

Jahresbericht 2004, 1. Dezember 2004

# Projekt

## Vision of Future Energy Networks

Autor und Koautoren	Prof. Fröhlich / Prof. Andersson (P. Favre-Perrod, M. Geidl, B. Klöckl, G. Koeppel)
beauftragte Institution	ETH Zürich, Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie
Adresse	Physikstrasse 3, 8092 Zürich
Telefon, E-mail, Internetadresse	01 632 2777 / <a href="mailto:froehlich@eeh.ee.ethz.ch">froehlich@eeh.ee.ethz.ch</a> , <a href="http://www.eeh.ee.ethz.ch">www.eeh.ee.ethz.ch</a>
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	100669 / 151068
Dauer des Projekts (von – bis)	1. Juli 2004 bis 30. Juni 2008

### ZUSAMMENFASSUNG

Die erste Etappe des Projektes „Vision of Future Energy Networks“ umfasste die Erarbeitung von Werkzeugen zur systematischen Bewertung von Technologien und Topologien in zukünftigen Energienetzen. Es wurde ein sogenannter „Greenfield Approach“ gewählt, der es möglich machen soll, von fiktiven, unter definierten Gesichtspunkten optimalen Energiesystemen auf Transitionsstrategien des bestehenden Systems hin zu einem nachhaltigeren, umweltfreundlicheren und kosten-günstigeren System rückzuschliessen.

Die Arbeit wurde dafür in vier Bereiche aufgeteilt, die da wären:

- Systemintegration von verschiedenen Energieträgern
- Bedeutung von Energiespeicherung
- Systemmodellierung und –optimierung
- Lastverhalten und Zuverlässigkeit

Die ersten unter Zuhilfenahme der genannten Werkzeuge erzielten Resultate zeigen, dass ein theoretisches optimales und optimiertes Energiesystem

- Auf elektrischer Energie beruht
- Viele Verknüpfungspunkte zu anderen Energiesystemen aufweist
- Dadurch synergetische Effekte zwischen den Energieträgern erzeugt und ein Maximum an Flexibilität, Umwelt-freundlichkeit und Kundennutzen bringen kann.

Die Identifikation von fehlenden Technologien und theoretischem Wissen über Design und Betrieb von zukünftigen Energiesystemen wird im Jahr 2005 anstehen.

## Projektziele

Im Projektantrag [1] wurde Mitte 2004 die folgende langfristige Zielsetzung definiert:

*„Ziel des Projekts ist die Erarbeitung von Szenarien und Randbedingungen für einen Wandel des bestehenden Elektroenergiesystems hin zu einem nachhaltigen, dezentral organisierten und auf regenerativen Energieträgern basierten System. Zentrale Idee ist maximale Flexibilität und Kompatibilität verschiedener Technologien bei der Einspeisung, dem Transport und der Nutzung der Energie.“*

Dieses Gesamtziel gilt auch weiterhin. Als Milestone für Ende 2004 wurde darüberhinaus die Erarbeitung der folgenden Ergebnisse angegeben:

- Layout für die 3 Szenarios: Ländlich, Urban, Mega-City
- Kriterien:
  - Leistungsanforderungen / Lastprofile / Kundengruppen
  - Implementierung von chemischen Energieträgern (H<sub>2</sub>, Gas)
  - Identifikation von notwendigen Schlüsselementen / -komponenten / -apparaten (black box)

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Die Arbeit im Jahr 2004 gliederte sich in vier voneinander abhängige Teile, die von verschiedenen Personen bearbeitet wurden und die im Folgenden beschrieben werden.

### Systemintegration von verschiedenen Energieträgern (P. Favre-Perrod, High Voltage Laboratory)

Bis heute haben sich die verschiedenen Energieversorgungssysteme (elektrische Netze, Gasnetze, Fernwärmennetze, usw.) weitgehend unabhängig entwickelt. Aufkommende kleine dezentrale Erzeuger stellen vermehrt ein Potential für Verknüpfungen zwischen verschiedenen Systemen dar [2]. Beispielsweise wird durch eine Mikroturbine in einem Privathaus ein chemisches System mit dem elektrischen und thermischen System verknüpft. Des Weiteren sprechen auch ökonomische und technische Effizienzgründe für eine gebündelte Übertragung mehrerer Energieträger. Dies wird in urbaner Umgebung durch gemeinsame Trassennutzung heute schon praktiziert, könnte jedoch in der Form einer gemeinsamen Infrastruktur („kombiniertes Übertragungs-Betriebsmittel“) erweitert werden.

In dieser Studie wird untersucht, welche technologischen und systemtechnischen Mittel eine optimale Ausnutzung der Synergien zwischen verschiedenen Energiesystemen ermöglichen können. Als Teilprojekt wird zur Zeit das Konzept eines kombinierten Übertragungsmittels für Elektrizität, Gas und eventuell auch Wärme, Daten und Wasser untersucht. Verschiedene Subvarianten des kombinierten Übertragungsmittels wurden formuliert:

- A Kombinierter Leiter ohne Wärmeaufnahme des Gases
- B Kombinierter Leiter mit Nutzung des Gases zur Kühlung des elektrischen Leiter
- C Kombinierter Leiter mit Nutzung des Gases zur Kühlung des elektrischen Leiter mit der Möglichkeit des ungekühlten Betriebs.
- D Supraleitender oder kryogekühlter Leiter mit Wasserstoffkühlung und energetischer Nutzung des Wasserstoffs.

Offensichtlich kann je nach Variante der Energiefluss in jedem System (elektrisch, chemisch, thermisch) nicht mehr unabhängig eingestellt werden. Beispielsweise sind in der Variante B die chemischen und elektrischen Leistungen über die Verluste gekoppelt, usw.. Durch Anpassung der Spannung, Betriebsdrücke usw. kann voraussichtlich die nötige Entkopplung der Energieströme erreicht werden.

Mögliche zusätzliche Funktionalitäten sind einerseits die Speicherfähigkeit des Leiters (v.a. chemisch und evtl. auch elektrisch) und die Abwärmenutzung des Gases am Leitungsende.

Im Hinblick darauf wurde mit der Modellierung eines entsprechenden Leiters begonnen. Dazu wurde folgendes Vorgehen gewählt:

- Genaue Modellierung der Temperatur-, und Druckverläufe und entsprechende numerische Simulation.
- Daraus Ermittlung von vereinfachten analytischen Ausdrücken für die entsprechenden Größen an den Leitungsenden
- Anschliessend soll das System soweit vereinfacht werden, dass eine Modellierung des gesamten „future energy networks“ ohne Bezug auf Spannungen, Drücke und dergleichen möglich wird

Dieses Modell bildet die Basis der weiteren Szenario-Untersuchungen.

### **Bedeutung von Energiespeicherung (B. Klöckl, High Voltage Laboratory)**

Ein wichtiger Bestandteil der Gesamt-Projektidee ist die Integration eines möglichst hohen Anteils an klassischen erneuerbaren Energiequellen in das optimale Systemlayout. Dies bedeutet jedoch im Hinblick auf die Stochastizität z.B. der Quellen „Wind“ und „Solar“ wesentlich erhöhte Anforderungen an die Hardware des involvierten Energieübertragungs- und –verteilungssystems. Verschiedene Studien bewerteten schon in vergangenen Jahrzehnten den Einfluss des Ausgleichs stochastischer Einspeisung an verschiedenen Orten in grossen Elektroenergiesystemen durch theoretisch unbegrenzte Übertragungskapazitäten und kamen zu dem Schluss, dass unter der genannten Annahme ohne weiteres 30 oder gar 40% der umgesetzten Energie aus solchen Quellen kommen könnte [3,4]. Auch kürzlich in Zusammenhang mit der extrem hohen Windkraft-Durchdringung des Energiesystems in manchen Bereichen Europas durchgeführte Untersuchungen kommen zu ähnlichen Schlussfolgerungen [5]. Nun ist das Ziel des vorliegenden Projektes aber auf eine Definition der notwendigen Hardware ausgerichtet und die Annahme eines unbegrenzten Zubaus von Übertragungskapazität kann im Lichte von Landschaftsschutz und politischen Rahmenbedingungen nach Meinung der Autoren ebenfalls nicht mehr aufrecht erhalten werden.

Es wurden deshalb als Input für ausgedehnte Simulationsreihen an verschiedenen Netzkonfigurationen simplifizierte Modelle für Energiespeicher entwickelt, um möglichst allgemeine Aussagen über deren Einfluss auf die Anforderungen an Übertragungs- und Verteilnetze zu erhalten. Als die wichtigsten Einflussgrößen auf die Speicher-Performance wurden nach einer umfangreichen Technologie-Recherche folgende Parameter identifiziert:

- Maximaler Energieinhalt
- Art des Speichermechanismus (kinetisch, kapazitiv oder potentiell)
- Verlustmechanismen
- Daraus resultierend: Speicher-Zeitkonstanten und deren Relation zu den geforderten zeit-abhängigen Klemmenleistungen

Aus den oben genannten Randbedingungen lässt sich für viele Situationen der technische, wirtschaftliche und ökologische Einfluss des Einsatzes von Energiespeichern bestimmen. Erste, nach dieser Methodologie durchgeführte Abschätzungen haben ergeben, dass unter Zugrundelegung vorhandener Netzstrukturen (d.h., das untersuchte übergeordnete Elektronenergiesystem ist starr und kann auf Betriebszustände eines lokal durch Energiespeicherung gepufferten stochastischen Erzeugers nicht reagieren) keine Verbesserungen durch Speichereinsatz zu erwarten sind. Die Gründe dafür sind:

- Unter Verwendung gemessener sowie synthetisch generierter stochastischer Signale kann eine Effizienzsteigerung des Gesamtsystems „stochastische Quelle–Speicher–Übertragungssystem“ nur in Ausnahmefällen nachgewiesen werden.
- Die effektive Umwandlung einer stochastischen Quelle in eine so genannte „dispatchable source“ ist mit vorhandenen Speichertechnologien nicht mit angebrachtem Aufwand zu bewerkstelligen. Der Grund liegt in den dafür notwendigen Energieinhalten der Speicher und den daran gekoppelten notwendigen Raum- und Kapitalaufwendungen.

Aus den oben genannten Zwischenergebnissen könnte man nun folgern, dass jede Art von Energiespeicherung als Lösung des Gesamtproblems nicht tauglich ist. Es gibt jedoch auch noch eine zweite Klasse von Ergebnissen, die aus den bisherigen Untersuchungen isoliert werden konnte. Die wichtigsten sind

- Da Energiespeicherung in den allermeisten Fällen mit interimsistischer Energieumwandlung verbunden ist, können synergetische Effekte am ehesten durch Zwischennutzung der umgewandelten Energie z.B. zur Energieübertragung erreicht werden. Als klassisches Beispiel sei die Umwandlung von erneuerbarer Energie in H<sub>2</sub> mit anschliessendem Transport genannt.
- Die reine Tatsache, dass ein Energiesystem an bestimmten Punkten Energie speichern kann, ist als Lösungsansatz für die künftigen Probleme der Elektroenergieversorgung nicht ausreichend. Vorteile ergeben sich nur dann, wenn das Gesamtaufbau eine zusätzliche Nutzung der umgewandelten Energie zulässt.

### **Systemmodellierung und –optimierung (M. Geidl, Power Systems Laboratory)**

Zentrales Element in der Projektidee ist der sog. Energy Hub, eine Art Energiedrehscheibe, in der Energie umgewandelt, gespeichert und verteilt werden kann [6]. Für diesen Energy Hub wurde ein Modell zur Analyse statischer Lastflüsse entwickelt [7]. Die durch die Energiekonversionen entstehenden Lastflussverkoppelungen zwischen den verschiedenen Energieträgern können damit mathematisch beschrieben und analysiert werden. Basierend auf diesem Modell wurden sowohl für den Energy Hub als auch für daraus aufgebaute Hub-Netze Optimierungsmodelle entwickelt [8]. Die Optimierung des Energy Hub konzentriert sich auf den optimalen Energiebezug und die interne Umwandlung der Energie für eine gegebene Lastsituation. Basierend auf Energiekosten, Emissionen und anderen Kriterien kann der Energiebezug optimal auf die zur Verfügung stehenden Energieträger aufgeteilt werden (z.B. Elektrizität, Gas, Fernwärme) [9-12]. Die Optimierung der Leistungsflüsse in Hub-Netzen zielt auf geringstmögliche Übertragungsverluste ab. Dabei werden die Leitungen für elektrische, chemische und thermische Energieübertragung durch ihre Verlusteigenschaften charakterisiert. Aus dem Ergebnis der Lastflussoptimierung können dann Schlüsse bezüglich optimaler Topologie und Betrieb des Netzwerkes gezogen werden.

### Lastverhalten und Zuverlässigkeit (G. Koeppel, Power Systems Laboratory)

Das Ziel einer neuen Energieversorgung muss sein, den Kundenbedarf mit hoher Zuverlässigkeit und Qualität zu decken. Zur sinnvollen Auslegung und Konfiguration von Energy Hubs sowie für Topologiestudien ist es folglich notwendig, das Zeitverhalten der Verbraucher zu kennen. Deshalb wurden von verschiedenen Schweizerischen Städten Lastprofile gesammelt, die teilweise ganze Städte repräsentieren, zum Teil aber auch einzelne Industriebetriebe oder Haushalte sowie Gruppen von Verbrauchern. Diese Lastprofile repräsentieren den Ist-Zustand und werden vor allem verwendet, um Modelle zu verifizieren und Sensitivitätsanalysen durchzuführen. Erste Fallstudien wurden durchgeführt und die Resultate werden momentan interpretiert und auf Sensitivitäten untersucht. Damit die Lastprofile auch für die Erarbeitung zukünftiger Netztopologien verwendet werden können, müssen jedoch verschiedene Zukunftsszenarien angewendet werden. Seit Mitte des Jahres ist deshalb das Centre for Energy Policy and Economics (ETH Zürich) ebenfalls Projektpartner. Aufgrund ähnlicher Projekte im nächsten Jahr wird das CEPE Synergien auch für dieses Projekt nutzen können. Die Szenarienarbeit wird folglich parallel zur Verfeinerung der Modelle vom vorliegenden Projekt geschehen und dann zeitgleich in Topologiestudien einfließen.

Neue Energieversorgungsstrukturen müssen aus Gründen der Akzeptanz eine hohe Zuverlässigkeit garantieren können. Zuverlässigkeitsmethoden werden deshalb sowohl bei der Erarbeitung von Topologien wie auch zur Bewertung von Topologien eingesetzt. Als Einarbeitung in das Gebiet wurde eine Studie veröffentlicht, in welcher - zur Gewährleistung der Zuverlässigkeit - der Einsatz von lokalen Energiespeichern als Alternative zu einer Netzverstärkung untersucht wird. Die Zuverlässigkeitsanalysen werden mit probabilistischen Methoden durchgeführt. Dadurch können die Zuverlässigkeitsmerkmale innerhalb eines Energy Hubs gut dargestellt werden. Mit Hilfe der Lastflussanalysen wird es so auch möglich, den Einfluss einzelner Komponenten auf die Verfügbarkeit der Versorgung zu untersuchen und entsprechend die Topologie zu optimieren. Momentan wird untersucht, die Zuverlässigkeit ähnlich dem 'economic dispatch' (ED) Verfahren zu implementieren, indem Nichtverfügbarkeiten pönalisiert werden [13]. Dies erlaubt, das System zusätzlich zu den oben erwähnten Kriterien wie Emissionen oder Energiekosten auf hohe Verfügbarkeit oder tiefe Ausfallkosten zu optimieren. Die Anzahl möglicher Zustände eines Energy Hubs steigt exponentiell an, weshalb ausserdem untersucht wird, ob es für grössere Netze sinnvoll ist, mit genetischen Algorithmen zu arbeiten. Dadurch könnte der Rechenaufwand deutlich reduziert werden [14]. Die Implementierung ähnlich dem ED-Verfahren wird bis Ende Jahr abgeschlossen sein. Die Untersuchung mit genetischen Algorithmen wird zu Beginn des nächsten Jahres durchgeführt.

### Projektbezogene Publikationen 2004

G. Koeppel, M. Geidl, G. Andersson: Value of storage devices in congestion constrained distribution networks. Paper presented at IEEE PES International Conference on Power System Technology (Powercon) 2004, Singapore.

B. Klöckl, P. Favre-Perrod: On the influence of demanded power upon the performance of energy storage devices. Paper presented at EPE-PEMC 2004, Riga, Latvia

## Geplante projektbezogene Publikationen 2005<sup>1</sup>

M. Geidl, G. Koeppel, G. Andersson: A model for multiple energy carrier systems. Extended abstract, submitted to IEEE PowerTech 2005, St. Petersburg, Russia.

M. Geidl, G. Andersson: Optimal power dispatch and conversion in multiple energy carrier systems. Abstract accepted for 15th Power System Computation Conference (PSCC) 2005, Liege, Belgium.

B. Klöckl: On the properties of stochastic power sources in combination with local energy storage. Abstract accepted for the CIGRÉ Symposium on Power Systems with Dispersed Generation, Athens, Greece

B. Klöckl, K. Fröhlich, K. Kaltenegger: New energy technologies, new requirements on electricity and an unresolved transition problem towards sustainability: Is there need for basic academic research? Abstract submitted to the CIGRÉ 5<sup>th</sup> Southern Africa Regional Conference, Cape Town, South Africa

## Nationale Zusammenarbeit

Folgende Firma mit Firmensitz in der Schweiz tritt ebenfalls als Projektpartner auf:

- ABB Medium Voltage Technology (Zürich). Die Zusammenarbeit schliesst sowohl finanzielle Unterstützung als auch die Bereitstellung fachlicher Ansprechpartner ein.

Als akademische Ansprechpartner mit Aussicht auf eine spätere vollwertige personelle Beteiligung in Form zusätzlicher Doktoranden treten an der ETH Zürich folgende Institute auf:

- Professur für Leistungselektronik und Messtechnik (Prof. Kolar)
- Institut für Automatik (Prof. Morari)
- CEPE – Centre for Energy Policy and Economics (Prof. Spreng)

Der Kontakt zu schweizerischen EVU wird im kommenden Jahr gesucht werden.

## Internationale Zusammenarbeit

Die folgenden ausländischen Firmen sind zur Zeit als vollwertige Partner in das Projekt integriert und gewähren sowohl finanzielle als auch fachliche Unterstützung. Weitere Partner werden laufend gesucht.

- VA Tech Hydro AG (Österreich)
- Areva (Frankreich)

Projektbezogene akademische Kooperationen und Gremienarbeit:

- Zusammen mit der Königlich Technischen Hochschule (KTH) Stockholm wird ein Projekt im Bereich Schutztechnik durchgeführt (M. Geidl)
- Mitwirkung in der CIGRÉ Arbeitsgruppe WG C6.05 (B. Klöckl)

---

<sup>1</sup> Es handelt sich um eine vorläufige Zusammenstellung von Arbeiten, die veröffentlicht werden sollen. Zeitpunkt, Titel und genauer Inhalt können sich je nach Verlauf der Reviewing-Prozesse noch ändern.

## Bewertung 2004 und Ausblick 2005

Ziel bis Dezember 2004 war die Erstellung eines „Rough Layout“. Die dafür notwendigen Systemanalyse und -optimierungswerkzeuge wurden entwickelt und sind einsatzbereit. Als zentrales Element der bisher gewonnenen Erkenntnisse ist die explizite theoretische Fokussierung auf hybride multifunktionale Energiesysteme und Betriebsmittel zu bezeichnen. Die bisherigen Resultate zeigen, dass synergetische Effekte durch Bündelung mehrerer Energieträger in derselben Infrastruktur Vorteile bei Investition und Betrieb bedeuten würde. Die offene Frage der teilweise notwendigen, aber fehlenden Technologien wird das Hauptaufgabengebiet der Gruppe „High Voltage Laboratory“ im Jahr 2005 sein. Für alle Bereiche des Projektes ist ein „Model Refinement“ geplant. Dafür müssen die Modelle auf eine detailliertere physikalische Ebene bezogen werden. Die Entwicklung eines entsprechenden kombinierten Lastflussberechnungs und -optimierungsmoduln ist deswegen ein zentrales Ziel für 2005 für die Gruppe „Power Systems Laboratory“.

## Referenzen

- [1] **BfE-Projektantrag Vision of Future Energy Networks**, Juni 2004
- [2] P. M. Grant, **Energy for the City of the Future**, The Industrial Physicist, February – March, 2002, p. 22.
- [3] E. Kahn, **The Reliability of Distributed Wind Generators**, Electric Power Systems Research 2 (1979), 1-14
- [4] J. Carlin, J. Haslett, **The Probability Distribution of Wind Power from a Dispersed Array of Wind Turbine Generators**, *Journal of Applied Meteorology*, March 1982, 303-313
- [5] **Persönliche Mitteilungen, CIGRÉ WG C6.05**, Januar und August 2004
- [6] R. Frik, P. Favre-Perrod, **Proposal for a Multifunctional Energy Bus and its Interlink with Generation and Consumption**, High Voltage Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, 2004
- [7] M. Geidl, **Power Flow Coupling in Hybrid Systems**, Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, Power Systems Laboratory, Zurich, 2004
- [8] B. Bakken, A. Haugstad, K. S. Hornnes, and S. Vist, **Simulation and Optimization of Systems with Multiple Energy Carriers**, presented at The 1999 Conference of the Scandinavian Simulation Society (SIMS '99), Linköping, Sweden, 1999.
- [9] M. R. Gent and J. W. Lamont, **Minimum Emission Dispatch**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-90, pp. 2650-2660, 1971.
- [10] V. L. Vickers, W. J. Hobbs, S. Vemuri, and D. L. Todd, **Fuel resource scheduling with emission constraints**, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, pp. 1531-1538, 1994
- [11] A. S. Vertis and L. Eisenberg, **An Approach to Emissions Minimization in Power Dispatch**, Journal of the Franklin Institute, vol. 296, pp. 443-449, 1973.
- [12] R. Ramanathan, **Emission constrained economic dispatch**, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, pp. 1994-2000, 1994
- [13] S. Asgarpoor and S. K. Panarelli, **Expected Cost Penalty due to Deviation from Economic Dispatch for Interconnected Power Systems**, *IEEE Transactions on Power Systems*, 10, 441-447, 1995.
- [14] N. Saaman and C. Singh, **Genetic Algorithms Approach for the Assessment of Composite Power System Reliability Considering Multi-State Components**, 8th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Iowa, 2004.