Gasnetzwerke

Mathematische Modellierung, Simulation und Optimierung

Jens Lang, Günter Leugering, Alexander Martin und Caren Tischendorf

Im Mai 2014 wurde seitens der DFG der Transregio 154 *Mathematische Modellierung, Simulation und Optimierung am Beispiel von Gasnetzwerken* bewilligt. Die Forschungsarbeiten an den beteiligten Standorten, der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (Sprecheruniversität; Sprecher: Alexander Martin), der Technischen Universität Darmstadt (stellvertretender Sprecher: Jens Lang), der Technischen Universität Berlin, der Humboldt Universität (stellvertretende Sprecherin: Caren Tischendorf) sowie den Partnerinstitutionen Weierstraß-Institut (Berlin), Konrad-Zuse-Zentrum (Berlin) und Universität Duisburg-Essen haben im Oktober 2014 begonnen.

Auf den ersten Blick scheint es sich bei dem Thema des TRR 154 um ein eher klassisches Problem der anwendungsorientierten Mathematik zu handeln: Komplexer Anwendungskontext soll mit modernen Verfahren der Numerik bzw. des Wissenschaftlichen Rechnens und solchen der mathematischen Optimierung modellbezogen erschlossen, simuliert und optimiert werden – ein Projekt, das so gesehen und für sich genommen keine besondere Beachtung im Rahmen der *Mitteilungen der DMV* reklamieren könnte. Der Zusatz *am Beispiel von Gasnetzwerken* im Zusammenhang mit den allgemeinen Begriffen *Mathematische Modellierung und Simulation* eröffnet allerdings eine neue Perspektive, die die Komplexität des Gesamtkontextes, seine Genese und seine grundlegende und richtungsweisende mathematische Bedeutung in den Blick nimmt.

Auch ohne Ingenieurexpertise im Umfeld des Transports von Gas in verzweigten Rohrleitungssystemen wird deutlich, dass hier physikalisch beschriebene dynamische Prozesse (zum Beispiel beschrieben durch die Eulerschen Gasgleichungen) auf vernetzten kontinuierlichen Gebieten (Rohrleitungen) betrachtet und optimal gesteuert werden sollen. Eine entscheidende Schwierigkeit bei dem Transport von Gas (aber auch bei Wasser) besteht in dem reibungsinduzierten Druckverlust entlang der Rohre, der den Einsatz von komplexen und kostenintensiven Druckerhöhungsanlagen zusammen mit Ventilen und anderen Steuerungsinstrumenten notwendig macht (vgl. Abbildung 1). Im operationellen Echtzeitbetrieb müssen auf der Basis von Simulationen und Messungen Entscheidungen über das An- und Abschalten solcher Kompressoren und das Öffnen bzw. Schließen von Ventilen getroffen und sodann technisch-physikalisch realisiert werden, sodass der Gasfluss von gewissen Eingangsknoten zu den Abnehmerknoten vertragsgemäß und kostenoptimal garantiert werden kann.

Offensichtlich handelt es sich hier um ein echtzeitgetriebenes, schaltendes, vernetztes, ganzzahlig-kontinuierliches, nichtlineares und örtlich verteiltes dynamisches System höchster Komplexität. Hier wird das Ausmaß und der Anspruch des Vorhabens deutlich, und es wird offenbar, dass es der Expertise in der Theorie und Numerik nichtlinearer partieller Differentialgleichungen, der Expertise über solche Systeme auf vernetzten Gebieten, der kontinuierlichen und ganzzahligen Optimierung und Optimalsteuerungstheorie für verteilte Systeme sowie der Theorie und Praxis komplexer Echzeitsysteme bedarf.

Eben diese Expertise ist in Deutschland in den vergangenen Jahrzehnten vorausschauend und systematisch aufgebaut worden. Zunächst wurde in den Jahren 1987 bis

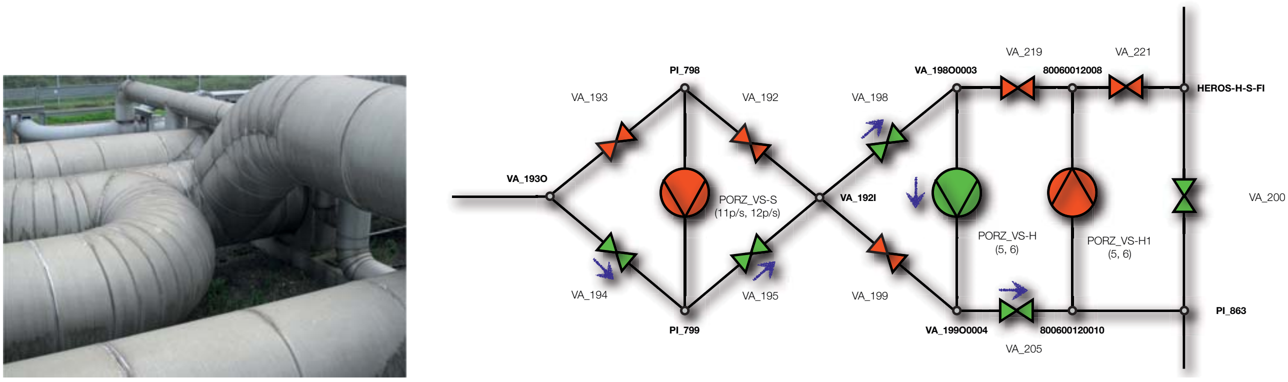

Abbildung 1. *Links: Typische Verzweigung der Rohrleitungen innerhalb einer Verdichterstation*
Rechts: Exemplarischer Schaltzustand der Ventile und Verdichter (rot = aus, grün = an) in einer Verdichterstation

DOI 10.1515/dmvm-2015-0013

1993 ein DFG-Schwerpunktprogramm *Anwendungsbezogene Optimierung und Steuerung* (Sprecher: K.-H. Hoffmann, TU München) eingerichtet, in dem der Fokus besonders auf der Theorie von Optimalsteuerungsproblemen im Kontext partieller Differentialgleichungen gesetzt wurde. Es wurde in dieser Zeit immer deutlicher, dass die numerische Komplexität nach geeigneter Diskretrisierung und der Zeitfaktor einen immer wichtigeren Raum, gerade mit Blick auf reale Anwendungen, einnahmen. Diesen Aspekten wurde systematisch im DFG-Schwerpunktprogramm *Echtzeitoptimierung großer Systeme* (Sprecher: M. Grötschel, TU Berlin) Rechnung getragen, das von 1995 bis 2002 neben Experten der kontinuierlichen Optimierung und Numerik partieller Differentialgleichungen zunehmend auch Kolleginnen und Kollegen mit Expertise in der ganzzahligen Optimierung einbezog [2]. Hier entstand erstmalig in Deutschland im Rahmen eines gemeinsamen Großprojektes ein mathematischer Dialog zwischen Experten für diskrete und kontinuierliche Strukturen vor dem Hintergrund der Optimierung. Während nunmehr das wissenschaftliche Potenzial für Anwendungsszenarien für zeitkritische dynamische und örtlich verteilte Optimierungsprobleme mit großer Komplexität sichtbar wurde, blieben Aspekte der Modelladaptivität, der Modellreduktion und der numerischen Effizienz offen. Diese wurden in dem DFG-Schwerpunktprogramm *Optimierung mit Partiellen Differentialgleichungen* (Sprecher: G. Leugering, FAU Erlangen-Nürnberg) von 2006 bis 2013 als Kernthemen in den mathematischen Fokus genommen. Die höchst eindrucksvollen Ergebnisse sind in den Themenbänden [4, 5] dokumentiert. Im Zuge dieser drei DFG-Schwerpunktprogramme wurde ein enormes wissenschaftliches Nachwuchspotenzial in Deutschland geschaffen, das gezielt mit Blick auf die oben beschriebenen breiten Anwendungsklassen und der damit verbundenen mathematischen Theoriebildung ausgebildet bzw. etabliert wurde. Die Grundlagen waren geschaffen, Probleme im Umfeld entscheidungsbasierter, hierarchisch gestaffelter, dynamischer und örtlich verteilter Echtzeitoptimierungsprobleme systematisch in den Blick zu nehmen. Energienetzwerke, Versorgungssysteme in den Bereichen Strom, Wasser und Gas wurden zu den treibenden Anwendungsszenarien (für Gas siehe [3]) insofern, als dass die inhärenten Entscheidungsstrukturen diskrete bzw. ganzzahlige Komponenten aufweisen, die gegebene physikalische Realität eine Beschreibung durch gewöhnliche und partielle Differentialgleichungen auf vernetzten Gebieten notwendig macht und der Echtzeitbetrieb numerische Effizienz und echtzeitfähige Algorithmik fordert. Mit anderen Worten, der Boden war bereitet für einen DFG-Transregio, der im Rahmen der Modellierung, Simulation und Optimierung auf die Theoriebildung für ganzzahlig-kontinuierliche Strukturen abzielt und dabei exemplarisch eine der wichtigsten und zukunftsweisenden Anwendungsszenarien fokussiert, um so einerseits die Genese neuer mathematischer Paradigmen und Resultate aus dem konkreten Anwendungskontext abzuleiten und andererseits anwendungsrelevante und mithin validierbare Lösungskonzepte zu erarbeiten, die ihrerseits über den gegebenen Anwendungskontext hinausreichen, sodass sie einer allgemeinen *Energienetzoptimierung der Zukunft* zugute kommen.

Warum Gasnetzwerke?

Die Energiewende und ihr Gelingen stehen derzeit im Mittelpunkt des öffentlichen Interesses. Sie ist gesellschaftlich, politisch sowie wissenschaftlich von zentraler Bedeutung, da sich Deutschland, wie viele andere Industrienationen, in einer dramatisch zunehmenden Abhängigkeit von einer zuverlässigen, sicheren, effizienten und finanzierbaren Energieversorgung befindet. Gleichzeitig ist das Verlangen nach einer sauberen, umwelt- und klimafreundlichen Energieerzeugung so groß wie nie. Um dies zu ermöglichen und parallel den Ausstieg aus der Kernenergie zu bewältigen, spielt Gas als Energieträger in den nächsten Jahrzehnten eine entscheidende Rolle. Gas ist in diesem Zeitraum ausreichend vorhanden, ist schnell verfügbar, wird gehandelt und ist speicherbar. Gleichwohl impliziert die Fokussierung auf eine effiziente Gasversorgung eine Vielzahl von Problemen, sowohl in Bezug auf den Transport und die Netztechnik, als auch was die Berücksichtigung marktregulatorischer Bedingungen und die Kopplung mit anderen Energieträgern betrifft. Exemplarisch sei hier genannt, dass Gastransporteure den Nachweis führen müssen, dass innerhalb gegebener technischer Kapazitäten alle am Markt zustande kommenden Verträge physikalisch und technisch erfüllbar sind. Dies stellt sich mathematisch als ein komplexes, entscheidungsgetriebenes Steuerbarkeits- bzw. Zulässigkeitsproblem für nichtlineare Transportprozesse unter stochastischen Einflüssen auf vernetzten Gebieten dar. Diese Herausforderungen sollen im TRR 154 bewältigt werden, um mathematische Grundlagen für die Behandlung der in der Praxis auftretenden Fragestellungen zu erarbeiten, und um die mathematische Theorie- und Methodenbildung voranzutreiben. Erfolgsentscheidend für ein solch ambitioniertes und komplexes Forschungsvorhaben ist die Nähe zu einem Realsystem, das vor dem Hintergrund der operationellen Praxis Randbedingungen, Bereichseinschränkungen, Substrukturierungen und auch Komplexitätsschranken sinnvoll definiert. So wird aus der mittlerweile klar identifizierten, aber in ihrer Uneingeschränktheit viel zu allgemeinen Problematik der *ganzzahlig-kontinuierlichen Echtzeit-Optimierung großer Systeme* ein hierarchisch strukturiertes Problem, in dem zwischen Teilsystemen bzw. Teilaspekten und der Gesamtproblematik kontrolliert vermittelt werden kann. Gasnetzwerke, deren ingenieurtechnische hierarchische Modellierung gegeben ist, bieten hier ein ideales Beispiel für eine anwendungsbezogene Grundlagenforschung im Bereich der Optimierung und Prozesssteuerung.

Fluch der Komplexität: Modellhierarchien und Adaptivität

Gasnetzwerke, wie auch andere Versorgungssysteme, z. B. Frisch- und Abwassernetzwerke oder Stromtrassennetze, können auf sehr unterschiedlichen Komplexitätsstufen beschrieben werden. Geht man bis zu den Haushalten, so hat man es mit Millionen Rohrleitungen zu tun, beschränkt man sich auf die lokalen Verteiler, die die Verträge mit den Netzbetreibern und den Anbietern aushandeln, so kommt man in der Komplexität auf zigtausend mittelgroße Leitungen (vgl. Abbildung 2).

In dem Transregio bewegen wir uns auf der Ebene der Vernetzung zwischen den Betreibern und ihren Vertragspartnern. Dieses Grobnetz kann sodann in verschiedene Teilnetze unterteilt werden. Letztlich können die Teilnetze auf einzelne Rohrleitungen heruntergebrochen werden, wo dann die Eulerschen Gasgleichungen vollständig gelten:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v) = 0, \\
&\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(p + \rho v^2) = -\frac{\lambda}{2D}\rho v|v| - g\rho h', \\
&\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho(\tfrac{1}{2}v^2 + e)\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho v(\tfrac{1}{2}v^2 + e) + pv\right) \\
&\qquad\qquad = -\frac{k_w}{D}\,(T - T_w)\,,
\end{aligned} \tag{1}$$

zusammen mit der Zustandsgleichung für reale Gase, $p = R\rho Tz(p,T)$. Hierin bezeichnen $\rho(x,t), v(x,t), p(x,t)$ Dichte, Geschwindigkeit und Druck im Punkt x zur Zeit t. Weiter ist g die Gravitationskonstante, $h' = h'(x)$ die Steigung des Rohres, λ der Rohrreibungskoeffizient, D der Rohrdurchmesser, k_w der Wärmeleitkoeffizient, $T_w = T_w(x)$ die Oberflächentemperatur der Rohrwand, R die Gaskonstante und $z = z(p,T)$ der Realgasfaktor (Kompressibilitätsfaktor). Die Variable $e = c_v T + gh$ bezeichnet die interne Energie (= thermische + potenzielle Energie). Hierbei ist c_v die spezifische Wärme.

Es ist offensichtlich, dass eine solch detailgenaue Formulierung auf der Ebene des Gesamtsystems nicht durchgehalten werden kann [3]. Gleichwohl ist (1) nicht die genaueste Beschreibung des Gasflusses durch ein Rohr, welche auf eine dreidimensionale Darstellung abzielen würde. Die Wahl von (1) als physikalisches Basissystem wird durch den Anwendungskontext gegeben. In Richtung aufsteigender Komplexität des Netzwerkes, von einem Rohr (Kante), welches durch die Endpunkte (Knoten) parametrisiert werden kann, zu verzweigten Systemen und schließlich zum Gesamtnetzwerk, muss die Detailgenauigkeit der physikalischen Repräsentation „zurückgefahren" werden. So wird beispielsweise in Teilnetzen auf den Temperatureinfluss verzichtet und die Dynamik semi-linear abgebildet, während auf der komplexesten Vernetzungsebene die blanke Tatsache, dass Gas fließt, durch eine binäre Variable abgebildet wird. Umgekehrt sind die aufgrund des konstitutiven Druckverlustes wesentlichen Druckstationen (Kompressoren),

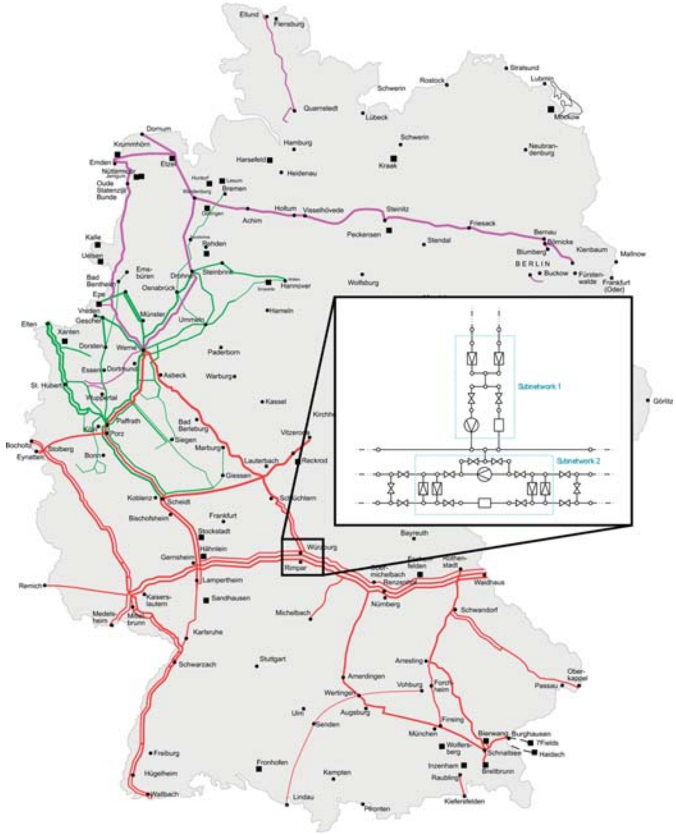

Abbildung 2. *Übersicht des Netzes des größten deutschen Gastransporteurs* Open Grid Europe

Ventile und Entlastungselemente nur im Kontext des Gesamtnetzwerkes bzw. auf Teilnetzebene abbildbar, da sie nicht die lokalen Eigenschaften, wie (1), sondern die globalen Transportprozesse in den Blick nehmen. Das Öffnen eines Ventils oder eines Entlastungselements und das Anfahren einer Pumpe wird auf der Netzwerkebene durch binäre Variablen definiert, während der tatsächlich damit verbundene technische Vorgang stetig abläuft und wiederum auf lokaler Rohrebene in (1) als Randbedingung einfließt.

Auf diese Weise werden „Entscheidungen" durch die Festsetzung binärer Variablen auf Netzwerkniveau über zunehmend komplexere physikalische und graphenspezifisch gröbere Modelle bis in die physikalische Realisierung auf der untersten Beschreibungsebene (1) systematisch „weitergereicht". Sofern aber diese Entscheidungen zunächst keine detaillierte physikalische Grundlegung haben, müssen ihre physikalischen Implikationen auf der Ebene der physikalischen Modellierung auf Zulässigkeit hin geprüft werden. Die Verletzung der Zulässigkeit ist dann zum Entscheidungsträger (repräsentiert durch ganzzahlige Strukturen) „zurückzumelden". Dieser Fluss von Informationen, von den ganzzahligen zu den kontinuierlichen Variablen und zurück, muss sich sowohl mit Blick auf die numerische Simulation, als auch und insbesondere im Kontext der Optimierung widerspiegeln.

Neue Herausforderung: Untrennbare Einheit von Modellbildung und Simulation

Die binären An-/Aus-Entscheidungen führen auf parameterabhängige Modellgleichungen, deren dynamische Variablen in gewissen Zeitintervallen (abhängig vom Parameter) zu statischen Variablen werden können und umgekehrt. So ist beispielsweise an einem geöffneten Ventil der Fluss durch die vorherrschenden Druckbedingungen dynamisch bestimmt, während er bei einem geschlossenen Ventil statisch durch Null festgelegt ist. Erschwerend kommt hinzu, dass die binären Parameter nicht nur zeitabhängig, sondern auch zustandsabhängig (z. B. bei Rückschlagklappen flussabhängig) gesteuert werden. Dies bedeutet, dass eine stabile numerische Simulation nur möglich ist, wenn die numerische Diskretisierung des Gesamtsystems partieller differential-algebraischer Gleichungen dem zeit- und zustandsabhängigen Wechsel von Dynamik und Statik der Modellgleichungen angepasst ist.

Eine weitere Schwierigkeit für die numerische Simulation besteht in den algebraischen Nebenbedingungen, die sich aus der Netztopologie und den statischen Modellanteilen ergeben. Es ist wohlbekannt, dass für eine stabile numerische Simulation eines Rohres die Wahl der Diskretisierung an die Randbedingungen (Druck-Druck, Druck-Fluss, etc.) angepasst werden muss. Im Falle von Netzen, die nicht nur aus Rohren, sondern auch aus Ventilen, Verdichtern, Kühlern etc. bestehen, sind die Randbedingungen jedoch nicht explizit, sondern nur implizit gegeben.

Wie zuvor erwähnt, erfordert die Komplexität im Falle großer realer Gasnetze den Einsatz reduzierter Elementmodelle, deren Güte von mehreren Parametern (z. B. Rohrlänge) und den aktuell vorherrschenden Druck- und Flussbedingungen abhängt. Daher ist eine Entwicklung präziser Fehlerschätzer für das Gesamtsystem nötig, auf deren Grundlage der Einsatz detaillierterer oder gröberer Modelle für einzelne Elemente oder bestimmte Teilnetze (zustandsabhängig) gesteuert wird. Damit ist klar, dass nicht nur die Simulation der Modellbildung angepasst, sondern auch umgekehrt die Modellierung simulationsgesteuert betrieben werden muss.

Neues Paradigma: Ganzzahlig-kontinuierliche Optimierung

Die gerade beschriebene Verzahnung von ganzzahligen und kontinuierlichen Konzepten der Modellierung, Simulation und Optimierung ist ein modellgestütztes Beispiel eines allgemeinen Paradigmas, das auch in den Bereichen der Multiskalenmodelle, der Multileveloptimierung bzw. einer allgemeinen Mehrgitterphilosophie bereits Niederschlag gefunden hat.

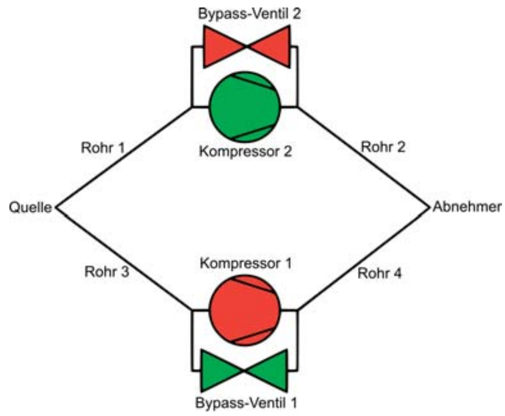

Abbildung 3. *Gasnetzwerk mit zwei Kompressoren, einer Quelle und einem Abnehmer. Exemplarischer Schaltzustand der Kompressoren und Bypass-Ventile: Rot bedeutet aus bzw. zu; grün bedeutet an bzw. offen.*

Während man aber in den zuletzt genannten Bereichen typischerweise in derselben Begrifflichkeitsebene verbleibt, ist diese Verzahnung in auf- und absteigender Komplexität zwischen zwei bislang weitgehend getrennten Teilgebieten der Mathematik im TRR 154 im Fokus der Forschung mit dem Ziel, eine ganzzahlig-kontinuierliche Optimierung als neue Disziplin zu etablieren. Damit nicht der Eindruck eines allzu philosophischen Überbaus entsteht, an dem so mancher Multiskalen- oder Multilevelansatz mangels Validierungspotenzial im konkreten Anwendungskontext gescheitert ist, soll an einem sehr einfachen Beispiel erläutert werden, wie ganzzahlige und kontinuierliche Strategien zusammenspielen und dabei überraschende Resultate liefern können. Von solchen validierbaren Beispielen ausgehend, werden künftig im Transregio die Komplexitätsgrenzen überschritten.

Zur Demonstration des neuen Paradigmas von ganzzahliger-kontinuierlicher Optimierung eignet sich bereits ein kleines Netzwerk mit zwei Kompressoren, die symmetrisch angeordnet sind, einer Quelle, einem Abnehmer und vier gleichlangen Rohren, wie in Abbildung 3 dargestellt. Ein Kompressor wird dabei üblicherweise als eine Einheit mit einem Bypass-Ventil modelliert. Ist das Ventil offen, dann ist der Kompressor aus, ist es geschlossen, dann läuft der Kompressor.

Die genaue Beschreibung des Optimierungsproblems findet sich in Kapitel 5.2 von [1]. Der Zeithorizont beträgt vier Stunden. Zur Modellierung des Gasflusses auf den Rohren werden die isothermen Eulerschen Gleichungen betrachtet, d. h. die Temperatur wird als konstant angenommen. Das Optimierungsproblem besteht darin, bei vorgegebener Verbrauchskurve beim Abnehmer und einem wohldefinierten Anfangszustand des Gasnetzes, die optimale Zuflussrate an der Quelle in gegebenen Schranken und die kostengünstigste Fahrweise der Kompressoren zu finden. Beide Kompressoren dürfen im Belastungsbereich [600kW, 1500kW] gefahren werden, wobei eine Anpassung nur nach einer Stunde erlaubt

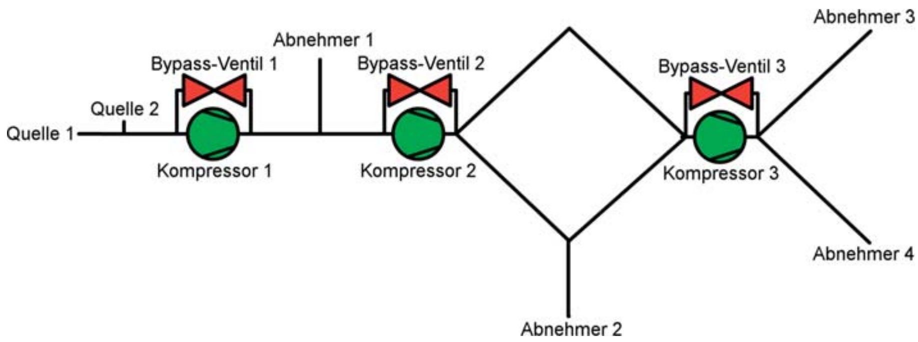

Abbildung 4. *Gasnetzwerk mit drei Kompressoren, zwei Quellen und vier Abnehmern. Exemplarischer Schaltzustand der Kompressoren und Bypass-Ventile: Rot bedeutet aus bzw. zu; grün bedeutet an bzw. offen.*

ist. Der Druck in den Rohren muss dabei im Intervall [61bar,65bar] liegen – eine typische praktische Anforderung.

Das Optimierungsproblem wurde mit drei verschiedenen Strategien gelöst. Die sich dabei ergebenden Fahrweisen der Kompressoren und ihr Gesamtverbrauch, den es zu minimieren gilt, sind in Tabelle 1 dargestellt. Der kontinuierliche Optimierer, der auf *sequential quadratic programming* (SQP) und einer iterativen Penalisierungsstrategie zur Erzwingung einer 0/1-Entscheidung für die Zustände ‚An' oder ‚Aus' bei den Kompressoren basiert [1], liefert eine (erwartete) symmetrische Lösung. Bei festgehaltener räumlicher und zeitlicher Diskretisierung (und Linearisierungsansätzen) findet der ganzzahlige Optimierer mit *mixed-integer linear programming* (MILP) als Grundlage eine bessere, jetzt asymmetrische Lösung. Diese lässt sich noch einmal verbessern mit einem kombinierten, ganzzahlig-kontinuierlichen Ansatz, wobei der Linearisierungsfehler des ganzzahligen Optimierers weiter verringert wird. Es ist eine interessante Beobachtung, dass die durch den MILP-Löser gefundene Schaltentscheidung für die Kompressoren das Ergebnis aus der kontinuierlichen Optimierung um 16.5 % verbessert. Die Brechung der Symmetrie hat ihre Ursache in der unteren Schranke für die Laufleistung der Kompressoren.

Ein praktisches Gasnetzwerk von immer noch kleiner Größe ist in Abbildung 4 gezeigt. Mit drei Kompressoren unterschiedlicher Leistungen und mehreren Quellen und Abnehmern besitzt dieses Problem mit den zahlreichen Nebenbedingungen für Druck und Flussraten sowie Schranken an die Belastungsbereiche der Kompressoren bereits eine beachtliche Komplexität. Die bisher erzielten Ergebnisse für dieses Netzwerk sind unbefriedigend [1]. Es ist das Anliegen des Transregios, hier neue Algorithmen im Bereich der ganzzahlig-kontinuierlichen Optimierung zu entwickeln, die in der Lage sind, derartige und noch weitaus komplexere Transportprobleme auf Netzwerkstrukturen erfolgreich zu optimieren.

Tabelle 1. *Optimierung des Gasnetzwerks aus Abbildung 3*

Erste Lösung mit kontinuierlicher Optimierung (SQP)

Zeit [h]	0	1	2	3	4
Leistung Kompressor 1 [kW]	0.00	0.00	600.00	600.00	939.83
Leistung Kompressor 2 [kW]	0.00	0.00	600.00	600.00	939.88
Gesamtverbrauch [m^3]					1120.10

Beste Kontrolle mit ganzzahliger Optimierung (MILP)

Zeit [h]	0	1	2	3	4
Leistung Kompressor 1 [kW]	0.00	0.00	0.00	600.00	947.21
Leistung Kompressor 2 [kW]	0.00	0.00	600.00	600.00	1035.66
Gesamtverbrauch [m^3]					936.20

Verbesserte Lösung mit ganzzahlig-kontinuierlicher Optimierung

Zeit [h]	0	1	2	3	4
Leistung Kompressor 1 [kW]	0.00	0.00	0.00	600.00	987.34
Leistung Kompressor 2 [kW]	0.00	0.00	600.00	600.00	987.37
Gesamtverbrauch [m^3]					934.80

Neues Potenzial durch Integration von Simulation und Optimierung

Wie an den obigen Beispielen sichtbar, zeigt das Paradigma der ganzzahlig-kontinuierlichen Optimierung den natürlichen Bedarf an neuen Algorithmen, bei denen Simulations- und Optimierungsverfahren miteinander gekoppelt werden, siehe auch [3]. Daraus ergibt sich ein neues spannendes Forschungsfeld: eine kombinierte Entwicklung von Simulations- und Optimierungsverfahren mit dem Potenzial einer erheblichen Effizienzsteigerung. So kann beispielsweise durch die Wahl der numerischen Diskretisierung nicht nur die Stabilität des Systems, sondern auch die Struktur des zu optimierenden Gesamtsystems beeinflusst werden, sodass entsprechend strukturausnutzende Optimierungsverfahren schneller zum Ziel führen. Ein zweites Beispiel ist die Möglichkeit einer beschleunigten Simulation bei einem geeigneten, vom Optimierer vorgegebenen Parameterspektrum, sodass die Lösungen für bereits berechnete Parameterwerte für weitere Simulationen effizient genutzt werden können.

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 J. Comp.*, 23:605–617, 2011.

[2] M. Grötschel, S.O. Krumke, and J. Rambau, editors. *Online Optimization of Large Scale Systems*. Springer, September 2001.

[3] Thorsten Koch, Benjamin Hiller, Marc E. Pfetsch, and Lars Schewe, editors. *Evaluating Gas Network Capacities*. SIAM-MOS series on Optimization. SIAM, 2015.

[4] G. Leugering, P. Benner, S. Engell, A. Griewank, H. Harbrecht, M. Hinze, R. Rannacher, and S. Ulbrich, editors. *Trends in PDE Constrained Optimization*, volume 165 of *International Series of Numerical Mathematics*. Birkhäuser, 2014.

[5] G. Leugering, S. Engell, A. Griewank, M. Hinze, R. Rannacher, V. Schulz, M. Ulbrich, and S. Ulbrich, editors. *Constrained Optimization and Optimal Control for Partial Differential Equations*, volume 160 of *International Series of Numerical Mathematics*. Birkhäuser, 2012.

Prof. Dr. Jens Lang, Technische Universität Darmstadt, Institut für Mathematik, Dolivostraße 15, 64293 Darmstadt
lang@mathematik.tu-darmstadt.de

Prof. Dr. Günter Leugering, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Angewandte Mathematik 2, Cauerstraße 11, 91058 Erlangen
guenter.leugering@fau.de

Prof. Dr. Alexander Martin, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Wirtschaftsmathematik, Cauerstraße 11, 91058 Erlangen
alexander.martin@math.uni-erlangen.de

Prof. Dr. Caren Tischendorf, Lehrstuhl für Angewandte Mathematik, Humboldt Universität zu Berlin, Unter den Linden 6, 10099 Berlin
tischendorf@math.hu-berlin.de

Jens Lang, Jahrgang 1960, studierte Mathematik und promovierte im Jahre 1988 an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Im Rahmen eines Forschungsstudiums verbrachte er von 1984 bis 1985 ein Jahr an der Staatlichen Universität in St. Petersburg. Im Jahre 1990 wechselte er an das Zuse-Institut nach Berlin und habilitierte sich im Jahre 1999 an der Freien Universität Berlin. Seit 2001 ist er als Professor für Numerik partieller Differentialgleichungen an der Technischen Universität Darmstadt tätig. Sein Arbeitsgebiet umfasst die Modellierung und Simulation von Evolutionsgleichungen mittels adaptiver numerischer Algorithmen mit Anwendungen in den Bereichen reaktive Strömungen, elektromagnetische Felder und Transport in Netzwerken.

Günter Leugering, Jahrgang 1953, studierte an der Universität Frankfurt a. M. Mathematik mit Nebenfach Theoretische Physik. Er promovierte im Jahre 1984 an der Technischen Universität Darmstadt und wurde dort 1988 habilitiert. Im Jahre 1989 erhielt er ein Heisenbergstipendium und wurde, nach einem Aufenthalt als Gastprofessor am VPI in Blacksburg VA, Assistant-Professor an der Georgetown University in Washington DC. Im Jahre 1992 kehrte er im Rahmen einer Fiebiger-Professur an die Universität Bayreuth nach Deutschland zurück und wechselte im Jahre 2000 an die Technische Universität Darmstadt. Seit 2003 Leitet er den Lehrstuhl für Angewandte Mathematik 2 (Kontinuierliche Optimierung) an der Universität Erlangen-Nürnberg. Sein Arbeitsgebiet lässt sich mit "Steuerung und Optimierung für Partielle Differentialgleichungen" umschreiben.

Alexander Martin, Jahrgang 1965, studierte Wirtschaftsmathematik an der Universität Augsburg und promovierte und habilitierte sich in Mathematik an der TU Berlin. Er war stellvertretender Leiter der Abteilung Optimierung am Konrad-Zuse-Zentrum in Berlin (ZIB) bevor er im Jahre 2000 Professor an der TU Darmstadt wurde. Er war dort Vizepräsident von 2008 bis 2010. Seit April 2010 leitet er den Lehrstuhl für Wirtschaftsmathematik an der Universität Erlangen-Nürnberg. Sein Forschungsgebiet umfasst das Studium und die Lösung allgemeiner gemischt-ganzzahliger linearer und nichtlinearer Optimierungsprobleme u. a. mit Anwendungen im Transport, Verkehr, Finanzwesen und Energiemanagement.

Caren Tischendorf, Jahrgang 1969, studierte Mathematik an der Humboldt-Universität zu Berlin und der Lomonossow-Universität Moskau. Sie promovierte und habilitierte sich in Mathematik an der Humboldt-Universität zu Berlin. Während dieser Zeit war sie für sechs Monate in der Zentralen Forschung und Entwicklung der SIEMENS AG in München und ein Jahr an der Universität Lund in Schweden tätig. Nach zwei Jahren Gastprofessur an der TU Berlin wurde sie 2006 Professorin an der Universität zu Köln. Seit Mai 2012 ist sie Lehrstuhlinhaberin für angewandte Mathematik an der Humboldt-Universität zu Berlin. Ihre Forschung umfasst die Modellierung und numerische Simulation differential-algebraischer Gleichungen und gekoppelter partieller Differentialgleichungen in den Bereichen Elektronik, Transport und Energie.