

Reihe 7

Strömungstechnik

Nr. 505

Andreas Hielscher,  
Bochum

## Ein neues Verfahren zur strömungstechnischen Simulation von Gasnetzen





---

EIN NEUES VERFAHREN ZUR STRÖMUNGSTECHNISCHEN SIMULATION  
VON GASNETZEN

---

Dissertation  
zur  
Erlangung des Grades  
Doktor-Ingenieur

der  
Fakultät für Maschinenbau  
der Ruhr-Universität Bochum

von

Andreas Hielscher  
aus Dortmund

Bochum 2016

---

Dissertation eingereicht am: 24. März 2016

Tag der mündlichen Prüfung: 10. Juni 2016

Erster Referent: Prof. Dr.-Ing. Roland Span

Zweiter Referent: Prof. Dr.-Ing. Andreas Brümmer

# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 7

Strömungstechnik

Andreas Hielscher,  
Bochum

Nr. 505

Ein neues Verfahren  
zur strömungstechnischen  
Simulation von Gasnetzen

VDI verlag

Hielscher, Andreas

## **Ein neues Verfahren zur strömungstechnischen Simulation von Gasnetzen**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 7 Nr. 505. Düsseldorf: VDI Verlag 2017.

150 Seiten, 78 Bilder, 14 Tabellen.

ISBN 978-3-18-350507-4, ISSN 0178-9538,

€ 57,00/VDI-Mitgliederpreis € 51,30.

**Für die Dokumentation:** Strömungssimulation – Gasbeschaffenheit – Gasbeschaffenheitsverfolgung – Brennwertverfolgung – Unsicherheitsberechnung – Monte-Carlo-Simulation – Gasnetze – Verteilnetze – SmartSim

Seit einigen Jahren werden zunehmende Schwankungen der Gasbeschaffenheit, insbesondere des Brennwerts, in Erdgasverteilnetzen beobachtet und damit die korrekte Abrechnung von Endkunden erschwert. In dieser Arbeit wird ein neues Verfahren zur strömungstechnischen Simulation von Erdgasverteilnetzen entwickelt, welches sich auch für stationäre Strömungen eignet. Dieses Verfahren wird zur Brennwertverfolgung eingesetzt und zeichnet sich durch hohe Genauigkeit sowie kurze Rechenzeit aus. Eine Validierung des Rechenmodells erfolgt sowohl auf Basis von Messungen mit Prozessgaschromatografen als auch durch einen Vergleich mit etablierter Simulationssoftware. Zusätzlich wird erstmals eine Unsicherheitsberechnung für die an den Ausspeisestellen des Gasnetzes ermittelten Brennwerte auf Basis einer Monte-Carlo-Simulation nach dem „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“-Leitfaden durchgeführt. Der Vergleich mit einer Sensitivitätsanalyse bestätigt die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie

(German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

D 294

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9538

ISBN 978-3-18-350507-4

---

## DANKSAGUNG

---

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Thermodynamik der Ruhr-Universität Bochum unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Roland Span und in sehr enger Kooperation mit dem Energieversorgungsunternehmen E.ON.

Hiermit möchte ich allen herzlich danken, die mich bei dieser Arbeit auf vielfältigste Art und Weise unterstützt haben.

Zunächst möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Roland Span meinen Dank aussprechen, der mir die Chance zu dieser Promotion ermöglichte und mich bei dieser Arbeit in den zurückliegenden Jahren umfassend fachlich betreute. Für die Übernahme des Koreferats sowie die sehr konstruktiven Diskussionen gebührt Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Brümmer größtmöglicher Dank.

Herzlichster Dank geht an Herrn Dr.-Ing. Peter Schley für die Ermöglichung dieser Promotion, die damit verbundenen Erfahrungen und die fortwährende Unterstützung. Nur wenigen Leuten ist es vergönnt, eine erste Idee und Skizze über die akademische Umsetzung bis zum fertigen Produkt entwickeln und mitgestalten zu können. Außerdem möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Joachim Schenk für seine enorme fachliche Expertise, sein Mentoring und seine persönliche Unterstützung besonders danken.

Für mittlerweile fünf unvergessliche Jahre im Büro und im Open Space mit meinem Kollegen, Mitstreiter und Freund Christian Fiebig bin ich sehr dankbar. Seine enorme Hilfsbereitschaft und sein großartiger Humor haben wesentlich dazu beigetragen, dass ich die Zeit der Promotion nie vergessen werde.

Mein freundschaftlicher Dank für die fachliche und persönliche Unterstützung gebührt auch Herrn Dr.-Ing. Stefan Rickelt. Bei Herrn Hans-Joachim Kuhs, Herrn Dieter Wolf, Herrn Samuel Spiza, Herrn Malte Bitter, Herrn Dominik Schacht, Herrn Mattias Christelius und Frau Bettina Humberg bedanke ich mich für das freundschaftliche Arbeitsklima. Zudem möchte ich allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Thermodynamik meinen persönlichen Dank aussprechen.

Ich danke auch meinen Freunden und dem harten Kern meiner Kommilitoninnen und Kommilitonen in Grund- und Hauptstudium. Ohne das stets gelebte Teamwork hätte meine akademische Karriere sicherlich eine andere Richtung genommen.

Abschließend ist es mir besonders wichtig, mich bei meiner Familie zu bedanken. Sie hat mir Vieles ermöglicht und stand mir jederzeit zur Seite. Zuletzt danke ich Alexandra, die mich immer wieder motiviert und mir auch in turbulenten Zeiten Gelassenheit schenkt.

Bochum im Dezember 2016



Andreas Hielscher



---

## INHALTSVERZEICHNIS

---

<b>Kurzfassung</b>	<b>VIII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Simulation von Erdgasverteilnetzen.....	1
1.2 Gliederung und Beitrag dieser Arbeit .....	2
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1 Charakteristika von Erdgasnetzen .....	4
2.1.1 Definition von Transportnetzen .....	4
2.1.2 Definition von regionalen Erdgasverteilnetzen .....	5
2.1.3 Definition von Ortsnetzen .....	6
2.2 Grundlagen der Strömungssimulation.....	6
2.2.1 Definitionen zur Modellierung von Erdgasverteilnetzen .....	6
2.2.2 Massenerhaltung .....	8
2.2.3 Bestimmung von Druckänderungen .....	9
2.2.4 Bestimmung der Rohrreibungszahl .....	12
2.3 Berechnung von Stoffdaten.....	16
2.3.1 Virial-Zustandsgleichungen .....	16
2.3.2 SGERG Zustandsgleichung.....	18
2.4 Graphentheorie zur Beschreibung von Netzen .....	19
2.4.1 Begriffsdefinitionen .....	19
2.4.2 Mathematische Beschreibungsmethoden von Netzen .....	20
2.5 Geltende Regelwerke in Deutschland.....	22
2.5.1 DVGW Arbeitsblatt G 260 .....	22
2.5.2 DVGW Arbeitsblatt G 685 .....	24
2.6 Brennwertzuordnung mit SmartSim .....	27

<b>3</b>	<b>Entwicklung eines neuartigen Rechenkerns</b>	<b>31</b>
3.1	Entwicklung einer vereinfachten Virialgleichung.....	31
3.2	Strömungssimulation .....	33
3.2.1	Mathematische Abbildung der Gasverteilnetz-Topologie .....	34
3.2.2	Bestimmung des Strömungszustands .....	37
3.2.3	Berechnung der Druckänderung in einer einzelnen Rohrleitung.....	44
3.2.4	Berechnung der Druckverteilung mit adaptivem Gradientenabstiegs- verfahren.....	46
3.2.5	Berechnung von Vermischungen in Gasverteilnetzen .....	48
3.3	Gasbeschaffenheitsverfolgung auf Basis eines Paketmodells.....	50
3.3.1	Gaspaket-Propagierung in einzelner Rohrleitung .....	51
3.3.2	Gaspaket-Propagierung an Knoten .....	53
<b>4</b>	<b>Validierung des entwickelten Rechenkerns</b>	<b>57</b>
4.1	Wiedergabe des Realgasverhaltens durch vereinfachte Virialgleichung .....	57
4.1.1	Vergleich der Abhängigkeit der vereinfachten Virialgleichung von Dichte und Druck.....	58
4.1.2	Wiedergabe des Realgasverhaltens und der Dichte.....	59
4.2	Auswertung der Druckberechnung in einzelnen Rohrleitungen .....	65
4.2.1	Vergleich der Rohrreibungszahlberechnung zwischen Zanke und Hofer .....	65
4.2.2	Druckberechnung in einzelnen Rohrleitungen .....	67
4.2.3	Druckberechnung in einzelnen Rohrleitungen unter Berück- sichtigung geodätischer Höhendifferenzen .....	76
4.3	Validierung des Strömungszustands an beispielhaften Gasverteilnetzen .....	85
4.3.1	Vorstellung der untersuchten Gasverteilnetze .....	85
4.3.2	Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messdaten .....	90
4.3.3	Vergleich der Simulationsergebnisse mit Referenz-Software .....	99
4.4	Auswertung der Rechengeschwindigkeit und der Konvergenz des Strömungszustands .....	103
4.4.1	Rechengeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Netzgröße .....	103
4.4.2	Untersuchung zur Konvergenz des Strömungszustands .....	107

<b>5</b>	<b>Unsicherheitsberechnung für Gasverteilnetze</b>	<b>112</b>
5.1	Anwendung des „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ in Gasverteilnetzen.....	112
5.2	Eingangsgrößen für die Unsicherheitsberechnung.....	112
5.3	Monte-Carlo-Simulation.....	115
5.3.1	Berechnung der Standardunsicherheit.....	115
5.3.2	Anzahl der Monte-Carlo-Szenarien .....	115
5.4	Sensitivitätsanalyse.....	117
5.4.1	Unsicherheitsfortpflanzung.....	118
5.4.2	Resultierende relative Sensitivitätskoeffizienten .....	119
5.5	Korrelationsanalyse .....	119
5.5.1	Korrelationskoeffizient.....	119
5.5.2	Wahl der Zeiträume .....	120
5.5.3	Gleitend-mittelnder Korrelationskoeffizient .....	120
<b>6</b>	<b>Anwendung der Unsicherheitsberechnung für Gasverteilnetze</b>	<b>121</b>
6.1	Anpassung des regionalen Gasverteilnetzes „Lüchow“ .....	121
6.2	Monte-Carlo-Simulation.....	121
6.3	Sensitivitätsanalyse.....	123
6.4	Korrelationsanalyse .....	126
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>129</b>
7.1	Beiträge und Ergebnisse .....	129
7.2	Ausblick .....	131
	<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>132</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>137</b>

---

## KURZFASSUNG

---

Seit einigen Jahren werden zunehmende Schwankungen der Gasbeschaffenheit, insbesondere des Brennwertes, in Erdgasverteilnetzen beobachtet und damit die korrekte Abrechnung von Endkunden erschwert. In dieser Arbeit wird ein neues Verfahren zur strömungstechnischen Simulation von Erdgasverteilnetzen entwickelt, welches sich auch für instationäre Strömungen eignet. Dieses Verfahren wird zur Brennwertverfolgung eingesetzt und zeichnet sich durch hohe Genauigkeit sowie kurze Rechenzeit aus. Eine Validierung des Rechenmodells erfolgt sowohl auf Basis von Messungen mit Prozessgaschromatografen als auch durch einen Vergleich mit etablierter Simulationssoftware. Zusätzlich wird erstmals eine Unsicherheitsberechnung für die an den Ausspeisestellen des Gasnetzes ermittelten Brennwerte auf Basis einer Monte-Carlo-Simulation nach dem „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“-Leitfaden durchgeführt. Der Vergleich mit einer Sensitivitätsanalyse bestätigt die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation.