



Auslegung heterogener Kommunikationsnetze nach Performance und Wirtschaftlichkeit

Andreas Bley, Adrian Zymolka

Konrad-Zuse-Institut für Informationstechnik Berlin, Abteilung Optimierung
Takustraße 7, D-14195 Berlin
Tel.: +49 30 84185-229, +49 30 84185-248 Fax: +49 30 84185-269
e-mail: bley@zib.de, zymolka@zib.de

Friederich Kupzog

Institut für Computertechnik, TU Wien
Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien
Tel.: +43 1 58801 38424 Fax: +43 1 58801 38499
e-mail: kupzog@ict.tuwien.ac.at

Zusammenfassung

In zukünftigen elektrischen Verteilnetzen wird Datenkommunikation eine signifikante Rolle spielen, insbesondere bei der Koordination verteilter Erzeuger und für eine effiziente Realisierung von Demand Side Management (DSM). Das Design einer geeigneten Kommunikationsinfrastruktur für diese Zwecke ist aufgrund der Forderung nach einer kostenoptimalen Implementation, der Größe des Systems und der Anzahl möglicher Alternativen eine nicht-triviale Aufgabe. In diesem Beitrag wird ein mathematisches Modell zur kosteneffektiven Auslegung heterogener Kommunikationsnetze vorgeschlagen. Das Modell ist in der Lage, unter Berücksichtigung der technischen und wirtschaftlichen Parametern der einzelnen Technologien, wie Installationskosten, Betriebskosten, Bandbreite, Reichweite etc., der geografischen Gegebenheiten und der Kommunikationsanforderungen der Teilnehmer die optimale Netzauslegung für ein gegebenes Szenario zu bestimmen. Außerdem ermöglicht das Modell eine Abschätzung der Kapazitätsgrenzen des Kommunikationsnetzes, und ist damit auch bei Kosten-Leistung Abwägungen im Rahmen von Szenarioanalysen hilfreich.



Abstract

Future electricity distribution systems will significantly rely on a supporting communication infrastructure, e.g. for coordinating Distributed Generation (DG) or Demand Side Management (DSM) measures. The design of such a communication infrastructure is a non-trivial task due to demand for cost-effectiveness and the large number of connected entities (size of the system). This paper presents a mathematical model for the cost-effective design of heterogeneous communication networks. The model is able to determine the optimal system design under various constraints such as available communication technologies, geographical situation, bandwidth and latency demands, installation costs, operation costs etc. Furthermore, the model is able to calculate the bandwidth capacities on individual communication links for a given system and therefore can be used for a consideration of performance versus costs.

1 Einleitung

Die zunehmende Dezentralisierung nationaler und internationaler Elektrizitätssysteme aufgrund der steigenden Nutzung regenerativer Energieträger bringt einen steigenden Koordinationsbedarf mit sich. Die bisherige Struktur der Versorgungsnetze lässt die Integration von verteilten Erzeugern nur in beschränktem Maße zu /Ackermann 2004/. Kommunikation ist hier der Schlüssel zur Erhöhung der realisierbaren Dichte von verteilter Erzeugung /Buchholz+ 2006/. Gleichzeitig führen auch die von der EU forcierten Maßnahmen zur Effizienzsteigerung wie koordiniertes Last-Management (LM) oder Demand Side Management (DSM) zu einem höheren Kommunikationsbedarf /Ver+ 2003/. Die zukünftige Energieversorgung wird daher nicht mehr ohne eine parallele Kommunikationsinfrastruktur auskommen.

Die Errichtung eines vollständig neuen, zur Erfüllung der zukünftigen Aufgaben ideal ausgelegten Kommunikationssystems zur Anbindung aller Netzteilnehmer ist aus wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll. Nur die weitgehende Nutzung vorhandener Technologien erlaubt den Aufbau eines kosteneffizienten Kommunikationsnetzes. Das heißt insbesondere, dass je nach Verfügbarkeit, Performanceanforderungen und Kosten verschiedene Übertragungstechnologien gleichzeitig in das Netz eingebunden sein können, wie etwa Wähl- oder Festverbindungen über ISDN, GSM/UMTS Funkverbindungen, oder Power Line Carrier (PLC) Verbindungen. Darüber hinaus bestehen zukünftige elektrische (Verteil-)netze aus einer Vielzahl verschieden großer Einspeiser und Abnehmer mit teilweise sehr unterschiedlichen kommunikationstechnischen Anforderungen. Welche Technologie für welchen Abschnitt technisch und wirtschaftlich sinnvoll ist, hängt somit stark von der Art der anzubindenden Teilnehmer ab.



Es stellt sich die Frage, welche der möglichen Technologien auf welchen Abschnitten eingesetzt werden sollen, so dass das resultierende Kommunikationsnetz den technischen und geografischen Randbedingungen sowie den zur Realisierung der Kommunikationsaufgaben nötigen Anforderungen entspricht, seine Gesamtkosten dabei aber so gering wie möglich sind. Dieser Beitrag stellt ein mathematisches Modell zur Lösung dieses Planungsproblems vor. Das Modell ist in der Lage, unter Berücksichtigung der technischen und wirtschaftlichen Parametern der einzelnen Technologien, wie Installationskosten, Betriebskosten, Bandbreite, Reichweite etc., der geografischen Gegebenheiten, und der Kommunikationsanforderungen der Teilnehmer die optimale Netzauslegung für ein gegebenes Szenario zu bestimmen. Außerdem ermöglicht das Modell eine Abschätzung der Kapazitätsgrenzen des Kommunikationsnetzes, und ist damit auch bei Kosten-Leistung Abwägungen im Rahmen von Szenarioanalysen hilfreich.

2 Problembeschreibung

Die planerische Aufgabe besteht darin, ein kostenminimales Kommunikationsnetz zwischen den verschiedenen Teilnehmern des elektrischen Netzes zu entwerfen, über das sich alle geforderten Kommunikationsaufgaben realisieren lassen. In erster Linie ist dabei zu entscheiden, welche Verbindungen zwischen den Standorten eingerichtet und welche Übertragungstechnologien auf diesen Verbindungen verwendet werden sollen.

Zwei Faktoren spielen hierbei eine wesentliche Rolle: die zu erfüllenden Kommunikationsanforderungen und die potentiell nutzbaren Kommunikationstechnologien. Die Anforderungen beschreiben, welche minimalen Bandbreiten und maximalen Latenzzeiten zwischen den Teilnehmern zur Realisierung der verschiedenen Kommunikationsaufgaben zu gewährleisten sind. Die Eigenschaften der potentiellen Kommunikationstechnologien (insbesondere deren Latenz, Verfügbarkeit, Bandbreite und Kosten) entscheiden darüber, welche Technologien für welche Verbindungen technisch verwendbar und wirtschaftlich sinnvoll sind.

2.1 Kommunikationsanforderungen

Grundsätzlich wird die Kommunikation zwischen einer zentralen Instanz (im Folgenden als „Zentrale“ bezeichnet) und den einzelnen Netzteilnehmern betrachtet. Die Kommunikationsanforderungen zwischen den Netzteilnehmern und der Zentrale ergeben sich aus den Kommunikationsaufgaben, die über das Netz realisiert werden sollen. Sie können für unterschiedliche Teilnehmertypen sehr stark variieren. Generell lassen sich verschiedene Informationsklassen identifizieren, die typischerweise bei der Betriebsführung des elektrischen Netzes übertragen werden müssen. Dies sind einerseits Einzelwertübertragungen (Stellwerte zum Endgerät bzw. Messwerte vom Endgerät), die in be-



stimmter zeitlicher Verteilung übertragen werden, sofern die zeitlichen Anforderungen der zugrunde liegenden Regelprozesse unkritisch sind, oder Soll- bzw. Messwertprofile, die in regelmäßigen Intervallen übertragen werden und als Kennlinienvorgabe zur lokalen Regelung (Sollwerte) bzw. zur späteren Auswertung (Abrechnung, Betriebsplanung) dienen.

Zur Bestimmung der übertragenden Datenmenge müssen die Anforderungsprofile der verschiedenen Kommunikationsaufgaben für jeden Teilnehmer überlagert werden. Da die zeitliche Verteilung insbesondere der Einzelwert-Übertragungen nur sehr ungenügend beschrieben werden kann, ist es sinnvoll, verschiedene Szenarien zu definieren, die unterschiedliche Betriebszustände wie z.B. Normalfall, Störfall im Mittelspannungsnetz, Inselbetrieb, o.ä. widerspiegeln. Innerhalb dieser Szenarien lassen sich die Auftrittswahrscheinlichkeiten bestimmter Nachrichtentypen genauer bestimmen. Tabelle 1 zeigt beispielhaft die Anforderungsprofile für unterschiedliche Teilnehmertypen im Normalfall-Szenario. Aus diesen Anforderungsprofilen ergeben sich unter Berücksichtigung der für jede Informationsklasse geforderten maximalen Übertragungszeit und der zur Übertragung genutzten Protokolle Netto-Bandbreiten-Kommunikationsbedarfe wie in Tabelle 2. Dabei ist zu beachten, dass für unterschiedliche Teilnehmer und Aufgaben evtl. unterschiedliche Protokolle genutzt werden /Buchholz+ 2006/.

Tabelle 1: Beispiel für die Kommunikationsanforderungen unterschiedlicher Teilnehmer im Normalfall-Szenario

Teilnehmer	Meldungen / Tag	Meldungen / 15 Min	Meldungen spontan
PV und WKA	1 Sollwertprofil	1 Messwert	1 Status, 1 Befehl
BHKW	1 Sollwertprofil	4 Messwerte, 1 Messwertfeld	1 Status, 1 Befehl
Thermischer und Batteriespeicher	1 Sollwertprofil	2 Messwerte	1 Status
Spitzenlastbrenner	1 Sollwertprofil	1 Sollwert	1 Status, 1 Befehl
Trafo		1 Messwert	
Haushalt		2 Messwerte, 1 Messwertfeld	1 Status
Regelbare Last	1 Sollwertprofil	2 Messwerte, 1 Messwertfeld	1 Status, 1 Befehl

2.2 Kommunikationsmedien und Netzstruktur

Prinzipiell können alle technisch verfügbaren Übertragungstechnologien und –medien zum Aufbau des Kommunikationsnetzes genutzt werden. Sieht man vom Einsatz speziell auf unzuverlässige Medien zugeschnittener Regelkonzepte ab, so fällt jedoch eine Reihe von Kommunikationstechnologien aufgrund zu hoher Latenzen oder zu geringer



Zuverlässigkeit von vornherein weg. Eine Modem-Wählverbindung ist z.B. bei einer geforderten maximalen Latenz von 2 Sekunden für zeitkritische Fehlermeldungen oder Schaltbefehle nicht einsetzbar. Andere Medien, wie etwa Modem-Standleitungen oder Richtfunkstrecken, fallen a priori aufgrund zu hoher Kosten weg. Eine genaue Analyse der unterschiedlichen in diesem Zusammenhang in Frage kommenden Medien wird in /Ausburg+ 2006/ gegeben.

Da sämtliche Teilnehmer mit einer einzelnen Zentrale kommunizieren, ist es sinnvoll, das reale Kommunikationsnetz in einer hierarchischen Baumstruktur aufzubauen. Auf der obersten Ebene befindet sich die Zentrale, die unterste Ebene umfasst alle Netzteilnehmer. Zusätzlich werden eine oder mehrere Verteilschichten eingefügt. Meist ist es zweckmäßig, diese in Analogie zu den Verteilschichten des elektrischen Netzes zu wählen /Vver+ 2003/, so daß die Standorte für Transformatoren auch Sammelstellen für Kommunikationskanäle sind. An einem Ortsnetztransformator können so beispielsweise die über schmalbandiges PLC angebundene Endverbraucher gesammelt werden und von hier über ein breitbandigeres Medium zusammen mit den gebündelten Kanälen aus anderen Ortsnetzen an die nächsthöhere Ebene angebunden werden.

3 Mathematisches Modell

Um mathematische Methoden zur Lösung der praktischen Optimierungsproblems einsetzen zu können, ist es nötig, das Problem zunächst abstrakt in einem Modell aus Parametern, Variablen, Nebenbedingungen und einer Zielfunktion darzustellen. Für kombinatorische Optimierungsprobleme, wie die oben beschriebene Kommunikationsnetzplanung, haben sich gemischt-ganzzahlige lineare Programme als sehr geeignet erwiesen. Dabei werden ganzzahlige Variablen zur Abbildung der diskreten Entscheidungen verwendet, beispielsweise für die Anzahl der zu installierenden Geräte eines bestimmten Typs an einem Standort. Kontinuierliche Variablen werden für Entscheidungen verwendet, bei denen auch gebrochene Werte zulässig sind, wie etwa den Datenflüssen über einzelne Verbindungen. „Ja/Nein“-Entscheidungen werden durch 0/1-Variablen abgebildet, einen Spezialfall der ganzzahligen Variablen. Die Nebenbedingungen des Problems werden ausschließlich durch lineare Gleichungen oder Ungleichungen beschrieben. Im folgenden stellen wir ein solches Modell für oben beschriebene Kommunikationsnetzplanung vor.

3.1 Parameter

Ein konkretes Planungsproblem kann durch seine Standorte, die Menge der zu berücksichtigenden Szenarien mit ihren jeweiligen Kommunikationsbedarfen sowie den verfüg-



baren Medien und prinzipiell möglichen Verbindungen beschrieben werden. Diese Eingangsdaten entsprechen den folgenden Modellparametern.

S	Menge aller berücksichtigten Betriebszustände (Normalfall, Störfall,...)
V	Menge aller Standorte (Trafos, Haushalte, Erzeuger, ...)
$z \in S$	Standort der Zentrale
d_v^s	Kommunikationsbedarf (in kbit/s) zwischen Standort $v \in V$ und der Zentrale z im Betriebszustand $s \in S$
M	Menge aller möglichen Übertragungsmedien (ISDN, GSM, PLC, ...)
$E \subseteq V^2 \times M$	Menge aller möglichen Verbindungen zwischen je zwei Standorten mit jeweils einem zugeordnetem Übertragungsmedium

Eine Verbindung $\nu w m \in E$ wird als eine mögliche Anbindung des Standortes ν an den Standort w (und von dort weiter in Richtung Zentrale) angesehen. D.h., w ist immer auf einer höheren Netzebene als ν , und w ist entweder eine Sammelstelle für mehrere Verbindungen $\nu_1 w m_1, \nu_2 w m_2, \dots$ oder w ist die Zentrale selbst. Wir nennen ν die Client-Seite und w die Server-Seite einer Verbindung $\nu w m$.

Um eine Verbindung von ν nach w über Medium m einzurichten, müssen in der Praxis die entsprechenden Endgeräte an ν und w sowie die eigentliche Verbindung aufgebaut werden. Da an einer Sammelstelle (oder Zentrale) w typischerweise mehrere Standorte ν_1, ν_2, \dots über das gleiche Medium und das gleiche Endgerät angebonden werden, unterscheiden wir im Modell zwischen der Einzelverbindungsbandbreite und den Einzelverbindungskosten einerseits sowie der gemeinsamen Bandbreite und den Gemeinverbindungskosten andererseits. Die Einzelverbindungsbandbreite ergibt sich aus der Bandbreite des Übertragungsmediums sowie der Bandbreite des clientseitigen Endgerätes, bei UMTS also z.B. 384kbit/s. Die Einzelverbindungskosten enthalten die Investitions- und Betriebskosten für die Verbindung und das clientseitige Endgerät, bei UMTS also die Kosten für das UMTS Modem sowie die Nutzungsentgelte des Client-Standortes. Die gemeinsame Bandbreite ist die Bandbreite, die für alle an einer Sammelstelle angebondenen Standorte gemeinsam zur gleichzeitigen Verfügung steht. Sie ergibt sich aus der Bandbreite des Übertragungsmediums und den an der Sammelstelle verwendeten Endgeräten. Für eine 8-fach UMTS Modembank wären das also $8 \cdot 384 = 3072$ kbit/s, für ein PLC System wäre es die Gesamtkapazität eines PLC Kanals



für alle angeschlossenen Standorte. Die Gemeinverbindungskosten beinhalten die Investitions- und Betriebskosten der gemeinsam genutzten serverseitigen Endgeräte, bei ein 8-fach UMTS Modembank also deren Anschaffungskosten und die Nutzungsentgelte. Die entsprechenden Bandbreiten und Kosten werden durch die folgenden Problemparameter beschrieben.

k_m^{ded}	Einzelverbindungsbandbreite (in kbit/s) für Medium $m \in M$
k_m^{sha}	Gemeinsam nutzbare Bandbreite (in kbit/s) für Medium $m \in M$
c_m^{ded}	Einzelverbindungskosten für Medium $m \in M$ (Nutzerseitige Endgeräte und Nutzungsentgelte)
c_m^{sha}	Kosten der gemeinsam genutzte Ressourcen für Medium $m \in M$ (Serverseitige Endgeräte und Nutzungsentgelte)

3.2 Variablen

Die zu treffenden Entscheidungen werden durch Variablen modelliert. Für jede mögliche Verbindung $vwm \in E$ beschreibt die 0/1 Variable x_{vwm} ob diese Verbindung eingerichtet wird oder nicht. Das heißt

$$x_{vwm} = 1, \text{ wenn von Standort } v \text{ zu Standort } w \text{ eine Verbindung über Medium } m \text{ eingerichtet wird, und } x_{vwm} = 0 \text{ sonst.}$$

Analog beschreibt für jeden Standort $w \in V$ und jedes Medium $m \in M_v$ eine 0/1 Variable y_{wm} ob am Standort w serverseitige Endgeräte für Verbindungen über Medium m installiert werden. In einer Lösung des Modells gilt

$$y_{wm} = 1, \text{ wenn an den Standort } w \text{ andere Standorte über Verbindungen mit Medium } m \text{ angebunden werden, und } y_{wm} = 0 \text{ sonst.}$$

Um die Bandbreitenbeschränkungen korrekt modellieren zu können, benötigen wir noch reell-wertige Hilfsvariablen f_{vwm}^s für all möglichen Verbindungen $vwm \in E$ und alle Szenarien $s \in S$. Deren Bedeutung ist



f_{vwm}^s = tatsächlich genutzte Bandbreite auf Verbindung vwm im Szenario s .

3.3 Bedingungen

Lineare Gleichungen und Ungleichungen garantieren, dass die Lösungen des mathematischen Modells den technischen und planerischen Rahmenbedingungen des praktischen Problems genügen.

In jedem Szenario muss der jeweilige Kommunikationsbedarf verlustfrei zwischen den Standorten und der Zentrale übertragen werden. Für die tatsächlich genutzten Bandbreiten ergeben sich damit die folgenden Flusserhaltungsbedingungen:

$$(1) \quad \sum_{w,m:vwm \in E} f_{vwm}^s - \sum_{w,m:vwm \in E} f_{wvm}^s = d_v^s \quad \forall s \in S, v \in V - \{z\}.$$

Die tatsächlich genutzte Bandbreite auf einer Verbindung darf in keinem Szenario die Einzelverbindungsbandbreite des benutzten Mediums übersteigen. Das wird durch die folgenden Einzelkapazitätungleichungen garantiert:

$$(2) \quad k_m^{ded} x_{vwm} - f_{vwm}^s \leq 0 \quad \forall s \in S, vwm \in E.$$

Ebenso muss an jeder Sammelstelle die gemeinsame Bandbreite eines Mediums mindestens so groß wie die Summe der effektiv genutzten Bandbreiten aller über dieses Medium realisierten Verbindungen sein. Diese Bedingung wird durch die Gesamtkapazitätungleichungen ausgedrückt:

$$(3) \quad k_m^{sha} y_{vm} - \sum_{w:vwm \in E} f_{vwm}^s \leq 0 \quad \forall s \in S, v \in V, m \in M.$$

Wird ein Standort v an eine Sammelstelle w über Medium m angebunden, so muss an w auch die serverseitige Hardware für Medium m installiert werden. Die entsprechenden Endgeräte-Ungleichungen lauten:

$$(4) \quad y_{wm} - x_{vwm} \leq 0 \quad \forall vwm \in E.$$



Schließlich soll das Kommunikationsnetz eine Baumstruktur haben, d.h. von jedem Standort soll es nur eine einzige Verbindung Richtung Zentrale geben. Das wird durch die folgenden Grad-Ungleichungen erreicht:¹

$$(5) \quad \sum_{w,m: vwm \in E} x_{vwm} \leq 1 \quad \forall v \in V - \{z\}.$$

3.4 Zielfunktion

Das Ziel der Optimierung ist die Minimierung der Gesamtnetzkosten, d.h. die Summe der Kosten aller installierten Verbindungen und Endgeräte. Die entsprechende Zielfunktion lautet:

$$\min \quad \sum_{w \in V} c_m^{sha} y_{wm} + \sum_{vwm \in E} c_m^{ded} x_{vwm}.$$

4 Lösungsmethodik

Übersetzt man ein praktisches Netzplanungsproblem in das oben beschriebene mathematische Optimierungsmodell, so erhält man ein gemischt-ganzzahliges lineares Programm mit einigen Tausend bis zu einigen Millionen Variablen und Ungleichungen, je nach Größe des zugrunde liegenden Energienetzes und der Anzahl der berücksichtigten Szenarien und Medien. Diese sind zwar aus theoretische Sicht im Allgemeinen schwer lösbar, verhalten sich aber in unserem konkreten Anwendungsfall gutartig und können für reale Problemgrößen optimal gelöst werden.

Die dabei verwendeten Verfahren basieren auf einer Kombination von Enumeration und linearer Relaxierung. Die Enumerationskomponente sorgt dafür, dass der mögliche Lösungsraum tatsächlich vollständig nach der Optimallösung abgesucht wird. Wie bei Divide-and-Conquer wird das Problem dabei sukzessive in viele kleinere Teilprobleme zerlegt. Die lineare Relaxierung eines gemischt-ganzzahligen linearen Programms ist eine Vereinfachung, bei der die ganzzahligen und 0/1-Variablen auch gebrochene Werte annehmen dürfen. Das sich dabei ergebende lineare Programm kann sehr effizient mit der Simplex-Methode oder mit Innere-Punkte-Verfahren gelöst werden /Vanderbei 2001/ und liefert eine untere Kostenschranke für das ursprüngliche gemischt-ganzzahlige

¹ Soll in einigen der Szenarien der Ausfall von Kommunikationsnetzelementen mitbetrachtet werden, so müssen die Grad-Bedingungen je Szenario für die tatsächlichen Datenflussvariablen f_{vwm}^s anstelle der Verbindungsvariablen x_{vwm} formuliert werden.



lineare Programm. Die Relaxierungstechnik erlaubt es, den Suchraum bei der Enumeration frühzeitig zu beschränken und nicht unnötig in Teilproblemen weiterzusuchen, in denen sowieso keine Optimallösung enthalten sein kann. Eine Kurzdarstellung dieser Verfahren findet sich in /Bley+2003/ oder /BleyZymolka2003/, einen detaillierteren Überblick über Lösungsverfahren für gemischt-ganzzahlige Programme erhält man z.B. bei /Graham+1999/ oder /Nemhauser+ 1988/.

5 Resultate

Mit dem oben beschriebenen Modell wurden verschiedene Berechnungen für ein repräsentatives Muster-Verteilnetz durchgeführt. Dabei wurde einerseits die optimale Auswahl der Medien für die einzelnen Teilabschnitte des Kommunikationsnetzes bestimmt als auch die Belastung der einzelnen Links, wie sie sich aus den Kommunikationsanforderungen der einzelnen Teilnehmer in zwei verschiedenen Szenarien ergibt. Die gemischt-ganzzahligen Programme wurden dabei mit der am ZIB entwickelten Modellierungssprache ZIMPL (<http://www.zib.de/koch/zimpl>) erzeugt und mit dem ebenfalls am ZIB entwickelten Programm SCIP (<http://scip.zib.de>) gelöst.

5.1 Muster-Verteilnetz

Das zugrunde gelegte Musternetz (Netzwerks Energie und Kommunikation, <http://www.neuk.de>) kann vereinfacht wie in Abbildung 1 dargestellt werden. An einem Strang eines Mittelspannungsnetzes sind Niederspannungsnetze mit verschiedenen Verbraucherprofilen nach VDN angeschlossen (Haushalt, Gewerbe in drei Kategorien, Landwirtschaft). In diese Netze speisen erneuerbare und verteilte Erzeuger mit einem hohen Grad der Lastabdeckung bei voller Verfügbarkeit ein. Mittels Lastmanagement kann ein solches Netz auch als Insel unabhängig vom einspeisenden Netz betrieben werden. In den Industrie- und Gewerbe-Netzen wurden dafür verschiedene steuerbare Lasten definiert.

5.2 Kommunikationsszenarien

Im ersten Schritt wurden die Kommunikationsanforderungen in diesem Netz erfasst. Um die Auftrittswahrscheinlichkeiten der einzelnen Kommunikationsereignisse angemessen beschreiben zu können, wurden zwei verschiedene Szenarien betrachtet:

Szenario 1 – Normalbetrieb. Hier findet im Wesentlichen nur Fahrplanübermittlung und -überwachung statt, sporadisch werden einige Regelbefehle ausgetauscht.

Szenario 2 – Störfall. Innerhalb von 2 Sekunden muss an jede regelbare Last und an jeden Erzeuger ein Befehl mit Rückmeldung gesendet werden.



Für jedes dieser Szenarien wurde ein Mengengerüst der zu übertragenden Informationsklassen wie in Tabelle 1 erstellt. Unter Annahme gleichen Protokoll-Overheads, wie sie bei MMS über Ethernet auftreten, ergeben sich daraus die benötigten Bandbreiten zwischen der Zentrale und den einzelnen Netzteilnehmern. In Tabelle 2 werden die Bandbreitenanforderungen in beiden Szenarien für die unterschiedlichen Teilnehmer im obigen Musternetz aufgeschlüsselt.

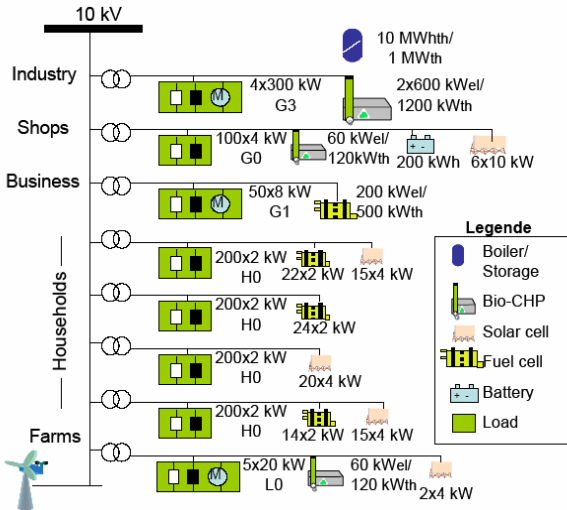


Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung des betrachteten Verteilnetzes.

Tabelle 2: Benötigte Bandbreite der Netzteilnehmer in verschiedenen Szenarien

Teilnehmer	Normalbetrieb [kbit/s]	Störfall [kbit/s]
PV und WKA	0,006	3,75
BHKW	0,016	3,75
Thermischer und Batteriespeicher	0,007	3,75
Spitzenlastbrenner	0,008	3,75
Trafo	0,002	0
Haushalt	0,009	0
Regelbare Last	0,012	3,75



5.3 Kommunikationsmedien

Während die technischen Eigenschaften der möglichen Kommunikationsmedien klar definiert sind, sind Kostenangaben nicht mit gleicher Genauigkeit fassbar. Einerseits setzen sich die Kosten für die Nutzung der Kommunikationsmedien aus verschiedenen Zeit-, Volumen- und Fixanteilen zusammen. Dies lässt sich im Modell (mit einigen Erweiterungen) noch gut berücksichtigen. Andererseits sind die Kosten jedoch auch abhängig von der Sichtweise, aus der sie bestimmt werden. Während beispielsweise ein Netzbetreiber für die Nutzung von PLC in seinem Netz nur Hardwarekosten ansetzen muss, können für einen „externen“ Betreiber noch zusätzliche Nutzungskosten anfallen.

Für die Berechnungen wurden aktuelle Preise verschiedener Gerätehersteller und Netzbetreiber für die Technologien WLAN (IEEE 802.11), GSM/GPRS, UMTS, ISDN/POTS und PLC (DLC-2000) eingeholt.

5.4 Optimale Realisierung des Kommunikationsnetzes

Aus Sicht eines Verteilnetzbetreibers ergab sich bei aktueller Marktsituation PLC als die mit Abstand kostengünstigste Variante in fast allen Anwendungsfällen. Es zeigt sich, dass PLC ausreichende Bandbreite selbst im Fehlerszenario (siehe Abschnitt 5.5) bereitstellt. Die Gerätekosten für DLC-2000 sind gering und es fallen keinerlei Nutzungsentgelte für den Netzbetreiber an. Unter den gegebenen Ausgangsdaten weicht das Ergebnis der Optimierungsrechnung nur in wenigen Ausnahmen von der PLC-Wahl ab: (1) bei sehr kleinen Subnetzen, bei denen eine PLC-Bridge über den Trafo teurer als eine Einzelanbindung aller dahinterliegenden Nutzer über andere Technologien ist, (2) wenn eine alternative dauerhafte Kommunikationsanbindung wie etwa DSL mit Flatrate bereits in den angeschlossenen Haushalten vorhanden ist und diese ohne substantielle Zusatzkosten mitgenutzt werden kann, oder (3) wenn aus Sicherheitsgründen bestimmte Teilnehmer nicht über das elektrische Verteilnetz als Kommunikationsmedium angebunden werden sollen, um etwa das Wiederanfahren auch nach Netzstörungen zu kontrollieren.

5.5 Belastungs-Szenario

Für das Musternetz ergibt sich im kritischen Szenario „Störfall“ folgende Situation: Das gesamte Kommunikationsnetz wird in PLC realisiert, einzige Ausnahme ist die Summenverbindung des Gewerbenetzes G0 zur Zentrale, die mit UMTS realisiert wird (siehe Abbildung 2). Der Grund dafür ist, dass die gemeinsame Bandbreite der PLC-Summenleitung von 1024 kbit/s im Mittelspannungsstrang nicht ausreicht, um den Datenverkehr aller 8 Subnetze abzuwickeln. Das zugrunde liegende Kostenmodell führt daher zur Auswahl der UMTS-Alternative für eines der Subnetze. Die insgesamt genutzte Band-



breite auf der PLC-Verbindung im Mittelspannungsstrang beträgt 889 kbit/s, die genutzte Bandbreite auf der UMTS-Verbindung zum Gewerbenetz G0 217 kbit/s.

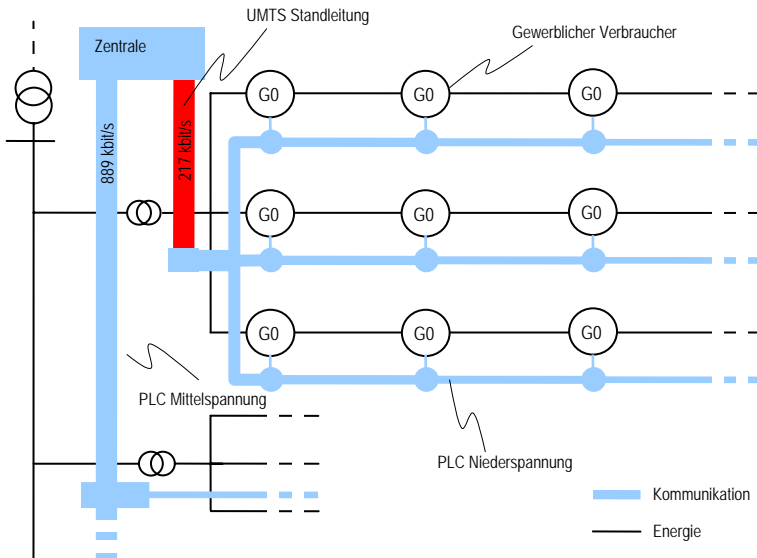


Abbildung 2: Ausschnitt aus einem Optimierungsergebnis für das im Text beschriebene Szenario. Die Strichdicke der Kommunikationsverbindungen gibt qualitativ die genutzte Bandbreite an.

6 Fazit

Es wurde ein mathematisches Modell zur Lösung des Problems der Auslegung von Kommunikationsnetzen für die Steuerung elektrischer Verteilnetze vorgestellt. Mit Methoden der gemischt-ganzzahligen Optimierung erlaubt dieser Modellierungsansatz die effiziente Lösung des gegebenen Planungsproblems. Alle Beispiele in dem von uns betrachteten Verteilnetz ließen sich in wenigen Sekunden optimal lösen.

Der Ansatz erlaubt jedoch nicht nur die Berechnung des kostenoptimalen Kommunikationsnetzes für ein gegebenes Szenario. Im Rahmen von Szenarioanalysen lässt sich damit auch der Einfluss unterschiedlicher Kostenentwicklungen und Betriebsführungsstrategien auf die Kosten des Kommunikationsnetzes und damit auf die Wirtschaftlichkeit des gesamten Verteilnetzes schnell und präzise quantifizieren.



7 Literatur

- /Ackermann 2004/ T. Ackermann: Distributed Resources in a Re-Regulated Market Environment, Doktorarbeit, KTH Stockholm, 2004.
- /Ausburg+ 2006/ O. Ausburg, J. Giebhardt und O. Haas: Medienvielfalt mit einheitlichen Datenmodellen und Diensten, Tagungsband 11. Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik, Kassel, 2006.
- /BleyKoster+ 2003/ A. Bley, A.M.C.A. Koster, A. Kröller, R. Wessäly und A. Zymolka: Kosten- und Qualitätsoptimierung in Telekommunikationsnetzen, Telekommunikation Aktuell 7/8, 2003.
- /Bley+ 2003/ A. Bley und A. Zymolka: Planung kostenoptimaler Informations- und Kommunikations-Infrastrukturen, Tagungsband 8. Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik, Kassel, 2003.
- /Buchholz+ 2006/ B.M. Buchholz und P. Palensky: Kommunikation als Schlüssel für künftige Effizienz der Netzführung, Tagungsband 11. Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik, Kassel, 2006.
- /Graham+ 1999/ R.L. Graham, M. Grötschel und L. Lovasz: Handbook of Combinatorics, Elsevier, Amsterdam, 1999.
- /Nemhauser+ 1988/ G. Nemhauser und L. Wolsey: Integer and Combinatorial Optimization, John Wiley and Sons, 1988.
- /Vanderbei 2001/ R.J. Vanderbei: Linear Programming - Foundations and Extensions, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2001.
- /Vver+ 2003/ J.v.d. Vver, G. Deconinck und R. Belmans: The Need for a Distributed Algorithm for Control of the Electrical Power Infrastructure, Tagungsband International Symposium on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications, Lugarno, Schweiz, 2003.