Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 96 (2005)
Heft: 19

Artikel: Die Vision eines zukünftigen Energieversorgungsnetzwerkes
Autor: Koeppel, Gaudenz / Favre-Perrod, Patrick / Geidl, Martin
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-857851

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 11.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die Vision eines zukünftigen Energieversorgungsnetzwerkes

Konzeption zukünftiger Energieversorgungssysteme unter Ausnützung von Synergien zwischen mehreren Energieträgern

Die heutigen Energieversorgungsstrukturen wurden mit dem Ziel errichtet, in zentralen Kraftwerken erzeugte Energie mit hoher Verfügbarkeit zu den Endkunden zu transportieren. Für moderne Erzeugungstechnologien wie beispielsweise Kraftwärmekopplungsanlagen, Mikroturbinen oder Windkraftanlagen sind diese Netze aus verschiedenen Gründen nur bedingt geeignet. Im Rahmen des Projektes «Vision of Future Energy Networks» wird untersucht, welche Topologien für eine grössere Anzahl verteilter Energiewandler und -speicher besser geeignet sind. Zudem wird untersucht, ob Synergieeffekte bei Einbezug mehrerer Energieträger vorhanden sind, wie diese genutzt werden können und welche Technologien erforderlich sein werden. In diesem Beitrag werden Projektidee und -ziele sowie die Methoden und Anwendungsbereiche diskutiert.

Die Grundstrukturen heutiger Energieversorgungssysteme entstanden zu einer Zeit, als es auf Grund von Skaleneffekten effizient war, die benötigte Energie vor allem in Grosskraftwerken zu erzeugen [1]. Entsprechend wurden die Topologien

Gaudenz Koeppel, Patrick Favre-Perrod, Martin Geidl, Bernd Klöckl

konzipiert, um die zentral erzeugte Energie möglichst verlustarm zum Endkunden zu transportieren. Dabei gewährleistete der traditionell zentral organisierte Betrieb zusammen mit der Netzverflechtung eine hohe Stabilität und Versorgungssicherheit.

Entwicklungen und Änderungen in den letzten Jahren lassen im Energiesektor jedoch Trends absehen – sowohl politischer und ökologischer wie auch technischer Art – für welche die bestehenden Strukturen und Betriebskonzepte nur noch bedingt geeignet sein werden. Die vermehrte Integration erneuerbarer Energiequellen führt beispielsweise zu Erzeugungsleistungen, welche nicht oder nur begrenzt gesteuert werden können; die entsprechenden Produktionsmengen und -zeiten sind dabei oft nur schlecht prognostizierbar. Zudem können im Speziellen beim Einsatz dezentraler Energieerzeugungseinheiten Leistungsflüsse entstehen, die in Grösse und Richtung bei der Auslegung der Netze und deren Schutzeinrichtungen nicht berücksichtigt worden waren [2]. Es ist weiterhin anzunehmen, dass die bevorstehenden Liberalisierungsprozesse und die damit verbundenen Preisunsicherheiten die Bereitschaft für Investitionen in Grosskraftwerke mit langen Amortisationshorizonten reduzieren werden. Zudem können Kostendruck und *Reliability Centred Maintenance* auf der Übertragungs- und Verteilebene zu einer Reduktion redundanter Verbindungen führen.

Gründe wie diese haben Mitte 2003 zur Lancierung des Projektes *Vision of Future Energy Networks* am Institut für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik[1)] (EEH) der ETH Zürich in Kooperation mit mehreren Partnern[2)] geführt. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts werden Topologien und Betriebskonzepte erarbeitet und entwickelt, welche für die anstehenden Aufgaben geeigneter sind als die heute vorhandenen Strukturen. Im Unterschied zu den meisten Projekten anderer Institutionen liegt der Fokus aber nicht auf der Integration dezentraler Generatoren in bestehende Netze. Vielmehr wird ein Energieversorgungskonzept mit Hilfe eines «grüne Wiese»-Ansatzes, der erlaubt, auch unkonventionelle Lösungen auszudenken, von Grund auf und unabhängig von vorhandenen Strukturen neu entwickelt.

Das Projekt gliedert sich in vorerst zwei Phasen. In der ersten Projektphase werden für verschiedene Kriterien – beispielsweise minimale Emissionen – Vorschläge für optimale Energieversorgungskonzepte erarbeitet. Diese werden dann in der zweiten Projektphase mit den heutigen Strukturen verglichen, um Wege aufzeigen zu können, wie die bestehenden Systeme entsprechend verändert oder weiterentwickelt werden sollten. Eine exemplarische Anwendung wäre in einer dritten Phase denkbar.

Die einzigen Rahmenbedingungen, die vom bestehenden System übernommen werden, sind absehbare Laststrukturen. Die Untersuchungen zielen somit darauf ab, den Verbraucher mit einer geeigneten Infrastruktur optimal zu versorgen. Verschiedene Bewertungskriterien (z.B. Energiepreise oder Emissionen, erwartete Ausfallhäufigkeit) lassen sich dann sowohl für das bestehende System wie auch für die neu entwickelten Topologien an-

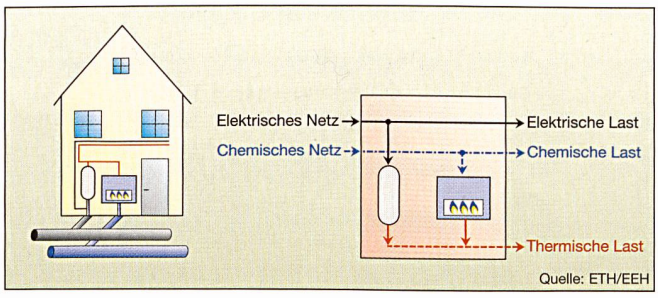

Bild 1 Symbolische Darstellung eines Haushalts, der mit Boiler und Brenner aus elektrischer (schwarz) und chemischer (blau) Energie thermische Energie (rot) erzeugt; Darstellung als Energy Hub

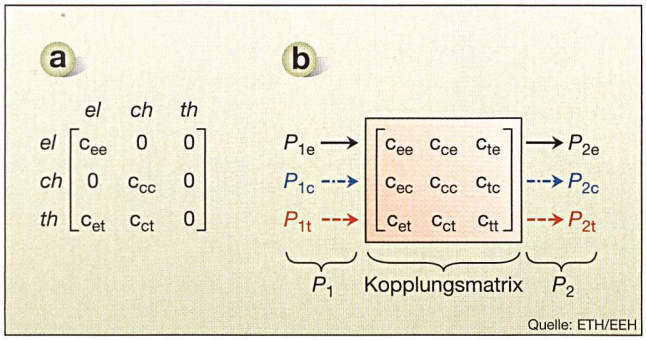

Bild 2 Kopplungsmatrix für das Haushaltbeispiel aus Bild 1; allgemeine Form der Kopplungsmatrix (elektrisch: schwarz, chemisch: blau, thermisch: rot)

wenden, um festzustellen, in welchen Punkten existierende Systeme verändert werden sollten.

Modellansatz und das Konzept «Energy Hub»

Für dieses Projekt wurde ein Modellkonzept entwickelt, welches sich allgemein und unabhängig von Technologie und Netzstruktur benutzen lässt. Das Modell ermöglicht die gleichzeitige Optimierung des Bezugs mehrerer Energieträger und ist für Erzeugung, Übertragung, Speicherung sowie Umwandlung bzw. Verbrauch anwendbar. Mit dem Modell kann berechnet werden, welche Bedingungen ein optimales Energieversorgungssystem erfüllen sollte – abhängig von den definierten Anforderungen. Mit Hilfe einer Datenbank, die heutige und absehbare Technologien enthält, lassen sich dann die Komponenten festlegen, mit denen der berechnete Idealzustand erreicht werden kann oder könnte.

Das Energy-Hub-Konzept wurde entwickelt, um einen Netzteilnehmer zu beschreiben, der mehrere Energieträger gleichzeitig benötigt. Der grundsätzliche Modellgedanke beschränkt sich zwar nicht auf die Verbraucherseite, lässt sich jedoch beispielhaft anhand eines Kleinverbrauchers anschaulich entwickeln und erklären. Ein nachfolgender Abschnitt wird sich dann explizit mit dem ganzen Anwendungsgebiet auseinander setzen.

Beispiel Privathaushalt

Im Privathaushalt wird Energie für Raumwärme, Warmwasser, Kochen, Beleuchtung und Haushaltsgeräte benötigt. Dieser Energieverbrauch lässt sich prinzipiell in drei Gruppen einteilen: elektrischer, chemischer und thermischer Energieverbrauch[3]. Dieser Verbrauch kann durch Direktbezug aus dem Netz, durch Bezug aus einem Energiespeicher oder aber durch (teilweise) Umwandlung eines Energieträgers in einen anderen gedeckt werden. Denn nicht immer bezieht ein Haushalt alle drei Energieträger direkt aus dem Netz: Bild 1 zeigt beispielsweise einen Haushalt, der nur elektrische und chemische Energie bezieht. Mit Hilfe eines Elektroboilers wird warmes Brauchwasser aufbereitet und ein Gasbrenner wird zur Heisswassererzeugung für die Heizung verwendet.

Der Verbraucher lässt sich systemtechnisch somit als 2-Tor darstellen, in das elektrische und chemische Energie hineinfliesst und aus dem elektrische, chemische und thermische Energie herausfliesst; der Ausgang entspricht dabei dem Verbrauch. Im Inneren des 2-Tors findet die Umwandlung von elektrischer und chemischer Energie in thermische Energie statt (Bild 2).

Jede Verbindung von Eingang zu Ausgang ist mit Verlust behaftet und kann mit einem Wirkungsgrad beschrieben werden; dieser Verbindungswirkungsgrad hängt vom Betriebspunkt und den vorhandenen Komponenten ab. Dadurch lässt sich jede Verbindung α-β mit einem so genannten Kopplungsfaktor $c_{\alpha\beta}$ charakterisieren, der eine Funktion des Wirkungsgrades ist. α und β stehen dabei für zwei beliebige Energieträger. Die Kopplungsterme aller Verbindungen können in einer Matrix zusammengefasst werden, deren Zeilen und Spalten den Energieträgern zugeordnet sind [3]. Die Schnittpunkte dieser Kopplungsmatrix entsprechen dann dem jeweiligen Kopplungsterm. Bild 2a zeigt die Kopplungsmatrix für das Haushaltsbeispiel.

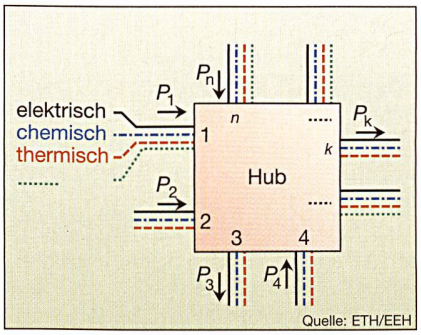

Bild 3 Die allgemeine Darstellung eines Energy Hubs mit beliebig vielen Zugängen; die Flussrichtungen an den Zugängen sind frei definierbar

Die allgemeine Form der Kopplungsmatrix ist – zusammen mit dem Eingangsvektor P_1 und dem Ausgangsvektor P_2 – in Bild 2b dargestellt. Die momentanen Flüsse an den Ein- und Ausgängen entsprechen den momentanen Leistungen und können folglich als Vektoren dargestellt werden. Über die Kopplungsmatrix C_{12} sind diese Vektoren miteinander verknüpft, entsprechend der Beziehung $P_2 = C_{12} \cdot P_1$[4]. Die Lasten und die Lastverhältnisse werden somit je nach Besetzung der Kopplungsmatrix transformiert und führen zu einem veränderten Netzbezug.

Anwendung und Dimensionen eines Energy Hubs

Mit der gleichen Methode kann jeder Netzteilnehmer auf seine Ein- und Ausgänge sowie auf seine internen Umwandlungen reduziert und somit als Energy Hub dargestellt werden. Die Anzahl der Zugänge (Ein- und Ausgänge) ist dabei ebenso unlimitiert wie die Menge der vorhandenen Energieträger. Daraus folgt, dass ein Hub nicht mehr durch eine einzige Kopplungsmatrix dargestellt wird, sondern dass für jedes Verbindungspaar eine Kopplungsmatrix existiert. Die allgemeine Form eines Energy Hubs ist in Bild 3 dargestellt.

Weil die Anzahl der Zugänge theoretisch unbegrenzt ist, kann ein Energy Hub auch die Zusammenfassung mehrerer Energy Hubs sein. Die Dimensionen der Zugänge sind nicht begrenzt, weshalb mit einem Energy Hub beispielsweise ein einzelner Verbraucher, aber auch ein Stadtviertel mit Kehrrichtverbrennungsanlage oder auch ein Speicherseensystem modelliert werden kann.

Die Flussrichtung der Leistungen ist frei wählbar und kann für jeden Zeitabschnitt anders sein. Dies ist wichtig, um Leitungen oder auch Verbraucher, die zeitweise ins Netz zurückspeisen, modellieren zu können.

Weil die Kopplungsmatrizen die momentanen Leistungsflüsse transformieren, müssen alle Komponenten durch einen Wirkungsgrad beschrieben werden können, welcher sich auf die Ein- und Ausgangsleistungen bezieht. Für erzeugende und konvertierende Teilnehmer definiert sich dieser Wirkungsgrad jeweils nur über die Leistungen an Ein- und Ausgang. Um jedoch für Energiespeicher die korrekten Wirkungsgrade zu erhalten, muss neben der Leistung auch der momentane Energieinhalt des Speichers berücksichtigt werden. Die effektiven Aufnahme- und Abgabeleistungen hängen jederzeit direkt vom momentanen Ladezustand des Energiespeichers ab;

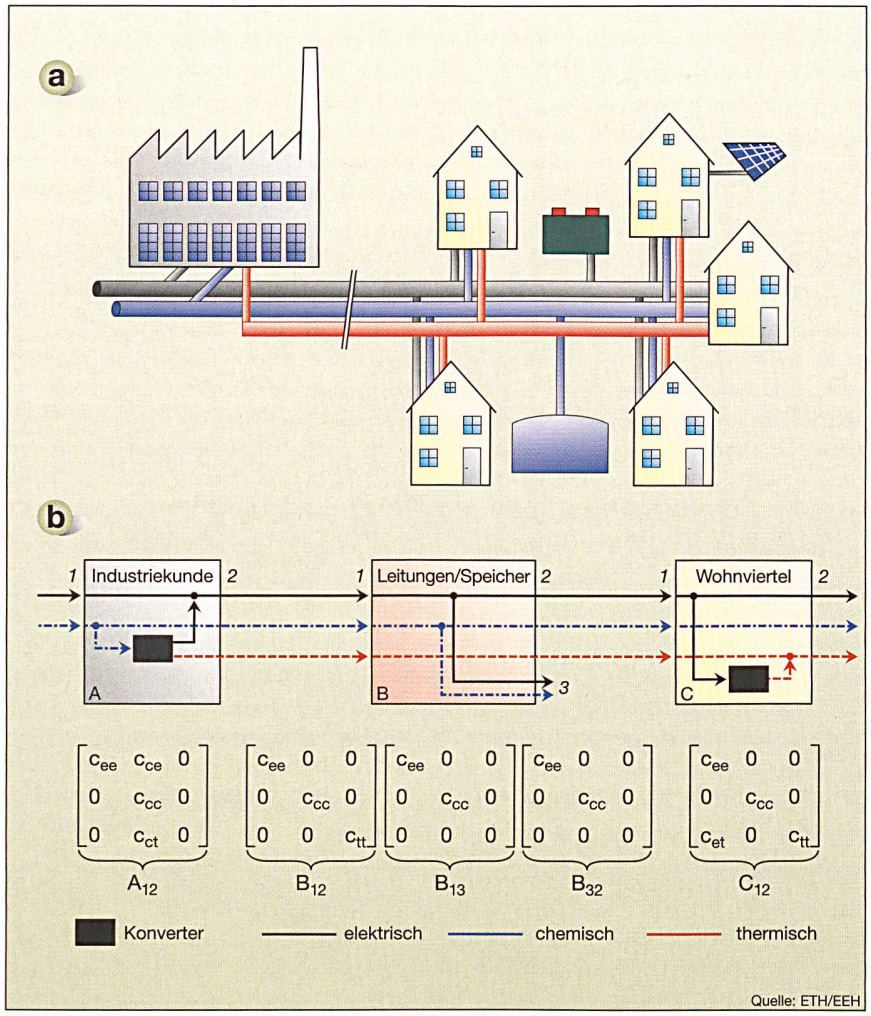

Bild 4 Symbolische Darstellung eines Industriekunden, der die überschüssige, lokal erzeugte Wärme an ein Wohnviertel abgibt, in welchem auch lokale Erzeugung und Speicherung stattfindet; Darstellung als Energy Hubs mit den dazugehörigen Kopplungsmatrizen (elektrisch: schwarz, chemisch: blau, thermisch: rot)

diese sind je nach Speichertyp (kapazitiv, potenzial oder kinetisch) proportional oder umgekehrt proportional zur entnehmbaren Energie[5].

Wenn diese Tatsache bei der Modellierung der Energiespeicher berücksichtigt wird, können mit dem Energy-Hub-Konzept somit alle Teilnehmer der drei Stufen Übertragung, Umwandlung und Speicherung systematisch integriert werden.

Fallstudien gesucht

Die Autoren sind an Möglichkeiten für Fallstudien interessiert und würden sich über entsprechende Zusammenarbeiten mit Energieversorgungsunternehmen freuen.
Der aktuelle Projektstand kann jederzeit auf der Projekthomepage http://www.eeh.ee.ethz.ch/psl/forschung/vofen.html verfolgt werden.

In Bild 4 ist als Beispiel ein Industriekunde dargestellt, der seine eigene Prozesswärme und einen Teil seines Elektrizitätsbedarfs in einem Blockheizkraftwerk erzeugt. Die überschüssige Wärme wird in ein Fernwärmenetz eingespeist, an welches ein Wohnviertel angeschlossen ist, dessen Haushalte die Fernwärmeleistung mit Elektroboilern ergänzen. Zudem gibt es einen Energiespeicher für elektrische und einen für chemische Energie, um für das ganze Viertel Lastmanagement betreiben zu können. Schliesslich gibt es einen Haushalt, der eine Photovoltaikanlage (PV-Anlage) betreibt. Bild 4b zeigt die Darstellung mit Energy Hubs und den dazu gehörenden Matrizen. Die Leistung der PV-Anlage ist kleiner als der Verbrauch des angeschlossenen Haushalts, weshalb sich der Ertrag der PV-Anlage mathematisch vom Verbrauch des Haushaltes subtrahieren lässt und zu einem zeitweise veränderten Lastprofil führt; dadurch muss der Solargenerator nicht mit einem separaten Zugang modelliert werden.

Auf diese Weise kann ein ganzes Energieversorgungssystem mit Energy Hubs modelliert werden. Wie mit Energy Hubs das bestehende System modelliert wird und wie mit Hilfe von Energy Hubs ein neues Systemkonzept erarbeitet und optimiert wird, ist Inhalt der folgenden Abschnitte.

Systemoptimierung

Ein Netzteilnehmer, der mit mehreren Energieträgern versorgt wird, hat die Möglichkeit, auszuwählen, wie er die verschiedenen Lasten versorgen will. Beispiele sind Brauchwasser, welches elektrisch, mit einem Gasbrenner oder mit einem Wärmetauscher erhitzt werden kann oder elektrische Energie, die direkt oder mit einer Mikroturbine erzeugt werden kann. Die Modellierung mit Energy Hubs ermöglicht es, mit wenig Aufwand verschiedene Varianten durch Optimierung nach unterschiedlichsten Kriterien zu finden.

Der optimale Systembetrieb hängt unter anderem davon ab, wie jeder einzelne Energy Hub die Lasten am Ausgang versorgt. Die beiden entscheidenden Fragen sind deshalb, wie viel von welchem Energieträger aus dem Netz bezogen wird und wie die Energieträger innerhalb des Hubs konvertiert werden. Daraus folgt direkt die Frage, wie und wo die Energieträger durch das Netz fliessen.

Ein ausschlaggebender Punkt ist also die Frage, wie ein Hub konfiguriert ist, d.h. welche Konvertoren im Hub installiert werden. Durch die Kapazitätsgrenzen der eingesetzten Konvertoren folgen daraus auch die Limiten für den Netzbezug der betroffenen Energieträger und daraus wiederum bestimmte Übertragungs- und Verteilbedingungen.

Deshalb muss für gegebene Rahmenbedingungen die optimale Hubkonfiguration gefunden werden. Dies kann auf zwei Arten geschehen: technologieorientiert oder bedarfsorientiert. Bei der technologieorientierten Methode wird wie bei einem «bottom-up»-Ansatz die Menge aller möglichen Komponenten und deren Konfigurationen identifiziert. Anschliessend wird das System mit jeder dieser Konfigurationen modelliert, um mit Hilfe von Simulationen verschiedene Indizes berechnen zu können. Anhand dieser Indizes kann dann die bestmögliche Konfiguration für die zuvor definierten Rahmenbedingungen identifiziert werden. Die Gefahr bei dieser Methode besteht darin, dass die optimale Lösung nicht gefunden werden kann, da eventuell benö-

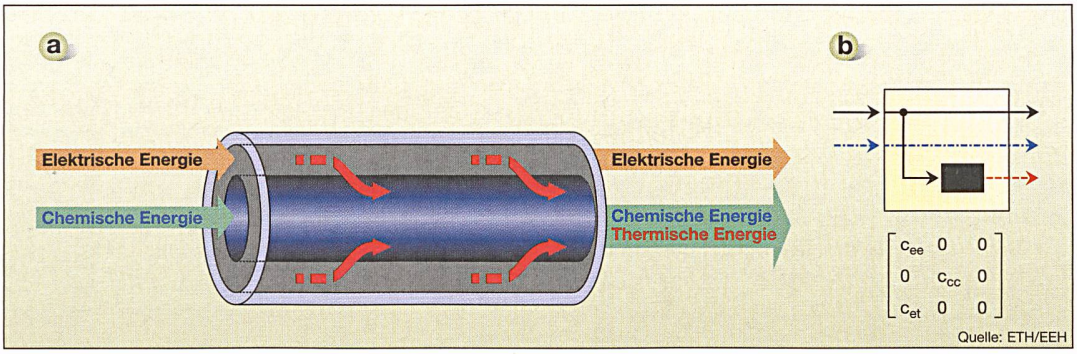

Bild 5 Symbolische Darstellung eines Energy Interconnectors; Darstellung als Energy Hub mit der dazugehörigen Kopplungsmatrix

tigte Technologien (noch) nicht existieren oder gewisse Kombinationen nicht berücksichtigt wurden.

Die bedarfsorientierte Methode kann als «top-down»-Ansatz verstanden werden: für die im vornherein definierten Rahmenbedingungen werden die optimalen Matrizeneinträge berechnet, unabhängig davon, ob diese Einträge überhaupt realisierbar sind. Erst dann wird versucht, durch Kombination vorhandener Technologien und Konzepte eine Hubkonfiguration zu finden, die den berechneten, optimalen Matrizeneinträgen entspricht. Es kann vorkommen, dass mit den vorhandenen Technologien nur suboptimale Matrizeneinträge zu Stande kommen, was jedoch hilft, Technologielücken und Forschungsbedarf aufzuzeigen. Das Energy-Hub-Konzept kann für beide Methoden angewendet werden, eignet sich aber insbesondere für die bedarfsorientierte Methode.

Die Suche nach der optimalen Hub-Konfiguration kann also als Optimierungsproblem betrachtet werden, bei welchem die geeigneten Matrizeneinträge gesucht werden. Basierend auf den aktuellen Lasten und ihren Verhältnissen zueinander, ergeben sich zusammen mit Übertragungs- und Verteilkapazitäten verschiedene Optimierungsmöglichkeiten. Eine nahe liegende Optimierung ist ein erweiterter Lastfluss, bei welchem alle vorhandenen Energieträger so eingesetzt werden, dass möglichst tiefe Energiekosten resultieren. Emissionen (z.B. CO_2, NO_x) und andere externe Effekte können mit zusätzlichen Zielfunktionen oder durch Monetarisierung berücksichtigt werden; dies könnte dann auch für eine Lebenszykluskosten-Optimierung verwendet werden. Andere Optimierungsziele sind beispielsweise möglichst geringe Transportverluste oder möglichst hohe Redundanz, bzw. Versorgungsverfügbarkeit. Wenn ausserdem Lastmanagementmöglichkeiten berücksichtigt werden, kann ein System mit beispielsweise ausgeglichenem Bezug oder mit einem Bezug, der sich nach Tarifen richtet, realisiert werden.

Mit dem gleichen Verfahren kann aber auch der Einfluss zusätzlicher Übertragungskapazitäten oder die Frage, wo im Netz die Installation dezentraler Erzeugung sinnvoll wäre, untersucht werden. Es lässt sich somit evaluieren, auf welchem Leistungsniveau und auf welcher Spannungsebene dezentrale Erzeugung oder Umwandlung interessant ist und was eine angemessene Vermaschung wäre.

$$\Lambda_{12} = \begin{bmatrix} \lambda_{ee} & \lambda_{ce} & \lambda_{te} \\ \lambda_{ec} & \lambda_{cc} & \lambda_{tc} \\ \lambda_{et} & \lambda_{ct} & \lambda_{tt} \end{bmatrix} \quad M_{12} = \begin{bmatrix} \mu_{ee} & \mu_{ce} & \mu_{te} \\ \mu_{ec} & \mu_{cc} & \mu_{tc} \\ \mu_{et} & \mu_{ct} & \mu_{tt} \end{bmatrix}$$

Quelle: ETH/EEH

Bild 6 Allgemeine Form der Ausfallratenmatrix und der Wiederherstellratenmatrix für eine Energy-Hub-Kopplung

Der Energy Interconnector

Die Kosten für Übertragung und Verteilung machen einen beachtlichen Teil der gesamten Energiekosten aus. Es ist somit angebracht zu untersuchen, ob in hybriden[6)] Energiesystemen auch bei der Übertragung und Verteilung Synergien existieren, welche vorteilhaft und für eine Kostenreduktionen genutzt werden können.

Deshalb wird neben der Entwicklung des Energy-Hub-Konzepts und der Erarbeitung zukünftiger Versorgungskonzepte ein Übertragungskonzept studiert, welches mehrere Energieträger gleichzeitig überträgt. Diese Forschungsarbeit basiert auf einer Konzeptstudie aus dem Jahr 2004 [5] und wird als «Energy Interconnector» bezeichnet. Er überträgt gleichzeitig elektrische und chemische Energie. Die Wärmekapazität des chemischen Energieträgers wird genutzt, um die Wärmeverluste des elektrischen Leiters zu absorbieren; der elektrische Leiter wird also durch den chemischen Energieträger gekühlt. Am Ausgang des Energy Interconnectors steht somit neben den elektrischen und chemischen Energieträgern auch nutzbare thermische Energie zur Verfügung (Bild 5).

Je nach Übertragungsspannung und Distanz wird es dadurch möglich, die Wärmeverluste der elektrischen Übertragung in einem Wärmetauscher zu nutzen. Da diese Kühlung faktisch einer Umwandlung von elektrischer in thermische Energie entspricht, kann ein Energy Interconnector auch als Energy Hub modelliert werden; zusätzlich zu den Diagonalelementen elektrisch–elektrisch und chemisch–chemisch steht in der Kopplungsmatrix noch der elektrisch–thermische Kopplungsfaktor (Bild 5b).

Höhere Zuverlässigkeit durch Verknüpfung mehrerer Energieträger?

Ein Netzteilnehmer, der mehrere Energieträger bezieht und ausserdem die Möglichkeit hat, diese ineinander umzuwandeln, kann wählen, wie viel er von welchem Energieträger beziehen will. Er kann also jederzeit Preisdifferenzen ausnutzen, um seine Energiekosten möglichst tief zu halten. Grundsätzlich kann er sogar Überproduktion ins Netz zurückspeisen, wenn sich dies preislich anbietet.

Die gezielte Verlagerung von Teillasten in eine andere Versorgungsstruktur führt jedoch nicht nur zu Arbitragemöglichkeiten. Die vorhandenen Versorgungssysteme und Konvertoren können auch so ausgelastet und betrieben werden, dass beispielsweise bei Ausfall einer der Versorgungsstrukturen die Lasten immer noch durch die verbleibenden Energieträger versorgt werden können. Die Verbindung der Versorgungsstrukturen mit Hilfe der Konvertoren führt folglich zu einer Art von Redundanz. Diese Redundanz ist aber nur vorhanden, solange die Lasten unter den Leistungsgrenzen der Versorgungssysteme und der Konvertoren liegen. Andernfalls können die operativ verbleibenden Versorgungsstrukturen nur den Lastabwurf verringern oder zeitlich verzögern. Wenn also durch Verwendung lokaler Energiewandler die Verfügbarkeit gesteigert werden soll,

dann müssen die Leistungsgrenzen dieser Wandler entsprechend der Lasten dimensioniert werden.

Die Zuverlässigkeitsbetrachtungen werden jedoch nicht mit Redundanz- und «n–1»-Kriterien betrachtet, sondern mit Hilfe probabilistischer Methoden. Diese probabilistischen Zuverlässigkeitsmethoden können mit wenig Aufwand in das Energy-Hub-Konzept integriert werden. So wie sich für jede Verbindung ein Kopplungsfaktor definieren lässt, so kann auch für jede Verbindung α-β eine Ausfallrate $\lambda_{\alpha\beta}$ und eine Wiederherstellrate $\mu_{\alpha\beta}$ definiert werden. Folglich ergeben sich dann gleichermassen eine Ausfallratenmatrix Λ_{12} und eine Wiederherstellratenmatrix M_{12} für jedes Verbindungspaar (Bild 6).

Je nach Hubkonfiguration und Betriebskonzept resultieren aus entsprechender Multiplikation und Addition dieser Matrizeneinträge die analytischen Ausdrücke für die Verfügbarkeit am Ausgang des jeweiligen Energy Hubs. Beispielsweise kann dann für verschiedene Konfigurationen untersucht werden, ob die Wiederherstellrate am Ausgang sinkt oder steigt, oder wie sich die erwartete Menge nicht gelieferter Energie[7] verändert.

Gegenstand der Forschung ist momentan unter anderem, ob und wie Verfügbarkeit und Kosten miteinander verknüpft sind. Solche Abschätzungen wären hilfreich beispielsweise bei Fragestellungen, die den operativen Nutzen und Wert von dezentraler Erzeugung bewerten.

Ein mögliches Vorgehen, welches momentan geprüft wird, sieht folgendermassen aus: Für gegebene Lasten und gegebene Rahmenbedingungen können zwei verschiedene Optimierungen durchgeführt werden. Einmal wird mit dem Ziel optimiert, diejenigen Kopplungsmatrizen zu finden, die zu den tiefsten gesamten Energiekosten führen. Die zweite Optimierung hat hingegen das Ziel, Kopplungsmatrizen zu finden, die zu einer möglichst hohen Verfügbarkeit am Ausgang führen. Anschliessend werden mit beiden Systemen Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt, um die Auswirkungen bei verschiedenen Lastszenarien zu berechnen. Daraus können dann die anfallenden Energiekosten sowie probabilistische Werte wie die erwartete Menge nicht gelieferter Energie[7] oder andere Indizes[8] abgeleitet werden [6]. Gemäss Bild 7 kann dann möglicherweise die Reduktion der Menge nicht gelieferter Energie mit der Zunahme der Energiekosten in ein Verhältnis gesetzt werden und so Auskunft darüber geben, wie viel die möglicherweise zusätzlich gewonnene Verfügbarkeit an betrieblichen Mehrkosten bedeutet.

Schlussbemerkung

Die Autoren sind sich bewusst, dass die vorgestellten Modelle und Konzepte sehr abstrakt sind. Dieses theoretische Herangehen erlaubt jedoch, verschiedenste Ansätze zu studieren, ohne sich durch bestehende Strukturen von vornherein beeinflussen und beschränken zu lassen. Dadurch erst wird es möglich, objektive Alternativen zu den heutigen Strukturen zu erarbeiten.

Sobald diese Strukturen gefunden worden sind, wird mit Hilfe eines «Backcastings» versucht, den Übergang in die Praxis zu definieren. Konkret wird erarbeitet werden, wie die heutigen Strukturen erweitert und ergänzt werden müssen, um zu den vorgeschlagenen Alternativstrukturen zu gelangen. Sowohl ökonomische wie ökologische Fragen werden dabei ebenfalls einen grossen Stellenwert einnehmen.

Die laufenden Arbeiten befassen sich momentan unter anderem mit der Bepreisung und Modellierung von Emissionen, mit der Integration von Verfügbarkeitsbetrachtungen in das Modell sowie damit, wie das Modell ergänzt werden kann, um auch Investitions- und generell Lebenszykluskosten zu berücksichtigen.

Referenzen

[1] *M. Vignolo, R. Zeballos:* Transmission networks or distributed generation? First International Symposium on Distributed Generation, Stockholm, 2001.

[2] *G. Koeppel:* Distributed generation – Literature review and outline of the Swiss situation. ETH Zürich, Power Systems Laboratory, Zürich 2003. http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=bericht&nr=312

[3] *M. Geidl, G. Andersson:* A Modeling and Optimization Approach for Multiple Energy Carrier Power Flow. IEEE PES Powertech 2005, St. Petersburg, Russland, 2005.

[4] *B. Klöckl, P. Favre-Perrod:* On the influence of demanded power upon the performance of energy storage devices. EPE-PEMC, Riga, Lettland, 2004.

[5] *P. Favre-Perrod, R. Frik:* Proposal for a multifunctional energy bus and its interlink with generation and consumption. ETH Zürich, Diplomarbeit 2004.

[6] *R. Billinton, R. N. Allan:* Reliability Evaluation of Power Systems. 2nd ed. New York: Plenum Press, 1996.

Weiterführende Literatur

Weitere relevante Publikationen, auf die im Text nicht explizit verwiesen wurde, sind zum Download bereitgestellt unter http://www.eeh.ee.ethz.ch/psl/forschung/vofen.html

Angaben zu den Autoren

Dipl. El.-Ing. ETH **Gaudenz Koeppel** ist seit 2002 Doktorand an der ETH Zürich, Fachgruppe Elektrische Energieübertragung. Sein Forschungsinteresse sind Zuverlässigkeitsaspekte zukünftiger Energieversorgungssysteme sowie deren Bewertung.
ETH Zentrum ETL G29, CH-8092 Zürich, koeppel@eeh.ee.ethz.ch

Dipl. El.-Ing. ETH **Patrick Favre-Perrod** ist seit 2003 Doktorand an der ETH, Fachgruppe Hochspannungstechnologie. Sein Forschungsgebiet ist der Bereich Energieübertragung in zukünftigen Energieversorgungssystemen.
ETH Zentrum ETL H29, CH-8092 Zürich, pfavre@eeh.ee.ethz.ch

Dipl.-Ing. **Martin Geidl** studierte Elektrische Energietechnik an der TU Graz. Seit 2003 ist er Doktorand an der ETH, Fachgruppe Elektrische Energieübertragung. Seine Forschung ist der Modellierung und Optimierung von Systemen mit gemischten Energieträgern gewidmet.
ETH Zentrum ETL G24.1, CH-8092 Zürich, geidl@eeh.ee.ethz.ch

Dipl.-Ing. **Bernd Klöckl** studierte an der TU Graz Elektrische Energietechnik und ist seit 2002 Doktorand an der ETH Zürich, Fachgruppe Hochspannungstechnologie. Seine Interessensgebiete sind rotierende elektrische Maschinen und die Theorie der Energiespeicherung in stochastisch gespeisten Energiesystemen.
ETH Zentrum ETL H35.2, CH-8092 Zürich, kloeckl@@eeh.ee.ethz.ch

[1] http://www.eeh.ee.ethz.ch
[2] Kooperationspartner: Bundesamt für Energie, ABB Schweiz, Areva Frankreich/Grossbritannien und VA-Tech Grossbritannien.
[3] Der Begriff chemische Energie steht dabei für Energieträger wie Erdgas und Erdöl oder zukünftige, auf Wasserstoff basierende Träger.
[4] Eine detaillierte Herleitung findet sich in [3].
[5] Die genauen Modelle finden sich in [4].
[6] Energiesysteme mit mehreren Energieträgern
[7] Englisch: Energy Not Served (ENS)
[8] z.B. SAIFI: System Average Interruption Frequency Index; SAIDI: System Average Interruption Duration Index

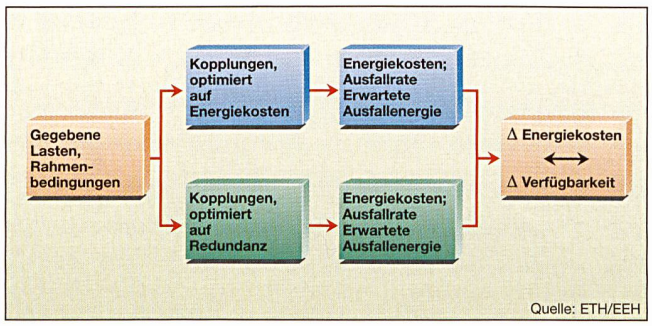

Bild 7 Schematische Darstellung einer Methode zur Gegenüberstellung Verfügbarkeit und Betriebskosten