sinkt, so dass auch die Gesamtmenge der nicht detektierten Fehler abnimmt. In diesem Zusammenhang sind Kommunikationssysteme zu bevorzugen, deren BER¹⁶ sehr gering sind. Entsprechende Präferenz spiegelt sich auch in der Punktvergabe wieder (siehe Tabelle 3.8).

Die untere Grenze der Bitfehlerwahrscheinlichkeit von 10^{-5} wurde aus [DIN 94] übernommen. Der Wert 10^{-3} als obere Grenze entspricht den *gängigen* Bitfehlerwahrscheinlichkeiten von proprietären Funkssystemen, so dass der gesamte Wertebereich von Fernwirkeinrichtungen bis hin zu proprietären Systemen berücksichtigt werden kann.

¹⁶ BER: **Bit Error Rate**

Auswahlliste	Wertebereich: BER	Note
Integritätsklasse 1	Systemwert $\leq 10^{-3}$	4
Integritätsklasse 2	Systemwert $\leq 10^{-4}$	7
Integritätsklasse 3	Systemwert $\leq 10^{-5}$	10

Tabelle 3.8: Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums *Datenintegrität*

3.3.3 Bewertungstypen und Maßstäbe für den Kommunikationsaufwand

Da, wie Eingangs erläutert, die Kommunikation vorwiegend zum 1/4-h-Fahrplanaustausch verwendet werden soll, sind die Anforderungen bzgl. der *Nutzdatenübertragungsraten* eher als gering zu erachten. In diesem Zusammenhang ist von entscheidender Bedeutung, dass die zu übertragenden Informationen (z. B. Sollwertvorgaben an die einzelnen Erzeugungsanlagen) vor dem Beginn des nächsten 15-minütigen Zeitrasters am Empfänger eingehen und noch genügend Zeit verbleibt, um die entsprechenden Informationen zu verarbeiten.

Basierend auf einer Auswahl von zu kommunizierenden Werten bzw. Parametern für den koordinierten Betrieb von Erzeugungsanlagen und Verbrauchern im Niederspannungsnetz ([NEUK 05-2]) wurden im Rahmen des thematischen Netzwerks Energie und Kommunikation unterschiedliche Kommunikationsinfrastrukturen näher untersucht. Hierbei zeigte es sich, dass selbst bei einer Vielzahl von Kommunikationsteilnehmern (≥ 50 , EuK-Szenarionetz [NEUK 05] bzw. [Buchholz 05]) Nutzdatenübertragungsraten von 9,6 kbps vollkommen ausreichend sind (inklusive Protokollumsetzung nach IEC 61850).

Für die Aufteilung und Punktvergabe der Nutzdatenübertragungsrate wird daher die in Tabelle 3.9 vorgestellte Gruppierung (vier verschiedene Klassen) vorgeschlagen. Es ist ersichtlich, dass in Abhängigkeit der Anforderungen an die Applikation Abweichungen von dieser Klassenbildung möglich sind.

Auswahlliste	Wertebereich	Note
Klasse 1	100 bps < Systemwert \leq 1 kbps	2
Klasse 2	1 kbps < Systemwert \leq 10 kbps	4
Klasse 3	10 kbps < Systemwert \leq 100 kbps	6
Klasse 4	100 kbps < Systemwert \leq 1 Mbps	8
Klasse 5	1 Mbps < Systemwert	10

Tabelle 3.9: Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums *Nutzdatenübertragungsrate*

Zur Einteilung und Quantifizierung des Bewertungskriteriums *Effizienz* werden vier Klassen definiert. Kommunikationssysteme mit einem Verhältnis Netto-¹⁷ – zu Bruttodatenrate von kleiner 50 % werden nicht berücksichtigt, da hierbei von einer sehr ineffizienten Übertragung und einer Verschwendung der knappen Frequenzressourcen ausgegangen werden kann. Da im einfachsten

¹⁷ bzw. Nutzdatenübertragungsrate

Fall mindestens ein Anfangs- und ein Endsymbol zwecks Koordination mit übertragen werden muss, ist eine Effizienz von 100 % unrealistisch.

Zu präferieren sind Systeme mit einer geringen Frequenzbandbreite, hoher Übertragungsdatenrate und hoher Effizienz. Entsprechende Systeme bieten, in Hinblick auf eine Zunahme der Teilnehmeranzahl ein hohes Potenzial dafür, dass durch eine geeignete Frequenzverlagerung innerhalb des zulässigen Frequenzbandes eine Systemerweiterung in einfacher Weise möglich ist. In diesem Kontext ist auch die Stufung der Punktvergabe in Tabelle 3.10 zu verstehen.

Auswahlliste	Wertebereich: Effizienz A	Note
Effizienzklasse 1	Systemwert $\geq 50,0\%$	1
Effizienzklasse 2	Systemwert $\geq 70,0\%$	4
Effizienzklasse 3	Systemwert $\geq 80,0\%$	7
Effizienzklasse 4	Systemwert $\geq 90,0\%$	10

Tabelle 3.10: Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums *Effizienz*

3.3.4 Bewertungstypen und Maßstäbe für die Teilnehmerkenngröße

Bei der Klassifizierung des Bewertungskriteriums *Übertragungsdistanz* und der Festlegung der Noten für die unterschiedlichen Klassen ist immer die *eigentliche Applikation* zu berücksichtigen. Das heißt, je nach Abstand der zu vernetzenden Anlagen untereinander sind andere Anforderungen an die Übertragungsdistanz des Kommunikationssystems zu stellen. Beträgt der zu überbrückende Abstand nur wenige Meter, so können sowohl Kommunikationssysteme des Nahbereichs als auch Weitbereichskommunikationssysteme verwendet werden. Ist der zu überbrückende Abstand größer als die Übertragungsdistanz, die von Nahbereichskommunikationssystemen abgedeckt werden kann, ist die Frage zu klären, ob entweder eine Erweiterung der Übertragungsdistanz durch die Verwendung von Repeatern oder ein Weitbereichskommunikationssystem zum Einsatz kommt. In Bezug auf die Vergabe von Noten für die unterschiedlichen Kommunikationssysteme ist daher eine Zunahme der Punktzahl mit steigender Übertragungsdistanz des Kommunikationssystems sinnvoll.

Auswahlliste	Wertebereich	Note
Bereich 1	Systemwert < 100 m	1
Bereich 2	100 m \leq Systemwert < 1,0 km	3
Bereich 3	1,0 km \leq Systemwert < 5,0 km	6
Bereich 4	5,0 km \leq Systemwert < 10,0 km	7
Bereich 5	10,0 km \leq Systemwert	10

Tabelle 3.11: Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums *Übertragungsdistanz*

Schon in Hinblick auf eine potenzielle Ausweitung der notwendigen Übertragungsdistanz bei einem zukünftigen Zubau weiterer Kommunikationsteilnehmer (Erzeugungsanlagen), ist es emp-

fehlenswert, Systeme zu berücksichtigen, die die aktuellen Mindestanforderungen an die Übertragungsdistanz über erfüllen.

Die in Tabelle 3.11 gebildeten Übertragungsdistanzklassen bzw. Bereiche 1 bis 5 geben im Wesentlichen die aus der Literatur bekannten Bereiche *Local-*, *Metropolitan-* und *Wide Area Network* wieder (vgl. [VDI 02]). Der Bereich Personal Area Network, mit Übertragungsdistanzen kleiner 50 m, wird dem Bereich 1 in Tabelle 3.11 zugeordnet.

Das Bewertungskriterium *Teilnehmeranzahl* (Abschnitt 3.2.4.2) berücksichtigt die maximale Anzahl von Kommunikationsteilnehmern, die von einem betrachteten Kommunikationssystem unterstützt werden. Es erlaubt somit prinzipiell Rückschlüsse, ab welcher Komponentenanzahl ein weiteres bzw. eventuell neues Kommunikationssystem erforderlich ist. Resultierend hieraus müsste die Note mit zunehmender Teilnehmeranzahl proportional ansteigen. Prinzipiell wird dem auch in der hier verwendeten Notenaufteilung Rechnung getragen.

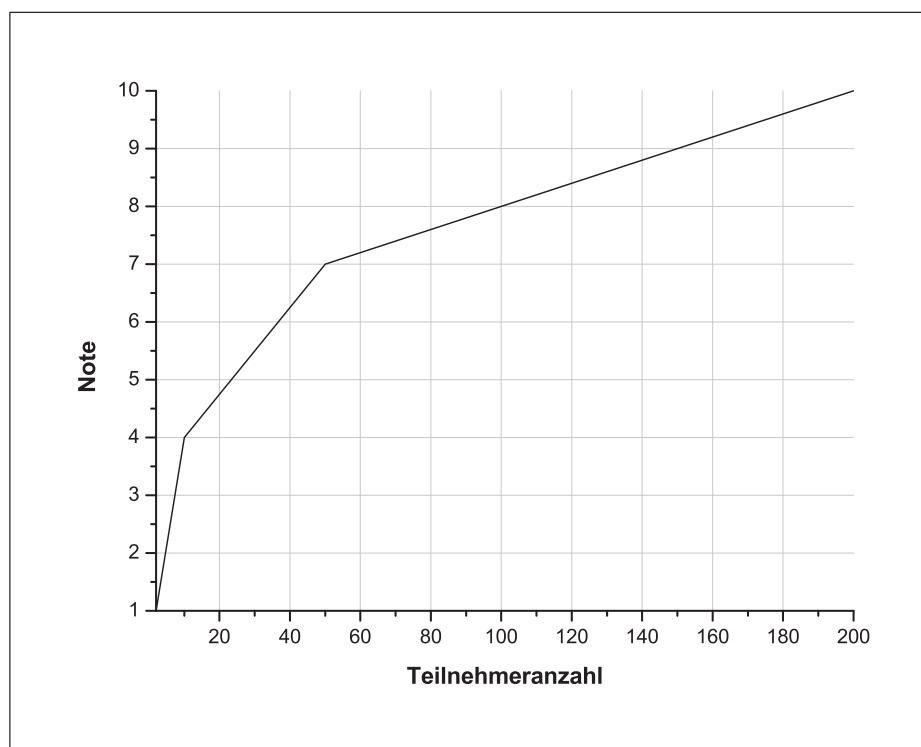


Abbildung 3.4: Auswahlkurve zur Benotung des Bewertungskriteriums *Teilnehmeranzahl*

Der in Abbildung 3.4 dargestellte Verlauf weist jedoch eine 3-Teilung bzgl. der Steigung auf. Der erste Bereich (2 bis 10 Teilnehmer) repräsentiert die typische Anzahl von Verbindungen zur Einbindung weniger Systemkomponenten. Dies kann z. B. die Anbindung von einzelnen Ortsnetzen an eine Energiemanagementzentrale oder die Anbindung dezentraler, exponierter Energieerzeugungsanlagen (z. B. Windkraftanlagen etc.) sein. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf einer geringen Anzahl von Teilnehmern. Typische Teilnehmeranzahlen im Bereich von 10 bis 50 sind für kleine Dorfstrukturen zu erwarten (vgl. Kapitel 2), wohingegen der dritte Bereich (50–200) eher die mögliche Teilnehmeranzahl in einem europäischen Niederspannungsnetz wiedergibt (vgl. [Buchholz 05]). Da in dieser Arbeit Kommunikationssysteme für den Einsatz in dezentralen Versorgungsstrukturen im Fokus stehen, nimmt in Bezug auf die zu erwartende reale Teilnehmeranzahl die Steigung (Notenzuwachs) mit zunehmender Teilnehmeranzahl ab.

In Anlehnung an den im Abschnitt 3.2.4.3 angesprochenen Zusammenhang zwischen der Bandbreite und der Kanalkapazität des Kommunikationssystems, wird eine mit der *Bandbreite* stei-

gende Notenvergabe gemäß Tabelle 3.12 verwendet. Die Bandbreitenunterteilung in vier Bereiche basiert auf den aktuell von unterschiedlichen Kommunikationssystemen benutzten Bandbreiten. Im ersten Bereich können z. B. DLC-Systeme (vgl. Abschnitt 5.2.2, Abbildung 5.2) eingeordnet werden, frequenzuteilungspflichtige Funkssysteme (z. B. nichtöffentlicher Datenfunk) fallen in den zweiten Bereich. Der Bereich 3 deckt z. B. das GSM-System mit einer Bandbreite von 200 kHz je Kanal ab, wohin gegen Bluetooth mit einer Bandbreite von jeweils 1 MHz dem Bereich 4 zuzuordnen ist.

Auswahlliste	Wertebereich	Note
Bereich 1	Systemwert < 10 kHz	1
Bereich 2	10 kHz ≤ Systemwert < 100 kHz	3
Bereich 3	100 kHz ≤ Systemwert < 1,0 MHz	8
Bereich 4	1,0 MHz ≤ Systemwert	10

Tabelle 3.12: Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums *Bandbreite*

Wie in Abschnitt 3.2.4.4 erläutert, ist der *Duty Cycle* ein Bewertungskriterium für die erlaubte *Sendebetriebszeit* eines Kommunikationssystems. Der entsprechende Wert wird jeweils von der lokalen Regulierungsbehörde festgelegt und ist nicht international gültig. Um jedoch Anhaltswerte bzgl. der Quantifizierung des Bewertungskriteriums zu erhalten, erfolgt die Aufteilung und Notenvergabe anhand von in Deutschland geltenden Bestimmungen für Funkkommunikationssysteme. Im Wesentlichen sind hierbei drei Gruppen zu unterscheiden. Alle Systeme, die einen *Duty Cycle* von 1 % nicht überschreiten dürfen (z. B. Short Range Devices¹⁸) können der ersten Gruppe zugeordnet werden (siehe Abbildung 3.5¹⁹). Die zweite Gruppe umfasst alle Systeme deren *Sendebetriebszeit* auf 1 bis 10 % limitiert ist. Zu diesen Systemen gehören z. B. Datenfunkssysteme des nichtöffentlichen mobilen Landfunks. Der letzte Bereich (10 bis 100 %) ist allen anderen Systemen vorbehalten.

Allgemein ist natürlich ein uneingeschränkter Sendebetrieb des Kommunikationssystems wünschenswert, da in einem vom Normalbetrieb abweichenden Betrieb (z. B. Notfallmanagement) mit einem erhöhten Kommunikationsaufwand zu rechnen ist und dieser eventuell die sonst geltenden regulatorischen Grenzen überschreitet. Bei einer nicht zeitkritischen Übertragung unter Berücksichtigung des Datenvolumens und Teilnehmeraufkommens sind jedoch auch Kommunikationssysteme mit *Duty Cycles* kleiner 100 % grundsätzlich einsetzbar.

Ein *Duty Cycle* von 10 % ermöglicht immer noch 96 Übertragungen an jeweils 10 Teilnehmer mit einer Sendedauer von jeweils 5 Sekunden (exklusive 4 Sekunden Aktivierungsverzögerung). Wird eine Nettodatenrate von 9600 bps angesetzt, so können ca. 4800 Byte²⁰ je Sendesyklus an einen Teilnehmer übertragen werden. Dies entspricht einer Profilvergabe bestehend aus 96 Sollwerten²¹, einem Messfeld mit 96 Messwerten²² nach IEC 61850 und einem Restvolumen von ca. 900 Byte (vgl. [Buchholz 05]).

Um ein entsprechendes Verhalten bei der Benotung der Systemparameter berücksichtigen zu können, weist der Verlauf der Benotungskurve 3.5 zwei verschiedene Steigung auf.

¹⁸ siehe RegTp. Verfügung 71/2003

¹⁹ Bereich unterhalb 1 % nicht gesondert dargestellt

²⁰ 10 Bit ≙ 1 Byte, bei 8 Datenbit, 1 Stopbit, 1 Paritybit

²¹ Profil (96 Sollwerte): 480 Byte (Rohdaten) + 388 Byte (Overhead MMS) + 128 Byte (Ethernet-Overhead)

²² Messfeld (96 Messwerte): 1440 Byte (Rohdaten) + 1320 Byte (Overhead MMS) + 128 Byte (Ethernet-Overhead)

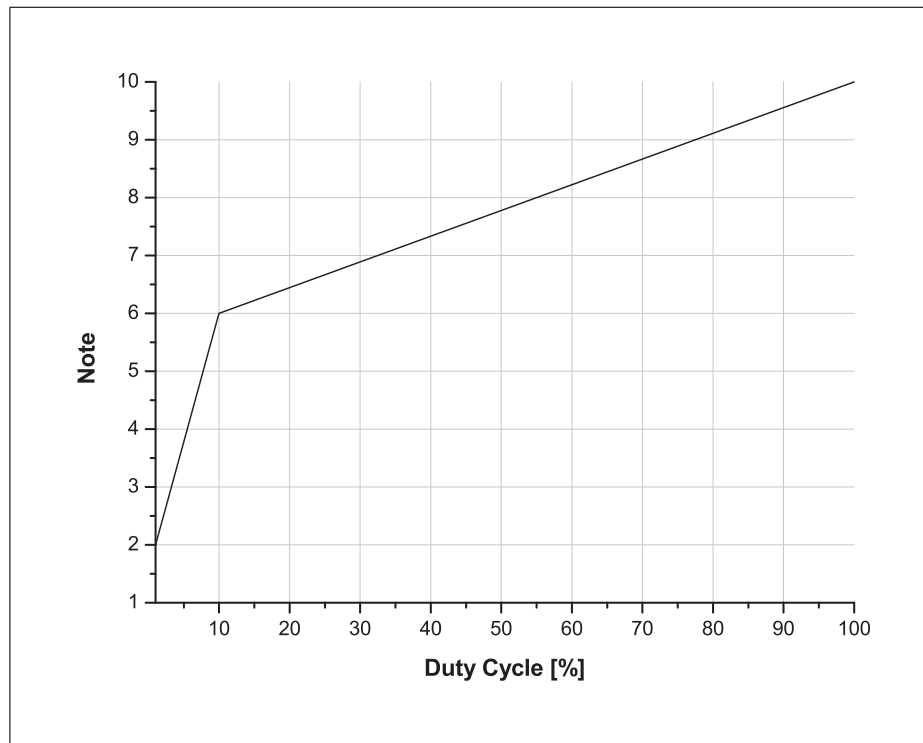


Abbildung 3.5: Auswahlkurve zur Benotung des Bewertungskriteriums *Duty Cycle*

Auswahlliste	Benennung	Note
Kategorie 1	Nutzung frei zugänglicher Frequenzen	5
Kategorie 2	Nutzung zuteilungspflichtiger Frequenzen	10

Tabelle 3.13: Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums *Frequenznutzung*

Für das in Abschnitt 3.2.4.5 eingehend beschriebene Kriterium *Frequenznutzung* ist eine quantitative Bewertung schwierig, da entweder frei nutzbare oder zuteilungspflichtige Frequenzen von den Kommunikationssystemen verwendet werden. In diesem Kontext erfolgt daher eine qualitative Einordnung der entsprechenden Kommunikationssysteme in die Kategorie *Nutzung frei zugänglicher Frequenzen* bzw. *Nutzung zuteilungspflichtiger Frequenzen*. In Bezug auf die Notenvergabe für diese beiden Bereiche werden, unter Berücksichtigung der in Abschnitt 3.2.4.5 beschriebenen Vor- und Nachteile, Kommunikationssysteme die der Kategorie 2 zuzuordnen sind, besser bewertet (siehe Tabelle 3.13).

Wie bereits in Abschnitt 3.2.4.6 dargelegt, können Kommunikationssysteme prinzipiell danach unterschieden werden, ob eine Sichtverbindung (Line of Sight) zwischen den Kommunikationsteilnehmern zur Informationsübertragung notwendig ist oder nicht. Dementsprechend kann sich als Bewertungstyp für das Bewertungskriterium *topografische Abhängigkeit* einer Auswahlliste bestehend aus den Kategorien *Line of Sight erforderlich* bzw. *Line of Sight nicht erforderlich* bedienen. In Bezug auf einen universellen, von topografischen Einflussfaktoren unabhängigen Einsatz, sind Kommunikationssysteme, die keine Sichtverbindung erfordern, primär höher zu bewerten, was sich auch in der Notenvergabe in Tabelle 3.14 widerspiegelt.

In Analogie zum Kriterium *topografische Abhängigkeit* ist auch beim Bewertungskriterium *klima-*

Auswahlliste	Benennung	Note
Kategorie 1	Line of Sight erforderlich	5
Kategorie 2	Line of Sight nicht erforderlich	10

Tabelle 3.14: Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums *topografische Abhängigkeit (Einschränkung)*

tische Abhängigkeit eine Einordnung der Kommunikationssysteme in einen quantifizierbaren Bewertungstyp relativ schwierig, so dass hier ebenfalls eine qualitative Zuordnung zu präferieren ist. Die entsprechende Auswahlliste beinhaltet die drei Kategorien *hohe, mittlere und geringe klimatische Abhängigkeit*. Ferner ist für die Festlegung des Bewertungsmaßstabes zu berücksichtigen, dass je weniger der Einsatz eines Kommunikationssystems von klimatischen Randbedingungen mitbestimmt wird, eine höhere Notenstufe zu wählen ist (siehe Tabelle 3.15).

Auswahlliste	Benennung	Note
Kategorie 1	hohe klimatische Abhängigkeit	4
Kategorie 2	mittlere klimatische Abhängigkeit	7
Kategorie 3	geringe klimatische Abhängigkeit	10

Tabelle 3.15: Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums *klimatische Abhängigkeit (Einschränkung)*

3.3.5 Bewertungstypen und Maßstäbe für die Teilnehmerinteraktion

Wie in Abschnitt 3.2.5.1 schon dargelegt, kann bei der *Interaktionsrichtung* grundsätzlich zwischen einer unidirektionalen bzw. bidirektionalen Übertragung unterschieden werden. Aufgrund dieser einfachen Unterscheidung wird als Bewertungstyp eine Auswahlliste mit zwei Kategorien gemäß der Übertragungsrichtung verwendet (Tabelle 3.16). Die relativ geringe Note (Wert: 1) für Systeme mit einer nur unidirektionalen Übertragungsrichtung ist im Wesentlichen durch die nicht vorhandene Möglichkeit der Informationsrückmeldung (Quittierung) begründet. Der Sender kann nur durch Detektion einer Zustandsänderung feststellen, ob die gesendete Information beim Empfänger eingegangen, verstanden und umgesetzt worden ist, was schlussendlich den Einsatz entsprechender Systeme auf wenige Einsatzbereiche begrenzt.

Auswahlliste	Benennung	Note
Kategorie 1	unidirektionale Übertragung	1
Kategorie 2	bidirektionale Übertragung	10

Tabelle 3.16: Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums *Interaktionsrichtung*

Für das Bewertungskriterium *Betriebsart* wird eine quantitative Auswahlliste als Bewertungstyp festgelegt. Hierbei werden die im Abschnitt 3.2.5.2 aufgeführten Betriebsarten unicast, broadcast bzw. multicast zur Kategorisierung verwendet. Da die Flexibilität von Kommunikationssystemen, ausgehend von der Betriebsart unicast, über die Zwischenstufe broadcast, bis hin zu multicast zunimmt, ist dies bei der Benotung der verschiedenen Kategorien durch eine entsprechende Stafelung, wie in Tabelle 3.17 dargestellt, zu berücksichtigen.

Auswahlliste	Benennung	Note
Kategorie 1	Punkt-zu-Punkt (unicast)	1
Kategorie 2	Rundruf (broadcast)	8
Kategorie 3	selektiver Rundruf (multicast)	10

Tabelle 3.17: Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums *Betriebsart*

3.3.6 Bewertungstypen und Maßstäbe für den Applikationsaufwand

Wie bereits in Abschnitt 3.2.6 erläutert, erfolgt in Bezug auf die Kriterien *Integration*, *Instandhaltung* und *Erweiterbarkeit* keine quantitative Eingruppierung, da explizite Angaben nur für einige wenige Kommunikationssysteme existieren. Um jedoch den Applikationsaufwand für die verschiedenen Systeme trotzdem mit berücksichtigen zu können, wird der zu erwartende Aufwand durch die qualitative Zuordnung zu den Kategorien *hoher*, *mittlerer* bzw. *geringer Aufwand* der korrespondierenden Auswahllisten abgeschätzt (siehe Tabelle 3.18, 3.19 und 3.20).

Auswahlliste	Benennung	Note
Kategorie 1	hoher Integrationsaufwand	4
Kategorie 2	mittlerer Integrationsaufwand	7
Kategorie 3	geringer Integrationsaufwand	10

Tabelle 3.18: Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums *Integrationsaufwand*

Im Allgemeinen sollten Kommunikationssysteme so einfach wie möglich gestaltet sein, so dass auch weniger technikversiertes Personal sowohl die Installation (Integration) als auch die Instandhaltung durchführen kann. Wünschenswert wäre in diesem Kontext eine einfache *Plug-and-Play*-Eigenschaft des Systems, die nicht nur die Integration sondern auch wesentlich die Austauschbarkeit der Systemkomponenten im Fehlerfall vereinfachen könnte. Die hier festgelegte Benotung und Stufung soll diese Aspekte unterstreichen, so dass Kommunikationssysteme mit einem geringen Applikationsaufwand höher zu bewerten sind, als Systeme mit einem entsprechend höheren Aufwand. Allgemein sind somit Systeme mit einem geringen Applikationsaufwand zu präferieren.

Auswahlliste	Benennung	Note
Kategorie 1	hoher Instandhaltungsaufwand	4
Kategorie 2	mittlerer Instandhaltungsaufwand	7
Kategorie 3	geringer Instandhaltungsaufwand	10

Tabelle 3.19: Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums *Instandhaltungsaufwand*

Auswahlliste	Benennung	Note
Kategorie 1	hoher Aufwand für Systemerweiterung	4
Kategorie 2	mittlerer Aufwand für Systemerweiterung	7
Kategorie 3	geringer Aufwand für Systemerweiterung	10

Tabelle 3.20: Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums *Aufwand für Systemerweiterung*

3.4 Einordnung und Notenberechnung der zur Auswahl stehenden Kommunikationssysteme

Nach dem im vorherigen Abschnitt 3.3 sowohl die Bewertungstypen als auch die Noten für die verschiedenen Bewertungskriterien festgelegt und erläutert worden sind, müsste nun die Einordnung von den zur Auswahl stehenden Systemen in die korrespondierenden Kategorien erfolgen (vgl. Abbildung 3.1).

Abweichend von dieser Vorgehensweise soll jedoch hier weiterhin der prinzipielle Auswahlentscheidungsprozess beschrieben werden, d.h. zu diesem Zeitpunkt wird auf eine quantitative Einordnung von Kommunikationssystem verzichtet. Die eigentliche beispielhafte Bewertung einer repräsentativen Gruppe von Kommunikationssystemen für ein Beispielszenario und die schlussendliche Auswahl eines Systems, basierend auf den in Kapitel 3 erläuterten Schritte, wird in Kapitel 6 durchgeführt.

3.5 Nutzenfunktion für Bewertungskriterien

In Abschnitt 3.3 wurden den Bewertungstypen der verschiedenen Bewertungskriterien spezifische Noten zugeordnet, die eine Abbildung der unterschiedlichen Systemparameter und deren quantitative Größe auf eine *neutrale* Kenngröße ermöglichen. Diese Abbildung richtet sich im Allgemeinen nach der *Größe* des entsprechenden Parameters, d.h. den besten bzw. höchsten Parameterwerten werden die höchsten Notenwerte zugeordnet, so dass die Vergabe für sich betrachtet relativ neutral erfolgt.

Eine Rückkopplung zur eigentlichen späteren Applikation bzw. zum Nutzen, der aus einem hohen Notenwert für die Applikation resultieren könnte, fehlt. Es besteht somit noch keine Korrelation zwischen der Notenvergabe und dem Nutzen²³ für die Applikation. Das fehlende Bindeglied wird durch die Nutzenfunktion(-en) bereit gestellt, die den Notenwerten Nutzwerte bzgl. der Applikation zuordnen.

²³ Unter dem Begriff Nutzen ist hier in Anlehnung an [Bartzsch 01] im weitesten Sinne der Grad der Bedürfnisbefriedigung für die Applikation zu verstehen.

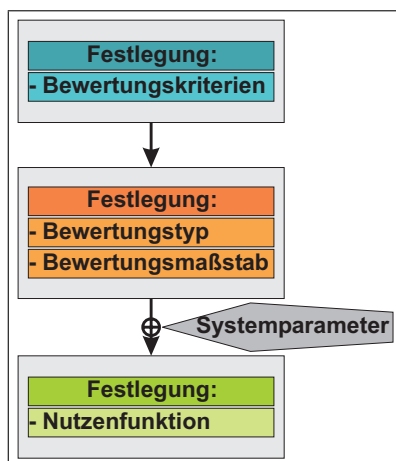


Abbildung 3.6: Flussdiagramm: Nutzenfunktion (4. Schritt des Entscheidungsprozesses)

Der Systemnutzer ist bei einer Systemauswahl nicht an den einzelnen Notenwerten der verschiedenen Alternativen interessiert, sondern vielmehr an dem aus diesen Notenwerten resultierenden bzw. entstehenden Nutzen. In Analogie zur Note wird der Nutzen durch einen Zahlenwert repräsentiert, der sich in Abhängigkeit des Notenwertes ergibt. Die eigentliche Festlegung der Korrelation zwischen Note und Nutzen bzw. die Erstellung der Nutzenfunktion ist im Wesentlichen durch das subjektive Verhalten der Person, die die entsprechende Festlegung trifft, bestimmt.

In Abhängigkeit des *Verhaltens* des Entscheidungsträgers²⁴ sind drei verschiedene Kategorien von Nutzenfunktionen zu unterscheiden.

Ist das Verhalten des Entscheiders von Neutralität geprägt, so korreliert der Nutzen eines Systems linear mit dem Notenwert. Ein höherer Notenwert führt analog zu einem höheren

Nutzwert des Systems für das betrachtete Bewertungskriterium.

Werden jedoch kleinen Notenwerten überproportional große Nutzwerte zugeordnet und nimmt die Nutzwertsteigerung im Bereich großer Notenwerte ab, so ist das Verhalten als konservativ zu bezeichnen. Die relativ kleinen Nutzwertsteigerungen im hohen Notenbereich weisen auf einen Grenzwertnutzen für die Applikation hin. Trotz steigender *Performance* der Systeme nimmt der Nutzen nur unwesentlich zu. Das heißt, der Mehrwert der entsprechenden Systeme wird zwar honoriert, ist aber in Hinblick auf die eigentlichen Anforderungen nicht notwendig, da auch schon Systeme mit geringeren Notenwerten diese hinreichend erfüllen können. Systeme mit hohen Notenwerten sind daher in diesem Zusammenhang im gewissen Maße als *überqualifiziert* zu bewerten. Das heißt, die entsprechende Funktionalität ist zwar ein *Nice-to-have* aber kein *Muss* für die Applikation. Konservativen Nutzenfunktionen ist ein rechtsgekrümmter, konkaver Verlauf gemein (vgl. [Dörsam 03]).

Konträr zur konservativen Nutzenfunktion verhält sich die progressive Nutzenfunktion. Hierbei steigt der Nutzwert überproportional im Bereich hoher Notenwerte, wohingegen niedrige Notenwerte nur zu sehr kleinen Nutzwerten führen.

Prinzipiell ist für jedes einzelne Bewertungskriterium eine eigene Nutzenfunktion zu definieren und die aus den Systemparametern resultierenden Notenwerte in Nutzwerte zu transformieren. Abweichend von dieser Vorgehensweise wird jedoch hier, zur Vereinfachung, für alle Bewertungskriterien die gleiche Nutzenfunktion verwendet, wobei je eine konservative, neutrale bzw. progressive Funktion zur Auswahl stehen.

Wie schon erläutert, hängt die Nutzenfunktion vom Verhalten des Entscheidungsträgers ab, so dass in Abhängigkeit der Applikation unterschiedliche Kurvenverläufe möglich sind. Für die spätere Bewertung von realen Kommunikationssystemen (Kapitel 6) werden hier beispielhaft drei Funktionen ausgewählt:

$$\begin{aligned} f_n(N_o) &= 10 \cdot N_o \\ f_k(N_o) &= 20 \cdot N_o - N_o^2 \\ f_p(N_o) &= N_o^2 \end{aligned}$$

f_n stellt eine neutrale, f_k eine konservative und f_p die progressive Funktion dar bzw. N_o den Notenwert als Eingangsparameter.

²⁴ hier: identisch mit dem Ersteller der Nutzenfunktion

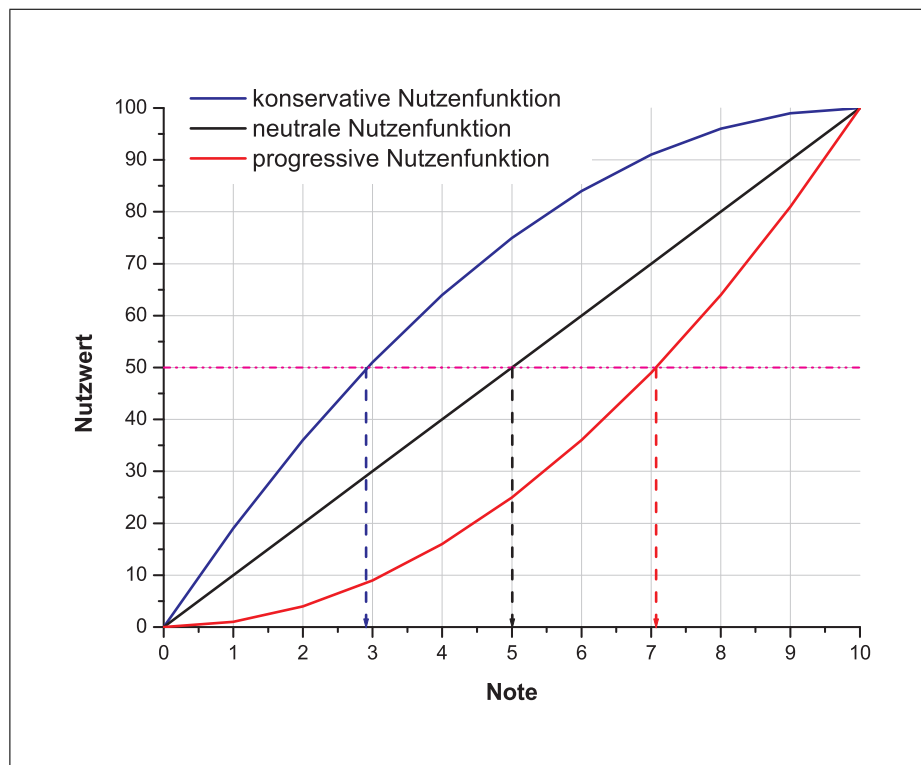


Abbildung 3.7: Verlauf der ausgewählten Nutzenfunktionen

Allen Funktionen ist ein Höchstwert von 100 gemein. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass dieser Wert nicht *100 % Nutzen* für das System bedeutet, da im Umkehrschluss Systeme mit einem Nutzwert von 50 nur zu 50 % der Applikation dienlich sein würden und somit eigentlich nicht berücksichtigt werden dürften. Das heißt, alle zu betrachtenden Kommunikationssysteme müssen mindestens in die Kategorie bzw. Klasse etc. des geringstwertigen Bewertungstyps des entsprechenden Bewertungskriteriums passen, um überhaupt in eine nähere Auswahl zu gelangen. Systeme die diese Grundanforderungen nicht erfüllen, fallen aus der Betrachtung heraus, da hier ein K.o.-Kriterium erfüllt ist.

Wie in Abbildung 3.7 erkennbar, erreicht die konservative Nutzenfunktion sehr schnell hohe Nutzwerte, so dass, wie erläutert, auch Systeme mit einer geringen Note im Verhältnis zu Systemen mit hohen Notenwerte gut abschneiden. Bei der konservativen Nutzenfunktion werden Werte von 50 schon bei einem Notenwert von ca. 3 erreicht, wohingegen dieser Wert bei einer progressiven Nutzenfunktion erst bei einem Notenwert von über 7 möglich ist. Systeme mit einem Notenbereich von 6 bis 7, was einer Einordnung in die mittleren Kategoriebereich der Bewertungstypen nach Abschnitt 3.2 entspricht, werden gemäß der konservativen Nutzenfunktion dem oberen Drittel des Wertebereichs zugeschrieben. Erfolgt diese Zuordnung nach der progressiven Funktion, werden nur Werte kleiner als 50 erreicht. Dies zeigt, dass die Wahl der Nutzenfunktion wesentlich die Höhe des korrespondierenden Nutzwerts bestimmt, der bei der späteren Berechnung des Erwartungsnutzwerts in Abschnitt 3.7 von entscheidender Bedeutung ist.

3.6 Festlegung der Gewichtungsfaktoren

In den vorherigen Abschnitten wurden die 21 Bewertungskriterien getrennt von einander betrachtet, so dass der Eindruck entsteht, dass allen Bewertungskriterien bzgl. einer späteren Systemaus-

wahl eine gleich hohe *Wertigkeit* gemein ist. Dies ist jedoch nur unter besonderen Randbedingungen der Fall. Üblicherweise ist die Höhe der Wertigkeit eines Bewertungskriteriums basierend auf den Anforderungsprofilen der Applikation individuell und spezifisch zu ermitteln. Der Einfluss eines Bewertungskriteriums auf die Systemauswahl kann je nach Applikation und Anwendungsfall variieren. So ist z. B. das Hauptbewertungskriterium Kommunikationsaufwand mit den Unterpunkten Nettoübertragungsrate und Effizienz bei einer Applikation im Bereich der Schutztechnik höher zu werten als bei einer Übermittlung von 15-minütlichen Energiefahrplänen.

Die unterschiedlichen Höhen der Wertigkeiten von Bewertungskriterien für eine Applikation führen somit zu einem *Ranking* der Kriterien. Um den entsprechenden Stellenwert eines Bewertungskriteriums für die Systemauswahl besser berücksichtigen zu können, wird hier die Höhe der Wertigkeit²⁵ durch einen korrespondierenden (prozentualen) Gewichtungsfaktor bewertet. Der hier verwendete Ansatz beruht auf der Überlegung, dass die *Gesamthöhe* aller Wertigkeiten (Summe der Rankingpunkte) der einzelnen Bewertungskriterien von der Applikation abhängt und in der Höhe variieren kann. Für die weitere Betrachtung wird daher allen möglichen Gesamthöhen (Summe der Rankingpunkte für eine Applikation) der Gesamtgewichtungsfaktor 1 bzw. 100 % zugeordnet, so dass der Anteil der verschiedenen Bewertungskriterien und deren Ranking an der Gesamthöhe anteilig und als dessen Gewichtungsfaktor angegeben werden kann. Die Summe aller *neuen* Gewichtungsfaktoren der 21 Bewertungskriterien ergibt somit immer 1 bzw. 100 %, wobei die Gewichtungsfaktoren der einzelnen Bewertungskriterien in Abhängigkeit ihres Anteils an der Summe der Rankingwerte zwischen 0 % und 100 % liegen können.

Die Verwendung von Wertigkeiten und deren Überführung in Gewichtungsfaktoren geschieht hier in Anlehnung an die Theorie der *Entscheidung unter Risiko* (vgl. [Dörsam 03]), bei der einzelnen Zuständen Eintrittswahrscheinlichkeiten zugeordnet werden können. Hierbei müssen die Wahrscheinlichkeiten nicht unbedingt statistisch bzw. mathematisch fundiert sein (objektive Wahrscheinlichkeiten), sondern können sich auch lediglich aus der subjektiven Sicht des Entscheidungsträgers ergeben (subjektive Wahrscheinlichkeiten). In Analogie zu den subjektiven Wahrscheinlichkeiten spiegelt auch das *Ranking* der Kriterien eine subjektive Bewertung bzw. Sicht des Entscheidungsträgers wieder, so dass die entsprechenden Gewichtungen in gewisser Weise mit den Wahrscheinlichkeiten der Entscheidungstheorie korrelieren.

Wie Eingangs schon erläutert, resultiert die Festlegung des Rankings und die daraus abgeleiteten Gewichtungsfaktoren für die unterschiedlichen Bewertungskriterien aus einem subjektiven Entscheidungsprozess. Die Gewichtungen der Kriterien können somit von Entscheidungsträger zu Entscheidungsträger, für die gleiche Applikation, individuell differieren. In diesem Kontext haben die in diesem Abschnitt festgelegten relativen Gewichtungsfaktoren (siehe in Tabelle 3.21 Feld *rel.G.*) beispielhaften Charakter und sollen als Anhaltspunkte für andere Applikationen dienen.

Bezüglich der Gewichtung der Bewertungskriterien besteht zum einen die Möglichkeit alle 21 Bewertungskriterien sukzessive zu gewichten oder zum anderen zuerst eine Gewichtung (Ranking) der Hauptgruppen durchzuführen und anschließend die *unterlagerten* Bewertungskriterien durch eine zusätzliche Gewichtung (Ranking) zu berücksichtigen (siehe z. B. in Tabelle 3.21 Feld *abs.G.1* bzw. 2). Aufgrund der besseren Übersichtlichkeit hinsichtlich der Gewichtung und Vorteilen bzgl. einer einfachen Modifikation der Gewichtung wird hier die zweite Methode bevorzugt.

Bei Verwendung der 2. Methode ergeben sich die eigentlichen *relativen Gewichtungsfaktoren* aus der Multiplikation der *absoluten Gewichtungsfaktoren* der Hauptgruppen und der unterlagerten Bewertungskriterien. Den beiden Gruppen der *absoluten Gewichtungsfaktoren* ist gemein, dass die Summe der Gewichtungen innerhalb der Gruppe gleich 100 % ergibt, so dass auch die Gesamtsumme der relativen Gewichtungen dem Wert 100 % entspricht.

²⁵ in Anlehnung an das verwendete Softwaretool CELSIEVAL: Rankingwerte von 0 bis 10 möglich

Hauptgruppe	abs. G.1	Bewertungskriterium	abs. G.2	rel. G.
Systempräferenz	14, 29 %	Systemdienstleister	15, 63 %	2, 23 %
		Schnittstellendefinition	31, 25 %	4, 46 %
		Systemstandardisierung	31, 25 %	4, 46 %
		Marktdurchdringung	21, 88 %	3, 13 %
Qualitätsmerkmale	20, 00 %	Zuverlässigkeit	36, 36 %	7, 27 %
		Verfügbarkeit	27, 27 %	5, 45 %
		Datenintegrität	36, 36 %	7, 27 %
Kommunikationsaufwand	5, 71 %	Nettodatenübertragungsrage	62, 50 %	3, 57 %
		Effizienz	37, 5 %	2, 14 %
Teilnehmerkenngrößen	28, 57 %	Übertragungsdistanz	19, 23 %	5, 49 %
		Teilnehmeranzahl	11, 54 %	3, 30 %
		Bandbreite	11, 54 %	3, 30 %
		Duty Cycle	13, 46 %	3, 85 %
		Frequenznutzung	13, 46 %	3, 85 %
		topogr. Abhängigkeit	15, 38 %	4, 40 %
		klima. Abhängigkeit	15, 38 %	4, 40 %
Teilnehmerinteraktion	11, 43 %	Interaktionsrichtung	60, 0 %	6, 86 %
		Betriebsart	40, 0 %	4, 57 %
Applikationsaufwand	20, 00 %	Integration	33, 33 %	6, 67 %
		Instandhaltung	33, 33 %	6, 67 %
		Erweiterbarkeit	33, 33 %	6, 67 %

Tabelle 3.21: Absolute und relative Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien für das Applikationsumfeld *dezentrale Versorgungsstrukturen*

Unter der Prämisse, dass eine Kommunikation zwischen modularen Energieerzeugern in dezentralen Versorgungsstrukturen vorrangig unter dem Aspekt des Energiemanagements und optimalen Anlageneinsatzes auf Basis eines 15-minütlichen Fahrplanaustauschs betrieben werden soll (vgl. Abschnitt 3.3.3), ist der Einfluss des Hauptkriteriums *Kommunikationsaufwand* auf die Systemauswahl als gering zu erachten. Entsprechendes Verhalten spiegelt sich hier in der Vergabe von geringen relativen Gewichtungsfaktoren (2,14 % bzw. 3,57 %) wieder.

In Hinblick auf einen Einsatz in dezentralen Versorgungsstrukturen bzw. in dezentralen Regionen ist der Bewertungspunkt *Applikationsaufwand* besonders hoch zu gewichten. Eine entsprechend hohe Gewichtung kann im Wesentlichen durch ökonomische Aspekte begründet werden. Bedingt durch die dezentrale Lage des Applikationsortes ist mit erhöhten Personalaufwendungen (Ressourcen und Kosten) für die Integration, die Instandhaltung und mögliche Erweiterung zu rechnen. Wünschenswert wäre daher, dass die entsprechenden Aufgaben durch lokal ansässige Personen, Handwerksbetriebe etc. durchgeführt werden könnten. Oft verhindert jedoch die Systemkomplexität in Verbindung mit einem geringen Ausbildungsgrad des lokalen Personals (speziell in dörflichen Strukturen in Entwicklungsländern) eine derartige Übertragung der anliegenden Aufgaben. Ziel muss es daher sein, Systeme zu präferieren bzw. zu etablieren, bei denen der Applikationsaufwand als gering zu erachten ist und lokales Personal, nach entsprechender Schulung, Applika-

tionsaufgaben übernehmen kann. Es macht keinen Sinn, Kommunikationssysteme zu verwenden, die nur von Spezialisten eingerichtet und bedient werden können, da diese dann im kleinsten Fehlerfall wieder zu dessen Behebung anreisen müssten. Das heißt, die Einfachheit eines Systems ist wesentlich mitentscheidend für dessen Wahl. Der entsprechenden Präferenz wird hier durch die hohen absoluten und relativen Gewichtungsfaktoren von 20 %, 33 % bzw. 6,67 % Rechnung getragen.

Da bzgl. der Applikation ein nicht zeitkritischer Datenaustausch (Energiefahrplan) postuliert wird, ist nicht die Austauschgeschwindigkeit sondern die Integrität der Daten von entscheidender Bedeutung. Das heißt, der auszutauschende Fahrplan muss an der Informationssenke korrekt empfangen werden. Wie schnell dies geschieht, ist von untergeordneter Relevanz. Zusätzlich ist auch eine hohe Zuverlässigkeit in Verbindung mit einer hohen Verfügbarkeit zu präferieren. Die Zuverlässigkeit ist im Wesentlichen vom eigentlichen Kommunikationssystem abhängig, so dass hier in Hinblick auf den dezentralen Applikationsort und den möglicherweise eingeschränkten Zugangsmöglichkeiten, sei es aus finanziellen oder geografischen Gründen (Distanz zum Applikationsort) hohe Zeiten zwischen zwei Ausfällen zu präferieren sind. Die Verfügbarkeit hängt mitunter von der Reperaturzeit ab, die sich aus der Verfügbarkeit von Ersatzteilen und dem Know-How des technischen Personals bzw. den Personalressourcen ableitet (vgl. Applikationsaufwand). Resultierend aus diesen Überlegungen werden daher die Bewertungskriterien der *Qualitätsmerkmale* bzgl. des Einsatzes von Kommunikationssystemen in dezentralen Versorgungsstrukturen hier mit den Faktoren 7,27 %, 5,45 % bzw. 7,27 % überdurchschnittlich zu gewichten.

In Analogie zur Präferenz von einfachen Systemen bzgl. des notwendigen Applikationsaufwandes ist auch die Systempräferenz und hierbei speziell die Bewertungskriterien Schnittstellendefinition und Systemstandardisierung von nicht zu vernachlässigender Bedeutung. Wie in Abschnitt 3.2.1 angemerkt, kann die Schnittstellenadaption im Bereich der informationstechnischen Vernetzung von dezentralen Energieerzeugern mit unter als problematisch erachtet werden. Entsprechende Probleme können natürlich durch Einbindung von Experten gelöst werden, wobei jedoch für dezentrale Strukturen in Bezug auf das relativ geringe Budget davon Abstand genommen werden soll. Hier sind Systeme vorzuziehen (siehe relative Gewichtung), die aufgrund der Schnittstellendefinition und der Systemstandardisierung untereinander kompatibel sind und somit eine einfache *Plug-and-Play* Funktionalität erlauben, so dass diese Systeme auch durch *Nichtexperten* betrieben werden können.

Für den anvisierten Energiefahrplanaustausch ist neben der korrekten Übertragung der Daten auch ein bidirektionaler Informationsaustausch erforderlich, da sonst keine Fahrpläne seitens der Erzeuger aggregiert (quittiert) werden können. Das Management könnte nur durch die Detektion von *Aktionsänderungen* innerhalb der Applikation Rückschlüsse ziehen, ob die gesendete Information beim Empfänger eingegangen und auch umgesetzt worden sind. Neben dieser fehlenden Quittierung erlaubt die unidirektionale Übertragung auch keine Übermittlung von Statusinformationen (Wartung, Fehlermeldung etc.) oder Zählwerten von den Erzeugeranlagen zum Management, so dass eine Bilanzierung und Einsatzplanung der Anlagen nur eingeschränkt möglich erscheint. Die hohe Relevanz der Interaktionsrichtung wird hier durch einen relativen Gewichtungsfaktor von 6,86 % berücksichtigt.

Die Bewertung des Hauptkriteriums Teilnehmerkenngrößen ist weitestgehend vom Applikationsort und den daraus resultierenden Randbedingungen abhängig. So ist zum Beispiel für die Festlegung des relativen Gewichtungsfaktors des Bewertungskriteriums *topografische Abhängig* wesentlich entscheidend, ob die informationstechnisch anzubindenden Komponenten durch Berge, Hügel usw. von einander getrennt bzw. auf unterschiedlichen Höhenniveaus liegen. Die unmittelbaren applikationsspezifischen Randbedingungen sind für die Festlegung der Gewichtungsfaktoren ausschlaggebend.

Da für diese Arbeit kein reales Applikationsbeispiel zu Grunde liegt und die in Kapitel 7 beschriebene weiterführende Untersuchung eines Kommunikationssystems für den Einsatz in dezentralen Versorgungsstrukturen unter Laborbedingungen im *Design-Zentrum Modulare Versorgungstechnik* durchgeführt wurde, spiegeln die in Tabelle 3.21 angeführten Gewichtungen Anhaltswerte wieder, die applikationsspezifisch anzupassen sind. Bzgl. der Laboruntersuchungen, die im Rahmen des Projektes *Vernetzung modularer Systeme* [ModIII 06] durchgeführt wurden, stand die informationstechnische Vernetzung von dezentralen Ortsnetzen (Minigrids) im Fokus. In diesem Kontext ist daher auch die hohe Gewichtung des Bewertungskriteriums *Übertragungsdistanz* in Höhe von 5,49 % zu verstehen.

3.7 Berechnung des Erwartungsnutzen

Nach dem in Abschnitt 3.4 prinzipiell die Einordnung und Notenberechnung der zur Auswahl stehenden Kommunikationssysteme auf Basis der zuvor in Abschnitt 3.2 und 3.3.1 festgelegten Bewertungskriterien und -typen erfolgte, kann mit dem in Abschnitt 3.5 erläuterten Verfahren für jedes Bewertungskriterium und Kommunikationssystem der spezifische Nutzwert berechnet werden. Die in Abschnitt 3.6 zusätzlich eingeführten relativen Gewichtungsfaktoren erlauben des Weiteren eine applikationsspezifische Gewichtung der verschiedenen Bewertungskriterien.

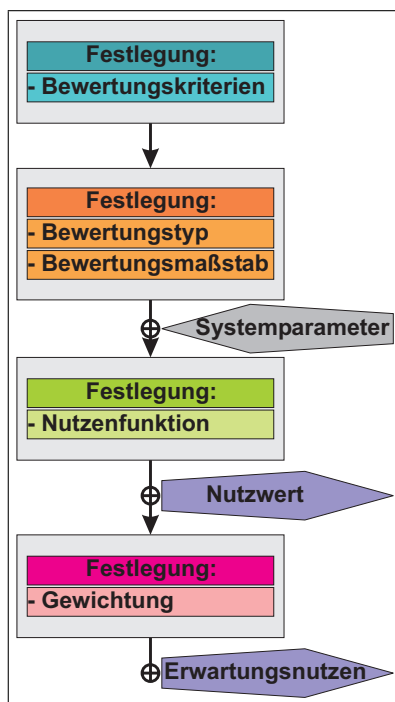


Abbildung 3.8: Flussdiagramm: Erwartungsnutzen (6. Schritt des Entscheidungsprozesses)

Mit den bis dato vorgeschlagenen Verfahren ist ein, auf die Nutzwerte der unterschiedlichen Bewertungskriterien bezogener applikationsspezifischer Vergleich der zur Auswahl stehenden Kommunikationssysteme möglich. Für den Auswahlprozess bedeutet dies jedoch, dass jeder einzelne Nutzwert eines Systems unter Berücksichtigung des Gewichtungsfaktor mit den korrespondierenden Werten der anderen Systeme verglichen werden muss. Es ist, in Hinblick auf die relativ hohe Anzahl von 21 Bewertungskriterien, ersichtlich, dass dieses Verfahren sehr unübersichtlich wird und der Aufwand mit zunehmender Auswahl möglicher Kommunikationssysteme sehr schnell ansteigt. Mit der Einführung eines Erwartungsnutzen und dessen Berechnung aus den zuvor ermittelten Kenngrößen (Nutzwert und relativer Gewichtungsfaktor) soll im folgenden der Aufwand und die Komplexität in Bezug auf eine Systemauswahl maßgeblich reduziert werden.

Die Verwendung eines Erwartungsnutzen geschieht, wie auch die Einführung der relativen Gewichtungsfaktoren, in Anlehnung an die *Theorie der Entscheidung unter Risiko*, bei der Nutzwerte (gegebene Risiko-Nutzenfunktion) durch Multiplikation mit den entsprechenden Auftrittswahrscheinlichkeiten in Erwartungswerte überführt werden und die Summe der Einzelprodukte den Erwartungsnutzen angibt.

Bzgl. einer Auswahl ist dann die Alternative zu wählen, die den größten Erwartungsnutzen besitzt (vgl. [Dörsam 03]).

Wird diese Methodik auf die bis jetzt beschriebene Vorgehensweise zur Auswahl von Kommunikationssystemen übertragen, so kann der Erwartungsnutzen aus der Gesamtsumme der Einzelprodukte, bestehend aus dem Nutzwert des Kommunikationssystems je Bewertungskriterium und

dem, für das entsprechende Bewertungskriterium applikationsspezifisch festgelegten, relativen Gewichtungsfaktor bestimmt werden. Es gilt der Zusammenhang:

$$E_k = \sum_{i=1}^n f_{i_k}(N_o) \cdot G_i \quad (3.1)$$

mit:

E_k : Erwartungsnutzen des k-ten Kommunikationssystems

i : Laufvariable für die Anzahl der Bewertungskriterien

n : Anzahl der Bewertungskriterien

$f_{i_k}(N_o)$: Nutzwert der Noten N_o des i-ten Bewertungskriteriums und k-ten Kommunikationssystems

G_i : relativer Gewichtungsfaktor des i-ten Bewertungskriteriums

Durch die Bestimmung des Erwartungsnutzen werden sowohl die technischen Parameter und applikationsspezifischen Aspekte als auch die subjektiven Bewertungen zu einem Wert vereint. Alle zur Auswahl stehenden Kommunikationssysteme können somit durch einen Wert für die entsprechende Applikation beschrieben werden. Ein Vergleich der Systeme untereinander ist dadurch sehr einfach möglich. Bzgl. einer Systemauswahl sind unter Vernachlässigung ökonomischer Randbedingungen und Aspekte, Systeme zu präferieren, die für die entsprechende Applikation den größten Erwartungsnutzen aufweisen.

In Kombination mit der zuvor getroffenen Festlegung eines maximal möglichen Nutzwerts von 100 Punkten je Bewertungskriteriums (Abschnitt 3.5) und einen relativen Gesamtgewichtungsfaktor²⁶ von 1, ist ein maximaler Erwartungsnutzen von 100 möglich. Der entsprechende Wert kann aber nur von Systemen erzielt werden, die je Bewertungskriterium die höchste Note erzielen, so dass dieser Maximalwert eher theoretischer Natur ist.

3.8 Ökonomische Betrachtung

Ist eine Systementscheidung nur aufgrund der technischen und applikationsspezifischen Randbedingungen zu treffen, so ist mit der Wahl des Kommunikationssystems, das den größten Erwartungsnutzen aufweist, der Entscheidungsfindungsprozess abgeschlossen.

In Realität spielen jedoch neben den systemtechnischen Eigenschaften auch die mit den Systemen verbundenen Kosten eine entscheidende und nicht zu vernachlässigende Rolle. Kommunikationssysteme kosten Geld, seien es Investitionsausgaben und/oder betriebsgebundene Ausgaben. Diese zusätzlichen Aufwendungen müssen durch den Mehrwert, der durch den Einsatz des Systems entsteht, gerechtfertigt sein. Das heißt, das Kommunikationssystem bzw. die Kommunikation ist nicht zum Selbstzweck da (*Nice-to-have*), sondern muss einen Zweck erfüllen. Diesem kann ein monetärer *Gewinn* zugeordnet werden, der den Einsatz und die damit verbundenen Ausgaben schlussendlich rechtfertigt.

So kann z. B. ein übergeordnetes Energiemanagementsystem auf Basis von Einspeiseprognosen für dargebotsabhängige Erzeugungsanlagen, in Korrelation mit den prognostizierten Lastganglinien der Verbraucher, einen 1/4-h-Leistungsfahrplan zur Minimierung des Einsatzes von fossilen Energieträgern für nicht dargebotsabhängige Erzeugern erstellen. Die durch die Minimierung der

²⁶ \sum aller relativen Gewichtungsfaktoren = 100 %

fossilen Energieträger eingesparten Aufwendungen müssen jedoch auch die zusätzlichen Ausgaben für die benötigte Kommunikation decken. Nur dann ist ein Einsatz entsprechende Systeme begründbar.

Wie am obigen Beispiel erkennbar, sind mögliche monetäre Einsparpotenziale durch den Einsatz von Kommunikationssystemen immer vom eigentlichen Zweck der Kommunikation und von, aus der Applikation abzuleitenden, weiteren Faktoren abhängig (z. B. Kosten für fossile Energieträger, eingesparte Menge etc.). In diesem Zusammenhang ist daher eine allgemein gültige Aussage, wann eine Kommunikation bzw. ein Kommunikationssystem wirtschaftlich sinnvoll bzw. durch einem der Kommunikation zugeordneten monetären Gewinn gerechtfertigt ist, nicht möglich. Es ist daher zwingend erforderlich, vor Beginn des Auswahlprozesses, die durch eine Kommunikation zu erzielenden Einsparpotenziale bzw. Gewinne mittels Analysen und Kostenbewertungen zu ermitteln. Anschließend ist das verfügbare *Kommunikationsbudget* hieraus abzuleiten. Für das weitere Vorgehen wird daher angenommen, dass das *Kommunikationsbudget* bekannt ist und die Ausgaben für die Kommunikation dieses Limit nicht überschreiten dürfen, da sonst ein K. o.-Kriterium erfüllt ist.

Für eine Ermittlung der jährlichen Gesamtkosten eines Kommunikationssystems sind neben Kenntnissen bzgl. der zu berücksichtigenden Kostenfaktoren (direkte oder indirekte Kosten, operative Ausgaben usw.) auch Angaben zur Abschreibungsdauer, dem Kapitalzins, der Teuerungsrate etc. erforderlich (siehe [Bartzsch 01]). Viele dieser Parameter hängen unmittelbar vom Applikationsort ab (z. B. Transportkosten, Lizenzkosten, Zinssatz), so dass eine detaillierte Betrachtung nur applikationsspezifisch erfolgen kann.

Für die in Kapitel 6 zu berücksichtigenden Kosten werden vereinfacht nur pauschalisierte Investitions- und Betriebskosten der Systeme zum aktuellen Betrachtungszeitpunkt berücksichtigt. Unter Beachtung einer festgelegten Abschreibungsdauer, eines Kapitalzinses und einer jährlichen Betriebskostenteuerung können die jährlichen Gesamtkosten ermittelt werden. Da die explizite Berechnung der jährlichen Gesamtaufwendungen mittels der Software CELSIEVAL erfolgt, wird im Rahmen dieser Arbeit auf eine explizite Herleitung der Kostenberechnung (Annuität, Barwert etc.) verzichtet und auf die einschlägige Literatur verwiesen (siehe z. B. [Bartzsch 01]).

3.9 Auswahl des Bezugssystems

Durch die Berechnung der jährlich erforderlichen Gesamtaufwendungen für ein Kommunikationssystem bzw. für die anvisierten Kommunikationsaufgaben (in Abhängigkeit der Applikation) ist, neben dem ermittelten Erwartungsnutzen des Systems, ein weiterer Entscheidungsparameter für die Systemauswahl etabliert worden. Es besteht somit nun prinzipiell die Möglichkeit auch monetäre Effekte bei einer Systemauswahl zu berücksichtigen. Jedoch ist hiermit auch ein weiterer *Freiheitsgrad* geschaffen worden, der die Entscheidungsfindung erschweren kann.

Für eine Auswahlentscheidung wäre es natürlich wünschenswert, wenn es ein System gäbe, das die geringsten Kosten und den höchsten Erwartungsnutzen aufweist. In einem entsprechenden Fall ist die Entscheidung dann sehr einfach zu treffen. Jedoch trifft dies nur in Ausnahmefällen zu. So könnte z. B. ein System einen Erwartungsnutzen von 78 Punkten haben, aber 200 € günstiger sein als ein anderes System mit einem Erwartungsnutzen von 85 Punkten. Bezüglich der Systemauswahl stellt sich die Frage, welches der beiden Systeme zu wählen ist. Soll das günstigere System mit einem geringeren Erwartungsnutzen dem teureren System vorgezogen werden, oder rechtfertigt der größere Erwartungsnutzen die höheren Gesamtaufwendungen pro Jahr?

Das obige Beispiel zeigt, dass zwingend zu klären ist, wie eine Auswahl zu erfolgen hat und auf

welcher Sachgrundlage. Dies gilt im Besonderen, wenn die Systeme, in Bezug auf den Gesamtaufwand und des Erwartungswerts, sehr eng bei einander liegen.

Als ein möglicher Lösungsansatz wird hier ein mehrstufiger Entscheidungsprozess unter Einbeziehung eines neuen Bezugssystems verwendet und vorgestellt. Ziel ist es, die Entscheidungsfindung auf einen Vergleich der zur Auswahl stehenden Systeme, mit einem Bezugssystem zurückzuführen. Die Entscheidung wird primär unabhängig von einem Vergleich der Systeme untereinander und dadurch wesentlich vereinfacht.

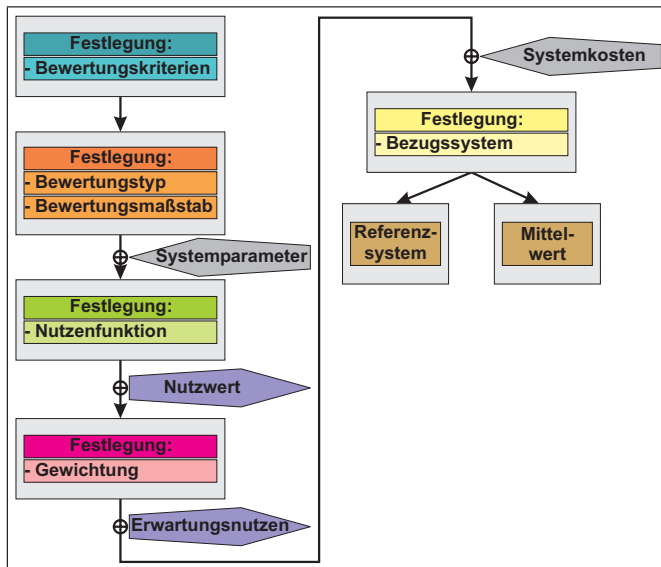


Abbildung 3.9: Flussdiagramm: Auswahl des Bezugssystems (8. Schritt des Entscheidungsprozesses)

In einem ersten Schritt ist das Bezugssystem festzulegen. Dieses stellt gewissermaßen das *Normal* für die spätere Entscheidung dar, da die hier zugrunde gelegten Werte des Erwartungsnutzen und des monetären Aufwands die 100 %-Marke definieren.

Bei einem Vergleich der zur Auswahl stehenden Systeme mit dem Bezugssystem, sind nicht die absoluten Differenzen des Erwartungswertes bzw. des jährlichen Gesamtaufwandes von Interesse, sondern vielmehr wie sich das entsprechende System gegenüber dem *Normal* darstellt. In diesem Zusammenhang sind die relativen Abweichungen

der Werte, bezogen auf das Bezugssystem, von entscheidender Bedeutung.

Da die Größe des Erwartungsnutzen und des monetären Aufwandes direkt die relative Abweichung beeinflusst, sind die entsprechenden Werte geeignet zu wählen. So kann z. B. das zuvor berechnete Kommunikationsbudget (vgl. Abschnitt 3.8), als ein geeigneter Wert für die jährlichen Gesamtkosten des Bezugssystems und ein Erwartungsnutzen im oberen Drittel des Punktbereichs verwendet werden. Prinzipiell ist dem Entscheider freigestellt, welche Werte als Bezugswerte eingesetzt werden, so dass auch ein Vergleich mit anderen realen Systemen (Referenzsystemen als Bezugssystem) möglich ist.

Sind keine Referenzangaben verfügbar, so können Bezugswerte durch eine Mittelwertbildung der Erwartungsnutzen und der Kosten aller zur Auswahl stehenden Systeme in einfachster Weise ermittelt werden.

3.10 4-Quadranten-Matrix und Systemauswahl

Sind der Erwartungsnutzen und die jährlichen Gesamtkosten des Bezugssystems durch Wahl eines geeigneten Referenzsystems oder durch die Mittelwertberechnung der zur Auswahl stehenden Systeme ermittelt worden, kann nun ein weiterer Schritt in Richtung Systemauswahl getätigt werden.

Wie im vorherigen Abschnitt 3.9 schon angemerkt, sind nicht die absoluten Differenzen des Erwartungsnutzen bzw. des jährlichen Gesamtaufwandes von Interesse, sondern vielmehr wie sich das entsprechende System gegenüber dem *Normal* darstellt. Zu diesem Zweck sind daher der

prozentuale Zuwachs des Erwartungsnutzen und der jährlichen Gesamtkosten je zu betrachtenden Systems in Relation zum Bezugssystem zu berechnen. Für den relativen Erwartungsnutzenzuwachs gilt:

$$E_k^{\text{relativ}} = \frac{E_k - E_B}{E_B} \quad [\%] \quad (3.2)$$

bzw. für den relativen Gesamtkostenzuwachs:

$$A_k^{\text{relativ}} = \frac{A_k - A_B}{A_B} \quad [\%] \quad (3.3)$$

mit:

E_k^{relativ} : relativer Erwartungsnutzenzuwachs des k-ten Kommunikationssystems, [%]

E_k : Erwartungsnutzen des k-ten Kommunikationssystems,

E_B : Erwartungsnutzen des Bezugssystems (Mittelwert oder Referenz,)

A_k^{relativ} : relativer Kostenzuwachs des k-ten Kommunikationssystems, [%]

A_k : jährliche Gesamtkosten des k-ten Kommunikationssystems,

A_B : jährliche Gesamtkosten des Bezugssystems (Mittelwert oder Referenz).

Die berechneten prozentualen Zuwächse der verschiedenen Systeme können zur Verdeutlichung als Koordinatenpunkte (Paare) eines kartesischen Koordinatensystems, dessen Ursprung den Werten des Bezugssystems entspricht, aufgefasst werden. Auf der Abszissenachse ist der Erwartungsnutzenzuwachs und auf der Ordinatenachse der Kostenzuwachs (jährliche Gesamtkosten) aufzutragen. Ein negativer Abszissenwert bedeutet, dass der Erwartungsnutzen geringer ist als der des Bezugssystems, wohingegen negative Ordinatenwerte günstigere Systeme gegenüber dem Bezugssystem auszeichnen. In Abbildung 3.10 sind beispielhaft die Koordinaten von sieben Systemen in ein entsprechendes Koordinatensystem (*4-Quadranten-Matrix*) eingetragen.

Aufgrund der kartesischen Darstellung ist das Koordinatensystem in vier Quadranten (I–IV) unterteilt, denen bzgl. der Systemscheidung unterschiedliche Bedeutungen zukommen. Allen Systemen, deren Koordinatenpunkte im zweiten Quadranten liegen, sind ein negativer Erwartungsnutzenzuwachs und ein positiver Kostenzuwachs gemein. Der Erwartungsnutzen dieser Systeme sinkt bei gleichzeitigem Anstieg der Kosten bezogen auf das Bezugssystem. Dies bedeutet, dass die Systeme weniger *Nutzen* und höhere Kosten verursachen. Insgesamt sind daher Systeme, die diesem Quadranten zugeordnet werden können, bei einer Systemauswahl zu meiden.

Systeme, deren Koordinatenpunkte im vierten Quadranten liegen, sind für eine Systemauswahl prädestiniert. Dieser Bereich ist durch einen positiven Erwartungsnutzenzuwachs und einen negativen Kostenzuwachs gekennzeichnet – der Erwartungsnutzen nimmt bei sinkenden Kosten zu.

Im Quadranten I ist sowohl eine Zunahme des Erwartungsnutzen (positive Werte) als auch ein positiver Kostenzuwachs zu verzeichnen. Systeme dieses Bereichs kosten somit mehr als das Bezugssystem, haben aber auch einen höheren Erwartungsnutzen. In diesem Kontext muss die Frage gestellt werden, inwieweit ein Zuwachs an Erwartungsnutzen die höheren Kosten rechtfertigt bzw. welche Korrelation zwischen dem Kosten- und dem Erwartungsnutzenzuwachs unterstellt werden darf. Wird bei der Wahl des Bezugssystems das zur Verfügung stehende Kommunikationsbudget zur Festlegung der Bezugskosten herangezogen, so ist ein Kostenzuwachs nicht vertretbar bzw. unzulässig. Systeme, die dann dem Quadranten I zuzuordnen sind, dürfen nicht ausgewählt werden.

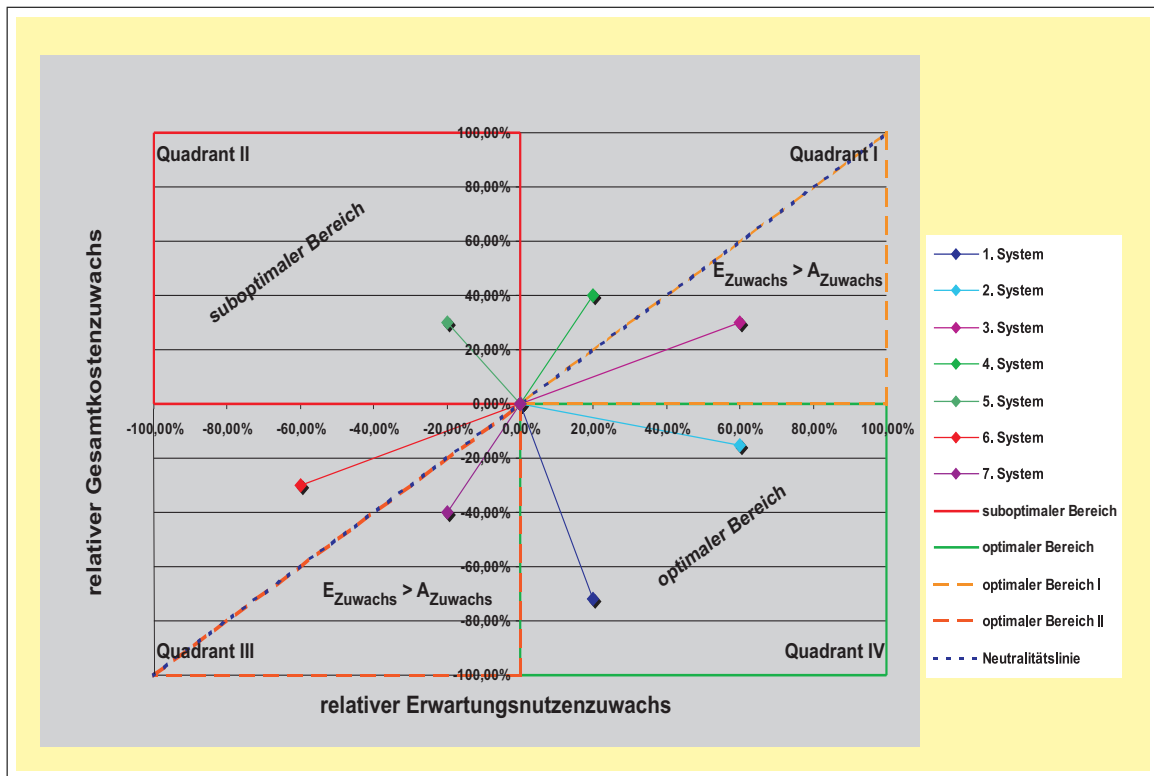


Abbildung 3.10: 4-Quadranten-Entscheidungsmatrix: Darstellung des Erwartungsnutzen- und jährlichen Gesamtkostenzuwachs für sieben Beispielsysteme

Anders gestaltet sich die Situation für Bezugssysteme, deren Kosten unterhalb des Budget liegen, da hier eine explizite Korrelation fehlt. In diesem Fall ist eine Funktionsvorschrift festzulegen, die den erlaubten relativen Kostenzuwachs bei positivem Erwartungsnutzenzuwachs beschreibt²⁷. Ähnlich der Festlegung der Nutzenfunktion im Abschnitt 3.5, ist auch hier die Wahl der Funktion vom Verhalten des Entscheiders abhängig, so dass progressive, lineare und auch degressive Verläufe mit unterschiedlichen Steigungen denkbar sind.

Stehen explizit keine Funktionen zur Verfügung, so kann, wie für die Systemauswahl in Kapitel 6 verwendet, eine äquidistante Geradenfunktion durch den Ursprung angesetzt werden. Ein positiver Kostenzuwachs ist dann nur solange zulässig, wie auch der Erwartungsnutzenzuwachs mindestens im gleichen Maße ansteigt und die Budgetgrenze nicht überschritten wird. In Abbildung 3.10 ist diese Funktion als Neutralitätslinie dargestellt. Systeme, deren Koordinatenpunkte oberhalb dieser Linie liegen, sind von der Systemauswahl auszuschließen, da der Kostenzuwachs höher ist als der korrespondierende Erwartungsnutzenzuwachs.

Die für den Quadranten I erläuterten Zusammenhänge gelten prinzipiell auch für den Bereich III, wobei jedoch hier die Korrelation zwischen dem negativen Kosten- und Erwartungsnutzenzuwachs berücksichtigt werden muss.

Zusammenfassend kann daher festgestellt werden, dass bei der Verwendung einer äquidistanten Geradenfunktion nach Abbildung 3.10 eine Vorauswahl derart möglich ist, dass alle Systeme, deren Koordinatenpunkte (Wertepaare) unterhalb der Neutralitätslinie liegen, bei der weiteren Systemauswahl berücksichtigt werden können (siehe *optimaler Bereich I* bzw. *II* und Quadrant IV in Abbildung 3.10) und Systeme oberhalb dieser Geraden für eine weitere Systemauswahl nicht

²⁷ Eine entsprechende Funktion ist auch für den Quadranten III zu definieren.

betrachtet werden müssen. (Für das hier betrachtete Beispiel ist somit nur eine Systemauswahl zwischen den Systemen 1, 2, 3 und 7 zu treffen.)

Falls mindestens ein System nach erfolgter Vorauswahl im Quadranten IV liegt, sind aller anderen Systeme, die sich außerhalb dieser Quadranten befinden, nicht weiter zu berücksichtigen. Begründet ist dies in der Tatsache, dass der vierte Quadrant zwei Vorteile vereint. Zum einen sinken die Kosten und zum anderen ist eine Zunahme des Erwartungsnutzens zu verzeichnen. Bei Systemen, die dem Bereich I bzw. II zugeordnet werden, steigt der Erwartungsnutzen bzw. sinken die Kosten, wobei jedoch der scheinbare Vorteil jeweils durch einen Kostenanstieg oder Erwartungsnutzenabnahme beeinträchtigt wird. In Bezug auf die Beispielsysteme in Abbildung 3.10 sind daher nur noch die Systeme 1 und 2 von Interesse.

Die Entscheidung welches der Systeme des vierten Quadranten ausgewählt wird, kann unter vielfältigen Gesichtspunkten erfolgen. Stehen zum Beispiel allgemeine technische Aspekte im Fokus, so ist das System zu wählen, das den größten positiven Erwartungsnutzenzuwachs im vierten Quadranten aufweist. Sind hingegen die ökonomischen Belange von entscheidendem Interesse, so fällt die Auswahl auf das System mit dem größten negativen Kostenzuwachs (größte finanzielle Einsparung gegenüber dem Bezugssystem).

Sind keinerlei Präferenzen vorhanden, so ist eine Entscheidung nur durch iterative Entscheidungsprozesse zu bestimmen. Das heißt, alle Systeme die aktuell dem vierten Quadranten zugeordnet werden, stellen die Ausgangsbasis für eine neue, vereinfachte 4-Quadranten-Matrix dar. Als neues Bezugssystem wird dann der Mittelwert der Zuwächse der Systeme gewählt. Es werden also nicht wie zuvor die absoluten Werte des Erwartungsnutzens und der Kosten der Systeme verwendet, sondern die nach Formel 3.2 und 3.3 schon ermittelten relativen Zuwächse. Durch diesen Schritt bleibt die Korrelation zum alten Bezugssystem gewährleistet (iterativer Prozess). Da die Kostenzuwächse in der alten 4-Quadranten-Matrix negative Werte aufweisen, sind für das neue Bezugssystem nur die entsprechenden Beträge zu verwenden. Die für die Darstellung der Systeme in der neuen 4-Quadranten-Matrix erforderlichen *neuen* relativen Zuwächse werden gemäß Formel 3.2 und 3.3 berechnet. Hierbei ist darauf zu achten, dass für den Erwartungsnutzen des k -ten Systems der prozentuale Wert des alten Erwartungsnutzenzuwachses bzw. für die jährlichen Gesamtkosten des k -ten Kommunikationssystems der prozentuale Betrag des alten Kostenzuwachses eingesetzt werden. Der hier beschriebene iterative Prozess ist solange durchzuführen (weitere Iterationsschleifen), bis entweder nur noch ein System oder kein System dem vierten Quadranten zuzuordnen ist. Falls nur noch ein System vorliegt, ist dieses System für die Applikation zu wählen. Es weist von allen zur Auswahl stehenden Systemen sowohl den größten relativen Erwartungsnutzenzuwachs als auch den höchsten negativen Kostenzuwachs in Korrelation mit dem Bezugssystem auf.

Befinden sich nach der Vorauswahl und den iterativen Schleifen keine Systeme im vierten Quadranten, so sind primär Systeme innerhalb des Bereichs II in die nähere Auswahl einzubeziehen. Diese Systeme weisen einen positiven Erwartungsnutzenzuwachs gegenüber Systemen des Bereich I auf und sind daher unter technischen Gesichtspunkten zu präferieren. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass alle Systeme des Bereichs I das Kommunikationsbudget als feste Obergrenze (K. o.-Kriterium) nicht überschreiten. In Bezug auf die verbleibenden Systeme, wird das System ausgewählt, welches am nächsten zur Abszissenachse liegt und den höchsten Erwartungsnutzenzuwachs besitzt. Es wird das System ausgewählt, das bzgl. des Verhältnisses von Kostenzuwachs zu Erwartungsnutzenzuwachs den geringsten Wert aufweist und somit den größten Erwartungsnutzenzuwachs für den kleinsten Kostenzuwachs vereint.

Liegen alle Systeme nach der Vorauswahl im Bereich II, so ist jenes System zu wählen, das den kleinsten negativen Erwartungsnutzenzuwachs besitzt. Monetäre Aspekte, in Bezug auf die Höhe des negativen Kostenzuwachses, sollten hier nicht weiter betrachtet werden. Die *Kosten* der

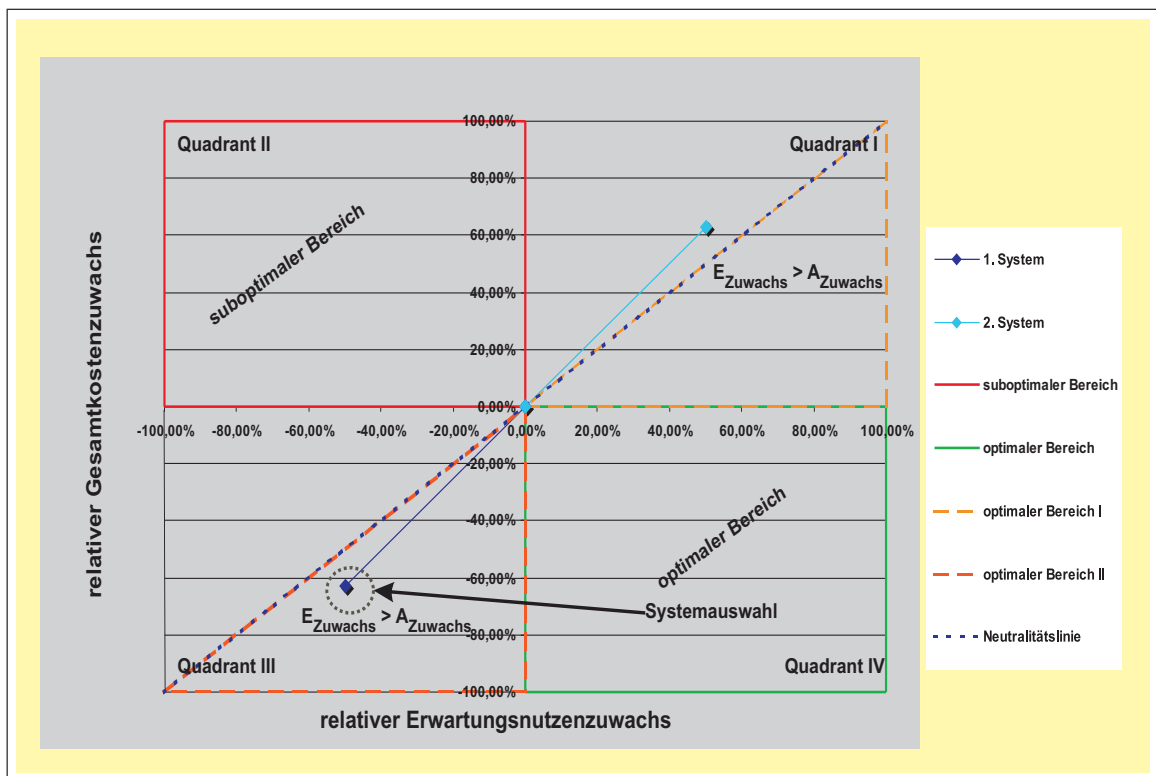


Abbildung 3.11: 4-Quadranten-Entscheidungsmatrix: Darstellung des Erwartungsnutzen- und jährlichen Gesamtkostenzuwachs (1. Iterationsschleife)

Systeme im Bereich II sind ausnahmslos geringer als die für das Bezugssystem, so dass eine Systementscheidung ausschließlich aus technischer Sicht zu treffen ist.

Die Überführung von Erwartungsnutzen und Kosten der verschiedenen Systeme in relative Größen, die Darstellung der Koordinatenpunkte in einer 4-Quadranten-Matrix und die abschließende Systementscheidung auf Basis der *Systemlage* innerhalb der 4-Quadranten-Matrix erlaubt eine einfache und schnelle Entscheidungsfindung.

Insgesamt ist mit dem hier vorgestellten 10-Schritte-Ansatz (siehe Abbildung 3.1 bzw. Einleitung zu Abschnitt 3), ein strukturierter Leitfaden zur Auswahl von geeigneten Kommunikationssystemen für dezentrale Versorgungsstrukturen geschaffen worden. Neben den technischen und applikationsspezifischen Anforderungen werden sowohl die Eigenschaften der Kommunikationssysteme als auch ökonomische Aspekte beachtet. Nur die Berücksichtigung all dieser Faktoren in einem gesamtheitlichen Ansatz erlaubt eine geeignete Systemauswahl.

4 Providerbasierte Kommunikationssysteme

Nach dem im vorherigen Kapitel die Anforderungen an Kommunikationssystemen detailliert erörtert und Entscheidungswege aufgezeigt wurden, werden im folgenden Kapitel providerbasierte Kommunikationssysteme für den Einsatz in dezentralen Versorgungsstrukturen untersucht. Im Gegensatz zu den nicht-providerbasierten Systemen, stehen hierbei nur Kommunikationssysteme im Fokus, bei denen explizit ein externer Versorger oder Anbieter für die Kommunikationsinfrastruktur (Carrier-Netz) und die Erbringung von Dienstleistungen verantwortlich ist. Neben *leitungs-basierten Carrier-Netzen* (z. B. öffentliches Telefonnetz), *funkbasierten terrestrischen Carrier-Netzen* (öffentliches GSM-Mobilfunksystem) werden *funkbasierte, nicht terrestrische Carrier-Netze* (Satellitenfunksysteme) für einen Datenaustausch zwischen dezentralen Versorgungsstrukturen und den unterlagerten Komponenten analysiert.

Es kann gezeigt werden, dass der in städtischen Gebieten bzw. hoch entwickelten Ländern verfolgte Ansatz des Einsatzes von öffentlichen Telefonnetzen (Mobilfunk und Festnetztelefonie) zur Datenübertragung, nur begrenzt auf dezentrale Versorgungsstrukturen übertragbar ist. Als verantwortlich hierfür kann die aktuell unzureichende oder auch gänzlich fehlende Kommunikationsinfrastruktur detektiert werden. Inwieweit eine zukünftige Nutzung von öffentlichen Carrier-Netzen in dezentralen Versorgungsstrukturen möglich ist, hängt im Wesentlichen vom Auf- bzw. Ausbau der erforderlichen Infrastruktur ab. Jedoch kann die Erschließung dezentraler Versorgungsstrukturen mit öffentlichen Carrier-Netzen, speziell in Hinblick auf die ökonomischen Randbedingungen (vgl. Abschnitt 2.2) als nicht gesichert erachtet werden.

4.1 Leitungsbasierte Carrier-Netze (öffentliches Telefonnetz)

Prinzipiell besteht die Möglichkeit, dezentrale Versorgungsstrukturen und deren Komponenten durch leitungs-basierte Carrier-Netze miteinander zu vernetzen. Unter einem leitungs-basierten Carrier-Netz ist eine leitungsgebundene Infrastruktur für die Abwicklung von technischer Kommunikation zu verstehen, die, unter allgemein geltenden Geschäftsbedingungen, zur allgemeinen Benutzung von einem Anbieter bereit gestellt wird (vgl. [Jung 02]). Das bekannteste und flächendeckendste leitungs-basierte Carrier-Netz, ist das *öffentliche Telefonnetz*, bei dem in Abhängigkeit der verwendeten Technologien ein Datenaustausch analog oder digital erfolgen kann.

Bei der analogen Datenübertragung mit einem Sprachmodem¹ können in Abhängigkeit der Modulation Datenraten bis zu 56 kbps realisiert werden. Höhere Datenraten sind durch den Einsatz digitaler Technologien und der Belegung größer Frequenzbereiche bzw. Bandbreiten erzielbar.

Im Kontext der schnellen digitalen Datenübertragung sind im Speziellen ISDN² und die unterschiedlichen Varianten des DSL³ zu nennen (vgl. Tabelle 4.1). Auf eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Technologien und deren Vor- und Nachteile wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet und auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen (siehe [Jung 02], [Bluschke 01] etc.).

¹ Sprachmodem: ca. 3,2 kHz Bandbreite; verwendeter Frequenzbereich: 300 – 3400 Hz

² ISDN: Integrated Services Digital Network

³ DSL: Digital Subscriber Line

DSL-Varianten	Datenrate	Übertragungsdistanz
ISDN	128 kbps	5,5 km bei 0,5 mm Verdrahtung
ADSL	1,544 – 8,448 Mbps (downstream) 32 – 768 kbps (upstream)	2,7 – 5,5 km
HDSL	1,544 Mbps (2·twisted-pair) 2,048 Mbps (3·twisted-pair)	3,6 km bei 0,5 mm Verdrahtung
VDSL	12,9 – 51,8 Mbps (downstream) 1,5 – 2,3 Mbps (upstream)	0,3 – 1,4 km

Tabelle 4.1: Datenraten und maximale Übertragungsdistanzen für unterschiedliche DSL-Varianten; Quelle: [Krsti 00],[Bluschke 01]

4.1.1 Verfügbarkeit von leitungsbasierten Telefonnetzen in dezentralen Versorgungsstrukturen

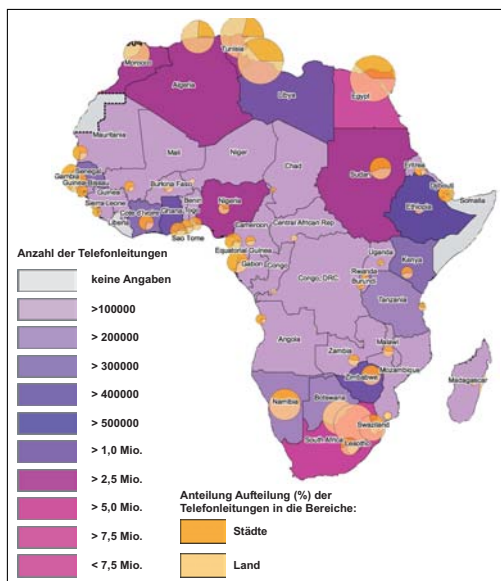


Abbildung 4.1: Telefonleitungen in Afrika; Quelle: [IDRC 06]

Alle leitungsbasierten Technologien benötigen als Übertragungsmedium entweder ein metallische Kabel, (z. B. Kupferdraht) oder Lichtwellenleiter. Im einfachsten Fall kann das, für die Sprachkommunikation dimensionierte Telefonkabel, zum Datenaustausch genutzt werden. Es ist jedoch anzumerken, dass die erforderliche Leitungsinfrastruktur nicht immer existiert. Dies gilt im Besonderen für die hier betrachteten dezentralen Versorgungsstrukturen.

Während in Europa durchschnittlich 111,6 Telefonteilnehmeranschlüsse auf 100 Einwohner⁴ entfallen, so sind es in Afrika gerade einmal 11 ([ITU 04]). Bei der Ermittlung der Teilnehmeranschlüsse wird die Mehrfachnutzung der Telefonleitungen berücksichtigt, so dass die eigentliche Leitungsinfrastruktur noch geringer ist. Werden anstatt der Teilnehmeranschlüsse die Teilnehmeranschlussleitungen (Abbildung 4.1) pro 100 Einwohner

betrachtet, so sinkt das Verhältnis zwischen Afrika und Europa, trotz einer durchschnittlichen jährlichen Zuwachsrate von 4,8 % neu installierte Telefonleitungen in Afrika (Abbildung 4.2, auf unter 8 % (Europa: 40,9 Telefonleitungen/100 Einwohner, Afrika: 3,11 Telefonleitungen/100 Einwohner).

Im Zeitraum von 1996 – 2004 wurden ca. 13,2 Mio. zusätzliche Telefonleitungen in Afrika verlegt, wohingegen in Europa ca. die 4-fache Anzahl zusätzlicher Leitungen installiert wurde. Berücksichtigt man des Weiteren, dass das Verhältnis von städtischen zu ländlichen Telefonanschlüssen in Afrika im Bereich von 3 – 5,5 zu 1 liegt [Afemann 01], so ist ersichtlich, dass die in ländlichen Gebieten zur Verfügung stehende Zahl der Anschlüsse und die daraus resultierende potenzielle

⁴ für das Jahr 2004

Möglichkeit der Nutzung sehr gering ist. Das heißt, die Wahrscheinlichkeit, dass ein Anschluss oder eine Leitung am Applikationsort der dezentralen Komponente vorhanden ist, kann als sehr gering erachtet werden.

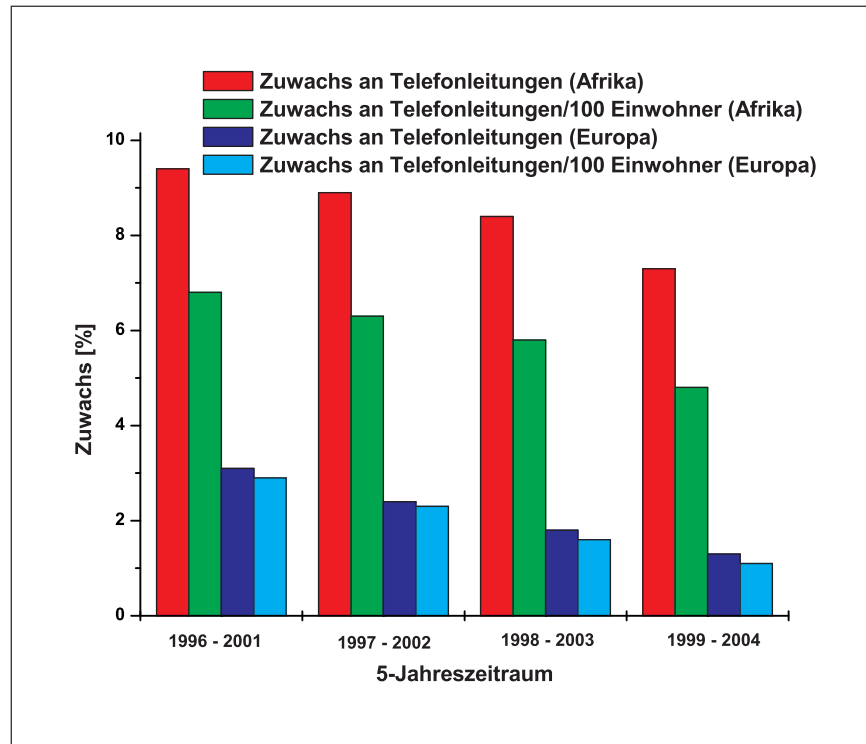


Abbildung 4.2: Zuwächse an installierten Telefonleitungen in Europa und Afrika, Datenquelle: [ITU 04]

Die Zahlen verdeutlichen sehr anschaulich, dass zwar ein Aufbau an leitungsbasierter Telekommunikationsinfrastruktur in Afrika zu erkennen ist, dieser aber als zu gering einzuschätzen ist (absoluter Zuwachs an Leitungen), um eine flächendeckende Versorgung in der näheren Zukunft zu gewährleisten.

Die rückläufigen Zuwächse an Neuinstallationen von Telefonleitungen liegen zum einen in den hohen Kosten für die Leitungsanbindung und zum anderen in der schnelleren und kostengünstigeren Implementierung von Mobilfunk begründet. Während für die leitungsbasierte Anbindung (Leiterschleife) eines Teilnehmers an das Telefonnetz Kosten in Höhe von 800–1500 US\$ zu veranschlagt sind, liegen die durchschnittlichen Kosten für eine Mobilfunkanbindung des Teilnehmers (in Entwicklungsländern) im Bereich von 250–500 US\$ (vgl. [Thies 01], [ITU 00-1]). In Hinblick auf den stetig wachsenden Rohstoffsbedarf in China und den daraus resultierenden Anstieg des Kupferpreises auf dem Weltmarkt⁵, ist daher auch zukünftig nicht von einer Reduktion der leitungsbasierten Anschlusskosten auszugehen.

Eine leitungsbasierte Anbindung kann nur dann als sinnvoll erachtet werden, wenn eine hohe Teilnehmeranzahl an das Medium angebinden wird. Eine geringe Teilnehmeranzahl und weite Übertragungsdistanzen erhöhen die Installations- und Wartungskosten. Allgemein gilt der Leitsatz *»the greater the distance, the greater the cost«*. Speziell in ländlichen Gebieten können die Anschlusskosten schnell das 5-fache der herkömmlichen Kosten betragen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass aus technischer Sicht leitungsbasierte Carrier-Netze zum Datenaustausch zwischen dezentralen Versorgungsstrukturen verwendet werden können. Jedoch

⁵ Verdreifachung des Kupferpreises von ca. 0,6 US\$/lbs in 01.2003 auf ca. 2,1 US\$/lbs in 12.2005, [Handelsblatt 05].

sind reale Anwendungen in Hinblick auf die Ermangelung eines flächendeckenden Carrier-Netzes bzw. der fehlenden Leitungsinfrastruktur, speziell in den ländlichen Gebieten von Entwicklungsländern, derzeit auf Einzelfälle beschränkt.

Hohe Investitionskosten hemmen den Ausbau existierender Carrier-Netze, so dass auch zukünftig der Einsatz von leitungsbasierten Carrier-Netzen für den hier fokussierten Datentransfer eher die Ausnahme bilden wird.

4.2 Funkbasierte Carrier-Netze (öffentliches Mobilfunknetz)

Wie eingangs schon angedeutet, besteht neben der Verwendung von leitungsbasierten Carrier-Netzen auch die Möglichkeit, drahtlose providerbasierte Netze für den Datenaustausch zu nutzen (vgl. [Schmid 01]). Erweitert man die zuvor aufgestellte Definition von Carrier-Netzen um funkbasierte Systeme, so ist als bekanntester Vertreter von erdgebundenen und funkbasierten Carrier-Netzen das öffentliche Mobilfunksystem *Global System for Mobil Communication* (GSM) zu nennen.

Bedingt durch unterschiedliche historische Entwicklungen, abweichende Frequenzzuweisungen und verschiedene Standardisierungen, sind neben der GSM-Technologie weltweit noch eine Vielzahl von weiteren Mobilfunktechnologien, wie z. B. AMPS⁶, USDC⁷, PDC⁸ etc., im Einsatz. Diese Systeme spielen jedoch, aufgrund ihres relativ geringen weltweiten Marktanteils, von insgesamt 23 % (ca. 466 Mio. Teilnehmer), gegenüber GSM mit einem Marktanteil von 77 % (3. Quartal 2005, 1561 Mio. Teilnehmer; [GSMWorld 06]), eher eine untergeordnete Rolle bzgl. der Analyse von funkbasierten Carrier-Netzen für den Datenaustausch in dezentralen Versorgungsstrukturen. In diesem Zusammenhang wird daher im Weiteren nur das GSM-Mobilfunksystem näher betrachtet.

4.2.1 Global System for Mobil Communication (GSM)

Wie alle providerbasierten Carrier-Netze der Telekommunikation, ist auch das GSM-Netz hierarchisch aufgebaut und beinhaltet komplexe Systemarchitekturen. Im Normalfall existieren für den Systemnutzer, außer der funktechnischen Anbindung seiner Mobilstation⁹ an die Sende-Empfangsstation¹⁰ des Providers, keine für ihn erkennbaren Berührungspunkte mit der hinterlagerten Systeminfrastruktur. Die weiteren Betrachtungen beschränken sich daher im Wesentlichen auf die Funkschnittstelle, die die Anbindung der MS an den BTS ermöglicht. (Eine detaillierte Beschreibung bzgl. der weiterleitenden und hinterlagerten Infrastrukturen sind [Jung 02] und [Schiller 03] zu entnehmen.)

Das GSM-Funknetz ist zellular aufgebaut. Zellulare Funknetze basieren auf der Einteilung der Gesamtfläche in Funkzellen oder Segmenten, die jeweils von einer Feststation versorgt werden. Jeder Feststation wird eine Teilmenge der insgesamt verfügbaren Frequenzkanäle zugewiesen, wobei darauf zu achten ist, dass zwei direkt benachbarte Funkzellen nicht die gleichen Kanäle verwenden. Im Idealfall nähert sich die Zellenform einer hexagonalen Struktur an, bei der eine in der Zellenmitte oder an den Zelleneckpunkten lokalisierte Sende-bzw. Empfangsstation die Zelle funkfeldtechnisch abdeckt. Reale Zellen weichen aber, aufgrund der Topologie und Morphologie der Landschaft und der daraus resultierende Effekte (Reflexionen, Beugung etc.), von der hexagonalen Struktur ab.

⁶ AMPS: Advanced Mobile Phone System

⁷ USDC: US Digital Cellular System (TDMA/IS-136)

⁸ PDC: Personal Digital Cellular

⁹ MS: Mobil Station

¹⁰ BTS: Base Transceiver Station

Es können daher nur die Mobilstationen in das Carrier-Netz eingebunden bzw. erreicht werden, die sich im Sende-/Empfangsbereich einer BTS des Providers befinden. Typischerweise liegt der Sende-/Empfangsradius einer BTS im Bereich von einigen hundert Metern bis hin zu 35 Kilometern. Der Zellradius hängt neben der Topographie, der MS-bzw. BTS-Sendeleistung auch vom verwendeten Frequenzband ab.

In Abhängigkeit der Wahl der Übertragungsfrequenz zwischen MS und BTS, werden GSM-Systeme überwiegend in *GSM900*, *GSM1800* bzw. *GSM1900* unterschieden. GSM1900, mit einem Frequenzbereich um 1900 MHz, kommt aufgrund des schon belegten 900 MHz-Bereiches in den USA, vorwiegend in Nordamerika zum Einsatz, wohin gegen GSM1800 in Europa als Kapazitätserweiterung des klassischen GSM900 dient (siehe Tabelle 4.2).

Zur Abdeckung größerer, dünn besiedelter Gebiete und zur Erweiterung des maximalen Zellradius von ca. 35 km bei GSM900, wurde von dem European Telecommunication Standards Institute ein GSM-System im 400 MHz Frequenzband vorgeschlagen. Durch die Verringerung der Trägerfrequenz und Verwendung von 2 W-Mobiltelefonen sollen Zellradien von bis zu 40 km¹¹ erzielbar sein. Trotz der größeren Funkfeldabdeckung werden 400 MHz-GSM-Systemen derzeit nur in Tanzania (Celtel-Netz) eingesetzt [GSMWorld 06-1].

charakteristische Systemkennwerte	GSM900	GSM1800
Zellradius	max. 35 km	max. 10 km
Frequenzbereich (uplink)	890–915 MHz	1710–1785 MHz
Frequenzbereich (downlink)	935–960 MHz	1805–1855 MHz
Duplexabstand	45 MHz	95 MHz
Trägerfrequenzen	124	374
Kanalabstand	200 kHz	
Zeitschlitz	8	
Zugriffsverfahren	FDMA, TDMA	
Datenrate	270,8 kbps	
Nettodatenrate	2,4–14,4 kbps	
BER (ungeschützte Übertragung)	0,001–0,3 %	
max. Sendeleistung (MS)	39 dBm	30 dBm

Tabelle 4.2: Systemparametervergleich: GSM900 - GSM1800; Datenquelle: [Schiller 03], [Jung 02], [Göbel 99]

Beim GSM900 wird der Frequenzbereich 890–915 MHz für die Übertragung von der Mobilstation zur Basisstation (uplink) und der Frequenzbereich 935–960 MHz für die Verbindung von der Basisstation zur Mobilstation (downlink) benutzt. Die resultierende Bandbreite von 25 MHz wird mittels FDMA¹² in 124 physikalische Kanäle zu je 200 kHz aufgeteilt. Die Kanäle 1 und 124 werden zur Vermeidung von Beeinträchtigungen benachbarter Kanäle nicht eingesetzt. Durch ein TDMA¹³-Verfahren werden jedem Kanal acht Zeitschlitz (logische Kanäle) der Dau-

¹¹ Bei Einsatz höherer Sendeleistungen und Gewinnantennen kann der Zellradius noch vergrößert werden.

¹² FDMA: Frequency Division Multiple Access

¹³ TDMA: Time Division Multiple Access

er 0,577 ms zugeordnet. Dies bedeutet, dass jeder physikalische Kanal von insgesamt 8 Mobilstationen genutzt werden kann und jeder Teilnehmer für sich betrachtet, zyklisch jeden achten Zeitschlitz, alle 4,615 ms verwenden kann. Je Zeitschlitzdauer können 156,25 Bit übertragen werden, so dass die maximale Bruttodatenrate eines physikalischen Kanals 270,8 kbps beträgt. Die logischen Kanäle verfügen, in Abhängigkeit der verwendeten Kanalcodierung (vgl. [Schiller 03], [Jung 02]), jeweils über eine Nettoübertragungsrate im Bereich von 2,4 bis 14,4 kbps für Datendienste, wobei für die klassische Datenübertragung (kein GPRS, HSCSD etc.) üblicherweise nur die 9,6 kbps Variante vom Provider bereit gestellt wird.

Höhere Nettodatenraten können durch HSCSD¹⁴ und GPRS¹⁵ zur Verfügung gestellt werden. Bei HSCSD werden mehrere Zeitslitze eines TDMA-Rahmens einem Teilnehmer zugewiesen. In Abhängigkeit der Anzahl der Zeitslitze und der Nettodatenrate pro Zeitschlitz ist eine Gesamtnettodatenrate von 8-14,4 kbps theoretisch zu erzielen. In der Praxis sind jedoch, in Hinblick auf die Netzauslastung und der Blockierung ganzer Kanäle, während der Übertragung nur maximal 4 Zeitslitze zur Nutzung freigegeben. Die maximale Nettodatenrate ist daher auf 38,4 (4·9,6 kbps) respektive 57,6 kbps (4·14,4 kbps) limitiert.

Im Gegensatz zum leitungsorientierten HSCSD, handelt es sich bei GPRS um einen flexiblen, paketvermittelnden Datentransferdienst. Neben der Zuteilung eines Übertragungskanals auf mehrere Teilnehmer, werden die zu übertragenden Daten in Pakete aufgeteilt und über den Kanal übertragen. In Leerlaufzeiten während denen z. B. ein Teilnehmer keine Daten überträgt, können von anderen Teilnehmern verwendet werden, um Daten zu übertragen. Das heißt, die scheinbaren Leerlaufzeiten werden mit Daten anderer Teilnehmer ausgefüllt. Die Kapazität des Funkkanals wird von einem Teilnehmer nur beansprucht, wenn tatsächlich Daten zur Übertragung anstehen, so dass insgesamt eine flexiblere Ausnutzung der Netzkapazität erreicht wird.

Um höhere Datenraten zu erzielen, werden auch bei GPRS mehrere Zeitslitze miteinander kombiniert bzw. gebündelt. Theoretisch ist eine Bündelung von 8 Zeitslitzen möglich. In Hinblick darauf, dass noch andere Endgeräte (außer GPRS) über die entsprechende BTS kommunizieren sollen, ist die Bündelung seitens der Netzbetreiber auf maximal 4 Zeitslitze begrenzt [Galsterer 05]. In Kombination mit den nutzbaren Zeitslitzen und neuen Codierungsverfahren, die sich in Datenrate und Übertragungsqualität unterscheiden, stehen letztlich nur 53,6 kbps¹⁶ zur Verfügung. Theoretisch sind bis zu 171,2 kbps¹⁷ möglich.

Im Gegensatz zur klassischen leitungsorientierten Datenübertragung mit GSM, kann der Nutzer bei GPRS ein *Quality of service* Profil angeben. Dieses Profil regelt sowohl die Priorität (hoch, normal, niedrig), die Zuverlässigkeitsklasse und die Verzögerungsklasse der Übertragung, als auch die Nutzdatenrate. Für GPRS sind drei Zuverlässigkeitsklassen definiert. Je nach Klassenauswahl sind Wahrscheinlichkeiten im Bereich 10^{-9} – 10^{-2} für den Verlust, die Duplizierung, die Veränderung oder die Vertauschung einer Service-Data-Unit¹⁸ möglich.

Die Verzögerungszeit bei GPRS, bestehend aus der Zugriffsverzögerung auf das Medium, der Codierung und der Übertragungsverzögerung des leitungs- und funkbasierten Netzes liegt in Größenordnungen über den der Festnetze [Schiller 03]. In Abhängigkeit der gewählten Verzögerungsklasse und der Paketlänge sind so z. B. maximale, durchschnittliche Verzögerungen von bis zu 75 s möglich (siehe Tabelle 4.3).

In Bezug auf die hohen Verzögerungs- und Umlaufzeiten (größer 1 s bei kleinen Paketen und

¹⁴ HSCSD: **H**igh **S**peed **C**ircuit **S**witched **D**ata

¹⁵ GPRS: **G**eneral **P**acket **R**adio **S**ervice

¹⁶ 53,6 kbps: 4 (Zeitslitze) · 13,4 kps (Codierschema CS-2)

¹⁷ 171,2 kbps: 8 (Zeitslitze) · 21,4 kps (Codierschema CS-4)

¹⁸ Der zu übertragende Datensatz (kompletter Satz an Daten und Verwaltungsinformation der Schicht N) wird auf der Schicht $N - 1$ auch als Service Data Unit (SDU) der Schicht $N - 1$ bezeichnet: $PDU(N) = SDU(N - 1)$.

unbelastetem Netz [Schiller 03], [Galsterer 05]), ist ersichtlich, dass GPRS eher auf zeitunkritische Applikationen beschränkt ist. Für den, im Rahmen dieser Arbeit zu betrachtenden 1/4-h-Fahrplanaustausch, sind die durchschnittlichen Verzögerungszeiten der Klassen 1 bis 3 akzeptabel. Das 95%-Quantil der Verzögerungsklasse 3 kann jedoch bei einer Anbindung von mehr als drei dezentralen (Erzeuger-)Komponenten an eine zentrale (Energie-)Managementzentrale durchaus zu Komplikationen führen¹⁹. Bei der Verwendung von GPRS für die Datenübertragung ist daher die Verzögerungsklasse in Abhängigkeit der Teilnehmeranzahl und des zu erwartenden Datenvolumen je Übertragung geeignet zu wählen.

Klasse	SDU: 128 Byte		SDU: 1024 Byte	
	Durchschnitt	95 %-Quantil	Durchschnitt	95 %-Quantil
1	<0,5 s	<1,5 s	<2 s	<7 s
2	<5 s	<25 s	<15 s	<75 s
3	<50 s	<250 s	<75 s	<375 s
4	nicht spezifiziert			

Tabelle 4.3: Verzögerungsklassen und -zeiten für GPRS: maximale Durchschnitt und 95 %-Quantil, Quelle: [Schiller 03]

GPRS bietet den Vorteil, dass die Teilnehmer immer *online* sind. Der Übertragungskanal wird im Gegensatz zur klassischen, leitungsvermittelnden Datenübertragung nur bei Bedarf belegt. Dies spiegelt sich auch in der Einführung neuer Tarifstrukturen für GPRS-Anwendungen wieder. Im Gegensatz zu HSCSD ist nicht die Zeitdauer, sondern die Datenmenge zu vergüten. Im Rahmen der Vermarktung und Verbreitung der GPRS-Technologie werden derzeit spezielle Tarifstrukturen (M2M-Tarif) für die Kommunikation zwischen Maschinen und Komponenten angeboten. Auf dieser Basis wird GPRS heute schon erfolgreich in Europa im Bereich der Fernwirktechnik und Zählerfernauslesung eingesetzt. [Galsterer 05].

4.2.2 Verfügbarkeit von öffentlichen Mobilfunksystemen in dezentralen Versorgungsstrukturen

In Analogie zu leitungsbasierten Carrier-Netzen, hängt der Einsatz von providerbasierten Mobilfunksystemen von der Verfügbarkeit der Dienste am Applikationsort ab. Das heißt, die entsprechenden Systeme und Dienste können nur dann genutzt werden, wenn die anzubindende Anlage auch im Netzabdeckungsbereich des Mobilfunksystems liegt.

Für Länder, wie z. B. Deutschland, mit einer sehr gut ausgebauten Mobilfunkinfrastruktur, kann weitestgehend von einer 100 % Netzabdeckung ausgegangen werden. Nur in Ausnahmefällen ist eine Anbindung von Anlagen, aufgrund fehlender Netzabdeckung, unmöglich. Ob diese Aussagen jedoch auch für Entwicklungsländer und hierbei im Speziellen für die ländlichen Gebiete gelten, ist zu klären.

Mit einer Zuwachsrate von ca. 38% an neuen Mobilfunkteilnehmern in 2005 (1/4-jährlichen GSM-Zuwachsrate von über 10 %) und gleichzeitig weltweit sinkenden jährlichen Zuwachsraten, sind

¹⁹ Gesamtverzögerung bei 3 Verbindung: 3·250 s: 12,5 min-Verzögerungszeit zur 4. Komponente darf max. 2,5 min betragen.

mit 112 Mio. GSM-Teilnehmern ca. 7 % aller weltweiten GSM-Anschlüsse in Afrika registriert (vgl. Abbildung 4.3). Dies entspricht einer GSM-Mobilfunkdichte von ca. 12,35 auf 100 Einwohner²⁰, die im Verhältnis zur europäischen Mobilfunkdichte mit ca. 82,85 auf 100 Einwohner relativ gering ausfällt.

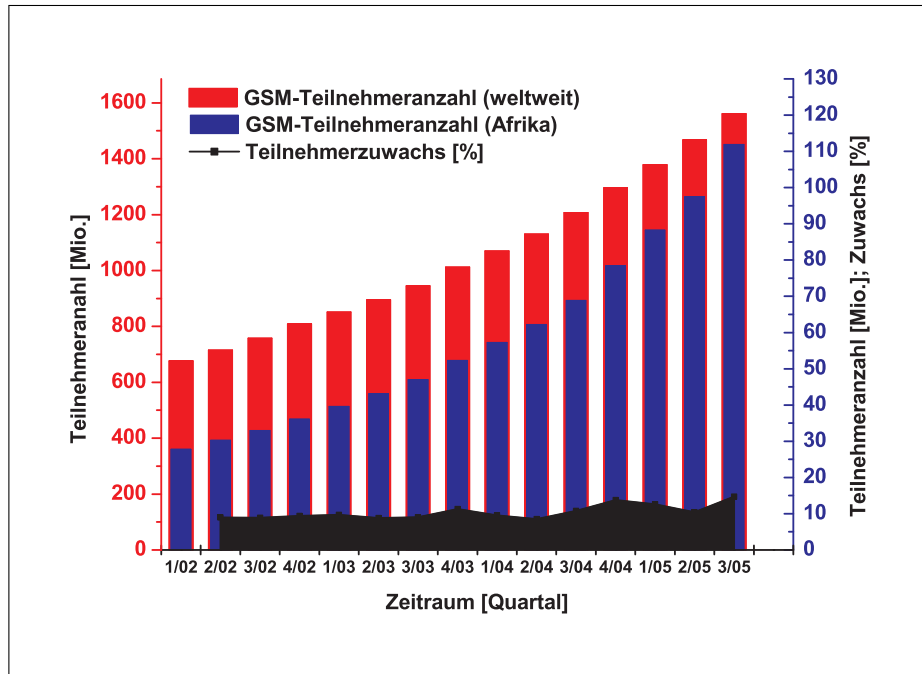


Abbildung 4.3: Zuwachs an GSM-Teilnehmern; Datenquelle: [GSMWorld 06]

Wird neben der Teilnehmeranzahl auch die Netzabdeckung der Mobilfunksysteme untersucht, so zeigt sich, dass mit Ausnahme von Süd Afrika, die Netzabdeckung im wesentlichen auf urbane Gebiete Afrikas beschränkt ist (Abbildung 4.4).

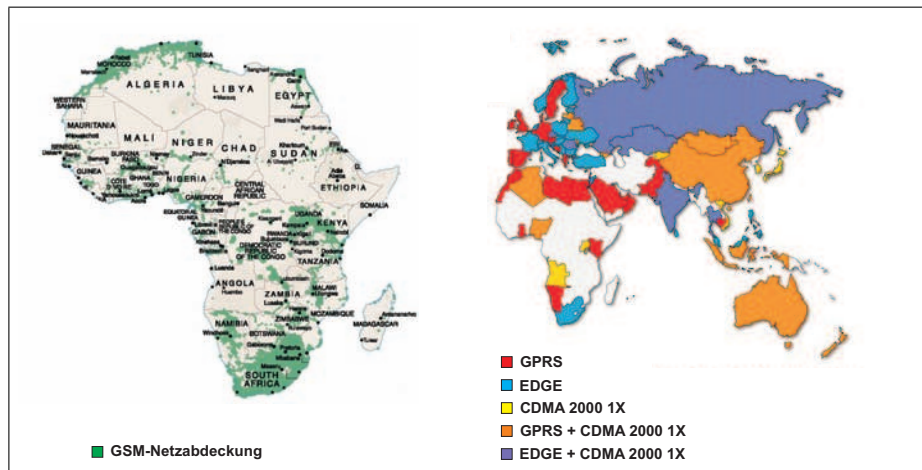


Abbildung 4.4: GSM-Netzabdeckung und Dienste in Afrika (Stand: 2005); Quelle: [GSMWorld 06], [WCDM 05]

Ländliche Gebiete, als implizite Applikationsorte für dezentrale Energieerzeugungsanlagen, weisen hingegen im überwiegenden Fall keine Netzabdeckung auf. Der fokussierte Datenaustausch

²⁰ Afrika: 905,591 Mio. (Bevölkerung), 111,9 Mio. (GSM-Teilnehmer); Europa: 738,585 Mio. (Bevölkerung), 611,9 Mio. (GSM-Teilnehmer); Quelle: [unstats 05], [GSMWorld 06]

zwischen dezentralen Komponenten durch Verwendung von Mobilfunk-Carrier-Netzen, ist daher auf Einzelanwendungen beschränkt und stellt keinesfalls die Regel dar (*State-of-the-Art für Kommunikationsanbindungen in dezentralen Versorgungsstrukturen*).

Die Analysen verdeutlichen jedoch anschaulich, dass die Mobilfunktechnologie, insbesondere im Vergleich zur konventionellen leitungsbasierten Telefonie (vgl. Abschnitt 4.1), eine entscheidende Schlüsseltechnologie für die kommunikationstechnische Erschließung Afrikas darstellt. Inwieweit es in dem Zusammenhang zu einem schnellen Ausbau der Mobilfunknetze und einer ausreichenden Netzabdeckung in ländlichen Gebieten kommt, ist aber, speziell in Hinblick auf die relativ geringe Kaufkraft der ländlichen Bevölkerung (vgl. Abschnitt 2.2.1) und den daraus zu erzielenden Einnahmen offen.

Ist eine Netzabdeckung am Applikationsort vorhanden, so spricht unter technischen Gesichtspunkten primär nichts gegen eine Nutzung der Mobilfunk-Carrier-Netze zur Datenübertragung (vgl. [Schmid 05]). Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass Datendienste der *Generation 2+* nur sehr eingeschränkt in Afrika verfügbar sind (vgl. Abbildung 4.4). Der Datenaustausch wird daher vorwiegend leitungsvermittelt mit einer maximalen Datenrate von 9,6 kbps erfolgen und ist nach der Verbindungszeit zu vergüten .

Neben GSM ist auch UMTS für einen Datenaustausch zwischen dezentralen Komponenten prinzipiell anwendbar, doch ist hier die Netzabdeckung noch lückenhafter als bei GSM. UMTS-Systeme können daher nur in Ausnahmefällen in dezentrale Versorgungsstrukturen eingesetzt werden. Wie schnell der Netzaufbau bzw. eine Netzerweiterung, unter Berücksichtigung der technischen (Makrozellenradius 10 km, [Turczyk 04]) und ökonomischen (vgl. Abschnitt 2.2.1) Randbedingungen, ländliche Gebiete erreicht, ist offen. Dies gilt im Besonderen, da eine entsprechende Anbindung schon bis dato nicht durch das kostengünstigere²¹ GSM-System erfolgt ist.

4.3 Nicht erdgebundene Carrier-Netze (Satellitenkommunikationssysteme)

Neben der Nutzung von erdgebundenen Carrier-Netzen, besteht die Möglichkeit, satellitenbasierte Carrier-Netze für den bidirektionalen Datenaustausch zwischen dezentralen Komponenten einzusetzen. Satellitensysteme werden jedoch nur in den Fällen eingesetzt, in denen keine anderen Carrier-Netze vorhanden sind. In Bezug auf eine nicht existente Infrastruktur, sind somit auch nur solche Systeme einsetzbar, die eine bidirektionale End-zu-Endpunkt-Kommunikation ohne Anbindung an einen erdgebundenen Hub ermöglichen. Das heißt, Systeme bei denen der Datenaustausch zwischen den Kommunikationsendpunkten mindestens über eine nicht satellitenbasierten Verbindung zu einem zentralen, erdgebundenen Hub oder Gateway erfolgt, sind nicht verwendbar²².

Auf eine detaillierte Beschreibung aller existenten Satellitenkommunikationssysteme wird hier explizit verzichtet, da dies den Rahmen der Arbeit sprengen würde. In Hinblick auf die zu erwartenden hohen Kosten (Investitionskosten, Übertragungskosten²³ etc. vgl. [Schiller 03] bzw. Tabelle 4.4) und der hier fokussierten Anwendung ist davon auszugehen, dass entsprechende Kommunikationssysteme nur in Ausnahmefällen zum Einsatz kommen und der Datenaustausch im Wesentlichen durch nicht-providerbasierte Kommunikationssysteme gewährleistet werden kann (siehe Abschnitt 5.1, 5.2.2). Im Folgenden werden daher nur die wichtigsten Aspekte bzgl. einer satellitenbasierten Kommunikation erläutert.

²¹ UMTS-Teilnehmer-Anschluss 75 % höher als GSM-Anschluss, Schätzung bezogen auf 1000 neue Teilnehmer; [ITU 00-1]

²² Systeme wie z. B. das Argos-System können somit nicht eingesetzt werden.

²³ z. B.: Investitionskosten für VSAT: ca. 2800 €/Terminal, VSAT-Service: 175 €/Monat; Quelle: [Leox 05]

Satellitensysteme können in Abhängigkeit der Satellitenumlaufbahn in GEO-²⁴, MEO-²⁵ bzw. LEO-Systeme²⁶ unterschieden werden. Da GEO-Satelliten sich von der Erde aus gesehen scheinbar nicht bewegen, können Sende- und Empfangsantennen stationär und fest ausgerichtet ausgeführt werden. Die langen Signalwege (Erde-Orbit-Erde) haben eine hohe Signallaufzeit von ca. 250 ms zur Folge, so dass GEO-Systeme für zeitkritische Applikationen und Prozesse weniger geeignet sind. GEO-Systeme werden für Telefon-, Datenverbindungen und Fernsehübertragungen etc. eingesetzt. LEO-Systeme haben im Vergleich zu GEO-Systemen niedrigere Umlaufbahnen. Sie befinden sich in 500 – 1500 km Entfernung von der Erde, so dass weitaus kürzere Signallaufzeiten (ca. 10 ms) erzielt werden. LEO-Systeme werden meist für weltweite Telefon und Datendienste eingesetzt. MEO-Systeme, als dritte Systemvariante, haben Umlaufbahnen in einer Höhe von 5000 – 12000 km über der Erdoberfläche. Eine zeitkontinuierliche Netzabdeckung erfordert, aufgrund der nicht stationären Position und kurzen Sichtdauer bei LEO- und MEO-Systemen eine höhere Anzahl an Satelliten, als dies bei GEO-Systemen notwendig ist. Die geringeren Abstände (Satellit-Erdstation) von LEO- und MEO-Systemen erlauben jedoch, im Vergleich zu GEO-Systemen, geringere Sendeleistungen.

Systemparameter	Globalstar	Thuraya	Iridium
Umlaufbahn	LEO	GEO	LEO
Bahnhöhe	1414 km	36000 km	780 km
Satellitenanzahl	48	2	66 (+7)
Abdeckung	±70°; keine Abdeckung: große Teile Afrikas, Asiens	Europa, Nord- und Zentral Afrika, Nahe Osten, Zentral Asien, indischer Subkontinent	weltweit; außer Polen, Ungarn, Nord-Korea, Srilanka
Datenrate	bis zu 9,6 kbps	bis zu 9,6 kbps	bis zu 9,6 kbps
Roaming auf GSM-Netz	ja	ja	nein
Gerätepreise	ab ca. 900 €	ab ca. 650 €	ab ca. 1300 €
Anschlussgebühr	ab ca. 40 €	ab ca. 50 €	ab ca. 35 €
Abrechnungseinheit	Minute	Minute	Minute
Airtime (Vertrag)	-	ab ca. 0,88 €	ab ca. 1,03 €

Tabelle 4.4: Systemparameter und typische Kosten für Globalstar, Thuraya und Iridium; Quelle: [Lehner 03], [Schiller 03], [CPN 06]

Satelliten können ein aus acht Bändern bestehendes Gesamtfrequenzspektrum von 0,3 bis 40 GHz ([Jung 02]) zur Kommunikation nutzen. Entscheidend für die Frequenzwahl sind, neben den zu berücksichtigenden Beeinflussungen durch klimatische Randbedingungen und Ionosphäre, die An-

²⁴ GEO: Geostationary Earth Orbit

²⁵ MEO: Medium Earth Orbit

²⁶ LEO: Low Earth Orbit

forderungen bzw. Eigenschaften der Satellitensysteme. Es eignen sich nicht immer alle Frequenzen für jede Anwendung. Untersuchungen im Kontext der satellitenbasierten Datenübertragung für SCADA-Zwecke mit ultra-small-aperture Terminals (USAT) im Ka-Band²⁷, haben gezeigt, dass z. B. Regen bei einem zu geringem Signal-zu-Rauschabstand zu Kommunikationsunterbrechungen führen kann [Emrich 02].

Bis vor kurzem waren, aufgrund fehlender Liberalisierung des Telekommunikationssektors, nur große Telekommunikationsanbieter Nutzer der Satellitenkommunikation bzw. Diensteanbieter. Erst die immer noch fortschreitende Liberalisierung schaffte die Möglichkeit, den Markt der Satellitenkommunikation auch für andere Dienstleister zu öffnen (Abbildung 4.5). Die Lizenzkosten sind jedoch, selbst dort wo eine rein private Nutzung erlaubt ist, immer noch sehr hoch, so dass nur wenige neue Dienstleister am Markt partizipieren können [IDRC 06].

Der Einsatz von satellitenbasierten Carrier-Netz zur kommunikationstechnischen Anbindung von Komponenten in dezentralen Versorgungsstrukturen ist nur dann möglich, wenn die zu vernetzenden Komponenten auch im Abdeckungsbereich des jeweiligen Satellitensystem ist. 54 Satelliten gewährleisten derzeit eine flächendeckende Abdeckung Afrikas und stellen Fernspreverbindungen, Datenübertragungen bzw. Internetdienste prinzipiell flächendeckend zur Verfügung [IDRC 06].

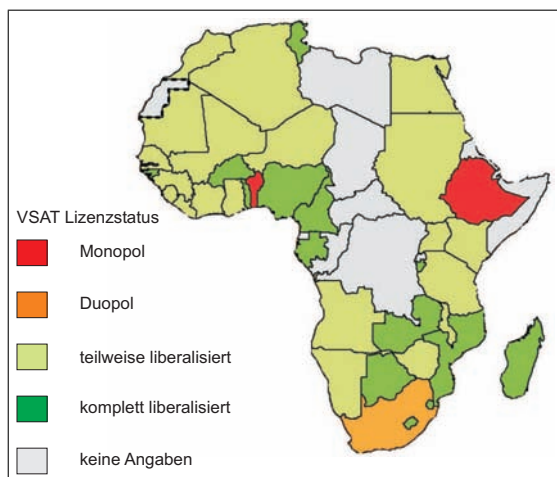


Abbildung 4.5: Status der Lizenzvergabe für VSAT-Systeme in Afrika, Quelle: [IDRC 06]

In Hinblick auf die Komponentenkosten kann derzeit die VSAT-Technologie als aussichtsreichste Variante für eine schnelle, nicht mobile satellitenbasierte Kommunikationstechnologie angesehen werden. VSAT steht hierbei für *Very Small Aperture Terminals* und beschreibt kleine sende- als auch empfangsfähige Satellitenterminals, die einen bidirektionalen, direkten End-zu-Endpunktdatenaustausch, ohne Datentransfer über ein zentrales Hub erlauben. Zur Signalübertragung wird normalerweise das Ku-Band oder das C-Band verwendet²⁸. In Abhängigkeit des Bandes und der Empfangsleistung sind unterschiedlich große Antennen einzusetzen (Antennendurchmesser: Ku-Band: 1,2–2,4 m, C-Band:

1,8–3,8 m). Die Sendeleistung beträgt zwischen 1 und 4 Watt. In Abhängigkeit des Vertrages mit dem Dienstleister sind Datenrate von bis zu 1024 kbps möglich.

Auch wenn es sich bei den zu vernetzenden Komponenten um stationäre Anwendungen handelt, können in Analogie zum Mobilfunktechnik auch Systeme zur mobilen satellitenbasierten Kommunikation (GMPCS²⁹) verwendet werden. In diesem Zusammenhang sind die Systeme Iridium, Globalstar, Thuraya etc. zu nennen. Detaillierte Informationen zu diesen Systemen sind [Schiller 03], [Lehner 03] zu entnehmen.

Die in Tabelle 4.4 angegebenen Parameter zeigen, dass ein Datenaustausch zwischen dezentralen Systemen bei geeigneter GMPCS-Systemauswahl (unterschiedlicher Abdeckungsbereich) technisch möglich ist. Jedoch sind die zu erwartenden Übertragungskosten, in Höhe von über 30000 €, für den hier fokussierten 1/4-h-Datenaustausch und über 35000 Übertragungen im Jahr, schon bei

²⁷ 24–40 GHz

²⁸ bei militärischen Anwendungen auch das M-Band

²⁹ GMPCS: **G**lobal **M**obile **P**ersonal **C**ommunications **S**ervices

der Verbindung zwischen zwei Komponenten als zu hoch zu erachten. Die informationstechnische Vernetzung einer Vielzahl von Komponenten durch GMPCS-Systeme (minutenbasierte Vergütung der Airtime vorausgesetzt) ist somit nicht zielführend.

Inwieweit eine veränderte Vergütungsstruktur basierend auf das zu übertragende Datenvolumen, ähnlich der M2M-Tarifstruktur beim GSM-Mobilfunk, den wirtschaftlichen Einsatz von Systemen wie z. B. Inmarsat B-GAN³⁰, für den 1/4-h-Datenaustausch erlaubt, ist letztlich in Abhängigkeit der Teilnehmeranzahl und des Datenvolumens zu klären.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass satellitenbasierte Carrier-Netze aufgrund der nahezu weltweiten Verfügbarkeit, für einen Datenaustausch zwischen Komponenten in dezentralen Versorgungsstrukturen prädestiniert sind. In Bezug auf die aktuellen Verbindungskosten, ist jedoch ein ökonomischer Betrieb eher unwahrscheinlich.

³⁰ Gerätekosten (Richtpreis): ab ca. 2700 €, Airtime (1 Mbyte): ab ca. 8,35 €

5 Nicht-providerbasierte Kommunikationssysteme

Im folgenden Kapitel werden Möglichkeiten aufgezeigt und erläutert, die einen Datenaustausch auf Basis nicht-providerbasierter Kommunikationssysteme für dezentrale Versorgungsstrukturen im Fernbereich ermöglichen. Neben der Betrachtung von Funkkommunikationssystemen im VHF bzw. UHF-Bereich, werden leitungsbasierte Kommunikationssysteme und im Speziellen Distribution Line Carrier Systeme näher analysiert.

Im Gegensatz zu den in Kapitel 4 beschriebenen Systemen werden nur Kommunikationssysteme betrachtet, bei denen explizit kein externer Versorger oder Anbieter für die Kommunikationsinfrastruktur und die Erbringung von Dienstleistungen verantwortlich ist. Nicht-providerbasierte Systeme zeichnen sich somit durch einen, in Eigenregie und Eigenverantwortung des Kommunikationsnutzers, durchgeführten gesamtheitlichen Betrieb aus.

5.1 Funkbasierte Kommunikationssysteme

Wie bereits in Kapitel 4 erläutert, besteht prinzipiell die Möglichkeit auch Funkssysteme zur Übermittlung von Informationen für dezentrale Versorgungsstrukturen zu verwenden (vgl. [Schmid 03]). Eine Beschreibung aller existierenden, nicht-providerbasierter Funkssysteme, würde jedoch den Rahmen der Arbeit sprengen. Insofern stellen die im Folgenden aufgeführten Funkssysteme nur eine eingeschränkte Auswahl von Systemen dar. Analysen im Rahmen des Projekts *Vernetzung modularer Systeme* [ModIII 06] haben gezeigt, dass es unzählige funkbasierte Übertragungstechniken und Systeme für den Nahbereich gibt. Für den Fernbereich wird jedoch meist auf die in Kapitel 4 analysierten Systeme zurückgegriffen. Es werden daher hier im Speziellen Systeme zur informationstechnischen Vernetzung im Fernbereich näher untersucht. In Anlehnung an Abschnitt 3.2 bzw. 3.3.4, sind dem Fernbereich Kommunikationssysteme zuzuordnen, die eine Distanz von 1 bis 10 km überbrücken.

Auf eine Detaillierung von Systemen mit Übertragungreichweiten bis zu 1 km wird verzichtet. Das heißt, bekannte Funkssysteme für den Nahbereich wie z. B. Bluetooth, die in Abhängigkeit der Sendeleistung Übertragungsdistanzen von bis zu einigen hundert Metern erzielen, bleiben unberücksichtigt.

Im Gegensatz zu providerbasierten Systemen, bei denen es meist nur einer Inbetriebnahme der Kommunikationsendgeräte (handelsübliche Transceiver) durch den Systemnutzer bedarf, ist bei nicht-providerbasierten Systemen die gesamte erforderliche Infrastruktur durch den Systemnutzer bereitzustellen. Das heißt, es ist die notwendige Antennentechnik, die Frequenznutzung (vgl. Abschnitt 3.2.4.5), die Funkfeldausbreitung, die klimatischen und topografischen Randbedingungen etc. vom Systemnutzer zusätzlich zu berücksichtigen. Bei nicht-providerbasierten Funkkommunikationssystemen ist daher mit einem höheren Applikationsaufwand als bei providerbasierten Systemen zu rechnen, so dass hier, in Bezug auf die geforderte *Plug-and-Play* Eigenschaft der Systeme, Abstriche gemacht werden müssen.

Die Anzahl der noch unter einem zumutbaren wirtschaftlichen Aufwand technisch nutzbaren Frequenzen für die Informationsübertragung, ist aktuell begrenzt, so dass die zur Verfügung stehenden Frequenzen und Frequenzbereich als ein *beschränktes Ressourcen-Gut* angesehen werden kann. Die Nutzer dürfen nicht beliebig Frequenzen und Frequenzbereiche für ihre Zwecke verwenden, da es sonst zu Störungen anderer, eventuell wichtigerer Dienste (z. B. BOS-Funkdienste¹), kommen kann. Entsprechendes gilt im Besonderen für Frequenzen des Kurzwellenbereichs, bei der

¹ BOS: Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben

die Ausbreitung keine LoS-Verbindung voraussetzt. Hier sind sehr große und grenzüberschreitende Verbindungen möglich.

Eine Koordination der Nutzung, der Zuteilung und der Freigabe von Frequenzen ist zwingend erforderlich. Diese Aufgaben werden auf Länderebene durch die nationalen Regulierungsbehörden und international durch die ITU wahrgenommen. Bzgl. der Koordination ist die Welt formal in drei Bereiche unterteilt. Die erste Region umfasst Europa, die Länder der ehemaligen UDSSR, Afrika als auch den Mittleren Osten. Dem zweiten Bereich (2. Region) ist die gesamte westliche Hemisphäre zugeordnet. Asien und Ozeanien werden durch die dritte Region berücksichtigt. Für die in Kapitel 2 und 4 betrachteten Gebiete Afrikas, bedeutet dies, dass die für Europa geltenden internationalen Richtlinien auch dort prinzipiell gültig sind. Markantes Beispiel hierfür ist die Verbreitung von GSM auf Basis der für die Region 1 festgelegten Frequenzbedingungen.

Obwohl in Europa viele Frequenzen für eine nicht kommerzielle Nutzung bereit gestellt werden, beschränkt sich der Zugang zu Frequenzen bzw. deren Nutzung in Afrika, zum Teil nur auf die Frequenzzuteilung für Fernsehübertragungen, Radio oder (kommerziellen) Mobilfunk. Das heißt, dass restliche Frequenzspektrum, im Speziellen der Bereich von 30 bis 900 MHz (vgl. [IDRC 96]) ist länderspezifisch für die Nutzung durch staatliche oder militärische Organisation bestimmt, so dass in Europa einsetzbare Kommunikationssysteme aufgrund einer *Nichtfreigabe* der Frequenzen in Afrika nicht verwendet werden dürfen (vgl. [IDRC 99]). Falls entsprechende Frequenzen für eine zivile Nutzung freigegeben sind, ist jedoch mit abweichenden Werten bzgl. der Bandbreite, der Sendeleistung und des Duty Cycles zu rechnen. Im Besonderen gilt dies für nicht-providerbasierte Systeme, die Frequenzen außerhalb des *Industrial Scientific and Medical*-Bandes belegen. Insgesamt ist festzuhalten, dass eine 1:1-Übernahme von in Europa erlaubten Systemen nicht immer möglich ist und daher applikationsspezifisch die geltenden, länderspezifischen Regelungen zu berücksichtigen sind.

In Bezug auf die festgelegte Obergrenze der Übertragungsdistanz von 10 km für eine funkbasierte informationstechnische Vernetzung von dezentralen Versorgungsstrukturen, können Kommunikationssysteme, die den Frequenzbereich unterhalb von 30 MHz benutzen, primär außer Acht gelassen werden. Systeme dieses Bereichs weisen keine LoS-Abhängigkeit auf, so dass Reichweite bis zu einigen hundert von Kilometern möglich sind. Der, für den hier postulierten Fernbereich, korrelierende Frequenzbereich liegt somit oberhalb von 30 MHz und ist eher dem UHF bzw. VHF²-Band zuzuordnen.

5.1.1 Funksysteme des VHF- und UHF-Bandes

5.1.1.1 Packet-Radio und Betriebsfunk im VHF-Band

Der Einsatz von Funkkommunikationssystemem im VHF-Band ist in der Vergangenheit primär durch die Übermittlung von Sprache im Bereich des Rundfunks, des Betriebsfunks und des Einsatzes im Amateurfunkbereich geprägt gewesen. Es besteht jedoch prinzipiell auch die Möglichkeit durch Modifikation der Transceiver Daten zu übertragen. Populärstes Beispiel hierfür ist das *Packet-Radio* im Amateurfunkbereich.

Der Name Packet-Radio beruht auf der Übertragungsart der Daten. Diese werden nicht kontinuierlich gesendet, sondern erst zu Paketen zusammengesetzt (packet). Die eigentliche Umwandlung der Daten erfolgt mittels eines *Technical Node Controlers*³, der zwischen dem Funkgerät und der eigentlichen Informationsquelle/-senke (z. B. Computer) angeordnet ist und eine Umsetzung der zu übertragenden Daten auf das AX.25 Protokoll ermöglicht. AX.25 ist eine, auf die

² VHF: Very High Frequency

³ TNC: Technical Node Controller

Bedürfnisse des Amateurfunks angepasste Erweiterung, des aus dem postalischen Netz bekannten X.25 Protokoll zur Datenübertragung und definiert die zweite Schicht des *OSI-ISO* Modells (vgl. Abbildung 7.2 in Abschnitt 7.1.2). Neben AX.25 werden von neueren Geräten auch TCP/IP-Verbindungen unterstützt. In Abhängigkeit des verwendeten TNC, des Funkgerätes und der Modulation sind Signalübertragungsraten von bis zu 19200 Baud erzielbar. Bzgl. des finanziellen Aufwandes für ein Packet-Radio-System, sind je TNC-Komponente ca. 250–500 € bzw. 1000–1300 €⁴ für das eigentliche Funkgerät zu veranschlagen. Zusätzlich sind weitere Kosten z. B. für die Antennen, Zuleitungen und Funklizenzen etc. zu berücksichtigen.

Wesentlicher Vorteil des Packet-Radio-Systems ist die hohe Reichweite als auch die einfache Netzbildung. Das Packet-Radio-Verfahren funktioniert sowohl direkt zwischen zwei Teilnehmern als auch über eine oder mehrere Zwischenstationen (Digipeatern). Die Netzknoten des weltweiten Packet-Radio-Netzes im Amateurfunk sind über schnelle Richtfunkstrecken untereinander verbunden. Ähnlich dem Mobilfunksystem GSM reicht es auch hier aus, wenn nur einer dieser Netzknoten von einem Teilnehmer erreicht werden kann, um weltweit die Informationen zu übertragen. Dies bietet in Hinblick auf ein weit außerhalb der eigentlichen Versorgungsstruktur angesiedelten Monitoring (z. B. Anlagenmonitoring in Deutschland, Anlagenstandort in Afrika) der dezentralen Anlagen Vorteile. Das Packet-Radio-System kann sowohl innerhalb als auch außerhalb der dezentralen elektrischen Versorgungsstruktur als Kommunikationssystem verwendet werden.

Neben dem Packet-Radio im Amateurfunk, ist als eine weitere Möglichkeit der Datenübertragung im VHF-Band, der nicht öffentliche Mobilfunk und als dessen Kernstück der Betriebsfunk zu nennen. Zusätzlich zur Sprache ist auch hier eine Datenübertragung möglich. Entsprechende Systeme wurden, vor der Einführung der GSM-Netze, unter anderem von Energieversorgungsunternehmen zur innerbetrieblichen Kommunikation und aktuell unter dem Gesichtspunkt der Redundanz parallel betrieben.

Als eine Art Weiterentwicklung des klassischen Betriebsfunks kann der Bündelfunk verstanden werden, bei dem sich mehrere Teilnehmer einen Kanal teilen. Das heißt, dem Benutzer wird der Kanal dynamisch zugewiesen, so dass eine effizientere Nutzung des Spektrums, als im Fall einer starren Frequenzzuweisung (klassischer Betriebsfunk) möglich ist. In Deutschland erfolgt der Einsatz von Bündelfunksystemen im Bereich 410–470 MHz und kann daher additiv zu den in Abschnitt 5.1.1.3 beschriebenen Systemen eingesetzt werden.

5.1.1.2 Funksysteme im ISM-Band

Der Begriff *ISM* steht für *Industrial Scientific and Medical* und bedeutet im Wesentlichen die Nutzung von Hochfrequenzen in der Industrie, Wissenschaft und Medizin. Prinzipiell sollte die Nutzung der von der ITU-R international zugewiesenen ISM-Frequenzbereiche keiner staatlichen Regulierung unterliegen und lizenzfrei genutzt werden können. Um Störungen, aufgrund der freien und *unkorrelierten Nutzung* dieser Frequenzbereiche zu vermeiden, sind Auflagen bzgl. der Sendeleistung, des Duty Cycles einzuhalten. Gemäß [ITU-R 06] stehen aktuell zwölf ISM-Frequenzbereiche zur Verfügung. Bedingt durch den Aufwand, sei es technischer oder wirtschaftlicher Natur, der notwendig ist, Frequenzen für Kommunikationszwecke nutzbar zu machen, beschränkt sich die Nutzung der ISM-Frequenzen zur Datenkommunikation im Wesentlichen auf die in Tabelle 5.1 aufgeführten Frequenzbereiche.

Eine Nutzung des Frequenzbereichs 433,05–434,79 MHz für die Vernetzung dezentraler Versorgungsstrukturen entfällt, da dieser Bereich zum einen nur in bestimmten Ländern der Region 1 zulässig ist und zum anderen nur eine geringe Sendeleistung zulässig sind⁵. Des Weiteren ist der

⁴ Preisangaben (Deutschland): Symek Packet-Radio (<http://www.symek.com/>)

⁵ 10 mW

Frequenzbereich 902–928 MHz für Länder der Region 1, d.h. auch für Afrika nicht verwendbar, da es sonst zu einer Beeinträchtigung des in diesem Spektrum arbeitenden GSM-Mobilfunk kommen kann. Insgesamt bedeutet dies, dass im ISM-Band nur noch die beiden Frequenzbereiche 2,4–2,5 GHz respektive 5,725–5,875 GHz Potenzial für eine funkbasierte Kommunikation aufweisen.

Frequenzbereich [MHz]	Mittelfrequenz [MHz]	Einschränkung
433,05 – 434,79	433,93	nur in ausgewählten Ländern der Region 1
902 – 928	9125	nur in Region 2
2400 – 2500	2450	keine
5725 – 5875	5800	keine

Tabelle 5.1: Auswahl von ISM-Frequenzbereichen, die überwiegend für Kommunikationszwecke genutzt werden

5.1.1.2.1 2,4 GHz-ISM-Band Bei der Frequenzwahl ist zu berücksichtigen, dass die Freiraumdämpfung a^6 in Abhängigkeit der Frequenz f des Übertragungssystems und der Distanz zwischen Sender und Empfänger ansteigt d . Das heißt, die Übertragungsdistanz nimmt mit steigender Frequenz ab, falls alle anderen Parameter (z. B. Sendeleistung) konstant bleiben. In Bezug auf die beiden verbleibenden ISM-Frequenzbänder wird dieser Effekt noch verstärkt, wenn man berücksichtigt, dass für den 5 GHz Bereich nur eine maximale Ausgangsleistung von 25 mW zulässig ist, wohingegen für ISM-Anwendungen im 2,4 GHz-Bereich 100 mW erlaubt sind. Werden diese Aspekte bei einer Systemauswahl berücksichtigt, so sind Funkssysteme bzgl. der Reichweite zu präferieren, die den 2,4 GHz-Bereich des ISM-Bandes zur Datenübertragung nutzen.

Aktuelle Untersuchungen ([Neto 04]) haben gezeigt, dass das prinzipiell frei zugängliche 2,4 GHz-ISM-Band speziell in Afrika, nur eingeschränkt lizenzfrei genutzt werden kann (siehe Abbildung 5.1). Das heißt, falls entsprechende Systeme eingesetzt werden sollen, ist eine Klärung der Nutzungsbedingungen unablässig.

Ist eine Nutzung des 2,4 GHz-Bandes unter den ISM-Randbedingungen erlaubt, so ist aufgrund der relativ geringen Ausgangsleistung nur bei optimalsten Randbedingungen eine Reichweite von mehr als 1 km als realistisch zu erachten. Die Ausgangsleistung von 100 mW ist bezogen auf die korrespondierende Leistung eines isotropen Kugelstrahlers. Das heißt, beim Einsatz von Richtantennen ist die Ausgangsleistung des Funkgerätes soweit zu reduzieren, dass inklusive des Antennengewinns nur 100 mW EIRP⁷ abgestrahlt werden.

⁶ Freiraumdämpfung: $a = 92,4 + 20 \log \frac{d}{\text{km}} + 20 \log \frac{f}{\text{GHz}}$ [dB], vgl. [Donnevert 94], [Heinrich 88]

⁷ EIRP: Equivalent Isotropic Radiated Power

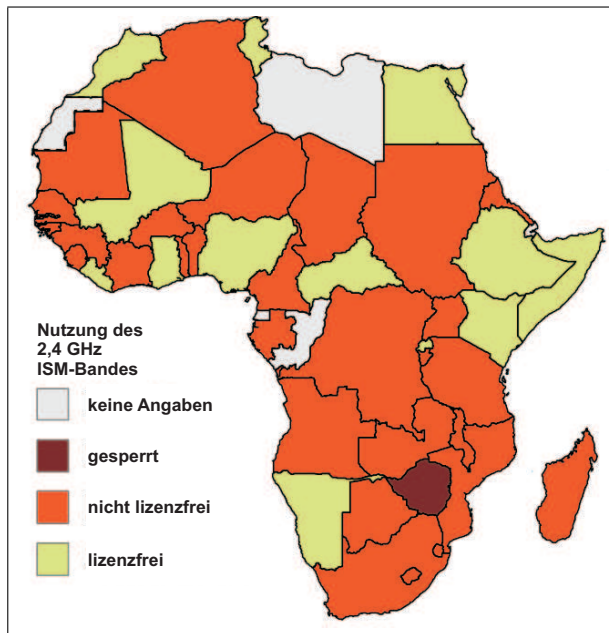


Abbildung 5.1: Lizenzfreie Nutzung des 2,4 GHz-ISM-Band in Afrika, Quelle: [Neto 04]

Systeme und im Speziellen WLAN Systeme nach IEEE 802.11b haben jedoch ihre Berechtigung bzgl. der Vernetzung im Nahbereich. Sind höhere Sendeleistungen erlaubt, ist auch eine Nutzung dieser Systeme für den Fernbereich durchaus denkbar.

Aktuell sind Systeme zu erwerben, die Reichweiten bis zu einigen Kilometern erzielen. Jedoch ist hier Vorsicht geboten, da entweder die abgestrahlte Leistung den zulässigen Grenzwert überschreitet bzw. ein Sichtkontakt zwischen den Funkteilnehmern und eine freie 1. Fresnel-Zone erforderlich ist (vgl. Abschnitt 3.2.4.6). Üblicherweise sind Übertragungsdistanzen im Bereich von 100 bis 500 m als realistisch zu erachten [TRASA 04].

Eine Nutzung des 2,4 GHz-Frequenzbereichs, unter Berücksichtigung der geringen Ausgangsleistung im ISM-Band, kann für die dezentrale Vernetzung von Komponenten oder Anlagen mit zu überbrückenden Distanzen größer 1 km, insgesamt als weniger geeignet angesehen werden. Die entsprechenden Systeme

5.1.1.3 Zuteilungspflichtige Funkssysteme im UHF-Band

Wie in [TRASA 04]⁸ für die informationstechnische Anbindung von ländlichen Strukturen in Afrika gefordert, kann auch im Rahmen der Vernetzung dezentraler Versorgungsstrukturen die Verwendung von Frequenzen unterhalb von 1 GHz, in Hinblick auf die relativ weiten Übertragungsdistanzen als zielführend angesehen werden.

Die entsprechenden Frequenzen liegen meist jedoch nicht im ISM-Frequenzbereich, so dass es einer Genehmigung (Frequenzuteilung) der lokalen Regulierungsbehörde bedarf. Als vorteilhaft kann aber zum einen die Nutzung zuteilungspflichtiger Frequenzen in Hinblick auf die Vermeidung potenzieller Störungen durch andere Teilnehmer (vgl. Abschnitt 3.2.4.5) als auch die wesentlich höher Sendeleistung gewertet werden.

5.1.1.3.1 869 MHz-Band Auch wenn aktuell die lizenzfreie Nutzung des Bereichs 869,40 bis 869,95 MHz für *Short Range Devices* nur in einigen europäischen Ländern erlaubt ist, so zeigen diese Systeme, aufgrund der niedrigeren Frequenzwahl und einer maximalen Ausgangsleistung von 500 mW ERP (Equivalent Radiated Power), welche Potenziale für eine Datenübertragung unterhalb 1 GHz bestehen (siehe Tabelle 5.2). Üblich sind erzielbare Reichweiten von ca. 3 km (Sichtkontakt: ca. 5 km) und eine Datenübertragungsrate von bis zu 19,2 kbps [ELPRO 06]. Wesentlicher Vorteil der niedrigeren Frequenz ist die geringere Freiraumdämpfung und eine geringere Störanfälligkeit gegenüber Wänden, Metallkonstruktionen etc., die im 2,4 GHz-Band eine Datenfunkverbindung häufig unmöglich macht. Die Investitionskosten für entsprechende Datenfunksysteme sind aufgrund der geringeren Stückzahl und der höheren Sendeleistung tendenziell etwas

⁸ „Although there is a tendency in the developed countries to move fixed links to frequency bands above 3 GHz, Africa has unique requirements in terms of few people scattered over very large areas, making the need for low capacity PTP links below 1 GHz.“

höher, als für professionelle 2,4 GHz-ISM-Systeme und betragen in Abhängigkeit der Ausführung ca. 800 bis 1200 € je Transceiver.

5.1.1.3.2 459 MHz-Band Auch wenn, wie schon erläutert, die Frequenznutzung von Land zu Land verschieden sein kann, so wird es lizenzpflichtigen Nutzungsmöglichkeiten im UHF-Bereich unterhalb 1 GHz geben, die eine Übertragungsdistanz größer 3 km und den hier fokussierten Datenaustausch erlauben. Nach [ELPRO 06] ist im allgemeinen von einer lizenzpflichtigen Nutzung des Frequenzspektrums 400–500 MHz für Afrika auszugehen, wobei die exakten Parameter (Mittelfrequenz, Sendeleistung, Duty Cycle etc.) länderspezifisch zu klären sind. Als Referenz für eine entsprechende Applikation in diesem Frequenzbereich kann z. B. der in Deutschland genehmigungspflichtige *Fernwirkfunk für gewerbliche und industrielle Zwecke* (siehe Tabelle 5.2) betrachtet werden.

Die korrespondierenden Funksysteme verwenden eine von vier Frequenzen im Bereich 459,53–459,59 MHz und eine Kanalbandbreite von 20 respektive 25 kHz (Trägerfrequenz 459,55 MHz). Normalerweise ist die Sendeleistung, wie bei dem 869 MHz-Systemen auf 500 mW begrenzt. Wird das System jedoch nur gelegentlich zur Messwertübertragung (5 % Duty Cycle) genutzt, sind unter Verwendung von Richtfunkantennen und einer ortsfesten Installation Abstrahlleistungen von 6 W ERP möglich.

Übertragungstests im Rahmen des Projektes *Vernetzung modularer Systeme* [ModIII 06] haben gezeigt, dass auch bei geringeren Sendeleistungen und nicht vorhandenem Sichtkontakt applikationsspezifisch Übertragungsdistanzen von mehr als 10 km zu erreichen sind⁹. Entsprechende Reichweiten sind jedoch nur bei guten Sichtverhältnissen erzielbar, so dass in Bezug auf einen ganzjährigen Einsatz zu höheren Sendeleistungen zu tendieren ist. Die Investitionskosten für Funktransceiver des Fernwirkfunk betragen, je nach Ausstattungsvariante im Bereich von 1000–1400 €.

Trotz des relativ kleinen Duty Cycle von 5 %, ist aufgrund der erreichbaren Datenrate von 19,2 kbps (25 kHz Kanalabstand) ein Betrieb wie in Abschnitt 3.3.4 beschrieben (96 Übertragungen an 10 Teilnehmer) denkbar. Für einen Einsatz in Deutschland ist zu beachten, dass eine hohe Abstrahlleistung nur in Kombination mit einer Richtantenne eingesetzt werden darf. Das heißt, die Teilnehmer müssen sich entweder im Hauptöffnungswinkel der Richtantenne befinden oder es ist der Einsatz einer omnidirektionalen Antenne vorzusehen, mit der jedoch nur geringere Reichweiten erzielbar sind.

Punkt-zu-Multipunktverbindungen zwischen allen Funkteilnehmern sind meist nicht direkt möglich bzw. müssen über den Umweg einer Master-Slave-Struktur und spezieller Adressierungen realisiert werden. Bei der Master-Slave-Struktur übernimmt ein Transceiver die Masteraufgabe inklusive der zugehörigen Netzwerk-Management-Aufgaben. Alle anderen Transceiver werden als Slaves dem Master zugeordnet. Jeder Transceiver erhält eine eindeutige Adresse, die zur Identifikation des entsprechenden Gerätes dient. Eine Broadcast- und Multicast-Übertragungen seitens des Masters zu den angeschlossenen Slaves ist durch spezielle reservierte Adressbereich erreichbar. Jegliche Kommunikation von einem Slave zu einem Anderen wird über den Master abgewickelt. Das heißt, falls Daten von einem Slave zu einem anderen Slave übertragen werden sollen, werden diese zuerst an den Master gesendet, der diese dann an den Ziel-Slave weiterleitet.

Unter technischen Gesichtspunkten besteht prinzipiell die Möglichkeit Funksysteme des UHF-Bereichs für eine Fernbereichübertragungs zur Vernetzung dezentraler Komponenten einzusetzen. Eine endgültige Entscheidung ist jedoch nur unter Berücksichtigung der lokalen regulatorischen Vorgaben zu treffen, da diese im Wesentlichen die zulässigen Systemeigenschaften be-

⁹ Funkstrecke ISET – Gemarkung Alte Schanze, Distanz: ca. 12 km, Sendeleistung: 2 W ERP

typische Kennwerte	Funksystem im 869 MHz-Band	Funksystem im 459 MHz-Band
Frequenzbereich	869,4 – 869,65 MHz	459,53 – 459,59 MHz
Kanalabstand	25 kHz	20 bzw. 25 kHz
Abstrahlleistung	max. 500 mW ERP	max. 6 W ERP
Empfangsempfindlichkeit	-105 – -115 dBm	-105 – -115 dBm
Duty Cycle	100 %	5 %
Übertragungsdistanz	bis zu 5 km	über 10 km
Datenrate	19,2 kbps	19,2 kbps
Bitfehlerrate	10^{-3}	10^{-3}
Sicherungsverfahren	proprietär, CRC, Wiederholung	proprietär, CRC, Wiederholung
Adressierung	proprietär	proprietär
Verschlüsselung	proprietär	proprietär
Topologie	Infrastruktur	Infrastruktur
Relaisstation	nicht erlaubt	möglich
Point to MP	ja, 1 Master-N Slave	ja, 1 Master-N Slave
Modulation	ASK, BPSK, FSK	ASK, BPSK, FSK
Spreizverfahren	teilweise	nein
Multiplex	FDM	TDM, FDM
Lizenz/Nutzungsgebühren	nein	ja

Tabelle 5.2: Typische Parameter und Kennwerte für Funksysteme im 869 bzw. 459 MHz Bereich; Quelle: [Bundesnetzagentur 06], [VDI 02]

stimmen. In [Marihart 01] wird für die informationstechnische Anbindung entfernter Komponenten im Bereich des Energiemanagements und der Fernüberwachung explizit UHF-Systeme im 450/900 MHz-Band (900 MHz: USA) vorgeschlagen. Aber auch Beispiele aus anderen Bereichen der Versorgungstechnik (vgl. [Lex 03]) zeigen, dass Funksysteme im UHF-Bereich effizient für die Datenfernübertragung eingesetzt werden können.

5.2 Leitungsbasierte Kommunikationssysteme

In Analogie zur Verwendung des öffentlichen leitungsbasierten Telefonnetzes, besteht prinzipiell die Möglichkeit, nicht-providerbasierte leitungsgebundene Kommunikationssysteme für den Datenaustausch in dezentralen Versorgungsstrukturen einzusetzen. Neben der Verwendung von existierenden elektrischen Versorgungsleitungen (vgl. Abschnitt 5.2.2) als physikalisches Übertragungsmedium, können explizit *zusätzliche* Medien in Form von Lichtwellenleitern (Glas bzw.

Kunststoff), Twistedpair, Koaxialkabel etc. benutzt werden. Die Wahl des Übertragungsmediums ist jedoch, aufgrund der Dämpfung, wesentlich bestimmend für die Leitungslänge zwischen zwei Kommunikationsteilnehmern und daher auch für die maximale Übertragungsdistanz nach Abschnitt 3.2.4.1 bzw. der benötigten Anzahl von Repeatern.

5.2.1 Leitungsbasierte Bussysteme

Prinzipiell ist es möglich jeden Teilnehmer mit jedem anderen Teilnehmern mittels einer separaten Parallelverdrahtung zu verbinden. Für eine kleine Anzahl von Teilnehmern und geringe Übertragungsdistanzen, mag dieser Weg praktikabel sein. Es ist jedoch ersichtlich, dass der Aufwand bei weiten Distanzen und vielen Teilnehmern sehr schnell ansteigt. In Hinblick auf eine flexiblere Struktur und einem reduzierten Aufwand für die Einbringung neuer Komponenten ist, bei einer leitungsbasierte Übertragung im Bereich der Vernetzung dezentraler Versorgungsstrukturen, davon auszugehen, dass eine Präferenz für Bussysteme im Gegensatz zu Einzelanbindungen besteht.

Eine Vielzahl von Bussystemen unterschiedlichster Technik und Anbieter erlauben Übertragungsdistanzen größer 1 km (Tabelle 5.3), so dass in Bezug auf die hier geforderte informationstechnische Vernetzung im Fernbereich, leitungsbundene Bussysteme grundsätzlich eingesetzt werden können. Jedoch sind in diesem Zusammenhang die Investitionskosten als auch der Installations- und Applikationsaufwand für entsprechende Kommunikationssysteme nicht zu unterschätzen. Im Besonderen gilt dies für die zusätzlich erforderlichen Leitungen als physikalisches Übertragungsmedium zwischen den Komponenten¹⁰.

Das Medium muss sowohl widerstandsfähig gegenüber allen klimatischen Einflüsse am Applikationsort sein, als auch den topografischen Randbedingungen gerecht werden. Das heißt, neben der Temperaturbeständigkeit, der Resistenz gegenüber Feuchtigkeit etc. müssen mittels des Medium sowohl ebene Flächen, als auch Anhöhen überbrückbar sein. Des Weiteren ist zu beachten, dass das Übertragungsmedium, aufgrund des Materialwertes, speziell in einkommensschwachen Regionen, einen nicht zu unterschätzenden ökonomischen Wert darstellt, und muss daher durch geeignete Maßnahmen gegenüber Diebstahl bzw. Vandalismus geschützt werden.

Eine mögliche Schutzvariante ist die Verlegung der Leitung im Erdbereich. Hierbei wirkt sich jedoch neben den entstehenden Kosten für die Erdarbeiten auch die erschwerte Detektion von Stör- bzw. Fehlerstellen im Übertragungsmedium negativ aus. Eine weitere Variante ist die Verlegung entlang von separaten Mastanlagen (over-head) oder parallel zu existierenden elektrischen Freileitungen. Im ersten Fall ist mit erhöhten Investitionskosten zu rechnen (Mastanlagen), wohin gegen durch die Verlegung parallel zu elektrischen Freileitungen eine Kostenreduktion erzielt werden kann. Je nach Intensität der elektromagnetischen Beeinflussung der Freileitung auf die Übertragungsleitung, kann aber eine Datenverbindung gestört bzw. unmöglich sein. Der Einsatz von geschirmten Leitungen oder Lichtwellenleiter schafft hier Abhilfe, ist jedoch mit Zusatzkosten verbunden.

In Bezug auf den relativ hohen Installations- und Applikationsaufwand leitungsbasierter Übertragungsmedien für Bussysteme, ist ein effizienter Einsatz entsprechender Systeme und Technologien für die hier geforderte Kommunikation und Applikation nicht erkennbar. Die vielfältige Verwendung in der Produktionstechnik als auch im Bereich der Hauskommunikation zeigt jedoch, dass diese Systeme durchaus ihre Berechtigung für die Nutzung im Nahbereich haben, bzw. eine Alternative zu funkbasierten Systemen darstellen können.

¹⁰ Gradienten-LWL: ca. 600 €/km [Erdkabel, A-DQ(ZN)b2Y]; ca. 1700 €/km [Luftkabel, ATF2YZN2Y]; Quelle: Berliner Glasfaserkabel GmbH, Mai 2005

typische Kennwerte	Profibus	Interbus-S	Industrial Ethernet	LonWorks
Medium	Twistedpair, LWL	Twistedpair, LWL	Twistedpair, LWL, Koax.	Twistedpair, LWL, Koax.
Übertragungsdistanz	bis 1,9 km	bis 13 km	bis 2,5 km	bis 2,2 km
Datenrate	9,6 kbps – 12 Mbps	bis 512 kbps	bis 1000 Mbps	4,8 kbps – 1,25 Mbps
Knotenanzahl	32 ohne Repeater, DP: 126, FMS: 127; 4 Repeater	256 (Fernbus), 7 (Peripheriebus), max. 4096 E/A	1024 ohne Router	max. 32385
Zugriffsverfahren	Mast./Mast., Tokenring, Mast./Slave	Mast./Slave	CSMA/CD	CSMA/CD
Topologie	Linie, Baumtopologie, kombinierbar	Ring	Linie	Linie
Fehlererkennung	Paritybit, Start- und End-Delimiter	16 Bit CRC	32 Bit CRC	16 Bit CRC
Standardisierung	DIN 19245, EN 50170, IEC 61158	DIN EN 19258	nein Anlehnung an Ethernet-Standard	IEC 61158 (Entwurf)

Tabelle 5.3: Typische Parameter und Kennwerte für verschiedene Bussysteme (Zellen- und Feldbus) Quelle: [Scherff 99]

5.2.2 Distribution Line Carrier Systeme

Neben dem Einsatz von autarken Funksystemen könnte die additive Nutzung, der, für die elektrische Energieübertragung notwendigen und vorhandenen Leitungsinfrastruktur, eine weitere Möglichkeit zur kommunikationstechnischen Vernetzung dezentraler Strukturen darstellen ([Schmid 03], [Schmid 03-1]). Im Kontext der *Signalübertragung auf Energieleitungen* wird oft der Begriff *Power Line Communication-Systeme*¹¹ benutzt.

PLC ist nicht explizit auf einen Anwendungsbereich bzw. Frequenzbereich begrenzt, sondern wird für ein weites Spektrum von Techniken und Anwendungen benutzt. So wird z. B. die seit Jahrzehnten zur Tarifschaltung erfolgreich eingesetzte *Tonfrequenzrundsteuertechnik*¹² im Frequenzbereich 167 bis 2000 Hz, als auch die schnelle Vernetzung von IT-Geräten über die interne Hausverkabelung (Frequenzbereich 10 – 30 MHz) dem Ausdruck Power Line Communication zugeordnet [Sanders 04].

¹¹ PLC: Power Line Communication

¹² TRT: Tonfrequenzrundsteuertechnik

Aufgrund einer fehlenden, einheitlichen Definition bzgl. PLC und der Mehrfachverwendung des Begriffs für die unterschiedlichsten Anwendungsbereiche und Techniken können schnell Missverständnisse entstehen. Zur sprachlichen Differenzierung bzw. Eingrenzung der in der elektrischen Verteilungsebene angesiedelten PLC-Systeme werden diese zunehmend mit dem Begriff *Distribution Line Carrier Systeme*¹³ in Verbindung gebracht [IEC 98].

Der Ausdruck *Distribution* bedeutet *Verteilung* und beinhaltet nicht die Übertragung, so dass eine klare Abgrenzung zu den PLC-Systemen der Übertragungsebene erzielt wird. Verteilnetze umfassen neben der Mittelspannung auch die Niederspannungsebene, so dass Kommunikationssysteme, die kundeneigene Niederspannungsinstallationen als Medium benutzen auch als DLC-Systeme bezeichnet werden können. Allgemein kann daher festgestellt werden, dass der Terminus *DLC-System* alle Kommunikationssysteme berücksichtigt, deren Datentransfer auf die Signalein- und Auskopplung in die elektrische Verteilnetzebene basiert. PLC-Systeme können generell in zwei Systemgruppen unterteilt werden. Die erste Gruppe umfasst Schmalbandsysteme die als *Narrowband-PLC-Systeme* bezeichnet werden. Breitbandsystemen bzw. *Broadband-PLC-Systeme* oder *Broadband-over-power-line*¹⁴ bilden die zweite Gruppe.

Der Begriff Breitband-PLC wird gewöhnlich im Kontext mit Ausdrücken wie z. B. *Last-Mile-Access* oder *HomePlug* verwendet. Der Last-Mile-Access ist die providerbasierte Bereitstellung von (Internet-)Zugangsnetzen für Hausanschlüsse unter Verwendung von PLC. Als *letzte Meile* (Kilometer) wird hierbei die zu überbrückende Distanz zwischen dem am Niederspannungstransformator installierten Zugang zum Telekommunikations-Backbone und den Hausübergabepunkten bezeichnet. Der Zugriff muss jedoch nicht explizit auf die letzte Meile beschränkt sein. Unter Access-BPL wird daher ein *Carrier current* System verstanden [FCC 04], das Hochfrequenzenergie über Energieleitungen überträgt, die im Besitz und unter Kontrolle von Netzbetreiber sind. Die Energieleitungen können sowohl oberirdisch als auch unterirdisch verlaufen. Typischer Weise nutzen Access BPL Mittelspannungsenergieleitungen (1 bis 40 kV) als Übertragungsmedium für die schnelle Datenkommunikation.

Im Gegensatz zur Anbindung an das Zugangsnetz (*Last Mile*) steht *HomePlug* stellvertretend für Ansätze der Inhausvernetzung. HomePlug für sich genommen ist eine Interessengemeinschaft von Industrieunternehmen mit dem Ziel der Koordination und Standardisierung von PLC-Aktivitäten im Gebäudesektor.

5.2.2.1 Frequenz- und Sendeparameter für PLC-Systeme

Unter der Berücksichtigung der Abhängigkeit der Baudrate von der benötigten Bandbreite im Frequenzbereich, wird schnell klar, dass die allen Breitband-PLC-Systemen gemeine hohe Datenrate für die Übertragung von Video-, Audiosignalen etc. im Bereich von mehreren Megabits pro Sekunde nur durch die Belegung bzw. die Nutzung großer Frequenzspektra (mehrere Megahertz) zu realisieren ist. Kommerzielle Breitband-PLC-Systeme für den *Last-Mile-Access* verwenden meist den in Abbildung 5.2 visualisiert Frequenzbereich von 1 bis 30 MHz.

Für den gesamten Frequenzabschnitt von 150 Hz bis 30 MHz existieren momentan keine einheitlichen Normen bzw. Frequenzbandwidmungen. Diesbezügliche Arbeiten sind innerhalb der CENELEC¹⁵, ETSI¹⁶ und CEPT¹⁷ im Gang.

¹³ DLC: **D**istribution **L**ine **C**arrier

¹⁴ BPL: **B**roadband-**P**ower-**L**ine

¹⁵ European Committee for Electrotechnical Standardization

¹⁶ ETSI: **E**uropean **T**elecommunications **S**tandards **I**nstitute

¹⁷ CEPT: **E**uropean **C**onference of **P**ostal and **T**elecommunications **A**dministrations

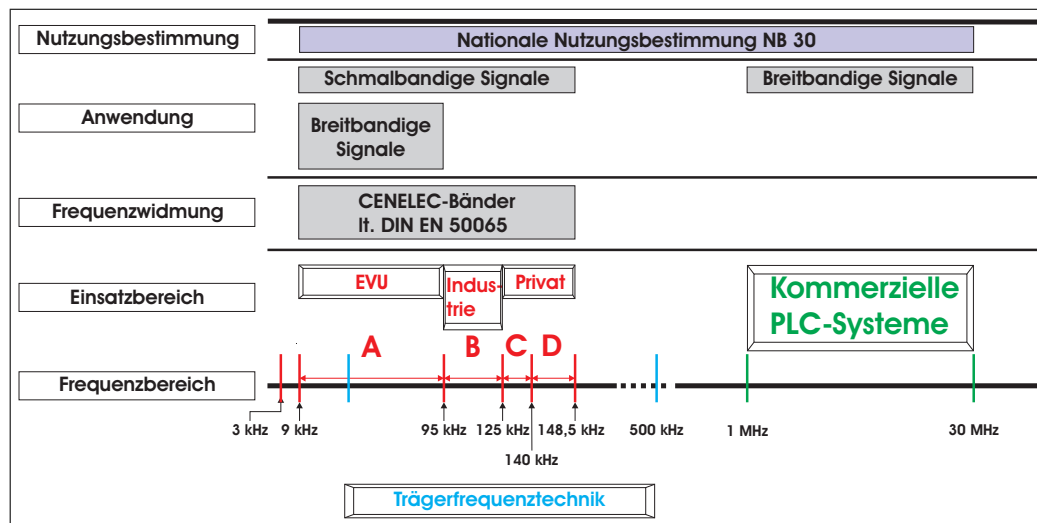


Abbildung 5.2: PLC-Nutzungsübersicht

In Deutschland hat der Gesetzgeber mit der Nutzungsbestimmung NB 30 der Frequenzbereichszuweisungsplanverordnung [Bundesnetzagentur 04] einschränkende Rahmenbedingungen für die Nutzung des Frequenzbereichs von 9 kHz bis 3 GHz durch Telekommunikationsanlagen bzw. Telekommunikationsnetzen die das Übertragungsmedium *in und längs von Leitern* nutzen geschaffen. Sowohl schmalbandige als auch breitbandige PLC-Systeme verwenden Frequenzspektren innerhalb des von der NB 30 festgelegten Gültigkeitsbereichs, so dass die Nutzungsbestimmung für beide PLC Systeme gilt. NB 30 benennt die zulässigen Spitzenstörfeldstärken in drei Meter Messabstand, die aus EMV-Gründen¹⁸ nicht überschritten werden dürfen.

Schmalbandige PLC-Systeme belegen, wie der Name schon ausdrückt, nur kleine Frequenzspektren, so dass auch nur geringe Datenraten zu erzielen sind. In Abhängigkeit der Bandbreite, des eingesetzten Modulationsverfahren, der Kanalcodierung etc. sind Datenraten von bis ca. 288 kbps im CENELEC-Band zu realisieren [iAd 04].

Für Deutschland erfolgt der Einsatz von schmalbandigen PLC-Systemen unter Berücksichtigung der Norm DIN EN 50065-1 [VDE 02]. Diese regelt die Signalübertragung auf elektrischen Niederspannungsnetzen im Frequenzbereich 3 kHz bis 148,5 kHz. In Abhängigkeit der Nutzung werden vier Klassen (A – D) von Frequenzbereichen festgelegt.

Das erste Frequenzspektrum (9 – 95 kHz) ist ausschließlich für die Anwendung durch Energieversorgungsunternehmen bzw. deren Konzessionsinhaber reserviert. Aufgrund der relativ großen Bandbreite von 84 kHz können sowohl *schmale* breitbandige als auch schmalbandige Signale zur Übertragung eingesetzt werden.

Unter breitbandigen Signalen werden Signale verstanden, deren Bandbreite größer oder gleich 5 kHz ist [VDE 02]. Schmalbandige Signale sind Signale, die ein Spektrum kleiner 5 kHz belegen. Der zweite Bereich B (95 – 125 kHz) ist auf die Nutzung in Kundenanlagen beschränkt und erfordert im Gegensatz zum dritten Bereich C (125 – 140 kHz) kein Zugriffsprotokoll. Die vierte Klasse D deckt das Frequenzspektrum von 140 kHz bis 148 kHz ab. Auch hier wird kein Zugriffsprotokoll benutzt. Für den Bereich D ist das CSMA-Protokoll vorgeschrieben. Durch die Verwendung des Zugriffsprotokolls soll mehreren Systemen der Betrieb in gleichen oder elektrisch verbundenen Niederspannungsnetzen ermöglicht werden, wobei das Übertragungsprotokoll weiterhin frei wählbar ist.

¹⁸ EMV: Elektromagnetische Verträglichkeit

Neben der Nutzungseinschränkung und der Vorschrift bzgl. des Zugriffsprotokoll sind auch die zulässigen, maximalen Einspeisepegel vorgeschrieben. Für breitbandige Signale im Bereich von 9 bis 95 kHz ist ein maximaler Einspeisepegel von 134 dB(μ V) erlaubt. Schmalbandige Signale dürfen nur mit dem in Abbildung 5.3 dargestellten Einspeisepegelverlauf eingekoppelt werden

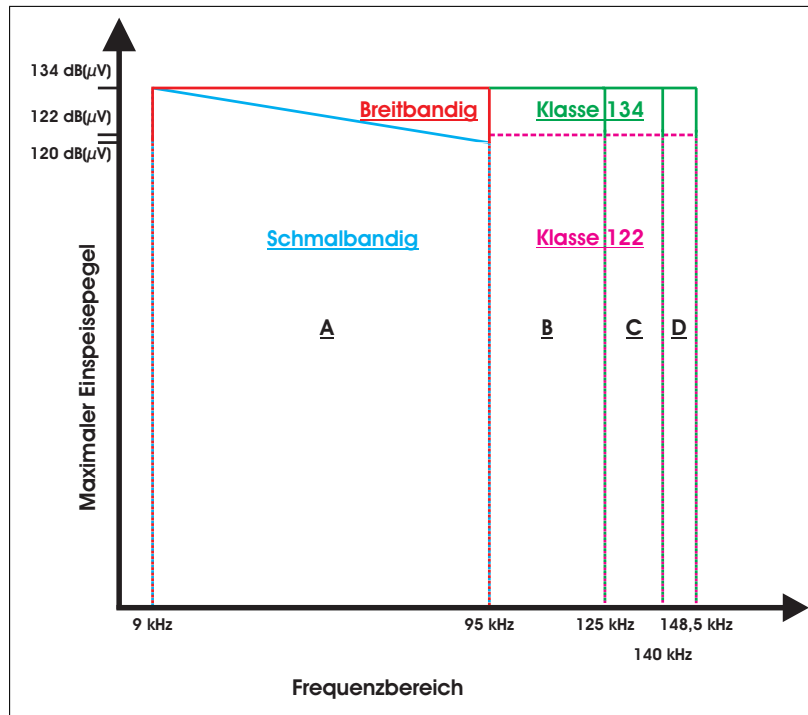


Abbildung 5.3: maximaler Einspeisepegel gemäß DIN EN 50065-1

Es besteht weiterhin natürlich die Möglichkeit schmalbandige PLC-Systeme im Bereich oberhalb von 148,5 kHz zu betreiben, so lange die in der NB 30 festgelegten Störfeldstärken eingehalten werden und der benutzte Frequenzbereich keine sicherheitsrelevanten Funkdienste aufweist. Es ist zu berücksichtigen, dass für die gesamte Frequenznutzung (9 kHz – 3 GHz) kein *expliziter* Schutz vor Störungen durch Aussendung von Sendefunkanlagen vom Gesetzgeber her vorgesehen ist.

Für die mittelspannungsseitige Anwendungen der DLC-Technik ist die internationale Normenreihe IEC 61334 gültig. Gemäss [IEC 98] können MS- bzw. MV-DLC-Systeme¹⁹ den Frequenzbereich von 3 bis 500 kHz zur Datenübertragung verwenden, wobei zwei frequenzabhängige Sendeleistungen (1 W bzw. 5 W) zulässig sind. Aufgrund möglicher technischer Probleme bzw. Konfliktsituationen mit DIN EN 50065-1 ist jedoch bis zum jetzigen Zeitpunkt keine Harmonisierung von IEC 61334-3-1 erfolgt, so dass für MS-DLC-Systeme DIN EN 50065-1 in Deutschland maßgeblich bestimmend ist.

5.2.2.2 Übertragungseigenschaften

Stromversorgungsleitungen werden üblicherweise für die Energieübertragung optimiert, so dass es sich bei diesen Netzen nicht um hochfrequenzmäßig angepasste Netzwerke handelt. In diesem Zusammenhang ist daher mit Beeinträchtigungen bei der Signalübertragung zu rechnen. Ein wesentliches Maß ist die Dämpfung des Signals entlang der Leitung.

¹⁹ MS: Mittelspannung bzw. MV: Medium Voltage

Die Dämpfung ist definiert als der Quotient des Verlustwiderstandes der Leitung und dem Wellenwiderstand. Der Skin-Effekt (Stromverdrängung) bewirkt mit zunehmender Frequenz einen Anstieg des Verlustwiderstandes und somit eine erhöhte Dämpfung des Signals entlang der Leitung. Bei einem netzfrequenten Betrieb ist der Einfluss des Skineffektes auf das ohmsche Verhalten der Leitung zu vernachlässigen. Mit steigender Betriebsfrequenz erfolgt jedoch eine Stromverdrängung zum Außenrand des Leiters hin, so dass die wirksame Leiterquerschnittsfläche für den Energietransport reduziert wird. Als Konsequenz hieraus steigt der Widerstandsbelag R' an. Das, durch die Stromverdrängung reduzierte Eindringmaß δ des Stromes ist abhängig von der Frequenz f , der spezifischen Leitfähigkeit σ und der absoluten magnetischen Permeabilität μ des Leiters. In Anlehnung an [Kupfmüller 90] gilt der Zusammenhang:

$$\delta_{Skin} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad (5.1)$$

Das *Eindringmaß* δ gibt die Tiefe an, bis wohin die elektrische Feldstärke auf den e -ten-Teil abgesunken ist.

Eine nicht konstante Netzimpedanz beeinträchtigt zusätzlich die Signalausbreitung. Variierenden Lastzuständen des Netzes sowie Art und Anzahl der zu versorgenden Verbraucher führen zu schwankenden Netzimpedanzen (siehe Abbildung 5.4) [VDEW 01] [Dostert 99].

Wie in [Dostert 99] ausgeführt wird, können z. B. im A-Band bei Frequenzen im Bereich von 10 kHz derartig hohe Netzimpedanzen auftreten, dass Sendeleistungen von mehreren hundert Watt erforderlich wären, um die maximal zulässigen Sendeamplituden aufzuprägen. Im Gegensatz dazu sind schon Sendeleistungen von einigen Watt ausreichend für den Bereich um 90 kHz.

In Außenhausnetzen konvergiert die Impedanz bei hohen Frequenzen gegen 50Ω (Wellenwiderstand der Versorgungskabel). Ab einem Frequenzbereich oberhalb von 300 kHz klingt das zeitvariante Verhalten der Netzimpedanz ab. Messungen im Bereich von rd. 500 kHz bis 20 MHz zeigen einen erhöhten Dämpfungsanstieg und spiegeln die Tiefpasscharakteristik elektrischer Versorgungskabeln wieder [Zimmermann 00]. Der erhöhte Dämpfungsanstieg hat zur Folge, dass hochfrequente Signale entlang des Übertragungsweges schneller abklingen als niederfrequente Signale. Unter Berücksichtigung gleicher Randbedingungen (Sendeleistung und Modulation etc.) bedeutet dies, dass bei Einkopplung von hochfrequenten Signalen auf die Versorgungsleitung kleinere Übertragungsdistanzen (maximaler Abstand der Transceiver), als bei der Verwendung von niederfrequenten Signalen zu erwarten sind. Prinzipiell führt dies dazu, dass Breitband-DLC-Systeme eine wesentlich geringere Distanz überbrücken können als Schmalband-DLC-Systeme.

5.2.2.3 Störszenarien

Für eine fehlerfreie Informationsübertragung stellt das Dämpfungsverhalten der elektrischen Versorgungsleitung an sich kein Hindernis dar. Durch geeignete Empfängertechnik bzw. durch den Einsatz zusätzlicher Repeater können auch Übertragungen auf dämpfungsintensiven Strecken ermöglicht werden.

Wesentliches Handicap für eine fehlerfreie Übertragung sind die auf den Übertragungskanal eingekoppelten Störsignale. Prinzipiell können die im elektrischen Netz auftretenden Störer in drei Gruppen unterteilt werden. Die erste Gruppe umfasst die Rauschstörer. Dies sind Störer, die das Grundrauschen des elektrischen Versorgungsnetzes bestimmen. Störquellen für dieses Grundrauschen sind unterschiedlichster Natur, so können z. B. Glimmentladungen, kapazitive oder induktive Einkopplungen etc. zu Grundrauschen führen. Allen Rauschstörern ist ein stochastisches Auftreten und ein mit der Frequenz abnehmendes Leistungsdichtespektrum gemein. Nach [VDEW 01]

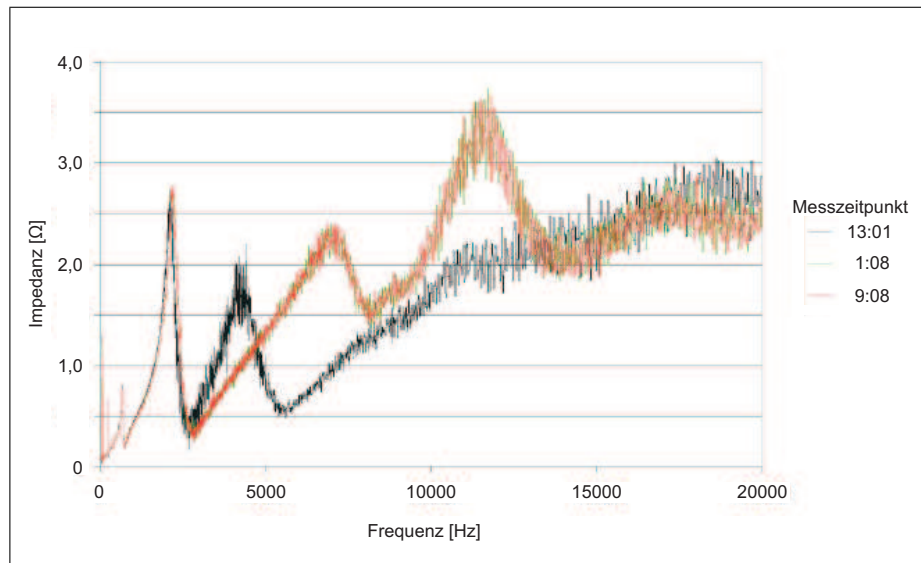


Abbildung 5.4: Impedanzverlauf für unterschiedliche Zeitpunkte; Quelle: [ESDEPS 02]

ist der Pegel des Grundrauschens sowohl von der Spannungsebene als auch von den örtlichen Gegebenheiten abhängig. In der Mittelspannungsebene treten weniger Rauschstörern als in der Niederspannungsebene auf, so dass das Grundrauschen in der Mittelspannungsebene insgesamt als geringer zu erachten ist. Die von Rauschstörern verursachten Fehler sind statistisch verteilter Natur, so dass bei entsprechender Systemauslegung Fehler mit einer Wahrscheinlichkeit im Bereich von 10^{-6} auftreten.

Schmalbandstörer bilden die zweite Gruppe von Störern. Charakteristisch für diese Gruppe sind spitzen Peaks in eng abgegrenzten Frequenzbereichen mit sehr hohen Leistungsdichten. Auslöser für Schmalbandstörer können z. B. Schaltnetzteile, Frequenzumrichter, Vorschaltgeräte für Leuchtstoffröhren, Computermonitore etc. sein. Im höheren Frequenzbereich können Mittel- und Kurzwellenrundfunksender als Störquellen identifiziert werden. Speziell der zur Synchronisation von funkgestützten Zeitsystemen europaweit genutzte DCF-77 (77,5 kHz), kann bei langen Leitungsabschnitten (Antennenwirkung) zu Störungen führen. Gemäß [Dostert 99] hängen die Auswirkungen von schmalbandigen Störern sehr stark von der verwendeten Modulation ab und können im Extremfall zu einer Unterbrechung der Übertragung führen.

Kennzeichnend für die letzte Gruppe von Störern, den Impulsstörern, sind kurze Impulsdauern von 10 bis 100 μs . Prinzipiell kann man diese in netzsynchron bzw. asynchron auftretende Störer unterteilen [Dostert 00]. Zufällige Störungen entstehen z. B. durch Ein- und Ausschaltvorgängen von Maschinen, wohingegen periodische Störungen meist durch Phasenanschnittsteuerungen verursacht werden. Aufgrund der Steilheit des nadelförmigen Störimpulses (Anstieg- und Abfallzeit gering) und der hohen Amplitude, wirken sich Störimpulse bis in Megaherzbereich aus. Je nach Dauer, Energie und Auftrittszeitpunkt können Impulsstörer die Datenübertragung stören bzw. einzelne Datenbits verfälschen. Durch geeignete Kanalcodierung kann der Einfluss von Impulsstörern auf die Datenübertragung minimiert werden.

5.2.2.4 Modulationsarten

Für die Auswahl eines geeigneten Modulationsverfahrens für DLC-Systeme müssen im Wesentlichen drei Randbedingungen betrachtet werden. Zum Einem können die in Abschnitt 5.2.2.3 be-

schriebenen Störszenarien zu relativ geringen Signal zu Rauschabständen (SNR²⁰) führen, zum anderen weist das Übertragungsmedium ein zeitvariantes frequenzselektives Verhalten auf. Legislative und regulatorische Beschränkungen bzgl. EMV, Frequenznutzung etc. umfassen den dritten Einflussfaktor. Prinzipiell können die bei DLC-System eingesetzten Modulationsverfahren in schmalbandige und bandspreizende Techniken gegliedert werden.

5.2.2.4.1 Single-Carrier-Systeme Bei *Single-Carrier-Systemen* erfolgt eine schmalbandige Modulation mit nur einer Trägerfrequenz. Hierbei ist die Bandbreite des Sendesignals $s(t)$ in der gleichen Größenordnung wie das Basisbandsignal. Die zu übertragenden Informationen werden entweder durch Amplitudenumtastung (ASK²¹) oder Phasenumtastung (PSK²²) des Trägersignals gebildet. In Hinblick auf die Übertragungssicherheit ist das SNR-Verhältnis im Bereich der Trägerfrequenz das entscheidende Kriterium. Aufgrund fehlender spektralen Redundanz sind Single-Carrier-Systeme für die zuverlässige Nachrichtenübertragung über Energienetzen weniger geeignet [Karl 97].

Die beschriebenen Single-Carrier-Systeme benutzen nur eine Trägerfrequenz. Werden jedoch innerhalb eines Frequenzbandes der Bandbreite B unter Verwendung unterschiedlicher Trägerfrequenzen gleichzeitig mehrere Signale im Frequenzmultiplex ausgesendet, so spricht man von *Multi-Carrier Systemen* oder Mehrträgerverfahren.

Einfachste Beispiele für Multicarrier-DLC-Systeme sind solche, die das zweiwertige *Frequency Shift Keying* einsetzen. Bei diesen Systemen erfolgt eine direkte Zuordnung der zu übertragenden Bits (Baud) zu speziellen Frequenzen. Ein typischer Vertreter dieser Gruppe sind z. B. DLC-Systeme, die das Konnex-Power-Line-Protokoll (KNX-Standard) verwenden. Hierbei sieht die Bitübertragungsschicht ein Minimal-Frequenzmodulationsverfahren vor. Die Mittenfrequenz dieser Systeme liegt bei 132,5 kHz mit einer Abweichung von $\pm 0,6$ kHz. Eine logische 1 wird durch die Frequenz 131,9 kHz und eine logische 0 durch die Frequenz 133,1 kHz repräsentiert²³ [domologic 00]. Der Frequenzabstand der beiden Trägerfrequenzen muss mindestens dem Wert der Datenrate entsprechen ist aber nach oben hin nicht begrenzt. Es ist jedoch in diesem Zusammenhang auf ein ganzzahliges Vielfaches der Datenrate zu achten, da sonst die Orthogonalität (Überlagerung der Nullstellen im Spektrum) der Signale verloren geht und eine Empfängerdetektion schwierig wird. Das Übertragungsprinzip mit einer Belegung von zwei Frequenzen wird oftmals in der Literatur und Normung als S-FSK (*Spread Frequency Shift Keying*) bezeichnet, wobei ein Mindestabstand von 10 kHz zwischen den beiden Frequenzen empfohlen wird [VDE 01].

DLC-Systeme mit FSK sind in der Regel robuster als Single-Carrier-System mit Amplitudenmodulation, da Verfälschungen der Frequenz entlang des Übertragungsweges unwahrscheinlicher sind als Amplitudenverfälschungen. DLC-FSK-Systeme stoßen jedoch an ihre Grenzen sobald die gewählten Trägerfrequenzen entweder sehr hohen Dämpfung unterliegen oder sehr starke Störsignale überlagert werden [Dostert 00-1].

5.2.2.4.2 Mehrträgerverfahren Der bekanntester Vertreter von Mehrträgerverfahren ist das *Orthogonal Frequency Division Multiplex* (OFDM²⁴). Hierbei wird der zur Verfügung stehende Frequenzbereich in zahlreiche Subkanäle der Breite Δf unterteilt (Abbildung 5.5). Die für eine

²⁰ SNR: Signal to Noise Ratio

²¹ ASK: Amplitude Shift Keying

²² PSK: Phase Shift Keying

²³ spread frequency shift keying signaling, Mittenfrequenz EIB: 110 kHz, EHS: 132 kHz

²⁴ OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplex

Übertragung verwendeten Subträgersymbolformen sind im Zeitbereich rechteckig²⁵, so dass im Frequenzbereich ein $s_i(x)$ Spektrum entsteht.

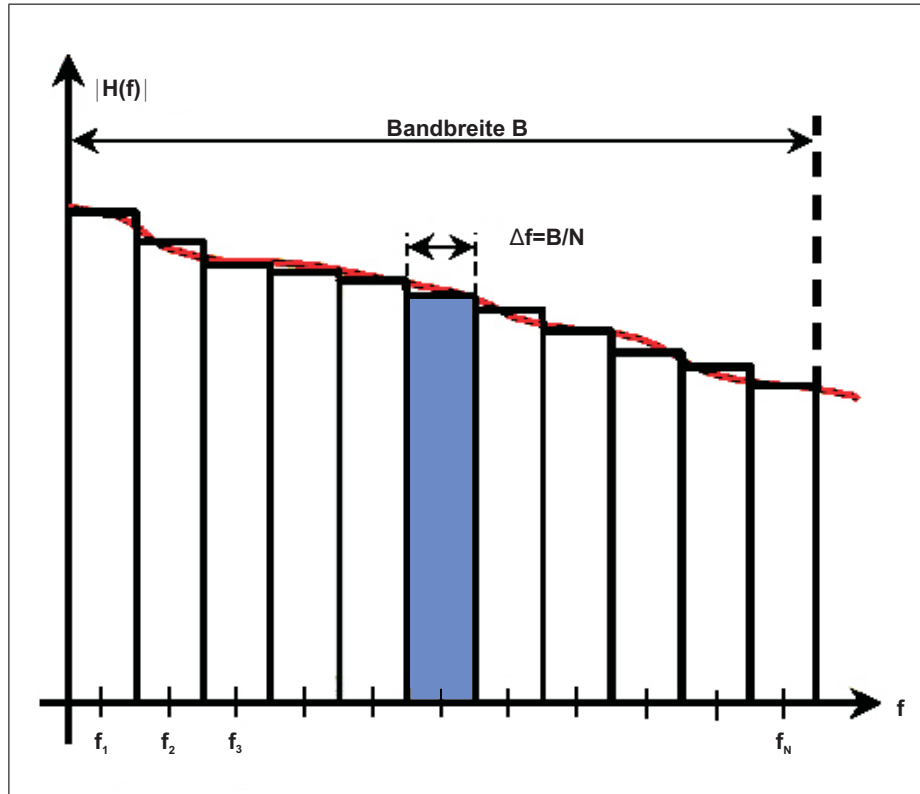


Abbildung 5.5: Prinzipdarstellung: Aufteilung des Frequenzraumes in Subkanäle

In einem nicht orthogonalen System sind die Trägerfrequenzen so angeordnet, dass die Signale separat empfangen und demoduliert werden können. Zur *Signaltrennung* sind Sicherheitsabstände zwischen den einzelnen Trägerfrequenzen notwendig. Dies führt jedoch zu einer unzureichenden Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Bandbreite.

Bei OFDM sind die Subträgerfrequenzen so angeordnet, dass die spektralen Maxima der einzelnen S_i -Funktionen mit den Nullstellen der benachbarten Trägerfrequenzen übereinstimmen, so dass der Leistungsanteil der einzelnen Träger bei den Mittenfrequenzen der anderen Träger gleich Null ist (vgl. Abbildung 5.6 und 5.7) [Halldorsson 98].

Wie schon beschrieben erfolgt beim OFDM eine Aufteilung des zur Verfügung stehenden Frequenzspektrums in zahlreiche Subkanäle N . Die zu übertragenden digitalen Datenströme werden nicht seriell übertragen, sondern in eine Vielzahl von parallelen Datenströmen aufgeteilt. Durch diese Aufteilung reduziert sich die Taktfrequenz des Teildatenstroms um den Aufteilungsfaktor gegenüber dem Ausgangsdatenstroms. Zur Einhaltung der Zeitkontinuität müssen jedoch nun anstatt einem Bit n -Bits (gemäß dem Aufteilungsfaktor) gleichzeitig übertragen werden. Hierzu werden die Teildatenströme auf die N schmalbandigen Träger innerhalb des zur Verfügung stehenden Frequenzspektrums verteilt (Abbildung 5.8). Durch die Verwendung von orthogonalen Trägern wird sichergestellt, dass es bei der parallelen Übertragung von einzelnen Datenströmen zu keinen gegenseitigen Beeinflussungen kommt.

Das digitale Nachrichtensignal $D_{NA}(t)$ wird zunächst in Teilsignale $D_i(t)$ ²⁶ aufgeteilt und da-

²⁵ Nach dem Demultiplexing des seriellen Datenstroms mapping auf komplexwertige rechteckige Symbole

²⁶ für $i=1$ bis n

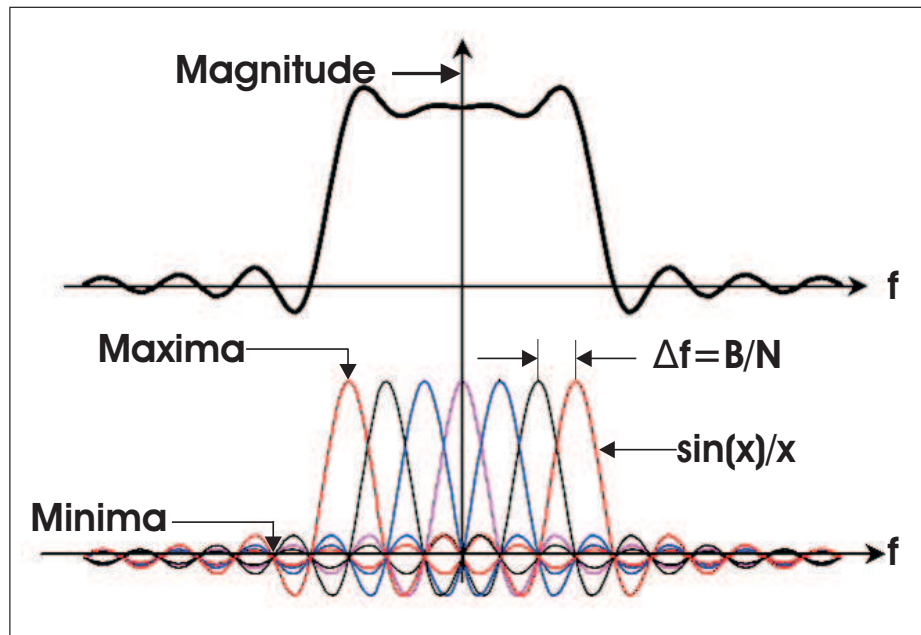


Abbildung 5.6: Prinzipdarstellung: OFDM-Spektrum

nach mit der Trägerfrequenz ω_i moduliert. Anschließend erfolgt die Addition aller Subkanäle zum Multicarrier-Signal:

$$X_{Multicarrier}(t) = \sum_{i=0}^{N-1} D_i(t) e^{j\omega_i t} \quad (5.2)$$

Im Fall einer orthogonalen Aufteilung der Trägerfrequenzen des Frequenzspektrums B gilt:

$$\begin{aligned} \omega_i &= \pi i \Delta f \\ \Delta f &= \frac{2}{T_{Symbol}} \end{aligned}$$

mit T_{Symbol} als Symboldauer der Subkanäle [Meyer 02]. Aus 5.2 folgt somit:

$$X_{OFDM}(t) = \sum_{i=0}^{N-1} D_i(t) e^{\frac{j\pi i t}{T_{Symbol}}} \quad (5.3)$$

Da es sich bei den Datensignalen um digitale Signale handelt, ist die Zeitvariable t diskret, so dass (5.3) identisch mit der inversen diskreten Fouriertransformation²⁷ ist. Digitale Signalprozessoren²⁸ bieten die Möglichkeit IDFT und die diskrete Fouriertransformation schnell und effizient mit FFT-Algorithmen²⁹ zu berechnen, so dass für OFDM-Systeme DSP eingesetzt werden.

Durch die Aufteilung des seriellen Datenstroms $D_{NA}(t)$ auf mehrere parallele Subkanäle, kann die Datenrate je Subkanal um ca. $\frac{1}{N}$ gegenüber dem seriellen Datenstrom reduziert werden, so dass die Symboldauer verlängert wird. Das heißt, eine Erhöhung der Subkanalanzahl N führt bei fester Datenrate zu einer Verkleinerung der Taktrate des Datenstroms $D_i(t)$ und einer Verlängerung

²⁷ IDFT: Inverse Diskrete Fourier Transformation

²⁸ DSP: Digitale Signalprozessor

²⁹ FFT: Fast Fourier Transformation

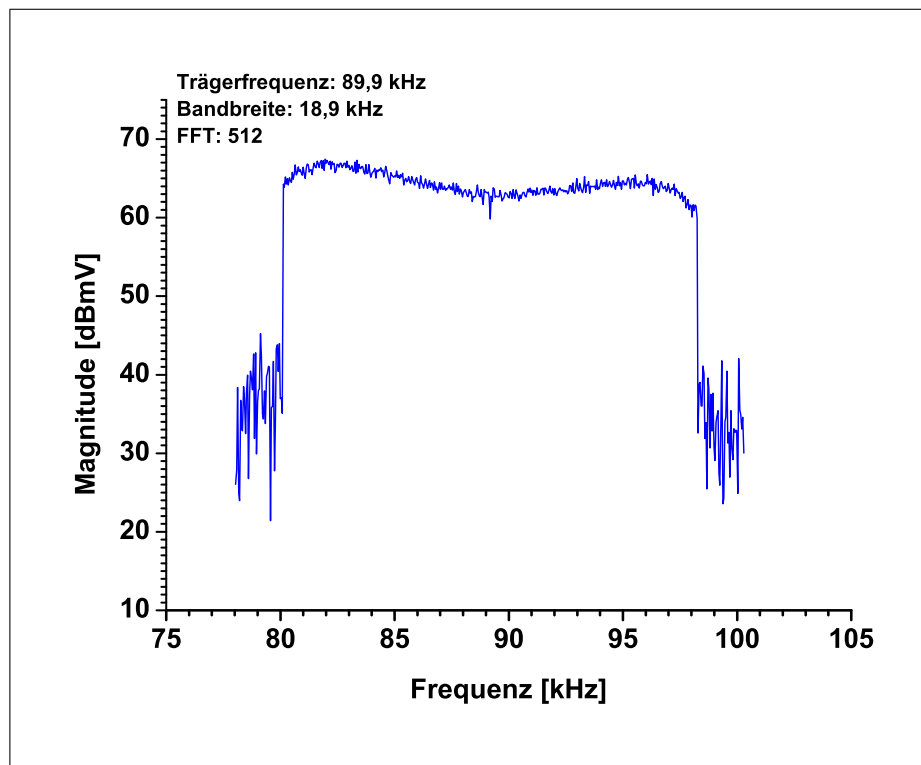


Abbildung 5.7: Messung des komplexen OFDM-Spektrums

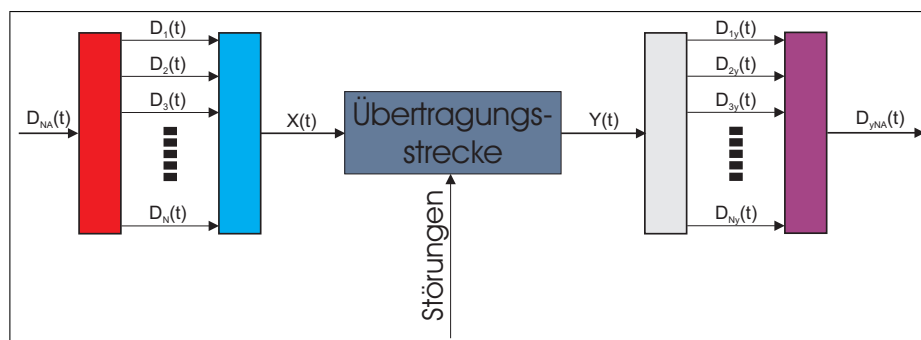


Abbildung 5.8: OFDM-Übertragungssystem, Quelle: [Halldorsson 98], (modifiziert)

der Symboldauer. Aufgrund dieses Phänomens erweisen sich OFDM-Systeme für den Einsatz bei Übertragungskanälen mit langandauernden Echoeffekten als vorteilhaft [Halldorsson 98]. Die Anzahl der Subkanäle kann jedoch nicht beliebig gesteigert werden, da die notwendigen komplexen Multiplikation zur Berechnung der FFT mit der Subkanalanzahl steigen (notwendige komplexe Multiplikationen: $\frac{N}{2} \cdot \log N$).

Da sich die Kanaleigenschaften von elektrischen Versorgungsleitungen zeitlich ändern und nicht vorrausgesehen werden kann, bei welchen Frequenzen innerhalb eines Kanals große Verzerrungen auftreten, erfolgt bei DLC-Mehrträger-Systemen meist keine individuelle Übertragungsanpassung an die einzelnen Kanäle. Alle Teilkanäle verwenden daher die gleiche digitale Modulation.

Die Aufteilung des Datenstroms auf eine Vielzahl von Subkanälen und die damit verbundene *Aufweitung* der Symboldauer je Kanal, bewirkt, dass sich OFDM-Systeme prinzipiell robust gegenüber dem Auftreten von Impulsstörungen verhalten. Bedingt durch die Kurzzeitigkeit von Impulsstörungen (Belegung eines weiten Frequenzspektrums) im Verhältnis zur langen Symboldauer im Subkanal erfolgt kaum eine Beeinflussung der Übertragung. Des Weiteren kann durch die Unter-

teilung des Übertragungsbandes in Subkanäle auf eine komplexe Gesamtkanalmodellierung verzichtet werden, so dass nur ein kleiner Teilbereich je Subkanal betrachtet werden muß. Aufgrund der geringen spektralen Breite der Subkanäle kann innerhalb des Subkanals von einer konstanten Dämpfung und Phase ausgegangen. Bei Verwendung von differentiellen Amplituden- und Phasenmodulationsverfahren kann daher auf eine absolute Ermittlung der Dämpfungs- und Phasenwerte innerhalb des Subkanals verzichtet werden. Der Systemaufwand reduziert sich.

Je nach Modulationsart besteht das Empfängersignal aus einer Abfolge von Datensymbolen, die repräsentativ für eine bestimmte Bitfolge stehen. Jedoch erfolgt aufgrund der physikalischen Leitungsverzweigungen, der vorhandenen Reflexionsstellen innerhalb des elektrischen Netzes, nicht immer eine direkte Ausbreitung der eingekoppelten Hochfrequenzsignale vom Sender zum Empfänger. In diesem Zusammenhang kann es zu Mehrwegeausbreitungen und resultierend zu Mehrwegeempfang am Empfänger führen. Auf der Senderseite werden Signale zeitlich voneinander getrennt. Auf der Empfängerseite jedoch überlappen sich Signale aufgrund unterschiedlicher Laufzeiten. In Abhängigkeit der Codierung und der Modulation stellen die auftreffenden Signale Symbole dar, so dass verzögerte Signale direkt empfangene Signale stören. Das heißt, das Signal, welches für ein Symbol gedacht war, beeinflusst durch die Überlappung das zeitlich folgende Signal für das nächste Symbol. Dieser Effekt wird in der Literatur als Intersymbolinterferenz³⁰ bezeichnet [Schiller 03].

Als Gegenmaßnahme besteht die Möglichkeit, die Symboldauer zu verlängern (Abbildung 5.9), so dass nur das direkte Folgesignal(-symbol) gestört wird. Des Weiteren kann auch durch Verlängerung der Symbole (nach vorn) auch die Störung des Nachbarintervalls verhindert werden. Zur *Nach-vorn-Verlängerung* wird ein Teil des Symbolendes zum Schutz an den Anfang kopiert. Diese Schutzintervall (*Guard-Intervall*) wird vom Empfänger eliminiert. Liegt der Laufzeitunterschied unterhalb der Dauer des Schutzintervalls, findet keine Störung benachbarter Symbole mehr statt. Wird jedoch ein zu langes Schutzintervalls gewählt, kommt es zu einer nicht notwendigen Reduzierung der nutzbaren Datenrate. Die Länge des Guard-Intervalls muss jedoch mindestens der Länge der Impulsantwort der Übertragungsstrecke entsprechen, um ein Symbol vor ISI zu schützen.

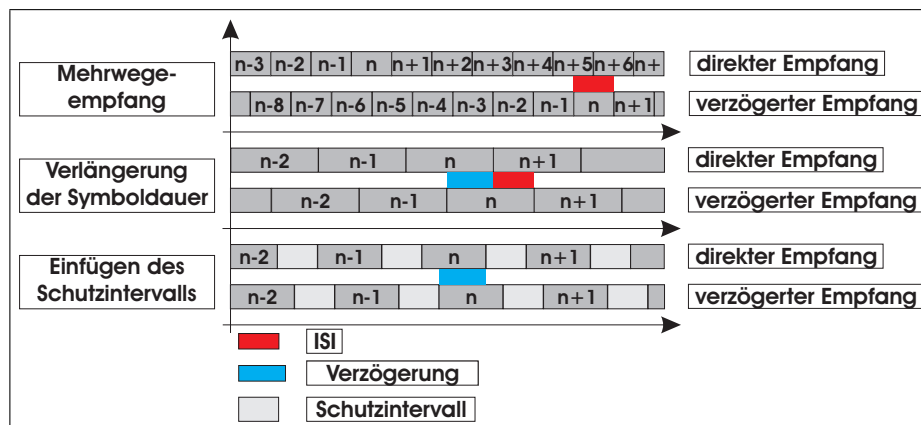


Abbildung 5.9: Mehrwegeempfang, Quelle: [Schiller 03], (geändert)

Durch eine Verlängerung der Symboldauer bzw. dem Einsatz von Guard-Intervallen wird die Signaldauer verlängert, so dass weniger Bandbreite im Frequenzbereich belegt wird. Dies führt zwangsläufig zu einer geringeren Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Kanalbandbreite. Soll eine maximale Ausnutzung der Kanalbandbreite erfolgen, muss die Anzahl der Subkanäle (Trä-

³⁰ ISI: Intersymbolinterferenz

ger) erhöht werden, was jedoch mit einer Steigerung des benötigten Rechenaufwandes (FFT und IFFT) verbunden ist.

Zahlreiche DLC-Systemhersteller verwenden zur Zeit OFDM als Multi-Carrier Modulationsart, so wird z. B. beim *DS2 Chip Set*³¹ bzw. beim Chip *DLC-2A*³² dieses Verfahren erfolgreich eingesetzt.

5.2.2.4.3 Bandspreizende Mehrträgerverfahren Bandspreizende Modulationstechniken für den Einsatz in DLC-Systemen (*Spread Spectrum*)³³ können im wesentlichen in zwei unterschiedliche Verfahren untergliedert werden. Beim ersten Vertreter der bandspreizenden Verfahren, dem *Direct Sequence Spread Spectrum*³⁴, wird ein primär modulierte informationstragendes Signal mit einer digitalen Codefolge höherer Rate moduliert, so dass aus dem ursprünglich schmalbandigen Informationssignal ein breitbandiges Signal wird. Durch diese zusätzliche Modulation folgt eine höhere Bandbreite für die Symbolrate als für das ursprünglicher Informationssignals bzw. eine Verbreiterung des Signalspektrum in der Umgebung der Trägerfrequenz. Die dem informationstragenden Signal (Nutzsignal) zugeordnete Energie wird durch die Spreizung auf einen größeren Frequenzbereich verteilt, so dass die Leistungsdichte des gespreizten Signals geringer ist als die des Ausgangssignals. Je nach Erzeugung und Empfang des gespreizten, breitbandigen Signals, kann dessen Leistungsdichte sogar geringer sein als das Hintergrundrauschen des Übertragungskanals.

Wesentlicher Vorteil von DSS-Systemen ist, dass bei Verwendung unterschiedlicher *Chippingsequenzen* eine Vielzahl von Systemen den gleichen Frequenzbereich belegen können, ohne dass eine gegenseitige Beeinflussung bzw. Störung erfolgt. Systeme einer bestimmten Codesequenz können nur Signale mit der entsprechenden Chippingsequenz dekodieren, so dass andere Signale (mit anderen Sequenzen) als *Hintergrundrauschen des Übertragungskanals* gedeutet werden. Es ist jedoch zu beachten, dass mit zunehmender Anzahl von DSS-Systemen innerhalb eines Kanals auch das Hintergrundrauschen stetig zunimmt.

DSS-Systeme sind gegen schmalbandige Störungen relativ unempfindlich, da diese im Empfänger bei der Entspreizung des Eingangssignals im Gegensatz zum Nutzsignal gespreizt und nicht entspreizt werden. Breitbandige Störungen bzw. Interferenzen bleiben hingegen auch im Empfänger breitbandig, haben aber im Verhältnis zu dem entspreizten Nutzsignal geringer Leistung, so dass eine Detektion des Nutzsignals prinzipiell möglich ist. DSS-Systeme weisen des Weiteren eine hohe Unempfindlichkeit gegenüber Mehrwegeausbreitung auf. Aufgrund der notwendigen Synchronisation zwischen der Codesequenz im Empfänger und Sender (Frequenz und Position) zur Entspreizung des Signals, werden um eine oder mehrere Chipperioden verspätet eintreffende Signale als nicht passende Signale detektiert und verworfen [Meel 99].

Der zweite Vertreter von bandspreizenden Verfahren basiert auf Frequenzsprüngen (*Frequency Hopping Spread Spectrum*³⁵). Bei diesem Verfahren wird die verfügbare Bandbreite auf viele Kanäle kleinerer Bandbreite und zugehörigen Schutzabständen aufgeteilt. Der DLC-Transceiver belegt für eine festgelegte Verweildauer (dwell time) einen schmalen Frequenzkanal und springt entsprechen einer Sprungsequenz dann zu einem anderen Kanal, so dass bei diesen Verfahren sowohl Zeit- als auch Frequenzmultiplexing eingesetzt wird. Beim Einsatz von mehreren DLC-Systemen muss jedoch darauf geachtet werden, dass durch unterschiedliche Wahl der Sprungsequenzen keine zeitliche Überlappung der Trägerfrequenzen entsteht, da dies zu Störungen führt.

³¹ Herstellernachweis: Design of Systems on Silicon (DS2); <http://www.ds2.es>

³² Herstellernachweis: Gesellschaft für Informatik, Automatisierung und Datenverarbeitung mbH, <http://www.iad-de.com>

³³ SS: **S**pread **S**pectrum

³⁴ DSSS: **D**irect **S**equen**S** **S**pread **S**pectrum

³⁵ FHSS: **F**requen**H**opping **S**pread **S**pectrum

Ähnlich wie bei DSS-Systemen (Codefolge) werden auch bei FHSS-Systemen Pseudozufallszahlenfolgen zur Erzeugung der Sprungsequenzen benutzt werden.

Im Gegensatz zu DSS muss bei FHSS nicht ein durchgängiges Frequenzspektrum belegt werden, so dass die Lage der einzelnen Sprungfrequenzen im zur Verfügung stehenden Frequenzband nahezu unabhängig gewählt wird. Dies ermöglicht das Ausblenden von Frequenzlagen mit möglichen schmalbandigen Störern aus dem Frequenzband.

Bewertungskriterien	OFDM	SS-Techniken	Single-Carrier
spektrale Effizienz	+	–	0
Unempfindlichkeit gegen Kanalverzerrung	++	–	0
Unempfindlichkeit gegen Impulsstörer	0	+	+
Adaptionsfähigkeit	++	0	+
EMV-Aspekt	+	++	–

Tabelle 5.4: Bewertungsübersicht von DLC-Modulationsverfahren, Quelle: [CCG 04]

Insgesamt zeigt sich, dass die *Kapazität* eines DLC-Systems von vielen Faktoren bestimmt wird, wobei jedoch die verfügbare Kanalbandbreite, das zu erwartende Stör- und Rauschscenario, die Signalleistung sowie die Unempfindlichkeit des Modulationsverfahrens die wesentlichen Einflussfaktoren darstellen. In Tabelle 5.4 sind die wichtigsten Kriterien für die zuvor beschriebenen Modulationsarten zusammengestellt und bewertet.

³⁵ Legende: ++: sehr gut, +: gut, 0: befriedigend, -: schlecht, --: sehr schlecht

6 Exemplarische Systemauswahl

Nach dem zuvor providerbasierte und nicht-providerbasierte Wege zur Kommunikation aufgezeigt und analysiert worden sind, ist die in Kapitel 3 entwickelte Vorgehensweise zur Systemscheidungsfindung anhand eines fiktiven Beispielszenarios und einer Gruppe von fünf zur Auswahl stehenden Kommunikationssystemen (GSM, MV-DLC, nicht-providerbasierte Funkssysteme) exemplarisch zu verifizieren (vgl. Abschnitt 3.4).

6.1 Festlegung des Beispielszenarios

Das hier zu betrachtende Beispielszenario ist ein Minigrid bestehend aus einem Mittelspannungsnetz und drei unterlagerten Niederspannungsverteilsnetzen (siehe Abbildung 6.1). Eine der Mittelspannungsebene zuzuordnende Managementzentrale soll, basierend auf den Eingangsdaten der lokalen Managementsysteme in den drei unterlagerten Teilnetzen, den Energieaustausch zwischen den verschiedenen Niederspannungsnetzen über das Mittelspannungsnetz optimieren und koordinieren (1/4-h-Energiefahrplan).

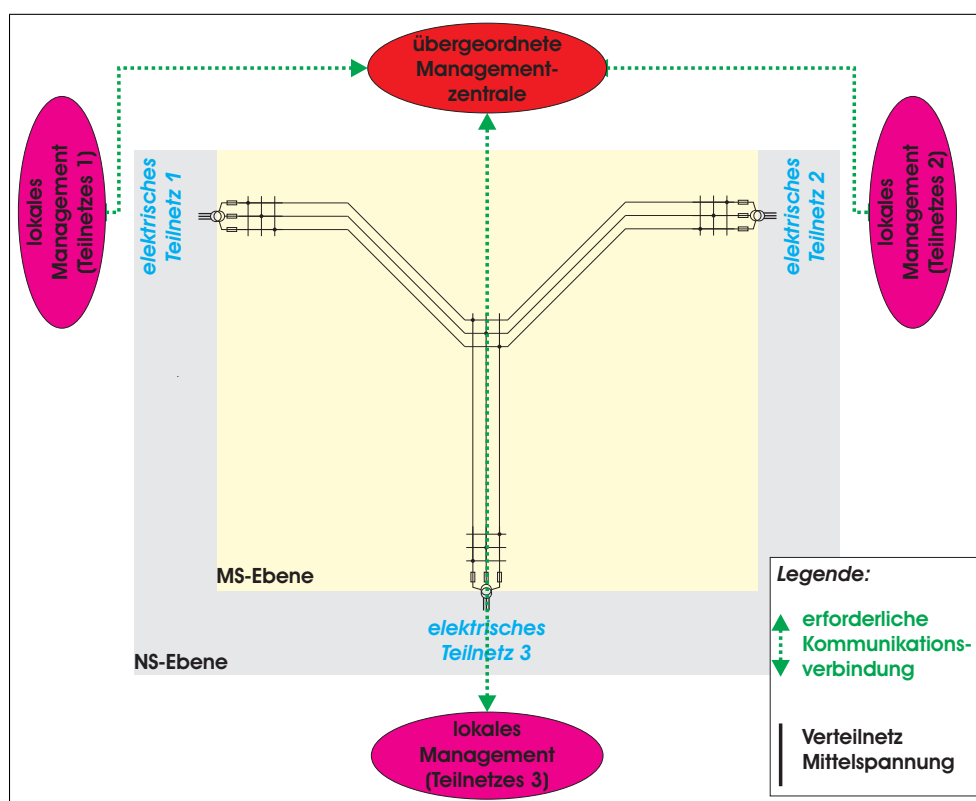


Abbildung 6.1: Struktur des Beispielszenarios (Versorgungs- und Kommunikationsnetz)

In diesem Zusammenhang soll die Notwendigkeit bestehen ein geeignetes Kommunikationssystem zu wählen, das je 1/4-h zwei Übertragungen von jeweils 48 kb Daten zwischen dem zentralen Managementsystem und den lokalen Managementsystemen erlaubt. Der Abstand zwischen der Managementzentrale und den lokalen Systemen soll hierbei ca. 5 km¹ betragen, so dass primär

¹ Dies gilt im Besonderen für die Sichtlinie zwischen der Zentrale und den Komponenten, vgl. Abschnitt 3.2.4.6 bzw. 3.2.4.1.

Kommunikationssysteme zur Fernbereichsanbindung verwendet werden müssen. Neben einer im ersten Schritt postulierten GSM-Netzabdeckung für die gesamte Ausdehnung des Minigrids, wird des Weiteren angenommen, dass sich die lokalen Managementsysteme in unmittelbarer Nähe zum Mittelspannungsnetz befinden.

Bei der Zusammenstellung der repräsentativen Gruppe von den zur Auswahl stehenden Kommunikationssystemen sollen sowohl providerbasierte bzw. nicht-providerbasierte Systeme als auch leitungsbasierte und funkbasierte Systeme berücksichtigt werden.

Für den Bereich der nicht-providerbasierten Funksysteme werden, in Anlehnung an Abschnitt 5.1.1.3, repräsentativ Kommunikationssysteme (Funkmodems) im 869 MHz bzw. 459 MHz-Band für das Beispielszenario in Betracht gezogen. Die für diese Kommunikationssysteme typischen technischen Parameter sind in Tabelle 6.1 aufgeführt. Zusätzlich zu den schon aus Abschnitt 5.1.1.3 bekannten Systemen, soll hier ein weiteres Funkkommunikationssystem im Frequenzbereich 448 MHz bewertet werden. Dieses System unterscheidet sich im Wesentlichen von Systemen des 459 MHz-Bereichs durch einen größeren Duty Cycle (Zeitschlitz von je 6 Sekunden pro Minute), einer geringeren Nutzdatenrate (9,6 kbps) und einem geringeren Kanalabstand (12,5 kHz).

Neben der Betrachtung dieser drei Funkkommunikationssysteme soll des Weiteren ein den Frequenzbereich der CENELEC-Bänder belegendes Mittelspannung-DLC-System als Vertreter der leitungsbasierten und nicht-providerbasierten Technologie (vgl. Abschnitt 5.2.2) in die Systemauswahl einbezogen werden.

Bewertungskriterium	GSM900	MS-DLC	869 MHz	459 MHz	448 MHz
Systemdienstleister	Netzbetreiber	Eigenregie	Eigenregie	Eigenregie	Eigenregie
Schnittstellendefinition	stand. Schnittstelle	stand. Schnittstelle	stand. Schnittstelle	stand. Schnittstelle	stand. Schnittstelle
Systemstandardisierung	stand. Kommunikationssystem	prop. Kommunikationssystem	prop. Kommunikationssystem	prop. Kommunikationssystem	prop. Kommunikationssystem
Marktdurchdringung	hoch	gering	mittel	mittel	mittel
Zuverlässigkeit	60000 h ²	92000 h ³	50000 h ⁴	50000 h	50000 h
Verfügbarkeit	≥ 99 % ⁵	≥ 99,75 % ⁶	≥ 99 %	≥ 99 % ⁷	≥ 99 %
Datenintegrität	≤ 10 ⁻⁵	≤ 10 ⁻⁹⁸	≤ 10 ⁻³	≤ 10 ⁻³	≤ 10 ⁻³

² typ. Anhaltswert, vgl. RASCOM-GSM-Modem MG100

³ typ. Anhaltswert, vgl. DLC-100 Box bzw. DLC-100 ComBoard

⁴ typ. Anhaltswert vgl. RASCOM Radio Modem MR900, Anhaltswerte werden auch für 459 bzw. 448 MHz übernommen

⁵ vgl. [DiaCon 04]

⁶ für Freileitung mit einer Ausfalldauer von 6 h pro Ausfall und einer Ausfallhäufigkeit von 0,09881 pro Jahr und Kilometer (siehe [IAEW 04])

⁷ Erfahrungswert aus Testbetrieb des Funksystems 459 MHz: Alte Schanze – ISET; wird auch für 869 und 448 MHz übernommen

⁸ Herstellerangaben für DLC-100

Nutzdaten- übertragungsrate	9,6 kbps	3,31 kbps ⁹	19,2 kbps	19,2 kbps	9,6 kbps
Effizienz	28,36 % ¹⁰	82,81 %	87,3 % ¹¹	87,3 %	87,3 %
Übertragungsdistanz	max. 35 km ¹²	≥ 10 km	5 km _≥	≥ 10 km	≥ 10 km
Teilnehmeranzahl	976 ¹³	1024 ¹⁴	200 ¹⁵	200 ¹⁶	200
Bandbreite	200 kHz	40 kHz	25 kHz	25 kHz ¹⁷	12,5 kHz ¹⁸
Duty Cycle	100 % ¹⁹	100 %	100 %	5 %	10 %
Frequenznutzung	zuteilungs- pflichtige Frequenzen	zuteilungs- pflichtige Frequen- zen ²⁰	frei zu- gängliche Frequen- zen	zuteilungs- pflichtige Frequen- zen	zuteilungs- pflichtige Frequen- zen
topogr. Abhängigkeit	LoS ²¹	kein LoS	LoS	LoS	LoS
klima. Abhängigkeit	gering	gering	mittel	mittel	mittel
Interaktionsrichtung	bidirek- tional	bidirek- tional	bidirek- tional	bidirek- tional	bidirek- tional
Betriebsart	unicast	multicast	multicast	multicast	multicast
Integration	geringer Aufwand	mittlerer Aufwand	hoher Aufwand	hoher Aufwand	hoher Aufwand
Instandhaltung	geringer Aufwand	mittlerer Aufwand	mittlerer Aufwand	mittlerer Aufwand	mittlerer Aufwand
Erweiterbarkeit	geringer Aufwand	mittlerer Aufwand	hoher Aufwand	hoher Aufwand	hoher Aufwand

Tabelle 6.1: Technische Parameter und Eigenschaften der Beispielsysteme

Unter Beachtung der in Kapitel 4 und 5 gewonnen Erkenntnisse und der postulierten Netzabdeckung wird für das Beispielszenario auch *GSM900* als ein Vertreter providerbasierter Kommunikationssysteme, in die Gruppe der zur Auswahl stehenden Systeme, aufgenommen.

⁹ DLC-100 mit NMS für: Frame-Länge 64 Byte, Abtastfrequenz 713 kHz, Guardintervall 5; Quelle: [iAd 01]

¹⁰ bei 33,85 kbps je Zeitschlitz (8 Stück je Trägerfrequenz, Summe 270,8 kbps)

¹¹ Herstellerangaben (SATEL): 11 kbps bei 12,5 kHz bzw. 22 kbps bei 25 kHz; Anhaltswerte werden auch für 459 MHz bzw. 448 MHz übernommen

¹² für GSM900

¹³ Annahme: 122 verwendete Kanäle·8 Zeitschlitz

¹⁴ 1 Master, 1024 Slaves

¹⁵ keine Begrenzung

¹⁶ Anhaltswert, Begrenzung im Wesentlichen durch Duty Cycle, entsprechendes gilt auch für 448 MHz

¹⁷ Kanalabstand

¹⁸ Kanalabstand

¹⁹ bezogen auf einen Zeitschlitz

²⁰ z. B. CENELEC A-Band

²¹ eingeschränkter LoS: Kontakt zu BTS erforderlich

In Hinblick auf die geringe Verfügbarkeit bzw. Verbreitung der *Generation 2+* (vgl. Abbildung 4.4 in Abschnitt 4.2.2) wird davon ausgegangen, dass der Netzbetreiber keine GPRS- bzw. HSCD-Funktionalitäten bzw. korrespondierende Dienste zur Verfügung stellen kann. Neben der daraus resultierenden geringeren Nutzdatenrate und der Limitierung auf die unicast Betriebsart (siehe Tabelle 6.1), beeinflusst diese Einschränkung maßgeblich die Wirtschaftlichkeit des Systems für den hier geforderten Einsatz.

6.2 Erwartungsnutzen der Beispielsysteme

In Analogie zu den in Kapitel 3 erläuterten Schritten können für die fünf Kommunikationssysteme die zugehörigen Erwartungsnutzen je System basierend auf den in Tabelle 6.1 angeführten Systemkenngrößen berechnet werden. Für das hier zu betrachtende Beispielszenario sollen sowohl die in Abschnitt 3.5 definierten Nutzenfunktionen (konservative, neutrale und progressive Nutzenfunktion) als auch die Gewichtungsfaktoren gemäß Abschnitt 3.6 gelten. Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen ergeben sich die in Tabelle 6.2 aufgeführten Werte der Erwartungsnutzen.

Erwartungsnutzen bei Verwendung der	GSM900	MS-DLC	869 MHz	459 MHz	448 MHz
konservativen Nutzenfunktion	87	92	83	82	83
neutralen Nutzenfunktion	82	81	68	68	68
progressiven Nutzenfunktion	77	70	54	55	55

Tabelle 6.2: Resultierender Erwartungsnutzen der zur Auswahl stehenden Systeme bei Verwendung unterschiedlicher Nutzenfunktionen

6.3 Ökonomische Bewertung der Beispielsysteme

Wie in Abschnitt 4.2.1 erläutert, erfolgt im Gegensatz zur volumenbasierten Vergütung des GPRS-Dienstes bei einem Circuit Switched Datentransfer die Abrechnung zeitbasiert. Das heißt, für die hier geforderte Applikation ist je Datenübermittlung eine zu vergütende Mindestdauer von fünf Sekunden anzusetzen, so dass je 1/4-h 30 Sekunden vom Netzbetreiber in Rechnung zu stellen sind (2 Kontakte je Kommunikationsteilnehmer · 3 Kommunikationsteilnehmer · 5 Sekunden Verbindungsdauer). Insgesamt summiert sich die zu vergütenden Zeit für den Informationsaustausch im Beispielszenario auf 292 h pro Jahr. Wird eine sekundliche Abrechnung mit einem Tarif von z. B. 0,0023 €²² pro Sekunde angesetzt, so betragen die jährlichen Verbindungskosten ca. 2417 €. Hierbei sind eventuell zu entrichtende monatlichen Bereitstellungskosten noch unberücksichtigt.

Allgemein soll für das Beispielszenario eine jährliche Pauschale von 10 % der Investitionsausgaben des zu betrachtenden Systems für dessen jährlichen Betriebskosten festgelegt werden (zu-

²² Tarif für die Nutzung des GSM-Mobilfunknetzes in Tansania; Cetel Business Services - closed user group: 3,33 TSH pro Sekunde mit 1TSH \cong 0,0006805 €, Stand 12. April 2006

sätzlich zu den Verbindungskosten). Diese Pauschale deckt neben den Instandhaltungs- und Wartungskosten auch die Ausgaben zur Deckung des erforderlichen Energiebedarfs. Des Weiteren setzen sich die Investitionskosten je System aus den Geräteinvestitionskosten des Systems (z. B. Modemkosten) und einem 15 %-igen Aufschlag für zusätzliche Geräteinfrastruktur (z. B. Kabel, Antennen, Adapter etc.) zusammen. Unterschreitet der 15 %-ige Zuschlag, aufgrund zu geringer Geräteinvestitionskosten, einen zuvor festgelegten Mindestbetrag (Sockelbetrag), so ist der Sockelbetrag zur Deckung eventueller Zusatzausgaben in der Berechnung zu berücksichtigen. In Bezug auf die im Beispielszenario zur Auswahl stehenden Kommunikationssysteme wird ein Sockelbetrag von 50 € je Kommunikationsteilnehmer angesetzt.

Für die Berechnung der jährlichen Gesamtkosten je System wird ein Kapitalzins von 5 % und eine Betriebskostenteuerung von 2 % pro Jahr angenommen. In Hinblick auf die schnelle Entwicklung im Bereich der ICT wird hier im Gegensatz zu den allgemein geltenden Abschreibungszeiträumen²³ ein Abschreibungszeitraum von fünf Jahren und ein vernachlässigbarer Restwert der Anlage nach Ablauf des Abschreibungszeitraumes unterstellt.

Wie in Abschnitt 3.8 erläutert, kann die Berechnung der für den Abschreibungszeitraum zu erwartenden jährlichen Gesamtausgaben pro System z. B. mittels des Softwareprogramms *CESLSIEVAL* erfolgen. Unter Beachtung der obigen Festlegungen und den in Tabelle 6.3 angeführten Systemkosten ergeben sich somit die in Tabelle 6.4 angegebenen jährlichen Gesamtausgaben, die bei der Systementscheidung zu berücksichtigen sind.

Parameter/Kosten ²⁴	GSM900	MS-DLC	869 MHz	459 MHz	448 MHz
Investitionskosten je Endgerät	90 € ²⁵	1700 € ²⁶	1000 € ²⁷	1397 € ²⁸	1397 € ²⁹
Summe der Geräteinvestitionen	360 €	6800 €	4000 €	5588 €	5988 € ³⁰
zusätzliche Geräteinfrastruktur (15 %)	150 €	1020 €	600 €	838 €	898 €
Summe der Investitionskosten	510 €	7820 €	4600 €	6426 €	6886 €
aktuelle jährliche Betriebskostenpauschale (10 %)	51 €	783 €	460 €	643 €	689 €
aktuelle jährliche Verbindungskosten	2417 €	-	-	-	-

Tabelle 6.3: Kostenübersicht der zur Auswahl stehenden Kommunikationssysteme

²³ Telekommunikationsanlagen allgemein: 10 Jahre, Mobilfunkgeräte: 5 Jahre gemäß Afa-Tabelle [BMF 03]

²⁴ alle Angaben exkl. Mehrwertsteuer

²⁵ typ. Anhaltswert 90 € pro GSM-Modem

²⁶ durchschnittlicher Preis für DLC-1000 System, April 2004

²⁷ Listenpreis für Satelline-3ASd, April 2006

²⁸ Listenpreis für Satelline-3ASd, April 2006

²⁹ Listenpreis für Satelline-3ASd exklusive Zeitschlitzeinheit, April 2006

³⁰ inklusive Zeitschlitzeinheit

Kosten	GSM900	MS-DLC	869 MHz	459 MHz	448 MHz
Gesamtkosten (Barwert)	11832 €	11412 €	6710 €	9376 €	10047 €
Kosten pro Jahr (Annuität)	2733 €	2636 €	1550 €	2166 €	2321 €

Tabelle 6.4: Gesamtkosten und jährliche Ausgaben der zur Auswahl stehende Systeme

6.4 4-Quadrantenmatrix für Beispielszenario

Basierend auf den zuvor ermittelten Erwartungsnutzen und der zu erwartenden jährlichen Gesamtkosten je Kommunikationssystem können nach Wahl eines Bezugssystems (vgl. Abschnitt 3.9) die relativen Erwartungsnutzenzuwächse bzw. die relativen Kostenzuwächse ermittelt werden.

Da für das hier zu betrachtenden Beispielszenario keine Referenzangaben verfügbar sind, werden die Bezugswerte durch eine Mittelwertbildung der Erwartungsnutzen bzw. der Kosten aller zur Auswahl stehenden Systeme ermittelt. Der Mittelwert des Erwartungsnutzen beträgt je nach Art der gewählten Nutzenfunktion 85 % (konservativ), 73,6 % (neutral) oder 62,1 % (progressiv), wohin gegen der Mittelwert der jährlichen Kosten (Annuität) für alle Nutzenfunktionen gleich ist und sich auf ca. 2270 € beläuft. Mit diesen Angaben können, wie in Abschnitt 3.10 erläutert, die erforderlichen Wertepaare (relativer Erwartungsnutzen und Kostenzuwachs) berechnet (siehe Tabelle 6.5) und in die zugehörige 4-Quadranten-Matrix eingezeichnet werden (vgl. Abbildung 6.2, 6.3 und 6.4).

relative Zuwächse	GSM900	MS-DLC	869 MHz	459 MHz	448 MHz
$E_{k,konserv.}^{relativ}$	2,2 %	7,93 %	-2,75 %	-3,79 %	-3,6 %
$E_{k,neutral}^{relativ}$	11,33 %	10,10 %	-7,42 %	-7,10 %	-6,91 %
$E_{k,progressiv}^{relativ}$	23,82 %	13,06 %	-13,81 %	-11,63 %	-11,44 %
$A_{k,konserv.; neutral; progressiv}^{relativ}$	18 %	16,1 %	-31,33 %	-4,61 %	2,2 %

Tabelle 6.5: Relativer Erwartungsnutzen- und Kostenzuwachs (Bezugssystem: Mittelwertbildung der Beispielsysteme)

Sowohl bei der konservativen als auch bei der neutralen Betrachtung (Nutzenfunktion) befinden sich die Wertepaare des GSM-, des DLC-, des 459 MHz- und des 448 MHz-Systems außerhalb des Bereichs I und II bzw. des vierten Quadranten, so dass in beiden Fällen für das Beispielszenario das nicht-providerbasierte Funkssystem im 869 MHz-Bereich zu wählen ist.

Bei der Verwendung der progressiven Nutzenfunktion nach Abschnitt 3.5, bei der der Nutzwert überproportional im Bereich hoher Notenwerte ansteigt, verlagert sich die Position des GSM-System in der Matrix. Das GSM-System ist nun dem Bereich II zuzuordnen, wohingegen das Wertepaar des 869 MHz-Funksystems weiterhin im Bereich I liegt (vgl. Abbildung 6.4).

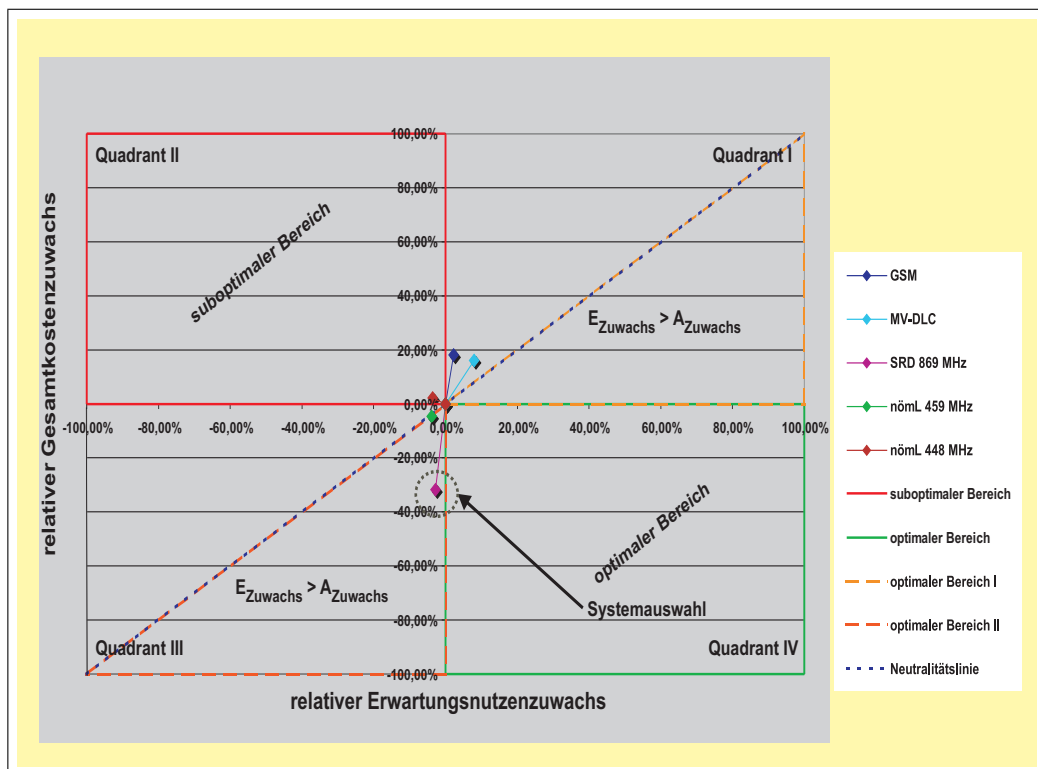


Abbildung 6.2: 4-Quadranten-Matrix für das Beispielszenario: konservative Nutzenfunktion

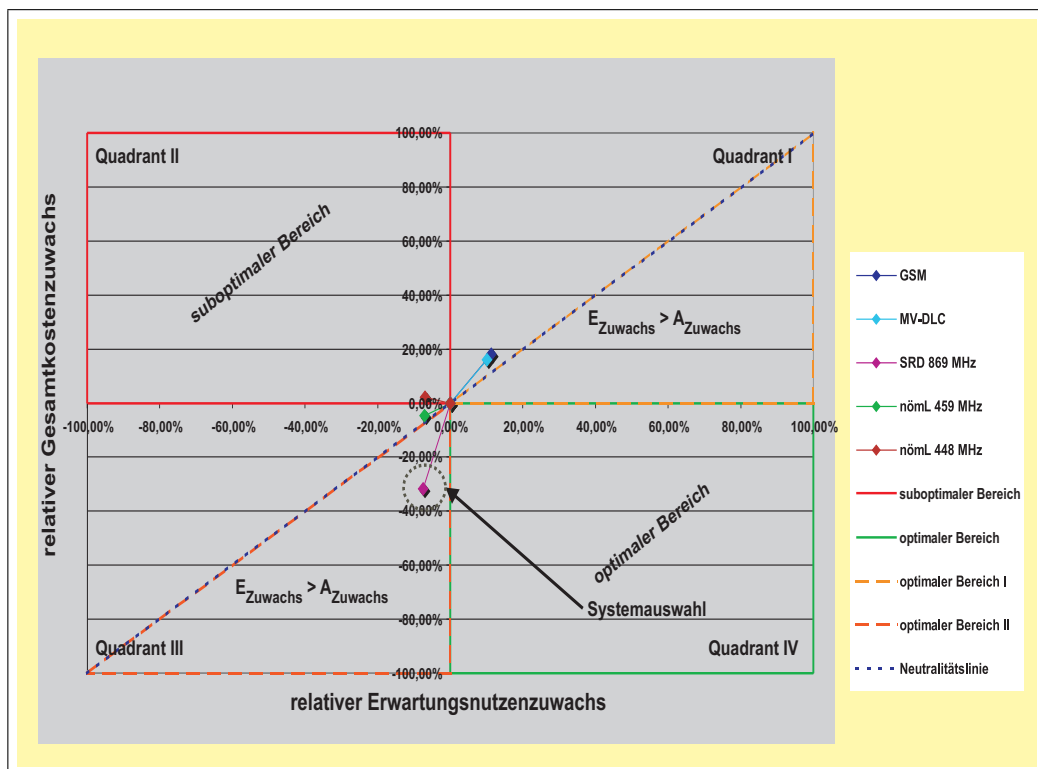


Abbildung 6.3: 4-Quadranten-Matrix für das Beispielszenario: neutrale Nutzenfunktion

Da keines der fünf Systeme Wertepaare im dritten Quadranten aufweist, sind nach Abschnitt 3.10

primär solche Systeme in die nähere Auswahl einzubeziehen, die sich innerhalb des Bereichs I befinden. Entsprechende Systeme weisen einen positiven Erwartungsnutzenzuwachs gegenüber Systemen des Bereichs II auf und sind somit aus technischer Sicht zu präferieren. Im Gegensatz zur vorherigen Wahl des Funksystems 869 MHz kann daher, bei Verwendung der progressiven Nutzenfunktion, GSM als geeignetes System für das Beispielszenario identifiziert werden (Abbildung 6.4).

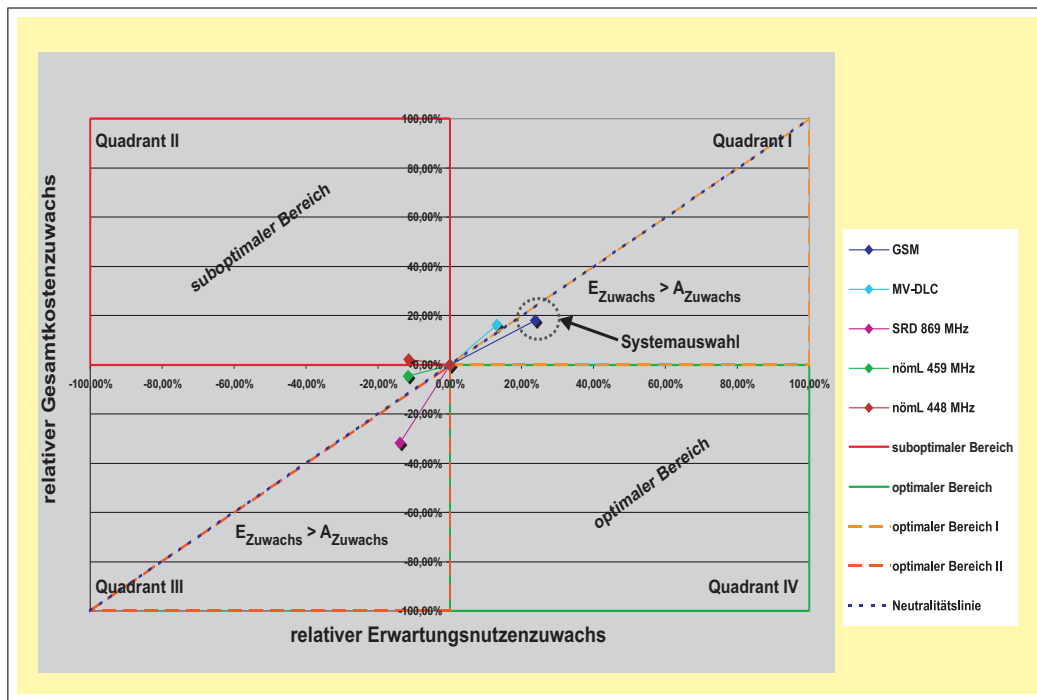


Abbildung 6.4: 4-Quadranten-Matrix für das Beispielszenario: progressive Nutzenfunktion

Die unterschiedlichen Entscheidungen, in Bezug auf das geeignete Kommunikationssystem für das gewählte Beispielszenario lassen erkennen, dass die Wahl des Kommunikationssystems im Wesentlichen durch das Entscheidungsverhalten (Nutzenfunktion) und die applikationsspezifischen Randbedingungen bestimmt wird. Ändert sich z. B. die zu überbrückenden Übertragungsdistanz im Beispielszenario auf acht Kilometer, verletzen die zuvor gewählten Kommunikationssysteme des 869 MHz-Bereichs aufgrund ihrer maximal erzielbaren Übertragungsdistanzen von fünf Kilometern, ein K. o.-Kriterium und dürfen bei der Systemauswahl nicht mehr berücksichtigt werden. Liegt des Weiteren, in Anlehnung an die in Abschnitt 4.2.2 gewonnenen Erkenntnisse, eine Nichtverfügbarkeit von öffentlichen Mobilfunksystemen am Applikationsort vor, stehen insgesamt nur noch drei Kommunikationssysteme für das entsprechende Beispielszenario zur Auswahl.

Erfolgt der zuvor durchgeführte Entscheidungsfindungsprozess nochmals nun für die reduzierte Auswahl, so entfällt sowohl bei der konservativen als auch bei der neutralen Betrachtung die Wahl auf das Funksystem im 459 MHz-Bereich (Bereich II der 4-Quadranten-Matrix), bzw. bei der progressiven Betrachtung auf das DLC-System (Bereich I der 4-Quadranten-Matrix).

Da nicht immer eine direkte LoS-Verbindung realisiert werden kann, ist bei Funksystemen mitunter die Verwendung von Repeatern unabdingbar. Wird in diesem Kontext für das Beispielszenario der Einsatz nur eines einzigen Funkrepeaters erforderlich, steigen zum einen die jährlichen Gesamtkosten (Annuität) der Funksysteme auf 2706 € für 459 MHz bzw. 2863 € für 448 MHz und zum anderen der Mittelwert auf 2735 € an. Bezüglich der Positionierung der Systeme in der

4-Quadranten-Matrix und der Systemauswahl bedeutet dies, dass für alle hier gewählten Nutzenfunktionen jeweils das DLC-System als einziges System im optimalen Bereich (Quadrant IV) liegt und daher als das geeignete System für das Beispielszenario zu wählen ist (vgl. Abbildung 6.5 und 6.6).

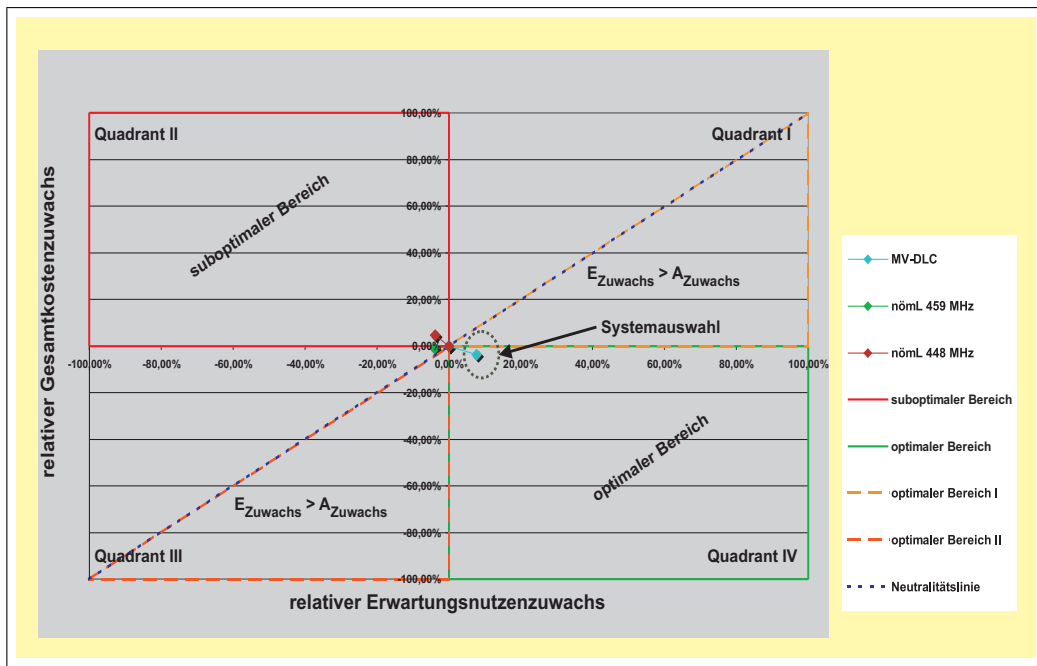


Abbildung 6.5: 4-Quadranten-Matrix für reduzierte Systemauswahl inkl. Repeater: konservative Nutzenfunktion

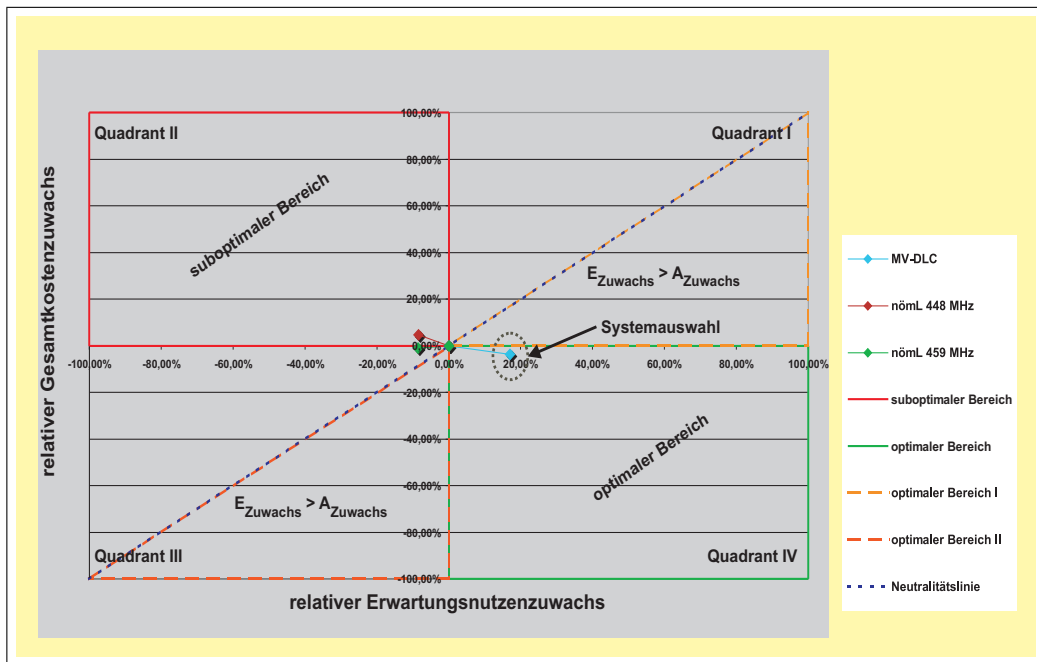


Abbildung 6.6: 4-Quadranten-Matrix für reduzierte Systemauswahl inkl. Repeater: progressive Nutzenfunktion

7 Anpassung eines Kommunikationssystems für den Einsatz in dezentralen Versorgungsstrukturen

Basierend auf der exemplarisch durchgeführten Systemauswahl in Kapitel 6, werden in diesem Kapitel die notwendigen Arbeitsschritte zur Realisierung eines schmalbandigen DLC-Systems, als eine Variante der non-providerbasierten Kommunikationstechnik für die Vernetzung dezentraler Versorgungsstrukturen im Fernbereich vorgestellt. Zu diesem Zweck wird der Einsatz eines MS-DLC-System, exemplarisch anhand eines Referenzsystems (DLC-1000) eingehender untersucht und analysiert.

Neben der technischen Integration in eine existierende Mittelspannungsnetzkonfiguration, den erforderlichen Untersuchungen zur Anpassung und Ermittlung der Kommunikationsparameter in Abhängigkeit der in Abschnitt 5.2.2 erläuterten Randbedingungen, werden die erforderlichen Entwicklungsschritte des bestehenden Systems hin zu einer TCP/IP-fähigen, Endpunkt-zu-Endpunkt-Kommunikation, als auch praktische Erfahrungen bei der Datenübertragung mit dem weiterentwickelten System präsentiert.

Die in diesem Kapitel beschriebenen Testaufbauten, Untersuchungsergebnisse und Analysen entstanden im Rahmen des Projekts *Vernetzung modularer Systeme* [ModIII 06].

7.1 Vernetzung dezentraler Strukturen mit DLC-Systemen

7.1.1 Auswahl und Implementierung des Referenzsystems

Die zuvor durchgeführten Analysen und Bewertungen von Kommunikationssystemen und Technologien für den effizienten Einsatz in dezentralen elektrischen Versorgungsstrukturen, basieren im Wesentlichen auf theoretischen Überlegungen und Betrachtungen. Für den Bereich der hier vorgestellten providerbasierten Kommunikationssysteme besteht zusätzlich ein breitgefächertes Spektrum von praxis relevanten Erfahrungen und Erkenntnissen aus anderen Applikationsbereichen (z.B. Großanlagenmonitoring, Netzleittechnik, Zählerfernauslesung etc.). Das heisst, es gibt eine Vielzahl von Applikationen, die das prinzipielle Nutzungspotenzial dieser Systeme für den Datenaustausch hinlänglich unter Beweis gestellt haben, so dass im Rahmen dieser Arbeit auf einen praktischen Nachweis der Funktionalität verzichtet werden kann.

Im Gegensatz dazu ist jedoch, stellvertretend für den Bereich der nicht-providerbasierten Kommunikationssysteme, das prinzipielle Nutzungspotenzial von Distribution Line Carrier für die effiziente Nah- und Weitbereichsanbindung in dezentralen Versorgungsstrukturen durch den Betrieb eines handelsüblichen Schmalband-DLC-Systems innerhalb einer geeigneten Testinfrastruktur praxisorientiert nachzuweisen. Als Testinfrastruktur wurde die, innerhalb des Projektes *Vernetzung modularer Systeme* zur Untersuchung verteilter elektrischer Versorgungssysteme entwickelte Nachbildung eines 3-strängigen 10-kV-Mittelspannungsverteilnetzes im *Design-Zentrum Modulare Versorgungstechnik* an der Universität Kassel gewählt. (Abbildung 7.1, vgl. [Schle 04]).

Da zum einen, in Bezug auf den Standort der Testinfrastruktur im *Design-Zentrum Modulare Versorgungstechnik*, ein Betrieb innerhalb der in Deutschland geltenden Richtlinien und Gesetze und zum anderen eine hohe Flexibilität des DLC-Systems für die Untersuchungen gewährleistet sein muss, wurde für die weiterführenden Untersuchungen das System *DLC-100* des Herstellers iAd¹ ausgewählt [Schle 06].

¹ Gesellschaft für Informatik, Automatisierung und Datenverarbeitung mbH; <http://www.iad-de.com>

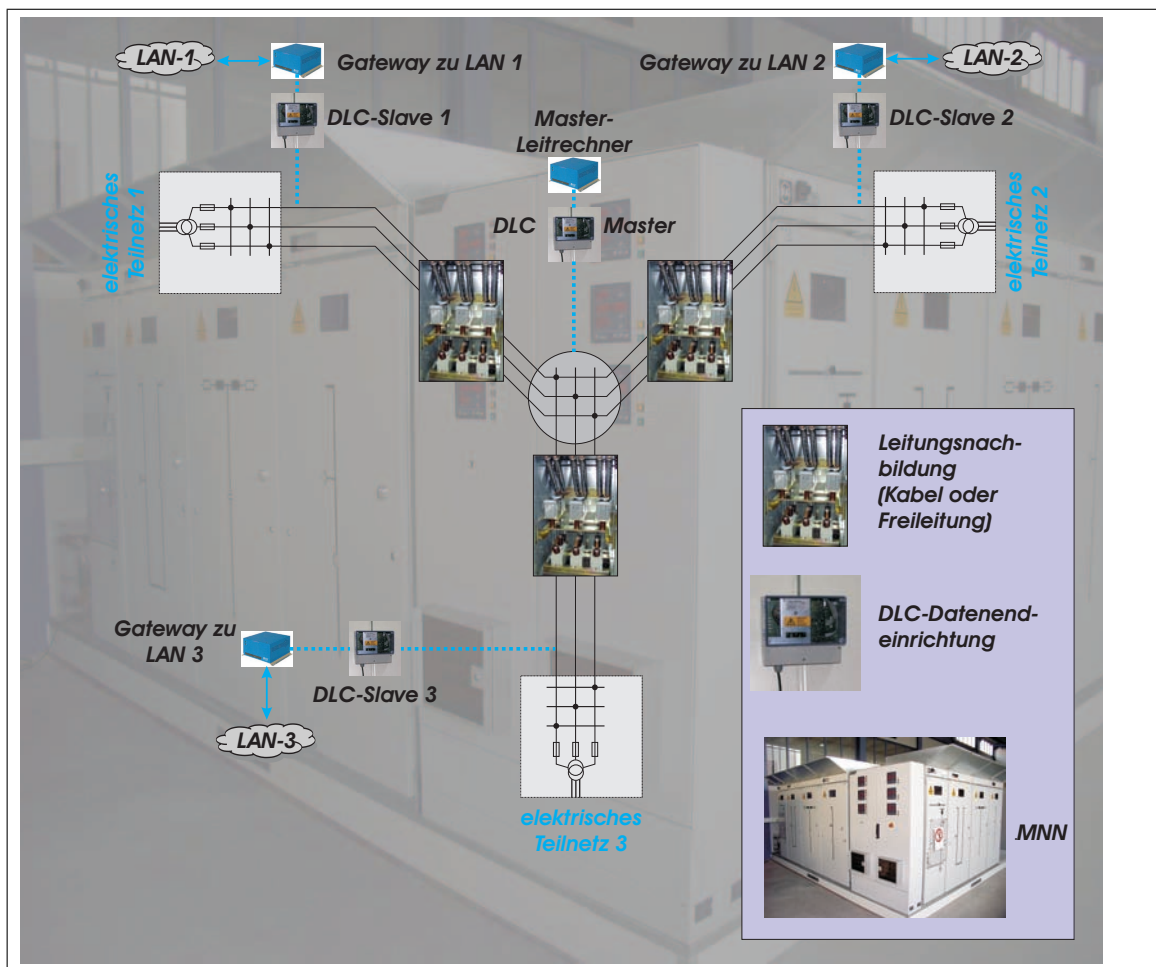


Abbildung 7.1: Strukturübersicht des Mittelspannungs- und Kommunikationsnetzes (Testinfrastruktur)

In Anlehnung an die *physikalische Netzstruktur* der Mittelspannungsnetznachbildung besteht das implementierte Kommunikationssystem aus einem dreisträngigen Strahlennetz, bei dem die jeweiligen Strahlenendpunkte mit Distribution Line Carrier Datenendeinrichtungen (Slave-Modem) verbunden sind [Schle 04-1]. Eine DLC-Mastereinheit (inklusive Steuerungsrechner und Netzwerkmanagement) übernimmt die Steuerung und Koordination des Datenverkehrs. Über spezielle Rechner-Gateways wird eine Anbindung der Slave-Modems an jeweils ein von drei unterlagerten, unabhängigen und lokal getrennten Kommunikationsnetzen (Ethernet) bereit gestellt.

Handelsübliche Schmalband-DLC-Systeme werden überwiegend zu Scada- bzw. Datenfernauslesezwecken verwendet, bei den von einer Zentrale aus die einzelnen Endstationen (Slave-Komponenten) gesteuert abgefragt und die entsprechenden Informationen und Daten zentral ausgewertet werden. Eine Kommunikation bzw. die Datenübertragung zwischen Slave-Komponenten wird nicht unterstützt, so dass eine direkte informationstechnische Vernetzung der den Slave-Komponenten unterlagerten elektrischen Versorgungsnetze z. B. für den Austausch von 15-minütlichen Energiefahrplänen, Statusinformationen etc. nicht möglich ist.

Neben dem prinzipiellen Nutzungsnachweis muss daher ein weiteres Ziel sein, das bestehende System der Art zu modifizieren und weiter zu entwickeln, so dass der Datenaustausch zwischen den einzelnen unterlagerten Netzen über die Verteilnetzebene (hier die Mittelspannungsebene) gewährleistet werden kann. Geschieht dies nicht, so ist das Nutzungspotenzial nur auf zentrale Abfrage- und Steuerungsaufgaben beschränkt. Es findet keine *Vernetzung* statt. Das heißt, dass

z. B. ein Energiemanagement und die zugehörige Energiedatenbank nur im Steuerungsrechner des Masters implementiert werden kann, da bei der aktuellen Kommunikationsstruktur nur explizit der Master Informationen von allen Slaves bzw. den unterlagerten Komponenten erhält. Eine Implementierung und Betrieb von, auf unterschiedlichen, dezentralen Steuerungsrechnern (z. B. Gatewayrechnern) verteilten Energiemanagementsystemen und Datenbanken ist nicht möglich, obwohl diese Struktur in Hinblick auf die Redundanz des Management des Gesamtsystems² wesentliche Vorteile gegenüber einem nur zentralen Energiemanagementsystem aufweist.

7.1.1.1 Analyse des Übertragungsmediums

Mittels der Mittelspannungsnetznachbildung kann das elektrische Übertragungsverhalten von Freileitungen und Energiekabeln unterschiedlicher Länge und Typs (Tabelle 7.1) bis ca. 200 Hz simuliert werden. Da DLC-Systeme jedoch, wie schon dargelegt, den Frequenzbereich von 9 kHz bis 30 MHz verwenden können, ist eine Vorabuntersuchung der Mittelspannungsnetznachbildung³ bzgl. des Übertragungsverhaltens notwendig, da dieser in diesem Frequenzbereich kein eindeutiges Abbild realer Leitungen darstellt. Zu diesem Zweck wurde das Frequenzverhalten der einzelnen Leitungsstrecken (Leitung 12⁴, Leitung 23⁵ und Leitung 24⁶) mittels der Einfügedämpfungsmessungen analysiert.

Parameter für Freileitungsnachbildung (Al-St 35/6)			
Länge [km]	R/2 [Ω]	L/2 [mH]	C [μ F]
1,6	0,67	0,92	n.a.
2,6	1,09	1,50	n.a.
5,0	2,09	2,88	n.a.
10,0	4,18	5,75	n.a.
20,0	8,35	11,50	n.a.
Parameter für Kabelnachbildung (Al 1X25)			
Länge [km]	R/2 [Ω]	L/2 [mH]	C [μ F]
1,6	0,96	0,63	0,325
2,6	1,56	1,00	0,525
5,0	3,00	1,95	1,050
10,0	6,00	3,90	2,100

Tabelle 7.1: Längenabhängige Parametrierungsdaten der MNN für Freileitung und Kabel

Messungen (Abbildung 7.2) an der Freileitungsnachbildung (Parametrierung: Al/ST-35/6) weisen, je nach Längenparametrierung, tiefe Dämpfungseinbrüche (bis zu -70 dB) im Bereich von 50 bis

² Beim Ausfall einer Datenbank können die anderen Datenbanken deren Aufgabe übernehmen bzw. den Ausfall kompensieren, da alle Datenbanken die identischen Informationen enthalten.

³ MNN: Mittelspannungsnetznachbildung

⁴ Zuleitung zu Teilnetz 1

⁵ Zuleitung zu Teilnetz 2

⁶ Zuleitung zu Teilnetz 3

200 kHz auf. Je länger die Leitung parametrierbar ist, desto kleiner sind die Frequenzwerte bei denen diese Einbrüche auftreten. Da die Nachbildung diskret aufgebaut ist, d.h. in modularer Bauweise, besteht das Gesamtsystem nicht nur aus den notwendigen *T-Elementen* (Widerstände, Spulen und Kondensatoren), sondern auch aus leitenden Verbindungselementen, Schienen, Zuleitungen etc. Diese Komponenten weisen zusätzlich zu den gewollten mechanischen auch elektrische Eigenschaften auf, so dass neben den *T-Elementen* auch parasitäre Induktivitäts-, Kapazitäts- und Widerstandsbeläge im System vorhanden sind. Die gemessenen *Dämpfungskegel* lassen daher auf parasitäre Resonanzeffekte innerhalb der Leitungsnachbildung schließen.

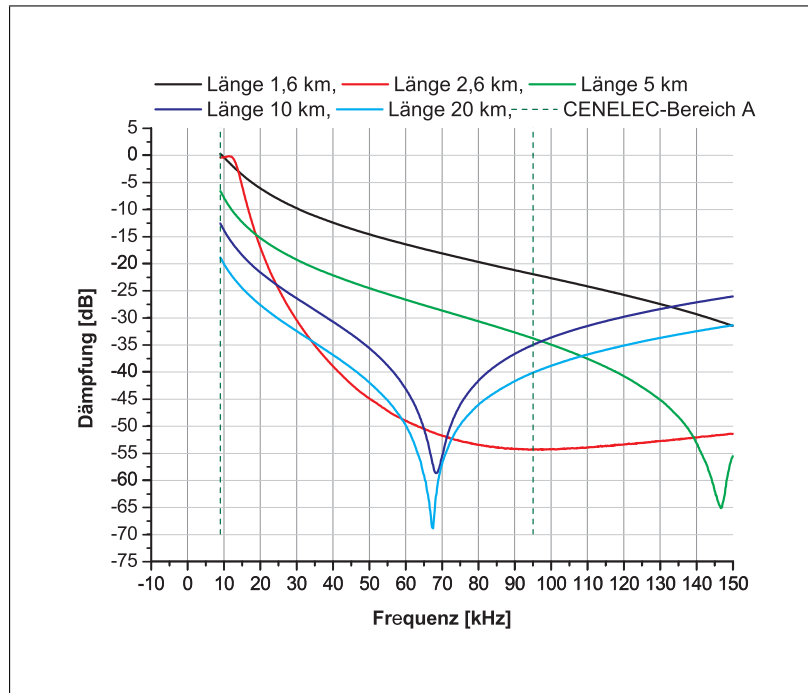


Abbildung 7.2: Dämpfungsverhalten der Freileitungsnachbildung (Al-St 35/6) für unterschiedliche Längenparametrierungen

Für die Nachbildung von Kabeln spielen die Koppelkapazitäten zwischen der Leitern bzw. zwischen den Leitern und dem Bezugspotential eine wesentlichere Rolle als bei Freileitungsnachbildungen. Für Kabelnachbildungen werden daher diskrete Mittelspannungskondensatoren je Strang mittig zwischen dem Leitungszweig (Induktivität und Widerstand) und dem Referenzpotential geschaltet. Der kapazitive Blindwiderstand der Kondensatoren sinkt mit steigender Frequenz, so dass für hohe Frequenzen die eingesetzten Kondensatoren wie diskrete Leitungsstücke wirken, die den Leitungszweig auf das Bezugspotential ziehen. Hochfrequente Signale werden stark gedämpft. Der zu $\frac{1}{f}$ proportionale Verlauf der Einfügedämpfung in Abbildung 7.3 (logarithmische Darstellung) spiegelt diesen Effekt wieder.

Der für ein Mittelspannungskabel zu erwartende Dämpfungsverlauf ist wesentlich geringer⁷ als die hier gemessenen Werte. Aufgrund der schon im unteren Frequenzbereich auftretenden hohen Dämpfungswerten (bis zu 50 dB), stellen die Leitungsnachbildungen der MNN bzgl. der Übertragung von hochfrequenten Signalen und der Nutzung von DLC eher ein *Worst-Case-System* dar.

Wie in Abschnitt 5.2.2.2 dargelegt, stellt das Dämpfungsverhalten der elektrischen Versorgungsleitung für eine fehlerfreie Informationsübertragung an sich kein Hindernis dar. Wesentliches Han-

⁷ Theoretisch ergeben für ein Kabel des Typs 1-35 RM 16 mit PVC-Isolierung: 0,4 dB/km (10 kHz); 1,36 dB/km (100 kHz); 1,7 dB (150 kHz).

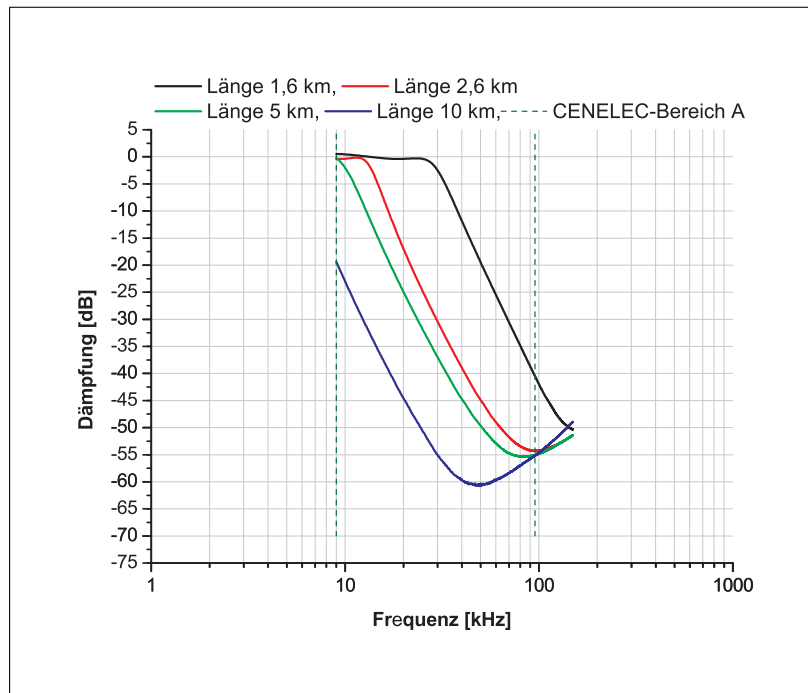


Abbildung 7.3: Dämpfungsverhalten der Kabelnachbildung (AI-1x25) für unterschiedliche Längenparametrierungen

dicap für eine fehlerfreie Übertragung sind die auf den Übertragungskanal eingekoppelten Störsignale. Nach [Dostert 00] ist der Pegel des Grundrauschens sowohl von der Spannungsebene als auch von den örtlichen Gegebenheiten abhängig. In der Mittelspannungsebene ist die Anzahl von Rauschstörern geringer als die in der Niederspannungsebene, so dass das Grundrauschen in der Mittelspannungsebene als geringer zu erachten ist. In diesem Kontext ist jedoch das frequenzabhängige Übertragungsverhalten der implementierten Mittel- bzw. Niederspannungstransformatoren mit zu berücksichtigen. Messungen an Giesharztransformatoren⁸ der Mittelspannungsnachbildung zeigen (Abbildung 7.4, roter Verlauf), dass bis in einen Bereich von 60 kHz, niederspannungsseitig eingekoppelte Signale auf der Mittelspannungsebene in der Größenordnung des Übersetzungsverhältnisses verstärkt werden. Oberhalb von 60 kHz wirken sich die parasitären Koppelkapazitäten zwischen den einzelnen Transformatorwindungen bzw. zwischen den Hauptinduktivitäten aus, so dass keine Verstärkung mehr auftritt. Aufgrund des Übersetzungsverhältnisses von 10:0,4 können die Einflüsse der mittelspannungsseitig erzeugten Hochfrequenzsignale auf die Niederspannungsseite vernachlässigt werden.

Wie in Kapitel 5.2.2.2 dargelegt, ist das zu erwartende Stör- und Rauschzenario ein wesentlicher Einflussfaktor auf die *Kapazität* eines DLC-Systems. Im Vorfeld einer Festlegung der zu belegenden Bandbreite und Trägerfrequenz ist daher der Signal zu Stör- bzw. Rauschabstand des Übertragungssystems unter Berücksichtigung der angeschlossenen (mittelspannungs- und niederspannungsseitig) Erzeuger- und Verbrauchersystemen zu analysieren. Je nach angeschlossenen Verbraucher bzw. Erzeuger sind unterschiedliche SNR -Verläufe zu erwarten. Mit wachsender Integration von wechselrichterdominierten dezentralen Energieerzeugungsanlagen (PV-Anlagen, drehzahlvariable Bio-Dieselaggregate, Windturbinen etc.) in das elektrische Netz ist eine Zunahme von Schmalband- und Impulsstörungen zu erwarten, die eine DLC-Kommunikation beeinträchtigen können. In diesem Kontext wird daher das Übertragungsverhalten des DLC-Systems bei unterschiedlichen niederspannungsseitig angeschlossenen Erzeugerkonfigurationen untersucht. In

⁸ Pauwels Gießharztransformator: Dyn5; 100 kVA; 10/0, 4 kV

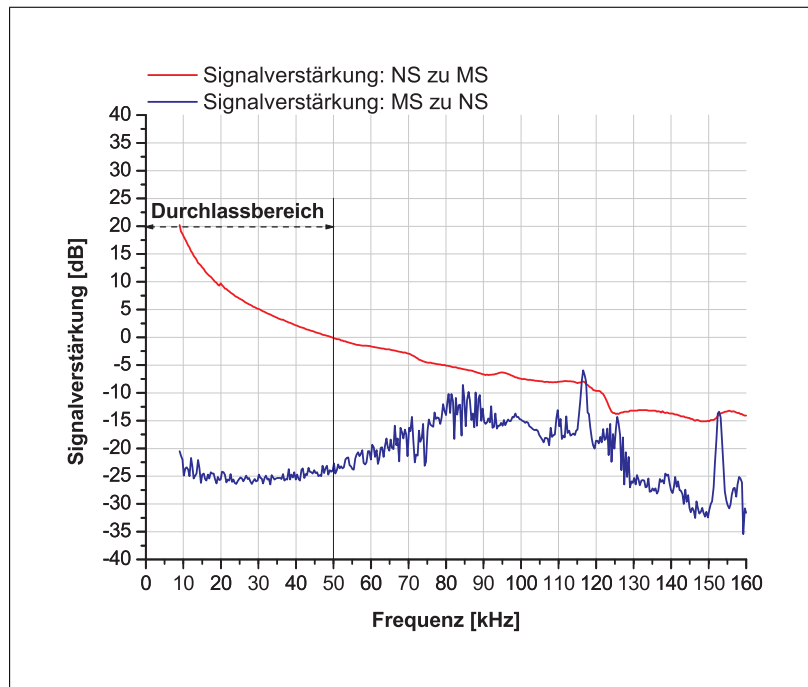


Abbildung 7.4: Messung der Signalverstärkung in NS- und MS-Richtung

Kombination mit den eingesetzten iAd DLC-Komponenten und dem verfügbaren Testwerkzeug *DLC-100 Configuration and Test* kann der Signal zu Rauschabstand bei unterschiedlichen Netzzuständen messtechnisch erfasst werden. Zu diesem Zweck wird das gesamte Frequenzspektrum von einer DLC-Dateneneinrichtung (Empfänger-Slave) zunächst gescannt, um die Höhe des Rauschsignals im Versorgungsnetz zu ermitteln. In einem zweiten Schritt wird der DLC-Master (Sender) in einen Testmodus gesetzt, so dass dieser nun kontinuierlich auf verschiedenen Frequenzen Testsignale in das Netz sendet. Die angeschlossene DLC-Dateneneinrichtung detektiert diese Signale. Durch Überlagerung beider Messkurven kann dann das Signal-zu-Rauschverhältnis für diesen Betriebspunkt ermittelt werden. Aufgrund unterschiedlicher Ausbreitungsrichtungen, richtungsabhängiger Reflexionsstellen etc. empfiehlt es sich diese Messung auch in umgekehrter Richtung durchzuführen, d.h. die DLC-Dateneneinrichtung sendet Testsignale und der DLC-Master detektiert diese.

Abbildung 7.5 visualisiert ein SNR-Messergebnis bei Kopplung des öffentlichen Niederspannungsnetzes (elektrisches Teilnetz 1) an den Mittelspannungsleitungsabschnitt L12 der MNN. Entsprechende Send- und Empfangsrichtungen werden durch die Indizes *L12* bzw. *L21* markiert, wobei bei *L12* der DLC-Master sendet und die Dateneneinrichtung am Ende des Leitungsabschnittes *L12* empfängt. Mit dem Index *L21* wird der korrespondierende *Rückkanal* bezeichnet (DLC-Master als Empfänger und die DLC-Dateneneinrichtung als Sender).

Wie schon erläutert ist im unteren Frequenzbereich ein geringeres SNR aufgrund der Koppel-eigenschaft der verwendeten Transformatoren zu erkennen. Die Messung zeigt, dass ab ca. 50 kHz der *Störeinfluss* des öffentlichen Versorgungsnetzes abklingt und der SNR wesentlich durch das *Eigenrauschen* auf der Mittelspannungsebene bestimmt wird.

Bei Untersuchungen mit zusätzlich in die Niederspannungsseite der MNN einspeisenden Photovoltaikanlagen (PV-Wechselrichter) ergaben sich sehr geringe SNR (Abbildung 7.6) im Bereich der Wechselrichterschaltfrequenzen und deren Vielfachen. Bei der Trägerfrequenzwahl sollten daher Frequenzbereiche gemieden werden, die im Bereich der Schaltfrequenz von PV-Wechselrichtern liegen. Datenübertragungstests (10 kHz Bandbreite, Trägerfrequenz 54 kHz) im

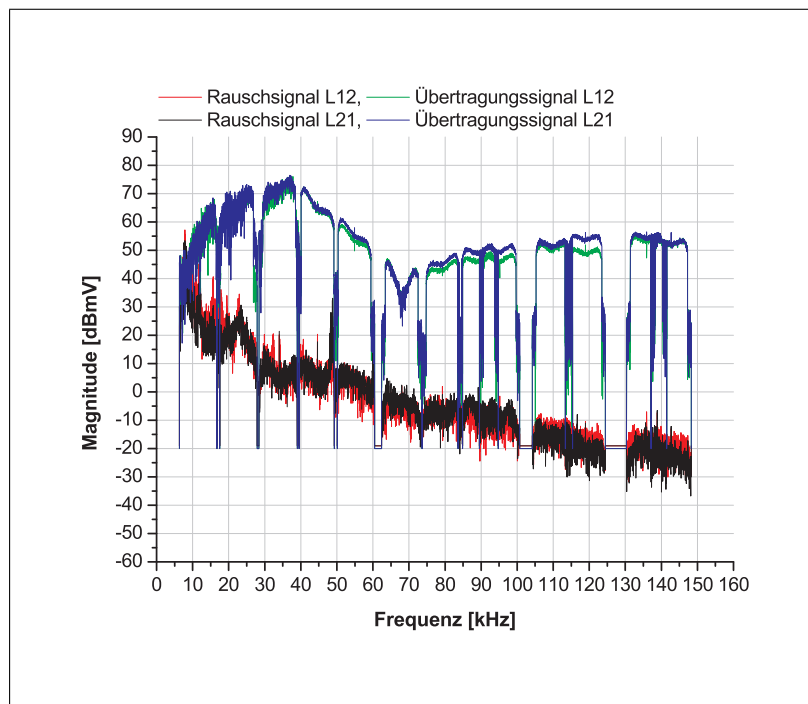


Abbildung 7.5: Messung des SNR bei Anschluss an das öffentliche NS-Netz; Messeinrichtung: DLC-100 Configuration & Test

Bereich der dritten Ordnung der Wechselrichterschaltfrequenz ergaben, dass nur ca. 11 % der gesendeten Testpakete nach der Übertragung die richtige Checksumme aufwiesen.

Bei einer Testnetzkombination, bestehend aus einer speisenden Windkraftanlage (Asynchrongenerator, 15 kVA), einer Netzlast von 10 kVA und einem netzbildenden Versuchsbatteriestromrichter, ergibt sich der in Abbildung 7.7 dargestellte Verlauf. Die aus dem relativ hohen Rauschniveau herausragenden nadelförmigen Impulse spiegeln, wie bei den PV-Wechselrichtern, die n -fachen Schaltfrequenzen wieder. Das auch im Bereich von 60 kHz bis 100 kHz hohe Rauschniveau ist dem Einfluss der Windkraftanlage zuzuordnen. Bei Auswahl des Bereiches 60 bis 70 kHz als Übertragungsband, führt das geringe SNR zu einer verminderten Übertragungsqualität. Nur ca. 4 % Prozent der gesendeten Testtelegramme in diesem Frequenzabschnitt wiesen eine richtige Checksumme auf.

Da es sich bei den durchgeführten Tests nur um Beispieluntersuchungen (Tastversuche) mit ausgewählten Erzeugersystemen handelt und der DLC-Kanal ein zeitvariantes Verhalten aufweist, ist es nicht möglich, allgemein gültige Aussagen bzgl. des geeigneten Frequenzbereiches für Versorgungsstrukturen abzuleiten. Diesbezügliche Aussagen müssen immer in Relation zu den angeschlossenen Netzkomponenten stehen, so dass für das System MNN mit den möglichen Erzeugerschlusskonfigurationen (Wind, PV etc.) der Frequenzbereich 30–148 kHz prinzipiell für eine DLC-Kommunikation geeignet scheint.

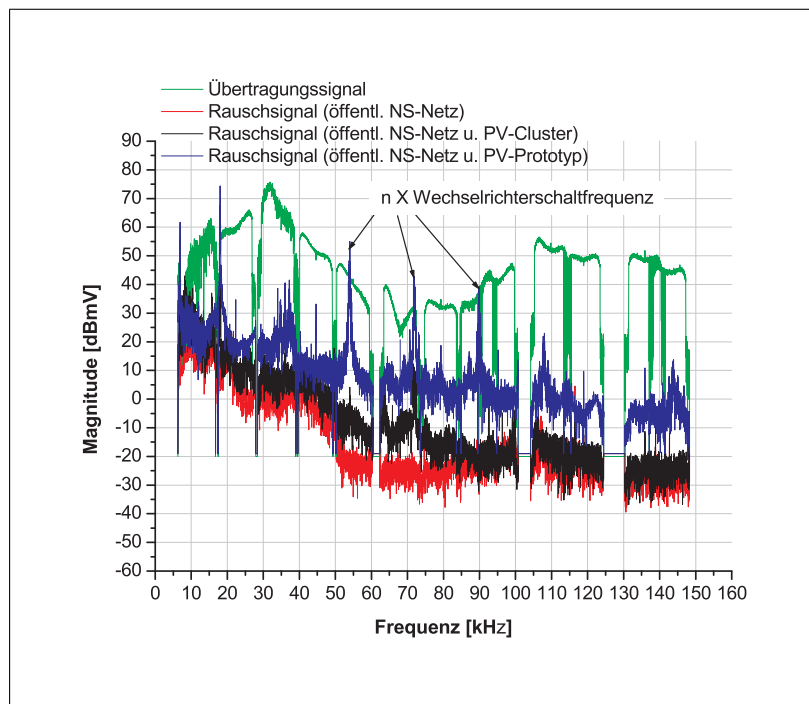


Abbildung 7.6: Messung des SNR bei Anschluss an das öffentliche NS-Netz und PV-Wechselrichtern; Messeinrichtung: DLC-100 Configuration & Test

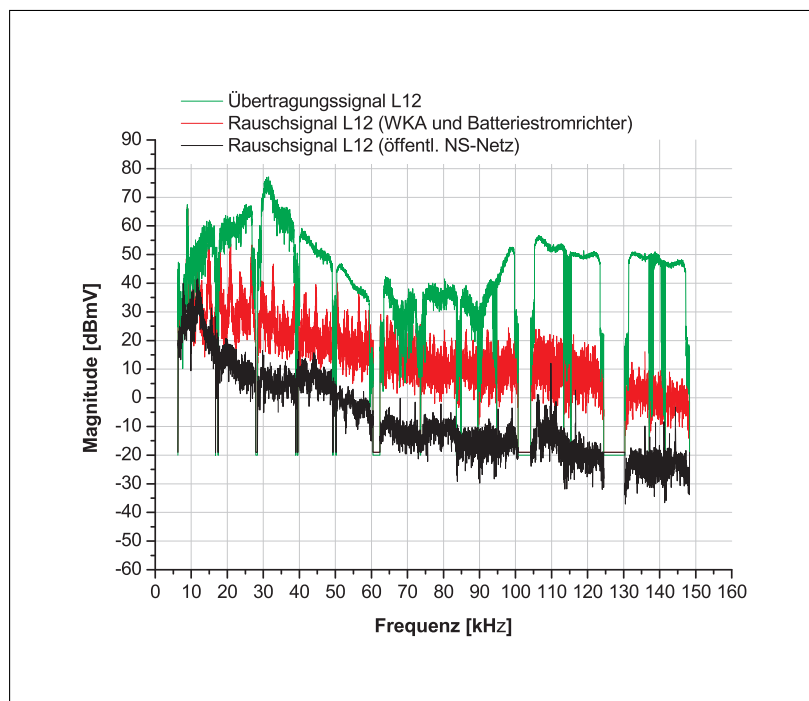


Abbildung 7.7: Messung des SNR bei Anschluss von Klein-WKA und Batteriestromrichter; Messeinrichtung: DLC-100 Configuration & Test

7.1.2 Modifikation der DLC-Kommunikationsstruktur

Aktuell zu erwerbende Schmalband-DLC-Systeme werden überwiegend zu Scada- bzw. Datenfernauslese Zwecken verwendet, bei den von einer Zentrale aus die einzelnen Endstationen (Slave-Komponenten) gesteuert abgefragt und die entsprechenden Informationen und Daten zentral ausgewertet werden.

Eine Kommunikation bzw. die Datenübertragung zwischen den DLC-Endpunkten (Slave-Komponenten) wird primär nicht unterstützt, so dass eine direkte informationstechnische Vernetzung der den Slave-Komponenten unterlagerten elektrischen Versorgungsnetze (siehe Abbildung 7.1; z. B. kleine Niederspannungsortnetze) ohne Systemeingriffe nicht möglich ist [Sauter 05].

Um jedoch eine Kommunikation zwischen den Slave-Komponenten zu realisieren, wurde für das vorhandene DLC-System eine neue Kommunikationsstruktur entwickelt und im *Master-Leitrechner* (Steuerrechner) als auch in den Rechnergateways implementiert. Mittels der neuen Kommunikationsstruktur muss es möglich sein, Daten von einer Slave-Komponente (oder dem unterlagerten Teilnetz) zu einer anderen Komponente über den Master hinweg zu transportieren.

Neben des *reinen* Datenaustauschs, ist eine einfache Anbindung bzw. Ankopplung des DLC-Endpunkte an die Infrastruktur der unterlagerte Kommunikationsnetze erforderlich. In Hinblick auf

OSI	TCP/IP	TCP/IP-Protokolle						
Anwendung	Anwendung	<i>Telnet</i>	<i>FTP</i>	SMTP	DNS	SNMP	NFS	
Darstellung							XDR	
Komm.-Steuer.							RPC	
Transport	Transport	<i>TCP/IP</i>				UDP		
Vermittlung	Internet	<i>IP</i>		ICMP		ARP	RARP	
Sicherung	Netzzugang	Ethernet	Token	FDDI	X.25	ATM	<i>SLIP</i>	PPP
Bitübertragung								

Tabelle 7.2: TCP/IP-Referenzmodell

die weltweite Akzeptanz von TCP/IP im ICT-Sektor, als auch die hohe Marktdurchdringung kostengünstiger TCP/IP-kompatibler Komponenten, ist es daher sinnvoll, DLC-Systeme für die Übertragung von TCP/IP-Protokollen zu ertüchtigen und eine einfache *Plug-and-Play* Anbindung an TCP/IP-Netze (z. B. Kommunikationsnetze, in den unterlagerten elektrischen Versorgungsstrukturen) zu realisieren.

Das existierende System ist in der Art zu modifizieren, dass verschiedenste auf TCP/IP aufsetzende Anwendungen (siehe Tabelle 7.2) in leicht modifizierter Form direkt das Medium *DLC* bzw. das DLC-System zur Übertragung nutzen können.

7.1.2.1 Modifikation für den Informationsaustausch zwischen DLC-Endpunkten

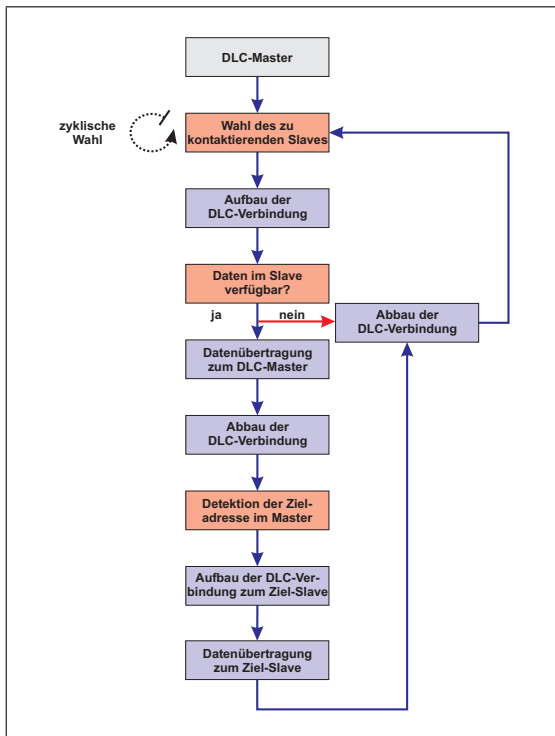


Abbildung 7.8: Informationsaustausch zwischen DLC-Endpunkten

Wie einleitend erwähnt, muss für einen Informationsaustausch zwischen den DLC-Endpunkten die existierende Kommunikationsstruktur geändert werden. Abbildung 7.8 visualisiert die neu entworfenen und softwaretechnisch im DLC-Master- und in den Gateway-Rechnern implementierte Kommunikationsstruktur.

Ausgehend vom DLC-Master wird eine DLC-Verbindung zu einem der DLC-Endgeräte (Slave-Einheit) aufgebaut. Der Master fragt anschließend über das DLC-Endgerät den Gateway-Rechner (vgl. Abbildung 7.1 in Abschnitt 7.1) nach dem ältesten vorliegenden Datensatz ab, der aus dem unterlagerten Netz in andere Netze zu übermitteln ist. Nach Erhalt des Datensatzes trennt der Master die Verbindung. Basierend auf die im Datensatz enthaltene und identifizierte Zieladresse baut der DLC-Master eine Verbindung zum Zielnetz bzw. entsprechenden Ziel-DLC-Endgerät auf. In einem weiteren Schritt überträgt der Master den zuvor erhaltenen Datensatz, schließt die existierende Verbindung und kontaktiert gemäß des Ablaufplanes (siehe Abbildung 7.8) den nächst folgenden DLC-Endpunkt (Slave). Sind bei einem Gateway-Rechner keine Datenpakete zur Übertragung vorhanden, wird dies dem Master durch die Übertragung eines Acknowledge-Byte mitgeteilt. Der Master kontaktiert darauf hin den nächst folgenden Slave.

7.1.2.2 Strukturanpassung für eine TCP/IP-Übertragung

Durch die zuvor neu entwickelte Kommunikationsstruktur (vgl. Abbildung 7.8) ist nun prinzipiell ein Datenaustausch zwischen den DLC-Endpunkten möglich, wohingegen der Informationsaustausch mit bzw. zwischen den unterlagerten Informationsnetzen (LAN 1 – LAN 2) noch nicht unterstützt wird. Zu diesem Zweck sind weitere Modifikationen erforderlich wie z. B.

- die Anbindung an die unterlagerten Kommunikationsnetze,
- die Detektion von Daten mit Adressaten in anderen Kommunikationsnetzen,
- die Transformation der entsprechen Daten in DLC-übertragungsfähige Formate,
- die Bereitstellung der Daten für eine DLC-Masterabfrage,

deren Umsetzung im Folgenden detailliert erläutert werden.

7.1.2.2.1 Anbindung unterlagerter Subnetze (Routing) In Hinblick auf die zusätzlichen Anforderungen müssen die Gateway-Rechner an den DLC-Endpunkten nicht nur die Kommunikationsstruktur wie in Abschnitt 7.1.2.1 beschrieben unterstützen, sondern darüber hinaus so angepasst werden, dass eine Geschwindigkeits-, Protokoll- und eine Signalumsetzung erfolgt.

Jeder Gateway-Rechner muss jeden Versuch eines Verbindungsaufbaus zu einer IP-Adresse außerhalb des eigenen lokalen Netzes erkennen, des Weiteren wissen zu welchem anderen Teilnetz (LAN 1, LAN 2 etc.) die betreffende Adresse gehört und die Daten dem DLC-Master in geeigneter Form übergeben, der diese dann an den entsprechenden DLC-Slave weiterleitet. Von dort muss die Anfrage über das angeschlossene Gateway in das lokale Netz und den eigentlichen Adressaten weitergeleitet werden. Eine Antwort (z. B. eine weitere Anforderung) an den zuvor anfordernden Rechner muss nach dem gleichen Prinzip übertragen werden.

Mit der Realisierung dieser Funktionalitäten in Kombination mit der zuvor neu implementierten Kommunikationsstruktur, wäre somit eine transparente TCP/IP-Verbindung, über das DLC-System, zwischen den Kommunikationsnetzen prinzipiell möglich.

Für das betrachtete Gesamtnetz (Abbildung 7.1) wurden zur eindeutigen Unterscheidung der unterlagerten Kommunikationsnetze und zur Verdeutlichung der räumlichen Trennung bzw. Distanz der einzelnen Netze jeweils unterschiedliche IP-Adressbereiche festgelegt⁹:

- lokales Kommunikationsnetz LAN 1: 172.16.1.Y
- lokales Kommunikationsnetz LAN 2: 172.16.2.Y
- lokales Kommunikationsnetz LAN 3: 172.16.3.Y

Bedingt durch eine klare Trennung der Adressbereiche der einzelnen Netze, ist eine Detektion von Datenpaketen, die für Adressaten in anderen Netzen bestimmt sind sehr einfach und kann durch entsprechende Gatewayeinträge bewerkstelligt werden. Je nach Zielnetzwerk werden für die verschiedenen Kommunikationsnetze (LAN 1, LAN 2 und LAN 3) jeweils zwei unterschiedliche Netzwerkschnittstellen als Gateway zu den anderen Netzen definiert (siehe Tabelle 7.3).

Erfolgt z. B. eine Anfrage der Netzwerkschnittstelle 172.16.1.4 aus dem LAN 1 an den Teilnehmer 172.16.3.10 im LAN 3, so wird korrespondierend zum Eintrag das entsprechende Datenpaket an die Netzwerkschnittstelle mit der Adresse 172.17.1.3 weitergeleitet¹⁰.

Neben der Einteilung der Kommunikationsnetze in 172.16.-Adressbereiche wird hier ein weiterer Adressbereich, speziell nur für die Gateway-Netzwerkschnittstellen definiert. Diese Abgrenzung geschieht im Wesentlichen zur Verdeutlichung, dass es sich bei diesen Schnittstellen, im Gegensatz zu den Schnittstellen des 172.16.-Bereiches, nicht um reale Hardware-Netzwerkschnittstellen handelt (z. B. eth0), sondern um zusätzliche Netzwerkschnittstellen (z. B. sl0, sl1) innerhalb der Gateway-Rechner.

Durch die geeignete Wahl von Punkt-zu-Punkt-Verbindungen zwischen den verschiedenen Gateway-Schnittstellen (172.17.X.Y) kann der Informationsaustausch zwischen den Netzen bestimmten *Routingwegen* direkt logisch zugeordnet werden (Tabelle 7.4).

Für das LAN 1 besteht z. B. eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung zwischen der Gateway-Schnittstelle 172.17.1.3 und der korrespondierenden Gateway-Schnittstelle 172.17.3.1 im LAN 3¹¹. Im Fall der zuvor schon beschriebenen Anfrage von 172.16.1.4 an 172.16.3.10, würde diese zuerst an

⁹ Y: Laufvariable von 1 bis 255

¹⁰ Einrichtung einer Route unter Linux mit: `/sbin/route add -net 172.16.2.0 netmask 255.25.255.0 gw 172.17.1.2`

¹¹ `/sbin/ifconfig sl0 172.17.1.3 pointopoint 172.17.3.1`

lokales Netzwerk	Zuordnung	IP-Adresse
LAN 1	<i>Gateway zu LAN 2</i>	172.17.1.2
	<i>Gateway zu LAN 3</i>	172.17.1.3
LAN 2	<i>Gateway zu LAN 1</i>	172.17.2.1
	<i>Gateway zu LAN 3</i>	172.17.2.3
LAN 3	<i>Gateway zu LAN 1</i>	172.17.3.1
	<i>Gateway zu LAN 2</i>	172.17.3.2

Tabelle 7.3: Zuordnung der Gateway-Adressen

von Gateway-Schnittstelle	Verbindung	nach Gateway-Schnittstelle
172.17.1.2	<i>Punkt-zu-Punkt</i>	172.17.2.1
172.17.1.3	<i>Punkt-zu-Punkt</i>	172.17.3.1
172.17.2.1	<i>Punkt-zu-Punkt</i>	172.17.1.2
172.17.2.3	<i>Punkt-zu-Punkt</i>	172.17.3.2
172.17.3.1	<i>Punkt-zu-Punkt</i>	172.17.1.3
172.17.3.2	<i>Punkt-zu-Punkt</i>	172.17.2.3

Tabelle 7.4: Logische Verknüpfung der Gateway-Schnittstellen

172.17.1.3 geleitet und könnte bei Existenz einer physikalischen Verbindung (z. B. Signalleitung) zwischen den Netzen an 172.17.3.1 weitergeleitet werden.

In diesem Kontext ist nochmals zu betonen, dass zwischen dem Kommunikationsnetz LAN 1 und LAN 3 keine direkte Verbindung existiert, so dass der Informationsaustausch über das DLC-System erfolgen muss. Es kann daher keine gleichzeitige Verbindung zwischen dem LAN 1 und dem LAN 3 bestehen, sondern nur eine zeitlich versetzte Verbindung zwischen dem DLC-Master und dem LAN 1 respektive dem DLC-Master und dem LAN 3.

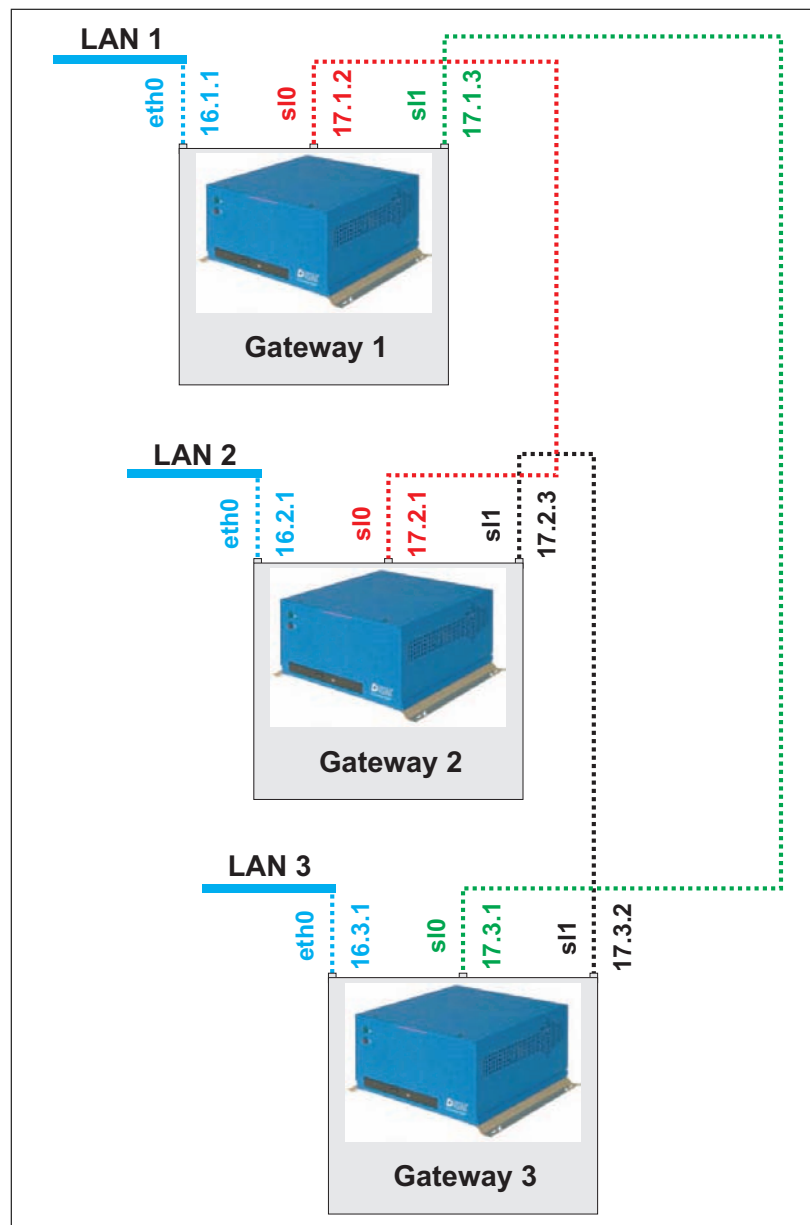


Abbildung 7.9: Visuelle Darstellung der Routing-Weege für den Informationsaustausch zwischen den LAN's

7.1.2.2.2 CSLIP zur Konvertierung der paketorientierten Übertragung Zur Bearbeitung der Aufgabenstellung TCP/IP-Pakete mittels DLC-Systeme weiterzuleiten, ist eine Transformation bzw. Umsetzung des üblicherweise paketorientierten Transportes von TCP/IP in eine serielle Kommunikation und deren Rücktransformation notwendig. Des Weiteren bieten TCP/IP-Verbindungen nicht die Funktionalität von seriellen Übertragungen, die von entsprechenden Anwendungen (z. B. DLC-Übertragung) gefordert werden. Zusammenfassend bedeutet dies, dass geeignete Werkzeuge bzw. Schnittstellen zu identifizieren sind, die dies ermöglichen.

Ein Lösungsansatz zur Bereitstellung der benötigten Funktionalitäten ist die Verwendung von Pseudo-Terminals (pty). Pseudo-Terminals stellen Schnittstellen zur Netzwerkebene zur Verfügung. Für die betrachtete Netzstruktur (Abbildung 7.1) wird jeder Gateway-Netzwerkschnittstelle formal einem Pseudo-Terminal zugeordnet (Tabelle 7.5).

lokales Netzwerk	Gateway-Netzwerkschnittstelle	Pseudo-Terminal
LAN 1	172.17.1.2	ptya0 (<i>Gateway-Rechner 1</i>)
	172.17.1.3	ptya1 (<i>Gateway-Rechner 1</i>)
LAN 2	172.17.2.1	ptya0 (<i>Gateway-Rechner 2</i>)
	172.17.2.3	ptya1 (<i>Gateway-Rechner 2</i>)
LAN 3	172.17.3.1	ptya0 (<i>Gateway-Rechner 3</i>)
	172.17.3.1	ptya1 (<i>Gateway-Rechner 3</i>)

Tabelle 7.5: Zuordnung: Gateway-Netzwerkschnittstelle und Pseudo-Terminal

Wie bereits erwähnt ist es erforderlich die paketorientierte TCP/IP Übertragung in eine serielle Kommunikation zu überführen. Das heißt, die über die Gateway-Netzwerkschnittstellen eingehenden Pakete müssen in geeigneter Form transformiert werden. Das in den Gateway-Rechnern implementierte Betriebssystem *Linux* unterstützt diese Umwandlung.

Für die serielle Übertragung kann entweder das *Point to Point Protocol*¹² oder das *Serial Line Internet Protocol*¹³ verwendet werden.

SLIP ist im Gegensatz zu PPP ein einfach gehaltenes Protokoll, das einen simplen Mechanismus zur Bildung geeigneter Datagramme zur Übertragung über serielle Leitungen bereitstellt. Bei SLIP werden die entsprechenden Daten als ein serieller Bytestrom über die serielle Verbindung zum Adressaten gesendet. Durch das Einfügen spezieller Zeichen in den seriellen Datenstrom werden die zusammengehörenden Daten zu entsprechenden *logischen* Datagrammen gruppiert bzw. gekennzeichnet. In diesem Kontext ist das SLIP *End* Zeichen zu nennen, das das Ende eines Datagramms innerhalb des Datenstrom markiert und im weiteren Verlauf noch von Bedeutung ist. Der korrespondierende SLIP-Adressat kann durch einfache Detektion der SLIP-End-Zeichen den ankommenden seriellen Datenstrom wieder in zusammenhängende Datagramme aufschlüsseln. Abweichend zu PPP definiert bzw. übermittelt das SLIP-Protokoll keine Informationen bzgl. der Verbindungskontrolle, die evtl. für eine dynamische Anpassung an die Eigenschaften der Verbindung notwendig wären. Es unterstützt des Weiteren keine Fehlerkorrektur.

Trotz der beschriebenen Einschränkungen gegenüber PPP, wird hier SLIP bzw. die Variante CSLIP¹⁴ für die notwendige Übertragung eingesetzt, da nicht direkt SLIP über das DLC-System übertragen wird, sondern das firmenspezifischen DLC-Protokoll, welches auch die Fehlererkennung und Korrektur übernimmt. Die CSLIP-Datagramme werden, wie später noch erläutert, in leicht modifizierter Form dem DLC-System als *Nutzdaten* zur Implementierung in das DLC-Protokoll bereit gestellt. Da der DLC-Master die Weiterleitung der Datenpakete an den richtigen DLC-Endpunkt übernimmt und die Übertragung in Abhängigkeit der Eigenschaften des Übertragungsmediums anpasst werden, sind die zusätzlichen *Dienstleistungen* die von PPP gegenüber SLIP abgedeckt werden, nicht erforderlich.

Die Verknüpfung zwischen einer Gateway-Netzwerkschnittstelle, dem zugehörigen Pseudo-Terminal und die Konvertierung in eine serielle Übertragung wird beim Betriebssystem *Linux* durch

¹² PPP: **P**oint to **P**oint **P**rotocol

¹³ SLIP: **S**erial **L**ine **I**nternet **P**rotocol

¹⁴ SLIP-Variante mit Van-Jacobsen-Header-Komprimierung

Standardbefehlsätze wie z. B. *slattach*¹⁵ in Kombination mit *ifconfig*¹⁶ unterstützt.

7.1.2.2.3 Gateway-Rechneranpassung für DLC-kompatible Formate Je Gateway-Rechner existieren somit zwei Pseudo-Terminal mit jeweils zwei Schnittstellen, über die zum einen schon *geslippte* Pakete¹⁷ aus der Netzwerkebene (Schnittstelle 1) und zum anderen *geslippte* Pakete an die Netzwerkebene (Schnittstelle 2) übergeben werden können (Abbildung 7.10).

Eine spezielle, im Projekt *Modulare Systemtechnik III* entwickelte Software überwacht jeweils die Schnittstelle 1 der Pseudo-Terminals eines Gateway-Rechner. In Abhängigkeit der angesprochenen Schnittstelle werden Daten, die über die Gateway-Schnittstellen an die Pseudo-Terminals weitergeleitet worden sind, vorübergehend in einem Buffer zwischengespeichert. Das heißt, Ausgabedaten der Schnittstelle 1 des Pseudo-Terminals *ptya0* werden in den *Buffer 1* und Daten der Schnittstelle 1 Pseudo-Terminals *ptya1* in *Buffer 2* geschrieben.

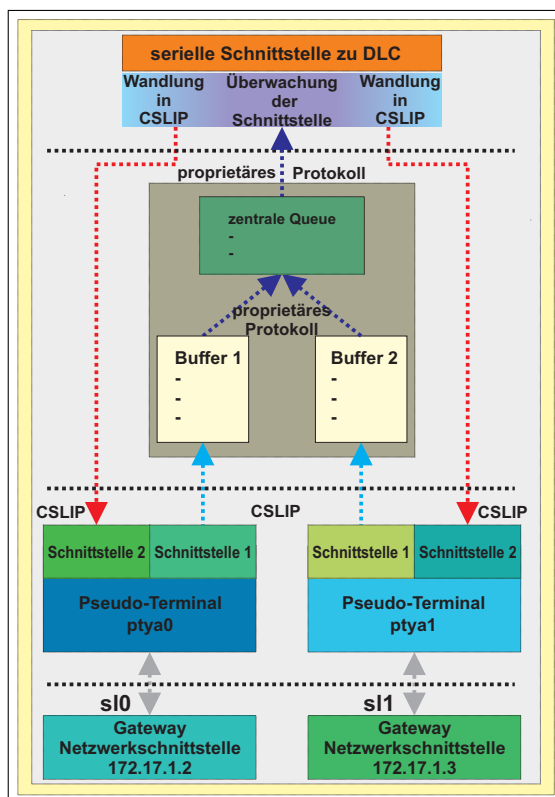


Abbildung 7.10: Prinzipdarstellung: Gateway-Rechneranpassung für TCP/IP-Übertragung

Wie schon erläutert, liegen die Ausgabedaten in einem speziellen seriellen CSLIP-Bytestrom vor. Die in einen Buffer eingehenden Byteströme können daher durch Detektion des CSLIP-Endzeichens (*0xC0*) in logische *CSLIP-Datagramme* aufgeteilt werden. Ist ein entsprechender Datagrammblock detektiert, wird dieser aus dem Buffer entfernt und in ein proprietäres Protokoll überführt. Das neue proprietäre Protokoll entsteht durch das Voranstellen eines Trennzeichens¹⁸ und der zugehörigen Zieladresse vor den eigentlichen CSLIP-Datagrammblock.

Aufgrund der zuvor durchgeführten, strikten Separierung der Gateway-Schnittstellen und deren Zuordnung zu den entsprechenden Netzen, als auch deren Verknüpfung zu Pseudo-Terminals (Tabelle 7.5), gestaltet sich die Bestimmung der Zieladresse relativ einfach. Jedes aus dem Buffer 1 des Gateway-Rechners 1 entfernte Datagramm hat als übergeordnetes Ziel das LAN 2, d.h. die Gateway-Schnittstelle 172.17.2.1 bzw. die Schnittstelle 2 des Pseudo-Terminals *ptya0*. Die Anbindung des Gateway-Rechners 2 (respektive LAN 2) ist

jedoch nur über dessen serielle Hardwareschnittstelle an den DLC-Endpunkt 2 (Slave 2) möglich, so dass die Zieladresse für das proprietäre Protokoll *Slave 2* ist.

Nach der Überführung in das proprietäre Protokoll, wird das neu entstandene Datagramm in eine zentrale Queue zur späteren Weiterverarbeitung gespeichert.

Eine weitere Software überwacht die serielle Hardwareschnittstelle¹⁹ des Gateway-Rechners und analysiert eingehende Daten. Handelt es sich bei den eingehenden Daten um eine Datenrequest

¹⁵ z. B. : `slattach /dev/ptya1 &`

¹⁶ z. B. : `/sbin/ifconfig s11 172.17.1.3 pointopoint 172.17.3.1`

¹⁷ aus dem unterlagerten Kommunikationsnetz (z. B. LAN 1)

¹⁸ hier: ~

¹⁹ Anschluss zum DLC-Modem

(Anfrage nach Daten aus Gateway-Rechner) des Masters, so wird der oberste (älteste) Eintrag aus der zentralen Queue entnommen und über die serielle Hardwareschnittstelle an das DLC-Modem weitergeleitet. Im Modem erfolgt die Implementierung dieses proprietären Datenpaketes in das eigentliche firmenspezifische DLC-Protokoll und die Übertragung an den DLC-Master bzw. DLC-Master-Rechner.

Wie bereits in Abschnitt 7.1.2.1 skizziert, wird im Master-Rechner die Zieladresse aus dem proprietären Datenpaket entschlüsselt. Über korrespondierende *Mappingeinträge* ist eine Zuordnung der detektierten Zieladresse zu den Adressen der DLC-Modems möglich. Der DLC-Master-Rechner initiiert daraufhin über den DLC-Master einen Verbindungsaufbau zum entsprechenden DLC-Endpunkt und sendet das zuvor erhaltene proprietäre Datenpaket an den DLC-Master. Dieser übernimmt die Implementierung in das DLC-Protokoll und die Weiterleitung an den Ziel-DLC-Endpunkt. Dort wird das proprietäre Datenpaket aus dem DLC-Protokoll wieder extrahiert und an die serielle Hardwareschnittstelle des zugehörigen Gateway-Rechners geschickt.

Die die serielle Schnittstelle überwachende Software, erkennt den eingehenden Datenstrom als Sendedaten vom Master (kein Datenrequest) und spaltet diesen daraufhin in die Bestandteile Zieladresse, Trennzeichen und CSLIP-Datagramm wieder auf. Da, wie bereits erläutert, eine genaue Zuordnung zwischen der Zieladresse und dem Pseudo-Terminal bzw. der Schnittstellen besteht (Tabelle 7.6), kann das CSLIP-Datagramm an die Schnittstelle 2 des Pseudo-Terminals weitergeleitet werden. Nach Rücktransformation des CSLIP-Datagramms in TCP/IP-Pakete, werden diese über die entsprechende Gateway-Schnittstelle an den Adressaten im lokalen Kommunikationsnetz (z. B. LAN 3) geleitet.

lokales Netzwerk	Pseudo-Terminal	Buffer	Zieladresse
LAN 1	ptya 0 (<i>Gateway-Rechner 1</i>)	Buffer 1	DLC-Slave 2
	ptya 1 (<i>Gateway-Rechner 1</i>)	Buffer 2	DLC-Slave 3
LAN 2	ptya 0 (<i>Gateway-Rechner 2</i>)	Buffer 1	DLC-Slave 1
	ptya 1 (<i>Gateway-Rechner 2</i>)	Buffer 2	DLC-Slave 3
LAN 3	ptya 0 (<i>Gateway-Rechner 3</i>)	Buffer 1	DLC-Slave 1
	ptya 1 (<i>Gateway-Rechner 3</i>)	Buffer 2	DLC-Slave 2

Tabelle 7.6: Zieladressenzuordnung

Mit der hier präsentierten Vorgehensweise und den erforderlichen Anpassungsschritten konnte das untersuchte DLC-Kommunikationssystem der Art modifiziert werden, dass zum einen eine relative einfache Anbindung an TCP/IP-basierte Kommunikationsnetze über Gateway-Rechner und zum anderen die Übertragung von TCP/IP-basierter Kommunikation möglich ist.

In diesem Kontext ist jedoch jetzt schon anzumerken, dass die vorgestellte gesamte Kommunikationsstruktur ein deutlich anderes Zeitverhalten als etwa die Kommunikation über Modems aufweisen wird. Auf diesbezügliche Untersuchungen und Ergebnisse werden in Abschnitt 7.1.3 detailliert eingegangen.

7.1.3 Praktische Erfahrungen mit modifiziertem DLC-System

7.1.3.1 Datenrate der DLC-Übertragung

Auf der DLC-Ebene werden Daten in OFDM-Blöcken übertragen. In Abhängigkeit der Übertragungsparameter ist die Zeit für eine Übertragung eines Frames unterschiedlich lang. Beim eingesetzten DLC-100 Modem können pro Sendeblock je nach Übertragungsmodus 48 bis 128 Byte Daten übertragen werden. Die Standard-Frame-Länge beträgt 64 Byte bzw. 128 Byte. Da pro Sendeblock 13 Byte für das NMS-Header entfallen, stehen für die reine Nutzdatenübertragung 35 bis 115 Byte im DLC-Telegramm zur Verfügung. Um die maximale Nutzdatenlänge, die vom Anwender an das NMS zum Versenden übergeben werden kann, nicht auf die Frame-Länge abzüglich NMS Header zu beschränken, führt das NMS eine Blockung der Nutzdaten durch. Die Applikation übergibt $n \cdot (\text{Frame-Länge} - \text{NMS Header})$ Daten an das NMS, maximal jedoch nur 247 Byte. In Empfangsrichtung werden die Blöcke wieder zusammengesetzt und nach Prüfung auf Vollständigkeit an die Applikation weitergegeben. Zu berücksichtigen ist, dass pro Datenblock der Applikation (z. B. 204 Byte) ein Byte für die Portsteuerung reserviert ist.

Seitens des Herstellers werden Datenraten von 1,21 bis 7,4 kbps für die Übertragung in Richtung Master Slave angegeben [iAd 01]. Da die Parametriersoftware des DLC keine Möglichkeit der Übertragungsgeschwindigkeitsmessung beinhaltet, wurde eine Software entwickelt, die die Übertragungszeit des Systems bei definierter Datenpaketgröße in unterschiedliche Übertragungsrichtungen misst und somit Aussagen bzgl. der Datenrate zulässt. In Abhängigkeit der Framedauer, der Frame-Länge und des zu übertragenden Datenvolumens ergeben sich die in Tabelle 7.7 ermittelten Datenraten.

Übertragungsrichtung zum DLC-Master					
Bandbreite: 10 kHz	Datenvolumen		274 Byte	532 Byte	1048 Byte
	Främelänge: 48 Byte		0,47 kbps	0,58 kbps	0,64 kbps
	Främelänge: 64 Byte		0,59 kbps	0,79 kbps	0,98 kbps
	Främelänge: 128 Byte		0,80 kbps	1,20 kbps	1,60 kbps
Übertragungsrichtung zum DLC-Endpunkt					
Bandbreite: 10 kHz	Datenvolumen		274 Byte	532 Byte	1048 Byte
	Främelänge: 48 Byte		0,63 kbps	0,70 kbps	0,76 kbps
	Främelänge: 64 Byte		0,78 kbps	0,93 kbps	1,09 kbps
	Främelänge: 128 Byte		1,25 kbps	1,27 kbps	1,93 kbps

Tabelle 7.7: Datenrate des modifizierten DLC-Systems

Die hier festgestellten Abweichungen von den Herstellerangaben sind auf mehrere Punkte zurückzuführen. Bei Messung der Datenrate vom Slave in Richtung Master startet die Messzeit mit dem ersten vom DLC-Endpunkt zu sendenden Byte und endet mit dem *Slave-seitigen* Empfang eines Acknowledge-Bytes, welches der Master nach Erhalt aller Datenpakete an den DLC-Endpunkt sendet. Bei der Bestimmung der Übertragungszeit vom Master in Richtung DLC-Endpunkt wird die Zeit vom ersten bis zum letzten im Slave eintreffenden Datenbyte gemessen. Die gewählten Datenpaketgrößen entsprechen nicht dem ganzzahligen Vielfachen der Netto-Frame-Länge, so

dass bei der Übertragung auch Frames gesendet werden, die nicht vollständig mit Nutzdaten besetzt sind. Die Dauer eines Frames ist jedoch, unabhängig von der Nutzdatenmenge, immer gleich groß.

Werden z. B. 274 Byte bei einer Frame-Länge von 128 Byte übertragen, so erfolgt eine Aufspaltung in drei Pakete der Nettolänge 115 Byte, 114 Byte und 45 Byte. Insgesamt werden daher mindestens 18 Slots ($3 \cdot 6 \cdot \text{Framedauer}$) für die Übertragung benötigt. Der letzte Frame enthält nur 45 Byte Nutzdaten, belegt jedoch die gleiche Zeitdauer, so dass insgesamt die Nettodatenrate sinkt. Bei den vom Hersteller ausgewiesenen Werten wird hingegen nur von einer einmaligen Übertragung mit einem *kompletten Nutzdatenframe* ausgegangen.

Die Messungen zeigen, dass generell eine Übertragung mit geringen Datenraten für die Testkonfiguration möglich ist. In Abhängigkeit der Framedauer, der Frame-Länge, des Datenvolumens lassen sich Datenrate bis zu 1,93 kbps (Paketgröße 1048 Byte) erreichen. Prinzipiell sind höhere Datenraten bei Belegung größerer Bandbreiten möglich, die jedoch hier aufgrund der Eigenschaften der MNN nur eingeschränkt erzielt werden konnten.

In Hinblick auf die durchgeführten SNR Messungen und der potenziellen Störung der Kommunikation durch elektrische Komponenten, ist ein Kompromiss zwischen der zu belegenden Bandbreite und der Datenrate zu finden. Aufgrund der Bandbreitenlimitierung steigt mit der Reduzierung der Framedauern auch das Risiko störbehaftete Bereich innerhalb des Frequenzbandes mit abdecken zu müssen, so dass bzgl. der Störresistenz kleiner Bandbreiten zu bevorzugen sind. Für das im *Design-Zentrum Modulare Versorgungstechnik* installierte DLC-System wurde daher eine Bandbreite von 10 kHz, eine Frame-Länge von 64 Byte und eine Trägerfrequenz von 89 kHz als optimal ermittelt.

7.1.3.2 Datenbankabfragen via DLC-System

In Hinblick auf die relativ geringen Datenraten, ist von einer Nutzung des Systems für zeitkritische, schnelle Anwendungen abzusehen. Potentielle Anwendungen sind jedoch im Bereich des Energiemanagements für die zeitunkritische Übertragung von Datensätzen z. B. 15-minütlicher Fahrplanaustausch etc. denkbar.

Um das Nutzungspotenzial des modifizierten DLC-Systems für einen entsprechenden Anwendungsbereich zu verifizieren, soll das DLC-System im Folgenden, als Kommunikationssystem für das Abfragen der im Projekt *Vernetzung modularer Systeme* etablierten relationalen MySQL-Datenbanken des Energiemanagements durch das *Multifunktionale Intelligente Digitalrelais*²⁰ verwendet werden [ModIII 06].

Die in den Gateway-Rechnern implementierten Datenbanken enthalten jeweils Daten über die im zugehörigen, unterlagerten Niederspannungsnetz präsenten Erzeuger. Das MIDR fragt die Kurzschlussleistung der Erzeuger aus den entsprechenden Datenbanken ab und summiert die Kurzschlussströme der eingeschalteten Erzeugungsanlagen. Durch Vergleich des errechneten zulässigen Gesamtkurzschlussstromes des Netzes mit den online gemessenen Strömen können kritische Betriebszustände ermittelt bzw. durch geeignete Schalthandlungen vermieden werden [Arief 05].

Für alle weiteren Untersuchungen werden die Leitungsnachbildungen der Mittelspannungsnetznachbildung auf die Freileitungslängen 10 km (L 12), 3,1 km (L 23) und 1,6 km (L 24) parametrisiert. Der NS/MS-Trafo des Niederspannungsnetzes 1 dient als Einspeisepunkt in das 10-kV-Mittelspannungsnetz und wird niederspannungsseitig durch das öffentliche Niederspannungsnetz gespeist. Am Transformator 3 ist niederspannungsseitig eine Last (6 kW) angeschlossen, so dass ein Leistungsaustausch aus dem Netz 1 über die Mittelspannungsebene in das Netz 3 erfolgt.

²⁰ MIDR: Multifunktionale Intelligente Digitalrelais

Das MIDR ist im elektrischen Niederspannungsnetz 1 positioniert (vgl. Abbildung 7.1), so dass bzgl. der Kommunikation zur Datenbank 1 eine direkte Ankopplung an das Kommunikationsnetz LAN 1 via Ethernet erfolgt. Die Kommunikation zu den Datenbanken 2 (auf Gateway-Rechner 2 im LAN 2) bzw. 3 (auf Gateway-Rechner 3 im LAN 3) ist über das DLC-System zu realisieren.

Erste Ansätze, eine Verbindung zu den Datenbanken 2 und 3 über das DLC-System aufzubauen, schlugen aufgrund der geringen Datenrate der DLC-Übertragung und der sowohl Server- als auch Client-seitig standardmäßig eingestellte MySQL *connect-timeout* Zeit von 5 Sekunden fehl. Ein Default-Wert von 5 Sekunden ist für schnelle Übertragungssysteme, wie z. B. Ethernet vollkommen ausreichend. Für das DLC-System konnten jedoch erst nach Erhöhung des Wertes auf 360 Sekunden Timeout-Fehler unterbunden werden.

Untersuchungen mit einer 10 kHz DLC-Bandbreite und einem 64 Byte langem Frame haben gezeigt, dass ca. 4 bis 5 Minuten für den Kommunikationsaufbau zwischen einem MySQL-Client (MIDR) und dem MySQL-Server (z. B. Datenbank 2) benötigt werden. In dieser Zeit werden 39 Verbindungen vom DLC-Master zu den entsprechenden DLC-Endpunkten initiiert und ca. 4 kB Daten über das DLC-System übertragen. Im Vergleich erfolgt der Kommunikationsaufbau zwischen dem MIDR und der Datenbank 1 in weniger als 1 Sekunde (Verbindung über Ethernet). Unter Beachtung der relativ langen Zeitdauer für einen Kommunikationsaufbau, ist es daher nicht sinnvoll, nach einer Datenbankabfrage die Client-Server-Verbindung wieder abzubauen, sondern die Verbindung unabhängig des Abfrageintervalls bestehen zu lassen. Ausgehend von der Verbindung zur Datenbank 1, initiiert das MIDR sukzessive den Verbindungsaufbau zu den Datenbanken 2 und 3.

Bei Tests hat sich gezeigt, dass zwischen einem erfolgreichen Verbindungsaufbau über DLC und der Initiierung des nächsten Aufbaus, Schutzzeiten einzuhalten sind. Trotz des Anzeigens eines erfolgreichen Verbindungsaufbaus seitens des MIDR, werden immer noch Datenpakete zwischen MIDR und der Datenbank über das DLC-System ausgetauscht. Durch die Verwendung von Schutzzeiten im Bereich von 30 bis 60 Sekunden, kann nach Indikation des erfolgten Verbindungsaufbaus durch das MIDR, sichergestellt werden, dass es zu einem vollständigen Abschluss des Verbindungsaufbaus kommt und keine Kommunikationskonflikte auftreten (vgl. [Arief 05]). Erst nach erfolgreichem Verbindungsaufbau zu einer Datenbank, können diese abgefragt werden.

Um einen Eindruck bzgl. des erforderlichen Zeitaufwands einer Abfrage zu gewinnen, wurden jeweils Daten mit einem Nettovolumen von 70 Byte je Abfrage²¹ von den Datenbanken angefordert und die erforderliche Zeit von der Anforderung bis zum Erhalt der Daten im MIDR gemessen.

In Analogie zum Verbindungsaufbau hat sich bei den ersten Datenbankabfragen gezeigt, dass auch hier Schutzintervalle zwischen den Abfragen zu den unterschiedlichen Datenbanken eingehalten werden müssen. Das MIDR detektiert den angeforderten Datensatz bevor die eigentliche Kommunikation für die Datenanforderung beendet ist. Das heißt, auf dem DLC-System ist weiterhin eine Übertragung zwischen dem MIDR und der Datenbank zu erkennen, obwohl die Daten schon längst dem MIDR zur Verfügung stehen und dort auch angezeigt werden. In Analogie zu der Schutzzeit für den Verbindungsaufbau ist eine Verzögerung von 10 bis 15 Sekunden zwischen den Datenbankabfragen sinnvoll.

Analysen von kontinuierlich durchgeführten Datenbankabfragen über Untersuchungszeiträume von bis zu zwei Tagen haben gezeigt, dass es sich bei der hier verwendeten DLC-Übertragung nicht um eine deterministische Kommunikation handelt. Die benötigten Übertragungszeiten variieren zwischen 66 bis 3447 Sekunden (Abbildung 7.11), wobei jedoch grob drei Teilbereiche zu unterscheiden sind.

²¹ Nettovolumen von 70 Byte entspricht dem zu erwartenden Abfragevolumen des MIDR im späteren Betrieb.

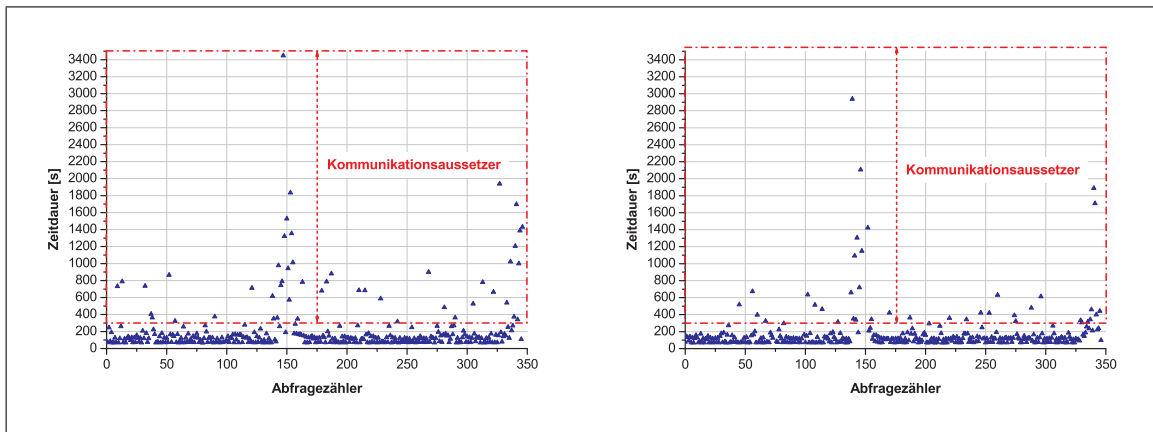


Abbildung 7.11: Übertragungszeiten für Datenbank 2 bzw. 3-Abfragen

Der erste Bereich beinhaltet alle Übertragungen, die zwischen 66 und ca. 90 Sekunden benötigen. Entsprechende Zeiten ergeben sich, wenn für die Übertragung zum einen keine Wiederholung von Datenpaketen und zum anderen keine Störungen während der DLC-Übertragung vorliegen. Zeiten im Bereich von 90 bis ca. 200 Sekunden sind zu ermitteln, falls während der Übertragung ein nochmaliges Senden von Datenpaketen erforderlich ist. Bei Übertragungen, die länger als 200 Sekunden benötigen, liegt eine bzw. mehrmalige Störung der DLC-Verbindung vor. Das heißt, der DLC-Master kann während einer nicht näher zu bestimmenden Zeitdauer keine Verbindung zum DLC-Endpunkt aufbauen bzw. kann diesen nicht detektieren. Entsprechende Effekte sind auf ein zu geringer SNR zurückzuführen. In diesem Kontext soll nochmals erwähnt werden, dass es sich hierbei nicht um ein zeitinvariantes Verhalten handelt. Zu verschiedenen Zeiten durchgeführte Übertragungsstatistikmessungen mit gleichem Mess-/und Versuchsaufbau belegen dies sehr deutlich. Hierbei sind Unterschiede in der Signalverstärkung des DLC-Signals von bis zu 25 % keine Seltenheit. Übertragungen von bzw. zum DLC-Endpunkt 2 über die Leitung L 23 sind insgesamt, im Gegensatz zu Übertragungen über die Leitung L 24, stärker störanfällig. Ein Maß hierfür ist z. B. die Anzahl der korrekt übertragenen DLC-Datenpakete bzw. der Anteil der Pakete mit einer korrekter Checksumme. DLC-Datenpakete, die über L 24 übertragen werden, weisen im gesamten Frequenzbereich (30 bis 140 kHz) keine Checksummenfehler auf. Fehlerfreie Übertragungen sind über L23²² nur bei den Trägerfrequenzen 54 und 89 kHz möglich.

79²³ bis 83 %²⁴ der Datenbankabfragen führen innerhalb von 200 Sekunden zum gewünschten Ziel (vgl. Abbildung 7.12). Wird in Hinblick auf einen 15-minütlichen Fahrplanaustausch eine Zeitobergrenze von 450 Sekunden angesetzt, in der jeweils ein Datenabgleich mit DB2 und DB3 erfolgen muss, so unterschreiten 83 bzw. 94 % aller Übertragungen diese Schwelle.

Da die Mittelspannungsnetznachbildung nur bedingt das Verhalten vom Mittelspannungsnetzen nachbildet, sind im Besonderen die Kommunikationsunterbrechungen aufgrund des zu geringen SNR nicht zu hoch zu bewerten. Bei einer realen Implementierung des modifizierten Systems in ein Mittelspannungsnetz können DLC-Repeater-Stationen bei einem zu geringem SNR zur Signalverstärkung bzw. Regenerierung des DLC-Signals eingesetzt werden. Entsprechende Maßnahmen sind jedoch aufgrund des kompakten Aufbaus für die Mittelspannungsnetznachbildung nicht umsetzbar. Es ist daher davon auszugehen, dass bei geeigneter Hardware-Konstellation die hier detektierten Kommunikationsunterbrechungen vermieden werden.

²² bei den hier gewählten Randbedingungen und Einstellparametern

²³ für DB2

²⁴ für DB3

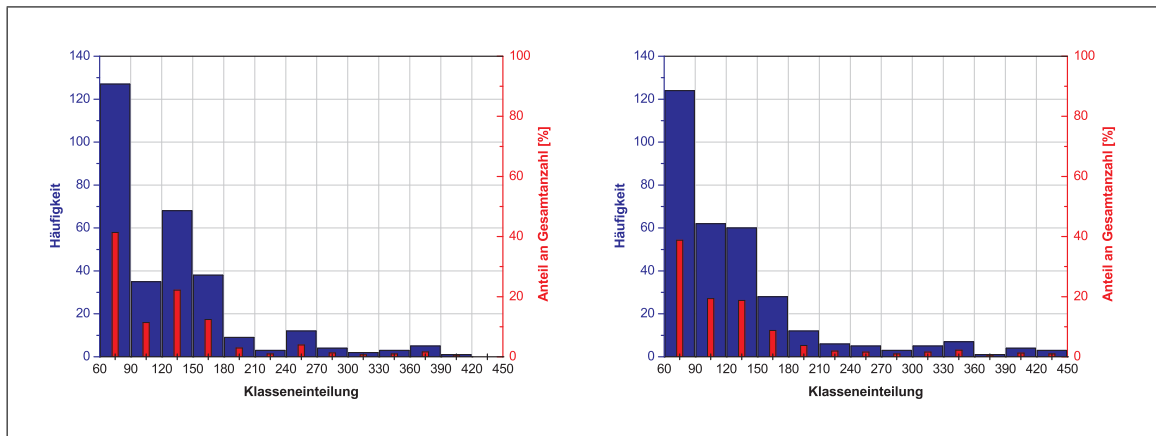


Abbildung 7.12: Häufigkeitsverteilung für Datenbankabfragen DB 2 und DB 3

Durch den hier untersuchten Einsatz des DLC-Systems als *Kommunikationssystem* zwischen den getrennten TCP/IP-basierten Kommunikationsstrukturen (LAN 1, LAN 2 und LAN 3) für die Übermittlung von Datenbankinformationen, konnte erfolgreich nachgewiesen werden, dass DLC als eine Variante der non-providerbasierten Kommunikationstechnik für die Vernetzung dezentraler Strukturen im Fernbereich eingesetzt werden kann. Das konzipierte System ermöglicht eine TCP/IP-fähige, nicht zeitkritische Kommunikation zwischen den einzelnen Subnetzen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit ist ein neuer 10-schrittiger Entscheidungsfindungsprozess (Leitfaden) entwickelt und vorgestellt worden. Dieser, erlaubt neben einem direkten Vergleich von Kommunikationssystemen basierend auf zuvor erarbeiteten Bewertungskriterien, der Reduktion des Vergleichs auf einen einzigen neuen Systemwert (Erwartungsnutzen), auch die Wahl eines geeigneten Kommunikationssystems für die Applikation in dezentralen elektrischen Versorgungsstrukturen.

Die in *Kapitel 3* abgeleiteten 21 qualitativen Bewertungskriterien der Hauptgruppen *Systempräferenz*, *Qualitätsmerkmale*, *Kommunikationsaufwand*, *Teilnehmerkenngröße* und *Applikationsaufwand* erlauben eine Zu- und Einordnung der eigentlichen Systemkenngrößen der Kommunikationssysteme für den späteren Entscheidungsprozess.

Mit den in der Hauptgruppe *Systempräferenz* festgelegten Bewertungskriterien (*Systemdienstleister*, *Schnittstellendefinition*, *Systemstandardisierung* und *Marktdurchdringung*) kann das Präferenzverhalten des Systemnutzers in Hinblick auf den Betrieb und die Kompatibilität eines möglichen Systems berücksichtigt werden. Die zweite Hauptgruppe *Qualitätsmerkmale* beinhaltet die Bewertungskriterien *Zuverlässigkeit*, *Verfügbarkeit* und *Datenintegrität*, die maßgeblich die Qualität eines Kommunikationssystems charakterisieren bzw. beschreiben. Neben den Qualitätsmerkmalen eines Kommunikationssystems ist für eine Applikation, die zu berücksichtigende Gesamtzeit des Informationsaustauschs von entscheidender Bedeutung. Die Gesamtzeit hängt hierbei im Wesentlichen von der Latenzzeit und dem applikationsspezifischen *Kommunikationsaufwand* ab. Im Gegensatz zur Latenzzeit, die in Hinblick auf den hier fokussierten 1/4-h-Datenaustausch vernachlässigt werden kann, wird der Kommunikationsaufwand durch die Bewertungskriterien Nutzdatenübertragungsrate und Effizienz erfasst. Kriterien, die den Standort und im Speziellen die daraus resultierenden standortspezifischen Einschränkungen, Anforderungen, Eigenschaften, etc. in die Bewertung mit einbeziehen, werden in der vierte Hauptgruppe *Teilnehmerkenngrößen* durch sieben Bewertungskriterien (*Übertragungsdistanz*, *Teilnehmeranzahl*, *Bandbreite*, *Duty Cycle*, *Frequenznutzung*, *topografische Abhängigkeit*) berücksichtigt. Das Bewertungskriterium *Interaktionsrichtung* ist neben der *Betriebsart* Bestandteil der Kriteriumsgruppe *Teilnehmerinteraktion*. Der erforderliche Aufwand für die *Integration*, die *Instandhaltung* und die *Systemerweiterung* eines Kommunikationssystems wird durch die fünfte Hauptgruppe *Applikationsaufwand* abgedeckt.

Mit der anschließend durchgeführten Festlegung von Bewertungstypen und Maßstäben (Noten 1 – 10) für die Bewertungskriterien ist zum einen die Zu- und Einordnung der eigentlichen Systemkenngrößen (dimensionsbehaftete / dimensionslose Parameter) der zur Auswahl stehenden Kommunikationssysteme in definierte Klassen der Bewertungskriterien möglich. Zum anderen erlaubt die Notenvergabe die Überführung, der den Bewertungskriterien zugeordneten Kennwerten auf jeweils dimensionslose Hilfsgrößen. Die Rückkopplung und Korrelation der Notenwerten zur eigentlichen späteren Applikation bzw. zum Nutzen des System für die Applikation, wird durch das Bindeglied der Nutzfunktion bewerkstelligt, die den Notenwerten Nutzwerte bzgl. der Applikation zuordnen. Je nach Verhalten des Entscheidungsträgers sind neutrale, konservative oder progressive Nutzenfunktionen denkbar. Für die in *Kapitel 6* beispielhaft durchgeführte Systemauswahl ist daher für jeden Verlaufstyp eine Funktion exemplarisch definiert worden.

Eine ausgewählte Nutzenfunktion ist uniform auf alle resultierenden Notenwerte der Bewertungskriterien anzuwenden. Die Höhe der Wertigkeit eines Bewertungskriteriums kann und wird daher durch zusätzliche Gewichtungen (relative Gewichtungsfaktoren) berücksichtigt, die sich in Abhängigkeit der Applikation individuell und spezifisch ergeben.

In Anlehnung an die Theorie der Entscheidung unter Risiko werden mit der anschließenden Berechnung eines Erwartungsnutzen je Kommunikationssystem, aus der Gesamtsumme der Einzelprodukte von Nutzwert und relativem Gewichtungsfaktor je System, sowohl die technischen Parameter und applikationsspezifischen Aspekte, als auch die subjektiven Bewertungen zu einem Wert vereint. Alle zur Auswahl stehenden Kommunikationssysteme können daher jeweils durch einen einzigen Wert (Erwartungsnutzen des Systems) charakterisiert werden. Ein Vergleich der Systeme untereinander kann somit von ehemals 21 Werten auf die Gegenüberstellung eines Werts je System reduziert werden.

Ist eine Systementscheidung nur aufgrund der technischen und applikationsspezifischen Randbedingungen zu treffen, so ist mit der Wahl des Kommunikationssystems, das den größten Erwartungsnutzen aufweist, der Entscheidungspfindungsprozess abgeschlossen. Durch die Berechnung der jährlich erforderlichen Gesamtaufwendungen für ein Kommunikationssystem bzw. für die anvisierten Kommunikationsaufgaben, in Abhängigkeit der Applikation kann jedoch neben dem ermittelten Erwartungsnutzen des Systems, ein weiterer Entscheidungsparameter für die Systemauswahl geschaffen werden.

Durch die Verwendung geeigneter Bezugsgrößen (Erwartungsnutzen und Gesamtaufwendungen von Referenzsystemen bzw. Mittelwertbildung der Erwartungsnutzen und Gesamtaufwendungen der in Frage kommenden Systeme) kann die Entscheidungsfindung der zur Auswahl stehenden Systeme auf einen Vergleich mit einem Bezugssystem zurückgeführt werden. Hierbei sind jedoch nicht die absoluten Differenzen des Erwartungsnutzen bzw. des jährlichen Gesamtaufwandes von Interesse, sondern vielmehr wie sich das entsprechende System gegenüber dem Normal (Bezugssystem) darstellt. Das heißt, der relative Zuwachs an Erwartungsnutzen und Gesamtkosten eines jeden Systems ist die entscheidende (Kenn-)Größe für die Systemauswahl.

Durch den Eintrag der berechneten relativen Erwartungsnutzen- und Gesamtkostenzuwächse in eine entwickelte 4-Quadranten-Matrix kann unter Berücksichtigung der Lage der korrespondierenden Wertepaare im Koordinatensystem (Quadranten I-IV, optimale bzw. suboptimale Bereiche) eine einfache grafische Lösung bzgl. der Auswahl des für die Applikation optimalsten Kommunikationssystems aus den zur Auswahl stehenden Systeme erfolgen. Dem Entscheidungsträger ist somit ein Werkzeug zur Verfügung gestellt worden, das eine einfache und praktikable Entscheidungsfindung erlaubt.

Mit dem in *Kapitel 3* erläuterten Konzept ist erstmals eine ganzheitliche Betrachtung unter Berücksichtigung sowohl der technischen und applikationsspezifischen, als auch der ökonomischen Aspekte und Randbedingungen möglich. Die in *Kapitel 6* exemplarisch durchgeführten Systemauswahl veranschaulicht und verifiziert die einfache und praktikable Handhabung des entwickelten Konzeptes.

Der entwickelte Lösungsansatz zur Entscheidungsfindung für Kommunikationssysteme ist universell verwendbar. Das heißt, er ist nicht auf einen speziellen Anwendungsfall begrenzt, sondern kann bei entsprechender Modifikation der Anforderungen, Systemkenngrößen etc. auf andere Applikationsanwendungen übertragen werden.

In Hinblick auf zukünftige Applikationen und Auswahlprozesse ist eine noch zu entwickelnde Datenbank, in der für jedes Kommunikationssystem die zu den Bewertungskriterien korrespondierenden Systemkennwerte zu hinterlegen sind, als sinnvoll zu erachten, um eine einfachere und schnellere Systemwahl zu ermöglichen.

Aktuell werden zwei Software-Programme (CELSIEVAL und Excel-Makro) zur Durchführung der Systemauswahl nach Kapitel 3 im Rahmen dieser Arbeit und im Speziellen für die exemplarische Systemauswahl nach Kapitel 6 eingesetzt. Die Definition der Bewertungskriterien, die Ein- und Zuordnung der jeweiligen Systemparameter zu den Bewertungskriterien sowie die resultie-

rende Bestimmung der Notenwerte als auch die Berechnung der jährlichen Gesamtaufwendungen erfolgt mit dem Programm CELSIEVAL.

Die Noten, die Gewichtungsfaktoren und die Gesamtaufwendungen aus CELSIEVAL werden als Eingangsdaten für ein weiteres Auswerteprogramm exportiert. Die eigentliche Verarbeitung dieser Parameter, die Definition der Nutzenfunktion, die Berechnung der Erwartungsnutzen, die Festlegung des Bezugssystems, die Berechnung der relativen Zuwächse als auch die grafische Darstellung in der 4-Quadranten-Matrix erfolgt mit einem separaten Excel-Makro. Aus Gründen der Bedienerfreundlichkeit wäre eine gesamte Verarbeitung aller Daten bis hin zur Darstellung der 4-Quadranten-Matrix in einem Softwaretool wie z.B. CELSIEVAL wünschenswert. Entsprechende Vorschläge zur Modifikation von CELSIEVAL wurden dem Hersteller unterbreitet und befinden sich derzeit in der Evaluierungsphase.

Im aktuellen Excel-Makro ist nur die Verwendung von einer Nutzenfunktion für alle Bewertungskriterien implementiert. Das heißt, eine Variation von unterschiedlichen Nutzenfunktionen für verschiedenen Bewertungskriterien ist derzeit nicht vorgesehen. Des Weiteren erfolgt die Modellierung der Nutzenfunktionen im Quellcode. In diesem Zusammenhang sind daher Erweiterungen zur Variation und zur freien Eingabe der Nutzenfunktion (Menusteuerung) denkbar.

Im Rahmen der Analyse von providerbasierten Kommunikationssystemen konnte in *Kapitel 4* gezeigt werden, dass der in städtischen Gebieten bzw. hoch entwickelten Ländern verfolgte Ansatz des Einsatzes von Mobilfunk- und Festnetztelefonie zur Datenübertragung, nur begrenzt auf dezentrale Versorgungsstrukturen übertragbar ist. Primär verantwortlich hierfür ist die aktuell unzureichende oder auch gänzlich fehlende Kommunikationsinfrastruktur. Wann und in welchem Umfang eine Erschließung dezentraler Versorgungsstrukturen mit öffentlichen Carrier-Netzen stattfindet, ist unter Berücksichtigung der in *Kapitel 2* erarbeiteten Kennzeichen offen bzw. fraglich.

Dezentrale Versorgungsstrukturen zeichnen sich neben einer geringen Bevölkerungsdichte, großer Entfernungen zum nächst gelegenen öffentlichen Elektrizitätsnetz, geringer Elektrizitätsverbräuche auch durch ein geringes Pro-Kopf-Einkommen aus. Das geringe verfügbare Einkommen kann als ein wesentliches Hemmnis für eine Erweiterung der Kommunikationsinfrastruktur gesehen werden. Es sind daher bzgl. der kommunikationstechnischen Vernetzung dezentraler Komponenten (DEA, Lasten etc.) Alternativen zu den providerbasierten Carrier-Netzen zu suchen.

Wie in *Kapitel 5* dargelegt, gibt es sowohl funk- als auch leitungsbasierte Kommunikationssysteme, die eine Anbindung der dezentralen Komponenten ohne Einsatz von providerbasierten Carrier-Netzen erlauben. Für die Ankopplung im Fernbereich (d. h. einige Kilometer Reichweite) sind hier im Speziellen Funkkommunikationssysteme im UHF-Bereich zu nennen. Kommunikationssysteme, die zusätzliche leitungsbasierte Medien zur Übertragung erfordern, sind aufgrund der zu erwartenden hohen Investitionskosten nicht zu präferieren.

Im Gegensatz zu providerbasierten Systemen, bei denen es meist nur einer Inbetriebnahme der Kommunikationsendgeräte durch den Systemnutzer bedarf, ist bei nicht-providerbasierten Systemen jedoch ein erhöhter Applikationsaufwand zu verzeichnen, da der Systemnutzer die gesamte notwendige Infrastruktur bereitstellen muss. Bei funkbasierten Systemen ist in diesem Zusammenhang z.B. die notwendige Antennentechnik, die Frequenznutzung, die Funkfeldausbreitung, die klimatischen und topografischen Randbedingungen etc. vom Systemnutzer zusätzlich zu berücksichtigen.

Distribution Line Carrier Systeme, die die vorhandenen Infrastruktur der elektrischen Versorgungsleitungen zur Übertragen nutzen, können als eine weitere Möglichkeit zur nicht-providerbasierten Anbindung verstanden werden. Jedoch werden aktuell käuflich zu erwerbende Schmalband-DLC-Systeme überwiegend zu Scada- bzw. Datenfernauslezwecken verwendet, bei denen von einer Zentrale aus die einzelnen Endstationen (Slave-Komponenten) gesteuert abgefragt und

die entsprechenden Informationen und Daten zentral ausgewertet werden. Eine Kommunikation bzw. die Datenübertragung zwischen den DLC-Endpunkten und den daran angeschlossenen Komponenten wird nicht unterstützt, so dass hier Anpassungen und Weiterentwicklungen für einen Datenaustausch zwischen den Endgeräten zwingend erforderlich sind.

Neben des reinen Datenaustauschs zwischen den DLC-Komponenten, ist eine einfache Anbindung bzw. Ankopplung der DLC-Endpunkte an die Infrastruktur möglicher unterlagerter Kommunikationsnetze wünschenswert. In Hinblick auf die weltweite Akzeptanz von TCP/IP im ICT-Sektor, als auch die hohe Marktdurchdringung kostengünstiger TCP/IP-kompatibler Komponenten, ist es daher sinnvoll, DLC-Systeme für die Übertragung von TCP/IP-Protokollen zu ertüchtigen und eine einfache Plug-and-Play Anbindung an TCP/IP-Netze (z. B. Kommunikationsnetze in den unterlagerten elektrischen Versorgungsstrukturen) zu realisieren.

Mit der Weiterentwicklung eines DLC-Systems (Kapitel 7) konnte ein nicht-providerbasiertes Kommunikationssystem realisiert werden, das sowohl für die autarke informationstechnische Vernetzung von dezentralen elektrischen Versorgungsstrukturen eingesetzt werden kann (Slave-to-Slave-Kommunikation), als auch eine direkte Kopplung mit IT-Komponenten ermöglicht (unterlagerte TCP/IP-Kommunikation in den dezentralen Ortsnetzen).

Der hier für die TCP/IP-Anpassung verwendete Ansatz, das jeweilige Protokoll inklusive des Overhead als Nutzdaten für das nächste Protokoll zu verwenden (TCP/IP → (C)SLIP → proprietär → DLC) reduziert maßgeblich die Leistungsfähigkeit (Performance) der Übertragung. In diesem Zusammenhang ist daher zu überlegen, ob eine Extraktion der reinen Nutzdaten aus dem TCP/IP-Datenstrom und deren anschließende Implementierung als Nutzdaten in das DLC-Protokoll möglich wäre. Die für die Rücktransformation der reinen Nutzdaten in einen TCP/IP-Datenstrom notwendigen Schritte müssten dann von den jeweiligen Gateway-Rechnern durchgeführt werden.

Auf der Ebene der Protokollumsetzung innerhalb der DLC-Controller ließe sich eine Verbesserung der Kommunikation dann erzielen, wenn überflüssige Wiederholungen reduziert bzw. gänzlich verhindert werden könnten.

Bei Ausnutzung der beschriebenen Optimierungspotenziale sind deutliche Steigerungen der Datenübertragungsrate zu erwarten, die im Bereich Faktor 3 bis 10 liegen könnten. Neben den softwaretechnischen Optimierungen könnte die Verwendung einer größeren Frequenzbandbreite (Steigerung von 10 auf 40 kHz) in einem anderen Frequenzbereich (150 bis 500 kHz) als auch der Einsatz des in der Herstellerentwicklung befindlichen zweiten Generation des DLC-Chips (DLC-Datenrate bis zu 288 kbps) zu einer Erhöhung der Datenrate führen.

Da während des Dissertationszeitraums kein reales Applikationsbeispiel für die Verwendung von DLC als ein Kommunikationssystem für den effizienten Einsatz in dezentralen elektrischen Versorgungsstrukturen vorlag, konnte das Nutzungspotenzial bisher nur unter Laborbedingungen im *Design-Zentrum Modulare Versorgungstechnik* analysiert werden. Es ist daher wünschenswert und erforderlich, die hier gesammelten Erfahrungen bzw. die Tauglichkeit des angepassten Kommunikationssystems in einem Feldversuch unter realistischen Bedingungen zu verifizieren.

Literaturverzeichnis

- [Afemann 01] U. Afemann: *Looking for a connection*. Entwicklung und Zusammenarbeit, Deutsche Stiftung für internationale Entwicklung, Vol. 42 No. 4, April 2001
- [Afrepren 04] African Energy Policy Research Network: *African Energy Data and Terminology Handbook, Year 2003 – 2004*. Occasional paper, No. 23, 2004
<http://www.afrepren.org>
- [Afrepren 04-1] African Energy Policy Research Network: *Energy Service for the Poor in Eastern Africa, Sub-Regional “Energy Access“ Study of East Africa*. No. 317, Juli 2004
<http://www.afrepren.org>
- [ASMARA 04] ASMARA: *Power distribution and rural electrification project*. Januar 2004
<http://web.worldbank.org>
- [Amin 04] M. Amin: *Protection Schemes & Communication Requirements*. Februar 2004
<http://www.citris-uc.org>
- [Arief 05] R. Arief: *Softwaretechnische Umsetzung und Überprüfung adaptiver Schutzkonzepte für elektrische Verteilnetze mit einem hohen Anteil verteilter, dezentraler, regenerativer Energieeinspeiser*. Diplomarbeit, Institut für Solare Energieversorgungstechnik, Kassel, 2005
- [Bartzsch 01] W. H. Bartzsch: *Betriebswirtschaft für Ingenieure*. VDE Verlag, Berlin, 7. Auflage, 2001
- [BdEv 03] Bund der Energieverbraucher e.V.: *Überlegungen und Berechnungen zur Netznutzung*. Dezember 2003
<http://www.energieverbraucher.de>
- [Bluschke 01] A. Bluschke, M. Matthews: *xDSL-Fibel-Telekommunikation aktuell*. VDE Verlag, Berlin, 2001
- [BMF 03] Bundesministerium der Finanzen: *Afa-Tabelle für allgemein verwendbare Anlagengüter* April 2003
<http://www.bundesfinanzministerium.de>
- [Bremsler 56] Bremsler: *Elektrische Leitungen und Leitungsnetze für Niederspannungsanlagen und ihre Berechnung*. Fachbuchverlag, Leipzig, 1956
- [Buchholz 05] B. M. Buchholz: *Netzwerk Energie und Kommunikation - Kommunikation im Verteilnetz*. Zehntes Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik: Die Zukunft der elektrischen Verteilnetze, Tagungsband, Kassel, 2005

- [Bundesnetzagentur 03] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen: *Verwaltungsvorschrift für Frequenzuteilung im Festen Funkdienst (VV-Richtfunk)*. RegTP 226, Stand 06.07.2004
<http://www.bundesnetzagentur.de>
- [Bundesnetzagentur 03-1] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen: *Frequenznutzungsplan nach §46 TKG über die Aufteilung des Frequenzbereichs von 9 kHz bis 275 GHz auf die einzelnen Frequenznutzungen sowie über die Festlegung für diese Frequenznutzungen*. RegTP, Stand April 2003
<http://www.bundesnetzagentur.de>
- [Bundesnetzagentur 04] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen: *Frequenzbereichzuweisungsplan*. Bundesgesetzblatt Teil I, Nr. 53, 2004
<http://www.bundesnetzagentur.de>
- [Bundesnetzagentur 06] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen: *Verwaltungsvorschriften für Frequenzuteilungen im nichtöffentlichen mobilen Landfunk (VVnömL)*.
<http://www.bundesnetzagentur.de>
Zugriff auf Internetdokument in 01/2006
- [CCG 04] Current Communication Group: *Current Technologies*. 2004
<http://www.currentgroup.com>
- [CONS 02] CONSENTEC, Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft der RWTH Aachen: *Preise und Bedingungen der Nutzung von Stromnetzen in ausgewählten europäischen Ländern*. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA), Abschlussbericht, Dezember 2002
<http://www.consentec.de>
- [CPN 06] CPN Satellite Services GmbH: *Systemübersicht: Systeme mit begrenzter Abdeckung, Systeme mit weltweiter Abdeckung*.
<http://www.cpn.de>
Letzter Zugriff auf Internetdokument in 03/2006
- [CRISP 02] CRISP: *Distributed Intelligence in Critical Infrastructures for Sustainable Power: Distributed generation as a means to increase system robustness*. ESSD Project ENK5-CT-2002-00673, 2002
- [Dahouenon 04] M. A. Dahouënou: *Technologieoptionen und Potenziale*. Informationstag Elektrifizierung im Senegal, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Eschborn, Februar 2005
- [DiaCon 04] DIALOG Consult GmbH: *DC-Bosnet-Studie 2004*. Mai 2004
<http://www.dialog-consult.com>

- [DIN 92] Deutsche Industrie-Norm: *Fernwirkeinrichtungen und Fernwirk-systeme, Anforderungen an die Leistungsmerkmale*. DIN 19 244-4, Oktober 1992
- [DIN 94] Deutsche Industrie-Norm: *Fernwirkeinrichtungen und -systeme, Teil 5: Übertragungsprotokolle, Hauptabschnitt eins: Telegramm-formate*. DIN EN 60870-5-1, Juli 1994
- [DIN 96] Deutsche Industrie-Norm: *Informationstechnik, Begriffe, Teil 9: Datenkommunikation*. Entwurf DIN ISO/IEC 2382-9, Juni 1996
- [DIN 03] Deutsche Industrie-Norm: *Grundlagen der Instandsetzung*. DIN 31051, Juli 2003
- [DIN 05] Deutsche Industrie-Norm: *Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe*. DIN EN ISO 9000, Ausgabe 12, 2005
- [Dintelmann 03] F. Dintelmann, H. Thomsen: *Berücksichtigung atmosphä-rischer Einflüsse bei der Planung von Richtfunkstrecken*. 19. Internationale Packet-Radio Tagung, Darmstadt, 2003
- [domologic 00] domologic: *Power-Line-Kommunikation im CENELEC-C-Band*. DOMOLOGIC Home Automation GmbH, 2000
- [Donnevert 94] J. Donnevert: *Richtfunkübertragungstechnik*. Oldenbourg Verlag, München, Wien, 1994
- [Dörsam 03] P. Dörsam: *Grundlagen der Entscheidungstherorie*. PD-Verlag, Heidenau, 4. Auflage, 2003
- [Dostert 99] K. Dostert: *Power Line Carrier (PLC)– Neue Möglichkeiten im Kabelnetz*. Elektrizitätswirtschaft, Heft 23, Jg. 98
- [Dostert 00] K. Dostert: *POWER LINE Kommunikation*. Francis Verlag GmbH, 2000
- [Dostert 00-1] K. Dostert: *Modulationsarten für die Powerline-Kommunikation*. Institut für Industrielle Informationstechnik, Universität Karlsruhe, 2000
<http://www.iit.uni-karlsruhe.de>
- [Emrich 02] C. Emrich et al.: *Supervisory control and data acquisition ex-periment using the advanced communications technology satellite*. Florida Solar Energie Center, 2002
<http://www.fsec.ucf.edu>
- [ELPRO 06] ELPRO Technologies: *Radio bands*.
<http://www.elprotech.com/elpro/radiobands.htm>
Zugriff auf Internetseite in 2006
- [Ericsson 02] G. N. Ericsson: *Classification of Power Systems Communications – Needs and Requirements: Experiences From Case Studies at Swedish Nation Grid*. IEEE Transactions on power delivery, Vol. 17, No. 2, April 2002

- [ESDEPS 02] ISET e.V., arsenal research, EAM AG, EnEtica S.L. : *EMC and Safety Design for Photovoltaic Systems*. Research funded in part by THE EUROPEAN COMMISSION in the framework of the Non Nuclear Energy Programme JOULE III, Publishable Final Report, Version: 28. March 2002
<http://www.iset.uni-kassel.de/esdeps>
- [FCC 04] Federal Communication Commission: *Carrier Current Systems, including Broadband over Power Line Systems*. 2004
<http://www.darc.de/aktuell/plc/pdf/fccpapier.pdf>
- [G8 01] G8: *Renewable Energy Task Force - Final Report*. Juli 2001
<http://www.worldenergy.org>
- [Galsterer 05] G. Galsterer: *Steuerungsebene: Fernwirken per GPRS*. Computer & Automation, 6. Ausgabe 2005
<http://www.elektroniknet.de>
- [Gavalda 03] O. Gavalda: *Tariff Structure Proposal For PV-Hybrid Systems*. 2. European PV-Hybrid and Mini-Grid conference, Kassel, 2003
<http://www.otti.de>
- [Göbel 99] J. Göbel: *Kommunikationstechnik*. Hüthig Verlag, Heidelberg, 2004
- [GSMWorld 06] GSM-World: *GSM-Subscriber statistics, 3. Q. 2005*. GSM-World, 2006
<http://www.gsmworld.com>
- [GSMWorld 06-1] GSM-World: *GSM-roaming: Tanzania*. GSM-World, 2006
<http://www.gsmworld.com>
- [Habieb 04] T. Habieb: *IT Basiskomponenten für ein dezentrales Energieversorgungssystem*. Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshafen, Diplomarbeit, 2004
- [Handelsblatt 05] A. Busch: *Rohstoffmärkte: China treibt den Kupferpreis von allen Seiten in die Höhe*. Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, 12.12.2005
<http://www.handelsblatt.com>
- [Halldorsson 98] U. R. Halldorsson, K. Dostert: *Modulation für Powerline*. Funkschau, Heft 6, 1998
- [Haas 02] O. Haas: *Kommunikation für dezentrale Stromversorgungssysteme* dissertation.de-Verlag im Internet, 2002
- [Heinrich 88] W. Heinrich: *Richtfunktechnik*. R. v. Decker's Verlag, 1988
- [iAd 01] Gesellschaft für Informatik, Automatisierung und Datenverarbeitung mbH: *Übertragungsleistung des DLC-100 Netzwerk Management Systems*. 2001
<http://www.iad-de.com>

- [iAd 04] Gesellschaft für Informatik, Automatisierung und Datenverarbeitung mbH: *High Performance Narrow Band Communication Controller MCM and Power Line Chipset*. 2004
<http://www.iad-de.com>
- [IDRC 96] The International Development Research Centre: *A Guide to Improving Internet Access in Africa*. August 96
http://www.idrc.ca/en/ev-11192-201-1-DO_TOPIC.html
- [IDRC 99] The International Development Research Centre: *The Wireless Toolbox, A Guide To Using Low-Cost Radio Communication Systems for Telecommunication in Developing Countries - An African Perspective*. Januar 1999
http://www.idrc.ca/en/ev-10592-201-1-DO_TOPIC.html
- [IDRC 06] The International Development Research Centre: *Acacia-Atlas Mapping African ICT growth*. Februar 2006
http://www.idrc.ca/en/ev-94196-201-1-DO_TOPIC.html
- [IEC 98] International Electrotechnical Commission: *Distribution automation using distribution line carrier systems: Mains signaling requirements-Frequency bands and output levels*. IEC 61334-3-1, 1. issue, November 1998
- [IEC 01] International Electrotechnical Commission: *Recommendation for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification: From requirements to a range of electrifications systems*. IEC 62257-2, Edition 1, November 2001
- [ITU 00] International Telecommunication Union: *Final report FG7: New technologies for rural application - Guidelines for Designing ICT's for rural Areas of Developing Countries*. 2000
http://www.itu.int/ITU-D/fg7/pdf/FG_7-e.pdf
- [ITU 00-1] International Telecommunication Union: *Estimated cost of GSM and UMTS networks* Gartner Dataquest, 2000
<http://www.itu.int>
- [ITU 04] International Telecommunication Union: *ITC-Statistics - Basic indicators: Population, GDP, total telephone subscribers and total telephone subscribers per 100 people*.
<http://www.itu.int/ITU-D/ict/statistics/>
Zugriff auf Internetdokument in 02/2006
- [ITU-R 06] International Telecommunication Union Radiocommunication: *FAQ: G013. What is meant by ISM applications and how are the related frequencies?*
<http://www.itu.int/ITU-R/terrestrial/faq/index.html#g013>
Zugriff auf Internetdokument in 01/2006
- [Jung 02] V. Jung, H.-J. Warnecke: *Handbuch für die Telekommunikation*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2. Auflage, 2002

- [Karl 97] M. Karl: *Möglichkeiten der Nachrichtenübertragung über elektrische Energieverteilnetze auf der Grundlage europäischer Normen*. VDI Verlag GmbH, 1997
- [Krsti 00] V. Krsti, M. Stojanovi: *Digital subscriber Technology: Network architecture, deployment problems and technology solutions*. Institut Mihajlo Pupin, Beograd, 2000
http://www.imp.bg.ac.yu/prez/lab300/white_paper.PDF
- [Kupfmüller 90] Kupfmüller: *Einführung in die theoretische Elektrotechnik*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1990
- [Lehner 03] F. Lehner: *Mobile und drahtlose Informationssysteme - Technologien, Anwendungen, Märkte*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2003
- [Lex 03] W. Lex: *Türme funken Füllstände - Fernwrikanlagen senden Daten sicher und störungsfrei zu günstigen Kosten*. ZfK-Zeitung für kommunale Wirtschaft, Juli 2003
<http://www.zfk.de/>
- [Leoxx 05] Leoxx IT-Solutions GmbH: *Angebot: VSAT-Station, satellite connectivity and internet access*. schriftl. Angebotsunterlagen, 25.02.2005
- [Marihart 01] D. J. Marihart: *Communications Technology Guidelines for EMS/SCADA Systems*. IEEE Transactions on power delivery, Vol. 16, No. 2, April 2001
- [Meel 99] J. Meel: *Spread Spectrum (SS)-Introduction*. de Nayer Instituut, Netherland, 1999
http://www.sss-mag.com/pdf/Ss_jme_denayer_intro_print.pdf
- [Meyer 02] M. Meyer: *Kommunikationstechnik, Konzepte der modernen Nachrichtenübertragung*. Vierweg Verlag, 2. Auflage, 2002
- [Mim 01] R. Mim: *Geht Bluetooth auf Kollisionskurs?* Elektronik Wireless, März 2001
- [ModIII 06] ISET, Universität Kassel: *Vernetzung modularer Systeme – Netzregelung zur wirtschaftlichen Optimierung dezentraler Energieversorgungsstrukturen mit hohem Anteil erneuerbarer Energiequellen*. Gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, FuE-Vorhaben Nr. 0329900B, Schlussbericht, Januar 2006
- [Neto 04] Maria Isabell A. S. Neto: *Wireless Networks for the Developing World: The Regulation and Use of Licence-Exempt Radio bands in Africa*. Massachusetts Institute of Technology, 2004
- [NEUK 05] Netzwerk Energie und Kommunikation: *Thematisches Netzwerk Energie und Kommunikation: EuK-Szenario-Netz*. April 2005
<http://www.netz-euk.org>

- [NEUK 05-1] Netzwerk Energie und Kommunikation: *Thematisches Netzwerk Energie und Kommunikation: Arbeitsgruppe 3: Energiemanagement und Betriebsführungsstrategien*. 2005
<http://www.netz-euk.org>
- [NEUK 05-2] Netzwerk Energie und Kommunikation: *AG3: Informationsbedarf II, Kommunikationsbedarf für 1/4-h-Energiemanagement* 2005
<http://www.netz-euk.org>
- [OAS 03] Organisation of American States: *The Renewable Energy Policy Manual*. A. J. Armstrong, J. Hamrin, U.S. Export Council for Renewable Energy
<http://www.oas.org>
Zugriff auf Internetdokument in 11/2003
- [REN21 05] Renewable Energy Policy Network: *Renewables 2005 Global Status Report*. Worldwatch Institute, Washington D.C., 2005
<http://www.ren21.net>
- [Rudolph 05] D. Rudolph: *Vielträger-Modulation-OFDM*. TFH Berlin, Telekom TT, IBH, 2005
<http://www.tfh-berlin.de>
- [Sanders 04] M. P. Sanders, R. E. Ray: *Power Line Carrier Channel and Application Consideration For Transmission Line Relaying*.
<http://www.pulsartech.com/pulsartech/docs/C045-P0597.pdf>
Zugriff auf Internetdokument in 2004
- [Sauter 05] T. Sauter, A. Treytl: *Security concept for a wide-area low-bandwidth power-line communication system*. REMPLI-Project, 2005
<http://www.rempli.org>
- [Scherff 99] B. Scherff et al.: *Feldbussysteme in der Praxis - Ein Leitfaden für Anwender*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1999
- [Schiller 03] J. Schiller: *Mobilkommunikation*. Addison-Wesley, Pearson Studium, 2. Auflage, 2003
- [Schle 03] V. Schlebusch et al.: *Multifunktionale Kommunikation im Niederspannungsnetz*. 8. Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik, Kassel, November 2003
- [Schle 04] V. Schlebusch et al.: *Mittelspannungsnetznachbildung zur Untersuchung verteilter elektrischer Versorgungssysteme*. 19. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2004
- [Schle 04-1] V. Schlebusch et al.: *Integration dezentraler Generatoren in das Verteilungsnetz-Pilot- u. Experimentieranlage im DeMoTec*. 9. Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik, Kassel, November 2004

- [Schle 06] V. Schlebusch et al.: *Adapted Medium Voltage Distribution Line Carrier Communication Systems for the Data Exchange between Decentralised Mini-Grids*. 3rd European PV-Hybrid and Mini-Grid Conference, Aix en Provence, Mai 2006
- [Schmid 01] J. Schmidt et al.: *Integration Erneuerbarer Energien in die Stromversorgung – Energie und Kommunikation*. ForschungsVerbund Sonnenenergie, FVS Themen, 2001
<http://www.fv-sonnenenergie.de>
- [Schmid 03] J. Schmidt et al.: *More than a light bulb – Minigrids for rural development and economic growth*. Renewable Energy World, Juli-August 2003
- [Schmid 03-1] J. Schmidt et al.: *Photovoltaik-Mininetze für die ländliche Entwicklung – Elektrizität abseits der Stromnetze*. Erneuerbare Energien, 12. Ausgabe, 2003
- [Schmid 05] J. Schmidt et al.: *Ländliche Elektrifizierung – ein integrativer Ansatz*. 20. Symposium Photovoltaik, Bad Staffelstein, März 2005
- [Schwaegerl 05] C. Schwaegerl: *Erfahrungsbericht Kommunikation „Konwerl“*. Technischer Bericht der AG2, Anlage 2, Netzwerk Energie und Kommunikation, 2005
<http://www.netz-euk.org>
- [Schwaegerl 05-1] C. Schwaegerl: *Erfahrungsbericht Kommunikation „Edison“*. Technischer Bericht der AG2, Anlage 3, Netzwerk Energie und Kommunikation, 2005
<http://www.netz-euk.org>
- [Shahidehpour 03] M. Shahidehpour, Y. Wang: *Communication and Control in Electric Power Systems: Applications of parallel and distributed processing*. Wiley-IEEE Press, 2003
- [Statistik 04] Statistische Ämter des Bundes und der Länder: *Fläche und Bevölkerung*. Stand 31.12.2004
<http://www.statistik-portal.de>
Zugriff auf Internetdokument in 01/2006
- [Tanenbaum 03] A. S. Tanenbaum: *Computer Networks*. Prentice Hall International Edition, 4. Edition, 2003
- [Thies 01] R. Thies: *Using GSM networks to provide fixed telephony. Providing Access for Underserved Communities*, ITU, 2001
www.itu.int/TELECOM/aft2001/cfp/auth/4686/pap_4686.pdf
- [TRASA 04] Telecommunication Regulators Association of Southern Africa: *Guidelines on Wireless Technologies Policy and Regulations*. Draft, 2004

- [Turczyk 04] L. A. Turczyk: *WLAN und UMTS – Konkurrenz oder Ergänzung? – Ein Systemvergleich*. Elektronik Wireless, Oktober 2004
<http://www.elektroniknet.de>
- [unhabitat 04] United Nations Human Settlements Programme: *Human Settlements Conditions and Trends*.
<http://www.unhabitat.org/habrdd/CONTENTS.html>
Zugriff auf Internetdokument in 2004
- [unstats 05] United Statistics Division: *Demographic and Social Statistics: Statistics and indicators on women and men*.
Januar 2005
<http://www.unstats.un.org>
- [usace 94] US Army Coprs of Engineers: *Manual: Communication Systems*. EM1110 – 2 – 3006, 1994,
<http://www.usace.army.mil/inet/usace-docs/eng-manuals/em1110-2-3006/c-10.pdf>
- [VDE 01] Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik: *Verteilungsautomatisierung mit Hilfe von Trägersystemen auf Verteilungsleitungen, Profil für erweiterte Frequenzsprungmodulation*. DIN EN 61334-5-1, Dezember 2001
- [VDE 01-1] Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik: *Verteilungsautomatisierung mit Hilfe von Trägersystemen auf Verteilungsleitungen, Netzbedingte Anforderungen an die Signalübertragung-Außenleiter-Erdleiter und eingefügte Schirm-Erdleiter-Ankopplungseinrichtungen für Mittelspannung*. DIN EN 61334-3-22, Dezember 2001
- [VDE 02] Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik: *Signalübertragung auf elektrischen Niederspannungsnetzen im Frequenzbereich 3 kHz bis 148,5 kHz*. DIN EN 50065-1, 2002
- [IAEW 04] Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft: *VDN-Störungsstatistik – Berichtsjahre 1994 bis 2001, Ermittlung von Eingangsdaten für Zuverlässigkeitsberechnungen aus der VDN-Störstatistik*. Stand: Juli 2004
<http://www.iaew.rwth-aachen.de/>
- [VDEW 03] Verband der Elektrizitätswirtschaft e.V.: *Stromverbrauch im Haushalt*. Stand 02.01.2003
<http://www.strom.de>
Zugriff auf Internetdokument in 01/2006
- [VDEW 01] Verband der Elektrizitätswirtschaft e.V.: *Powerline Communication Telekommunikation über 50-Hz-Netze*. VDEW Energieverlag GmbH, Frankfurt am Main, 2001
- [VDI 02] Verein Deutscher Ingenieure: *Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik*. VDI/VDE 2185, Richtlinie (Entwurf), Juni 2002

- [WBGU 03] Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen: *Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2003
- [WCDM 05] World Cellular Data Metrics: *World Cellular Data Metrics Map*. Juni 2005
- [Wiesner 01] T. Wiesner: *Technische Aspekte einer großflächigen Integration dezentraler Energieversorgungsanlagen in elektrischen Verteilungsnetzen*. Universität Dortmund, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Dissertation, 2001
- [World 01] The World Bank: *Best Practice Manual: Promoting Decentralized Electrification Investment*. ESMA Paper, ESM No. 248, 2001
<http://www-wds.worldbank.org>
- [World 02] The World Bank: *World Development Report 2003: Sustainable Development In A Dynamic World*. Washington D.C. , 2002
<http://www-wds.worldbank.org>
- [WEO 02] World Energy Outlook: *World Energy Outlook 2002, Energy and Poverty*.
<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2000/weo2002.pdf>
- [Zimmermann 00] M. Zimmermann, K. Dostert: *A Multipath Model for the Powerline Channel*. IEEE Transaction on communication, Vol. 50, 2000
- [Zinke 95] O. Zinke, H. Brunswig: *Hochfrequenztechnik 1*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1995
- [zintec 05] zintec: *RAMS Begriffe, typische Fragestellungen und gebräuchliche Kenngrößen*.
zintec Zuverlässigkeitstechnik, 2005,
<http://www.zintec.ch>
- [Zoomers 01] A. N. Zoomers:
Rural electrification - Utilities' Chafe or Challenge? Twente University Press, Enschede, 2001

Glossar

A	<i>Einheit der elektrischen Stromstärke Ampere</i>
Abk.	<i>Abkürzung</i>
abs.G.	<i>absoluter Gewichtungsfaktor</i>
Al	<i>chemisches Symbol für Aluminium</i>
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i>
ARP	<i>Address Resolution Protocol</i>
ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i>
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
Bd	<i>Einheit der Schrittgeschwindigkeit Baud</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BGAN	<i>Broadband Global Area Network</i>
BMBF	<i>Bundesministerium für Bildung und Forschung</i>
BMF	<i>Bundesministerium der Finanzen</i>
BMU	<i>Bundesministerium für Umwelt und Reaktorsicherheit</i>
BOS	<i>Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben</i>
BPL	<i>Broadband-over-power-line</i>
BPL	<i>Broadband-Power-Line</i>
bps	<i>bit per second</i>
BTS	<i>Base Transceiver Station</i>
bzgl.	<i>bezüglich</i>
bzw.	<i>Beziehungsweise</i>
C	<i>elektrische Kapazität</i>
ca.	<i>circa</i>
CENELEC	<i>European Committee for Electrotechnical Standardization</i>
CEPT	<i>European Conference of Postal and Telecommunications Administrations</i>
CSLIP	<i>SLIP-Variante mit Van-Jacobsen-Header-Komprimierung</i>
CSMA	<i>Carrier Sense Multiple Access</i>
CSMA/CD	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection</i>
dB	<i>Dezibel</i>
DB	<i>Datenbank</i>
DER	<i>Distributed Energy Resource</i>
DFT	<i>Diskrete Fourier Transformation</i>
DIN	<i>Deutsche Industrie-Norm</i>
d.h.	<i>das heißt</i>
DLC	<i>Distribution Line Carrier</i>

DNS	<i>Domain Name System</i>
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
DSP	<i>Digitaler Signalprozessor</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
EAM	<i>Energie AG Mitteldeutschland</i>
EIB	<i>European Installation Bus</i>
EIRP	<i>Equivalent Isotropic Radiated Power</i>
engl.	<i>Englisch</i>
EMV	<i>Elektromagnetische Verträglichkeit</i>
ERP	<i>Equivalent Radiated Power</i>
etc.	<i>et cetera</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
F	<i>Einheit der Kapazität: Farad</i>
FCC	<i>Federal Communication Commission</i>
FDDI	<i>Fiber Distributed Data Interface</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transformation</i>
FHSS	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>
FKZ	<i>Förderkennzeichen</i>
FreqNP	<i>Frequenznutzungsplan</i>
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
GEO	<i>Geostationary Earth Orbit</i>
GHz	<i>Gigahertz</i>
GMPCS	<i>Global Mobile Personal Communications Services</i>
GPRS	<i>General Packer Radio Service</i>
GSM	<i>Global System for Mobil Communication</i>
H	<i>SI-Einheit der Induktivität: Henry</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
HSCSD	<i>High Speed Circuit Switched Data</i>
Hz	<i>Zeichen für die Einheit Hertz</i>
ICMP	<i>Internet Control Message Protocol</i>
IDFT	<i>Inverse Diskrete Fourier Transformation</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
Inmarsat	<i>International Maritime Satellite</i>
IPC	<i>Inter Process Communication</i>
ISDN	<i>Integrated Services Digital Network</i>

ISI	<i>Inter Symbol Interference</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
IT	<i>Informationstechnologie</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
ITU-R	<i>International Telecommunication Union–Radio-communication</i>
kbps	<i>kilobit per second</i>
kHz	<i>Kilohertz</i>
km	<i>Längeneinheit: Kilometer</i>
KNX	<i>Konnex</i>
K.o.	<i>Knock-out</i>
kW	<i>Kilowatt</i>
kWh	<i>Kilowattstunde</i>
L	<i>elektrische Induktivität</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LEO	<i>Low Earth Orbit</i>
LoS	<i>Line of Sight</i>
μ F	<i>Mikrofarad</i>
m	<i>Längeneinheit: Meter</i>
Mbps	<i>Megabit per second</i>
MEO	<i>Medium Earth Orbit</i>
MHz	<i>Megahertz</i>
MIDR	<i>Multifunktionale Intelligente Digitalrelais</i>
min	<i>Zeiteinheit: Minute</i>
M2M	<i>Machine-to-Machine</i>
MNN	<i>Mittelspannungsnetznachbildung</i>
MS	<i>Mittelspannung</i>
MS	<i>Mobil Station</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failure</i>
MTTR	<i>Mean Time To Restoration</i>
mV	<i>Millivolt</i>
N	<i>Notenwert</i>
NB	<i>Nutzungsbestimmung</i>
NFS	<i>Network File Service</i>
NMS	<i>Netzwerk-Management-System</i>
NS	<i>Niederspannung</i>
Ω	<i>Einheit des elektrischen Widerstands</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplex</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>

PDC	<i>Personal Digital Cellular</i>
PLC	<i>Power Line Carrier</i>
PLC-System	<i>Power Line Communication-System</i>
PPP	<i>Point to Point Protocol</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
PTP	<i>Point To Point</i>
pty	<i>Pseudo-Terminal</i>
PV	<i>Photovoltaik</i>
PVC	<i>Polyvinylchlorid</i>
R	<i>elektrischer Widerstand</i>
RAMS	<i>Reliability, Availability, Maintainability, Safety</i>
RARP	<i>Reverse Address Resolution Protocol</i>
RegTp	<i>Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post</i>
rel.G.	<i>relativer Gewichtungsfaktor</i>
RPC	<i>Remote Procedure Call</i>
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>
S-FSK	<i>Spread Frequency Shift Keying</i>
SI	<i>Internationales Einheitensystem</i>
SLIP	<i>Serial Line Internet Protocol</i>
SMTP	<i>Simple Mail Transfer Protocol</i>
SNMP	<i>Simple Network Management Protocol</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SS	<i>Spread Spectrum</i>
St	<i>Symbol für Stahl</i>
T€	<i>tausend Euro</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TNC	<i>Technical Node Controller</i>
TRT	<i>Tonfrequenzrundsteuertechnik</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UCTE	<i>Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications Systems</i>
US\$	<i>Währungseinheit der USA (Dollar)</i>
USDC	<i>US Digital Cellular System</i>
V	<i>Einheit der elektrischen Spannung Volt</i>
VDE	<i>Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik</i>

VDI	<i>Verein Deutscher Ingenieure</i>
vgl.	<i>vergleiche</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VSAT	<i>Very Small Aperture Terminal</i>
W	<i>Einheit der Leistung: Watt</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
X.25	<i>standardisierte Protokollfamilie für großräumige Computernetze über das Telefon-Netzwerk</i>
XDR	<i>External Data Representation</i>
z.B.	<i>zum Beispiel</i>

Formelzeichen

a	<i>Freiraumdämpfung</i>
A_B	<i>jährliche Gesamtkosten des Bezugssystems</i>
A_k	<i>jährliche Gesamtkosten des k-ten Kommunikationssystems</i>
A_k^{relativ}	<i>relativer Kostenzuwachs des k-ten Kommunikationssystems,</i>
A_p	<i>vorausgesagte Verfügbarkeit</i>
B	<i>Frequenzspektrum</i>
d	<i>Abstand zwischen den Transceivern</i>
$d_{1,2}$	<i>Abstände der Transceiver zum aktuellen Betrachtungspunkt</i>
$D_i(t)$	<i>digitale Teilsignale</i>
$D_{NA}(t)$	<i>digitale Nachrichtensignal</i>
δ	<i>Eindringmaß</i>
E_B	<i>Erwartungsnutzen des Bezugssystems</i>
E_k	<i>Erwartungsnutzen des k-ten Kommunikationssystems</i>
E_k^{relativ}	<i>relativer Erwartungsnutzenzuwachs des k-ten Kommunikationssystems</i>
f	<i>Frequenz</i>
$f_{i_k}(N_o)$	<i>Nutzwert der Noten N_o des i-ten Bewertungskriteriums und des k-ten Kommunikationssystems</i>
f_k	<i>konservative Nutzenfunktion</i>
f_n	<i>neutrale Nutzenfunktion</i>
f_p	<i>progressive Nutzenfunktion</i>
Δf	<i>Frequenzbreite der Subkanäle</i>
G_i	<i>relativer Gewichtungsfaktor des i-ten Bewertungskriteriums</i>
i	<i>Laufvariable für die Anzahl der Bewertungskriterien</i>
n	<i>Anzahl der Bewertungskriterien</i>
N_o	<i>Notenwert</i>
N	<i>Anzahl der Subkanäle</i>
ω	<i>Kreisfrequenz</i>
r_F	<i>Abstand der Ellipse zur Sichtlinie</i>
$si(x)$	<i>si-Funktion: $\frac{\sin(x)}{x}$</i>
σ	<i>spezifische Leitfähigkeit</i>
T_{Symbol}	<i>Symboldauer der Subkanäle</i>
μ	<i>absolute magnetische Permeabilität</i>
$X_{\text{OFDM}}(t)$	<i>OFDM-Multicarrier-Signal</i>
$X_{\text{Multicarrier}}(t)$	<i>Multicarrier-Signal</i>

Abbildungsverzeichnis

2.1	Zu überbrückende Entfernung (Mittelspannungsebene) zum öffentlichen Elektrizitätsnetz in Abhängigkeit der zu versorgenden Personenanzahl, Beispiel: Senegal; Datenquelle: [Dahouenon 04]	6
2.2	Verteilung der ländlichen Bevölkerungsdichte weltweit; Quelle: [World 02] (modifiziert)	6
3.1	Flussdiagramm: Gesamtdarstellung der erforderlichen Schritte bis zur Entscheidungsfindung	15
3.2	Beispieldarstellung: topogr. Abhängigkeit und Fresnel-Zone; Quelle [ModIII 06]	25
3.3	Flussdiagramm: Bewertungstyp (2. Schritt des Entscheidungsprozesses)	29
3.4	Auswahlkurve zur Benotung des Bewertungskriteriums <i>Teilnehmeranzahl</i>	34
3.5	Auswahlkurve zur Benotung des Bewertungskriteriums <i>Duty Cycle</i>	36
3.6	Flussdiagramm: Nutzenfunktion (4. Schritt des Entscheidungsprozesses)	40
3.7	Verlauf der ausgewählten Nutzenfunktionen	41
3.8	Flussdiagramm: Erwartungsnutzen (6. Schritt des Entscheidungsprozesses)	45
3.9	Flussdiagramm: Auswahl des Bezugssystems (8. Schritt des Entscheidungsprozesses)	48
3.10	4-Quadranten-Entscheidungsmatrix: Darstellung des Erwartungsnutzen- und jährlichen Gesamtkostenzuwachs für sieben Beispielsysteme	50
3.11	4-Quadranten-Entscheidungsmatrix: Darstellung des Erwartungsnutzen- und jährlichen Gesamtkostenzuwachs (1. Iterationsschleife)	52
4.1	Telefonleitungen in Afrika; Quelle: [IDRC 06]	54
4.2	Zuwächse an installierten Telefonleitungen in Europa und Afrika, Datenquelle: [ITU 04]	55
4.3	Zuwachs an GSM-Teilnehmern; Datenquelle: [GSMWorld 06]	60
4.4	GSM-Netzabdeckung und Dienste in Afrika (Stand: 2005); Quelle: [GSMWorld 06], [WCDM 05]	60
4.5	Status der Lizenzvergabe für VSAT-Systeme in Afrika, Quelle: [IDRC 06]	63
5.1	Lizenzfreie Nutzung des 2,4 GHz-ISM-Band in Afrika, Quelle: [Neto 04]	69
5.2	PLC-Nutzungsübersicht	75
5.3	maximaler Einspeisepegel gemäß DIN EN 50065-1	76
5.4	Impedanzverlauf für unterschiedliche Zeitpunkte; Quelle: [ESDEPS 02]	78
5.5	Prinzipdarstellung: Aufteilung des Frequenzraumes in Subkanäle	80
5.6	Prinzipdarstellung: OFDM-Spektrum	81
5.7	Messung des komplexen OFDM-Spektrums	82
5.8	OFDM-Übertragungssystem, Quelle: [Halldorsson 98], (modifiziert)	82

5.9	Mehrwegeempfang, Quelle: [Schiller 03], (geändert)	83
6.1	Struktur des Beispielszenarios (Versorgungs- und Kommunikationsnetz)	86
6.2	4-Quadranten-Matrix für das Beispielszenario: konservative Nutzenfunktion	92
6.3	4-Quadranten-Matrix für das Beispielszenario: neutrale Nutzenfunktion	92
6.4	4-Quadranten-Matrix für das Beispielszenario: progressive Nutzenfunktion	93
6.5	4-Quadranten-Matrix für reduzierte Systemauswahl inkl. Repeater: konservative Nutzenfunktion	94
6.6	4-Quadranten-Matrix für reduzierte Systemauswahl inkl. Repeater: progressive Nutzenfunktion	94
7.1	Strukturübersicht des Mittelspannungs- und Kommunikationsnetzes (Testinfrastruktur)	96
7.2	Dämpfungsverhalten der Freileitungsnachbildung (Al-St 35/6) für unterschiedliche Längenparametrierungen	98
7.3	Dämpfungsverhalten der Kabelnachbildung (Al-1x25) für unterschiedliche Längenparametrierungen	99
7.4	Messung der Signalverstärkung in NS- und MS-Richtung	100
7.5	Messung des SNR bei Anschluss an das öffentliche NS-Netz; Messeinrichtung: DLC-100 Configuration & Test	101
7.6	Messung des SNR bei Anschluss an das öffentliche NS-Netz und PV-Wechselrichter; Messeinrichtung: DLC-100 Configuration & Test	102
7.7	Messung des SNR bei Anschluss von Klein-WKA und Batteriestromrichter; Messeinrichtung: DLC-100 Configuration & Test	102
7.8	Informationsaustausch zwischen DLC-Endpunkten	104
7.9	Visuelle Darstellung der Routing-Wege für den Informationsaustausch zwischen den LAN's	107
7.10	Prinzipdarstellung: Gateway-Rechneranpassung für TCP/IP-Übertragung	109
7.11	Übertragungszeiten für Datenbank 2 bzw. 3-Abfragen	114
7.12	Häufigkeitsverteilung für Datenbankabfragen DB 2 und DB 3	115

Tabellenverzeichnis

2.1	Haushaltsgröße und Haushaltseinkommen ausgewählter Entwicklungsländer; Quelle: [unhabitat 04]	7
2.2	Durchschnittliche Elektrizitätsverbrauch, pauschalisierte Tarife und Elektrizitätskosten für ausgewählte Länder der Sub-Sahara-Zone; Quelle: [Afrepren 04-1], [Afrepren 04], [ASMARA 04]	9
2.3	Typische Energiekosten pro Kilowattstunde aus erneuerbaren und fossilen Energiequellen, Off-Grid (ländlich); Quelle (Auszug): [REN21 05]	10
3.1	Kommunikationsaufwand in der Schutztechnik, Quelle: [Amin 04]	20
3.2	Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums <i>Systemdienstleister</i>	29
3.3	Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums <i>Schnittstellendefinition</i>	30
3.4	Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums <i>Systemstandardisierung</i>	30
3.5	Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums <i>Marktdurchdringung</i>	30
3.6	Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums <i>Zuverlässigkeit</i>	31
3.7	Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums <i>Verfügbarkeit</i>	31
3.8	Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums <i>Datenintegrität</i>	32
3.9	Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums <i>Nutzdatenübertragungsrates</i>	32
3.10	Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums <i>Effizienz</i>	33
3.11	Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums <i>Übertragungsdistanz</i>	33
3.12	Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums <i>Bandbreite</i>	35
3.13	Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums <i>Frequenznutzung</i>	36
3.14	Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums <i>topografische Abhängigkeit (Einschränkung)</i>	37
3.15	Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums <i>klimatische Abhängigkeit (Einschränkung)</i>	37
3.16	Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums <i>Interaktionsrichtung</i>	37
3.17	Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums <i>Betriebsart</i>	38
3.18	Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums <i>Integrationsaufwand</i>	38
3.19	Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums <i>Instandhaltungsaufwand</i>	39
3.20	Auswahlliste zur Benotung des Bewertungskriteriums <i>Aufwand für Systemerweiterung</i>	39
3.21	Absolute und relative Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien für das Applikationsumfeld <i>dezentrale Versorgungsstrukturen</i>	43
4.1	Datenraten und maximale Übertragungsdistanzen für unterschiedliche DSL-Varianten; Quelle: [Krsti 00],[Bluschke 01]	54
4.2	Systemparametervergleich: GSM900 - GSM1800; Datenquelle: [Schiller 03], [Jung 02], [Göbel 99]	57

4.3	Verzögerungsklassen und -zeiten für GPRS: maximale Durchschnitt und 95 %-Quantil, Quelle: [Schiller 03]	59
4.4	Systemparameter und typische Kosten für Globalstar, Thuraya und Iridium; Quelle: [Lehner 03], [Schiller 03], [CPN 06]	62
5.1	Auswahl von ISM-Frequenzbereichen, die überwiegend für Kommunikationszwecke genutzt werden	68
5.2	Typische Parameter und Kennwerte für Funksysteme im 869 bzw. 459 MHz Bereich; Quelle: [Bundesnetzagentur 06], [VDI 02]	71
5.3	Typische Parameter und Kennwerte für verschiedene Bussysteme (Zellen- und Feldbus) Quelle: [Scherff 99]	73
5.4	Bewertungsübersicht von DLC-Modulationsverfahren, Quelle: [CCG 04]	85
6.1	Technische Parameter und Eigenschaften der Beispielsysteme	88
6.2	Resultierender Erwartungsnutzen der zur Auswahl stehenden Systeme bei Verwendung unterschiedlicher Nutzenfunktionen	89
6.3	Kostenübersicht der zur Auswahl stehenden Kommunikationssysteme	90
6.4	Gesamtkosten und jährliche Ausgaben der zur Auswahl stehende Systeme	91
6.5	Relativer Erwartungsnutzen- und Kostenzuwachs (Bezugssystem: Mittelwertbildung der Beispielsysteme)	91
7.1	Längenabhängige Parametrierungsdaten der MNN für Freileitung und Kabel	97
7.2	TCP/IP-Referenzmodell	103
7.3	Zuordnung der Gateway-Adressen	106
7.4	Logische Verknüpfung der Gateway-Schnittstellen	106
7.5	Zuordnung: Gateway-Netzwerkschnittstelle und Pseudo-Terminal	108
7.6	Zieladressenzuordnung	110
7.7	Datenrate des modifizierten DLC-Systems	111