



# VISION OF FUTURE ENERGY NETWORKS

## Schlussbericht

Autor und Koautoren	Klaus Fröhlich / Göran Andersson (F. Adamek, P. Ahcin, M. Arnold, M. Galus, F. Kienzle (Verfasser), M. Schulze)
Beauftragte Institution	ETH Zürich, Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie.
Adresse	Physikstrasse 3 ETL H26, 8092 Zürich
Telefon, E-mail, Internetadresse	044 632 27 77, <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
BFE-Projektleiter	Rainer Bacher
Dauer des Projekts (von – bis)	1. Juli 2004 bis 30. Juni 2008
Datum	30. Juni 2008

## **Impressum**

Datum: 30. Juni 2008

**Im Auftrag des Bundesamt für Energie**

BFE-Projektnummer 100669

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

Bezugsort der Publikation: [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	1
Resumé.....	1
Abstract.....	1
1. Ausgangslage .....	2
2. Projektziel .....	3
3. Ergebnisse.....	3
4. Diskussion und Schlussfolgerungen.....	12
Referenzen .....	12

## ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Projektes „Vision of Future Energy Networks“ wurden Modelle und Methoden entwickelt, die einen Grüne-Wiese-Ansatz für Energiesysteme mit mehreren Energieträgern ermöglichen. Der Grüne-Wiese-Ansatz besteht darin, dass beim Entwurf des Energiesystems keine existierende Infrastruktur berücksichtigt wird, d.h. das System wird quasi auf einer grünen Wiese aufgestellt.

Die entwickelten Modelle beziehen sich auf den Einfluss von Energiespeichern auf Stromnetze mit stochastischer Erzeugung, auf die integrierte Modellierung und Optimierung von Multi-Energieträgersystemen, auf Zuverlässigkeitsbetrachtungen für zukünftige Energiesysteme sowie auf Möglichkeiten der kombinierten Übertragung von mehreren Energieträgern. Schlüsselkonzepte, die im Rahmen des Projektes erarbeitet wurden, sind der Energy Hub (für die Energieumwandlung und –speicherung) und der Energy Interconnector (für die Energieübertragung). Mit Hilfe dieser Konzepte ist es möglich, Strukturen für zukünftige Energiesysteme zu entwerfen, die den steigenden Anforderungen an die Energieversorgung gerecht werden.

## RESUME

Le projet « Vision of Future Energy Networks » a permis le développement de méthodes et modèles pour la description « ex nihilo » de systèmes énergétiques incluant différents vecteurs d'énergie. L'approche « ex nihilo » signifie qu'un nouveau système d'infrastructures est imaginé sans tenir compte du système actuel.

Les modèles développés font intervenir le stockage d'énergie en lien avec des sources d'énergie intermittentes, l'optimisation intégrée de systèmes multi-énergies (faisant intervenir plusieurs vecteurs), les implications en termes de fiabilité et les possibilités de transmission simultanées de plusieurs vecteurs d'énergie. Les concepts clés développés dans ce projet sont la plateforme de conversion et stockage d'énergie « Energy Hub » et la transmission de plusieurs formes d'énergie « Energy Interconnector ». A l'aide de ces éléments, l'élaboration de systèmes énergétiques répondant aux exigences du futur est facilitée.

## ABSTRACT

In the framework of the project „Vision of Future Networks“, models and methods have been developed that enable a greenfield approach for energy systems with multiple energy carriers. Applying a greenfield approach means that no existing infrastructure is taken into account when designing the energy system, i.e. the system is virtually put up on a green field.

The developed models refer to the impacts of energy storage on power systems with stochastic generation, to the integrated modelling and optimization of multi-carrier energy systems, to reliability considerations of future energy systems as well as to possibilities of combined transmission of multiple energy carriers. Key concepts, which have been developed in the framework of this project, are the Energy Hub (for the conversion and storage of energy) and the Energy Interconnector (for energy transmission). By means of these concepts, it is possible to design structures for future energy systems being able to cope with the growing requirements regarding energy supply.



In der Formulierung und Ausarbeitung des Projekts sollten stets die besonderen Merkmale des Projekts im Vordergrund stehen. Dies grenzte das Projekt VoFEN von thematisch verwandten Vorhaben ab und garantierte dessen innovativen Charakter. Diese Schwerpunkte waren:

- Der Grüne-Wiese-Ansatz: langfristig orientierte und unbeeinflusste Perspektive
- Das Multi-Energieträgernetz: Berücksichtigung aller tatsächlichen Bedürfnisse (gemeint ist der Endverbrauch und nicht etwa der Bruttostromverbrauch) der Netzteilnehmer.
- Die Integration der verschiedenen Verkehrsteilnehmer (öffentlich oder privat) in das Netz als Lasten, Erzeuger oder Speicher.
- Der Schwerpunkt auf physikalische Modelle (im Gegensatz zu ökonomischen Ansätzen, oder „Kupferplattenmodellen“, usw.)

## 2. PROJEKTZIEL

Ziel der Arbeit war es, Szenarien für die langfristige Entwicklung von Übertragungs- und Verteilnetzen für verschiedene Energieträger zu entwickeln. Der Fokus der Überlegungen lag dabei auf Elektrizitätsnetzen. Es sollte die Frage beantwortet werden, wie diese Systeme in 30 bis 50 Jahren grundsätzlich gestaltet sein sollten, um eine nachhaltige, wirtschaftliche und zuverlässige Energieversorgung sicherzustellen. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts sollten Topologien und Betriebskonzepte erarbeitet und entwickelt werden, die diesen Anforderungen besser gerecht werden als die heute vorhandenen Strukturen.

Im Unterschied zu den meisten Projekten anderer Institutionen lag der Fokus aber nicht auf der Integration dezentraler Generatoren in bestehende Netze. Vielmehr wurde die Methode des oben beschriebenen Grüne-Wiese-Ansatzes gewählt. Mit Hilfe dieses Ansatzes sollte unabhängig von vorhandenen Strukturen basierend auf heutigem Wissen und für die Zukunft absehbaren Technologien ein in der Zukunft optimales Energieversorgungskonzept bestimmt werden. Durch ein sogenanntes „Backcasting“ sollten anschliessend die Unterschiede zwischen der heutigen Situation und dem gewünschten zukünftigen System identifiziert werden.

## 3. ERGEBNISSE

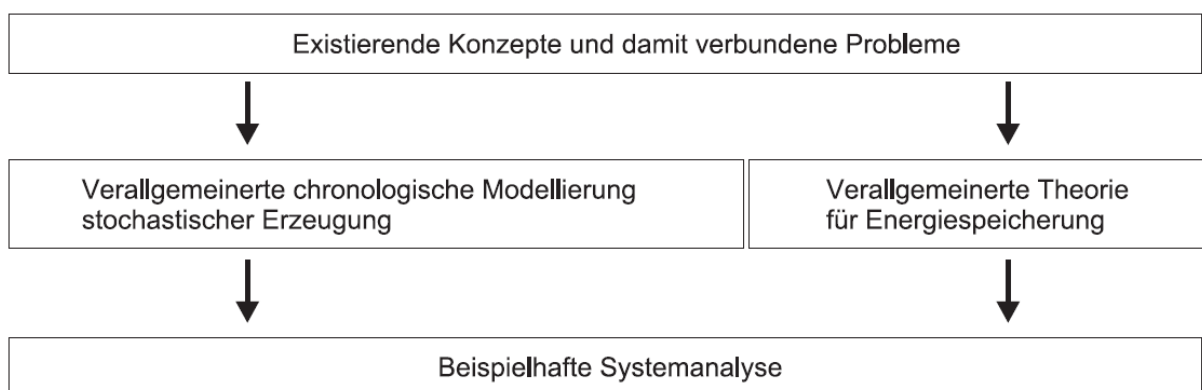
In [1] wurde der voraussichtliche Projektablauf skizziert, der den entstandenen Erkenntnissen laufend angepasst wurde. Seit 2004 wurden im Rahmen des VoFEN-Projekts vier Dissertationen abgeschlossen [2]-[5], deren Erkenntnisse und Resultate im Folgenden kurz zusammengefasst werden. Vollständige Dissertationen sind auf der Projekthomepage ([www.future-energy.ethz.ch](http://www.future-energy.ethz.ch)) verfügbar.

### EINFLUSS VON ENERGIESPEICHERN AUF STROMNETZE MIT STOCHASTISCHER ERZEUGUNG (B. Klöckl)

Planung und Betrieb von elektrischen Energiesystemen werden zunehmend vom gehäuftem Auftreten stochastischer Einspeisung aus erneuerbaren Energiequellen wie Wind- oder Solaranlagen beeinflusst. Die Auswirkungen erstrecken sich von komplexen Spannungsband-Management-Methoden auf Verteilnetzebene bis hin zu immer anspruchsvolleren Lastfluss-Managementmethoden auf der Übertragungsnetzebene. Das volatile Verhalten der stochastischen Erzeugung ist der Hauptgrund für die genannten Erschwernisse, vor allem, da die technisch unbeschränkte Einspeisung der jeweils maximal möglichen Leistung aus erneuerbaren Energiekonvertern ein erklärtes Ziel vieler Volkswirtschaften weltweit wurde und wird. Eine Möglichkeit, diese Volatilität zu reduzieren, ist der Einsatz von im System verteilten Energiespeichern. Sie sind theoretisch in der Lage, Energiemengen aus Perioden hoher Einspeisung in Perioden niedriger Einspeisung zu transferieren und damit die Charakteristika stochastischer Erzeugung an jene konventioneller Anlagen heranzuführen.

Diese Arbeit soll einen theoretischen Beitrag leisten, um die Frage nach der Sinnhaftigkeit von verteilten Speichern in komplexen Systemen und damit indirekt die Frage nach der Notwendigkeit von neuen Speichertechnologien einer Antwort näherzubringen. Dieser Fragenkomplex kann wahrscheinlich als eines der bekanntesten Henne-Ei-Probleme der Energietechnik bezeichnet werden.

Die Bewertung von Systemen mit hohem Anteil an stochastischer Erzeugung mit Energiespeichern wurde bislang mit denselben deterministischen Methoden durchgeführt, die typischerweise auch für konventionelle Systeme zur Anwendung kommen. Weiters ist zu bemerken, dass derzeit keine konsistente Standardmethodik für die Integration von Speichern in stochastisch gespeiste vermaschte Netze bekannt ist. Speziell für nicht vermaschte Inselfsystemlösungen ohne Anbindung an das öffentliche Netz ist eine Vielzahl von deterministischen Dimensionierungsmethoden in Verwendung. Das Zugeständnis an die stochastische Natur der Primärenergiequelle wird dabei nur durch die Verwendung von gemessenen Zeitreihen des Erzeugungsprozesses gemacht, gefolgt von einer Berechnung des ungünstigsten Betriebszeitpunktes mit verschiedenen Konfigurationen der Speichertechnik. Es kann jedoch leicht gezeigt werden, dass paradoxerweise die errechnete notwendige Speichergröße zunimmt, je mehr Datenmaterial des stochastischen Prozesses vorhanden ist. Die theoretischen Hintergründe dieses Problems werden in dieser Arbeit aufgezeigt und es wird vorgeschlagen, den Designprozess zu invertieren: Anstatt die notwendigen Charakteristika einer zu bestimmenden Speichertechnologie aus den vorhandenen Daten zu schätzen, werden diese Charakteristika als fixe Rahmenbedingungen der Untersuchung vorausgesetzt, und deren Betriebsverhalten auf der Basis von synthetisch generierten Zeitreihen analysiert. Abbildung 2 zeigt die zugehörige Argumentationskette.



**Abbildung 2:** Grobablauf der Problemanalyse.

Für die Durchführung dieser Vorgangsweise ist der Einsatz von digitaler Simulation notwendig. Speziell für kurze gemessene Zeitreihen kann gezeigt werden, dass die Erweiterung auf synthetische Zeitreihen beliebiger Länge durchgeführt werden muss, um Konvergenz in den Ausgangsgrößen beobachten zu können, was auf die speziellen Voraussetzungen des Problems zurückzuführen ist. Die statistischen Eigenschaften, welche von den synthetischen Zeitreihen erfüllt werden müssen, werden in einem neuartigen stochastischen Simulationsverfahren hergestellt. Dieses Verfahren ist geeignet, multivariate abhängige Zeitreihen mit beliebigen zeitlichen und wechselseitigen Abhängigkeitsstrukturen zu erzeugen. Die Auswirkungen der verteilten stochastischen Erzeugung auf wichtige technische Variablen von Energiesystemen gegebener Topologie, wie beispielsweise probabilistische Lastflüsse auf Übertragungsleitungen, kann dann mit und ohne Energiespeicher eingehend studiert werden. Die Unterscheidung zwischen verschiedenen Speichertechnologien erfolgt über eine generalisierte Leistungsbilanzgleichung, die in Verbindung mit einem speziell entwickelten Simulationsalgorithmus den direkten Vergleich zwischen verschiedenen Technologien ermöglicht. Die Gleichung folgt für alle Technologien der Form  $\dot{E} + P_L = P$ , worin  $\dot{E}$  die Energiestandsänderung,  $P_L$  die Verlustleistung, und  $P$  die Klemmenleistung des Energiespeichers ist.

Ergänzend werden in der Dissertation zwei Beispiele vorgestellt, eines davon, um die Möglichkeiten des entwickelten Simulationsverfahrens für die Eingangszeitreihen zu demonstrieren, das andere, um ein komplexes Energiesystem mit und ohne Speicher zu untersuchen. Dieses Beispiel belegt keinen klaren energetischen Vorteil von Systemen mit Speichern gegenüber Systemen ohne Speicher, weil die Verwendung von Energiespeichern realistischerweise die Gesamtverluste auf jeden Fall erhöht. Es ergeben sich jedoch erhebliche operative und planerische Vorteile, da bereits relativ geringe nutzbare Energieinhalte eine beträchtliche Reduktion der Maximallast auf den Übertragungsleitungen bewirken. Energiespeicher können daher verwendet werden, um die Topologie von Energiesystemen günstig zu beeinflussen. Mit der Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Quantifizierung dieses Nutzens mit probabilistischen und statistischen Methoden, wie der hier vorgestellten, zu erfolgen hat.

## **INTEGRIERTE MODELLIERUNG UND OPTIMIERUNG VON MULTI-ENERGIETRÄGERSYSTEMEN (M. Geidl)**

In der herkömmlichen Betrachtung von Energiesystemen werden Lastflüsse unterschiedlicher Energieträger, wie z. B. Strom und Erdgas, als nahezu unabhängig voneinander angenommen. Der zunehmende Einsatz von gasgefeuerten, dezentralen Erzeugungsanlagen, vor allem sog. Kraft- Wärme- (Kälte-)Kopplungsanlagen, sowie andere aktuelle Entwicklungen im Bereich der Energiewirtschaft legen allerdings eine integrierte Betrachtung der verschiedenen Energieträger nahe. Die Umwandlung von Energie, z. B. Gas in Strom, hat eine Kopplung der zugehörigen Lastflüsse zur Folge. Dies führt zu technischen und ökonomischen Wechselwirkungen zwischen den betroffenen Infrastrukturen. Die Untersuchung derartiger Phänomene verlangt nach integrierten Modellen, deren Entwicklung sich die Forschung in den letzten Jahren vermehrt angenommen hat.

In dieser Arbeit wurde ein Modell zur stationären Analyse von integrierten Energiesystemen entwickelt. Der allgemeine Ansatz, der auf dem „Energy Hub“-Konzept beruht, erlaubt eine konsistente und kongruente Beschreibung von Umwandlung, Speicherung und Übertragung beliebiger Energieträger. Dieses statische Systemmodell bildet die Grundlage für diverse Optimierungsprobleme, die in der vollständigen Dissertation aufgeführt sind.

Für die betriebliche Optimierung des Systems wurde ein Ansatz zur optimalen Umwandlung der Energieträger an einem Knoten gewählt, der dem klassischen Verfahren zur Bestimmung des optimalen Kraftwerkseinsatzes ähnlich ist. Wie beim klassischen Ansatz kann eine allgemein gültige Optimalitätsbedingung abgeleitet werden, die sich auf die inkrementellen Kosten der Energieträger bezieht. Unter Einbezug der Netzgleichungen kann der optimale Lastfluss aller Energieträger im System bestimmt werden. Neben der betrieblichen Optimierung wurden auch zwei Verfahren zur strukturellen Systemoptimierung vorgeschlagen. Im ersten Ansatz geht es um die Bestimmung eines theoretischen, mathematischen Optimums, welches als Grundlage für einen Systementwurf dienen kann. Im zweiten Ansatz wird aus einer gegebenen Menge von Energiekonvertern und -speichern eine konkrete, optimale Struktur gebildet. Einige Anwendungsbeispiele in der Dissertation zeigen grundlegende Eigenschaften sowie mögliche Einsatzgebiete der verschiedenen Modelle.

## **ZUVERLÄSSIGKEITSBETRACHTUNGEN FÜR ZUKÜNFTIGE ENERGIESYSTEME: MULTI-ENERGIETRÄGERSYSTEME UND DER EINFLUSS VON ENERGIESPEICHERN (G. Koepfel)**

Diese Dissertation widmet sich in zwei Teilen unterschiedlichen Aspekten der Zuverlässigkeit in zukünftigen Energieversorgungssystemen.

Teil I der Dissertation befasst sich mit Verfügbarkeitsberechnungen in Energieversorgungssystemen, die neben elektrischer Energie auch chemische und thermische Energie übertragen und verteilen. Basierend auf dem Energy Hub Ansatz, der die gleichzeitige Analyse mehrerer Energieträger ermöglicht, wird ein Verfahren zur Berechnung der Verfügbarkeit entwickelt. Mit diesem Zuverlässigkeitsmodell können die erwartete Versorgungszuverlässigkeit sowie die erwartete Menge nicht-versorgter Energie berechnet werden. Zudem können Energiesysteme modelliert werden, die Energiespeicher beinhalten. Zu diesem Zweck wurde ein Markov-basiertes Modell für Energiespeicher entwickelt, wobei der Speicher sowohl als Back-up – zur Überbrückung bei Zuleitungsausfällen – wie auch zur Abdeckung von Spitzenlasten eingesetzt werden kann.

Die Anwendung des Zuverlässigkeitsmodells sowie nur des Speichermodells wurde mit verschiedenen Beispielen und Sensitivitätsanalysen demonstriert. Zudem wurde die korrekte Funktionsweise des kompletten Modells mit alternativen Berechnungsmethoden schrittweise verifiziert. Neben der demonstrierten Anwendbarkeit der Modelle ist eine weitere Erkenntnis, dass Konversionen zwischen den verschiedenen Energieträgern einen positiven Einfluss auf die Versorgungsverfügbarkeit haben, insbesondere zur Reduzierung der erwarteten Menge nicht-versorgter Energie. Wenn die jeweiligen Lasten und installierten Übertragungsleistungen ähnlich dimensioniert sind, gilt diese Erkenntnis für alle drei betrachteten Energiesysteme. Vergleichsweise grösser dimensionierte Systeme profitieren zwar nicht von den Verbindungen zu den anderen Energieträgern, beeinflussen jedoch deren Zuverlässigkeit positiv.

Teil II der Dissertation befasst sich mit der Zuverlässigkeit der Netzeinspeisung durch nicht-steuerbare Erzeuger, insbesondere durch Photovoltaikanlagen und Windturbinen. Ein wichtiger Aspekt bei der Erzeugung aus erneuerbaren Energiequellen ist die Ungenauigkeit der Netzeinspeisungsprognosen. Es wurde deshalb vorgeschlagen, den nicht-steuerbaren Erzeuger am Einspeiseknoten mit einem Energiespeicher zu kombinieren. Dabei hat der Energiespeicher die Aufgabe, Differenzen zwischen der prognostizierten und der effektiven Einspeisung zu kompensieren. Die Zuverlässigkeit der Einspeiseprognose sowie der Wert des Erzeugers erhöhen sich durch diese Massnahme.

Zu diesem Zweck wurde ein Zeitreihen-basiertes Modell vorgeschlagen, welches sich auf verschiedene Typen von nicht-steuerbaren Erzeugern anwenden lässt. Der Algorithmus wurde in zwei Fallstu-

dien angewendet, mit Messdaten von einer 500 kW Photovoltaikanlage sowie mit Windgeschwindigkeitsmessungen an einer 2 MW Windturbine. Das Verhalten der Systeme wurde mit einer Reihe vorgeschlagener Indizes analysiert und bewertet. Beide Fallstudien demonstrieren die Anwendbarkeit der vorgeschlagenen Methoden. Ausserdem resultiert aus beiden Fallstudien, dass Energiespeicher die Zuverlässigkeit der Netzeinspeisung deutlich erhöhen können. Die dazu nötigen Energiekapazitäten hängen von der installierten Leistung der Generatoren ab und sind deshalb im Fall der Windturbine beträchtlich.

Zur Simulation verschiedener Prognosefehler, sowohl konstanter wie auch Zeithorizont-abhängiger Art, wurde ein neuer Ansatz entwickelt und erfolgreich implementiert. Des Weiteren wurde eine Methode zur monetären Bewertung des Speichers vorgeschlagen, basierend auf eingesparten Regelenergiekosten. Ausserdem wurde die Verwendung von Preiskurven diskutiert, zur Konzentration der Netzeinspeisung auf Stunden mit höheren Preisen. Schliesslich wurde die Relevanz und Aussagekraft von Zeitreihenanalysen diskutiert.

## **HYBRIDE ENERGIEÜBERTRAGUNG FÜR MULTI-ENERGIENETZE (P. Favre-Perrod)**

Die Anbindung erneuerbarer, stochastischer und dezentraler Energiequellen an das elektrische Netz wird dessen Betrieb und Gestaltung stark verändern. Die Nutzung zusätzlicher Interaktionsmöglichkeiten zwischen verschiedenen Energieträgern (etwa durch dezentrale Konversion) gehört zu den möglichen langfristigen Entwicklungstendenzen. Dadurch würden die Realisierung verschiedener Speichersysteme und die Anbindung neuer Teilnehmer (u.a. Hybridfahrzeuge) an das öffentliche Energienetz erleichtert.

Die allgemeine Beschreibung von Multi-Energiesystemen im Projekt "Vision of Future Energy Networks" erfolgt mittels Energie Hubs (als Schnittstelle zu den Netzteilnehmern) und Interconnectors (für die Energieübertragung). Die kombinierte Übertragungs- und Verteilungsinfrastruktur für verschiedene Energieträger stellt einen innovativen Lösungsansatz für aufkommende Fragestellungen dar, z.B. die Anbindung neuer erneuerbarer Quellen an das Energienetz. Zielsetzungen dieser Arbeit waren demnach die Formulierung eines Konzepts für die kombinierte Energieübertragung, die Erarbeitung eines Modellierungsrahmens, die Abschätzung der erreichbaren Leistungsmerkmale sowie die Identifikation einer möglichen Applikation dieses Konzepts.

Für das in dieser Arbeit beschriebene Prinzip des Interconnectors mussten zunächst eine Vorzugsvariante definiert werden, die physikalischen Prinzipien und deren Einfluss auf Systemauslegung und -betrieb ermittelt werden sowie der machbare Leistungsbereich identifiziert werden. Die in Frage kommenden Energieträger sind elektrische Energie, Erdgas, Wasserstoff, flüssige Kohlenwasserstoffe, Druckluft, Fernwärme, Fernkühlung, usw. Eine vielversprechende Kombination im Hinblick auf deren Einbindung in künftige Netze ist die Kombination der Übertragung von elektrischer und chemischer Energie.

Für diese Vorzugsvariante wurden Modelle entwickelt, welche die Beschreibung des kompressiblen, nicht-adiabatischen und reibungsbehafteten Gasflusses umfassen. In einem weiteren Schritt wurden analytische Näherungen entwickelt, welche die Ableitung einer Layout-Prozedur ermöglichten.

Schliesslich konnte diese Layout-Prozedur auf verschiedene Szenarien angewandt werden, welche einen breiten Bereich an Übertragungslängen und -leistungen abdecken. Der Vergleich der resultierenden Interconnector-Auslegungen ergab, dass der meistversprechende Anwendungsbereich des Interconnector-Prinzips im Bereich einiger zehn MW elektrischer und chemischer Leistung über eine Länge von einigen zehn Kilometern liegt.

Die hier entwickelte Layout-Prozedur kann im Rahmen der in nachfolgenden Projektphasen zu entwickelnden Infrastrukturszenarien angewandt werden.



## ARBEITSPAKETE IN BEARBEITUNG

2007 hat die Vertiefung und Validierung des Projekts begonnen. Momentan sind drei Arbeitspakete im Grundlagenbereich sowie zwei Fallstudien in Bearbeitung. Auf die einzelnen in Bearbeitung stehenden Arbeitspakete wird im Folgenden detaillierter eingegangen.

Es wurde ebenfalls eine ETH interne Zusammenarbeit mit dem Projekt „Integrierte Modellierung von Energie- und Verkehrssystemen“ initiiert. Die Modelle des VoFEN Projekts lassen sich in dieser Thematik günstig anwenden, so dass durch die enge Zusammenarbeit eine gegenseitige Verstärkung bewirkt wird. Die Aktivitäten in diesem Projekt werden im Folgenden als „Partnerprojekt“ bezeichnet.

## Investitionsstrategien für Systeme mit mehreren Energieträgern

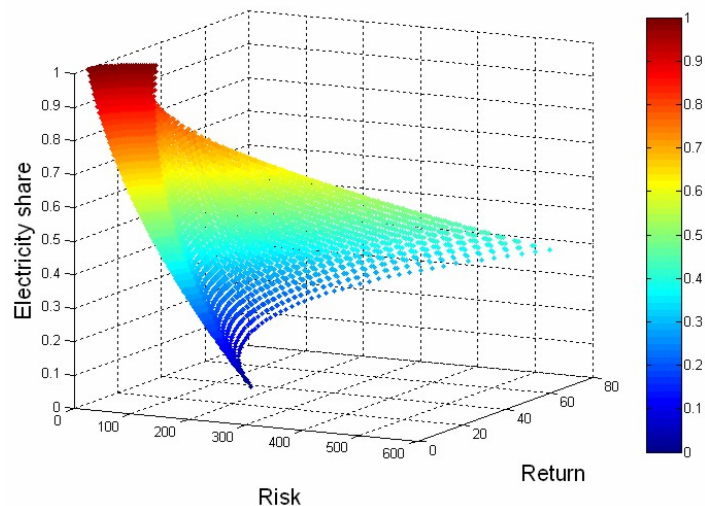
Traditionelle Energieplanung, wie sie heute grösstenteils praktiziert wird, konzentriert sich darauf, die kostengünstigste Erzeugungsalternative zu bestimmen. Im heutigen, immer dynamischer und komplexer werdenden Umfeld ist es jedoch quasi unmöglich, die kostengünstigste Alternative für die nächsten 30 Jahre vorherzusagen. Die moderne Finanztheorie liefert bessere Werkzeuge für die Miteinbeziehung von Risiko- und Unsicherheitsfaktoren in die Planung [1]. In diesem Teil des Projekts werden solche Werkzeuge auf Systeme mit mehreren Energieträgern angewendet, um effiziente Investitionsstrategien für die Zukunft entwickeln zu können.

Am Beginn der Arbeit stand die Identifizierung von Risikofaktoren, die bei der langfristigen Planung von Energiesystemen eine Rolle spielen. Es wurde analysiert, welche Faktoren entscheidend für die anschliessende Modellierung sind und welche unter Umständen vernachlässigt werden können. Aus der Studie von diversen Veröffentlichungen ergab sich, dass vor allem die unsichere zukünftige Entwicklung der Preise von fossilen Primärenergieträgern die Investitionsentscheidung entscheidend beeinflusst. Politische Massnahmen, die zum Ziel haben, den CO<sub>2</sub>-Austoss zu verringern und den Klimawandel abzuschwächen, werden den zukünftigen Preis einer emittierten Einheit CO<sub>2</sub> und damit auch den Preis einer produzierten Energieeinheit mitbestimmen. Die vorherrschende Unsicherheit über die zukünftige Ausgestaltung dieser Massnahmen stellt einen weiteren entscheidenden Risikofaktor für die Investitionsplanung dar.

Der nächste Schritt bestand darin, ein Modellierungskonzept zu finden, welches diese Art von Risikofaktoren abbilden kann. In mehreren Publikationen, z.B. [6], [7] und [8], wurde die sogenannte „mean-variance portfolio theory“, die ursprünglich für die Optimierung von Aktienportfolios entwickelt wurde, auf den Energiesektor angewendet. Dieses Modellierungskonzept wurde sowohl für die Abbildung der oben beschriebenen Risikofaktoren als auch für eine Anwendung auf mehrere Energieträger als geeignet identifiziert.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wurde die „mean-variance portfolio theory“ auf das Konzept des Energy Hubs angewendet und die dafür notwendigen modellierungstechnischen Anpassungen vorgenommen. Das Resultat ist ein allgemeines Modell eines Energy Hubs als Multi-Energie-Portfolio, das mehrere Ausgangsenergien wie Elektrizität, Wärme- und/oder Kälteleistung an seinem Ausgang zur Verfügung stellt. Mit diesem Modell ist es möglich, einen effizienten Mix aus Erzeugungstechnologien für einen bestimmten Bedarf an Ausgangsenergien zu bestimmen. Abbildung 3 veranschaulicht diesen Sachverhalt.

Für jede Kombination aus Ertrag und Risiko gibt die dreidimensionale Kurve den Anteil der Elektrizitätserzeugung an der gesamten Energieproduktion des Multi-Energie-Portfolios an. Für andere Ausgangsenergien wie z.B. Wärme- oder Kälteleistung kann die gleiche Art von Diagramm erstellt werden. Die Summe der einzelnen Energieanteile ist gleich 1 für jede Kombination aus Risiko und Ertrag. Mit Hilfe dieser Analyse kann der Planer eines Energieversorgungssystems, z.B. ein regionales Energieversorgungsunternehmen, eine effiziente Zusammenstellung seines Erzeugungsportfolios bestimmen.



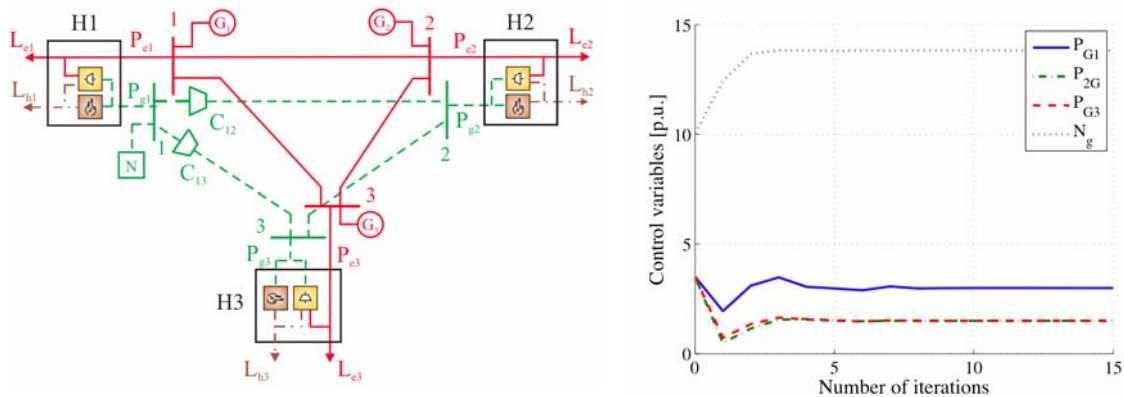
**Abbildung 3:** Elektrizitätsanteil an der gesamten Energieproduktion als Funktion von Risiko und Ertrag des Portfolios.

### Dezentrale Regelung für Systeme mit mehreren Energieträgern

Die heutigen Energieinfrastrukturen werden häufig unabhängig voneinander optimiert und betrieben. Ziel dieses Teilprojektes ist es, mehrere Energieträger zusammen zu optimieren und deren Kopplungen und Interaktionen zu berücksichtigen. Als Basis dient ein allgemeiner Modellierungs- und Optimierungsansatz, welcher sich auf statische Modelle stützt. Die Optimierung sowohl eines einzigen Energy Hubs als auch eines Netzes von verbundenen Hubs wurde untersucht. Dabei wurden die einzelnen Hubs mittels einer zentralen Regelstruktur verwaltet [9].

Bei einer zentralen Regelung wird ein Optimierungsproblem, welche das ganze System mit einbezieht, von einem zentralen Koordinator gelöst. Dafür müssen viele Daten über lange Distanzen übertragen werden und es entstehen grosse Optimierungsprobleme, welche schwer zu lösen sind aufgrund rechnerischer Leistungen. Deshalb wurde eine dezentrale Regelung für ein Hubsystem implementiert. Betrachtet wird ein kombiniertes Strom und Gas -system, welches sich aus 3 Hubs zusammensetzt. Bei einer dezentralen Regelung wird das gesamte Optimierungsproblem aufgeteilt auf die einzelnen Hubs. Die Hubs lösen die Optimierung für ihren zuständigen Bereich selbständig voneinander, müssen sich aber untereinander koordinieren. Verschiedene Methoden wurden untersucht, um ein Optimierungsproblem auf kleinere Einheiten aufzuteilen. In [10] wurden zwei Methoden auf elektrische Energiesysteme angewendet und weiterentwickelt. Für einen kombinierten Strom- und Gas-Lastfluss wurde die Dekompositionsmethode in [11] angewendet, adaptiert und implementiert in [12]. Die Hubs erreichen dabei eine Koordination untereinander, indem sie bestimmte constraints von benachbarten Hubs in ihre Optimierung einbauen. Dafür müssen die Hubs Daten austauschen, aber nur in einem beschränkten Masse und nur zwischen direkt benachbarten Hubs.

In Abbildung 4 (links) ist der Aufbau des Systems gezeigt, welches sich aus drei identischen Hubs zusammensetzt. Die Hubs werden mit Strom und Gas versorgt und liefern Strom und Wärme am Ausgang. Für die interne Konvertierung beinhalten die Hubs eine CHP und Feuerungseinheit. Das Stromnetz beinhaltet drei Generatoren, Gas wird von einem angrenzenden Netzwerk importiert. Das System wird in drei Zuständigkeitsbereiche unterteilt, welche jeweils den Hub und die an ihn angrenzenden Busse enthalten. In Abbildung 4 rechts sind die Regelungsvariablen während des Koordinationsprozesses aufgezeigt. Die Generatoren passen sich ihren Produktionskosten an (G1: 1 p.u., G2, G3: 2 p.u.), d.h. G1 erhöht seine Produktion verglichen mit den anderen beiden Generatoren. Man bemerkt, dass alle Hubs ihre elektrische Last zuerst mit Gas (via CHP) versorgen wollen und ihre Stromproduktion vermindern. Nach einigen Iterationen erkennen die Hubs, dass es günstiger ist, die elektrischen Lasten auch via elektrische Inputs zu decken.



**Abbildung 4:** Links: Setup drei Hub System. Rechts: Regelungsvariablen, d.h. Generatoren Output und Gas Import.

### Hubtechnologie

Vorangegangene Untersuchungen im VoFEN-Projekt haben das Potential von Energy Hubs aufgezeigt. Jedoch wurde nicht geklärt, wie die im Hub enthaltenen Komponenten ausgewählt werden sollen, um eine gewisse Hubfunktionalität zu realisieren. Deshalb wurde im Juni 2008 das Arbeitspaket „Hubtechnologie“ gestartet, das eine Verfeinerung des Hubmodells zum Ziel hat. Die genaue Beziehung zwischen den Zuständen von einzelnen Energiewandlern und der Leistung am Ausgang des Hubs soll untersucht werden. Das resultierende Konverter-basierte Modell benötigt Informationen über verfügbare Technologien, zum Beispiel in Form einer Technologiedatenbank. Mit dem in der Datenbank enthaltenen Wissen können generische Anwendungen untersucht werden, um Regeln für ein Hublayout abzuleiten. Optimale Hublayouts können unter Verwendung von Multi-Kriterien-Optimierung (Minimierung von Kosten, Minimierung von Umweltauswirkungen, usw.) bestimmt werden. In einem weiteren Schritt soll eine verallgemeinerte Layoutprozedur entwickelt werden. Eine wichtige abschliessende Aktivität wird die Integration des entwickelten Modells in schon vorhandene VoFEN Tools darstellen.

Dieses Arbeitspaket wird es ermöglichen, für gewisse Anforderungen in Bezug auf Funktionalität optimale Hub- bzw. Systemlayouts zu bestimmen. Es stellt damit einen wichtigen Schritt in Richtung optimales Grüne-Wiese-System dar.

### Fallstudie Energie-Hub Baden

Die Vertragspartner für die Fallstudie Baden hatten, obwohl grundsätzlich positiv gestimmt, bis zuletzt Bedenken, was die Vertragsunterzeichnung und somit den finalen Projektstart auf Anfang September verzögert hat. Seit dem Start hat sich die Zusammenarbeit positiv entwickelt. In vielen Sitzungen zusammen mit Vertretern der Regionalwerke und des Kantonsspitals wurde zunächst das Untersuchungsgebiet abgegrenzt, die Wahl viel auf die Region Dättwil, und die Netzknoten geeignet verteilt. Dättwil ist als Fallstudie besonderes geeignet, da schon heute sowohl Erdgas als auch Fernwärme im Versorgungsgebiet zusätzlich zum Strom zur Verfügung steht. Berücksichtigt wurden für die Wahl der Netzknoten, so wie es im Sinne des Energy Hub Konzeptes gedacht war:

- Geographische Lage, d.h. eine gewisse räumliche Konzentration der inkludierten Elemente
- Homogenität in der Erzeugungs- bzw. Verbrauchscharakteristik
- Strategische und hierarchische Einordnung im bestehenden Netz

Die Anzahl der Netzknoten wurde für den Anfang auf 11 festgelegt (Abbildung 6). In vorangegangenen Projektteilen wurde zumeist mit 1 bis 3 Netzknoten gearbeitet. Somit ist die höher gewählte Anzahl auch eine Probe, ob die Optimierungsalgorithmen auch bei grösseren Problemstellungen konvergieren und wie dann die Rechenzeit ausfällt.

Der erste Knoten, welcher als Energy Hub modelliert wurde, ist das Kantonsspital Baden. Die Heizungsanlage vor Ort versorgt ausser dem Krankenhauseigenbedarf auch Teile der Wohnsiedlung in Dättwil. Ferner ist das Krankenhaus an das Erdgasfernleitungsnetz angeschlossen. Eine geplante

Holzschnitzelanlage soll schon in naher Zukunft die bestehende Heizungsanlage ersetzen und wird dann auch eine Umwandlung von Gas in Strom und Wärme ermöglichen.

Auf das Kantonsspital konnten dann die Optimierungen multi-period optimal dispatch und multi-carrier optimal power flow angewandt werden. Somit können verschiedene Konfigurationen für die geplante Holzschnitzelanlage evaluiert werden und hinsichtlich ihres Einflusses auf die umgebende Netzstruktur verglichen werden. Aus der existierenden Vorstudie zum Energy Hub am Kantonsspital konnten bereits Aussagen bezüglich der Auswirkungen auf den Netzbetrieb abgeleitet werden. Detaillierte Ergebnisse für die Optimierungen stehen zum Zeitpunkt der Drucklegung noch nicht zur Verfügung.



**Abbildung 5:** Verteilungsmuster der Energy Hubs im Untersuchungsgebiet Dättwil.

### Fallstudie Swispower

Die zweite Fallstudie findet seit Februar 2008 in Kooperation mit Swispower statt. Ziel dieser Fallstudie ist es, die Lücke zwischen den theoretischen Modellen, die innerhalb früherer VoFEN-Arbeitspakete entwickelt wurden, und der praktischen Anwendung für komplexe Probleme zu schliessen. Entwicklungen in Richtung dezentraler und/oder stochastischer Erzeugung, der Einfluss von Speichereinsatz und Herausforderungen wie Klimawandel erfordern neue Lösungen für eine nachhaltige Energieversorgung. Innerhalb der Fallstudie werden Interaktionen mit dem Arbeitspaket „Dezentrale Regelung für Systeme mit mehreren Energieträgern“ erwartet, zum Beispiel, um optimale Regelstrategien für WKK-Anlagen zu bestimmen oder in Bezug auf dynamische Modellierungsmethoden. Um den potentiellen wirtschaftlichen Nutzen von Energy Hubs zu untersuchen wird die Fallstudie ebenfalls mit dem Arbeitspaket „Investitionsstrategien für Systeme mit mehreren Energieträgern“ interagieren. Schlussendlich könnte das Interconnector-Konzept als Verbindung zwischen verschiedenen Swispower-Mitgliedsstädten untersucht werden.

### Integrierte Modellierung von Energie- und Verkehrssystemen (Partnerprojekt)

Das Projekt „Integrated Modelling of Energy and Transportation Systems“ beschäftigt sich mit einer zukünftigen Integration des individuellen Transportsektors in das bestehende Energiesystem. Die Schnittstelle beider Systeme sind Elektrische Autos sowie die, in letzter Zeit vermehrt erforschten, „Plug-In Hybrid Electric Vehicles“ (PHEV). Ziel des Projektes soll es sein die Auswirkungen einer weitflächigen Verbreitung solcher Systeme auf das derzeitige sowie zukünftige Energieversorgungssystem zu untersuchen. Dieses Projekt wurde im Rahmen eines Polyprojektes in Zusammenarbeit mit D-BAUG, IVT und D-MAVT, LAV eingereicht. Aufgrund der stark hybriden Ausprägung, die auf Erkenntnissen aus der Transporttheorie, der Automobiltechnologie sowie der Energieversorgungstechnologie wird das Projekt die Forschungen aus diesen drei Bereichen zusammenführen. Basierend auf

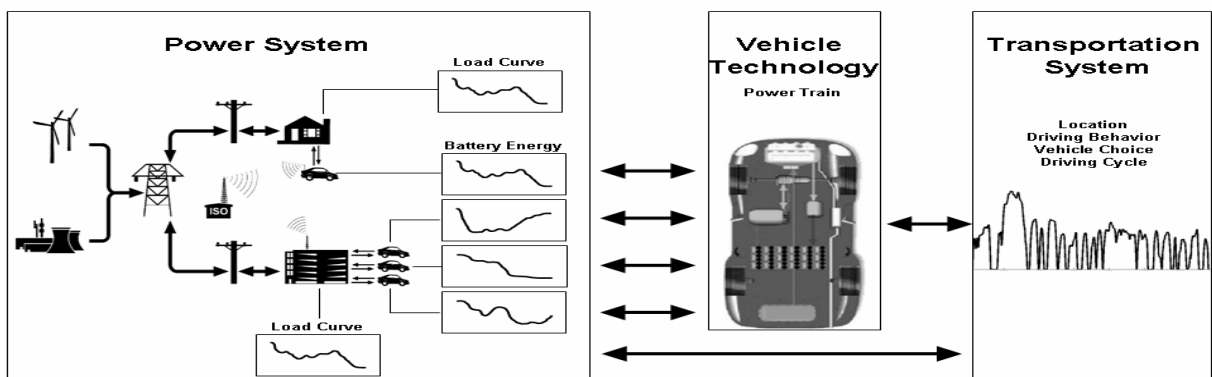
Erkenntnissen der jeweiligen anderen Bereiche werden Rückschlüsse auf die Technologien gezogen werden. Im Bereich der Energieversorgungssysteme werden hierbei folgende Schwerpunkte gelegt:

- Aufgrund der neuen Last, welche durch den Betrieb der PHEV resultiert, werden neue Lastkurven erwartet. Daher soll eine Analyse basierend auf Transport- und Automobiltechnologien Aufschluss über die zusätzliche Energienachfrage geben. Da fortgeschrittene Transport-systemanalysen auf der Agententheorie basieren, ist diese als Schnittschnelle von zentraler Bedeutung. Eine Erweiterung der Energy Hub Theorie für PHEV und ihre Versorgungsumgebung durch einen Agentenansatz wird angestrebt.
- Neue Lastmanagementmöglichkeiten sollen im Rahmen dieses Projektes ebenfalls untersucht werden, da durch die zusätzliche Nachfrage von Energie mit Engpässen bei der Versorgung zu rechnen ist. Netzseitige und generatorseitige Untersuchungen von eventuellen sind angedacht.
- Da für PHEV auch ein bidirektionaler Energiefluss in Betracht gezogen wird, sollen etwaige Auswirkungen auf die Energieversorgung untersucht werden. Durch eine hohe Penetration von PHEV im Markt kann ein großer Speicher im Energiesystem realisiert werden den es zu Nutzen gilt. Im Fokus stehen dabei Möglichkeiten erneuerbare Energiequellen vermehrt zu unterstützen. Ein Agentenansatz zusammen mit „Smart Metering Devices“ und einer Marktmodellierung für den Regelenergiemarkt soll diese Möglichkeit untersuchen.
- Durch den Bidirektionalen Energiefluss werden auch Grid Restoration Services Möglich. Eine Evaluation des durch die PHEV vorhandenen Speichers im Energieversorgungssystem wird modelliert und eine Analyse wird etwaige Möglichkeiten aufzeigen können.

Das Bild zeigt die typischen Interaktionen zwischen den drei Technologien auf und verdeutlicht zugleich die Funktion der PHEV im Energieversorgungssystem.

Bisherige, vorläufige Aktivitäten umfassten:

- 1) Ausgehend von der Definition eines Energy Hubs für PHEV sollen diese in das Energiesystem eingefügt werden. Dazu wurde eine Evaluation der derzeitigen PHEV Technologie durchgeführt, die Funktionsweise untersucht und Daten gesammelt. Typische Regelungstechniken für PHEV wurden betrachtet.
- 2) Ein vorläufiges Energy Hub Model für PHEV wurde erstellt. Es basiert auf den gesammelten Daten und der an der ETH Zürich entwickelten Theorie.
- 3) Eine Evaluation derzeitiger agentenbasierter Technologien für Distributed Generation (DG) Möglichkeiten wurde/wird durchgeführt. Diese soll Aufschluss darüber geben wie eine mögliche agentenbasierte Eingliederung von PHEV Energy Hubs in das Energiesystem erfolgen kann. Als Vorbildfunktion sollen DG Ergebnisse dienen.



**Abbildung 6:** Interaktion der Systeme Energie, Transport und Automobil

Detailliertere Informationen zum Projektverlauf in letzter Zeit finden sich in [13] und [14].

## 4. DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Im Rahmen des Projekts „Vision of Future Energy Networks“ wurden Modelle entworfen, mit Hilfe derer in einem Grüne-Wiese-Ansatz optimale zukünftige Energiesysteme mit mehreren Energieträgern entworfen werden können. Die dabei entstandenen Dissertationen widmen sich unterschiedlichen Aspekten von Multi-Energiesystemen. In der Welt der Wissenschaft fanden die entwickelten Modelle grossen Anklang. Das Konzept des Energy Hubs wird vielfach in Publikationen zitiert und wird von anderen Forschungseinrichtungen als Modellierungsmethode verwendet. Sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene wurden im VoFEN-Projekt entstandene Arbeiten mit Preisen ausgezeichnet (Innovationspreis 2007 der ETG der electrosuisse und 1. Preis im Internationalen Wettbewerb um den Preis herausragender Dissertationen im Ingenieurwesen der Ingenieurkammer Bozen).

Über die Zusammenarbeit mit international agierenden Industriepartnern (ABB, AREVA, Siemens) wurde eine weite Verbreitung des erarbeiteten Wissens erreicht. Ab Herbst 2008 werden auf europaweiter Ebene im VoFEN-Projekt entwickelte Ideen im Rahmen des 7. Rahmenforschungsprogramms der EU einfließen. Im Projekt IRENE-40 (Infrastructure Roadmap for Energy Networks in Europe) wird es um eine Analyse und Szenarien für die Energieinfrastrukturentwicklung in Europa gehen.

Neben momentan laufenden Arbeitspaketen, die zusätzliche Modellerweiterungen auf theoretischer Ebene verfolgen, werden im Zusammenhang mit den angelaufenen Fallstudien Ansätze aus dem Projekt im Rahmen praktischer Probleme angewendet. Dies wird einerseits den Wissenstransfer von der Hochschule in die „Aussenwelt“ unterstützen. Andererseits werden Rückschlüsse über die Anwendbarkeit der entwickelten Modelle gewonnen werden können, was wiederum Hinweise für die Weiterentwicklung der Modelle liefern wird.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass nach der ersten Projektphase, in der der Fokus auf der Modellbildung lag, nun in der zweiten Phase die Erprobung der Modelle in der Praxis verstärkt in den Vordergrund rücken wird.

## REFERENZEN

- [1] **Projektbeschreibung VoFEN**, 2003
- [2] B. Klöckl. **Impacts of Energy Storage on Power Systems with Stochastic Generation**. Dissertation, Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik, ETH Zürich, 2007.
- [3] M. Geidl. **Integrated Modeling and Optimization of Multi-Carrier Energy Systems**. Dissertation, Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik, ETH Zürich, 2007.
- [4] G. Koeppel. **Reliability Considerations of Future Energy Systems: Multi-Carrier Systems and the Effect of Energy Storage**. Dissertation, Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik, ETH Zürich, 2007.
- [5] P. Favre-Perrod. **Hybrid Energy Transmission for Multi-Energy Networks**. Dissertation, Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik, ETH Zürich, voraussichtlich August 2008.
- [6] S. Awerbuch, M. Berger: **Applying Portfolio Theory to EU Electricity Planning and Policy-Making**, IEA/EET Working Paper, Februar 2003.
- [7] B. Krey, P. Zweifel: **Efficient Electricity Portfolios for Switzerland and the United States**, Working Paper No. 0602, Februar 2006.
- [8] D. Bar-Lev, S. Katz: **A Portfolio Approach to Fossil Fuel Procurement in the Electric Utility Industry**, The Journal of Finance, Vol. 31, No. 3, Juni 1976.
- [9] M. Geidl, G. Andersson, **Optimal Power Flow of Multiple Energy Carriers**, IEEE Transactions on Power Systems, vol.22, no. 1, pp. 145-155, 2007.
- [10] M. Arnold, S. Knöpfli, G. Andersson, **Improvement of Opf Decomposition Methods Applied to Multi-Area Power Systems**, PowerTech 07, Lausanne, Switzerland, 2007.
- [11] A. Conejo, F. Nogales, F. Prieto, **A Decomposition Procedure based on Approximate Newton Directions**, Mathematical Programming, vol. Ser. A 93, pp. 495-515, 2002.
- [12] M. Arnold, G. Andersson, **Decomposed Electricity and Natural Gas Optimal Power Flow**, Power Systems Computation Conference 07, Glasgow, Scotland, 2008.
- [13] **BfE-Jahresbericht Vision of Future Energy Networks**, 2006.
- [14] **BfE-Jahresbericht Vision of Future Energy Networks**, 2007.