

LeOpln

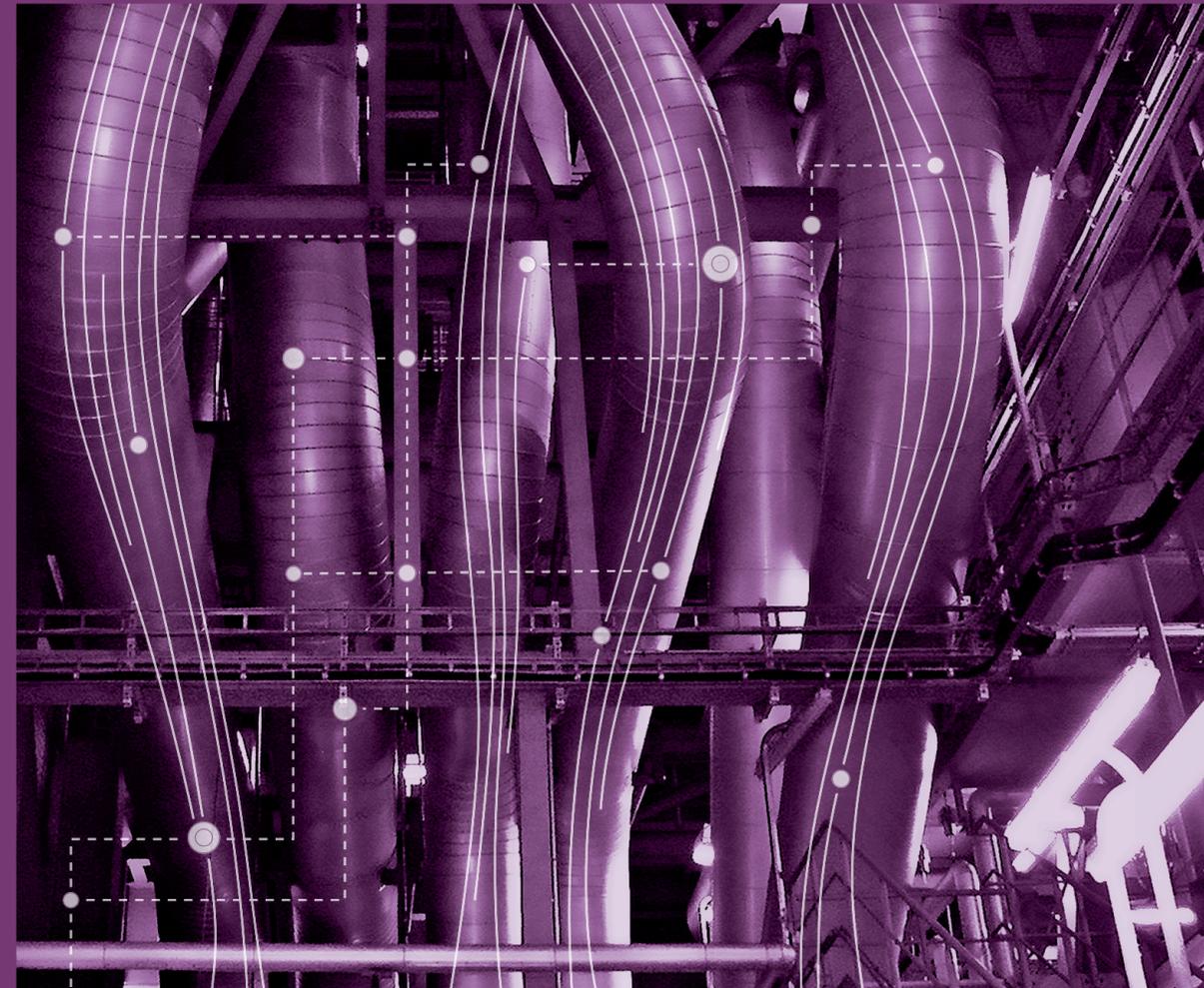
Lebenszyklusorientierte Optimierung für eine energie- und ressourceneffiziente Infrastruktur



KONTINUIERLICHE
OPTIMIERUNG



WIRTSCHAFTS
MATHEMATIK



Bilder: Billinger SE | Grosses Foto innen: Billinger SE / Eric Vazoler | iStockphoto.com/whiteisthecolor

Stand: Oktober 2013



KONTINUIERLICHE
OPTIMIERUNG



WIRTSCHAFTS
MATHEMATIK

Projektkoordination

Prof. Dr. Alexander Martin

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Department Mathematik
Cauerstraße 11 | 91058 Erlangen

Telefon: +49 (0)9131 - 85 67 163
E-Mail: alexander.martin@fau.de

Public Relations

Maximilian Merkert, Lena Hupp

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Department Mathematik
Cauerstraße 11 | 91058 Erlangen

Telefon: +49 (0)9131 - 85 67 180 | +49 (0)9131 - 85 67 182
E-Mail: maximilian.merkert@fau.de | lena.hupp@fau.de

LeOpln – Lebenszyklusorientierte Optimierung für eine energie- und ressourceneffiziente Infrastruktur

Nachhaltigkeit und Energieeffizienz gewinnen heutzutage mehr und mehr an Bedeutung und prägen unsere Gesellschaft wie kaum eine andere Thematik. Ressourcenschonung und Umweltschutz sind in der europäischen Industriegesellschaft längst zu politischen Themen von maßgebender Relevanz geworden.

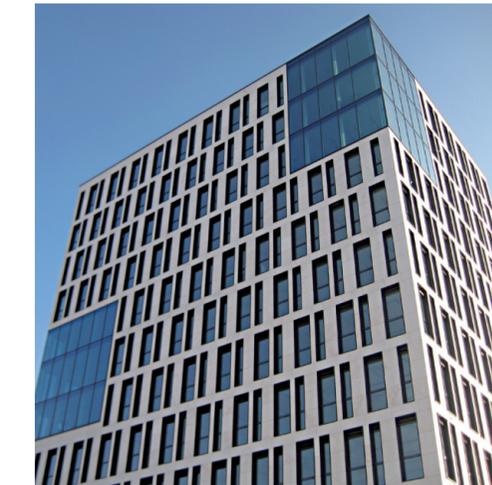
In Deutschland entstehen derzeit ca. 43% der CO₂-Emissionen durch die Energiewirtschaft. Etwa ein Drittel des Endenergieverbrauchs entfällt dabei auf die Beheizung von Räumen und die Erwärmung von Brauchwasser. Diese Zahlen verdeutlichen die Relevanz der Themen „Energieversorgung“ und „energieeffizienter Gebäudebetrieb“ bei der Einhaltung der europäischen

Klimaschutzziele. Hier schlummern beträchtliche Einsparpotentiale. Idealerweise schafft deren Erschließung nicht nur Vorteile im Hinblick auf den erforderlichen Einsatz von Ressourcen und Energie, sondern bietet auch wirtschaftliche Vorteile gegenüber einer nicht optimierten Variante.

Optimierung in der Gebäudeplanung

In der Vergangenheit wurden bei der Planung von Infrastrukturen hauptsächlich die Investitionskosten betrachtet. Um Ressourcen, Energie und wirtschaftliche Mittel optimal einsetzen zu können, ist jedoch eine Betrachtung des gesamten Lebenszyklus erforderlich. Das bedeutet, dass eine Fülle von komplexen Abhängigkeiten frühzeitig bei den Planungsentscheidungen berücksichtigt werden muss. Da etwa 80% der Kosten erst während der Betriebsphase entstehen, müssen bereits in der Planungsphase neben der Erstellung auch Betriebs- und Instandhaltungsstrategien sowie Rückbauszenarien betrachtet werden.

Planungsprozesse erfolgen bisher überwiegend ohne Kenntnis des erreichbaren Gesamtoptimums. Neben Wünschen von Nutzern, Planern, Investoren, etc. müssen physikalische Abhängigkeiten, gesetzliche Vorschriften und technische Bestimmungen berücksichtigt und eingehalten werden. Dieser Komplexität wird heuristisch begegnet, indem in jedem Planungsschritt nach Abwägung möglicher Alternativen eine Entscheidung getroffen wird, um von dort aus weitere Detailentscheidungen zu vollziehen. Die Planungsaufgaben sind zudem üblicherweise auf viele verschiedene Fachplaner verteilt, die auf dem ihnen gegebenen Planungsstand aufbauend in ihrem jeweiligen Fachgebiet Lösungen erarbeiten. Eine vernetzte Betrachtung aller Planungsentscheidungen findet selten statt.



Hier besteht ein großer Bedarf an ganzheitlich orientierten Methoden, die es ermöglichen, bei der Vielzahl an Alternativen die Auswirkungen über den vollständigen Lebenszyklus einzuschätzen und das energetische Zusammenwirken bisher unabhängig betrachteter Komponenten in die Entscheidungsfindung einzubeziehen. In Kooperation mit dem Ingenieur- und Dienstleistungskonzern Billinger wurden im Rahmen des Projekts LeOpln mathematische Verfahren zur Auffindung optimaler Entscheidungskombinationen entwickelt, die eine lebenszyklusorientierte Optimierung von Infrastrukturbauten unter Berücksichtigung ökologischer und ökonomischer Gesichtspunkte ermöglichen. Exemplarisch wurden der Planungsprozess eines Gebäudes, sowie die Verlaufplanung von Hochdruckleitungen als wesentliche Komponente im Kraftwerksbau untersucht. Als Ziel wurde die Optimierung einer Lebenszykluskostenfunktion, die sich aus Investitionskosten und Betriebskosten zusammensetzt, angestrebt. Besondere Bedeutung bei den Betriebskosten kommt jeweils den Energiekosten zu.

Mit der richtigen Raumanordnung Heizkosten sparen!?

In Mehrfamilienhäusern ist der Effekt bestens bekannt: Heizen die Nachbarn ausreichend stark, spart man sich das Aufdrehen der eigenen Heizung. Während Eckräume mit zwei Außenwänden schnell auskühlen, kann ein innen liegendes Badezimmer schon mal ohne zusätzliche Wärmequelle auskommen. Der Grund dafür liegt darin, dass zwischen zwei unterschiedlich temperierten Zonen ein Wärmeaustausch stattfindet. Dieser ist abhängig von der Temperaturdifferenz der aneinander grenzenden Bereiche, sowie dem Material, welches diese trennt. So geht in der Regel mehr Wärme durch ein Fenster verloren als durch eine kompakte Außenwand.

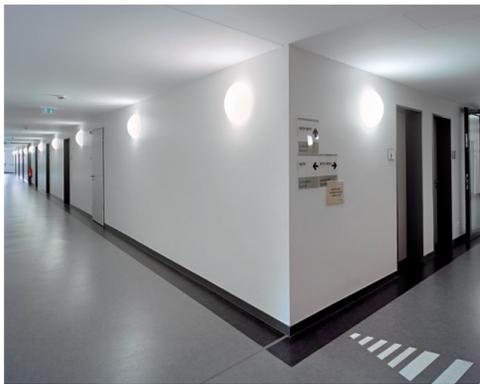
Der beschriebene Effekt bekommt selbstverständlich in größeren Gebäuden mit vielen unterschiedlichen Räumen und Wärmezonen ein entsprechend höheres Gewicht. Insbesondere gilt dies für Bürogebäude oder Schulen mit beheizten Büros, Seminarräumen oder Klassenzimmern, niedriger beheizten Küchen oder Toiletten und unbeheizten Fluren, Treppenhäusern und Fahrstühlen.

Die Kosten, die von Gebäuden über ihre gesamte Lebensdauer von mehr als 30 Jahren verursacht werden, setzen sich aus Bau- und Betriebskosten zusammen. Daher hat die Anordnung der Räume einen großen Einfluss auf die Lebenszykluskosten. Diese gilt es vor dem Bau des Gebäudes zu berücksichtigen, da der Einfluss darauf während der Betriebszeit relativ gering ist.

Bei der Suche nach der optimalen Raumanordnung ist der Planer durch eine Vielzahl an Nebenbedingungen eingeschränkt, die es unmöglich machen, per Hand eine optimale Anordnung der Räume in Bezug auf Bau- und Betriebskosten zu gewährleisten. Solche Nebenbedingungen können beispielsweise die Vorgabe einer ausreichenden Anzahl an Fenstern in Büro- oder Seminarräumen sein oder die Forderung einer gleichmäßigen Verteilung der sanitären Anlagen über das Gebäude. Auch beschränken Richtlinien häufig die Maximallänge des Fluchtwegs, die es einzuhalten gilt. Die Kombination von Raumanordnung und allen weiteren Aspekten führt zu einem äußerst komplexen Problem, welches auch mit viel Rechenleistung nur schwer handhabbar ist.

Die mathematische Modellierung der Raumanordnungsplanung lässt sich mit Hilfe eines gemischt-ganzzahligen Problems umsetzen. Sämtliche Zusammenhänge und Möglichkeiten können mit linearen oder linearisierten Gleichungen und Ungleichungen ausgedrückt werden, wobei das Ziel darin besteht, eine zulässige Anordnung zu finden, welche die Lebenszykluskosten minimiert.

Umweltfreundliche Verteilung und Ausstattung von Räumen



Während der Planungsphase eines Gebäudes können sich Kundenansprüche oder technische Spezifikationen ändern. Eine weitere Herausforderung kann darin bestehen, ein bereits geplantes Gebäude in gleicher Form unter veränderten Rahmenbedingungen, etwa in einem anderen klimatischen Umfeld, zu errichten.

Ist es möglich, die Gebäudeplanung zu automatisieren und ein energetisch optimales Resultat vom Computer berechnen zu lassen? Dieser Frage wird im LeOpln-Projekt nachgegangen. Der Anwender soll lediglich Randbedingungen wie die Anzahl, die Größe und die Funktion der Räume sowie äußere Bedingungen wie Sonneneinstrahlung oder Temperatur auswählen.

Die Aufgabe, daraus ein energetisch optimales Gebäude zu generieren, wird im LeOpln-Projekt in zwei Schritten gelöst. Zunächst wird die Raumaufteilung bestimmt. In einem zweiten Schritt ermittelt ein Optimierungsalgorithmus aufbauend auf einem physikalischen Modell optimale Wand- und Fenstermaterialien, Außenwanddimensionen sowie Heizungs- und Kühlungsanlagen. Ein Vorteil dieses automatisierten Ansatzes ist die große Flexibilität. Im Fall von Änderungen an den Eingabedaten kann die Optimierung in wenigen Minuten erneut durchgeführt werden.

Durch Methoden der mathematischen Optimierung können verschiedene Szenarien und Materialien effizient evaluiert werden. Eine kurze Rechenzeit wird erreicht, indem kein volles diskretes Optimierungsmodell verwendet wird, sondern eine leichter behandelbare kontinuierliche Approximation. Hierbei wird sichergestellt, dass das Endergebnis baulich realisierbar ist.

Optimale Verlaufsplanung für Hochdruckdampfleitungen in Kraftwerken



Wir nehmen es als völlige Selbstverständlichkeit hin, in unserer Wohnung das Licht oder die Waschmaschine anzuschalten. Sofort leuchtet die Glühbirne oder beginnt die Waschmaschine mit dem Waschgang. Ein potentieller Lieferant unseres Stroms ist beispielsweise ein Kraftwerk. Dort ist das Ein- und Ausschalten gar nicht so einfach. Wird in einem Kraftwerk ein Kreislauf eingeschaltet, finden dabei physikalische Vorgänge mit enormen Auswirkungen statt. Heißer Wasserdampf von über 500 °C schießt mit einem gewaltigen Druck von über 100 bar durch verwinkelte Rohrleitungssysteme von der Dampferzeugung zu einer Turbine, die schließlich dafür sorgt, dass uns ein Licht aufgeht oder unsere Wäsche sauber wird.

Um den enormen Beanspruchungen des Betriebes standzuhalten, ist die Rohrleitung nicht nur mehrere Zentimeter dick und aus speziellem Stahl gefertigt, sondern auch an entscheidenden Stellen durch verschiedene Hängerkonstruktionen mit dem Traggerüst verbunden. So bleibt sie auch bei Ausdehnung durch Temperaturunterschiede immer in einer vorgesehenen Lage.

Während der Planungsphase eines Kraftwerks müssen die Konstrukteure verschiedenste Szenarien durchspielen. Nicht immer ist von Beginn an klar, an welchen Stellen die Rohrleitung verlaufen soll. Wird das Rohrleitungssystem durch eine nicht optimale Anordnung zu stark belastet, kann dies zu Schäden an den Rohren führen. Die notwendigen Reparaturen erfordern im schlimmsten Fall die Abschaltung des Kraftwerks.

Neben den entstehenden Kosten, die möglichst gering gehalten werden sollen, müssen noch zahlreiche Nebenbedingungen

beachtet werden. Um ein Kraftwerk in Betrieb nehmen zu dürfen, müssen verschiedenste Nachweise erbracht werden, wie beispielsweise die Einhaltung von Grenzwerten bei den lokalen Spannungen im Rohr. Um Überschreitungen zu vermeiden, können die bereits erwähnten Hänger platziert werden. Sie sorgen für eine Entlastung des Rohrabschnitts und gewährleisten das Einhalten der erforderlichen Nachweise.

Die beschriebenen Aufgaben der Planung können mit Hilfe von Methoden der diskreten und kontinuierlichen Optimierung mathematisch formuliert und gelöst werden. Eine besondere Herausforderung stellen dabei Problemmodellierungen mit ganzzahligen Variablen und nichtlinearen Nebenbedingungen dar. Diese erfordern speziell auf das Problem zugeschnittene Herangehensweisen und Algorithmen.

Eine weitere komplexe Aufgabe ist die mathematische Modellierung der Rohrleitungen unter Hochdruck. Dazu muss das Material der Rohrleitungen (in diesem Fall verschiedene Stahlsorten) in das Modell derart miteinbezogen werden, dass sowohl Verformungen als auch permanente Veränderungen über die Zeit abgebildet werden können. Somit lassen sich „Alterungsprozesse“ im Material, wie plastisches Kriechen oder Ermüdung, mathematisch beschreiben. Dazu werden die aus der Problemmodellierung resultierenden Gleichungen in einer Computersimulation numerisch berechnet. Konkret heißt das, dass nichtlineare partielle Differenzialgleichungssysteme mittels der Methode der Finiten Elemente gelöst werden. Um die benötigte Flexibilität bei der Optimierung zu gewährleisten, kann nicht auf vorgefertigte Simulationspakete zurückgegriffen werden, sondern es wird ein eigener Code entwickelt.

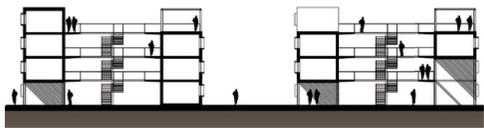
Reduzierte Modelle

Computersimulationen, die alle für die Planung relevanten Faktoren im Detail berücksichtigen, haben den Nachteil, dass die Rechenzeit im Bereich mehrerer Tage oder sogar Wochen liegen kann. Ziel ist es daher, diese hochauflösenden Modelle durch sogenannte „reduzierte Modelle“ zu ersetzen, die einerseits Rechenzeiten im Minutenbereich besitzen, andererseits aber wenig an Genauigkeit gegenüber dem exakten Modell verlieren und somit immer noch ausreichende Informationen für eine lebenszykluskostenoptimierte Planung liefern.

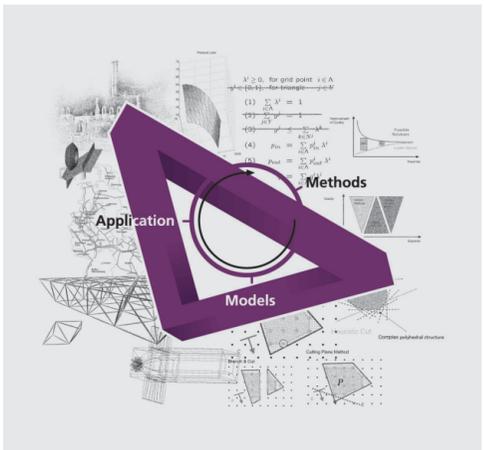
Dazu wird auf mathematische Methoden der Modellreduktion zurückgegriffen. Die Idee bei diesem Ansatz ist es, den Berechnungsprozess in zwei Phasen aufzuteilen. In der „Offline-Phase“ werden Ergebnisse für typische Szenarien des hochauflösenden Modells berechnet und die wichtigsten Informationen extrahiert. Daraus wird ein reduziertes Modell erstellt, welches das hochauflösende Modell bestmöglich approximiert. In der zweiten Phase, die als „Online-Phase“ bezeichnet wird, erfolgt die Auswertung des in der Offline-Phase erstellten reduzierten Modells. Der Vorteil dieser Zerlegung besteht darin, dass die rechenzeitintensive Offline-Phase nur ein einziges Mal durchgeführt werden muss und im späteren Planungsprozess nur noch mit der Online-Phase gearbeitet wird.

Kommt es während der Planungsphase zu Änderungen, etwa an der Gebäude- oder Rohrleitungsgeometrie, so ändert sich auch das zugrunde liegende hochauflösende Modell. Dies hat zur Folge, dass ein neues reduziertes Modell aufgestellt werden muss. Um das Konzept der einmaligen Berechnung der Offline-Phase beibehalten zu können, werden Teile des Gebäudes bzw. des Rohrleitungssystems zu unterschiedlichen Typen zusammengefasst. Im Bereich der Gebäude erfolgt die Einteilung typischerweise nach der Nutzungsart der Räume, wodurch man beispielsweise die Typen Büroraum, Flur, WC, etc. erhält.

Bei Rohrleitungssystemen wird eine Unterteilung in gerade Elemente, gekrümmte Elemente, Aufhänger, etc. vorgenommen. Ist diese Typisierung abgeschlossen, wird in der Offline-Phase für jeden dieser Typen ein reduziertes Modell erstellt. In der Online-Phase ist es dadurch möglich, nach dem Baukastenprinzip aus den einzelnen reduzierten Modellen ein reduziertes Gesamtmodell zusammenzustellen und dieses auszuwerten.



Anwendungsnahe Forschung



Die Arbeitsgruppen Diskrete- und Kontinuierliche Optimierung verfügen über langjährige Erfahrung bei einer Vielfalt von Anwendungsprojekten im Planungsbereich. In enger Kooperation mit Ingenieuren, Elektrotechnikern, Architekten und Mathematikern aus Universitäten, Forschungsinstituten und Industrie werden unterschiedliche Problemstellungen aus der Planung von Verteilungsnetzen und Gebäuden 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, die oftmals nichtlinearer Natur sind, abbilden. Zumeist ergeben sich äußerst komplexe Optimierungsprobleme, zu deren Lösung sowohl eine geeignete Modellierung als auch die Entwicklung von innovativen mathematischen Verfahren erforderlich sind. Die theoretische Analyse der Anwendungsprobleme erfolgt mittels Methoden aus den Bereichen der diskreten und kontinuierlichen Optimierung. Hierzu zählen beispielsweise Graphen- und Polyedertheorie, Kombinatorik, ganzzahlige und kontinuierlich-nichtlineare Programmierung sowie Existenz- und Eindeutigkeitsanalyse von Lösungen.

Diese bilden die Grundlage für die Entwicklung von spezialisierten Algorithmen und Simulationsmodellen sowie deren Implementierung in Softwaretools. Wichtige Werkzeuge bei der Umsetzung sind beispielsweise Finite-Elemente-Methoden und Schnittbenenverfahren. Dabei wird die Software bis zur Anwendungsreife gebracht und schließlich an realen Datensätzen evaluiert.

Gefördert von:



In Zusammenarbeit mit:

