



Konrad-Zuse-Zentrum
für Informationstechnik Berlin

Takustraße 7
D-14195 Berlin-Dahlem
Germany

ZIB

A. MARTIN B. GEISSLER C. HAYN B. HILLER J. HUMPOLA
T. KOCH T. LEHMANN A. MORSI M. E. PFETSCH
L. SCHEWE M. SCHMIDT R. SCHULTZ R. SCHWARZ
J. SCHWEIGER M. C. STEINBACH B. M. WILLERT

Optimierung Technischer Kapazitäten in Gasnetzen

Herausgegeben vom
Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin
Takustraße 7
D-14195 Berlin-Dahlem

Telefon: 030-84185-0
Telefax: 030-84185-125

e-mail: bibliothek@zib.de
URL: <http://www.zib.de>

ZIB-Report (Print) ISSN 1438-0064
ZIB-Report (Internet) ISSN 2192-7782

Optimierung Technischer Kapazitäten in Gasnetzen

Prof. Dr. **A. Martin**, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Dr. **B. Geißler**, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Dipl.-Math. **C. Hayn**, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Dr. **B. Hiller**, Zuse-Institut Berlin
Dipl.-Math. **J. Humpola**, Zuse-Institut Berlin
Dr. **T. Koch**, Zuse-Institut Berlin
Dipl.-Math. **T. Lehmann**, Zuse-Institut Berlin
Dipl.-Inf. **A. Morsi**, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Prof. Dr. **M. E. Pfetsch**, Technische Universität Braunschweig
Dr. **L. Schewe**, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Dipl.-Math. **M. Schmidt**, Leibniz Universität Hannover
Prof. Dr. **R. Schultz**, Universität Duisburg-Essen
Dipl.-Math. **R. Schwarz**, Zuse-Institut Berlin
Dipl.-Math. **J. Schweiger**, Zuse-Institut Berlin
Prof. Dr. **M. C. Steinbach**, Leibniz Universität Hannover
Dipl.-Math. **B. M. Willert**, Leibniz Universität Hannover

Kurzfassung

Die mittel- und längerfristige Planung für den Gastransport hat sich durch Änderungen in den regulatorischen Rahmenbedingungen stark verkompliziert. Kernpunkt ist die Trennung von Gashandel und -transport. Dieser Artikel diskutiert die hieraus resultierenden mathematischen Planungsprobleme, welche als Validierung von Nominierungen und Buchungen, Bestimmung der technischen Kapazität und Topologieplanung bezeichnet werden. Diese mathematischen Optimierungsprobleme werden vorgestellt und Lösungsansätze skizziert.

1 Einleitung

Der Gastransport bildet eine zentrale Komponente der heutigen Energieversorgung in Europa. Die Rahmenbedingungen hierfür haben sich in den letzten

Jahren durch Regulierungsvorgaben maßgeblich geändert. Diese Bedingungen werden in der Gasnetzzugangsverordnung (GasNZV), siehe [2], vorgegeben. Erklärtes politisches Ziel ist dabei, die Kapazität der Netze voll auszunutzen bzw. zu erhöhen. Hierbei definiert die GasNZV (§2 Absatz 13) die *Technische Kapazität (TK)* als

das Maximum an fester Kapazität, das der Netzbetreiber unter Berücksichtigung der Systemintegrität und der Erfordernisse des Netzbetriebs Transportkunden anbieten kann.

Die zentrale Aufgabe für den Gastransport ist also die Bestimmung der TK bzw. ein Verständnis für die Auswirkungen von Änderungen in der Netztopologie oder anderer Rahmenbedingungen auf die TK. Ziel dieses Artikels ist die Darstellung der mathematischen Zusammenhänge und Aufgaben, welche mit der Behandlung, Maximierung und Erweiterung der TK verbunden sind. Wir stellen abstrakte mathematische Optimierungsmodelle hierfür vor und skizzieren Lösungsansätze.

Den Hintergrund für diese Arbeit bildet die *Forschungskooperation Netzoptimierung (ForNe)*, an der sieben Forschungsinstitute und Universitäten sowie Open Grid Europe (OGE, ehemals E.ON Gastransport) beteiligt sind, zusammen mit dem vom BMWi geförderten und von der Bundesnetzagentur unterstützten Projekt „Technische Kapazität von Gasnetzen“.

Die Regulierung des Gastransports hat zu einer Trennung von Gastransport und Gashandel geführt. Als Konsequenz hiervon erwerben Gaskäufer das vertragliche Recht (*Buchung*), zu einem beliebigen Zeitpunkt an einem festen Punkt Gas bis zu einer vorgegebenen Kapazität auszuspeisen, wobei nicht festgelegt ist, an welchem Punkt das Gas eingespeist wird. Gasverkäufer erwerben das umgekehrte Recht. Käufer und Verkäufer finden sich dann über Verhandlungen zusammen und bilden zusammen einen Bilanzkreis, d. h., insgesamt entspricht die Leistung des eingespeisten Gases der Leistung des ausgespeisten. Im Prinzip müssen die Gastransportbetreiber sicherstellen, dass die Ausübung dieser Rechte (*Nominierungen*) jederzeit möglich ist. Viele theoretisch mögliche Nominierungen sind dabei in der Realität sehr unwahrscheinlich. Dies soll nach GasNZV bei der Planung berücksichtigt werden – das Problem wird also stochastisch. Die vor diesem Hintergrund wesentlichen Aufgaben des Gastransports sind daher:

1. Analyse der strukturellen und stochastischen Eigenschaften von Ein- und Ausspeiselasten,

2. Identifikation von „Engpässen“ in einem Gasnetz, welche die Ausweisung einer höheren TK verhindern,
3. Finden günstiger Netzausbaumaßnahmen zur Überwindung von Engpässen.

Der erste Punkt wird ausführlich in dem Beitrag von Koch et al. [3] behandelt. Auf den zweiten und dritten Punkt soll in diesem Beitrag genauer eingegangen werden.

Um den obigen drei Punkten gerecht zu werden, sind jeweils angepasste mathematische Verfahren notwendig. Beispielsweise ist es bei der Berechnung der TK notwendig, den Nachweis zu führen, dass keine höheren Kapazitäten angeboten werden können. Engpässe müssen also beweisbar bestätigt und somit nachgewiesen werden, dass diese nicht nur mangels Einsatz passender Methoden entstanden sind. Die Berechnung der TK ist also – nach GasNZV – ein mathematisches Optimierungsproblem (Maximierungsproblem). Hieraus ergibt sich, dass Simulationen allein nicht ausreichen können, um die oben genannten Punkte hinreichend beantworten zu können, sondern der Einsatz mathematischer Optimierungswerkzeuge notwendig wird.

Dies erfordert das Studium verschiedener Teilprobleme, die in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden und für die wir eine mathematische Beschreibung angeben. Im Einzelnen beinhaltet dies die Validierungen von Nominierungen und Buchungen in den Abschnitten 2 und 3, sowie darauf aufbauend die Maximierung der TK und die Topologieplanung in den Abschnitten 4 und 5. Die auftretenden mathematischen Optimierungsprobleme sind für State-of-the-art-Lösungsalgorithmen nicht handhabbar. Daher liegt ein Hauptfokus des Projekts auf der Entwicklung mathematischer Methoden, die die spezifische Struktur der Probleme in Gasnetzen ausnutzen; diese Methoden skizzieren wir jeweils kurz in den entsprechenden Abschnitten.

Die in diesem Beitrag geschilderten Planungsprobleme haben einen mittel- bis langfristigen Zeithorizont. Daher sind die konkreten Zustände des Netzes jeweils nicht bekannt. Wir führen daher eine *stationäre* Planung durch. Die transiente Planung, d. h., die konkrete Aussteuerung der Netze wird in diesem Artikel nicht behandelt; siehe [1, 4] und deren Referenzen für mehr Informationen zur transienten Gasoptimierung.

2 Nominierungsvalidierung

Die Nominierungsvalidierung und die Buchungsvalidierung gehören zu den grundlegenden mittelfristigen Planungsaufgaben jedes Netzbetreibers. Als *Nominierung* bezeichnen wir in diesem Kontext eine Gesamtheit von Ein- und Auspeisemengen des Netzes; genauer wird an jedem Ein- und Auspeiseknoten die Leistung (bestimmt durch Gasmenge und Brennwert), Druckschranken und Schranken für die Brennwerte sowie weitere Qualitätsparameter des Gases vorgegeben. Die *Nominierungsvalidierung* stellt fest, ob eine gegebene Nominierung technisch durch das Netz transportierbar (*zulässig*) ist. Hierzu gehören alle diskreten und kontinuierlichen Einstellungen der steuerbaren Netzelemente. Diskret sind Schieberstellungen (offen, geschlossen), Status von Verdichterstationen und Regelventilen (aktiv, bypass, geschlossen) sowie die Auswahl aktiver Verdichter innerhalb einer Station. Kontinuierlich sind die Drehzahlen aktiver Verdichter sowie die Druckreduktion aktiver Regelventile. Mathematisch handelt es sich bei der Nominierungsvalidierung somit um ein *nichtlineares nicht-konvexes diskret-kontinuierliches Zulässigkeitsproblem*: die technische Zulässigkeit der diskreten/kontinuierlichen Variablen lässt sich durch ein endliches System nichtlinearer Gleichungen und Ungleichungen modellieren, die das physikalische Verhalten des Netzes beschreiben (Verhalten des Gasflusses, Zusammenhang von Drehzahl, Durchfluss, Verdichtungsverhältnis im Verdichter, usw.) und zusätzlich alle technischen, vertraglichen und gesetzlichen Beschränkungen abbilden. Formal lässt sich die Nominierungsvalidierung wie folgt darstellen: Wir modellieren das Gasnetzwerk als *gerichteten Graphen* $G = (V, E)$ mit Knotenmenge V und Kantenmenge E . Bezeichnet man die Ein- und Auspeiseknoten mit V_+ bzw. V_- , so ist eine Nominierung ω definiert durch die unteren und oberen Druckschranken, p_i^+ und p_i^- , und fixierter Leistung \bar{P}_i (sowie möglicherweise weitere Qualitätsparameter) für alle Ein- und Auspeiseknoten $i \in V^+ \cup V^-$; wir schreiben kurz $\omega = (\mathbf{p}^+, \mathbf{p}^-, \bar{\mathbf{P}})$ für den Vektor, der aus allen diesen Werten besteht. Wir bezeichnen mit $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ den Vektor der kontinuierlichen Variablen (Drücke, Flüsse, Drehzahlen, ...) und mit $\mathbf{z} \in \mathbb{Z}^m$ den Variablenvektor der diskreten Entscheidungen (Schieberstellungen, Aktivierung von Verdichtern, ...). Damit lässt sich das Modell als nichtlineares System aus Gleichheits- und Ungleichheitsbedingungen,

$$g(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \mathbf{0} \in \mathbb{R}^r, \quad h(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \geq \mathbf{0} \in \mathbb{R}^s,$$

formulieren, wobei g und h sowohl kontinuierliche Problemaspekte wie Gasphy-

sik, Verdichtermaschinen etc. als auch die Zulässigkeit von Netzeinstellungen modellieren. Das Nominierungsvalidierungsproblem ist dann

$$\begin{aligned} \exists(\mathbf{x}, \mathbf{z}) : \quad & g(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = 0, \quad h(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \geq 0, \\ & p_i \in [p_i^-, p_i^+], \quad P_i = \bar{P}_i \quad \forall i \in V_+ \cup V_- ? \end{aligned} \quad (\text{NV}(G, \omega))$$

Dieses Modell führt auf große gemischt-ganzzahlige nichtlineare Optimierungsprobleme (sog. Mixed Integer Nonlinear Programs *MINLPs*). Aufgrund der Komplexität der Physik des Gastransports in Kombination mit der Größe realer Netze ist das mathematische Problem allerdings in der Praxis so schwierig, dass ein Lösungsversuch mit existierenden Verfahren völlig aussichtslos ist. Wir entwickeln deshalb einen spezialisierten zweistufigen Ansatz, der eine praktikable automatisierte Nominierungsvalidierung ermöglicht. In der ersten Stufe werden approximative Modelle generiert, welche in akzeptabler Laufzeit lösbar sind. Diese Modelle liefern die diskreten Entscheidungen für die zweite Stufe, in der die ganzzahligen Variablen \mathbf{z} entsprechend fixiert sind. Dadurch entsteht ein nichtlineares, aber kontinuierliches Modell (ein sog. NonLinear Program *NLP*), das ebenfalls in akzeptabler Laufzeit gelöst werden kann. Im Fall der Zulässigkeit des NLPs hat man somit eine zulässige Lösung für das zugrundeliegende MINLP gefunden.

3 Buchungvalidierung

Die *Buchungvalidierung* ist eine weitaus komplexere Fragestellung als die Nominierungsvalidierung. Die Rahmenbedingungen sind die folgenden – wie bereits in der Einleitung kurz angerissen: Die GasNZV (§ 8 Absatz 2 Satz 2) legt fest, dass Gasnetzbetreiber frei zuordenbare Kapazitäten anzubieten haben, welche es ermöglichen, angefragte Ein- und Ausspeisekapazitäten ohne Festlegung eines Transportweges zu nutzen. Diese Ein- und Ausspeisekapazitäten müssen unabhängig voneinander anfragbar sein. Das Recht, diese Kapazitäten zu nutzen, heißt *Buchung*. Im Rahmen einer Buchung muss es den Transportkunden möglich sein, Gas an jedem gebuchten Einspeisepunkt für die Ausspeisung an jedem gebuchten Ausspeisepunkt des betreffenden Marktgebietes bereitzustellen. Nach § 9 Absatz 2 GasNZV sollen bei der Berechnung der Ein- und Ausspeisekapazitäten insbesondere die historische und die prognostizierte Auslastung und Nachfrage nach Kapazitäten auf Basis der wahrscheinlichen und realistischen Lastflüsse berücksichtigt werden.

Mathematisch drücken wir eine *Buchung* durch einen Vektor $\Delta = (\mathbf{p}^+, \mathbf{p}^-, \mathbf{P})$ aus, der wie eine Nominierung aufgebaut ist. Eine Buchung heißt zulässig, wenn *alle* bilanzierten Nominierungen $\omega = (\mathbf{p}^+, \mathbf{p}^-, \bar{\mathbf{P}})$, mit $\omega \leq \Delta$ (also $\bar{\mathbf{P}} \leq \mathbf{P}$), erfüllbar sind – es müssen also *alle Nominierungen mit einer höchstens so großen Leistung erfüllbar sein*. Bei der *Buchungvalidierung* soll entschieden werden, ob eine Buchung zulässig ist, ob also die TK ausreichend für diese Buchung ist. Typischerweise entstehen Buchungen durch Addition von neuen *Buchungsanfragen* zu bestehenden Buchungen. Neue Buchungsanfragen beziehen sich auf die Frage, ob zusätzliche Kapazität an einem Ein- bzw. Ausspeiseknoten frei allen möglichen Aus- bzw. Einspeiseknoten zuordenbar ist. Man setzt dabei voraus, dass für die bereits erfolgten Buchungen die technische Zulässigkeit gewährleistet ist.

Im Sinne der Versorgungssicherheit ist bei Buchungen zu prüfen, ob jede erwartbare, bilanzierte Nominierung im Rahmen einer Buchung im Sinne der Nominierungsvalidierung technisch durchführbar ist, siehe Abschnitt 2. Wie beschrieben ist dieses Problem allein schon schwierig, weil sowohl diskrete Entscheidungen als auch die Gasphysik berücksichtigt werden müssen. Die Hauptschwierigkeit der Buchungvalidierung besteht aber darin, dass dieses Problem für jede erwartbare Nominierung entschieden werden muss. Mathematisch bilden die zu einer Buchung Δ gehörenden bilanzierten Nominierungen ω ein Kontinuum. Dieses enthält stets auch unzulässige Nominierungen, die aber eventuell nie oder extrem selten real auftreten. Zur Erfassung der praktischen Relevanz der Nominierungen wird deshalb eine *Wahrscheinlichkeitsverteilung* auf dem genannten Kontinuum eingeführt. Die Buchungvalidierung besteht nunmehr in der Frage, ob eine zufällige Nominierung ω *mit genügend hoher Wahrscheinlichkeit* II technisch zulässig ist. Ist diese Wahrscheinlichkeit größer als ein gegebener Schwellwert $\bar{\Pi}$, z. B. $\bar{\Pi} = 0,99$, so ist die Buchung erfolgreich validiert, und die angefragte Kapazität kann vergeben werden. Die Wahrscheinlichkeit potentieller Nominierungen wird dabei durch geeignete statistische Verfahren aus historischen Daten gewonnen. Allerdings gibt es üblicherweise Punkte ohne verwendbare historische Daten und Punkte, an denen in Zukunft starke Änderungen erwartet werden. Schon eine zusätzliche Buchungsanfrage erzeugt eine solche Situation. Es ist daher nicht an allen Punkten möglich, Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die erwartete Nachfrage zu schätzen. An diesen Knoten muss die voraussichtliche Nachfrage im schlechtesten Fall berücksichtigt werden. Dies stellt eine besondere Herausforderung dar, da im Allgemeinen nicht klar ist, welche Lastsituationen „restriktiv“ sind. Die Klärung dieser Frage erfordert deutlich mehr Struktureinsicht als zur

Lösung der Nominierungsvalidierung notwendig ist.

Für eine geforderte Wahrscheinlichkeit $\bar{\Pi} \in [0, 1]$ lässt sich das Problem der Buchungsvalidierung formalisieren als:

$$\mathbb{P}[\omega \leq \Delta : (NV(G, \omega)) \text{ erfolgreich}] \geq \bar{\Pi} ? \quad (BV(G, \Delta))$$

Mathematisch ist dies ein *infinite* Problem: Zur exakten Lösung müsste die Nominierungsvalidierungsfrage für das vollständige Kontinuum gelöst werden, um dann die Wahrscheinlichkeit der zulässigen Teilmenge zu bestimmen. In der Praxis erzeugen wir mit mathematischen Techniken, siehe [3], endlich viele (z. B. einige Tausend) möglichst repräsentative *Szenarien*, d. h. Nominierungen mit zugehörigen Wahrscheinlichkeiten, für die jeweils die technische Zulässigkeit mittels einer Nominierungsvalidierung entschieden wird. Da die Szenarien unabhängig sind, kann dies vollständig parallel erfolgen; der zu berechnende Wahrscheinlichkeitswert ergibt sich dann durch einfache Summation.

4 Bestimmung technischer Kapazitäten

Die Bestimmung der Technischen Kapazitäten geht nun noch einen Schritt weiter. Während die Nominierungs- bzw. Buchungsvalidierung fragt, ob eine bestimmte Lastsituation durch die TK abgedeckt wird, soll hier die verfügbare Kapazität maximiert werden. Insbesondere gehen wir nun zu einem Optimierungsproblem über. Physikalisch sind die Kapazitäten allerdings voneinander abhängig. Eine Erhöhung der freien Kapazität an einem Knoten kann zu einer Verringerung der freien Kapazität an einem anderen Knoten führen; insbesondere gibt es keine eindeutige Technische Kapazität. Eine notwendige Bedingung an die ausgewiesenen Technischen Kapazitäten ist, dass sie ein Pareto-Optimum darstellen. Es darf also nicht möglich sein, an einem Punkt die Kapazität zu erhöhen, ohne sie an einem anderen zu reduzieren.

Die Bestimmung der Technischen Kapazitäten ist weit komplexer als eine Buchungsvalidierung. Bei der simultanen Bestimmung der verfügbaren Kapazitäten an allen Punkten sind im Gegensatz zur Buchungsvalidierung die Kapazitäten nicht vorgegeben, sondern Teil der Fragestellung. Insbesondere ist damit die Menge der auf technische Umsetzbarkeit zu überprüfenden Nominierungen nicht a-priori bestimmbar. Die Buchungsvalidierung kann daher als Spezialfall der Bestimmung der TK mit oberen Schranken gesehen werden, bei dem die oberen Schranken den Kapazitäten der Buchung entsprechen. Ist die Pareto-Menge als

Lösung der Bestimmung der TK bekannt, hat man sofort die Lösung für alle Instanzen der Buchungsvalidierung.

Die Bestimmung der technischen Kapazitäten kann mathematisch folgendermaßen formuliert werden:

Finde $\Delta_{\max} \in \mathbb{R}^k$, so dass:

$\forall \Delta \in \mathbb{R}^k$ mit $\Delta \leq \Delta_{\max}$ ist $BV(G, \Delta)$ erfüllt und (TK(G))

$\forall \delta \in \mathbb{R}^k$, $\delta \geq \mathbf{0}$, $\delta \neq \mathbf{0}$, ist $BV(G, \Delta_{\max} + \delta)$ *nicht* erfolgreich.

Die Aufgabe ist also herauszufinden, wann das Netz an seine technischen Grenzen stößt. Man beachte hierbei, dass Δ auch negative Einträge haben kann. Es ist also prinzipiell erlaubt, Kapazitäten an einzelnen Punkten zu verkleinern. Ebenso ist es möglich, dies durch Hinzunahme der Bedingung $\Delta \geq \mathbf{0}$ zu verhindern.

Zur Bestimmung der maximalen technischen Kapazitäten nutzen wir die skizzierten Methoden zur Nominierungsvalidierung. Wir zerlegen dazu den Raum der Nominierungen in geeigneter Weise in Teilmengen, um technisch zulässige von nicht zulässigen Nominierungen zu trennen. Dabei versuchen wir einen möglichst großen Bereich in der Menge der Nominierungen zu bestimmen, in dem jeweils lokal hinreichend viele Nominierungen erfüllbar sind. Auf Basis der Nominierungsvalidierung und unter Verwendung von Methoden der stochastischen und robusten Optimierung berechnen wir die Technischen Kapazitäten als Pareto-Menge.

5 Topologieplanung

In der Praxis kommt es vor, dass aufgrund einer Buchungsvalidierung oder der Bestimmung der Technischen Kapazitäten festgestellt wird, dass eine Buchung von Kunden in der gewünschten Höhe nicht möglich ist. Im schlimmsten Fall kann bereits die Zulässigkeit der aktuellen vertraglich gebuchten Kapazitäten nicht garantiert werden. Dieser Fall kann durch eine Bestimmung der Technischen Kapazitäten behandelt werden, wobei dann an einigen Punkten die vermarktete Kapazität reduziert werden muss. Will man dennoch eine höhere Kapazität erreichen, so muss das Netz ausgebaut werden.

Es gibt eine Reihe verschiedener Ausbaumaßnahmen, welche die TK des Netzes steigern können. Häufig ist ein zu großer Druckabfall der limitierende Faktor. Eine vergleichsweise einfache Möglichkeit diesen zu verringern ist, die betroffenen Leitungen durch parallele Rohre, sogenannte *Loops*, auszubauen. Alternativ

können neue Verdichterstationen eingerichtet bzw. bestehende erweitert werden. Dies kann durch die Installation neuer Verdichtermaschinen oder der Anpassung der Arbeitsbereiche vorhandener Maschinen erfolgen. Daneben können durch zusätzliche Leitungen innerhalb der Verdichterstation neue Fahrwege eingerichtet werden. Das Netz kann durch die Installation neuer Ventile oder Regelventile ausgebaut werden; dies ermöglicht, die Gasflüsse anders zu verteilen. Eine weniger offensichtliche Maßnahme ist die Aushandlung weicherer Druckschranken mit den Transportkunden, sodass der Druckabfall nicht mehr limitierend wirkt. Bei größeren zusätzlich zu transportierenden Gasmengen ist der Neubau von Rohren sinnvoll. Zur Bestimmung der Kosten neuer Rohre muss dabei zunächst die geographische Lage der Rohre ermittelt werden. Hierbei müssen verschiedene Einschränkungen berücksichtigt werden. Beispielsweise müssen Naturschutz- und Wohngebiete vermieden und Kreuzungen mit Straßen und Flüssen beachtet werden. In diesem Zusammenhang sind Loop-Ausbauten von Vorteil, weil für bereits existierende Leitungen viele Restriktionen schon eingehalten sind. Weiterhin reduzieren neue kurze (parallele) Leitungen den Druckabfall oft genügend. Im Vergleich zum Bau neuer Pipelines sind sie daher kostengünstig, ebenso wie der Aus- bzw. Neubau von Verdichterstationen. Allerdings ist der Betrieb von Verdichtern im Gegensatz zu Rohren mit hohen laufenden Kosten verbunden. Das Problem der *Topologieplanung* besteht also darin, für eine Menge von Buchungen ausreichend TK durch kostengünstige Netzausbaumaßnahmen zu erreichen. Mathematisch formuliert ist für das bestehende Netz $G = (V, E)$ und gegebene Buchungen ein kostengünstiger *Erweiterungsgraph* $\hat{G} = (\hat{V}, \hat{E})$ mit $V \subseteq \hat{V}$ und $E \subseteq \hat{E}$ gesucht. Die Erweiterungskanten $\hat{E} \setminus E$ stellen bestimmte Ausbaumaßnahmen dar, wobei $\hat{e} \in \hat{E} \setminus E$ mit Kosten $c(\hat{e})$ verbunden ist. Damit stellt sich folgendes Optimierungsproblem:

$$\min \sum_{\hat{e} \in \hat{E} \setminus E} c(\hat{e}), \text{ so dass } \hat{G} \text{ Erweiterungsgraph von } G \text{ und } \quad (\text{TP}(G, \Delta))$$

$$\text{BV}(\hat{G}, \Delta) \text{ erfolgreich ist.}$$

Methodisch bestimmen wir zunächst in einem ersten Schritt eine endliche Menge geeigneter Ausbauentscheidungen, aus denen wir in einem zweiten Schritt eine beweisbar kostenoptimale Teilmenge wählen, die die Zulässigkeit der Nominierung sicherstellt.

Eine prinzipielle Schwierigkeit bei der Topologieplanung für Gasnetze ist, dass die Kapazitäten der Netzleitungen, anders als z. B. bei Telekommunikationsnetzen, nicht voneinander unabhängig sind. Sie sind vielmehr über die Drücke gekoppelt. Eine Konsequenz hieraus ist, dass ein „Engpass“ nicht lokal begrenzt

sein muss, sondern global durch das ganze Netz erzeugt wird. Dadurch können auch Ausbauten in entfernten, scheinbar unproblematischen Teilen des Netzes die TK erhöhen.

Weiterhin bildet die Menge der möglichen Ausbaumaßnahmen eines Netzes ein Kontinuum. Zum Beispiel kann zu jeder vorhandenen Leitung in jeder beliebigen Länge ein Loop gebaut werden. Man kann also höchstens implizit über alle möglichen Ausbaumaßnahmen optimieren; momentan ist weitestgehend unklar, ob dies möglich ist. Wir erlauben derzeit zunächst den Ausbau mit Rohren von beliebigem Durchmesser und schränken die Auswahl dann auf technisch mögliche Durchmesser ein. Mit Hilfe eines Optimierungsproblems finden wir außerdem mögliche Paare von Punkten zwischen denen der Neubau von Rohren aussichtsreich scheint. Die Berechnung der Kosten erfolgt aufgrund tabellarisierter Schätzkosten für die Ausbauten und eines Routingalgorithmus, der unter Berücksichtigung der Geographie kostengünstige Verläufe neuer Leitungen berechnet. Dies erlaubt die Kosten hinreichend genau abzuschätzen.

Um den kostengünstigsten Ausbau aus den vorher bestimmten Möglichkeiten zu bestimmen, lösen wir ein weiteres Optimierungsproblem. Dazu erweitern wir die Modelle für Nominierungsvalidierung um Ausbaumaßnahmen, wobei die Umsetzung jeder Ausbaumaßnahme mit den entsprechenden Kosten versehen ist.

Danksagung

Das Projekt „Forschungskooperation Netzoptimierung (ForNe)“ wird von sieben Forschungseinrichtungen getragen, der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, der Humboldt-Universität zu Berlin, der Leibniz Universität Hannover, der Technischen Universität Braunschweig, der Universität Duisburg-Essen, dem Weierstraß-Institut für Angewandte Analysis und Stochastik sowie dem Zuse-Institut Berlin. Wir bedanken uns bei unserem Kooperationspartner Open Grid Europe GmbH sowie dem BMWi für die finanzielle Unterstützung.

Literatur

- [1] P. Domschke, B. Geißler, O. Kolb, J. Lang, A. Martin, and A. Morsi. Combination of nonlinear and linear optimization of transient gas networks. *INFORMS Journal on Computing*, 2010. Im Druck.
- [2] Verordnung über den Zugang zu Gasversorgungsnetzen. (BGBl. I S. 1261).
- [3] T. Koch, H. Leovey, R. Mirkov, W. Römisch, and I. Wegner-Specht. Szenariogenerierung zur Modellierung der stochastischen Ausspeiselasten in einem Gastransportnetz. In *Proceedings VDI-Tagung „Optimierung in der Energiewirtschaft 2011“*, 2011.
- [4] B. Geißler, O. Kolb, J. Lang, G. Leugering, A. Martin, and A. Morsi. Mixed integer linear models for the optimization of dynamical transport networks. *Mathematical Methods of Operations Research*, 73:339–362, 2011.