

ENERGIE

Optimierungsprobleme aus der Energieversorgung



Projektkoordination

Prof. Dr. Alexander Martin

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Department Mathematik
Am Weichselgarten 9 | 91058 Erlangen

Telefon: +49 (0)9131 - 85 209 48
E-Mail: alexander.martin@math.uni-erlangen.de

Public Relations

Sonja Friedrich

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Department Mathematik
Am Weichselgarten 9 | 91058 Erlangen

Telefon: +49 (0)9131 - 85 209 54
E-Mail: sonja.friedrich@math.uni-erlangen.de



ENERGIE

Optimierungsprobleme aus der Energieversorgung

Kraft mal Weg – physikalisch gesehen ist das Energie: so kurz und knapp, so einfach und verständlich. Kaum vorstellbar, dass es das ist, was unsere Gesellschaft zu dem macht, was sie heute ist.

Energie ist überall. Jeder von uns benutzt sie täglich und ist auf sie angewiesen. Ohne Energie säßen wir im Dunkeln, es wäre kalt und für den Einen oder Anderen auch sehr langweilig, weil weder Fernseher noch Kühlschrank funktionierten. Ein ganz unvorstellbares Szenario für die meisten von uns. Doch die Ressourcenverknappung und die zunehmende Umweltbelastung führen uns genau solche Szenarien immer öfter vor Augen. Der

Klimawandel ist in aller Munde. So gewinnt die Energieeffizienz bei der Umwandlung und der Nutzung immer mehr an Bedeutung. Die Entwicklung umweltfreundlicher und nachhaltiger Strategien mit Einsatz erneuerbarer Energien in der Versorgung spielt eine immer wichtigere Rolle. Denn die Steigerung der Effizienz bietet nicht nur wirtschaftliche Vorteile wie Kostensenkungen, sondern mit Umwelt- und Klimaschutz auch ökologische.

Effiziente regenerative Energiekonzepte im urbanen Raum

Im Gebäudesektor bietet die Nutzung von erneuerbaren Energien in Verbindung mit einer energetischen Vernetzung vielfältige Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung. Dabei ist für die Planung effizienter Energieversorgungskonzepte auf Quartiers-ebene eine ganzheitliche Betrachtung von dezentralen Energieerzeugungs-, Speicher- und Vernetzungspotenzialen von Bedeutung. Neben technischen Konzepten wie Photovoltaik, Geothermie und Kraft-Wärme-Kopplung wird auch die energetische Nutzung von urbanen Freiflächen in den Planungsprozess eingebunden.



Der Schwerpunkt dieses Projekts liegt auf einer gebäudeübergreifenden Betrachtung im urbanen Raum, wodurch zusätzliche Synergieeffekte bei einer energetischen Vernetzung entstehen. Zu diesem Zweck wird der Gebäudebestand in Deutschland energetisch und mikroklimatisch untersucht und in so genannten Stadtraumtypologien zusammengefasst.

Auf Grundlage der Stadtraumtypologien werden in Kooperation mit Architekten der Technischen Universität Darmstadt (Fachgebiete: Entwerfen und Energieeffizientes Bauen, Entwerfen und Freiraumplanung) erweiterte Optimierungsmodelle aus dem Netzwerkdesign und der Ausbauplanung formuliert, welche die beschriebene Fragestellung hinreichend genau abbilden. Die zu treffenden Entscheidungen können diskreter oder kontinuierlicher Art sein, also zum Beispiel ob eine Anlage zu installieren ist und im Falle der Errichtung deren Größe und Betriebsweise. Die Optimierung erfolgt bezüglich verschiedener Kriterien, beispielsweise der Wirtschaftlichkeit, des Primärenergiebedarfs oder der CO₂-Einsparung.

Aus mathematischer Sicht sind Netzwerkdesignprobleme, in denen sowohl kombinatorische Aspekte als auch physikalische Randbedingungen modelliert werden, wenig untersucht. Um diese Probleme für praxisrelevante Größenordnungen lösen zu können, werden daher geeignete mathematische Verfahren entwickelt, welche Lösungen mit Gütegarantie liefern. Ein wesentliches Ziel ist die Implementierung der entwickelten Verfahren und darauf aufbauend die prototypische Erstellung eines Softwaretools. Anhand von realen Datensätzen wird das Softwaretool evaluiert und gegebenenfalls angepasst, um eine Anwendung in der Praxis zu ermöglichen.

Kostenoptimierte Planung gekoppelter Energienetze



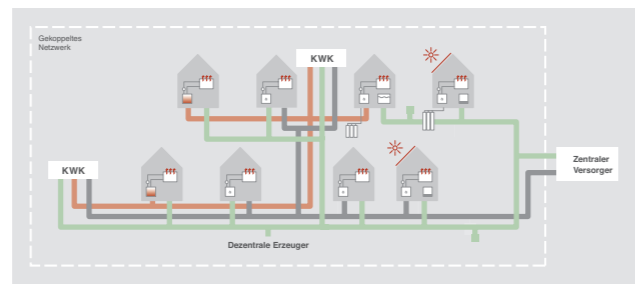
Gegenwärtig wird der Einsatz dezentraler Energieumwandlungsanlagen in der Energieversorgung politisch stark unterstützt. Dezentrale Energienetze fördern unter Anderem das Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), das die gleichzeitige Erzeugung von Strom und Wärme beinhaltet und sowohl energiewirtschaftliche als auch ökologische Vorteile bietet. So erreichen KWK-Anlagen eine hohe Ausnutzung des zugeführten Brennstoffs durch die Verwendung der bei der Stromerzeugung anfallenden Abwärme für Heizzwecke. Aufgrund der lokalen Energieerzeugung in Abnehmernähe werden außerdem Übertragungsverluste verringert. In der Energieversorgung werden die einzelnen Energieträger bisher sowohl bei der Planung als auch im Betrieb zumeist getrennt voneinander betrachtet. Durch den Einsatz dezentraler Energieumwandlungsanlagen werden jedoch die Energieträger Strom, Gas und Wärme stark gekoppelt. Dies macht eine simultane Planung der drei Versorgungsinfrastrukturen nötig, um die Potentiale von Kraft-Wärme-Kopplung auszunutzen und ein effizienteres Gesamtsystem zu ermöglichen.

Das Ziel dieses Projektes ist eine kostenminimale Infrastruktur zur thermischen und elektrischen Versorgung einer Siedlung, die an ein öffentliches Gas- und Stromnetz angeschlossen ist. Dabei sind in jedem Wohnblock eine KWK-Anlage zur gleichzeitigen Gewinnung von Strom und Wärme, ein Heizkessel zur thermischen Spitzenlastdeckung sowie ein Wärmetauscher zur Trennung des hausinternen vom lokalen Wärmenetz installiert. Diese dezentralen Anlagen ergeben zusammen einen so genannten Energy-Hub.

Die gekoppelten Energienetze sollen kostenminimal ausgelegt und dimensioniert werden. Die Aufgabe besteht darin zu bestimmen, auf welchen Trassenabschnitten Strom-, Gas- oder Wärmeleitungen verlegt und welche diskreten Leitungsschnitte dazu ausgewählt werden. Dabei werden sowohl die Investitionskosten für die Verlegung und Dimensionierung als

auch die im Betrachtungszeitraum anfallenden Betriebskosten berücksichtigt. Diese Topologie- und Dimensionierungsentscheidungen führen zu einer mathematischen Modellierung mit ganzzahligen Variablen. Dabei wird die Modellierung in Kooperation mit Energiewissenschaftlern der Technischen Universität Dortmund und dem Fraunhofer Institut *UMS/ICHT* durchgeführt. Eine Besonderheit dieses Modells besteht in der Kopplung der drei Energiesysteme über die oben beschriebenen Energy-Hubs. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der realitätsnahen Modellierung der physikalischen Randbedingungen wie etwa Energieübertragung, wobei die geforderte Genauigkeit die Integration von nichtlinearen Funktionen in das Modell verlangt. Aus mathematischer Sicht führt dies insgesamt zu einem gemischt-ganzzahligen nichtlinearen Optimierungsproblem.

Die mathematische Optimierung von gemischt-ganzzahligen nichtlinearen Problemen ist im Allgemeinen sehr schwer. Das betrachtete Problem ist bei steigender Komplexität mit gängiger Standardsoftware nicht mehr lösbar. Um dennoch beweisbar global optimale Lösungen in angemessener Zeit liefern zu können, werden die nichtlinearen Funktionen stückweise linear approximiert. Das dadurch entstehende gemischt-ganzzahlige lineare Optimierungsproblem wird durch ein exaktes Branch-and-Cut Verfahren gelöst. Dieser Löser wird durch problemspezifische Methoden der gemischt-ganzzahligen Optimierung ergänzt.



BMBF-Verbundprojekt „Dezentrale regenerative Energieversorgung: Innovative Modellierung und Optimierung“

Optimale Energieversorgung bei fluktuierender regenerativer Einspeisung



Im Hinblick auf den Einsatz von erneuerbaren Energien in der Stromproduktion gewinnt die Windenergienutzung in Deutschland immer mehr an Bedeutung. Gleichzeitig beinhaltet die verstärkte Nutzung von stark fluktuierenden Energiequellen jedoch eine zusätzliche Herausforderung, da in einem von Unsicherheit geprägten Umfeld ein Ausgleich zwischen schwankendem Angebot und Nachfrage zu jeder Zeit sichergestellt sein muss.

Neben Regelenergiekraftwerken und schnell startenden Gasturbinenkraftwerken bietet der Einsatz von Energiespeichern die Möglichkeit, auf dieses Ungleichgewicht zu reagieren. Durch die Zwischenspeicherung von elektrischer Energie in Stromspeichern soll eine Entkopplung von Angebot und Nachfrage erwirkt und damit eine kostengünstige Stromproduktion erzielt werden.

Um die vorgestellten Ausgleichsoptionen nach ökonomischen Gesichtspunkten bewerten zu können, wird ein Energieerzeugungssystem aus verschiedenen Kraftwerkstypen, einem Windpark und Energiespeichern betrachtet, welches zusätzlich die Möglichkeit bietet, Strom von der EEX Börse zu beziehen. Insgesamt soll dabei die Stromnachfrage einer Region bestimmter Größe möglichst kosteneffizient gedeckt werden. Dieses

Problem wird in Zusammenarbeit mit Energiewissenschaftlern der Universität Duisburg-Essen und der Ruhr-Universität Bochum sowie mit Mathematikern der Humboldt-Universität zu Berlin als mathematisches Optimierungsproblem formuliert. Dabei treten sowohl kombinatorische Aspekte aus den Schaltvorgängen der Anlagen als auch nichtlineare Funktionen aus der Modellierung der Teillastwirkungsgrade der einzelnen Komponenten auf. Um auch Probleme von höherer Komplexität zur globalen Optimalität lösen zu können, werden die Nichtlinearitäten durch stückweise lineare Funktionen approximiert. Neben diesen Aspekten liegt der Kernpunkt des Modells in der Beschreibung der mit Unsicherheit belegten Parameter. In dem vorliegenden Modell betrifft dies sowohl die eingespeiste Windenergie als auch die Strompreise, da beide Größen unvorhersehbaren Schwankungen unterliegen. In diesem Projekt wird der Ansatz verfolgt, auf Basis von statistischen Informationen die zeitliche Entwicklung von verfügbarer Windenergie und Strompreisen mittels eines Szenariobaumes abzubilden. Insgesamt führt dieses Vorgehen zu einem mehrstufigen stochastischen gemischt-ganzzahligen Optimierungsproblem. Die Lösung dieser Art von Problemen stellt in der gegenwärtigen Forschung noch immer eine große Herausforderung dar, da stochastische und kombinatorische Aspekte in einem Modell vereint werden.

Wesentliches Ziel des Projektes ist neben der Modellierung die Entwicklung geeigneter Optimierungsverfahren, um aussagekräftige Probleminstanzen mit einem Planungshorizont bis zu einer Woche in angemessener Zeit lösen zu können. Die besonderen charakteristischen Strukturen des vorliegenden Problems ermöglichen die Entwicklung spezieller Lösungstechniken, welche auf der Zerlegung des Problems in viele Teilprobleme basieren. Durch die Integration dieses Dekompositionsansatzes in ein Branch-and-Bound Verfahren können auf diesem Wege global optimale Lösungen des Problems bestimmt werden.



Gasnetzoptimierung

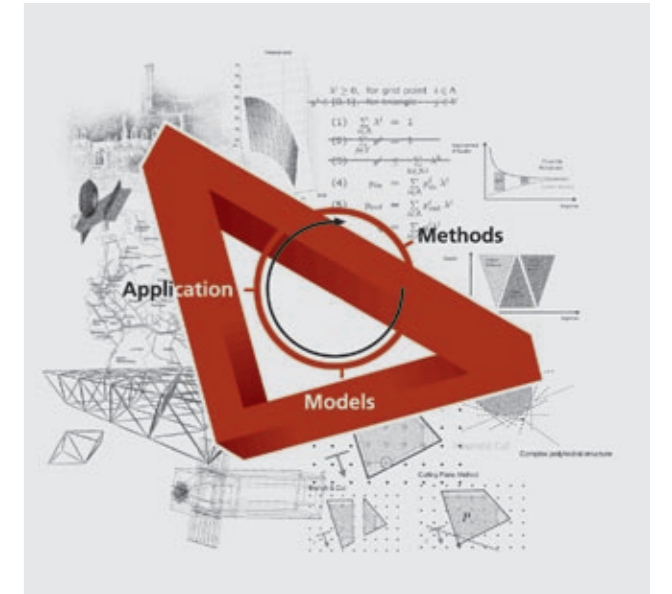
Erdgas ist ein fossiler Rohstoff, der seit vielen Jahren als Energiequelle zur Wärmeerzeugung in privaten Haushalten, zur industriellen Produktion und zur Stromerzeugung genutzt wird. Mit einem Anteil von 22 Prozent am deutschen Primärenergieverbrauch nimmt Erdgas dabei eine zentrale Rolle in der Energieversorgung ein und gewinnt aufgrund seiner ökologischen Verträglichkeit und wirtschaftlichen Vorteile immer weiter an Bedeutung.

Neue politische Vorgaben der letzten Jahre haben dazu geführt, dass stark veränderte Rahmenbedingungen für den Gastransport zu berücksichtigen sind. Diese Neuerungen beeinflussen sowohl die Planung als auch den Betrieb von Gasnetzen. Insbesondere die Ausweisung der technischen Kapazitäten an den Ein- und Ausspeisepunkten stellt den Netzbetreiber vor neue Herausforderungen, da neben zusätzlichen vertraglichen Bedingungen auch physikalische und technische Restriktionen des Versorgungssystems mit einbezogen werden müssen.

Im Wesentlichen bestehen heutige Gasnetzversorgungssysteme aus vernetzten Rohrleitungen, durch die das Erdgas von den Einspeisepunkten zu den Abnehmern transportiert wird. Um den Transport des Gases zu gewährleisten, werden Verdichtungsstationen eingesetzt, welche den Gasdruck im Netz erhöhen. Die Verdichtung des Gases ist notwendig, um den Druckverlust auszugleichen, der aufgrund von Reibungen mit den Rohrwänden auftritt. Die Energie, die zum Betreiben der Verdichter notwendig ist, wird dabei direkt aus dem Netz entnommen.

Die mathematische Optimierung bietet die nötigen Hilfsmittel, um diese Problemstellungen beschreiben, analysieren und lösen zu können. Mathematisch gesehen stellen Gasnetze eine besondere Herausforderung dar, da neben der Netztopologie auch die Gasflussdynamik sowie deren Beeinflussung durch Ventile und Verdichter berücksichtigt werden müssen. Daraus ergeben sich kombinatorische Aspekte, sowie Nichtlinearitäten, beispielsweise durch den Druckverlust. Hinzu kommen stochastische Effekte, da sowohl das Gasangebot als auch das Abnehmerverhalten mit Unsicherheit behaftet sind. Da bisher keine mathematischen Methoden zur Behandlung dieser Probleme vorliegen, ist die Entwicklung von innovativen Modellierungs- und Lösungsansätzen notwendig, um zuverlässige Aussagen in Hinblick auf eine effiziente und kostengünstige Verteilung von Erdgas treffen zu können.

Anwendungsnahe Forschung



Das Fachgebiet Diskrete Optimierung verfügt über langjährige Erfahrung bei einer Vielfalt von Anwendungsprojekten aus der Energieversorgung. In enger Kooperation mit Ingenieuren, Elektrotechnikern, Architekten und Mathematikern aus Universitäten, Forschungsinstituten und Industrie werden unterschiedliche Problemstellungen aus der Planung von energetischen Netzwerkinfrastrukturen und Anlagen sowie deren Betrieb analysiert und gelöst. Dabei werden die Fragestellungen als Optimierungsmodelle formuliert, die sowohl diskrete Aspekte wie ja/nein-Entscheidungen als auch technische und physikalische Randbedingungen abbilden. Auch können stochastische Komponenten in die Modellformulierung integriert werden, welche die Abbildung zufallsbehafteter Einflussgrößen ermöglichen.

Zumeist ergeben sich äußerst komplexe Optimierungsprobleme, zu deren Lösung sowohl eine geeignete Modellierung als auch die Entwicklung von innovativen mathematischen Verfahren erforderlich ist. Die theoretische Analyse der Anwendungsprobleme erfolgt mittels Methoden aus den Bereichen der Graphen- und Polyedertheorie, Kombinatorik und ganzzahligen Programmierung. Diese bilden die Grundlage für die Entwicklung von spezifischen Algorithmen sowie deren Implementierung in Softwaretools. Dabei wird die Software bis zur Anwendungsreife gebracht und schließlich an realen Datensätzen evaluiert.

gefördert vom

