



Dissertation

Modellierung und Simulation von weit verzweigten, vermaschten Netzen für thermische Energie und Gas

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaften unter der Leitung von

ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Karl Ponweiser
Institut für Energietechnik und Thermodynamik / E302

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Dipl.-Ing. Dominik Bothe

Matrikelnummer 0625245

Gerasdorfer Straße 55/126/3, 1210 Wien

Gutachter:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar
Institut für Hochbau und Technologie, TU Wien

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Wolfgang Gawlik
Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, TU Wien

Wien, am 13. Dezember 2016

eigenhändige Unterschrift

Kurzfassung

Viele Fragestellungen, die sich in Bezug auf die Entwicklung von urbanen Räumen ergeben, erfordern den Einsatz verschiedener Fachdisziplinen. Daher beschäftigt sich das Projekt URBEM (Urbanes Energie- und Mobilitätssystem) mit der ganzheitlichen Betrachtung von möglichen Veränderungen urbaner Gebiete und deren Auswirkungen. URBEM wurde als Doktoratskolleg an der TU Wien in Kooperation mit den Wiener Stadtwerken konzipiert und eingerichtet. Das Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer interaktiven Umgebung, um Szenarien zu einer „nachhaltig versorgungssicheren, leistbaren und lebenswerten Stadt“ am Beispiel der Stadt Wien zu erforschen. Um dieses Ziel erreichen zu können, erfordert es die Zusammenarbeit und Interaktion von vielen verschiedenen wissenschaftlichen Fachbereichen. Als Basis für die Untersuchungen dienen drei entwickelte URBEM-Szenarien, die mögliche zukünftige Pfade von Veränderungen abbilden.

Die Analyse der Auswirkungen auf die thermische Energieversorgung durch politische, gesellschaftliche, wirtschaftliche und technologische Veränderungen stellt einen wesentlichen Teil der Untersuchungen dar. Infolgedessen befasst sich die vorliegende Arbeit mit dem Themenfeld der thermischen Netze und der Gasnetze urbaner Gebiete. Um die Fragestellungen bezüglich dieser Versorgungsnetze in einem interdisziplinären Kontext adäquat beantworten zu können, erfolgt eine eigenständige Entwicklung von Berechnungsmethoden für die Ermittlung von Betriebskenngrößen großer vermaschter Netze. Bei der Betrachtung eines Fernwärmenetzes steht die Abbildung des thermohydraulischen Verhaltens bei veränderten Randbedingungen im Vordergrund. Deshalb erfolgt die Umsetzung einer quasistationären hydraulischen Berechnung in Kombination mit einer transienten thermischen Berechnung. Die Anwendung dieser Methodik hat den Vorteil, dass das thermische Verhalten eines Fernwärmenetzes sehr detailliert abgebildet werden kann. Die Gasnetze sollen hinsichtlich hydraulischer Veränderungen, unter der vereinfachten Berücksichtigung der Kompressibilität von Gasen, untersucht werden.

Unter Anwendung der weiterentwickelten Berechnungsmethoden erfolgt zunächst die Untersuchung der Auswirkungen auf das primäre Fernwärmenetz und das Niederdruck-Gasnetz von Wien durch die Veränderungen, die sich aufgrund der definierten Szenarien ergeben. In weiterer Folge werden die Einflüsse einer dezentralen Einspeisung und der Einsatz von Speichern im Fernwärmenetz analysiert. Eine andere Fragestellung bezieht sich auf die Anbindungsmöglichkeiten von Stadterweiterungsgebieten. Dazu erfolgen Simulationen unterschiedlicher Variationen hinsichtlich des Anschlusses an das Gasnetz und das Fernwärmenetz, unter Einbeziehung des Themenfeldes der elektrischen Netze.

Die Gegenüberstellung zwischen der weiterentwickelten hydraulischen Berechnungsmethode und der kommerziellen Software PSS[®]SINCAL anhand eines Testnetzes, zeigt die numerischen Vorteile der Eigenentwicklung in Hinblick auf die Konvergenzgeschwindigkeit.

Abstract

Many questions that arise with regard to the development of urban areas, require the use of different disciplines. Therefore, the project URBEM (Urban Energy and Mobility System) deals with the holistic view of possible changes in urban areas and their effects. URBEM was founded as doctoral programme at the TU Wien in cooperation with the Wiener Stadtwerken. The aim of the project is the development of an interactive environment to analyse scenarios to a „sustainable, secure supply, affordable and liveable city“ on the Example of the city of Vienna. In order to achieve this goal, it requires the collaboration and interaction of many different scientific fields. The basis for the investigations are three developed URBEM scenarios, which describe the possible future paths of change.

The analysis of the effects on the thermal energy supply by political, social, economic and technological changes is an important part of the investigations. As a result, the present thesis deals with the subject of the thermal networks and the gas networks of urban areas. To be able to give answers in an interdisciplinary context, a separate development of calculation methods for the determination of operating parameters of large meshed networks was realised. Considering a district heating network, the modeling of the thermohydraulic behavior in the case of modified boundary conditions is in focus. Therefore, a quasi-steady state hydraulic calculation is combined with a transient thermal calculation. The application of this methodology has the advantage, that the thermal behavior of a district heating network can be simulated very detailed. The analysis of the gas networks should be done with regard to the hydraulic changes considering the compressibility of gases.

By using the developed calculation methods, the impact due to the changes, resulting from the defined scenarios, on the primary district heating network and the low-pressure gas network of Vienna should be analysed. Subsequently, the influences of a decentralized feed and the use of thermal storages in the district heating network are investigated. Another question relates to the connection possibilities of urban expansion areas. For this purpose, simulations are carried out by vary the connection to the gas network and the district heating network, taking into account the electrical networks.

The comparison between the further developed hydraulic calculation method and the commercial software PSS[®]SINCAL using a test network, shows the numeric advantages of self-development with regard to convergence speed.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen besonderen Dank all jenen entgegen bringen, die mich während der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt und motiviert haben.

Ganz besonders gilt dieser Dank ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Karl Ponweiser für die stets hilfsbereite und wissenschaftliche Betreuung der Dissertation.

Darüber hinaus möchte ich Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Markus Haider danken, der es mir ermöglicht hat, am Institut für Energietechnik und Thermodynamik die vorliegende Arbeit zu schreiben. Aber auch allen anderen Mitarbeitern und ehemaligen Mitarbeitern des Instituts, insbesondere Esmail, Gregor, Johannes, Michael, Stefan, Stylianos, Thomas und Wolfgang, sei für die tolle Atmosphäre und die persönliche Unterstützung gedankt.

Außerordentlichen Dank gebührt den Initiatoren und Verantwortlichen des Projekts URBEM, seitens der TU Wien und der Wiener Stadtwerke. Unter den vielen Beteiligten möchte ich Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar und Dr. Ilse Stockinger erwähnen, ohne deren Engagement und Tatendrang das Projekt nicht zustande gekommen wäre. Für die ausgesprochen gute Zusammenarbeit mit meinen URBEM-KollegInnen Sara Fritz, Julia Forster, Nadine Haufe, Thomas Kaufmann, Peter Eder-Neuhauser, Nikolaus Rab, Johannes M. Schleicher und Manuel Ziegler möchte ich mich ebenfalls bedanken. Auch Dipl.-Ing. Dr.techn. Gudrun Weinwurm gebührt für die Koordinierung und Organisation von URBEM großer Dank. Nicht unerwähnt darf die finanzielle Unterstützung des bmvit - Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie im Rahmen des Projekts SIMULTAN bleiben.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern und meinen Geschwistern, die mir stets den nötigen Rückhalt bei der Verfolgung meiner Ziele gegeben haben.

Zum Schluss möchte ich meiner Freundin Michaela danken, die durch ihre unglaublich hilfreiche Unterstützung und ihr Verständnis einen wesentlichen Anteil an der Fertigstellung dieser Arbeit beigetragen hat. Unserer Tochter Lara gebührt ebenso Dank dafür, dass sie es stets geschafft hat, mich in stressigen Zeiten aufzumuntern.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	vi
1 Einleitung	1
1.1 URBEM	1
1.1.1 Themen	1
1.1.2 Szenarien	4
1.2 Motivation	4
1.3 Schnittstellen	5
1.4 Thermodynamische Begriffe	6
2 Stand der Technik	7
2.1 Grundlagen zu Versorgungsnetzen	7
2.1.1 Fernwärme	7
2.1.2 Gasnetz	9
2.1.3 Grundlagen der Netzrechnung	10
2.2 Berechnungsverfahren für Fernwärmenetze	11
2.2.1 Allgemeines	11
2.2.2 Bestimmende Gleichungen der stationären inkompressiblen Rohrnetzströmung	12
2.2.3 Numerische Lösungsmethoden	18
2.3 Berechnungsverfahren für Gasnetze	24
2.3.1 Stationäre Verfahren	25
2.3.2 Instationäre Verfahren	25
2.4 Berechnungsverfahren zur Beurteilung des thermischen Verhaltens	26
3 Methodik	28
3.1 Berechnung der Betriebsgrößen von Fernwärmenetzen	28
3.1.1 Hydraulische Berechnung	29
3.1.2 Thermische Berechnung	36
3.1.3 Thermohydraulische Berechnung	44
3.2 Berechnung der Betriebsgrößen von Gasnetzen	46
3.3 Datenaufbereitung	51
4 Ergebnisse	54
4.1 Fragestellung	54
4.2 Auswirkungen der Wärmebedarfsentwicklung auf das Betriebsverhalten des FW- und Gasnetzes	55

4.2.1	Fernwärmenetz	56
4.2.2	Gasnetz	63
4.3	Einbindung von dezentralen Einspeisern und Speichern in das FW-Netz	68
4.3.1	Dezentrale Einspeisung	68
4.3.2	Speichereinbindung	71
4.4	Versorgung von Stadterweiterungsgebieten mit Gas und Fernwärme	73
4.4.1	Fernwärme	74
4.4.2	Gas	76
5	Diskussion	78
5.1	Konvergenzverhalten der hydraulischen Berechnungsmethode	78
5.1.1	Einfluss der Variation der Startwerte	79
5.1.2	Einfluss der Variation der Relaxationsfaktoren	80
5.2	Einfluss der Rohrreibungszahl λ	83
5.3	Einfluss der Kompressibilität auf den Druckverlust	86
5.4	Vergleich mit der kommerziellen Software PSS [®] SINCAL	87
5.5	Einfluss der Netzgröße auf die Rechenzeit	89
6	Zusammenfassung und Ausblick	92
	Abbildungsverzeichnis	94
	Tabellenverzeichnis	97
	Literaturverzeichnis	98
A		105
A.1	105
A.2	107

Nomenklatur

Akronyme

BAU	Business-as-usual
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFL	Courant Friedrichs Ludwig
CPU	Central Processing Unit
EE	Erneuerbare Energie
FW	Fernwärme
GIS	Geoinformationssystem
IAPWS	International Association for the Properties of Water and Steam
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IoT	Internet of Things
KG	Kirchhoffsche Gesetz
KLIMA	Klimaschutz
KV	Kontrollvolumen
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LTM	Linear Theory Method
LU	lower upper
ND	Niederdruck
REF	Referenz
SIMPLE	Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations
SIMPLER	Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations Revised
STAG	Stagnation
SVD	Singular Value Decomposition
URBEM	Urbanes Energie- und Mobilitätssystem
WSTW	Wiener Stadtwerke

Griechische Formelzeichen

α_0	allgemeiner Koeffizient einer Polynomsgleichung	-
α_1	allgemeiner Koeffizient einer Polynomsgleichung	-
α_2	allgemeiner Koeffizient einer Polynomsgleichung	-
α_p	Relaxationsfaktor für Drücke	-
α_u	Relaxationsfaktor für Strömungsgeschwindigkeiten	-
Δ	Differenz	-
η	Wirkungsgrad	%
κ	Kompressibilität	1/Pa

λ	Rohrreibungszahl	-
μ	Dynamische Viskosität	kg/ms
ν	Kinematische Viskosität	m ² /s
ϕ	beliebige physikalische Größe	-
ρ	Dichte	kg/m ³
τ	Schubspannung	N/m ²

Lateinische Formelzeichen

A	Strömungsquerschnitt	m ²
A_{rad}	Mantelfläche	m ²
\mathbf{A}	Koeffizientenmatrix der Gradientenmethode	-
\mathbf{a}	Vektor der Strömungsquerschnitte für alle Rohre (FW)	m ²
\mathbf{a}_G	Vektor der Strömungsquerschnitte für alle Rohre (Gas)	m ²
B	<i>Manning</i> Koeffizient	-
\mathbf{b}	allgemeine rechte Seite eines linearen Gleichungssystems	-
C	<i>Hazen-Williams</i> Koeffizient	-
c	Schallgeschwindigkeit	m/s
c_p	isobare spezifische Wärmekapazität	J/kgK
c_w	spezifische Wärmekapazität von Wasser	J/kgK
f	allgemeine Funktion	-
g	Erdbeschleunigung	m/s ²
\mathbf{H}	Lösungsvektor der Gradientenmethode für die Druckhöhe	-
H	Druckhöhe	m
h	spezifische Enthalpie	J/kg
\mathbf{h}_{dif}	Vektor der geodätischen Höhendifferenz der Rohrsträngen	m
\mathbf{h}_{geo}	Vektor der geodätischen Höhen der Knoten	m
\mathbf{h}_{Gdif}	Vektor der geodätischen Höhendifferenz der Rohrsträngen (Gas)	m
\mathbf{I}	Inzidenzmatrix	-
\mathbf{I}_G	Inzidenzmatrix (Gas)	-
\mathbf{I}_{red}	reduzierte Inzidenzmatrix (FW)	-
J	Fluss einer beliebigen Größe durch ein Volumenelement	-
\mathbf{J}	Jacobimatrix	-
k	Widerstandskoeffizient nach <i>Darcy-Weisbach</i> (FW)	s ² /m ⁵
k_G	Widerstandskoeffizient nach <i>Darcy-Weisbach</i> (Gas)	s ² /m ⁵
k_{dif}	Wärmeleitfähigkeit	W/mK
k_{rad}	Wärmedurchgangskoeffizient	W/m ² K
K_v	Durchflusskoeffizient eines Ventils	m ³ /h
L	Länge	m
\mathbf{L}	untere Dreiecksmatrix	-
M	Machzahl	-
\mathbf{M}	Koeffizientenmatrix der Kontinuitätsgleichungen (FW)	-
\mathbf{M}_G	Koeffizientenmatrix der Kontinuitätsgleichungen (Gas)	-
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
\mathbf{N}	Teilmatrix der Koeffizientenmatrix für die Druckverlustgleichungen (FW)	-
\mathbf{N}_G	Teilmatrix der Koeffizientenmatrix für die Druckverlustgleichungen (Gas)	-
n	Exponent der allgemeinen Druckverlustgleichung	-
p	Druck	Pa

\mathbf{p}_r	Vektor der Randbedingungen für die Knotendrucke	Pa
\mathbf{p}_h	Vektor der geodätischen Druckdifferenz der Rohrstränge (FW)	Pa
\mathbf{p}_{Gh}	Vektor der geodätischen Druckdifferenz der Rohrstränge (Gas)	Pa
Q	Volumenstrom	m^3/s
\mathbf{Q}	Lösungsvektor der Gradientenmethode für den Volumenstrom	-
\dot{Q}	Wärmestrom	W
\mathbf{q}	Vektor der Gradientenmethode für Randbedingungen	-
R	spezifische Gaskonstante	J/kgK
r	Radius	m
\mathbf{r}	Vektor der Dichte für alle Rohre (FW)	kg/m^3
\mathbf{r}_G	Vektor der Dichte für alle Rohre (Gas)	kg/m^3
Re	Reynoldszahl	-
S_h	Quellen- oder Senkenterm	$\text{J}/\text{m}^3\text{s}$
\mathbf{s}	Erweiterungsvektor für \mathbf{p}_h	-
T	thermodynamische Temperatur	K
t	Zeit, Zeitpunkt	s
\mathbf{U}	obere Dreiecksmatrix	-
u	Strömungsgeschwindigkeit	m/s
\mathbf{u}_r	Vektor der Randbedingungen für die Strömungsgeschwindigkeit	m/s
V	Volumen	m^3
\dot{V}	Volumenstrom	m^3/s
\mathbf{w}	Koeffizientenmatrix für die Aufstellung der Randbedingungen (FW)	-
\mathbf{w}_G	Koeffizientenmatrix für die Aufstellung der Randbedingungen (Gas)	-
\mathbf{w}_r	Vektor der Randbedingungen (FW)	-
\mathbf{w}_{Gr}	Vektor der Randbedingungen (Gas)	-
x	allgemeine Variable	-
\mathbf{x}	Lösungsvektor für die Strömungsgeschwindigkeit und Knotendrucke (FW)	-
\mathbf{x}_G	Lösungsvektor für die Strömungsgeschwindigkeit und Knotendrucke (Gas)	-
\mathbf{x}_{Gp}	Lösungsvektor für die Knotendrucke (Gas)	Pa
\mathbf{x}_p	Lösungsvektor für die Knotendrucke (FW)	Pa
\mathbf{x}_{Gu}	Lösungsvektor für die Strömungsgeschwindigkeit (Gas)	m/s
\mathbf{x}_u	Lösungsvektor für die Strömungsgeschwindigkeit (FW)	m/s
z	geodätische Höhe	m

Kapitel 1

Einleitung

Wachsende Städte und die damit einhergehende steigende Nachfrage nach Mobilität und Energie, stellen neue Herausforderungen an die Planung urbaner Räume. Die inhaltliche Umsetzung von Klimaverträgen und infolge, eine Entwicklung zu einer nachhaltigen Gesellschaft, verlangen nach neuen Methoden der Entscheidungsfindung. Komplexer werdende Fragestellungen machen den simultanen Einsatz von Ansätzen und Denkweisen verschiedener Disziplinen notwendig. Das Projekt URBEM versucht diesen neuen Anforderungen mit einer gesamtheitlichen Betrachtung und Verschneidung unterschiedlicher Fachgebiete zu begegnen.

1.1 URBEM

URBEM steht für „Urbanes Energie- und Mobilitätssystem“, das von der TU Wien in Kooperation mit den Wiener Stadtwerken als Doktoratskolleg eingerichtet wurde. Ziel des Projekts ist die Erforschung und Entwicklung einer interaktiven Umgebung, die es ermöglicht, Szenarien für eine „nachhaltig versorgungssicheren, leistbaren und lebenswerten Stadt“ am Beispiel der Stadt Wien zu analysieren. Um dieses Ziel zu erreichen, bedarf es neuer Methoden, um mögliche Pfade der Veränderungen zu entwickeln und deren Einflüsse und Auswirkungen auf urbane Gebiete beurteilen zu können. Im Vordergrund steht dabei, dass eine Problemstellung ganzheitlich und durch das gemeinsame Agieren und Kommunizieren zwischen verschiedenen Disziplinen erörtert wird. Zu Beginn des Projekts erfolgte die Erarbeitung und Definition von Pfaden, die sich unter diversen politischen, gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und technologischen Voraussetzungen entwickeln. Aus diesen Pfaden resultierten drei Szenarien, die sich bis in das Jahr 2050 erstrecken und von den Projektbeteiligten aus unterschiedlichen Disziplinen untersucht werden.

1.1.1 Themen

Der inhaltliche Kern von URBEM ist in 10 Themenbereiche aufgeteilt, die in Abb. 1.1 dargestellt sind. Durch die Einbeziehung von möglichst vielen, aber auch für die Fragestellung sinnvollen, Fachbereichen, soll die Interdisziplinarität des Projekts sichergestellt werden.



Abbildung 1.1: Inhaltliche Themenfelder von URBEM

Aus dem Ziel einer ganzheitlichen Analyse urbaner Entwicklungsszenarien und den beteiligten Fachdisziplinen lassen sich folgende Forschungsfragen ableiten:

- **Ökonomie I:**
Unter anderem steht in diesem Themenfeld die Entwicklung des Wärmebedarfs, unter Berücksichtigung der Fernwärme als Wärmebereitstellungstechnologie, im Fokus. Über die Entwicklung des Gebäudebestands hinaus, erfolgen weitere Betrachtungen zu zukünftigen Anschlüssen von Gebäuden an das Fernwärme- oder Gasnetz. Ergänzend dazu, wird der Einsatz dezentraler Photovoltaik und Solarthermie untersucht [37].
- **Ökonomie II:**
Ein anderes ökonomisches Themenfeld beschäftigt sich mit der Modellierung des Wien Energie GmbH - Portfolios. Mit finanzmathematischen Methoden erfolgt die Beurteilung der Rolle der Fernwärme im zukünftigen Wiener Wärmesystem. Weiters wird die optimale Entwicklung und Diversifikation des Fernwärme-Erzeugungsportfolios unter Berücksichtigung unterschiedlicher Szenarien ermittelt und die Entwicklung der Gestehungskosten der Fernwärme untersucht [73].

- **Soziologie:**
Im Rahmen der soziologischen Untersuchungen sollen die Energiekonsum- und Mobilitätsverhaltenstypen in Wien und deren spezifischen Verkehrsmittelnutzungsanteile und Lastprofile aufgezeigt werden. In weiterer Folge stellt sich die Frage der räumlichen Verteilung der Verhaltenstypen. Eine andere Fragestellung befasst sich mit der Veränderung von Verhaltensmuster hin zu mehr Nachhaltigkeit [46].
- **Gebäude:**
Das Themenfeld der Gebäude beschäftigt sich mit der detaillierten Erstellung von Lastprofilen unter der Berücksichtigung des Gebäudetyps. Zusätzlich zu den technischen Einflüssen auf das Lastprofil, erfolgt eine Untersuchung hinsichtlich der Auswirkungen unterschiedlicher Milieus und Szenarien auf die Profile [103].
- **Netze, thermisch/Gas:**
Der Themenbereich der Netze für thermische Energie und Gas wird im Rahmen der gegenständlichen Dissertation behandelt. Eine detailliertere Beschreibung der Inhalte findet sich in Kapitel 1.2.
- **Netze, elektrisch:**
Durch Simulationen des urbanen elektrischen Versorgungsnetzes sollen Auswirkungen eines Ausbaus von Photovoltaikanlagen in Wien auf die Auslastungen der Betriebsmittel aufgezeigt werden. Eine weitere Fragestellung bezieht sich auf das Flexibilisierungspotential durch energieübergreifende Systeme mit einem Ausbau von Speichern und dezentralen Einspeisern. Schlussendlich folgt die Analyse von Netzausbauvarianten für Stadterweiterungsgebiete unter der Berücksichtigung aller Energienetze (Gas, Strom, Fernwärme) [54].
- **Netze, IKT:**
Der Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologie befasst sich mit Topologien in Bezug ihrer Sicherheit durch Architektur. In weiterer Folge wird die Ausbreitung von Schadsoftware in einem Smart Grid und die Erhöhung der Resilienz untersucht [30].
- **Mobilität:**
Im Rahmen des Mobilitätsthemas erfolgt die Analyse der Entwicklung des Modal Split und des Endenergieverbrauchs bis 2050 unter Berücksichtigung der zuvor beschriebenen Szenarien. Der Einfluss verschiedener Politikmaßnahmen auf die Entwicklung der Elektromobilität und die Differenziertheit des Mobilitätsverhalten nach sozialen Gruppen stellen weitere erforschte Teilbereiche dar.
- **Verteiltes Rechnen:**
Die Fragestellungen des Verteilten Rechnens beziehen sich auf IKT-Anforderungen im Bereich der Infrastrukturen in Smart Cities. Daraus ergeben sich weitere Fragen, wie man mit den enormen Dimensionen und Datenmengen, aufgrund von IoT (Internet of Things) im Bereich Smart Cities umgeht [78].
- **Visualisierung:**
Die Visualisierung beschäftigt sich mit dem Innenentwicklungspotential der Stadt Wien. Der Mehrwert der Visualisierung für die Mobilitäts- und Energieplanung im urbanen Bereich soll ebenfalls untersucht werden [36].

1.1.2 Szenarien

Aufgrund der möglichen Entwicklung des Wiener Energie- und Mobilitätssystems durch den Einfluss exogener Faktoren, wie Energiepreise oder EU-Klimaschutzpolitik, wurden die folgenden Szenarien definiert, die unterschiedliche Ausprägungen der Faktoren berücksichtigen.

Business-as-usual-Szenario (BAU)

Das business-as-usual Szenario stellt das Referenz-Szenario dar. Es geht von einer Fortsetzung der bestehenden Entwicklungen in der Klimaschutzpolitik aus. Mit noch begrenzten staatlichen Anreizen ist der Energie- und Mobilitätssektor von marktwirtschaftlichen Impulsen getrieben.

Stagnations-Szenario (STAG)

Bei dem Stagnations-Szenario geht man von einer stagnierenden Weltwirtschaft aus, die Klimaschutzmaßnahmen nur mehr begrenzt ermöglichen. Hohe Primärenergiepreise, höhere Arbeitslosigkeit und sinkende Löhne fördern die Energiearmut gewisser Bevölkerungsteile.

Klimaschutz-Szenario (KLIMA)

Der Klimaschutz wird weltweit und insbesondere in der EU mit hohen Ambitionen verfolgt. Die damit verbundenen Investitionen in den Energiesektor führen zu allgemeinen großen Impulsen für die Wirtschaft und zu einer rasanten Entwicklung neuer Technologien.

Weitere Details und Informationen zu den entwickelten Szenarien können in Anhang [A.1](#) nachgelesen werden.

1.2 Motivation

Die bisherigen Ausführungen zu URBEM zeigen die Komplexität und die Vielfalt an beteiligten Disziplinen. Die Anforderungen an die thermische und elektrische Energieversorgung von urbanen Gebieten verändern sich mit der gesellschaftlichen Entwicklung der Bevölkerung, dem technologischen Fortschritt der Energiebereitstellung und durch viele weitere Faktoren.

Die vorliegende Arbeit behandelt den Themenbereich der Netze für thermische Energie und Gas. Das übergeordnete Ziel ist es, ein Simulationsprogramm für die strömungstechnische Abbildung des primären Fernwärmenetzes und des Gasnetzes der Wiener Netze GmbH zu entwickeln. Dadurch sollen die Auswirkungen der definierten Szenarien auf das Betriebsverhalten der Netze technisch analysiert werden. Bei der Entwicklung des Berechnungsprogramms wurde der Fokus auf die Möglichkeit, das thermohydraulische Verhalten eines Fernwärmesystems und das hydraulische Verhalten von weit verzweigten, vermaschten Niederdrucknetzen für Gas detailliert abzubilden, gelegt. Durch die Entwicklung des Wärmebedarfs von Gebäuden im urbanen Gebiet, kommt es zu Lastverschiebungen in den Energieversorgungsnetzen. Der Einfluss dieser Entwicklungen auf die Betriebskenngrößen des Fernwärme- und Gasnetzes stellen eine zentrale Fragestellung in dieser Arbeit dar. Im Rahmen der Fernwärmesimulationen sollen auch die Einbindung von Speichern und dezentralen thermischen Einspeisern für die mögliche Integration von erneuerbaren Energien, wie sie in [71] beschrieben wird, untersucht werden. Schon jetzt spielt die Anbindung von Stadterweiterungsgebieten an die Versorgungsnetze eine

wichtige Rolle. Um auch zukünftige Entwicklungen bei der Planung von Stadterweiterungsgebieten berücksichtigen zu können, erfolgen Simulationen mit unterschiedlichen Anbindungsvariationen an das Fernwärme- und Gasnetz.

Die Umsetzung der Simulation sollte auf einem Verfahren beruhen, dass stabil ist, schnelle Konvergenz ermöglicht und flexibel in der Erweiterbarkeit ist. Daher wurde die Eigenentwicklung eines inkompressiblen thermohydraulischen Berechnungsverfahrens für die Simulation von Fernwärmenetzen und eines isothermen kompressiblen Verfahrens für die Berechnung von Gasnetzen gewählt.

1.3 Schnittstellen

Durch die breite Abdeckung von Fachbereichen, die in URBEM involviert sind, treten Verknüpfungspunkte und Schnittstellen zwischen den Themenfeldern auf. In Abb. 1.2 sind diese schematisch dargestellt. Die zentrale Schnittstelle für die Behandlung der Netze für thermische Energie und Gas ist jene zum URBEM-Server. Dieser verwaltet nicht nur die URBEM-Daten, sondern regelt das Zuordnen von den Ergebnissen zwischen den Fachbereichen (Domänenexperten). Die Simulationen des Fernwärme- und Gasnetzes benötigen für jedes Szenario und jeden Simulationszeitraum entsprechende Randbedingungen. Für die Bereitstellung der Randbedingungen erfolgen zunächst Berechnungen des Themenfeldes Ökonomie I. Deren Ergebnisse beinhalten unter anderem eine Prognose der zukünftigen Wärmelastverteilung von Wien für die verschiedenen Szenarien. Da die Ergebnisse räumlich verortet sind, können diese den Abnehmerknoten im Fernwärme- und Gasnetz als Randbedingungen zugeordnet werden.

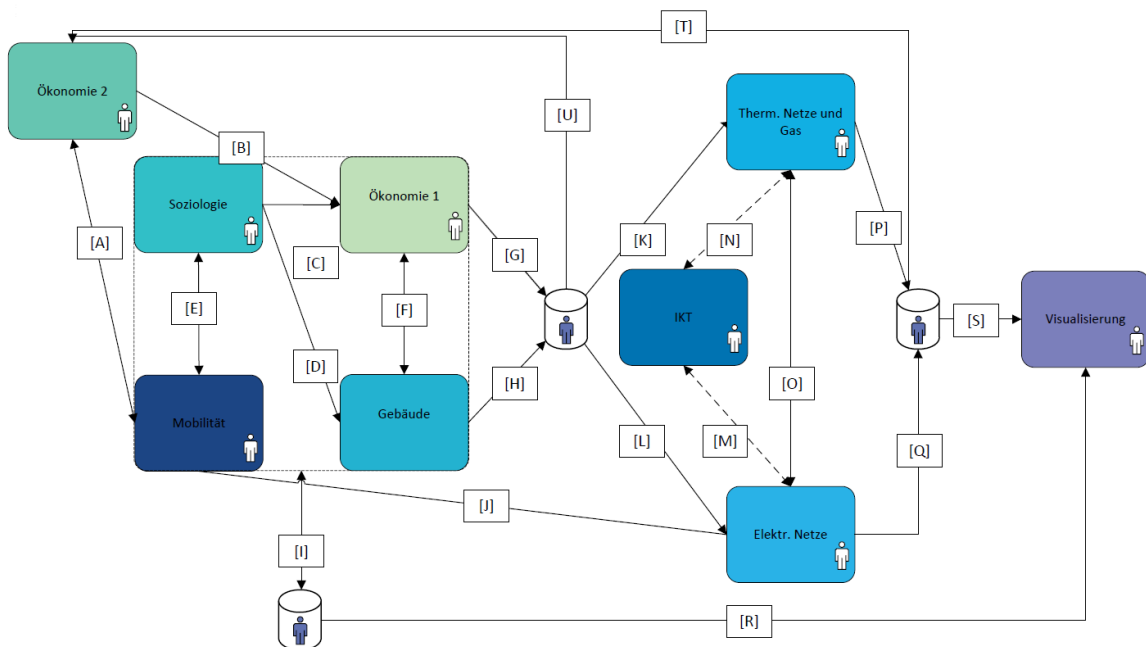


Abbildung 1.2: Schnittstellen zwischen den Themenfeldern von URBEM

Die Ergebnisse der thermohydraulischen und hydraulischen Simulationen werden anschließend zum URBEM-Server übertragen. Die in Abb. 1.2 gestrichelte Verbindungslinie zum Thema IKT ist als optionale Schnittstelle eingeplant, die derzeit nicht umgesetzt ist. Im Rahmen der Untersuchung einer Anbindung von Stadterweiterungsgebieten an das urbane Energieversorgungsnetz, findet eine gemeinsame Betrachtung der Energieträger Strom, Fernwärme und Gas statt.

1.4 Thermodynamische Begriffe

In vielen technischen Fachbereichen werden oft Begriffe der Thermodynamik verwendet, die mit der physikalischen Definition nicht übereinstimmen. Besonders im Bereich der technischen Anwendungen, wie der Fernwärmetechnik, haben sich die umgangssprachlichen Bezeichnungen thermodynamischer Prozesse weitläufig etabliert. Daher werden nachfolgend häufig verwendete Begriffe thermodynamisch beschrieben:

- *Wärme* ist eine Energietransportform, die an der Grenze von Systemen während einer Zustandsänderung auftritt. Dabei erhöht sich die Energie des einen Systems um den Betrag, um den das andere System abnimmt. Folglich ist die Wärme eine Prozessgröße und keine Zustandsgröße. Damit überhaupt Wärme über die Systemgrenze treten kann, bedarf es einer Temperaturdifferenz zwischen den Systemen. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik fordert, dass Wärme ohne weiteres Zutun nur von einem Medium höherer Temperatur auf ein Medium niedrigerer Temperatur übergehen kann. Zwischen zwei Systemen gleicher Temperatur kann somit keine Wärmeübertragung stattfinden. Wärme tritt nur an der Systemgrenze auf und existiert daher im Inneren eines Systems nicht. Die als Wärme aufgenommene Energie, führt zu einer Erhöhung der inneren Energie.
- Die *Wärmeübertragung* ist ein Prozess, der nur zustande kommt, wenn zwei oder mehr in Kontakt stehende Systeme, unterschiedliche Temperaturen aufweisen. Es gibt drei grundlegende Arten der Wärmeübertragung. Die Wärmeleitung transportiert die Energie in Form von Wärme auf molekularer Ebene. Bei der konvektiven Wärmeübertragung, die zwischen Festkörpern und Fluiden auftritt, erfolgt der Transport der übertragenen Energie in einer freien oder erzwungenen Fluidströmung. Die dritte Art der Wärmeübertragung ist die Wärmestrahlung. Diese basiert auf der elektromagnetischen Strahlung die jeder Körper, abhängig von dessen Temperatur, aussendet.
- Unter der *inneren Energie der Materie* versteht man die Summe aus thermischer, chemischer und nuklearer inneren Energie. Viele thermodynamische Prozesse berücksichtigen ausschließlich die Änderung der thermischen *inneren Energie*. Diese Zustandsgröße umfasst die kinetische und potentielle Energie der molekularen Bewegung und ändert sich mit der Temperatur und der Dichte eines Systems.

Der Begriff des Wärmetransports, im Sinne eines Transports der inneren Energie, in einem Fernwärmesystem sollte somit vermieden werden. Ein Wärmetransport oder eine Wärmeübertragung kann nur infolge einer Temperaturdifferenz auftreten. Die Prozessgröße Wärme existiert daher nur an den Systemgrenzen, die im Fall eines Fernwärmenetzwerkes sinnvollerweise bei den Wärmetauschern der Wärmeerzeuger und der Wärmenutzer gesetzt werden.

Kapitel 2

Stand der Technik

Dieses Kapitel soll einen Überblick der grundlegenden Verfahren zur Berechnung von hydraulischen und thermischen Betriebskennwerten von urbanen Versorgungsnetzen für thermische Energie und Gas geben.

2.1 Grundlagen zu Versorgungsnetzen

2.1.1 Fernwärme

Das Charakteristikum eines klassischen Fernwärmesystems ist die örtliche Trennung der Wärmeerzeugung und der Wärmebereitstellung. Der Transport, der im Wärmeerzeuger auf den Wärmeträger übertragenen Wärme, erfolgt in der Form als innere Energie über ein Rohrnetzwerk, das entweder mit Wasserdampf oder heute üblich mit Heißwasser betrieben wird. In der Regel bestehen Fernwärmenetze aus einer Vorlauf- und einer Rücklaufleitung. Die Vorlaufleitung fördert das, meist unter Druck stehende, heiße Wärmeträgerfluid von den Erzeugern zu den Übergabestationen der Kunden. Nachdem in der Übergabestation Wärme an den Kundenkreislauf übertragen wurde, fließt das abgekühlte Wärmeträgerfluid über die Rücklaufleitungen zurück zum Erzeuger. Grundsätzlich werden bei der Struktur von Fernwärmesystemen drei verschiedene Netztopologien unterschieden (siehe Abb. 2.1 (a)-(c)).

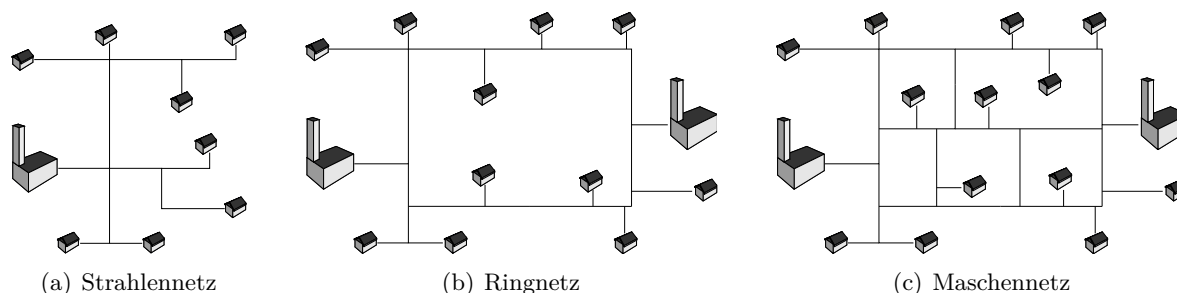


Abbildung 2.1: Netztopologien von Fernwärmenetzen

Für kleine Nah- oder Fernwärmenetze eignen sich strahlenförmige Strukturen, da diese die geringste Rohrleitungslänge aufweisen. Mittlere und größere Fernwärmesysteme werden meist als Ringnetze oder Maschennetze geplant und gebaut. Ringnetze haben den Vorteil, dass zusätzliche Erzeuger und Verbraucher leichter eingebunden werden können. Die größte

Versorgungssicherheit und Flexibilität bei der erzeuger- und verbraucherseitigen Erweiterbarkeit bieten vermaschte Netze. Jedoch sind die Investitionskosten für Fernwärmesysteme in Ring- und Maschenform wesentlich höher als für strahlenförmige Systeme.

Große vermaschte Netze und Ringnetze sind meistens in ein Primär- und Sekundärnetz unterteilt, die hydraulisch voneinander getrennt sind. Der primäre Teil übernimmt den Transport der thermischen inneren Energie vom Erzeuger zu den Übergabestationen, die das Primär- und das Sekundärnetz thermisch verbindet. Das Sekundärnetz übernimmt die Verteilung der thermischen Energie zu den Nutzern.

Grundsätzlich gibt es drei verschiedene Fahrweisen um die Vorlauftemperatur des Primärnetzes vorzugeben. In Abb. 2.2 sind die konstante, konstant-gleitende und die gleitende Fahrweise dargestellt. Die gleitende Vorgabe der Vorlauftemperatur ändert sich über den gesamten Betriebsbereich linear zur Umgebungstemperatur. Daraus folgt, dass die thermische Leistungsregelung vorwiegend über die Regelung der Vorlauftemperatur stattfindet und dadurch die hydraulischen Kennwerte des Betriebs annähernd konstant bleiben. Diese Fahrweise eignet sich nur für Systeme, die kein Warmwasser bereitstellen. Eine konstante Vorlauftemperatur, unabhängig von der Umgebungstemperatur, kann bei der Versorgung von Industrieverbrauchern sinnvoll sein, wenn die thermischen Lasten keinen großen Schwankungen unterworfen sind.

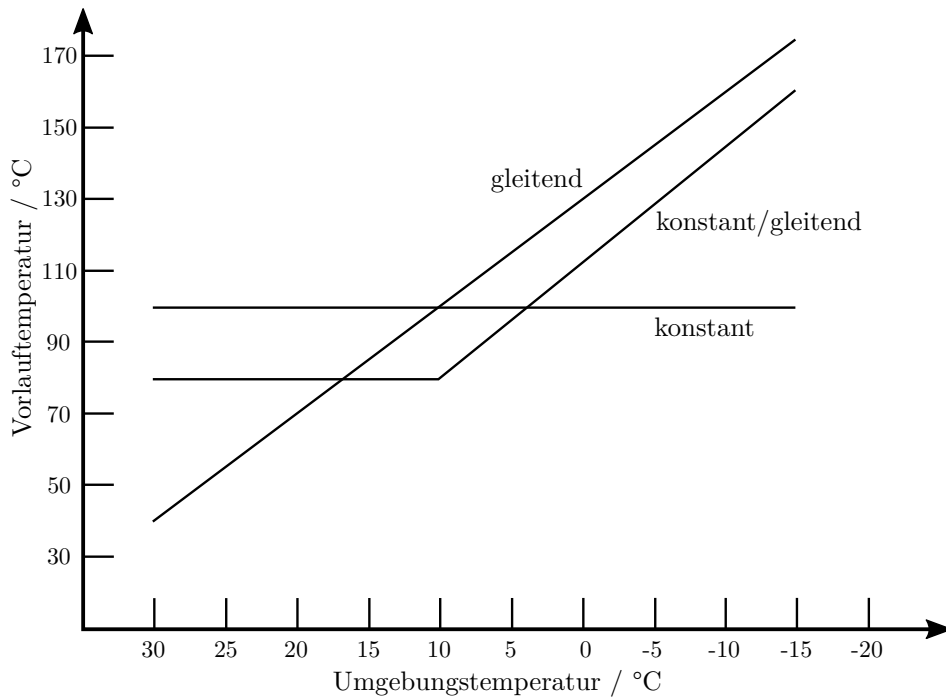


Abbildung 2.2: Fahrweisen der Vorlauftemperatur im primären Fernwärmenetz

Bei der Versorgung von Wohngebäuden mit Bedarf an Raumwärme und Warmwasser, kommt vorrangig die konstant-gleitende Fahrweise zum Einsatz, die unabhängig von den Umgebungstemperaturen die Bereitstellung von Warmwasser ermöglicht.

2.1.2 Gasnetz

Die Gasversorgungsinfrastruktur besteht grundlegend aus Transportleitungen, Verdichterstationen, Gasverteilnetz und Gasdruckregelstationen. Transportleitungen werden benötigt, um das aufbereitete Gas von den Gaslagerstätten über weite Strecken in das Zielland zu befördern. In Abb. 2.3 sind die, beim Transport und bei der Verteilung von Erdgas vorkommenden Leitungsebenen und Richtwerte der zugehörigen Leitungsdrücke dargestellt.

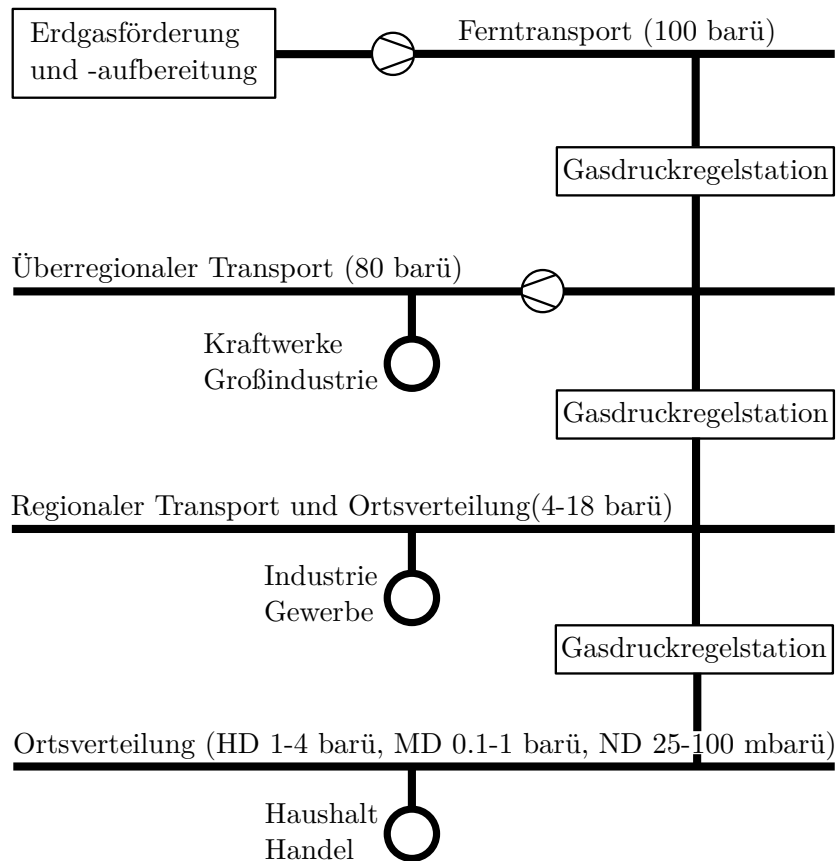


Abbildung 2.3: Darstellung der verschiedenen Leitungsebenen des Gastransports und der Gasverteilung (in Anlehnung an [56])

Da die Rohrdimensionen solcher Transportleitungen aus Kostengründen möglichst klein gewählt werden, muss der Druck des zu befördernden Gases erhöht werden, um die geforderte Menge transportieren zu können. Dadurch erreichen die Drücke in erdverlegten Fernleitungen bis zu 100 bar [56]. Über Regelstationen werden Gasverteilnetze, die aus mehreren Druckebenen aufgebaut sein können, versorgt. Je nach Größe des Gasabnehmers werden diese aus dem Hochdruck-, Mitteldruck- oder Niederdrucknetz gespeist. Industrielle und gewerbliche Kunden sind oft mit dem Hoch- und Mitteldrucknetz verbunden, Haushaltskunden mit dem Niederdrucknetz.

2.1.3 Grundlagen der Netzrechnung

Netztopologie

Zur Vereinfachung von realen, komplexen Netzen wird meist ein Ersatznetz, das aus Knoten und Strängen aufgebaut ist, abgeleitet (siehe Abb. 2.4). Die Knoten stellen Verzweigungen oder generell Verbindungspunkte und Stränge Netzelemente wie Rohre, Pumpen oder Ventile dar. Durch diese Vereinfachung ist eine effizientere und programmierfreundlichere Abspeicherung der Netztopologien in der Form von Adjazenz- oder Inzidenzmatrizen möglich.

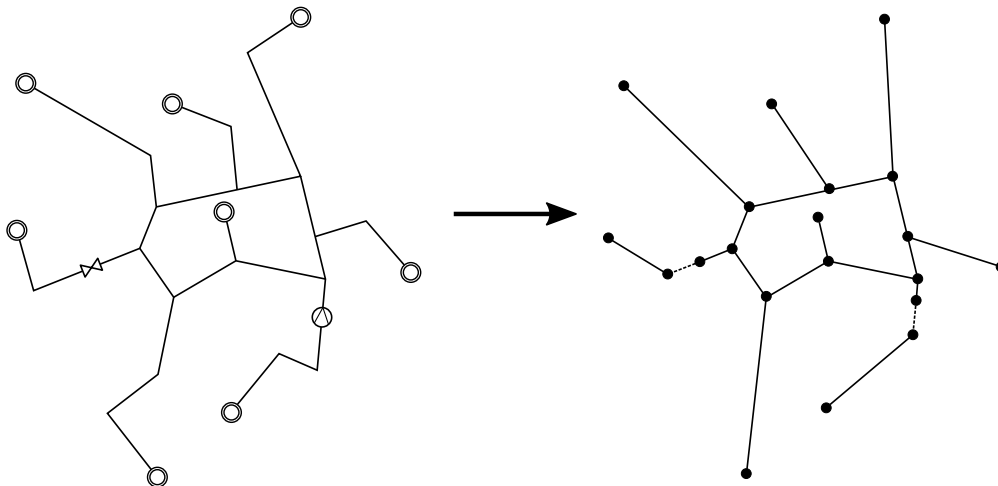


Abbildung 2.4: Ableiten eines Knoten-Strang-Netzwerkes

Bei den folgenden Ausführungen basiert die Betrachtung von Strömungsnetzwerken immer auf das abgeleitete Knoten-Strang-Netz.

Kommerzielle Programme

Zur computerunterstützten Auslegung und Analyse von Strömungsnetzwerken werden bereits etliche kommerzielle Softwarepakete eingesetzt. Die Tab. 2.1 gibt einen Überblick einiger bekannter Programme und deren Fähigkeiten.

Tabelle 2.1: Kommerziell verfügbare Softwarepakete

Software	Abwasser	Fernwärme	Gas	hydraulisch	thermisch
PSS [®] SINCAL	✓	✓	✓	✓	(✓)
STANET [®]	✓	✓	✓	✓	(✓)
Simplex	-	✓	-	✓	✓
Bentley [®] sisHYD	✓	✓	✓	✓	✓
EPANET	✓	-	-	✓	-
TERMIS	-	✓	-	✓	✓
SIR-3S	✓	✓	✓	✓	(✓)

2.2 Berechnungsverfahren für Fernwärmenetze

2.2.1 Allgemeines

Die simulationstechnische Untersuchung von Rohrnetzwerken ist vor allem im Bereich der Analyse und Planung der thermischen Energieversorgung ein unerlässliches Themenfeld. Unter einer hydraulischen Analyse versteht man die Berechnung der strömungstechnisch relevanten Größen eines Netzes für verschiedene Lastfälle. Zu diesen Größen zählen primär die Drücke und Strömungsgeschwindigkeiten des Wärmeträgerfluids. Um den Betriebszustand eines Netzes beurteilen zu können, werden Grenzwerte der Betriebsgrößen definiert und mit den berechneten Ergebnissen verglichen. Bei der thermischen Versorgung mit Fernwärme stellt der Differenzdruck zwischen Vor- und Rücklauf bei den Umformerstationen die dominierende Betriebsgröße dar. Ein zu geringer Differenzdruck an der Übergabestation führt dazu, dass die Versorgung der angeschlossenen Verbraucher nicht gewährleistet werden kann. Daher erfolgt üblicherweise die Druckregelung in einem Fernwärmenetz über den Schlechtpunkt¹. In einem Strahlennetz weist der Schlechtpunkt meist den größten Abstand zum Einspeiser auf (siehe Abb. 2.5). Dieser ist grundsätzlich nicht vom Lastfall abhängig, da die Strömungsverhältnisse im Rohrnetzwerk, bei der üblichen konstant/gleitenden Fahrweise, annähernd gleich bleiben. Im Gegensatz zum Strahlennetz, verschiebt sich der Schlechtpunkt in einem vermaschten Fernwärmenetz in Abhängigkeit der Lastverteilung.

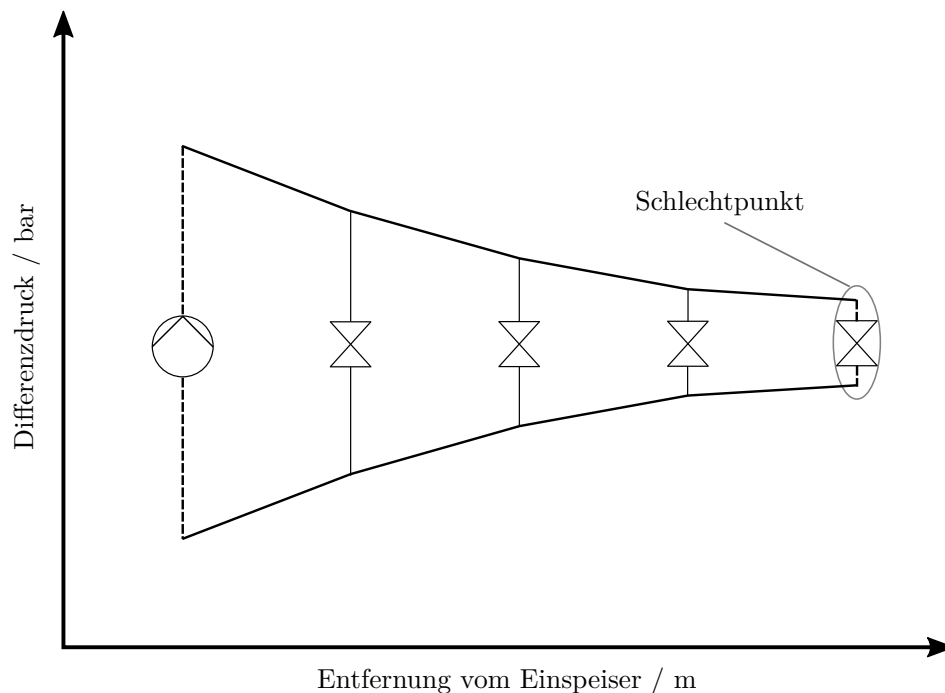


Abbildung 2.5: Differenzdruckverlauf zwischen Vor- und Rücklauf in Abhängigkeit der Entfernung vom Einspeiser

Neben dem Differenzdruck müssen auch der maximale und minimale zulässige Betriebsdruck berücksichtigt werden. Der minimale Betriebsdruck im Vorlauf ist abhängig von der maximalen

¹ Der Schlechtpunkt eines hydraulischen Netzwerkes ist der Knotenpunkt mit der geringsten Druckdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf.

Wassertemperatur, dem geodätischen Profil des Netzes und den zu erwartenden Druckverlusten zu definieren. Mit der Wahl des minimalen Betriebsdrucks soll das Ausdampfen des Wassers, aufgrund der Unterschreitung des Satttdampfdrucks verhindert werden. Entsprechende Auslegungsregeln sind in [81] angeführt.

Hohe Strömungsgeschwindigkeiten verursachen große Druckabfälle, die sich auf die gesamte Druckverteilung in einem vermaschten Rohrnetzwerk auswirkt. Daher hat die Wahl der Rohrdimension bei der Auslegung des Netzes einen entscheidenden Einfluss auf die Betriebscharakteristik. In [99] werden diese Zusammenhänge bei der Wahl des Rohrdurchmessers berücksichtigt. Bei der Auslegung der Rohrdimensionen werden in der Literatur spezifische Druckverluste¹ von 80-150 Pa/m [79] und 150-200 Pa/m [90] für einen ökonomischen sinnvollen Betrieb des Fernwärmenetzes angegeben. Steigt der spezifische Druckverlust an, führt das zu einem erhöhten Pumpenenergiebedarf.

2.2.2 Bestimmende Gleichungen der stationären inkompressiblen Rohrnetzströmung

Um die dominierenden Größen bei der Bestimmung des Druckverlaufes einer allgemeinen Rohrströmung aufzuzeigen, folgt zunächst die Beschreibung des Druckverlusts, der aufgrund von Reibungsprozessen auftritt.

Der reibungsinduzierte Druckverlust

Da die Rohrreibung einen wesentlichen Einfluss auf das hydraulische Verhalten eines Strömungsnetzwerkes hat, wird diese nachfolgend näher erläutert. Eine wichtige Größe im Gebiet der Rohrströmungen ist der Druck. Häufig ist wegen der guten Anschaulichkeit, die vom Druck abgeleitete Größe, Druckhöhe in Verwendung. Die Umrechnung des Drucks in eine Druckhöhe erfolgt nach Gleichung 2.1. Analog zur Druckhöhe wurde früher oft der Begriff Meter Wassersäule verwendet.

$$H = \frac{p}{\rho g} \quad (2.1)$$

Ebenso kann der Druckverlust einer Rohrleitung als Druckhöhenverlust angegeben werden. Der Druckhöhenverlust in einem Rohr, beginnend in Knoten 1 und endend in Knoten 2, kann allgemein durch die Gleichung 2.2 ausgedrückt werden. Für die Berechnung von Druckverlusten in Rohren werden vorwiegend die Gleichungen nach *Darcy-Weisbach* und *Hazen-Williams*, seltener die Gleichung nach *Manning* angewandt. Je nach gewählter Näherungsgleichung für den Druckverlust, variieren der Widerstandskoeffizient k und der Exponent n (siehe Tab. 2.2).

$$H_{12} = k Q^n \quad (2.2)$$

¹ Der spezifische Druckverlust gibt den Druckverlust über einen Meter Trassenlänge an.

Tabelle 2.2: Näherungsgleichungen zur Berechnung von Druckverlusten in Rohren

	Widerstandskoeffizient k	Exponent n
<i>Darcy-Weisbach</i>	$\frac{\lambda 8 L}{g d^5 \pi^2}$	2
<i>Hazen-Williams</i> ¹	$\frac{L 7.88}{C^{1.85} d^{4.87} 0.85^{1.85}}$	1.85
<i>Manning</i> ²	$\frac{10.29 L B^2}{d^{5.33}}$	2

Für die hydraulische Modellentwicklung wurde die Gleichung nach *Darcy-Weisbach* gewählt. Die Formulierung des reibungsinduzierten Druckverlustes in einem Rohr nach *Darcy-Weisbach* erfolgte empirisch. Aus Versuchen an einem durchströmten Kreisrohr konnte der Einfluss der Rohrgeometrie und der Strömungsgeschwindigkeit abgeschätzt werden. Die Druckverlusthöhe ändert sich proportional zu der Länge des Rohres, dem reziproken Wert des Durchmessers und der Strömungsgeschwindigkeit zum Quadrat (Gleichungen 2.3). Aus diesen Beobachtungen wurde die Gleichung für die Druckverlusthöhe abgeleitet.

$$\begin{aligned}
 H_v &\sim L \\
 H_v &\sim \frac{1}{d} \\
 H_v &\sim u^2
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

Die Gleichung nach *Darcy-Weisbach* lässt sich aber auch aus dem Gesetz von *Hagen-Poiseuille* für laminare Strömungen ableiten (Gleichung 2.4).

$$Q = \frac{\Delta p \pi r^4}{L 8 \mu} \tag{2.4}$$

$$u = \frac{Q}{A} \tag{2.5}$$

Setzt man Gleichung 2.5 in Gleichung 2.4 ein und stellt das Resultat nach Δp um, erhält man Gleichung 2.6.

$$\Delta p = \frac{8 \mu L u}{r^2} \tag{2.6}$$

Durch weitere Umformungen und Erweiterungen folgt Gleichung 2.7 und anschließend 2.8.

$$\Delta p = \frac{64 L \rho u^2}{\frac{u d}{\nu} 2 d} \tag{2.7}$$

¹ Der Hazen-Williams Koeffizient C ist vom verwendeten Rohrwerkstoff abhängig

² Der Manning Koeffizient B ist vom verwendeten Rohrwerkstoff abhängig

$$\Delta p = \frac{64}{Re} \frac{L}{d} \frac{\rho}{2} u^2 \quad (2.8)$$

Mit der Umrechnung des Druckverlustes in eine Druckverlusthöhe und dem Einsetzen der Rohrreibungszahl für laminare Strömungen $\lambda = 64/Re$, erhält man die Beziehung für die Druckverlusthöhe über eine gerade Rohrleitung nach *Darcy-Weisbach* (Gleichung 2.9).

$$H_{12} = \lambda \frac{L}{2dg} u^2 \quad (2.9)$$

Mit der reibungsinduzierten Druckverlusthöhe lässt sich die erweiterte *Bernoulli*-Höhengleichung 2.10 darstellen. Abb. 2.6 zeigt die Änderungen der potentiellen und der kinetischen Druckhöhe einer Rohrströmung anhand des Modells einer Stromröhre. Eine Stromröhre besteht aus mehreren Stromlinien, die von einer geschlossenen Kurve umschlungen ist. Innerhalb der Stromröhre befinden sich die Stromfäden, deren Druck und Geschwindigkeit über den Querschnitt als konstant angenommen werden können.

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + H_{12} \quad (2.10)$$

Weitere und vertiefende Mechanismen der Rohrströmung können in dem allgemeinen Werk der technischen Strömungslehre [16] und dem Skript zu Hydraulik in Rohrssystemen [59] nachgelesen werden.

Methoden zur Aufstellung der Gleichungssysteme

Die bisher entwickelten Methoden zur hydraulischen Berechnung von Rohrnetzen basieren grundsätzlich auf der Aufstellung und Lösung von Grundgleichungen der Netzwerkströmung:

- Knotengleichungen
- Maschengleichungen
- Rohrgleichungen

Aufbauend auf diesen Gleichungen, oder einer Kombination dieser Gleichungen, stehen verschiedene Methoden für die mathematische Beschreibung der Strömung in Rohrnetzwerken zur Auswahl (Tab. 2.3). Diese unterscheiden sich grundlegend durch die unbekanntenen Variablen, nach denen das Gleichungssystem gelöst werden muss.

Tabelle 2.3: Ansätze für die Aufstellung der Systemgleichungen

	Unbekannte des Gleichungssystems
Q-Methode	Volumenströme in den Rohren (Q)
H-Methode	Druckhöhe in den Knoten (H)
ΔQ -Methode	Korrekturvolumenströme in den Rohren (ΔQ)
ΔH -Methode	Korrekturdruckhöhe in den Knoten (ΔH)
QH-Methode	Volumenströme in den Rohren und Druckhöhen in den Knoten (QH)

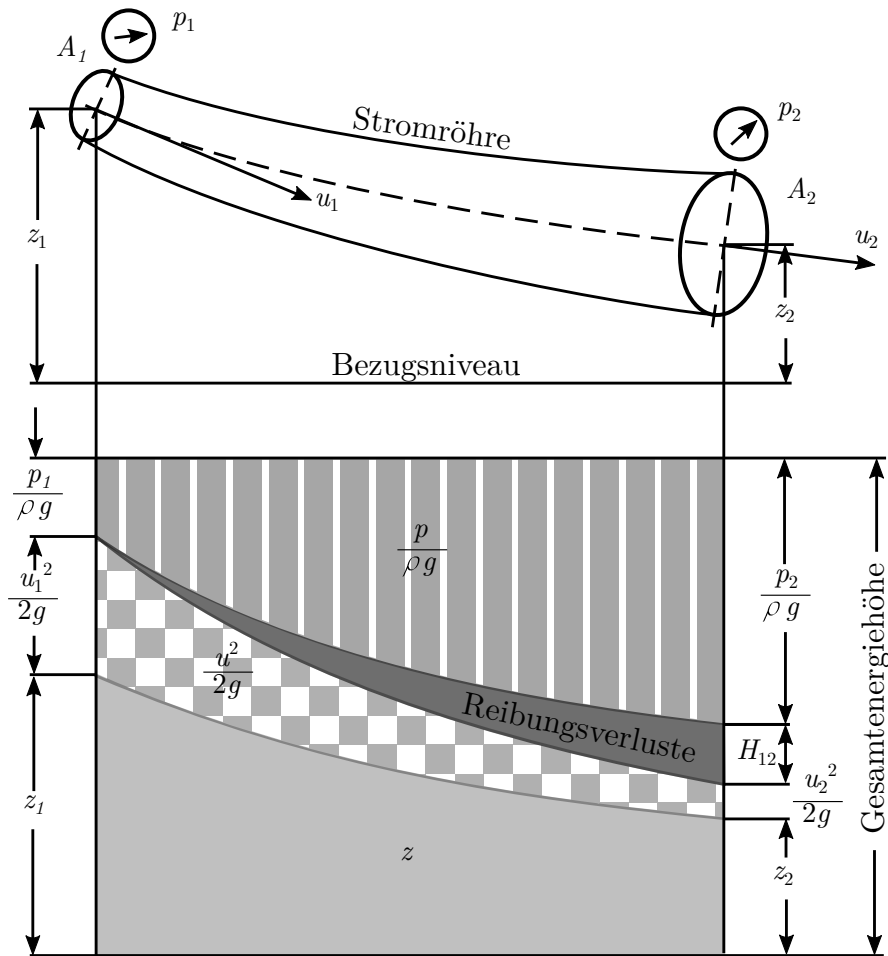


Abbildung 2.6: Grafische Darstellung der erweiterten Bernoulli Gleichung

Jede dieser Methoden führt zu einem nichtlinearen Gleichungssystem. Für die Lösung dieser Gleichungssysteme stehen eine Reihe an mathematischen Verfahren zur Verfügung, die in Kapitel 2.2.3 beschrieben werden.

Q-Methode

Bei der Anwendung der Q-Methode ist es das Ziel, ein Gleichungssystem von einem gegebenen Rohrnetzwerk abzuleiten, dessen unbekannte Variablen die Volumenströme (2.11) in den Rohren sind.

$$Q = \dot{V} = \frac{dV}{dt} \tag{2.11}$$

Unter der Annahme einer konstanten Dichte des strömenden Fluids und einer initialen Festlegung der Strömungsrichtung, können die hydraulischen Eigenschaften des in Abb. 2.7 gezeigten Rohrnetzes mit den Gleichungen 2.12 und 2.13 beschrieben werden. Wobei zu beachten ist, dass der eintretende Volumenstrom Q_{ein1} gleich der Summe der austretenden

Volumenströme $Q_{aus1} + Q_{aus2}$ sein muss. Der Widerstandsfaktor k und der Exponent n in den Maschengleichungen ist aus den in Tab 2.2 angeführten Näherungen entsprechend zu wählen. Anschließend müssen noch die positive und negative Maschenaufrichtung und die Vorzeichenregelung der Knotenbilanz festgelegt werden. Die Gleichungen 2.12 bilden die Knotenregel ab, welche besagt, dass die Menge der eintretenden Ströme gleich der Menge der austretenden Ströme sein muss. Die Anwendung der Maschenregel auf das Rohrnetz, führt zur Gleichsetzung der summierten und vorzeichenbehafteten Druckhöhenverluste mit Null, da sich in einer Masche Potentiale aufheben müssen.

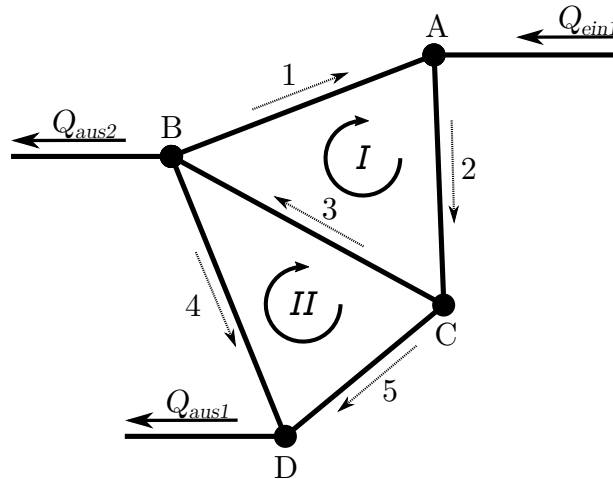


Abbildung 2.7: Beispiel für ein vermaschtes Rohrnetzwerk, bestehend aus 5 Rohren, 4 Knoten, einer Quelle und zwei Senken

$$\left. \begin{aligned} Q_1 - Q_2 + Q_{ein1} &= 0 \\ -Q_1 + Q_3 - Q_{aus2} &= 0 \\ Q_4 + Q_5 - Q_{aus1} &= 0 \end{aligned} \right\} \text{Knoten A, B, D} \quad (2.12)$$

$$\left. \begin{aligned} k_1 Q_1^n + k_2 Q_2^n + k_3 Q_3^n &= 0 \\ -k_3 Q_3^n - k_4 Q_4^n + k_5 Q_5^n &= 0 \end{aligned} \right\} \text{Maschen I, II} \quad (2.13)$$

Das aus 5 Gleichungen und 5 Unbekannten bestehende Gleichungssystem kann in weiterer Folge gelöst werden.

H-Methode

Die H -Methode verfolgt den Ansatz, ausschließlich Knotengleichungen des betreffenden Netzes aufzustellen und anschließend die ein- und ausgehenden Volumenströme der Knoten durch Ausdrücke der entsprechenden Druckverlustgleichungen 2.14 zu substituieren. Durch diese Umformungen treten die Druckhöhen H als unbekannte Variablen auf. Auf das bereits eingeführte Beispiel (Abb. 2.7) angewendet, liefert die H -Methode die Gleichungen 2.15.

$$Q_{12} = \left(\frac{H_{12}}{k} \right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{H_1 - H_2}{K_l} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2.14)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_1 - Q_2 + Q_{ein1} &= 0 \\ -Q_1 + Q_3 - Q_4 - Q_{aus2} &= 0 \\ Q_2 - Q_3 - Q_5 &= 0 \\ Q_4 + Q_5 - Q_{aus1} &= 0 \end{aligned} \right\} \text{Knoten A, B, C, D} \quad (2.15)$$

Setzt man die umgeformte allgemeine Druckverlustgleichung 2.14 in die Gleichungen 2.15 ein, folgt ein Gleichungssystem 2.16 mit 4 Gleichungen und 4 Unbekannten. Mit den aus dem Gleichungssystem resultierenden Druckhöhen und der Gleichung 2.14, können die gesuchten Volumenströme berechnet werden.

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{H_B - H_A}{k_1} \right)^{\frac{1}{n}} - \left(\frac{H_A - H_C}{k_2} \right)^{\frac{1}{n}} + Q_{ein1} &= 0 \\ - \left(\frac{H_B - H_A}{k_1} \right)^{\frac{1}{n}} + \left(\frac{H_C - H_B}{k_3} \right)^{\frac{1}{n}} - \left(\frac{H_B - H_D}{k_4} \right)^{\frac{1}{n}} - Q_{aus2} &= 0 \\ \left(\frac{H_A - H_C}{k_2} \right)^{\frac{1}{n}} - \left(\frac{H_C - H_B}{k_3} \right)^{\frac{1}{n}} - \left(\frac{H_C - H_D}{k_5} \right)^{\frac{1}{n}} &= 0 \\ \left(\frac{H_B - H_D}{k_4} \right)^{\frac{1}{n}} + \left(\frac{H_C - H_D}{k_5} \right)^{\frac{1}{n}} - Q_{aus1} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

ΔQ -Methode

Bei der Anwendung der ΔQ -Methode werden für jede Masche eines Rohrnetzwerks Korrekturvolumenströme ΔQ berechnet, die zur Berichtigung der Startwerte der Volumenströme benötigt werden. Die Volumenströme für die Anfangsverteilung im Rohrnetzwerk können, unter Beachtung der Kontinuitätsbedingung in den angrenzenden Knoten, betragsmäßig willkürlich gewählt werden. Jedoch kann die Wahl der Startwerte einen wesentlichen Einfluss auf das Konvergenzverhalten der numerischen Lösungsmethode haben. Für das in Abb. 2.7 dargestellte Rohrnetz resultieren folgende Gleichungen für Masche I und Masche II:

$$\left. \sum_{i=1}^3 k_i (Q_i + \Delta Q_I)^n = 0 \right\} \text{Masche I} \quad (2.17)$$

$$\left. \sum_{i=3}^5 k_i (Q_i + \Delta Q_{II})^n = 0 \right\} \text{Masche II} \quad (2.18)$$

Da für jedes Q_i ein Startwert definiert werden muss, verbleiben nur ΔQ_I und ΔQ_{II} als Unbekannte in zwei Gleichungen. Nach der Berechnung der Korrekturvolumenströme werden diese in Abhängigkeit der Maschenaufrichtung zu den maschenangehörigen Volumenströmen addiert oder subtrahiert. Daraus ergeben sich die berichtigten Volumenströme im Rohrnetz. Jedoch stellt das Ergebnis nur eine Näherung der Lösung dar. Das führt dazu, dass das Gleichungssystem nur iterativ gelöst werden kann.

ΔH -Methode

Die Aufstellung des Gleichungssystems erfolgt bei der ΔH -Methode analog zur H -Methode. Der Unterschied liegt in der Vorgabe von Startwerten für die Druckhöhen und der Einführung von unbekanntem Korrekturdruckhöhen ΔH . Für jeden Knoten des Rohrsystems muss die

Kontinuitätsgleichung (Gleichung 2.19)¹angeschrieben werden. Anschließend kann das Gleichungssystem nach den Korrekturdruckhöhen aufgelöst und die ursprünglich angenommenen Druckhöhen berichtigt werden. Auch bei Anwendung dieser Methode kann man sich nur iterativ der Lösung nähern.

$$\sum_{i=1}^l \left(\frac{h_{mn} + \Delta H_m + \Delta H_n}{k_i} \right)^{\frac{1}{n}} + \sum Q_{ein/aus} = 0 \quad (2.19)$$

QH-Methode

Die Q -, H -, ΔQ - und ΔH -Methoden zur Aufstellung der Systemgleichungen verfolgen den Ansatz, ein Gleichungssystem mit einer unbekanntem Variablen abzuleiten. Im Gegensatz dazu werden bei der QH -Methode die Gleichungen für jeden Rohrstrang und jeden Knoten, unabhängig von Maschen, aufgestellt. Das hat den Vorteil, dass die Lösung des Gleichungssystems unmittelbar die gesuchten Variablen ausgibt und keine Maschen aus der Netztopologie abgeleitet werden müssen. Für das in Kapitel 2.2.2 eingeführte Beispielnetz ergeben sich die Knotengleichungen 2.20 und die Rohrgleichungen 2.21.

$$\left. \begin{array}{l} Q_1 - Q_2 + Q_{ein1} = 0 \\ -Q_1 + Q_3 - Q_{aus2} = 0 \\ Q_2 - Q_3 - Q_5 = 0 \\ Q_4 + Q_5 - Q_{aus1} = 0 \end{array} \right\} \text{Knoten A, B, C, D} \quad (2.20)$$

$$\left. \begin{array}{l} k_1 Q_1^n = H_B - H_A \\ k_2 Q_2^n = H_C - H_A \\ k_3 Q_3^n = H_B - H_C \\ k_4 Q_4^n = H_D - H_B \\ k_5 Q_5^n = H_D - H_C \end{array} \right\} \text{Rohr 1, 2, 3, 4, 5} \quad (2.21)$$

Die allgemeine Formulierung der Systemgleichungen ist in Gleichung 2.22 und 2.23 dargestellt.

$$\sum_{i=1}^l Q_i = 0 \quad (2.22)$$

$$\sum_{i=1}^l k_i Q_i^n - (H_{i1} - H_{i2}) = 0 \quad (2.23)$$

2.2.3 Numerische Lösungsmethoden

Die nach den angeführten Methoden abgeleiteten Gleichungssysteme haben nichtlinearen Charakter. Daher wurden für die hydraulische Berechnung von vermaschten Rohrnetzwerken in

¹ mit l = Anzahl der ein- und austretenden Rohre
mit m = Index des, durch das Rohr i , verbundenen Knotens
mit n = Index des Knotens, für den die Bilanz aufgestellt wird

den letzten Jahrzehnten einige Lösungsverfahren entwickelt, die größtenteils auf drei methodische Ansätze zurückzuführen sind. In [93] sind einige Verfahren, in Bezug auf die Anwendung bei Fernwärmenetzen zusammengefasst.

Hardy-Cross Methode

Die erste Berechnungsmethode führte *Hardy Cross* [25] im Jahr 1936 ein. Es stellt das bekannteste iterative Lösungsverfahren dar, das die Gleichungssysteme basierend auf der ΔQ -Methode behandelt. Dieses musste noch händisch und ohne EDV-Unterstützung angewendet werden. Bis heute erfolgen viele hydraulische Analysen von vermaschten Rohrnetzwerken nach dem *Hardy-Cross*-Verfahren. Bei der Beschreibung des Verfahrens bezieht man sich auf das 1. und 2. Kirchhoffsche Gesetz. Diese bilden die Kontinuitätsbedingung in den Knoten (1. KG) und die Energieerhaltung in den Maschen (2. KG) eines Rohrnetzwerks ab. Wie in Kapitel 2.2.2 angeführt, müssen initial die Volumenströme in den Maschenabschnitten so gewählt werden, dass sie dem 1. Kirchhoffschen Gesetz in den angrenzenden Knoten genügen. Da es sich bei diesen Volumenströmen um eine geschätzte Anfangsverteilung handelt, wird zu jeder Masche ein Korrekturvolumenstrom ΔQ definiert.

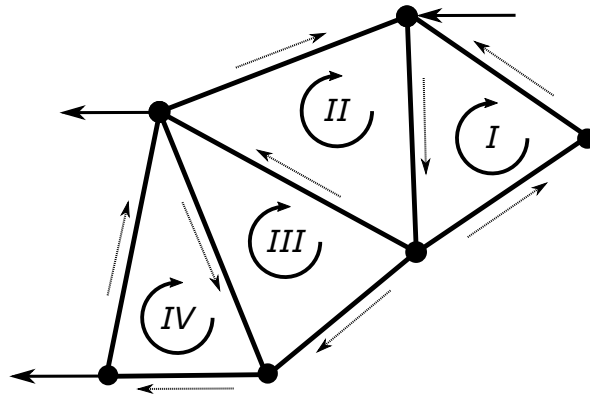


Abbildung 2.8: Anwendung des *Hardy-Cross*-Verfahrens auf ein vermaschtes Rohrnetz

Die reibungsbedingten Druckverluste je Strang werden bei der Anwendung des *Hardy Cross*-Verfahrens nach der *Darcy-Weisbach* Gleichung 2.24 für Rohrleitungen berechnet. Die geometrischen Rohreigenschaften Länge L und Durchmesser d , die Rohrreibungszahl λ und die Fluidichte ρ können wieder zu einem gemeinsamen Rohrwiderstandsfaktor k (Gleichung 2.25) zusammengefasst werden.

$$\Delta p = \frac{\lambda \rho 8 L Q^2}{d^5 \pi^2} \quad (2.24)$$

$$k = \frac{\lambda \rho 8 L}{d^5 \pi^2} \quad (2.25)$$

Mit diesem Widerstandsfaktor vereinfacht sich Gleichung 2.24 zu:

$$\Delta p = k Q^2 \quad (2.26)$$

Die gebildete Summe der Druckverluste muss für jede Masche gleich Null sein (siehe Gleichung 2.27)¹. Durch weitere Umformungen und Vernachlässigung des quadratischen Terms des Korrekturvolumenstroms in Gleichung 2.28, folgt die Berechnungsformel für den gesuchten Korrekturvolumenstrom 2.30. Die Vernachlässigung des quadratischen Terms ist zulässig, wenn der Startwert der Volumenströme nahe genug an der Lösung gewählt wird. Ist diese Bedingung erfüllt, sind die Auswirkungen der Vernachlässigung gering und schlussendlich ist der reale Korrekturvolumenstrom ΔQ gleich Null. Bei der Anwendung der Maschenregel muss darauf geachtet werden, dass der Volumenstrom vorzeichenrichtig entsprechend der Maschenlaufrichtung eingesetzt wird. Daher wird der quadratische Term in Gleichung 2.30 in ein Produkt umgewandelt. Der Korrekturvolumenstrom muss für jede Masche im Netzwerk bestimmt werden.

$$\sum_{i=1}^l k_i (Q_i + \Delta Q)^2 = 0 \quad (2.27)$$

$$\sum_{i=1}^l k_i (Q_i^2 + 2 Q_i \Delta Q + \Delta Q^2) = 0 \quad (2.28)$$

$$\sum_{i=1}^l k_i (Q_i^2 + 2 Q_i \Delta Q) = 0 \quad (2.29)$$

$$\Delta Q = - \frac{\sum_{i=1}^l k_i Q_i^2}{2 \sum_{i=1}^l k_i Q_i} \quad (2.30)$$

$$\Delta Q = - \frac{\sum_{i=1}^l k_i Q_i |Q_i|}{2 \sum_{i=1}^l k_i Q_i} \quad (2.31)$$

Anschließend berechnet man unter Beachtung der Maschenlaufrichtung die neuen Werte für die Volumenströme in den Strängen nach Gleichung 2.32. Dabei ist zu beachten, dass bestimmte Stränge in mehreren Maschen vorkommen. In solchen Fällen müssen die Korrekturvolumenströme der anderen beteiligten Maschen bei der Berechnung des neuen Volumenstroms berücksichtigt werden. Diese Rechenprozedur wird solange wiederholt bis das Abbruchkriterium, die Unterschreitung eines vorgegebenen Wertes für den Korrekturvolumenstrom, erfüllt wird.

$$Q_{neu} = Q_{alt} \pm \Delta Q \quad (2.32)$$

¹ mit $l =$ die Anzahl an Rohren in einer Masche

Da beim *Hardy-Cross*-Verfahren die Korrekturvolumenströme für jede Masche des Netzwerkes separat berechnet werden, bevor die neue Volumenstromverteilung ermittelt wird, nennt man dieses auch Gesamtschrittverfahren oder sequentielles Verfahren. Mathematisch basiert der Lösungsweg nach dem *Hardy-Cross*-Verfahren auf der Linearisierung einer quadratischen Funktion mit dem Newton-Verfahren, welches mit Hilfe des Taylorpolynoms ersten Grades hergeleitet werden kann. Wird Gleichung 2.31 in Gleichung 2.32 eingesetzt, so erkennt man unmittelbar die Übereinstimmung mit dem Newton-Verfahren (Gleichung 2.33).

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (2.33)$$

Das *Hardy-Cross*-Verfahren wurde ursprünglich als manuelles Handberechnungsverfahren entwickelt, indem eine Masche nach der anderen behandelt wird. Durch diese sequentielle Vorgehensweise ist das Verfahren schlecht für eine computertechnische Umsetzung geeignet und führt zu einem langsamen Konvergenzverhalten, da das Konvergenzkriterium für jede Masche erfüllt sein muss, ohne den Einfluss anderer Maschen zu berücksichtigen. Das Konvergenzverhalten hängt auch stark von den gewählten Startwerten der Volumenstromverteilung ab, da es sich bei dem zugrunde liegenden Newton-Verfahren um ein lokal konvergentes Verfahren handelt. Dies erfordert eine gute Startwertnäherung an den Lösungswert, weil sich ansonsten eine oszillierende Folge der Lösung oder im schlechtesten Fall Divergenz einstellt. Die Arbeiten von *Brkić* [20], *Demir* [26], *Lopes* [61] und *Waheed* [95] basieren auf Weiterentwicklungen und Abwandlungen des *Hardy-Cross*-Verfahrens.

Newton-Raphson Methode

Mit der Verbreitung von Computern konnten sich die *Newton-Raphson* Methode und die *Linear-Theory-Method* (LTM) bei der Analyse von Rohrnetzwerken etablieren. Das *Newton-Raphson* Verfahren ist eines der bekanntesten iterativen Lösungsverfahren für die Behandlung von nichtlinearen Funktionen. Bei der Anwendung der Methode ist es sinnvoll, das zu lösende Gleichungssystem in Vektoren- und Matrixform unter Verwendung der Jacobimatrix \mathbf{J} anzuschreiben (Gleichung 2.34). Erfolgt die Aufstellung des Gleichungssystems mit der *Q*-Methode, wird das *Newton-Raphson* Lösungsverfahren von *Jeppson* [50] nicht empfohlen.

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} - \mathbf{J}^{-1} \mathbf{f}(\mathbf{x}^{(k)}) \quad (2.34)$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_j}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_j}{\partial x_{n-1}} & \frac{\partial f_j}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Eine numerische Vereinfachung kann erfolgen, indem anstatt der Bildung der Inversen der Jacobi-Matrix, das Gleichungssystem 2.36 nach \mathbf{v} aufgelöst und in 2.34 eingesetzt wird.

$$\mathbf{J} \mathbf{v} = \mathbf{f} \quad (2.36)$$

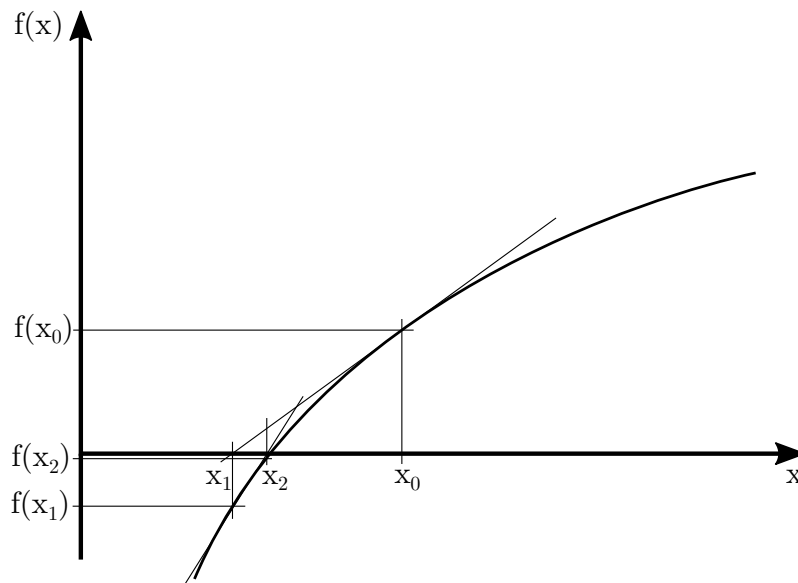


Abbildung 2.9: Berechnung einer Nullstelle mit dem *Newton-Raphson* Verfahren

Im Gegensatz zum *Hardy-Cross*-Verfahren, das die *Newton-Raphson* Methode separat auf jede Masche in einem Netzwerk anwendet, kann das allgemeine *Newton-Raphson* Verfahren auf das gesamte Netz simultan angewendet werden und so das Konvergenzverhalten positiv beeinflussen. Einen wesentlichen Beitrag zur Anwendung der *Newton-Raphson* Methode bei vermaschten Strömungsnetzwerken leistete *Epp* [33], der zur schnellen und speicheroptimierten Berechnung graphentheoretische Methoden verwendete. In der Arbeit von *Altman* und *Boulos* [8] wird das Konvergenzverhalten der *Newton-Raphson* Methode untersucht. Die Optimierung und Berechnung von Fernwärmenetzen unter Anwendung der *Newton-Raphson* Methode wird in [98] behandelt.

Linear-Theory Methode

Die *Linear-Theory* Methode wurde federführend von *Wood* und *Charles* [102] eingeführt und ständig weiterentwickelt. Schnelle Rechenzeiten und stabiles Konvergenzverhalten liefert das *Linear-Theory* Verfahren in Kombination mit der *Q*-Methode. Ein besonders wichtiger Vorteil gegenüber den anderen Lösungsverfahren besteht darin, dass zwar ebenfalls Startwerte für die Volumenströme initiiert werden, diese aber nicht der Kontinuitätsbedingung der angrenzenden Knoten genügen müssen. Die *Linear-Theory* Methode führt die nichtlinearen Druckhöhengleichungen in ein lineares Gleichungssystem über, indem der nichtlineare Term Q^n durch einen linearen Ausdruck angenähert und ersetzt wird (Gleichung 2.37). Q_0 ist der geschätzte Startwert für den Volumenstrom im Rohr.

$$H_{12} = k Q^n \sim (k Q_0^{n-1}) Q \quad (2.37)$$

Diese Annäherung wird für jedes Rohr in die Maschengleichungen der *Q*-Methode eingesetzt. Durch Ergänzung der Knotengleichungen entsteht ein lineares Gleichungssystem, dass mit

effizienten Algorithmen gelöst werden kann. Dieser Rechenprozess muss so oft wiederholt werden, bis das Abbruchkriterium erfüllt ist. Um Oszillationen um den Lösungswert zu dämpfen oder zu verhindern, sollte eine Relaxation während des Iterationsprozesses durchgeführt werden. Der Relaxationsprozess führt im Rahmen von iterativen Lösungsverfahren zu einer Dämpfung oder Glättung der Folge von Näherungswerten und stabilisiert oder ermöglicht erst die Konvergenz des Verfahrens.

Auf Basis des *Linear-Theory* Verfahrens untersucht *Krope* in seiner Arbeit [58] die Strömungs- und Druckverteilung in vermaschten Gasnetzen. In [80] stellt *Scholz* ein Berechnungstool auf Basis der *Linear-Theory* Methode für stationäre hydraulische Systeme vor.

Gradientenmethode

Einen anderen methodischen Ansatz verfolgten *Todini* und *Pilati* [92]. Die von ihnen entwickelte *Gradientenmethode* basiert auf der Formulierung der Systemgleichungen in Matrixschreibweise und der Anwendung der rekursiven *Newton-Raphson*-Methode. Diese Methode verfügt über ein gutes Konvergenzverhalten und ist in das weit verbreitete Softwarepaket EPANET implementiert. Das zu lösende Gleichungssystem formuliert *Todini* in folgender Gestalt

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \dots & \mathbf{A}_{12} \\ \vdots & & \vdots \\ \mathbf{A}_{21} & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \vdots \\ \mathbf{H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0 \\ \vdots \\ -\mathbf{q} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

wobei \mathbf{A}_{11} eine Diagonalmatrix mit den Koeffizienten $k_i Q_i^{(n-1)}$ der Druckverlustgleichung in der Hauptdiagonalen ist. Die Matrix \mathbf{A}_{12} stellt die Inzidenzmatrix des Rohrsystems mit jenen Knoten dar, deren Druckhöhen nicht bekannt sind. Sie ist gleich der transponierten Matrix \mathbf{A}_{21}^T . \mathbf{A}_{10} beinhaltet den Zusammenhang zwischen Rohren und Knoten mit bekannten Druckhöhen. \mathbf{Q} und \mathbf{H} sind die unbekanntes Volumenströme und Druckhöhen. Die Randbedingungen sind in Form von \mathbf{H}_0 (Druckhöhen) und \mathbf{q} (Abnahme in den Knoten) gegeben. Das Gleichungssystem wird unter Anwendung des *Newton-Raphson* Verfahrens linearisiert und iterativ gelöst. Die genaue Vorgehensweise bei der Anwendung der Gradientenmethode und der Vergleich der Konvergenzeigenschaften unterschiedlicher Lösungsmethoden ist in [91] beschrieben.

Weiterentwicklungen

Die vier beschriebenen Lösungsansätze stellen die Basis für weitere Entwicklungen der hydraulischen Rohrnetzberechnung dar. *Jeppson* [50], *Stephenson* [83], *Boulos* [19] und *Ellis* [31] geben einen guten zusammenfassenden Überblick der beschriebenen Ansätze und vergleichen deren Vor- und Nachteile.

Das Konvergenzverhalten bekannter iterativen Methoden zur Berechnung von Wasser- und Gasnetzen wird in [21] behandelt. Bis heute gibt es eine Vielzahl an Abwandlungen und Weiterentwicklungen der beschriebenen Methoden, unter anderem von *Boulos* [18], der eine explizite und effiziente Methode auf Basis der Erhaltung der Masse und Energie formulierte. Eine Kombination aus *Linear-Theory* Methode und *Newton-Raphson* Methode wird von *Nielsen* [67] beschrieben. Dadurch sollen auftretende Oszillationen der *Linear-Theory* Methode vermieden werden. In der Arbeit von *Ellis* und *Simpson* [32] wird das Konvergenzverhalten der *Linear-Theory* Methode, der *Newton-Raphson* und einem hybriden Verfahren zwischen

Linear-Theory Methode und *Newton-Raphson* untersucht. Jedoch beziehen sich die Ergebnisse auf die Untersuchung von sehr kleinen vermaschten Rohrnetzwerken. Daher lassen sich die Aussagen nur bedingt für eine Verallgemeinerung des Konvergenzverhaltens der Methoden verwenden.

Collins [24] war der erste, der die Berechnung von vermaschten Rohrnetzwerken als lineares Optimierungsproblem aufgefasst und durchgeführt hat. Der zentrale Ansatz dieser Methode ist die stückweise Linearisierung der Systemgleichungen. In [76] werden ausgehend von der *H*-Methode, ebenfalls durch einen Optimierungsansatz die Druckhöhen im Rohrnetz berechnet. Ansätze der nicht linearen Optimierung wurden von *Afshar* [5], *Boulos* [17] und in [42] entwickelt. Letzterer nutzt dafür einen graphentheoretischen Ansatz, der eine explizite Optimierung ermöglicht. Die Entwicklung eines konvexen, nichtlinearen Minimierungsmodells wird in [27] beschrieben.

Stevanovic formuliert in [85] eine Methode zur Lösung des Gleichungssystems, das mit der *Q*-Methode ermittelt wird, auf Basis der *Method of Square Roots*. Um die Konditionszahl großer Matrizen und die Effizienz des Verfahrens der konjugierten Gradienten zu verbessern, erfolgt in [3] eine Präkonditionierung des Gleichungssystems. Einen weiteren Beitrag zur Minimierung des Speicherplatzes und des computertechnischen Aufwandes, für die Berechnung von großen Netzen mittels konjugierten Gradientenmethode, liefert [4].

Auch die Analogie zur Berechnung von elektrischen Netzen stellt ein Lösungsverfahren dar, welches von *Hamam* [44] als hybride Methode und von *Rüdiger* [75] als Potentialanalyse in der Gasnetzrechnung entwickelt wurde.

In [60] kommen aggregierte Modelle von Strahlennetze zum Einsatz, um die Anzahl der Modellkomponenten (Rohre) und den Rechenaufwand zu verringern. Optimierungen des hydraulischen Betriebes werden oft mit separaten Softwarepaketen durchgeführt. Eine direkte Implementierung einer nicht-linearen Optimierung, unter Anwendung von quadratischen Näherungsgleichungen, wurde in [29] umgesetzt, um die optimale Positionierung von Ventilen im Netz zu bestimmen.

Eine kommerzielle Berechnungssoftware (STANET) wird in [13] verwendet, um das Trinkwasserverteilungsnetz in einem Versorgungsgebiet hydraulisch zu berechnen und daraus Empfehlungen für den Betrieb formulieren zu können. Um den Einsatz von Pumpen in einem Wasserverteilnetz zu optimieren, wurde in [43] ein aus Messdaten abgeleitetes Skelett-Modell entwickelt. Die hydraulische Berechnung basiert auf der Anwendung und Weiterentwicklung der *QH*-Methode. Die numerische Lösung erfolgt jedoch mittels der Singulärwertzerlegung (SVD). Der optimale Ausbau eines Fernwärmenetzes aus ökonomischer Sicht, wird in [47] als Steiner-Graph Problem behandelt. Als Nebenbedingung muss nur die Kontinuitätsgleichung in den Knoten des Graphen erfüllt sein. Die Erfüllung der Energieerhaltung wird vereinfacht als Kapazitätsrestriktion für jede Kante (Rohrleitung) im Modell berücksichtigt.

2.3 Berechnungsverfahren für Gasnetze

Die bisherigen Ausführungen zur hydraulischen Berechnung von vermaschten Rohrnetzen bezogen sich ausschließlich auf annähernd inkompressible Medien als Strömungsfluid im stationären Zustand. Bei Gasen hat die Kompressibilität (Gleichung 2.39) Einfluss auf die Strömungs- und Druckverteilung in einem Netzwerk. Die Einteilung in kompressible und inkompressible Medien erfolgt allgemein mit der Machzahl M (Gleichung 2.40), die das Verhältnis zwischen der Geschwindigkeit u eines Fluids zur Schallgeschwindigkeit c des

Fluids angibt. Liegt die Machzahl unterhalb des Wertes 0.3, kann das betrachtete Fluid näherungsweise als inkompressibel betrachtet werden. Je nachdem welche Anforderungen an die Modellierungstiefe gestellt werden, stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal der Berechnungsverfahren liegt in der zeitlichen Berücksichtigung von Randbedingungen. Im folgenden werden stationäre und instationäre Verfahren für die Gasnetzberechnung beschrieben.

$$\kappa = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (2.39)$$

$$M = \frac{u}{c} \quad (2.40)$$

2.3.1 Stationäre Verfahren

Der Großteil der stationären Berechnungsverfahren von vermaschten Gasnetzwerken basieren auf den gleichen Methoden, die zur Berechnung von Rohrnetzwerken mit inkompressiblen Medien verwendet werden (siehe Kapitel 2.2). In [88] wird das Gasverteilstück als inkompressibel betrachtet und mit den bereits beschriebenen Methoden gelöst. Die Aufstellung und Lösung des Gleichungssystems des Strömungsnetzwerks erfolgt vorrangig mit der Kombination der Q -Methode und dem *Newton-Raphson* Verfahren. In [2] kommt ebenfalls das Lösungsverfahren nach *Newton-Raphson* zum Einsatz, jedoch werden anstatt Maschengleichungen, Druckverlustgleichungen für jeden Strang aufgestellt.

Einen anderen Ansatz verfolgt *Bermudez* in [12]. Dabei werden die Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie so weit vereinfacht, dass eine Gleichung für die Druckänderung entlang eines Rohrstranges resultiert. In Ergänzung mit den Massenerhaltungsgleichungen in den Knoten, kann das Gleichungssystem ebenfalls mit dem *Newton-Raphson* Verfahren gelöst werden.

Eine Abwandlung des *Hardy Cross*-Verfahrens wird in [20] beschrieben und mit der ursprünglichen Methode verglichen. In [88] basiert die hydraulische Berechnung eines Niederdruckgasnetzes auf den bereits erläuterten Methoden für inkompressible Medien. Der Einfluss der Kompressibilität wird dabei vernachlässigt.

2.3.2 Instationäre Verfahren

Die instationäre Behandlung von allgemeinen Strömungen wird seit langem in Rahmen von CFD Simulationen und anderen strömungstechnischen Anwendungen in der thermischen Energietechnik durchgeführt. Es gibt eine Vielzahl an unterschiedlichen Modellgleichungen, die mit numerischen Lösungsmethoden gelöst werden. Für die Beschreibung der Grundlagen sei hier auf die zahlreichen und umfassenden Werke der Strömungsmodellierung und der numerischen Methodik in der Strömungslehre [34], [35], [43], [68], [69], [63], [82], [87] verwiesen.

Die Abbildung instationärer Strömungsvorgänge basiert auf den Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie. Je nachdem, welche Vereinfachungen und Annahmen bei der Behandlung dieser Gleichungen gemacht werden, resultieren unterschiedliche Verfahren. In [9] werden die Erhaltungsgleichungen in der Form der isothermen Euler-Gleichungen angewandt, um das dynamische Verhalten von Strömungsvorgängen in Gasnetzen abbilden zu können.

Den Euler-Gleichungen liegt die Annahme zugrunde, dass das strömende Fluid elastisches Verhalten zeigt und dadurch keine innere Reibung entsteht. Diese Methode wird auch in [48] eingesetzt und mit anderen bereits etablierten Methoden der Gasnetzsimulationen, wie die des Softwareprogramms SIMONE und der quasi-stationären Methode, numerisch verglichen. Das Programm SIMONE wird in [49] methodisch beschrieben und für die energetische Optimierung der öffentlichen Gasversorgung eingesetzt.

Ein weiteres instationäres Verfahren zur Strömungssimulation stellt die Methode der Charakteristiken dar. Dieses wird in [77] für die Berechnung von Gasnetzen, unter der Annahme einer isothermen Rohrströmung, eingesetzt. Das Charakteristikenverfahren kommt auch in der Arbeit von *Ponweiser* [72] zur Berechnung von nichtadiabaten Rohrströmungen in Naturumlaufdampferzeugern zum Einsatz.

In [23] werden die differentiell-algebraischen Modellgleichungen eines Gasnetzes mit einem impliziten Verfahren behandelt, dessen Schrittweite bei der Integration variabel ist. Durch eine Formulierung der Impulserhaltung, in der der Druck als Totaldruck und nicht als statischer Druck eingesetzt wird, können in [57] kompressible und inkompressible Medien mit einem nicht iterativen Verfahren gelöst werden.

Eine weitere Möglichkeit instationäre Rohrströmungen zu untersuchen, wird in [64] durch die Beschreibung der Strömung mit Übertragungsfunktionen, die entweder nichtlinear verteilte, linear verteilte oder konzentrierte Parameter verwenden.

Der Einsatz von Druckkorrekturverfahren zur Beschreibung von transienten Rohrströmungen in den netzwerkartigen Strukturen eines Naturumlaufdampferzeugers wird in [96] behandelt. Dabei kommen die bekannten Verfahren SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations) und die Weiterentwicklung SIMPLER (SIMPLE Revised) zum Einsatz.

2.4 Berechnungsverfahren zur Beurteilung des thermischen Verhaltens

Bei den Verfahren zur Berechnung des thermischen Verhaltens von Rohrströmungen werden grundsätzlich stationäre und instationäre Methoden unterschieden. Das generelle Ziel thermischer Analysen ist, die Zustandsgröße Temperatur an definierten Punkten in einem System zu bestimmen, um in weiterer Folge die Wärmeverluste oder die transportierte thermische Energie abzuleiten. Für eine Rohrströmung, die als stationär anzusehen ist, kann die Bestimmung der Austrittstemperatur und der Wärmeverluste mit der Theorie der Wärmeübertragung erfolgen. Je nachdem, welche vereinfachenden Annahmen bei der Erstellung der Modellgleichungen getroffen werden, stehen iterative und nicht iterative Lösungswege zu Verfügung. In [11] erfolgt die Berechnung der Rohraustrittstemperatur unter der Annahme, dass das Wärmeträgermedium innerhalb des Rohres eine mittlere Temperatur zwischen Eintritts- und Austrittstemperatur hat. Jedoch liegt in dieser Arbeit der Fokus auf der einfachen Abbildung vieler verschiedener Komponenten einer dezentralen Energieversorgung und nicht auf der Analyse des thermischen Verhaltens.

Der Einsatz instationärer Berechnungsmethoden empfiehlt sich, sobald ein System über einen Zeitraum mit sich ändernden Randbedingungen betrachtet wird. Der Ausgangspunkt für transiente Verfahren sind wie bei der transienten hydraulischen Berechnung, die Erhaltungsgleichungen für Massen, Impuls und Energie. Diese sind auch die Basis, der in [55], [41], [51] und [52] verwendeten Methoden zur Simulation von Wärmenetzen. Die Energiebilanz

in einem diskretisierten Rohr stellt in dem Programmpaket spHeat¹[45] die Basis dar, um in weiterer Folge das Optimierungspotential eines Fernwärmenetzes zu bestimmen. In [40] erfolgt ebenfalls die Anwendung der Energiebilanz auf den Transport der thermischen Energie in Rohren. Allerdings sind nur die Temperaturen der Fluideintritts- und Fluidaustrittsknoten von Interesse. Die zeitliche Entwicklung der Austrittstemperatur wird in Abhängigkeit der Eintrittstemperatur, den thermischen Verlusten und der Laufzeit des Fluids berechnet. Diese knotenbezogene Vorgehensweise führt zu effizienteren Algorithmen, jedoch zu einer geringeren thermischen Auflösung des Systems. Die selbe Methode wird in [38] angewendet, um ein Fernwärmenetz in Dänemark zu simulieren und die Ergebnisse mit dem Softwarepaket TERMIS zu vergleichen.

Die thermische Modellierung und die Behandlung der Erhaltungsgleichungen erfolgt vorwiegend unter der raumfesten eulerschen Betrachtungsweise. In [70] versucht man durch die Anwendung des Lagrangen Ansatzes (massefest), die Nachteile herkömmlicher Methoden (Euler Ansatz), wie schlechte numerische Stabilität oder numerische Diffusion, zu vermeiden.

Das thermische Verhalten von Fernwärmenetzen wird in [86] durch Lösung der Energiebilanzen mit Hilfe des Charakteristikenverfahrens bestimmt.

In [53] wird der Ansatz verfolgt, das thermische Verhalten in einem Fernwärmenetz abzubilden, indem die Fließgeschwindigkeit des Wärmeträgerfluids mit der Geschwindigkeit der sich ausbreitenden Temperaturfront ins Verhältnis gesetzt wird. Um dieses Verhältnis zu berechnen, kommt eine Näherungsgleichung, die von der Dichte des strömenden Fluids und des Rohrwerkstoffs, dem Innendurchmesser, den spezifischen Wärmekapazitäten von Rohr und Fluid und der Rohrdicke abhängt, zum Einsatz.

Die Untersuchung verschiedener Betriebsweisen eines Fernwärmenetzes, in Bezug auf die Vorlauf- und Rücklauf temperaturführung und der Einbeziehung der Gebäudetechnik, wird in [74] behandelt. Die Umsetzung der Modellierung erfolgt in TRNSYS-TUD, einem Simulationsprogramm für Gebäude mit der Möglichkeit, die Komponentenbibliothek mit individuellen Komponenten zu erweitern. Einen guten Überblick der Auswirkungen auf die Effizienz durch Senkung der Rücklauf temperatur, wird in [101] gegeben.

¹ Das Programmpaket spHeat wurde im Rahmen des europäischen Projekts POLYCITY entwickelt, <http://www.polycity.net>

Kapitel 3

Methodik

In dem folgenden Kapitel werden die entwickelten Methoden für die Modellierung und Simulation von vermaschten Fernwärme- und Gasnetzen beschrieben.

3.1 Berechnung der Betriebsgrößen von Fernwärmenetzen

Die Simulation eines Fernwärmenetzes hat das Ziel, detaillierte Aussagen über den hydraulischen und thermischen Betriebszustand bei gegebenen Randbedingungen treffen zu können. Da es sich bei dem, im Rahmen dieser Arbeit, zu untersuchenden Netz um ein sehr großes vermaschtes Fernwärmenetz handelt, spielen die benötigten Rechenzeiten und die Auslastung des Rechenspeichers eine wichtige Rolle. Es sollen sowohl die hydraulischen als auch die thermischen Betriebseigenschaften des Fernwärmenetzes detailliert abgebildet werden können. Daher kommt eine thermohydraulische Berechnungsmethode zum Einsatz. Diese kombiniert eine quasistationäre hydraulische mit einer transienten thermischen Berechnung. In Abb. 3.1 ist der allgemeine qualitative Verlauf einer quasistationären und einer transienten Funktion dargestellt. Ein quasistationärer Prozess besteht aus aneinander gereihete Teilprozesse, die sich im Gleichgewichtszustand befinden. Für den betrachteten Zeitraum des Teilprozesses ändern sich die Zustandsgrößen nicht. Der transiente Prozess zeichnet sich durch eine zeitliche Änderungen der Zustandsgrößen aus.

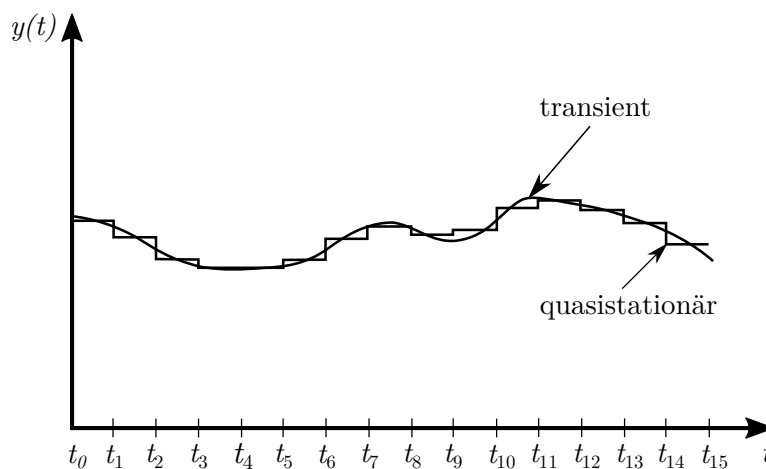


Abbildung 3.1: Unterschied zwischen quasistationärer und transienter Betrachtung

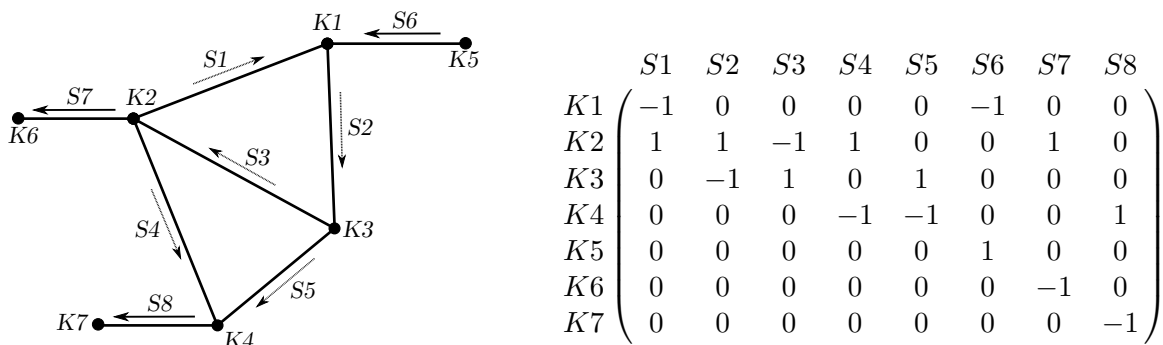
Die hydraulische Berechnung erfolgt quasistationär und die daraus resultierenden Ergebniswerte bilden die Randbedingungen für die nachfolgende transiente thermische Berechnung. Für einen betrachteten Zeitraum werden die hydraulischen Betriebsgrößen bestimmt und konstant gehalten. Nachdem die thermische Berechnung stattgefunden hat, erfolgt die nächste hydraulische Berechnung. Somit ändern sich die hydraulischen Randbedingungen in Abhängigkeit des gewählten Zeitintervalls der quasistationären Berechnung und des sich einstellenden Strömungszustandes.

3.1.1 Hydraulische Berechnung

Die quasistationäre hydraulische Berechnung wird in Anlehnung bereits existierender Methoden abgewandelt und weiterentwickelt. Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, besteht die hydraulische Berechnung aus der Aufstellung der Systemgleichungen und der numerischen Lösung des daraus resultierenden Gleichungssystems. Bevor jedoch das Gleichungssystem aufgestellt werden kann, müssen diverse Datenaufbereitungen und Definitionen durchgeführt werden. Die Topologie des Netzes wird durch eine aus der Graphentheorie [89] bekannte Inzidenzmatrix (Knoten-Kanten-Matrix) abgebildet. In jeder Zeile einer Inzidenzmatrix ist die Zuweisung der ein- oder austretenden Stränge des entsprechenden Knotens und in jeder Spalte ist zu dem entsprechenden Strang die Zuordnung des Anfangs- und Endknoten abgebildet. Wird die Strömungsrichtung des Fluids im Netzwerk berücksichtigt, spricht man von einem gerichteten Graphen. Je nach Knoten-Strang-Verbindung und Strömungsrichtung nehmen die Matrixelemente der Inzidenzmatrix i_{ij} einen von drei Werten an (siehe Gleichung 3.1).

$$i_{ij} = \begin{cases} -1, & \text{wenn das Fluid in Rohr } j \text{ aus dem Knoten } i \text{ austritt} \\ 1, & \text{wenn das Fluid in Rohr } j \text{ in den Knoten } i \text{ eintritt} \\ 0, & \text{wenn das Rohr } j \text{ keine Verbindung zu Knoten } i \text{ hat} \end{cases} \quad (3.1)$$

In Abb. 3.2 ist die graphentheoretische Ableitung eines Rohrnetzwerkes abgebildet. Im Gegensatz zu bekannten Ansätzen, verfügt in der gewählten Form jeder Abnehmer- und Einspeiserknoten über eine zusätzliche Abnehmer- und Einspeiserleitung.



(a) Strömungsnetzwerk, bestehend aus 7 Knoten und 8 Strängen

(b) abgeleitete Inzidenzmatrix

Abbildung 3.2: Ableitung der Inzidenzmatrix anhand einer gegebenen Netzstruktur

Diese Vorgehensweise erleichtert die Einbindung und erhöht die Flexibilisierung bei der Definition von Randbedingungen. Das abgebildete Beispielnetz besteht aus $m = 7$ Knoten

und $n = 8$ Strängen. Daraus resultiert eine Inzidenzmatrix der Dimension $m \times n$. Der Rohrstrang $S6$ bildet einen einspeisenden Erzeuger und die Rohrstränge $S7$ und $S8$ jeweils einen Verbraucher ab. Für die hydraulische Berechnung können die Randbedingungen je nach Fragestellung variieren. Sind die Entnahmemassenströme der Verbraucher und infolge der Massenerhaltung, die des Erzeugers bekannt, erfolgt die Festlegung einer Randbedingung durch Zuweisung der Strömungsgeschwindigkeiten in den Erzeuger- und Verbrauchersträngen, wobei ein Verbraucher- oder Erzeugerstrang für die Gleichungsaufstellung unbekannt bleiben muss. Diese Vorgehensweise ist erforderlich, um eine Überbestimmung des Gleichungssystems zu vermeiden. Die zweite Randbedingung legt den Referenzdruck eines Knotens im Netzwerk fest. Mit dieser Definition der Randbedingungen liefert das Ergebnis der Netzrechnung die Druckverteilung und die Massenstromverteilung im Netz, um den festgelegten Verbrauch decken zu können.

Die Systemgleichungen werden nach der QH -Methode, die auch beim Gradientenverfahren Anwendung findet, aufgestellt. Im Gegensatz zu den bekannten und meist verwendeten Methoden, erfolgt die Formulierung der Gleichungen mit den Variablen des Drucks und der Strömungsgeschwindigkeit, die schlussendlich den Betriebszustand des Netzes charakterisieren. Durch diese Umformulierung nimmt der Lösungsvektor \mathbf{x} folgende Gestalt an:

$$\mathbf{x}_u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{n-1} \\ u_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{x}_p = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_{m-1} \\ p_m \end{bmatrix} \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_u \\ \mathbf{x}_p \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Dadurch ist eine nachträgliche Umrechnung der Simulationsergebnisse nicht notwendig. Für den reibungsbehafteten Druckverlust einer Rohrleitung kommt die bereits in Kapitel 2.2.2 beschriebene *Darcy-Weisbach* Gleichung zur Anwendung. Die ursprüngliche Form als Druckhöhendifferenz wird durch Multiplikation mit der Fluidichte ρ und der Erdbeschleunigung g in eine Druckdifferenz übergeführt (Gleichung 3.3).

$$p_{12} = \frac{\lambda \rho L}{2 d} u^2 \quad (3.3)$$

Für ein Fernwärmenetz, dessen Topologie auch geodätische Unterschiede aufweist, muss die reibungsinduzierte Druckverlustgleichung um den Term der geodätischen Druckdifferenz erweitert werden. Je nach Fließrichtung des Fluids, muss der geodätische Term addiert oder subtrahiert werden

$$p_{12} = \frac{\lambda \rho L}{2 d} u^2 \pm \rho g \Delta h \quad (3.4)$$

Die Aufstellung der Systemgleichungen nach der QH -Methode erfolgt grundsätzlich mit Rohrstrang- und Knotengleichungen. Für jedes Rohr und für jeden Knoten muss die Energie- bzw. Massenerhaltung erfüllt sein. Die Erfüllung der Massenerhaltung und somit der Kontinuitätsgleichung in einem Knoten wird allgemein mit Gleichung 3.5 beschrieben.

$$\sum \dot{m}_{ein} = \sum \dot{m}_{aus} \quad (3.5)$$

Die Massenerhaltung muss grundsätzlich auf jeden Knoten im Rohrnetzwerk angewendet werden. Mit der Inzidenzmatrix \mathbf{I} , den Dichte- und Flächenquerschnittsvektoren \mathbf{r} und \mathbf{a} erfolgt die Aufstellung des Gleichungssystems unter Verwendung des Hadamard-Produktes nach Gleichung 3.8. Durch Anwendung des Hadamard-Produktes \circ werden zwei oder mehr Matrizen elementweise miteinander multipliziert.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{1n} \circ \mathbf{r} \circ \mathbf{a} \\ \vdots \\ \mathbf{I}_{mn} \circ \mathbf{r} \circ \mathbf{a} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} \rho_1 & \dots & \rho_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{a} = \begin{bmatrix} \frac{d_1^2 \pi}{4} & \dots & \frac{d_n^2 \pi}{4} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{M} \mathbf{x}_u = 0 \quad (3.8)$$

Eine Reduzierung der Gleichungsanzahl kann dahingehend erfolgen, dass nur Knoten berücksichtigt werden, die mit mehr als einem ein- oder austretenden Rohrstrang verbunden sind. Dadurch entfallen sämtliche Endknoten, die entweder in das Netzwerk einspeisen oder daraus entnehmen. Das hat zur Folge, dass die Definition der Einspeise- und Entnahmemengen als separate Zuweisung innerhalb der Setzung der Randbedingungen stattfindet. Bei der weiteren Behandlung der Massenbilanzgleichungen wird daher die reduzierte Inzidenzmatrix \mathbf{I}_{red} , deren Endknotenzeilen entfernt wurden, verwendet.

Die Erhaltung der Energie wird in Form der erweiterten Druckverlustgleichung 3.4, unter Beachtung der initial festgelegten Strömungsrichtungen, für jeden Rohrstrang aufgestellt. Dazu müssen zuvor die Höhenunterschiede zwischen Eingangs- und Ausgangsknoten jedes Rohrstrangs im Netzwerk berechnet (Gleichung 3.9) und anschließend die dadurch resultierenden statischen Druckdifferenzen ermittelt werden (Gleichung 3.10).

$$\mathbf{h}_{dif} = \mathbf{I}^\top \mathbf{h}_{geo} \quad (3.9)$$

$$\mathbf{p}_h = (\mathbf{r}^\top \circ \mathbf{h}_{dif}) g \quad (3.10)$$

Die Aufstellung der Rohrstranggleichungen erfolgt unter Anwendung der Linearisierungsmethode nach *Wood* und *Charles* [102]. Diese basiert auf der Aufteilung des nichtlinearen Terms einer Gleichung in eine Konstante und einen linearen Teil (Gleichung 3.11). Wendet man die Methode auf die allgemeine Druckhöhenverlustgleichung an, folgt Gleichung 3.12. Dabei ist zu beachten, dass der konstante Teil der ursprünglich nichtlinearen Variable als absoluter Betrag in der Gleichung definiert wird, um die Strömungsrichtung in der Rohrleitung berücksichtigen zu können.

$$x^n = \underbrace{x^{n-1}}_{\text{konst. linear}} \underbrace{x} \quad (3.11)$$

$$\Delta H = (k |Q_0|^{n-1}) Q \quad (3.12)$$

Die für die Berechnung verwendete *Darcy-Weisbach* Gleichung 3.3 kann somit als lineare Funktion, abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit, formuliert werden Gleichung 3.13. Die Konstante $u^{(t-1)}$ stellt den initial gewählten Startwert oder den Ergebniswert der Strömungsgeschwindigkeit des vorangegangenen Iterationsschritts dar und $u^{(t)}$ die unbekannte Strömungsgeschwindigkeit des aktuellen Iterationsschrittes.

$$\Delta p = \frac{\lambda \rho L}{2d} (u^{(t-1)}) u^{(t)} \quad (3.13)$$

$$k = \frac{\lambda \rho L}{2d} \quad (3.14)$$

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} k_1 u_1^{(t-1)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & k_2 u_2^{(t-1)} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & k_n u_n^{(t-1)} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Mit dieser Erkenntnis, dem Widerstandsfaktor k (Gleichung 3.14) und der Matrix \mathbf{N} (3.15), folgt das Gleichungssystem für die Energieerhaltung für jeden Rohrstrang zu 3.16. Sämtliche geometrischen und wärmetechnischen Parameter des Rohrnetzwerkes sind als Vektoren abgespeichert und erleichtern damit die mathematische Handhabung.

$$\left[\mathbf{N} \quad (-\mathbf{I})^\top \right] \mathbf{x} = \mathbf{p}_h \quad (3.16)$$

Zu dem Widerstandsfaktor k ist anzumerken, dass die strömungsabhängige Rohrreibungszahl λ als konstant angenommen und nicht iterativ bestimmt wird. Die sich daraus ergebenden Auswirkungen werden in Kapitel 5 ausführlich diskutiert. Bisher werden ausschließlich Rohrleitungen eines Strömungsnetzwerkes mathematisch abgebildet. Weitere bedeutende Komponenten für den Betrieb des Netzwerkes sind Pumpen und Ventile. Für die Einbindung dieser Komponenten muss zunächst der qualitative Zusammenhang zwischen Druck und Förderstrom definiert werden. In einem Q - H Diagramm einer Pumpe ist dieser Zusammenhang dargestellt. Abb. 3.3 zeigt die Kennlinie einer Kreiselpumpe mit radialem Laufradtyp für eine bestimmte Drehzahl und die allgemeine Kennlinie eines Ventils. Die Förderhöhe H nimmt, ausgehend von der sogenannten Nullförderhöhe ($Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$), mit zunehmendem Förderstrom Q ab.

Das Betriebsverhalten von Kreiselpumpen lässt sich näherungsweise mit der allgemeinen Funktion einer Parabel abbilden (Gleichung 3.17). Um die Näherungsfunktion in das zu lösende Gleichungssystem implementieren zu können, wird das lineare Glied $\alpha_1 x$ vernachlässigt, die Förderhöhe in einen Förderdruck umgerechnet und der Förderstrom Q durch das Produkt $A u$ ersetzt (Gleichung 3.19).

$$f(x) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2 \quad (3.17)$$

$$H = \alpha_0 \text{ m} + \alpha_2 \frac{\text{s}^2}{\text{m}^5} Q^2 \quad (3.18)$$

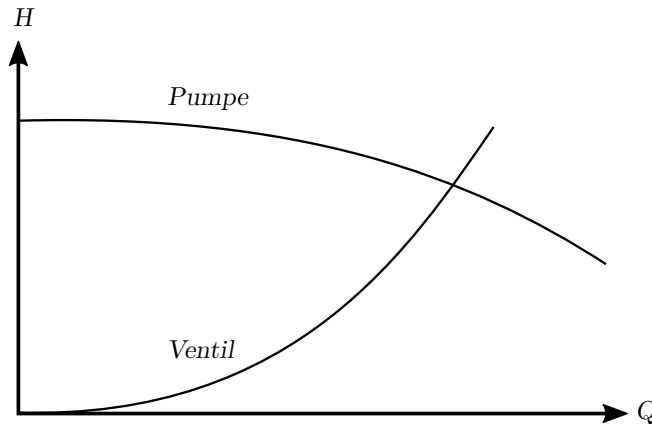


Abbildung 3.3: Q - H Pumpenkennlinie einer Kreiselpumpe mit Radiallaufrad und allgemeine Ventilkennlinie

$$\Delta p_{Pumpe} = \rho g (\alpha_0 m + \alpha_2 \frac{s^2}{m^5} A^2 u^2) \tag{3.19}$$

Die Abbildung eines Ventils erfolgt mit Hilfe des Durchflusskoeffizienten K_v . Der Durchflusskoeffizient gibt an, wie hoch der Volumenstrom durch ein Ventil bei einer Druckdifferenz über das Ventil von 1 bar und einer Fluidtemperatur zwischen 5 °C und 30 °C für eine bestimmte Öffnungsstellung des Ventils ist. Der K_v -Wert lässt sich mit Gleichung 3.20 in der Einheit m^3/h berechnen.

$$K_v = Q \sqrt{\frac{10^5 \text{ Pa } \rho}{\Delta p_{Ventil} \rho_0}} \tag{3.20}$$

Nachdem der K_v -Wert meist vom Ventilhersteller ermittelt wird und somit eine gegebene Größe ist, kann die Gleichung in die, für die Implementierung in das übergeordnete Gleichungssystem, nötige Form gebracht werden (Gleichung 3.21).

$$\Delta p_{Ventil} = \frac{\rho}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \left(\frac{A}{K_v \frac{1}{3600} \frac{\text{h}}{\text{s}}} \right)^2 u^2 10^5 \text{ Pa} \tag{3.21}$$

Bei der Umformung wurde die Referenzdichte ρ_0 durch 1000 kg/m^3 und der Volumenstrom Q durch das Produkt $A u$ ersetzt. Die Faktoren $\frac{1}{3600} \text{ h/s}$ und 10^5 Pa/bar in Gleichung 3.21 sind für die Umrechnung von m^3/h in m^3/s und von bar in Pa notwendig.

Das Gleichungssystem 3.16 beschreibt ein Netzwerk, das ausschließlich aus Rohrsträngen besteht und keine Pumpen oder Ventile beinhaltet. Sind jedoch diese Komponenten in das Netzwerk eingebunden, müssen die entsprechenden Rohrstranggleichungen durch die zuvor bestimmten Gleichungen für Pumpen und Ventile ersetzt werden. Da die Gleichungen die gleiche Form haben, erfolgt für Gleichung 3.19 und 3.21 ebenfalls eine Linearisierung nach der Methode von *Wood* und *Charles* (Gleichung 3.22 und 3.23).

$$\Delta p_{Pumpe} = \rho g (\alpha_0 m + \alpha_2 \frac{s^2}{m^5} A^2 (u^{(t-1)} u)) \tag{3.22}$$

$$\Delta p_{Ventil} = \frac{\rho}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \left(\frac{A}{K_v \frac{1}{3600} \frac{\text{h}}{\text{s}}} \right)^2 (u^{(t-1)}) u 10^5 \text{ Pa} \quad (3.23)$$

Nun werden die entsprechenden Einträge in dem Gleichungssystem 3.16 angepasst. Der Vektor \mathbf{p}_h wird um den Vektor \mathbf{s} erweitert, dessen Elemente nach 3.25 ermittelt werden.

$$\mathbf{p}_h = \mathbf{p}_h + \mathbf{s} \quad (3.24)$$

$$\mathbf{s}_i = \begin{cases} 0, & \text{wenn das Element } i \text{ keine Pumpe darstellt} \\ \rho g \alpha_0 m, & \text{wenn das Element } i \text{ eine Pumpe darstellt} \end{cases} \quad (3.25)$$

Der Widerstandsfaktor \mathbf{k} wird je nachdem, ob das Strangelement ein Rohr, eine Pumpe oder ein Ventil abbildet, nach 3.26 adaptiert.

$$\mathbf{k}_i = \begin{cases} k_i, & \text{wenn das Element } i \text{ einen Rohrstrang darstellt} \\ -\rho g \alpha_2 \frac{\text{s}^2}{\text{m}^5} A^2, & \text{wenn das Element } i \text{ eine Pumpe darstellt} \\ \frac{\rho}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \left(\frac{A}{K_v \frac{1}{3600} \frac{\text{h}}{\text{s}}} \right)^2 10^5 \text{ Pa}, & \text{wenn das Element } i \text{ ein Ventil darstellt} \end{cases} \quad (3.26)$$

Nachdem die Systemgleichungen für die Knoten und Rohrstränge aufgestellt und angepasst sind, können die Werte der Randbedingungen in Form von Vektoren definiert werden (siehe 3.27). Je nach Setzung der Randbedingungen kann jedes Element dieser Vektoren entweder den Wert -1 oder einen Wert ≥ 0 annehmen. Der Wert -1 steht für unbekannte Größen und der Wert $\neq -1$ für die festgesetzte Randbedingung für Geschwindigkeit oder Druck im Rohrnetzwerk.

$$\mathbf{u}_r = \begin{bmatrix} u_{r(1)} \\ u_{r(2)} \\ \vdots \\ u_{r(n-1)} \\ u_{r(n)} \end{bmatrix} \quad \mathbf{p}_r = \begin{bmatrix} p_{r(1)} \\ p_{r(2)} \\ \vdots \\ p_{r(m-1)} \\ p_{r(m)} \end{bmatrix} \quad \mathbf{w}_r = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_r \\ \mathbf{p}_r \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$\mathbf{w}_i = \begin{cases} 1, & \text{wenn } w_{r(i)} \neq -1 \\ 0, & \text{wenn } w_{r(i)} = -1 \end{cases} \quad (3.28)$$

Nachdem die verbraucher- und erzeugerseitigen Randbedingungen und der Druckwert im Referenzknoten definiert sind und die Umwandlung in einen Koeffizientenvektor \mathbf{w} (Gleichung 3.28) erfolgt, kann deren Einbindung in ein Gleichungssystem stattfinden (Gleichung 3.29).

$$\begin{bmatrix} w_{(1)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & w_{(2)} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & w_{(m+n)} \end{bmatrix} \mathbf{x} = \mathbf{w}_r \quad (3.29)$$

Bei der Aufstellung des Gleichungssystems ist zu beachten, dass jene Zeilen i der Diagonalmatrix und des Vektors \mathbf{w}_r aus dem System entfernt werden, wenn $\mathbf{w}_{(i)} = 0$ ist. Die aufgestellten Systemgleichungen und definierten Randbedingungen können in ein gemeinsames Gleichungssystem eingebunden werden (Gleichung 3.30).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & 0 \\ \mathbf{N} & (\mathbf{I}(-1))^\top \\ & \text{diag}(\mathbf{w}) \end{bmatrix} \mathbf{x} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{p}_h \\ \mathbf{w}_r \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Zur Lösung des linearen Gleichungssystems stehen mehrere Methoden zur Auswahl. In [15] werden die Möglichkeiten einer effizienten iterativen Lösung großer schwachbesetzter linearer Gleichungssysteme dargelegt und deren Vor- und Nachteile erörtert. Der Großteil der verwendeten Softwareumgebungen für die mathematische Modellierung verfügen bereits über umfangreiche Standardbibliotheken, die zur Lösung von Gleichungssystemen verwendet werden. Da die Umsetzung der Netzmodellierung und -simulation in MATLAB[®] erfolgt, bietet sich für die Lösung von linearen Gleichungssystemen der Backslash-Operator an. Dieser analysiert und bewertet das allgemeine lineare Gleichungssystem 3.31, um für die gegebene Struktur der Koeffizientenmatrix \mathbf{A} den optimalen Lösungsalgorithmus zu wählen.

$$\mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (3.31)$$

In Anhang A.2 ist die schrittweise Vorgehensweise des Backslash-Operators (mldivide-Befehl) dargestellt. Für das zu lösende Gleichungssystem des Strömungsnetzwerks setzt MATLAB[®] die LU-Zerlegung ein. Zuvor wird die Struktur der Koeffizientenmatrix durch den Befehl *colamd* (column approximate minimum degree permutation) dahingehend optimiert, dass die Anzahl an Nicht-Null Elementen der unteren und oberen Dreiecksmatrix minimiert und somit das Lösungsverfahren beschleunigt wird. Dazu werden die Spalten der Matrix vertauscht und die entsprechenden neuen und alten Indices in einem Vektor abgespeichert. In [14] werden die genaueren mathematischen Hintergründe des *colamd*-Befehls ausführlich erläutert. Der LU-Löser in MATLAB[®] führt bereits eine Präkonditionierung des Gleichungssystems mit einer Skalierung durch, um die Konditionszahl der Koeffizientenmatrix zu verringern. In den Gleichungen 3.32 bis 3.36 ist der schrittweise Ablauf des Lösungsalgorithmus dargestellt. Die Koeffizientenmatrix \mathbf{A}_p und der Vektor \mathbf{b}_p sind zeilenpermutierte Entwicklungen von \mathbf{A} und \mathbf{b} .

$$\mathbf{A}_p \mathbf{x} = \mathbf{b}_p \quad (3.32)$$

$$\mathbf{A}_p = \mathbf{L} \mathbf{U} \quad (3.33)$$

Mit der Substitution der Koeffizientenmatrix durch eine untere und obere Dreiecksmatrix, kann das Gleichungssystem in der Form von Gleichung 3.34 dargestellt und in weiterer Folge gelöst werden.

$$\mathbf{L} \mathbf{U} \mathbf{x} = \mathbf{b}_p \quad (3.34)$$

$$L \mathbf{y} = \mathbf{b}_p \quad (3.35)$$

$$U \mathbf{x} = \mathbf{y} \quad (3.36)$$

Die Lösung des Gleichungssystems 3.30 wird unter Beachtung des Relaxationsschrittes so oft wiederholt, bis das Konvergenzkriterium erfüllt ist. Die Relaxation soll die Konvergenz sicherstellen und mögliche Oszillationen des Ergebnisses verhindern. *Wood* und *Charles* [102] empfehlen, den Durchschnittswert der letzten zwei erfolgreichen Iterationen für das Endergebnis heranzuziehen. Der Wert des Relaxationskoeffizienten α wird für die Ermittlung der Geschwindigkeiten \mathbf{x}_u und der Drücke \mathbf{x}_p unterschiedlich angesetzt und nicht gemittelt. Der Einfluss der Relaxationskoeffizienten wird in dem Kapitel 5.1.2 näher erläutert. Die Ergebnisse für \mathbf{x}_u und \mathbf{x}_p ergeben sich nach Gleichung 3.37 und 3.38. Der Betrag von $\mathbf{x}_u^{(t)}$ in Gleichung 3.37 muss gebildet werden, da die Lösung für die Strömungsgeschwindigkeit auch negativ sein kann und infolge Oszillationen auftreten würden.

$$\mathbf{x}_u = \mathbf{x}_u^{(t-1)} (1 - \alpha_u) + |(\mathbf{x}_u^{(t)})| (\alpha_u) \quad (3.37)$$

$$\mathbf{x}_p = \mathbf{x}_p^{(t-1)} (1 - \alpha_p) + \mathbf{x}_p^{(t)} (\alpha_p) \quad (3.38)$$

3.1.2 Thermische Berechnung

Das Ziel einer thermischen Berechnung eines Fernwärmenetzes ist es, eine detaillierte Aussage über die Temperaturverteilung, den Wärmeverlusten und anderen dynamischen, wärmetechnischen Prozessen treffen zu können. Die Herleitung der Modellgleichungen erfolgt in Anlehnung an [7] und [10].

Allgemeine Transportgleichung

Die allgemeine Bilanzgleichung kann ausgehend von der Änderung des Flusses J einer beliebigen Größe ϕ über ein Volumenelement $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$ (Abb. 3.4) hergeleitet werden.

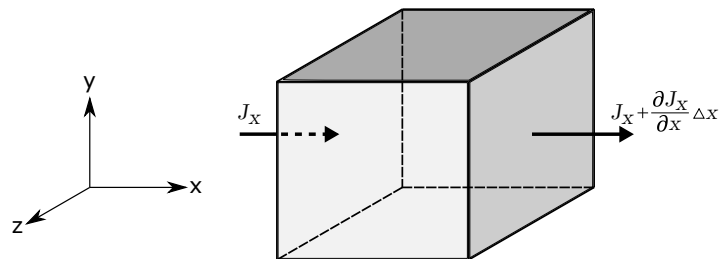


Abbildung 3.4: Flussbilanz über ein Volumenelement

Der Nettofluss in x -Richtung durch das Volumenelement (3.39) gibt den Strom der Größe pro Flächeneinheit an.

$$\left(J_x + \frac{\partial J_x}{\partial x} \Delta x - J_x \right) \Delta y \Delta z = \frac{\partial J_x}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3.39)$$

Auf das Volumenelement ΔV bezogen, ergibt sich der Nettofluss in x -Richtung:

$$\frac{\partial J_x}{\partial x} \quad (3.40)$$

Unter Beachtung aller drei Raumrichtungen folgt:

$$\frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z} = \operatorname{div}(J) = \nabla J \quad (3.41)$$

In Folge erhält man die differentielle Form einer allgemeinen Bilanz¹:

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \nabla J = S_\phi \quad (3.42)$$

Bei Betrachtung eines Fluids, besteht der Fluss J aus einem konvektiven und diffusiven Anteil²(Gleichung 3.43).

$$\begin{aligned} J &= J_{Konvektion} + J_{Diffusion} \\ J_{Konvektion} &= \rho u \phi \\ J_{Diffusion} &= -\Gamma_\phi \operatorname{grad} \phi = -\Gamma_\phi \nabla \phi \end{aligned} \quad (3.43)$$

Einsetzen des konvektiven und diffusiven Flusses in Gleichung 3.42 liefert die allgemeine konservative oder differentielle Form der Transportgleichung, die die Basis für die Modellbildung des thermischen Verhaltens des Fernwärmenetzes darstellt (Gleichung 3.44)³. In Abb. 3.5 ist der allgemeine Transport einer beliebigen physikalischen Größe grafisch dargestellt.

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi)}_{\text{instationär}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \phi)}_{\text{Konvektion}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i})}_{\text{Diffusion}} + \underbrace{S_\phi}_{\text{Quelle/Senke}} \quad (3.44)$$

Diese beschreibt die zeit- und ortsabhängige Veränderung der beliebigen spezifischen Größe⁴ ϕ . Das Produkt $\rho \phi$ wandelt die massenbezogene Größe in eine volumenbezogene Größe um. Je nachdem, welche Größe ϕ ersetzt, kommen den Variablen Γ_ϕ und S_ϕ eine andere Bedeutung zu.

¹ mit $\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t}$ = zeitliche Änderungsrate und S_ϕ = Quellen- oder Senkenterm

² mit Γ_ϕ = allgemeiner Diffusionskoeffizient

³ mit der Einsteinschen Summationskonvention: $\frac{\partial}{\partial x_i}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i}) = \frac{\partial}{\partial x_1}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_1}) + \frac{\partial}{\partial x_2}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_2}) + \frac{\partial}{\partial x_3}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_3})$ und der kartesischen Tensornotation: $x_i, i = 1, 2, 3$

⁴ spezifische Größen beziehen sich allgemein auf die Masse

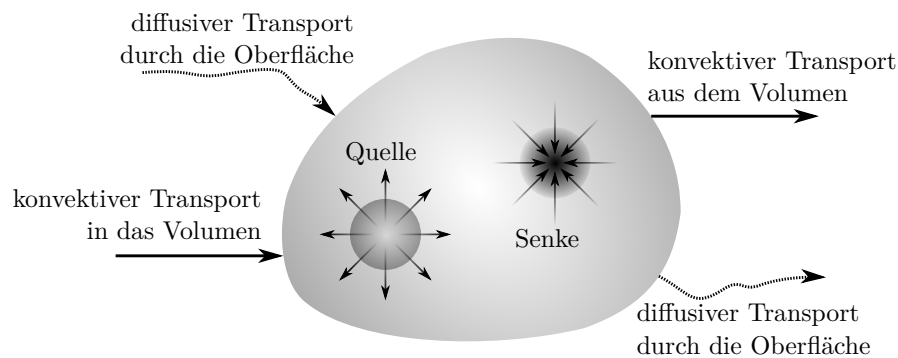


Abbildung 3.5: Erhaltung und Transport einer physikalischen Größe

Bezieht sich die Beschreibung der Gleichung auf das Verhalten eines Fluids, kann ϕ beispielsweise folgende Größen annehmen:

- Geschwindigkeitskomponente $\phi = u$ (Impulserhaltung in x-Richtung)
- spezifische Enthalpie $\phi = h$ (Energieerhaltung)
- Turbulenzgröße (z.B. turbulente kinetische Energie)
- ...

Erhaltung der Masse

Die Erhaltung der Masse bedeutet, dass eine Masse nicht produziert oder vernichtet werden kann. Durch direktes Einsetzen von $\phi = 1$ in die allgemeine Transportgleichung erhält man die differentielle Form der Massenerhaltung (Gleichung 3.45), die auch Kontinuitätsgleichung genannt wird.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3.45)$$

Bei der Modellierung des Fernwärmenetzes werden folgende Vereinfachungen bezüglich der Strömungseigenschaften angenommen:

- Eindimensionale Strömung
- Inkompressibles Strömungsmedium
- Kleine Änderungen des Drucks (keine Druckstöße)

Da sich durch diese Annahmen die Dichte über die Zeit nicht ändert, ist der Term $\frac{\partial}{\partial t}(\rho) = 0$. Das führt zu einer vereinfachten Kontinuitätsgleichung 3.46 in differentieller Form.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u) = 0 \quad (3.46)$$

Erhaltung des Impulses

Mit $\phi = u$ beschreibt die allgemeine Transportgleichung die Impulserhaltung. Ausgehend von Gleichung 3.47 wurde zur besseren Veranschaulichung die dreidimensionale Form der Impulserhaltung in x-Richtung abgeleitet. Der Diffusionsterm und der Quellterm ergibt sich aus der Betrachtung der Impulsänderung, aufgrund der auf die Volumenoberfläche wirkenden Druckkräfte und viskosen Kräfte, als auch der auftretenden Gravitationskräfte.

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho g_j \quad (3.47)$$

Für ein Newton'sches Fluid, dessen Fließverhalten linear viskos ist, gilt für die ein- und zweidimensionalen Schubspannungen τ_{xx} , $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ und $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ der Zusammenhang nach Gleichung 3.48.

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \\ \tau_{xy} &= \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ \tau_{xz} &= \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3.48)$$

Mit der Formulierung der Schubspannung τ ergibt sich die allgemeine Impulserhaltungsgleichung in x-Richtung zu:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u)}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \rho g_x \quad (3.49)$$

Erhaltung der Energie

Wenn in der allgemeinen Transportgleichung ϕ durch die spezifische Enthalpie h und der Diffusionsterm durch das Fouriersche Wärmeleitungsgesetz ausgedrückt wird, erhält man die Gleichung für die Energieerhaltung 3.50. Treten nur kleine Druckänderungen auf, ist es vertretbar eine konstante isobare Wärmekapazität anzunehmen. Infolge kann die Energieerhaltung mit der Beziehung $dh = c_p dT$ in der Form von Gleichung 3.51 angegeben werden.

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u \rho h) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{dif} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + S_h \quad (3.50)$$

$$c_p \frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + c_p \frac{\partial(u \rho T)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{dif} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + S_h \quad (3.51)$$

Diskretisierung

Da die Differentialgleichungen der Massen-, Impuls- und Energieerhaltung nur in speziellen Fällen analytisch lösbar sind, erfolgt eine Diskretisierung des zu untersuchenden Gebietes und der Gleichungen, um eine numerische Lösung zu ermöglichen. Für die Diskretisierung stehen grundsätzlich drei Ansätze zur Verfügung:

- *Finite Differenzen Methode:*
Die Finite Differenzen Methode verwendet die Erhaltungsgleichungen in differentieller Form. An den Punkten des Diskretisierungsgitters werden die partiellen Ableitungen der Erhaltungsgleichungen approximiert (Punktkollokation). Sie kann für einfache Geometrien mit strukturierten Gittern verwendet werden.
- *Finite Volumen Methode:*
Für den Einsatz der Finite Volumen Methode werden die Erhaltungsgleichungen in integraler Form verwendet. Das betrachtete Rechengebiet wird in eine endliche Anzahl an Teilvolumina unterteilt. Darauf erfolgt die Anwendung der integralen Erhaltungsgleichung auf jedes Teilvolumen (Gebietskollokation). Diese Methode eignet sich auch für komplexe Geometrien und ist die am häufigsten angewendete Methode in der Strömungsanalyse.
- *Finite Elemente Methode:*
Bei der Finite Elemente Methode erfolgt ebenfalls eine Unterteilung in endliche Elemente. Die Gleichungen jedes Elements werden jedoch zusätzlich durch eine Gewichtsfunktion erweitert. Ein Vorteil dieser Methode ist, die Möglichkeit beliebige Geometrien behandeln zu können und die einfache Verfeinerung eines Gitters.

Numerisches Modell

Die thermische Modellierung eines Fernwärmestrange kann durch Vereinfachungen auf die Abbildung einer Rohrströmung mit verschiedenen Randbedingungen reduziert werden. Wie bereits bei der Beschreibung der Massenerhaltung erwähnt, wird die Rohrströmung als eindimensional und inkompressibel angenommen. Die räumliche Diskretisierung basiert auf der Finite Volumen Methode und ist in Abb. 3.6 dargestellt. Über jeden Rohrstrang wird ein äquidistantes Gitter gelegt, dessen Zellenmittelpunkte von einem Teilvolumen ΔV umgeben ist und sich nur in x -Richtung ausbreitet¹.

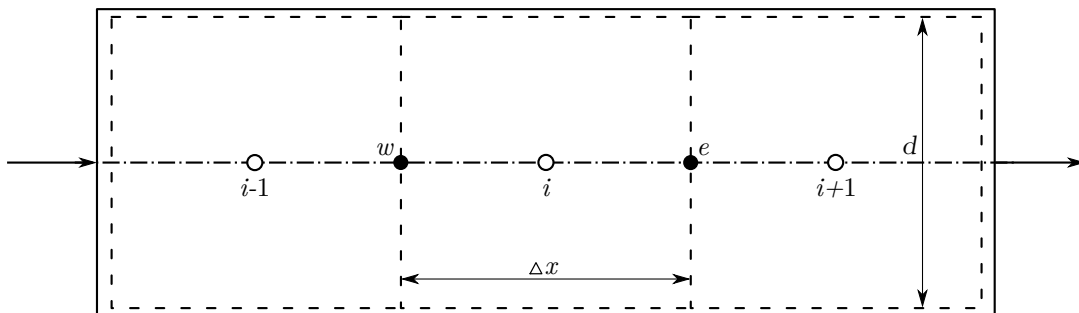


Abbildung 3.6: Eindimensionale Diskretisierung einer Rohrströmung

Der Ausgangspunkt für die Finite Volumen Methode ist die integrale Form der Erhaltungsgleichungen. Daher werden zunächst die differentiellen Massen-, Impuls- und Energiegleichungen entsprechend umgeformt und für den eindimensionalen Fall dargestellt. Um die integrale Form zu erhalten, werden die Erhaltungsgleichungen über das umgebende Teilvolumen integriert. Die Massenerhaltung vereinfacht sich bereits durch die Annahme der Inkompressibilität des Fluids zu dem Ausdruck 3.46. Aus diesem Ausdruck folgt die Aussage, dass sich das Produkt ρu

¹ w bezeichnet den Punkt an der westseitigen Volumengrenze
 e bezeichnet den Punkt an der ostseitigen Volumengrenze

über den Weg x nicht ändert und somit der eintretende Massenstrom gleich dem austretenden Massenstrom ist (Gleichung 3.52).

$$\dot{m}_w = \dot{m}_e \quad (3.52)$$

Die Impulserhaltung wird in weiterer Folge nicht mehr berücksichtigt, da das thermische Verhalten des Systems ohne die Auswirkungen von schnellen Druckänderungen betrachtet werden soll. Der Einfluss von Gravitationskräften und Reibungskräften wird bereits in der stationären hydraulischen Berechnung näherungsweise berücksichtigt. Daher kann die Strömungsgeschwindigkeit als vorgegebene Randbedingung in die thermische Berechnung einfließen. Aus der Integralbildung der Erhaltungsgleichung für die Energie folgt Gleichung 3.53. Bei Rohrströmungen in Fernwärmenetzen dominiert der konvektive Transport der thermischen Energie gegenüber dem diffusiven Transport. Daher kann zur Vereinfachung der Diffusionsterm der Energieerhaltung vernachlässigt werden (Gleichung 3.54).

$$\int_{\Delta V} c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} dV + \int_{\Delta V} c_p u \rho \frac{\partial T}{\partial x} dV = \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial x} (k_{dif} \frac{\partial T}{\partial x}) dV + \int_{\Delta V} S_h dV \quad (3.53)$$

$$\int_{\Delta V} c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} dV + \int_{\Delta V} c_p u \rho \frac{\partial T}{\partial x} dV = \int_{\Delta V} S_h dV \quad (3.54)$$

Durch Aufteilung des Kontrollvolumens in das Produkt $dV = A dx$ folgt die eindimensionale Formulierung:

$$\int_w^e c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} A dx + \int_w^e c_p u \rho \frac{\partial T}{\partial x} A dx = \int_w^e S_h A dx \quad (3.55)$$

Anschließendes Integrieren über die Ausbreitung des Kontrollvolumens in x -Richtung liefert:

$$\left(c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} \right)_i \Delta x + c_p u \rho (T_e - T_w) = S_h \Delta x \quad (3.56)$$

$$\left(c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} \right)_i \Delta x = c_p u \rho (T_w - T_e) + S_h \Delta x \quad (3.57)$$

Da die Temperatur nur in den Zellenmittelpunkten der Kontrollvolumina bestimmt werden, jedoch auch die Temperaturen der benachbarten Zellenwände in der Bestimmungsgleichung vorkommen, ist eine Profilannahme des Temperaturverlaufs zwischen den Knotenpunkten notwendig. Zwischenwerte werden häufig mit einer linearen Interpolation (Zentral-Differenzen-Schema) ermittelt (Abb. 3.7). Bei Anwendung dieser Methode kann es jedoch zu unrealistischen Approximationen kommen und es treten Instabilitäten auf.

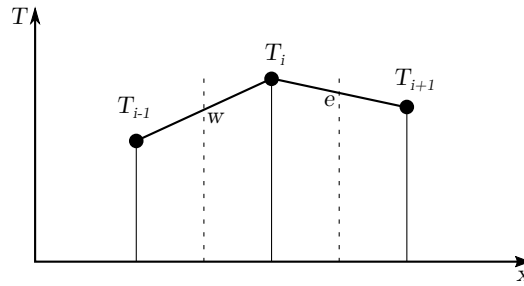


Abbildung 3.7: Ermittlung der Temperaturen an den KV-Grenzwänden durch lineare Interpolation

Eine bessere Annäherung des Temperaturverlaufs kann mit dem 1st Order Upwind-Schema gemacht werden, wenn der Konvektionsterm in der allgemeinen Transportgleichung über dem Diffusionsterm dominiert. Dieses Schema weist den Werten zwischen den Kontrollvolumen den Wert des stromaufwärts liegenden Knoten zu (Abb. 3.8).

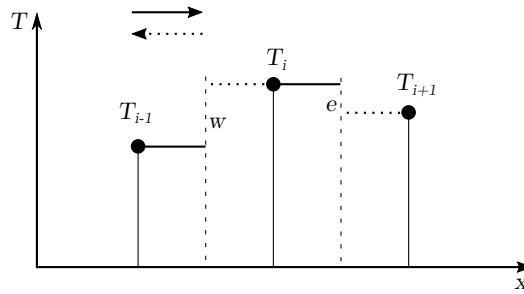


Abbildung 3.8: Ermittlung der Temperaturen an den KV-Grenzwänden durch das 1st Order Upwind-Schema

$$S_h = -k_{rad} \frac{A_{rad}}{\Delta V} (T_i - T_u) \tag{3.58}$$

Mit den Approximationen der Zellwandtemperaturen $T_w = T_{i-1}$ und $T_e = T_i$ und dem radialen Wärmeverlust S_h an die Umgebung (Gleichung 3.58), ergibt sich die Energiebilanz zu:

$$\left(c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} \right)_i = c_p \frac{u \rho}{\Delta x} (T_{i-1} - T_i) - k_{rad} \frac{A_{rad}}{\Delta V} (T_i - T_u) \tag{3.59}$$

Umordnung und Sortierung nach den Knotentemperaturen liefert:

$$c_p \rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_i = T_{i-1} \left(c_p \frac{u \rho}{\Delta x} \right) + T_i \left(-k_{rad} \frac{A_{rad}}{\Delta V} - c_p \frac{u \rho}{\Delta x} \right) + T_u \left(k_{rad} \frac{A_{rad}}{\Delta V} \right) \tag{3.60}$$

Nach der räumlichen Diskretisierung der Differentialgleichung folgt die zeitliche Behandlung der Energiebilanz. Für die zeitliche Diskretisierung kommt ein voll implizites Verfahren zum Einsatz, dessen größter Vorteil die unbedingte Stabilität ist. Jedoch ist die Lösung aufwendiger als bei expliziten Verfahren, weil die Rechenpunkte untereinander gekoppelt sind und daher rekursiv vorgegangen werden muss. Bei expliziten Verfahren können die Unbekannten Größen

direkt aus den bekannten Werten berechnet werden, da keine Kopplung zu den benachbarten Rechenpunkten besteht. Das führt zu einer schnellen Lösung des Gleichungssystems, aber auch zu Beschränkungen der Zeitschrittweite aufgrund der numerischen Stabilität (CFL-Kriterium, siehe [35]). Die Integration über den Zeitschritt Δt liefert einen Zusammenhang zwischen den Werten des aktuellen Zeitpunktes t und dem nächsten Zeitpunkt $t + 1$:

$$\int_{\Delta t} c_p \rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_i dt = \int_{\Delta t} \left(T_{i-1} \left(c_p \frac{u \rho}{\Delta x} \right) + T_i \left(-k_{rad} \frac{A_{rad}}{\Delta V} - c_p \frac{u \rho}{\Delta x} \right) + T_u \left(k_{rad} \frac{A_{rad}}{\Delta V} \right) \right) dt \quad (3.61)$$

$$c_p \rho (T_i^{t+1} - T_i^t) = \left(T_{i-1}^{t+1} \left(c_p \frac{u \rho}{\Delta x} \right) + T_i^{t+1} \left(-k_{rad} \frac{A_{rad}}{\Delta V} - c_p \frac{u \rho}{\Delta x} \right) + T_u \left(k_{rad} \frac{A_{rad}}{\Delta V} \right) \right) \Delta t \quad (3.62)$$

Durch Zusammenfassung der Koeffizienten und Umsortierung der Gleichung, ergibt sich die Energiebilanz für das Kontrollvolumen ΔV zu:

$$a T_{i-1}^{t+1} + b T_i^{t+1} = d \quad (3.63)$$

mit den Koeffizienten:

$$a = -c_p \frac{u \rho}{\Delta x} \Delta t \quad (3.64)$$

$$b = \left(k_{rad} \frac{A_{rad}}{\Delta V} + c_p \frac{u \rho}{\Delta x} \right) \Delta t + c_p \rho \quad (3.65)$$

$$d = T_u \left(k_{rad} \frac{A_{rad}}{\Delta V} \right) \Delta t + (c_p \rho) T_i^t \quad (3.66)$$

Die abgeleitete Energiebilanz wird für jedes Kontrollvolumen des betrachteten Rechengebiets aufgestellt und in ein lineares Gleichungssystem übergeführt. Die Koeffizientenmatrix dieses Systems hat die Form einer unteren bidiagonalen Matrix (3.67) für die $a_1 = 0$ gelten muss.

$$\begin{bmatrix} b_1 & 0 & \dots & 0 \\ a_2 & b_2 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & a_n & b_n \end{bmatrix} \mathbf{T}^{t+1} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

Das Gleichungssystem kann sehr einfach sequentiell gelöst werden. Es kann aber ebenso eine abgewandelte Version des effizienten *Thomas-Algorithmus* (auch *Richtmeyer-Algorithmus* genannt) für tridiagonale Gleichungssysteme angewendet werden. Die Ergebnisse der thermischen Berechnung sind die Temperaturen in den Zellenmittenpunkten des diskretisierten Rohres.

Berechnung der Knotentemperatur

Für die Berechnung der Temperatur eines Knotens stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Eine ist die Anwendung der zuvor definierten Gleichungen für ein räumlich diskretisiertes Rechengebiet (= Knotenvolumen). Da aber das Volumen von Knotenpunkten vergleichsweise

klein zu den Volumina der Rohrleitungen ist, können Knoten vereinfacht als ideale Mischer ohne thermische Trägheit betrachtet werden. Die Temperatur ergibt sich durch Bildung des massenstrombezogenen arithmetischen Mittel der eingehenden Enthalpieströme (Gleichung 3.68).

$$T_k = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{m}_i c_w T_i}{\sum_{i=1}^n \dot{m}_i c_w} \quad (3.68)$$

Da sich die spezifische Wärmekapazität für Wasser nur geringfügig mit der Temperatur ändert, kann diese als konstant angenommen werden. Daraus folgt die einfache Mischungsgleichung für die Berechnung der Knotentemperatur zu:

$$T_k = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{m}_i T_i}{\sum_{i=1}^n \dot{m}_i} \quad (3.69)$$

3.1.3 Thermohydraulische Berechnung

Die Ansätze für die Berechnung des hydraulischen und thermischen Verhaltens von Fernwärmenetzen können zu einer gemeinsamen thermohydraulischen Berechnungsmethode kombiniert werden. In Abb. 3.9 ist der Programmablauf der thermohydraulischen Berechnung dargestellt.

Nachdem die Daten zur Beschreibung der Netzstruktur und des Betriebs des Fernwärmenetzes für die numerische Verwendung aufbereitet und abgespeichert werden, erfolgt die Initialisierung der Startwerte für alle Variablen im Vorlauf und Rücklauf des Netzes. Anschließend lässt sich das Gleichungssystem mit Knotengleichungen, Stranggleichungen und den Randbedingungen befüllen. Letztere bestehen aus einer Druckvorgabe eines beliebigen Knotens im Vorlauf und im Rücklauf und der Vorgabe der Geschwindigkeit in den Entnahme- und Einspeisesträngen. Die Umrechnung der thermischen Last eines Verbrauchers in eine Strömungsgeschwindigkeit des Wärmeträgers erfolgt mit Gleichung 3.70. \dot{Q} ist die zu übertragende Wärmeleistung und ΔT die Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf im Fernwärmenetz. Die Einspeisung in das Rücklaufnetz wird mit einer konstanten Temperatur vorgegeben, aus der mit der aktuellen Temperatur im Vorlaufnetz die Temperaturdifferenz berechnet werden kann.

$$u_V = \frac{\dot{Q}}{\rho A c_w \Delta T} \quad (3.70)$$

Da die Massenerhaltung im gesamten Netz erfüllt sein muss, ist die einzuspeisende Masse gleich der bei den Verbrauchern entnommenen Masse. In vermaschten Fernwärmenetzen ist die Einspeisung meist auf mehrere Punkte im Netz verteilt. Je nach Auslastung und Einsatzplanung der Einspeiser, erfolgt die Aufteilung des gesamten einzuspeisenden Massenstroms auf die einzelnen Einspeisestellen. Die Einspeisung in das Rücklaufnetz findet bei den Verbrauchern und die Entnahme bei den thermischen Erzeugern statt. Um der Massenerhaltung in den Verbrauchern und den Erzeugern zu genügen, sind die Massenströme im Vor- und Rücklauf in den entsprechenden Strängen ident. Damit das Gleichungssystem nicht überstimmt wird, ist es wichtig, die Geschwindigkeit in einem Endstrang als unbekannt zu deklarieren. Nachdem das Gleichungssystem aufgestellt ist, wird es nach der beschriebenen Methode gelöst. Daraus

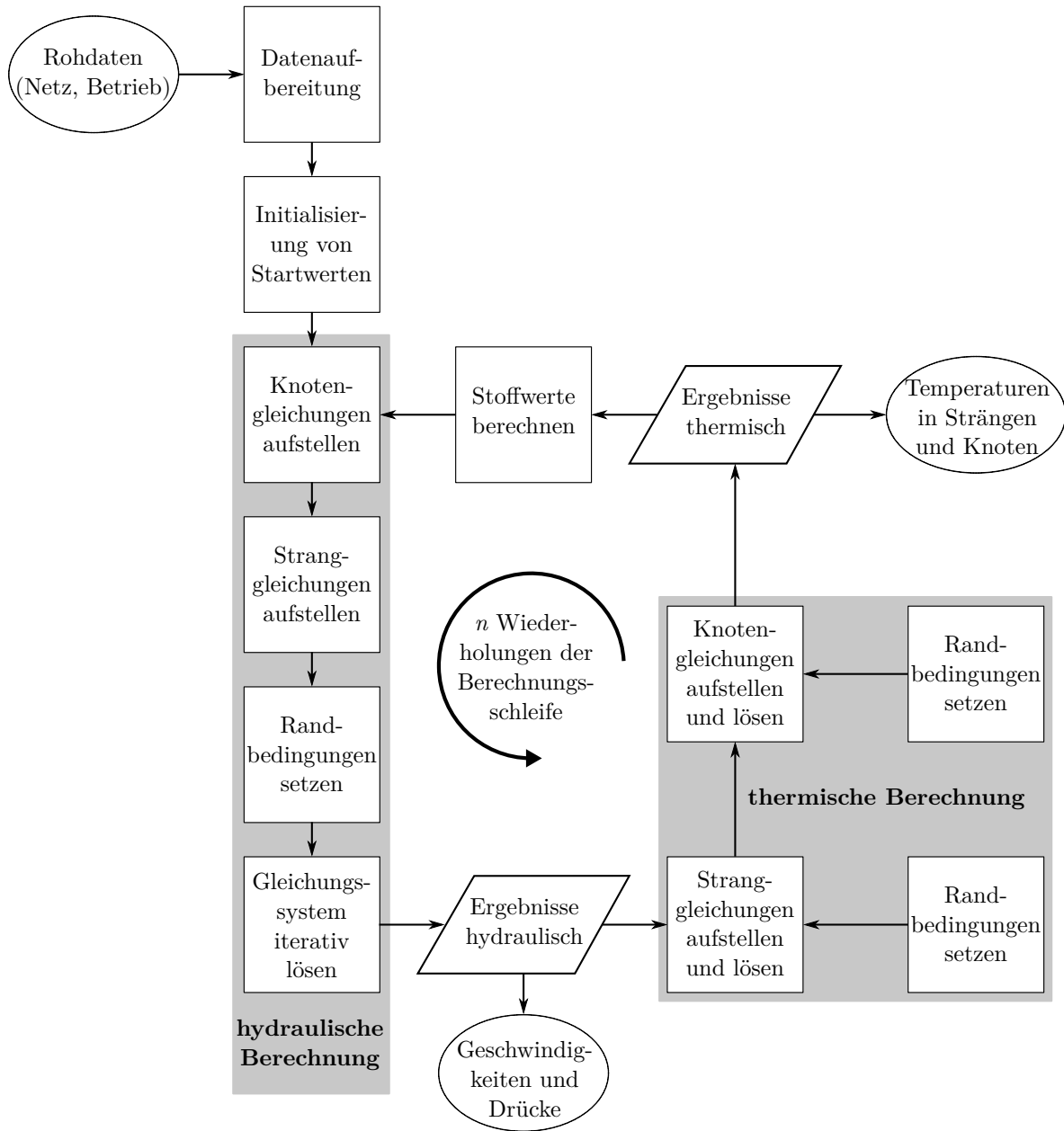


Abbildung 3.9: Programmablauf der thermohydraulischen Berechnung für n Zeitschritte

ergeben sich die Geschwindigkeits- und Druckverteilung im Fernwärmenetz. Diese Ergebnisse stellen einen Teil der Randbedingungen für die transiente thermische Berechnung dar. Unter Berücksichtigung weiterer Randbedingungen, wie die Temperatur des Einspeisers, werden die Temperaturen in den Strängen und Knoten berechnet. Aufgrund der neuen Temperaturverteilung im Fernwärmenetz ergeben sich Änderungen der verwendeten Stoffwerte, die in die Berechnung des nächsten Zeitschritts eingehen. Die sich daraus ergebende Berechnungsschleife wird je nach Simulationszeitraum und definierter zeitlichen Diskretisierung n mal wiederholt.

3.2 Berechnung der Betriebsgrößen von Gasnetzen

Bei der Betrachtung von Gasnetzen sind vorwiegend die hydraulischen Betriebseigenschaften von Interesse. Daher beschränkt sich die Methodik für die Behandlung der Gasnetze auf die Anwendung hydraulischer Verfahren. Da bereits in Kapitel 3.1 eine stabile und schnelle Methode für die Behandlung inkompressibler Rohrströmungen entwickelt wurde, wird diese als Ausgangspunkt für die Berechnung der hydraulischen Kennwerte eines Gasnetzes angewendet. Zum einen soll die Methode mit Hochdruck- und Niederdrucknetzen kompatibel sein und zum anderen sollen vor allem bei sehr großen weit verzweigten und vermaschten Netzen die kompressiblen Eigenschaften des Gases näherungsweise abgebildet werden können.

Ein kompressibles Medium, das in einem Rohr mit konstantem Querschnitt strömt, erfährt durch Zu- oder Abfuhr von Wärme eine Beschleunigung. Im Falle von reibungsbehafteten Rohrströmungen wird mechanische Energie dissipiert. Diese führt zur Erhöhung der thermischen inneren Energie und somit zu einer Erhöhung der Temperatur und einem Sinken der Dichte, unter der Annahme eines konstanten Drucks. Bleibt die Temperatur des strömenden Fluids über die Rohrlänge konstant, ändert sich die Dichte in Abhängigkeit des Drucks (siehe Abb. 3.10). Im Gegensatz zu der inkompressiblen Betrachtung einer Rohrströmung, bei der eine konstante Strömungsgeschwindigkeit angenommen wird, ergeben sich bei der kompressiblen Strömung unterschiedliche Geschwindigkeiten zwischen Rohreintritt und Rohraustritt $u_e \neq u_a$.

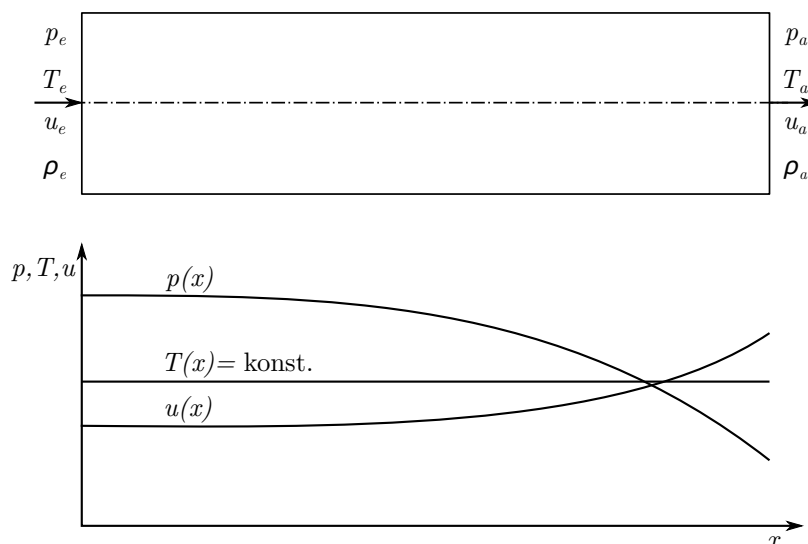


Abbildung 3.10: Darstellung des Verlaufs der Zustandsgrößen einer isothermen kompressiblen eindimensionalen Rohrströmung

Die Berechnung der hydraulischen Kennwerte des Gasnetzes erfolgt unter der Annahme, dass die Gasverteilung im Netz als stationärer Prozess stattfindet. Infolgedessen ist die Speicherung von Masse in dem Gasnetz nicht möglich. Daraus folgt mit der Massenerhaltung über ein Rohr, dass der eintretende Massenstrom gleich dem austretenden Massenstrom ist (Gleichung 3.71). Durch Einsetzen von $\dot{m} = \rho u A$ und Umformen der Gleichung, erhält man das Verhältnis der Geschwindigkeiten zwischen Rohraustritt und -eintritt (Gleichung 3.72).

$$\dot{m}_e = \dot{m}_a \quad \rho_e u_e A_e = \rho_a u_a A_a \quad (3.71)$$

$$\frac{u_a}{u_e} = \frac{\rho_e}{\rho_a} \frac{A_e}{A_a} \quad (3.72)$$

Im folgenden soll die Bestimmungsgleichung für den Druckverlust einer reibungsbehafteten isothermen Rohrströmung hergeleitet werden. Die Annahme einer gleich bleibenden Temperatur des Fluids über die Rohrlänge, ist bei nicht isolierten Gasleitungen berechtigt, da von einem ausreichenden Wärmeaustausch zwischen dem Fluid und der Umgebung ausgegangen werden kann. Dies bedeutet, dass die Dissipationsenergie ständig in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben wird. Den Ausgangspunkt für die allgemeine eindimensionale reibungsbehaftete Strömung bildet die Eulersche Bewegungsgleichung für Newtonsche Fluide in differentieller Form:

$$u \, du + \frac{dp}{\rho} + \frac{d\tau}{\rho} = 0 \quad (3.73)$$

Der Term $\frac{d\tau}{\rho}$ in Gleichung 3.73 repräsentiert die Dissipation von mechanischer Energie aufgrund der Reibung zwischen Fluid und Rohrwand und zwischen den Fluidteilchen. Die thermische Zustandsgleichung für ideale Gase 3.74 lässt sich durch Differentiation in der Form von Gleichung 3.75 darstellen.

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (3.74)$$

$$\frac{dp}{p} - \frac{d\rho}{\rho} = \frac{dT}{T} \quad (3.75)$$

Durch Annahme eines konstanten Strömungsquerschnitts $A_e = A_a$ über die Rohrlänge, ergibt sich die Kontinuitätsgleichung in differentieller Form zu:

$$\frac{d\dot{m}}{\dot{m}} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{du}{u} = 0 \quad (3.76)$$

Einsetzen der differentiellen Kontinuitätsgleichung 3.76 in die differentielle thermische Zustandsgleichung und Substitution von p durch $R\rho T$ liefert die, durch Geschwindigkeits- und Temperaturänderungen resultierende, Druckänderung (Gleichung 3.77).

$$\frac{dp}{\rho} = RT \left(\frac{dT}{T} - \frac{du}{u} \right) \quad (3.77)$$

Mit dieser Druckänderungsbeziehung und der spezifischen Reibungsarbeit (Gleichung 3.78) folgt die umgeformte Eulersche Bewegungsgleichung zu Gleichung 3.79.

$$\frac{\tau}{\rho} = \lambda \frac{x}{d} \frac{u^2}{2} \quad (3.78)$$

$$u \, du + R \, dT - RT \frac{du}{u} + \frac{\lambda c^2 \, dx}{2 d_h} = 0 \quad (3.79)$$

Für die weitere Vorgehensweise kann aufgrund der angenommenen isothermen Strömung der Term $R \, dT$ vernachlässigt werden. Unter Berücksichtigung dieser Vereinfachung und einer Umformung, nimmt die zu integrierende Gleichung die Form von Gleichung 3.80 an.

$$\left(1 - \frac{RT}{u^2} \right) u \, du + \frac{\lambda u^2 \, dx}{2 d_h} = 0 \quad (3.80)$$

Betrachtet man ein Rohr der Länge L , so resultiert nach der Integration der Gleichung 3.80 die Bestimmungsgleichung für die isotherme kompressible Rohrströmung. Der Vergleich der drei Terme in Bezug auf deren Größenordnung zeigt, dass der erste Term $2 \ln\left(\frac{u_a}{u_e}\right)$ gegenüber den anderen Termen verschwindend klein ist und daher näherungsweise vernachlässigt werden kann.

$$2 \ln\left(\frac{u_a}{u_e}\right) + RT \left(\frac{1}{u_a^2} - \frac{1}{u_e^2} \right) + \lambda \frac{L}{d} = 0 \quad (3.81)$$

Mit dieser Vereinfachung und der Umformung mit Hilfe der thermischen Zustandsgleichung für isotherme Prozesse (Gleichung 3.82), folgt die Druckverlustgleichung einer eindimensionalen kompressiblen und isothermen Rohrströmung für den stationären Prozess (Gleichung 3.83).

$$\frac{p_e}{\rho_e} = \frac{p_a}{\rho_a} \quad (3.82)$$

$$p_e - p_a = p_e \left(1 - \sqrt{1 - \lambda \frac{L}{d} \frac{\rho_e}{p_e} u_e^2} \right) \quad (3.83)$$

Durch Ergänzung des geodätischen Druckunterschieds zwischen Eintritt und Austritt der Rohrleitung, erhält man die endgültige Bestimmungsgleichung für die Druckdifferenz 3.84.

$$p_e - p_a = p_e \left(1 - \sqrt{1 - \lambda \frac{L}{d} \frac{\rho_e}{p_e} u_e^2} \right) \pm \rho g \Delta h \quad (3.84)$$

Diese Gleichung muss so umformuliert werden, dass sie in das bereits entwickelte Gleichungssystem aus Kapitel 3.1 integrierbar ist:

$$\rho_e \lambda p_e u_e^2 \frac{L}{d} + p_a^2 - p_e^2 - 2 p_a \Delta p_{geo} = \Delta p_{geo}^2 \quad (3.85)$$

Gegenüber der Druckverlustgleichung nach *Darcy-Weisbach* für inkompressible Medien, ist die Linearisierung der Gleichung 3.85 etwas aufwendiger. Die quadratischen Terme der Drücke p_e und p_a werden entsprechend der Vorgangsweise nach *Wood* und *Charles* behandelt. Ergänzend zu dieser Linearisierung muss p_e im Term $\rho_e \lambda p_e u_e^2 \frac{L}{d}$ als Konstante definiert werden. Damit die Information des Strömungsverlaufes erhalten bleibt, muss der Term Δp_{geo}^2 durch das Produkt $|\Delta p_{geo}| \Delta p_{geo}$ ersetzt werden.

$$\rho_e \lambda p_e^{(t-1)} u_e^{(t-1)} u_e \frac{L}{d} + (p_a^{(t-1)} - 2 \Delta p_{geo}) p_a - p_e^{(t-1)} p_e = |\Delta p_{geo}| \Delta p_{geo} \quad (3.86)$$

Der Herleitung der allgemeinen linearisierten Formulierung der Druckdifferenz in einer Rohrleitung, folgt nun die Implementierung in das Gleichungssystem für ein vermaschtes Rohrnetzwerk. In einem ersten Schritt wird der Lösungsvektor \mathbf{x}_G definiert (3.87). Da die Strömungsgeschwindigkeit in einem kompressiblen Rohr nicht konstant ist, stellt der Lösungsvektor \mathbf{x}_{Gu} die Geschwindigkeiten des Fluids am Rohreintritt dar.

$$\mathbf{x}_{Gu} = \begin{bmatrix} u_{1e} \\ u_{2e} \\ \vdots \\ u_{(n-1)e} \\ w_{ne} \end{bmatrix} \quad \mathbf{x}_{Gp} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_{m-1} \\ p_m \end{bmatrix} \quad \mathbf{x}_G = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{Gu} \\ \mathbf{x}_{Gp} \end{bmatrix} \quad (3.87)$$

Da die Massenerhaltung in den Knoten des Gasnetzes genauso erfüllt sein muss wie in einem Fernwärmenetz, kann der Satz von Gleichungen für die Beschreibung der Kontinuität (Gleichung 3.8) mit der Inzidenzmatrix \mathbf{I}_G des Gasnetzes übernommen werden.

$$\mathbf{M}_G = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{G1n} \circ \mathbf{r}_G \circ \mathbf{a}_G \\ \vdots \\ \mathbf{I}_{Gmn} \circ \mathbf{r}_G \circ \mathbf{a}_G \end{bmatrix} \quad (3.88)$$

$$\mathbf{r}_G = \begin{bmatrix} \rho_{G1e} & \dots & \rho_{Gne} \end{bmatrix} \quad \mathbf{a}_G = \begin{bmatrix} \frac{d_1^2 \pi}{4} & \dots & \frac{d_n^2 \pi}{4} \end{bmatrix} \quad (3.89)$$

$$\mathbf{M}_G \mathbf{x}_{Gu} = 0 \quad (3.90)$$

Die geometrischen Parameter, Stoffwerte und die Rohrreibungszahl können wieder zu einem Widerstandsfaktor k_G zusammengefasst (Gleichung 3.91) werden.

$$k_G = \frac{\lambda \rho_e L}{d} \quad (3.91)$$

Durch die Erweiterung der Diagonalelemente der Matrix \mathbf{N} mit $u_j^{(t-1)} p_{je}^{(t-1)}$ erhält man die Matrix \mathbf{N}_G (3.92), wobei $p_{je}^{(t-1)}$ der Druck am Eintritt des betrachteten Rohres ist.

$$\mathbf{N}_G = \begin{bmatrix} k_{G1} u_{1e}^{(t-1)} p_{1e}^{(t-1)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & k_{G2} u_{2e}^{(t-1)} p_{2e}^{(t-1)} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & k_{Gn} u_{ne}^{(t-1)} p_{ne}^{(t-1)} \end{bmatrix} \quad (3.92)$$

Die statische Druckdifferenz in einem Rohr, aufgrund eines geodätischen Höhenunterschieds, ergibt sich mit der mittleren Dichte \mathbf{r}_{Gm} zwischen Rohreintritt und Rohraustritt zu Gleichung 3.94.

$$\mathbf{h}_{Gdif} = -\mathbf{I}_G^\top \mathbf{h}_{geo} \quad (3.93)$$

$$\mathbf{p}_{Gh} = (\mathbf{r}_{Gm}^\top \circ \mathbf{h}_{Gdif}) g \quad (3.94)$$

Mit der Matrix $\mathbf{E} = (e_{ij})$ und dem Matrizenprodukt $-\mathbf{I}_G^\top \text{diag}(\mathbf{x}_{Gp}^{(t-1)})$ werden die Koeffizienten für die Variablen p_a aus Gleichung 3.86 in der Matrix \mathbf{G} dargestellt.

$$(e_{ji}) = \begin{cases} 2\mathbf{p}_{Ghj}, & \text{wenn } (\mathbf{i}_{Gij}) = -1 \\ 0, & \text{wenn } (\mathbf{i}_{Gij}) \neq -1 \end{cases} \quad (3.95)$$

$$\mathbf{G} = -\mathbf{I}_G^\top \text{diag}(\mathbf{x}_{Gp}^{(t-1)}) - \mathbf{E} \quad (3.96)$$

Die Setzung der Randbedingungen erfolgt analog zur Vorgehensweise in Kapitel 3.1. Allerdings sind die Einspeiser nicht über die Menge oder Geschwindigkeit im Einspeiserstrang definiert, sondern über den Druck im Einspeiserknoten. Das hat zur Folge, dass kein gesonderter Referenzdruck definiert werden muss. In den Verbrauchersträngen werden die Geschwindigkeiten entsprechend der geforderten Abnahme vorgegeben. Nach der Zuweisung der Randbedingungen findet die numerische Lösung des linearen Gleichungssystems 3.97 statt.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_G & 0 \\ \mathbf{N}_G & \mathbf{G} \\ \text{diag}(\mathbf{w}_G) & \end{bmatrix} \mathbf{x}_G = \begin{bmatrix} 0 \\ |\mathbf{p}_{Gh}| \circ \mathbf{p}_{Gh} \\ \mathbf{w}_{Gr} \end{bmatrix} \quad (3.97)$$

Die Lösung des Gleichungssystems erfolgt ebenfalls mit dem Backslash-Operator aus der MATLAB® Bibliothek und unter Anwendung einer Relaxation während des Iterationsvorganges. Da bei der angewendeten Methode die Dichte im Netz zunächst konstant angenommen wird, erfolgt nach jedem Iterationsschritt eine Anpassung der Dichte für jeden Knoten im Netz nach Gleichung 3.98, wobei die Referenzdichte ρ_{ref} bei dem Referenzdruck p_{ref} definiert werden muss.

$$\rho_{neu} = \frac{p_{neu}}{p_{ref}} \rho_{ref} \quad (3.98)$$

Der Ablauf der Rechenprozedur für die isotherme kompressible Rohrnetzströmung ist in Abb. 3.11 dargestellt. Wie auch für Fernwärmenetze, müssen zunächst die Informationen über die Netzstruktur und den Betrieb des Netzes für die numerische Simulation aufbereitet werden. Nach der Festlegung von Startwerten für die Strömungsgeschwindigkeiten und Drücke des Lösungsvektors, erfolgt die Erstellung des Gleichungssystems durch Anschreiben der Knoten- und Stranggleichungen. Erfüllen die Lösungsergebnisse des Gleichungssystems das Abbruchkriterium, können die Ergebniswerte ausgegeben werden. Ansonsten erfolgt eine Anpassung der initial definierten Dichte, die Relaxation der Näherungswerte und die Aufstellung und Lösung des Gleichungssystems wiederholt sich.

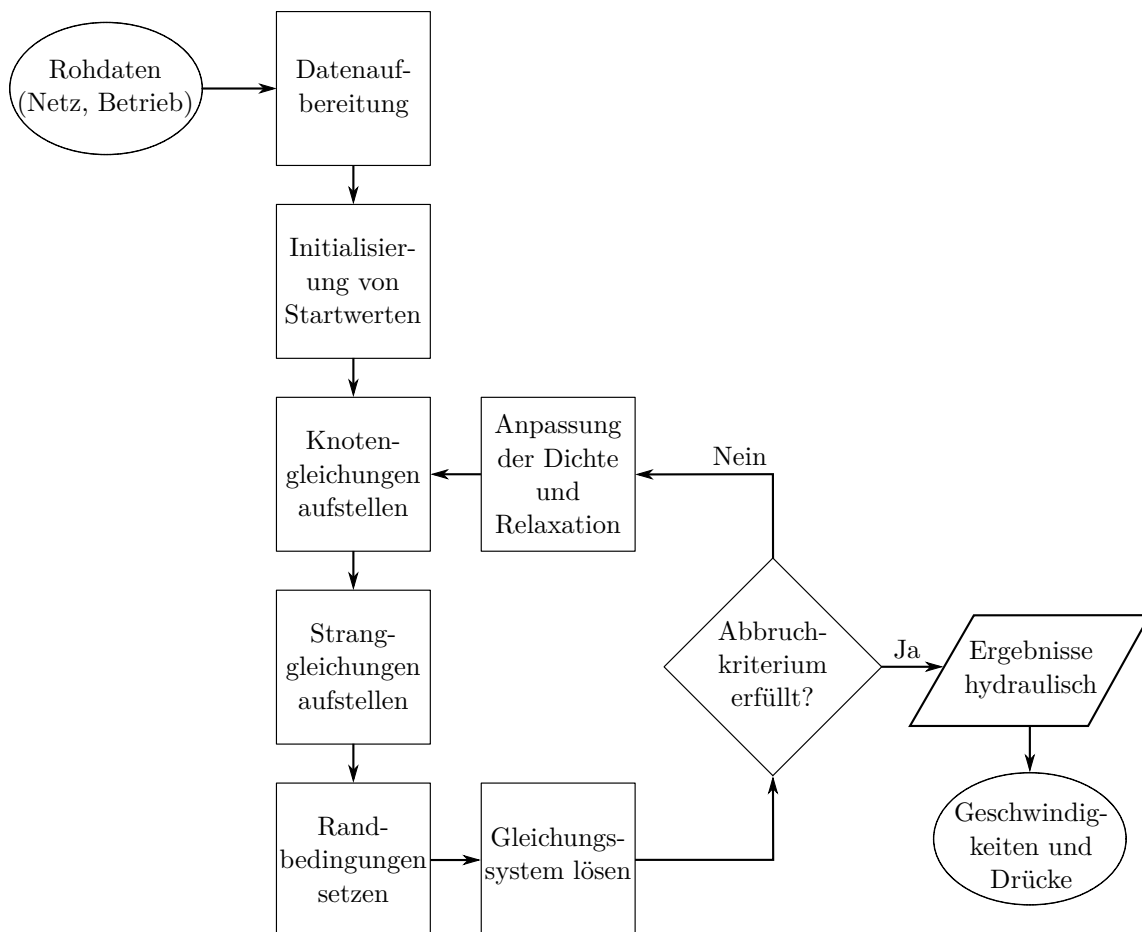


Abbildung 3.11: Programmablauf der isothermen kompressiblen Strömungsberechnung für einen Zeitschritt

3.3 Datenaufbereitung

Die Datengrundlage für computerunterstützte Analysen von Versorgungsnetzen basiert vorwiegend auf den Informationen aus GIS-Anwendungen. Die zur Verfügung gestellten GIS-Daten wurden in dem freien Open-Source Programm *QGIS* dargestellt und bearbeitet. Die Speicherung von GIS-Daten erfolgt in *QGIS* mit dem vektorbasierten Datenformat der Shapefiles. Diese bestehen grundsätzlich aus drei verschiedenen Dateien:

- *.shp*: Geometriedaten
- *.dbf*: Sachdaten (Attribute der Geometrien)
- *.shx*: Verknüpfung zwischen Geometrie und Attributen

Die grundlegenden Elemente für die Erstellung geografisch verorteter Daten bestehen aus Punkten, Linien und Polygonen. Für die Darstellung einer Netzstruktur kommen hauptsächlich Linien und Punkte zum Einsatz, die für eine numerische Simulation erst aufbereitet werden müssen. Das Format der Basisdaten für die hydraulische und thermohydraulische Berechnung der Netze ist ähnlich zu dem Speicherformat der Shapefiles. Aus der geografischen Struktur eines Netzes (*.shp*-Dateien) kann die Inzidenzmatrix abgeleitet und die Attribute zu jedem Strang oder Knoten (*.dbf*-Dateien) können als Vektoren abgespeichert werden. Die Verknüpfung zwischen Geometriedaten und Attributen besteht bei der numerischen Simulation aus dem Reihen- und Spaltenindex der Inzidenzmatrix und der Attributvektoren. Daher ist eine explizite Zuordnung der Attribute nicht notwendig. Der erste Schritt der Aufbereitung stellt die Reduzierung der Anzahl von Strängen dar. In einem GIS-System steht die möglichst realitätsnahe geografische Abbildung von Objekten im Vordergrund. So kann die Verbindung zwischen zwei Referenzpunkten aus vielen Teilsträngen bestehen. Im Gegensatz dazu ist es bei der numerischen Modellbildung von Vorteil, wenn die abzubildenden Objekte so einfach wie möglich dargestellt werden. Die Zusammenfassung von Strängen zwischen zwei Verteilerknoten erfolgt, indem Stränge, deren ausgewählten geometrischen Parameter (Durchmesser, Wandstärke, ...) ident sind, zu einem Strang reduziert werden. In Abb. 3.12 ist diese Vereinfachung für eine Verbindung zweier Punkte dargestellt. Zum Beispiel kann durch die Zusammenfassung von sieben auf einen Strang, das zu lösende Gleichungssystem um sechs Stranggleichungen und sechs Knotengleichungen reduziert werden, ohne Verlust von Informationen.

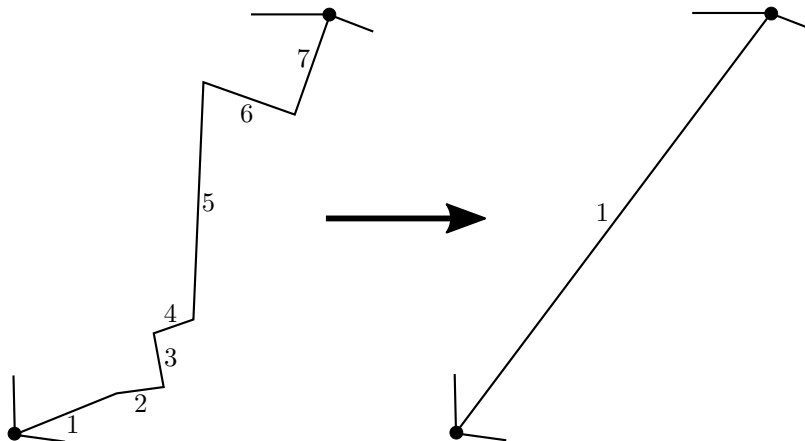


Abbildung 3.12: Reduzierung der Anzahl von Strängen

Ein weiterer Schritt der Datenaufbereitung ist die Zusammenfassung von Verbrauchersträngen zwischen zwei Verteilerknoten. Abb. 3.13 zeigt einen solchen Strangabschnitt mit vier Verbrauchern. Unter der Bedingung, dass die Stränge zwischen den Verbraucherabgängen ebenfalls die gleichen geometrischen Parameter aufweisen, werden die Verbraucher zu einem Strang zusammengefasst. Daraus ergibt sich eine Vereinfachung des Netzabschnitts, der um sechs Stränge und sechs Knoten reduziert ist.

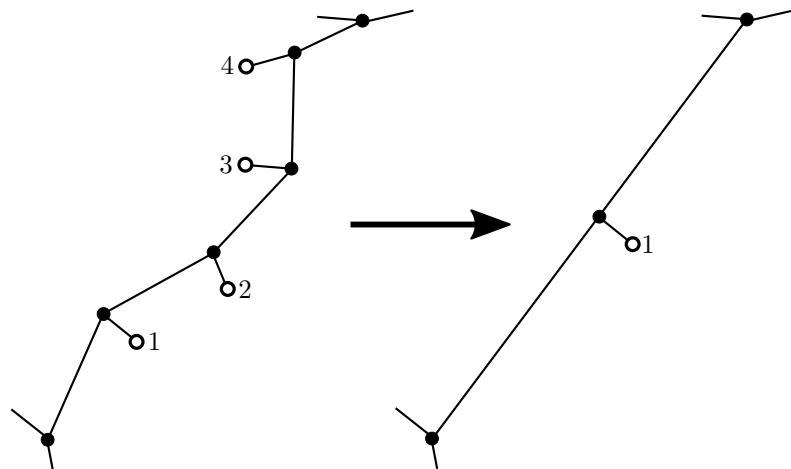


Abbildung 3.13: Reduzierung der Verbraucherstränge

Die Berechnung der Netzzustände kann ausschließlich für zusammenhängende Netzstrukturen durchgeführt werden. Bei der Übertragung von GIS-Daten wird diese Bedingung nicht berücksichtigt. Verteilnetze (ND-Gasnetz, Sekundärnetz FW) bestehen oft aus mehreren Teilnetzen die über mehrere Einspeisestellen versorgt werden. Daher kommt eine Methode aus der Graphentheorie zum Einsatz, um die bereits vereinfachten GIS-Daten in separate zusammenhängende Teilnetze zu trennen. Die *Tiefensuche* stellt ein Verfahren zur Untersuchung von Graphen dar. Dabei ist es das Ziel, alle in dem Graphen vorkommenden Knoten durch Beschreitung aller Pfade des Graphen zu finden. Der Algorithmus der Tiefensuche wird im Rahmen der Datenaufbereitung folgendermaßen angewendet:

1. Festlegung eines beliebigen Startknotens
2. Beschreitung des ersten Pfads (Strang) zum nächsten Knoten
3. Speicherung des beschrifteten Pfads (Strang) und Knoten
4. Wiederholung von 2. und 3. bis kein weiterer Pfad (Strang) gefunden wird
5. Den zuletzt beschrifteten Pfad retour
6. Wiederholung von 2. und 3., wenn noch nicht beschriftete Pfade vorliegen, ansonsten Wiederholung von 5.

Nach Durchlaufen des Algorithmus werden die gefundenen Knoten und Stränge als zusammenhängendes Netz mit allen Attributevektoren abgespeichert und aus den ursprünglichen Daten gelöscht. Dann wiederholt sich die Suche nach zusammenhängenden Knoten und Strängen bis keine mehr gefunden werden.

Kapitel 4

Ergebnisse

Ziel dieses Kapitels ist es, die innerhalb des Projektes URBEM entwickelten Fragestellungen und Ergebnisse wiederzugeben. Der Fokus liegt dabei auf der technischen Analyse und Bewertung unterschiedlicher Betriebsweisen und -zustände des Fernwärmenetzes und des Gasnetzes.

Die in Absprache mit den WSTW vereinbarten Fragestellungen, beziehen sich auf mögliche Auswirkungen auf den Betrieb des FW-Netzes und Gasnetzes, die in den nächsten Jahrzehnten durch sich ändernde Rahmenbedingungen, wie die Entwicklung des Wärmebedarfs, hervorgerufen werden. Als Grundlage für die technische Beurteilung der betrachteten Netze dienen einerseits thermohydraulische Simulationsmethoden (FW-Netz) als auch rein hydraulische Berechnungen (Gasnetz).

Die untersuchten Gebiete/Netzteile beschränken sich auf das primäre FW-Netz und auf das ND-Gasnetz. Aus datenschutzrechtlichen Gründen durfte die exakte örtliche Zuweisung zwischen Gebäudeblock und der zugehörigen Station der Fernwärme bzw. Hausanschlussleitung des Gasnetzes nicht übergeben werden. Die simulationstechnische Zuweisung erfolgte daher nach dem Kriterium der kürzesten Entfernung zwischen Gebäudeblock und FW- oder Gas-Knoten. Dieser Umstand resultiert in einer bestimmten Unschärfe der erzielten Ergebnisse und sollte bei der Interpretation berücksichtigt werden. Die Verschaltung der Netze mittels Ventilen und Pumpen wurde einmalig festgelegt und für alle Simulationen beibehalten.

4.1 Fragestellung

- FRAGE 1: *Wie wirkt sich die Entwicklung des Wärmebedarfs von Gebäuden auf die Auslastung des zukünftigen Fernwärme- und Gasnetzes aus?*

Mit der Vorgabe des zukünftigen Wärmebedarfs (Raumwärme und Brauchwasser) von Wien [37] werden die damit verbundenen Veränderungen im hydraulischen Netzwerk (FW, Gas) analysiert. Insbesondere sollen Schwachstellen und Überkapazitäten im Netz aufgezeigt werden, um technische Restriktionen für die Entwicklung des Wärmebedarfs bereitzustellen.

- FRAGE 2: *Welche Auswirkungen haben dezentrale Einspeisungen und die Einbindung von Speichern auf das Fernwärmenetz?*

Die Dezentralisierung der Einspeisung und die Einbindung von Speichern in das FW-Netz wird in die thermohydraulische Simulation eingebunden und analysiert. Dadurch können Aussagen über die Auswirkungen der veränderten FW-Netz-Struktur getroffen werden.

Durch Vergleiche mit den Simulationsergebnissen einer konventionellen FW-Struktur kann das Verbesserungspotential hinsichtlich der Auslastung des Netzes ermittelt werden. Die Koppelung mit anderen Energieträgern (Gas, Strom) [54] in Form von Energieknoten macht eine Optimierung der Auslastung in den Versorgungsnetzen möglich.

- FRAGE 3: *Wie kann ein Stadterweiterungsgebiet optimal an das Fernwärme- bzw. Gasnetz angeschlossen werden?*

Bei Vorgabe von Stadterweiterungsgebieten können durch Netzsimulationen (Gas, FW) mögliche Anschlussvarianten an das bestehende FW- und Gasnetz aufgezeigt werden. Die Betrachtung von Energieknoten [54] ermöglicht eine weitere Optimierung bezüglich der Auslastung des bestehenden Netzes bei Anschluss eines Stadterweiterungsgebietes.

4.2 Auswirkungen der Wärmebedarfsentwicklung auf das Betriebsverhalten des FW- und Gasnetzes

Die eingehenden Randbedingungen für die Simulationsläufe der Frage 1 wurden aus der Arbeit [37] bereitgestellt. Diese beschreiben die Entwicklung des thermischen Energiebedarfs für alle URBEM-Szenarien. Durch die Verschneidung des Energiebedarfs mit den generierten Lastprofilen aus [103], wird jedem Gebäudeblock ein thermischer Energieverbrauch zugewiesen. Wie in Abb. 4.1 und Abb. 4.2 ersichtlich, sinkt der Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser, bereitgestellt durch FW und Gas, über alle Jahre und Szenarien. Auffallend ist die starke Reduktion des Endenergieverbrauchs für das Klimaschutz-Szenario bereits ab dem Jahr 2030 bei Bereitstellung durch Fernwärme und ab dem Jahr 2050 bei Bereitstellung durch Gas.

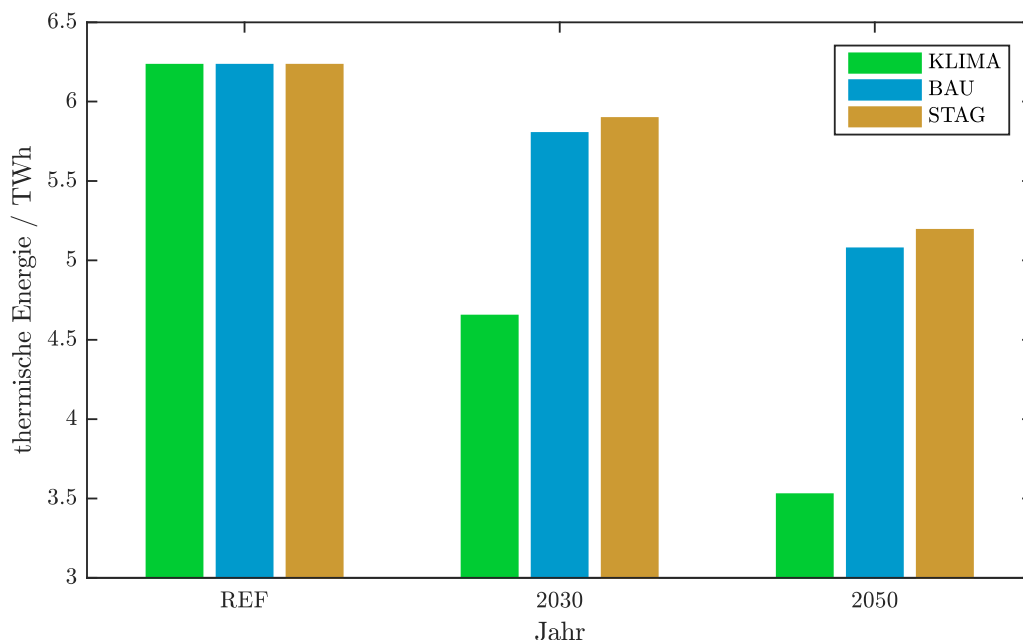


Abbildung 4.1: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser, bereitgestellt durch Fernwärme [37]

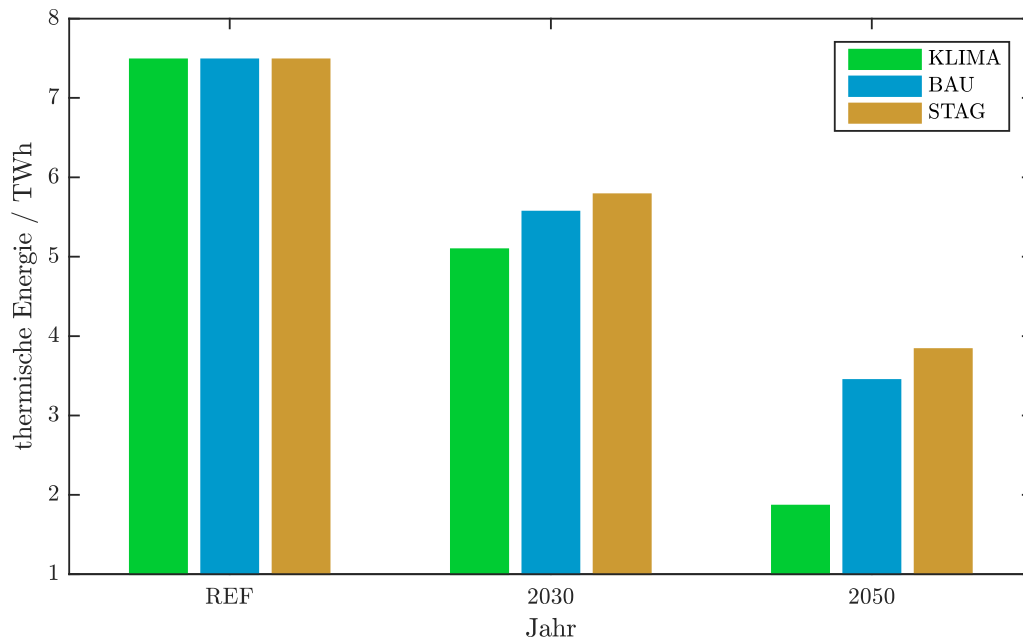


Abbildung 4.2: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser, bereitgestellt durch Gas [37]

4.2.1 Fernwärmenetz

Die folgenden Grafiken zeigen die hydraulischen und thermischen Auswirkungen der unterschiedlichen Entwicklungen auf den Betrieb des FW-Netzes. Die Ergebnisse des Jahres 2013 bilden die Referenzwerte, die für Vergleiche zwischen den Simulationsergebnissen herangezogen wurden. Jede Jahressimulation wurde mit der gleichen Netztopologie und den gleichen Klimadaten, die auch für die Lastprofilgenerierung benutzt wurden, durchgeführt.

Druckverteilung

In Abb. 4.3 ist die Differenzdruckverteilung zwischen Vor- und Rücklauf bei den Umformerstationen des primären FW-Netzes für den kritischen Zeitpunkt im Jahr dargestellt. Die Darstellung des Differenzdruckes erfolgt nach dem Visualisierungsschema der sogenannten Heatmap. Dabei werden die verorteten Ergebnisdaten trianguliert und die sich daraus ergebenden Flächen interpoliert. Diese Methode führt jedoch dazu, dass die punktuellen Ergebnisse geografisch zu flächigen Ergebnissen verschmieren und an Aussagekraft verlieren. Jedoch musste diese Darstellungsform gewählt werden, da die Netztopologie aus datenschutzrechtlichen Gründen nicht veröffentlicht werden darf.

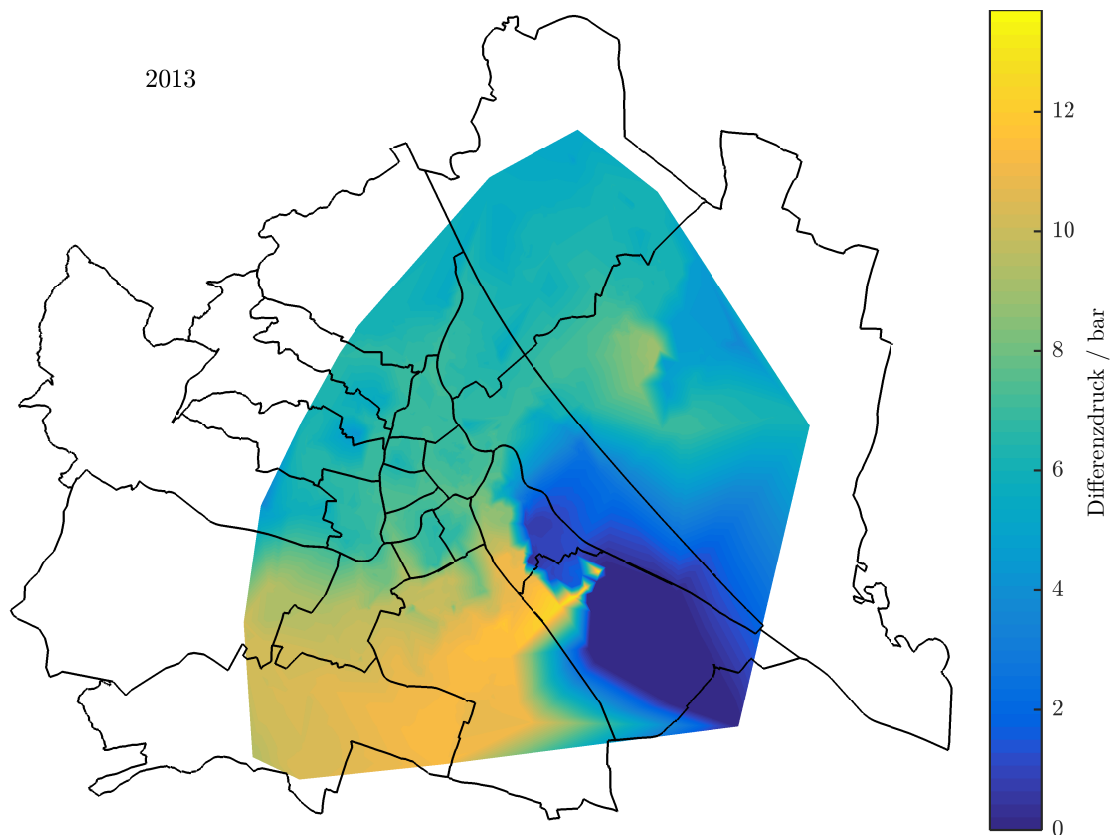


Abbildung 4.3: Differenzdruckverteilung im primären FW-Netz für das Referenzjahr 2013

Die minimale auftretende Druckdifferenz liegt bei 0 bar und die maximale Druckdifferenz bei 13.7 bar. Der, für den ordnungsgemäßen Betrieb, einzuhaltende Differenzdruck beträgt 1 bar. Zu kritischen Betriebszuständen kommt es im 11. Bezirk im Gebiet der Einspeisung von industrieller Abwärme. Die zu geringe Druckdifferenz kann auf die hinterlegte Zuweisung zwischen Gebäudeblock und FW-Knoten als auch auf die vielen Pumpen in diesem Bereich, deren Regelung sehr rudimentär abgebildet ist, zurückgeführt werden. Aufgrund der Visualisierungsform erscheint die kritische Zone groß, jedoch befinden sich in diesem Gebiet wenige Umformerstationen, die betroffen sind.

Die Abb. 4.4 (a)-(f) zeigen die Veränderungen in der Differenzdruckverteilung über die simulierten Szenarien und Jahre. Bei allen Abbildungen ist die Tendenz zu einem erhöhten Differenzdruck im Westen und Norden und einem reduzierten Differenzdruck im Osten und Südwesten von Wien zu erkennen. Die größten Differenzen zum Referenzergebnis treten beim Klimaschutz-Szenario (Abb. 4.4 (c),(d)) auf. Der große Druckunterschied im Bereich der südöstlichen Einspeisung kann aufgrund der Verschaltung des Ventils, die zwei Optionen der Fließrichtung in diesem Bereich ermöglicht, verursacht werden, da die Verschaltung einmalig definiert und für alle Simulationen eingefroren wurde. Die Druckdifferenzen bei dem Business-as-usual-Szenario und dem Stagnations-Szenario liegen in einem wesentlich kleineren Bereich und deuten auf geringe Auswirkungen aufgrund sich ändernder Lastzustände hin. Daraus folgt, dass aus hydraulischer Sicht die Entwicklung des Klimaschutz-Szenario den größten Einfluss auf den Betrieb des FW-Netzes hat.

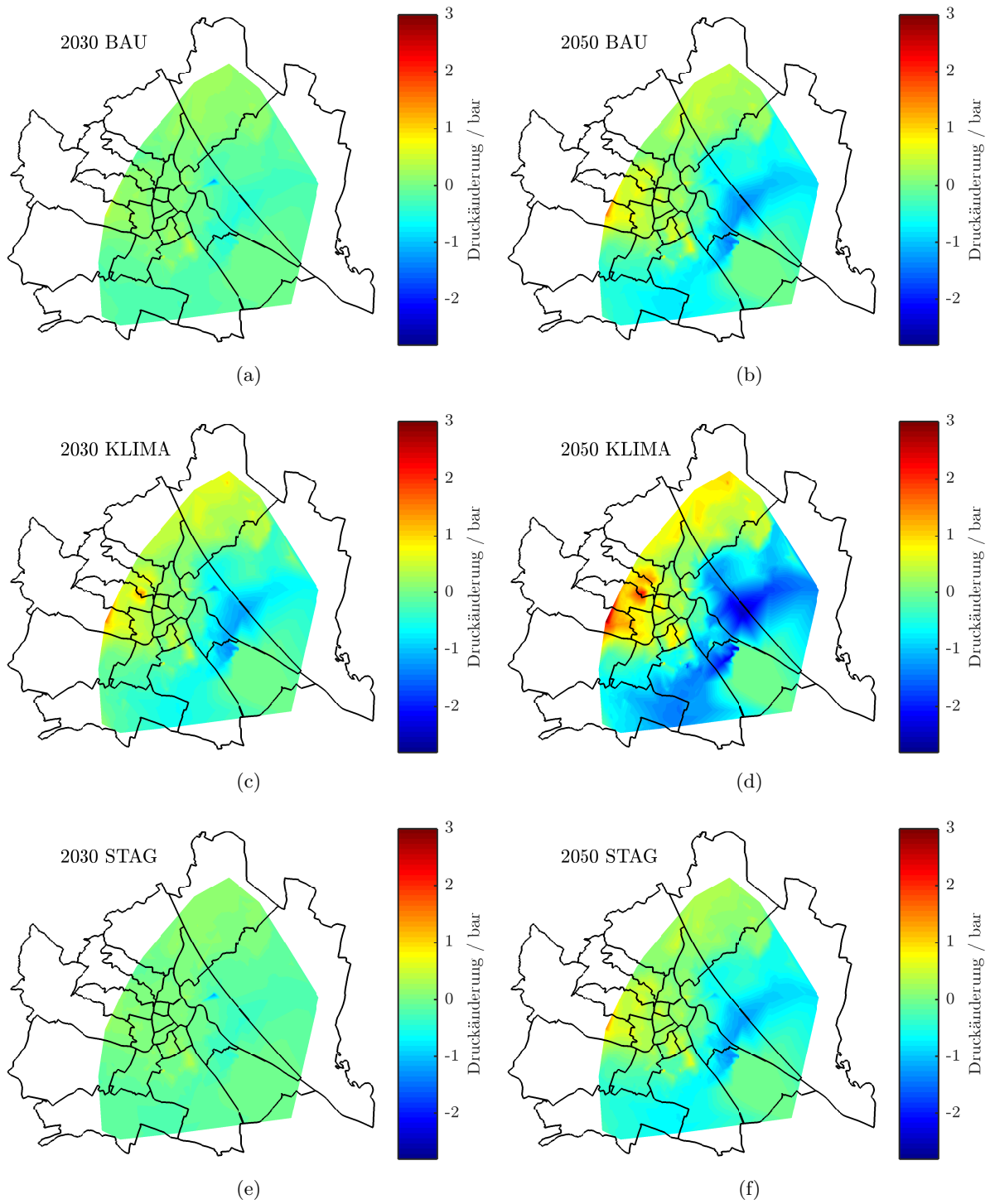


Abbildung 4.4: Differenzdruckänderungen des primären Fernwärmenetzes, bezogen auf das Referenzjahr 2013

Spezifischer Druckverlust

Die Differenzdruckverteilung im Primärkreislauf spiegelt die grundsätzliche Betriebscharakteristik des Netzes wieder. Für eine detailliertere hydraulische Bewertung stellt der spezifische Druckverlust in den einzelnen Rohrabschnitten einen nützlichen Kennwert dar. Der allgemeine Grenzwert für einen ökonomischen Betrieb von Wassernetzwerken liegt bei 200 Pa/m . In Abb. 4.5 sind jene Rohrabschnitte punktuell dargestellt, die einen spezifischen Druckverlust von über 500 Pa/m aufweisen. Die Größe der eingezeichneten Punkte korreliert mit den zugehörigen spezifischen Druckverlusten. Bei Erweiterungen des Netzes oder Neuanschlüssen sollte besonders auf die bereits stark belasteten Rohrabschnitte geachtet werden. Da die Zuweisung der Gebäudeblöcke zu den FW-Knoten großen Einfluss auf das lokale Druckverlustverhalten hat, treten auch besonders hohe spezifische Druckverluste in dem Ergebnis auf, die im realen Betrieb nicht vorkommen sollten.

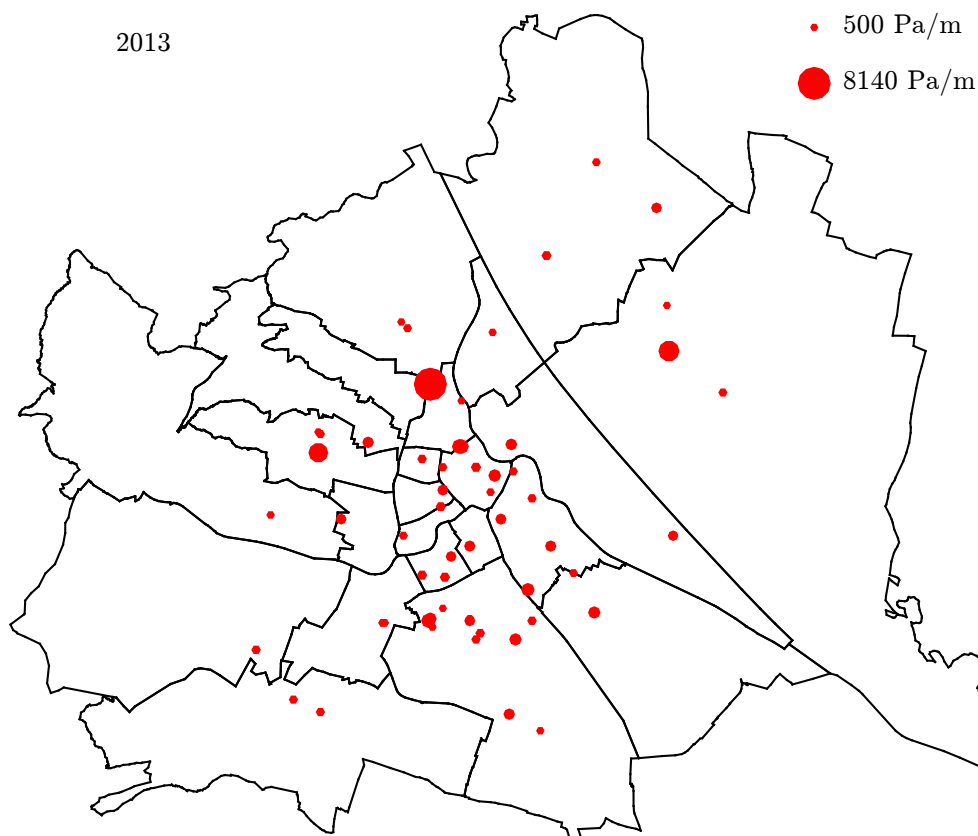


Abbildung 4.5: Positionen von Rohrabschnitten mit hohem spezifischen Druckverlust im Vorlauf des primären Fernwärmenetzes, Referenz 2013

Vergleicht man die sehr stark belasteten Stellen im FW-Netz zwischen den Szenarien (Abb. 4.6 (a)-(f)), so erkennt man, dass sich die geografische Lage dieser Stellen kaum ändert. Abhängig vom Szenario verschwinden einige stark belastete Rohrabschnitte oder tauchen an anderen Stellen auf. Die Ergebnisse des Stagnations-Szenarios weisen die wenigsten stark belasteten Rohrabschnitte auf, da sich der Betriebszustand im Vergleich zum Referenzjahr am geringsten verändert.

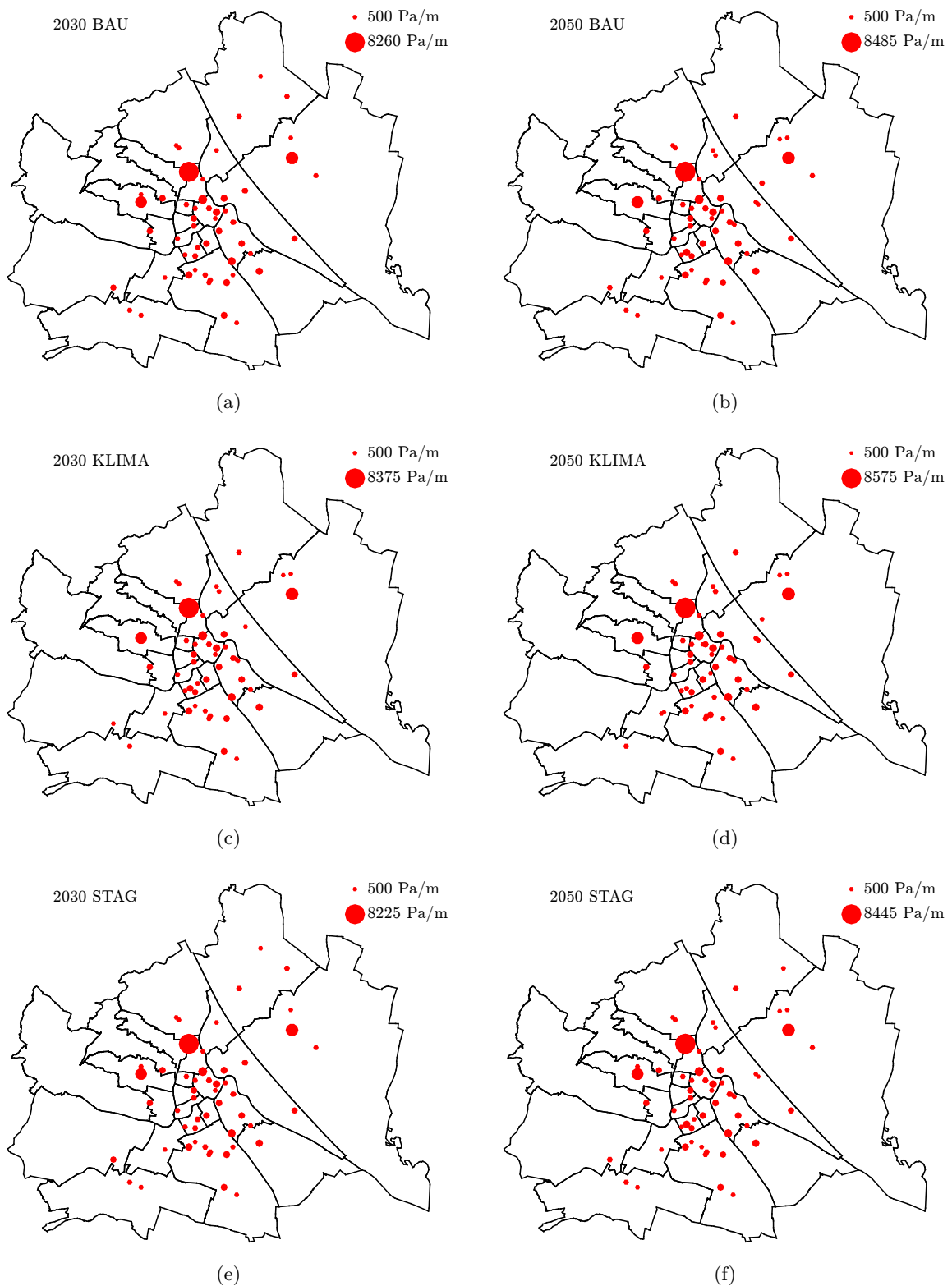


Abbildung 4.6: Veränderung der Positionen von stark belasteten Rohrabschnitten des primären Fernwärmenetzes für das Business-as-usual-, Klimaschutz- und Stagnations-Szenario der Jahre 2030 und 2050

Wird die Anzahl an stark belasteten Rohrabschnitten mit der Gesamtanzahl der Rohre ins Verhältnis gesetzt, erhält man die relative Belastung des Netzes (Abb. 4.7). Als Grenzwert für den Druckverlust von stark belasteten Rohrsträngen wurde 300 Pa/m definiert. Mit diesem Kennwert lässt sich die allgemeine Entwicklung der Auslastung des FW-Netzes beschreiben. Wie zu erwarten, sinkt aufgrund des verringerten Verbrauches die Beanspruchung für jedes Szenario mit fortschreitender Zeit. Da der Energieverbrauch für das Klimaschutz-Szenario am stärksten sinkt, reduziert sich auch die Gesamtanzahl an stark belasteten Rohren.

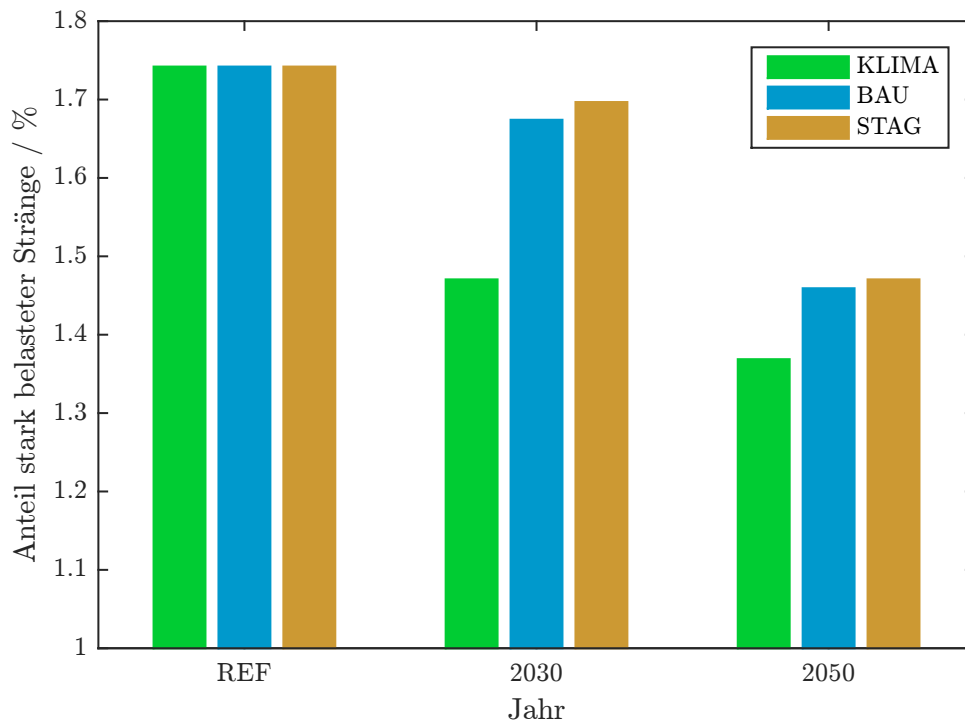


Abbildung 4.7: Relativer Anteil an stark belasteten Rohrabschnitten mit einem spezifischen Druckverlust von mehr als 300 Pa/m

Thermisches Verhalten

Die Entwicklung des thermischen Energiebedarfs hat nicht nur Auswirkungen auf die Hydraulik des FW-Netzes, sondern beeinflusst auch das thermische Verhalten. Durch den Einsatz einer thermohydraulischen Berechnungsmethode können die thermischen Verluste des FW-Netzes über das gesamte Jahr sehr detailliert ermittelt werden. In Abb. 4.8 ist der relative thermische Verlust für je ein Betriebsjahr der verschiedenen Jahre und Szenarien abgebildet. Die Verluste wurden dabei auf die in das Netz eingespeiste Energiemenge bezogen. Der ansteigende relative Verlust ist auf die leicht erhöhten thermischen Verluste, aufgrund langsamerer Strömungsgeschwindigkeiten, und auf die wesentlich verringerten eingespeisten Energiemengen zurückzuführen. Besonders beim Klimaschutz-Szenario steigt das Verhältnis zwischen thermischen Verlusten und Energieverbrauch. Der treibende Faktor für die relativen thermischen Verluste ist die Auslastung des FW-Netzes. Je höher die Auslastung, desto geringer wird der relative thermische Verlust eines FW-Netzes.

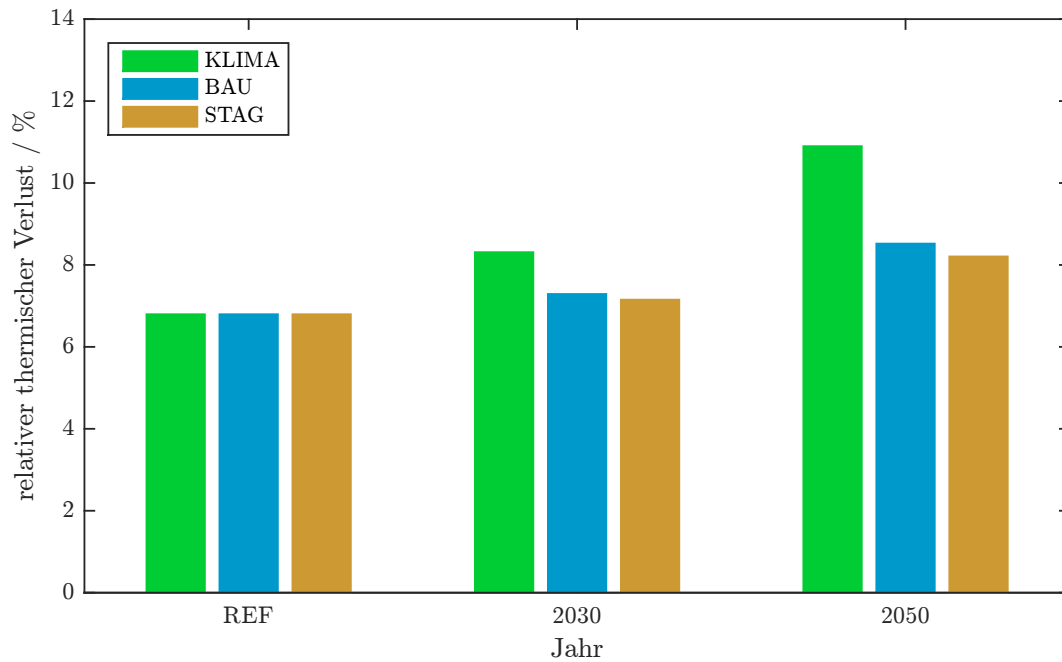


Abbildung 4.8: Relativer Anteil an thermischen Verlusten für das Business-as-usual-, Klimaschutz- und Stagnations-Szenario der Jahre 2030 und 2050

Pumpenenergie

Ein weiteres Ergebnis der Simulationen ist der elektrische Energiebedarf für den Betrieb der Pumpen im gesamten FW-Netz. Abb. 4.9 zeigt, wie viel elektrische Energie je verbrauchter MWh_{th} für die Versorgung der Pumpen benötigt wird.

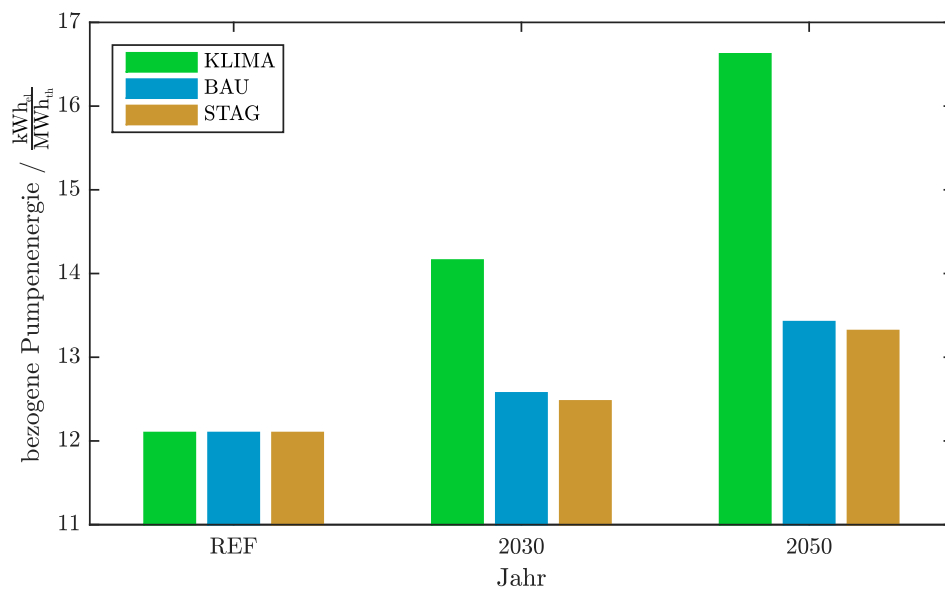


Abbildung 4.9: Durchschnittlich benötigter elektrischer Pumpenenergiebedarf für die Bereitstellung von einer MWh_{th}

Da keine genaueren Daten über die Betriebscharakteristik und -führung der Pumpen vorliegen, wurde der Gesamtwirkungsgrad für alle Pumpen konstant mit $\eta = 70\%$ angenommen. Für das Klimaschutz-Szenario im Jahr 2050, jenes mit dem geringsten thermischen Energiebedarf, bereitgestellt durch Fernwärme, ist der relative Bedarf an Pumpenenergie am größten. Das liegt daran, dass die benötigte Energie für die Umwälzung des Wassers nicht in dem Ausmaß sinkt, wie die thermische Last im Netz. Es zeigt sich, dass mit sinkender Auslastung des FW-Netzes die relative benötigte Pumpenenergie steigt.

4.2.2 Gasnetz

Wie für das FW-Netz sollen auch die Auswirkungen unterschiedlicher Szenarien auf das ND-Netz der Gasverteilung analysiert werden. Den Szenarien zufolge, sinkt der Endenergieverbrauch für Heizen und Brauchwasser bis zum Jahr 2050, der durch Nutzung von Gas als Energieträgermedium gedeckt wird. Daher kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass die Belastung für das Gasnetz abnimmt. Jedoch kann es zu Verschiebungen von Lasten kommen und dadurch zu lokalen Überlasten führen. Diese Effekte sollen mit den folgenden Ergebnissen dargestellt werden. Da das von der Wiener Netzen GmbH betriebene Gasnetz auch Gebiete außerhalb von Wien versorgt, diese aber gebäudetechnisch nicht in die URBEM-Simulationsumgebung integriert sind, kommt es in diesen Bereichen zu unrealistischen Ergebnissen.

Druckverteilung

In Abb. 4.10 ist die Druckverteilung für das Referenzjahr 2013 im kritischen Zeitpunkt für die beiden größten zusammenhängenden ND-Gasteilnetze, getrennt durch die Donau, dargestellt.

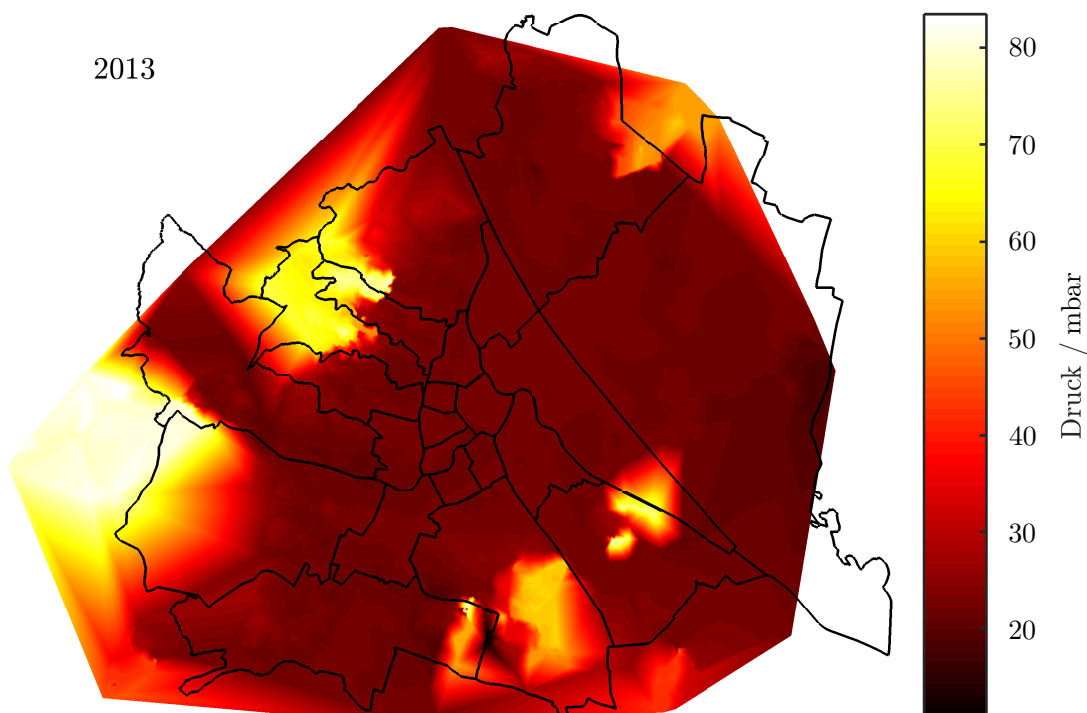


Abbildung 4.10: Druckverteilung im Niederdruck-Gasnetz von Wien im Referenzjahr 2013

Grundsätzlich liegt der Netzüberdruck im Bereich der Einspeisedrücke von 23, 50, 60 oder 80 mbar. Jedoch gibt es auch kritische Stellen in denen der Druck bereits unter 10 mbar sinkt. Diese Extremwerte lassen sich ebenfalls auf die gewählte Zuordnung zwischen Gasendknoten und angeschlossenem Baublock zurückführen.

Die Veränderungen, aufgrund sich ändernder Lasten, sind in Abb. 4.11 abgebildet.

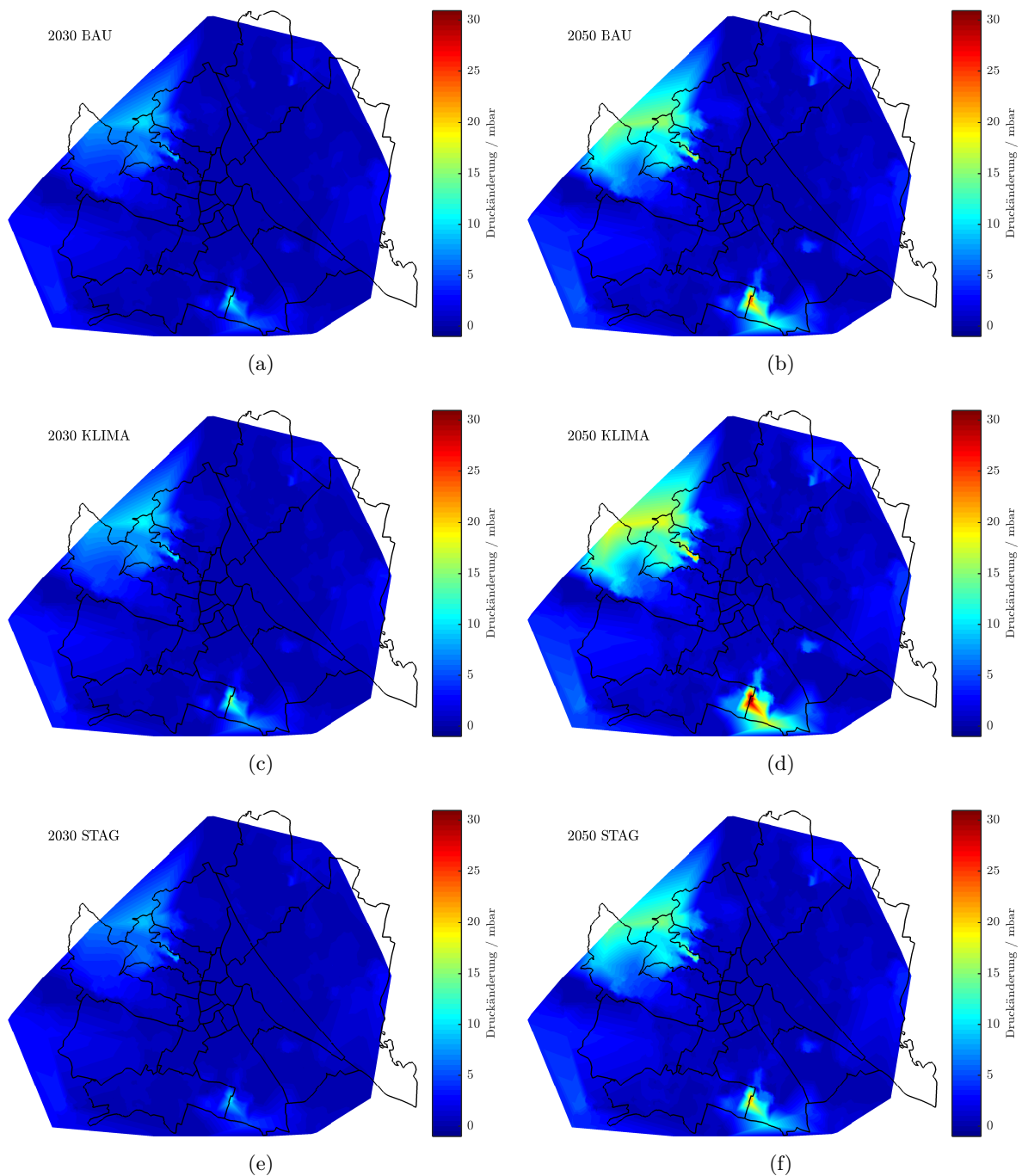


Abbildung 4.11: Druckänderungen des Niederdruck-Gasnetzes für das Business-as-usual-, Klimaschutz- und Stagnations-Szenario der Jahre 2030 und 2050

Die meisten Bereiche bleiben von der Laständerung unbeeinflusst und haben annähernd den gleichen Druck wie zuvor. Große Differenzen bilden sich in allen Szenarien im Nordosten und im Süden aus. Durch alle Szenarien und Jahre hindurch, steigen die Drücke im Verteilungsnetz an. Dieses Verhalten resultiert aus einem geringeren Bedarf an Gas und deutet auf lokale Entlastungen des ND-Gasnetzes hin. Aus hydraulischer Sicht zeigen die Ergebnisse des Klimaschutz-Szenarios die größten Veränderungen in der Druckverteilung. Vergleicht man die Druckdifferenzen aller Szenarien im Jahr 2050, so erkennt man nur mehr sehr geringe Veränderungen in der Betriebscharakteristik.

Spezifischer Druckverlust

Abb. 4.12 zeigt den Anteil an stark belasteten Rohrabschnitten mit mehr als 1.5 Pa/m spezifischen Druckverlust im Vergleich zur Gesamtanzahl aller Rohre. Bedingt durch die verringerte Last im Netz, wird die Zahl der stark belasteten Rohre kleiner. Besonders stark sinkt die allgemeine Belastung des Netzes beim Klimaschutz-Szenario.

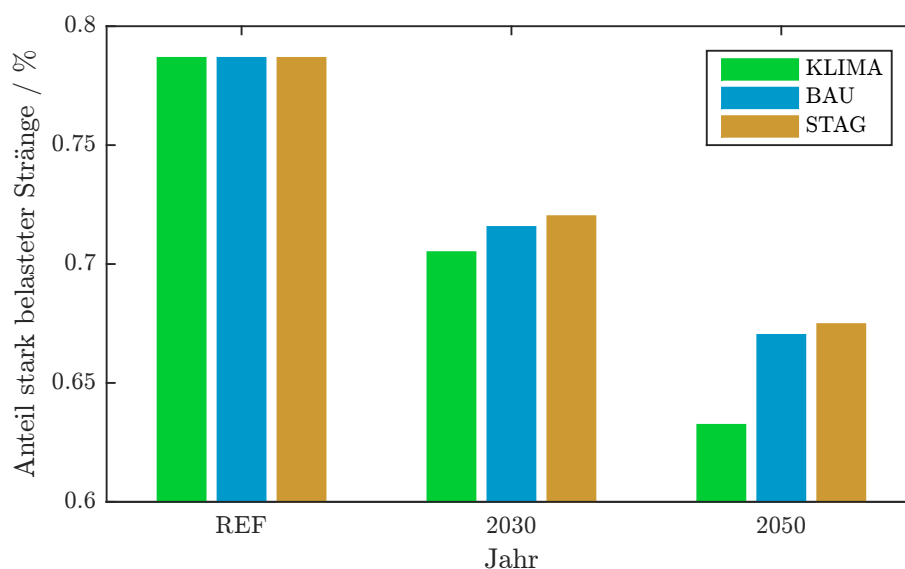


Abbildung 4.12: Relativer Anteil an stark belasteten Rohrabschnitten mit einem höheren spezifischen Druckverlust als 1.5 Pa/m

Für Abb. 4.13 wurde die Grenze für den spezifischen Druckverlust mit 10 Pa/m festgelegt, da der Übersichtlichkeit wegen, nur die wenigen sehr stark belasteten Rohrabschnitte gezeigt werden sollen. Die Größe der eingezeichneten Punkte korreliert wieder mit den zugehörigen spezifischen Druckverlusten.

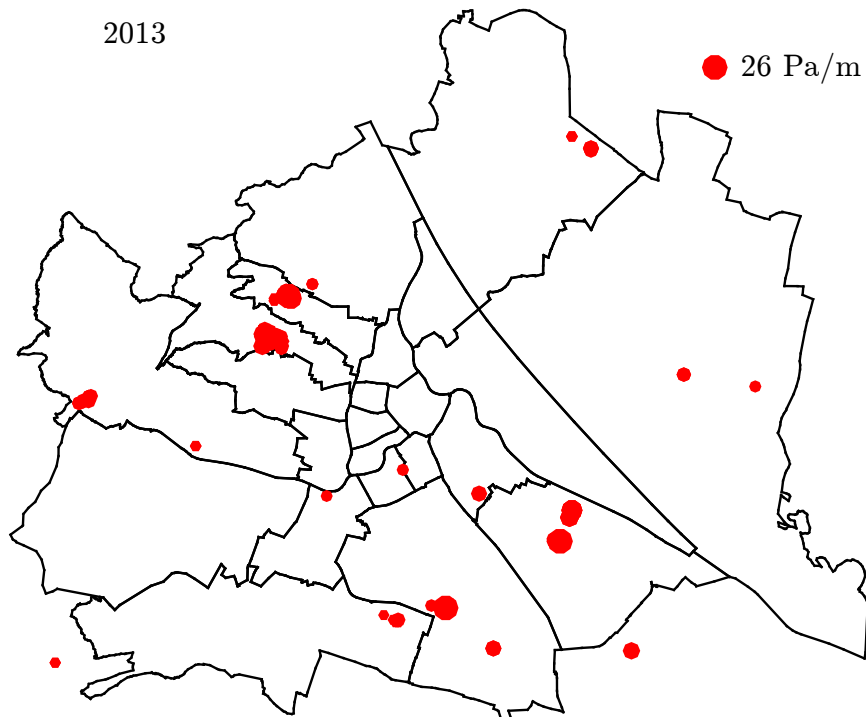


Abbildung 4.13: Positionen von stark belasteten Rohrabschnitten mit einem höheren spezifischen Druckverlust als 10 Pa/m im Niederdruck-Gasnetz im Referenzjahr 2013

In Abb. 4.14 sind die Veränderungen der Auslastungen für die URBEM-Szenarien dargestellt. Die am stärksten belasteten Rohre bleiben annähernd an der gleichen Position, nur wenige kritische Stellen verschieben sich. Dieses Verhalten deutet darauf hin, dass zwar gesamtheitlich die Belastung des Netzes sinkt, die lokalen Überlastungen jedoch sehr konstant bleiben.

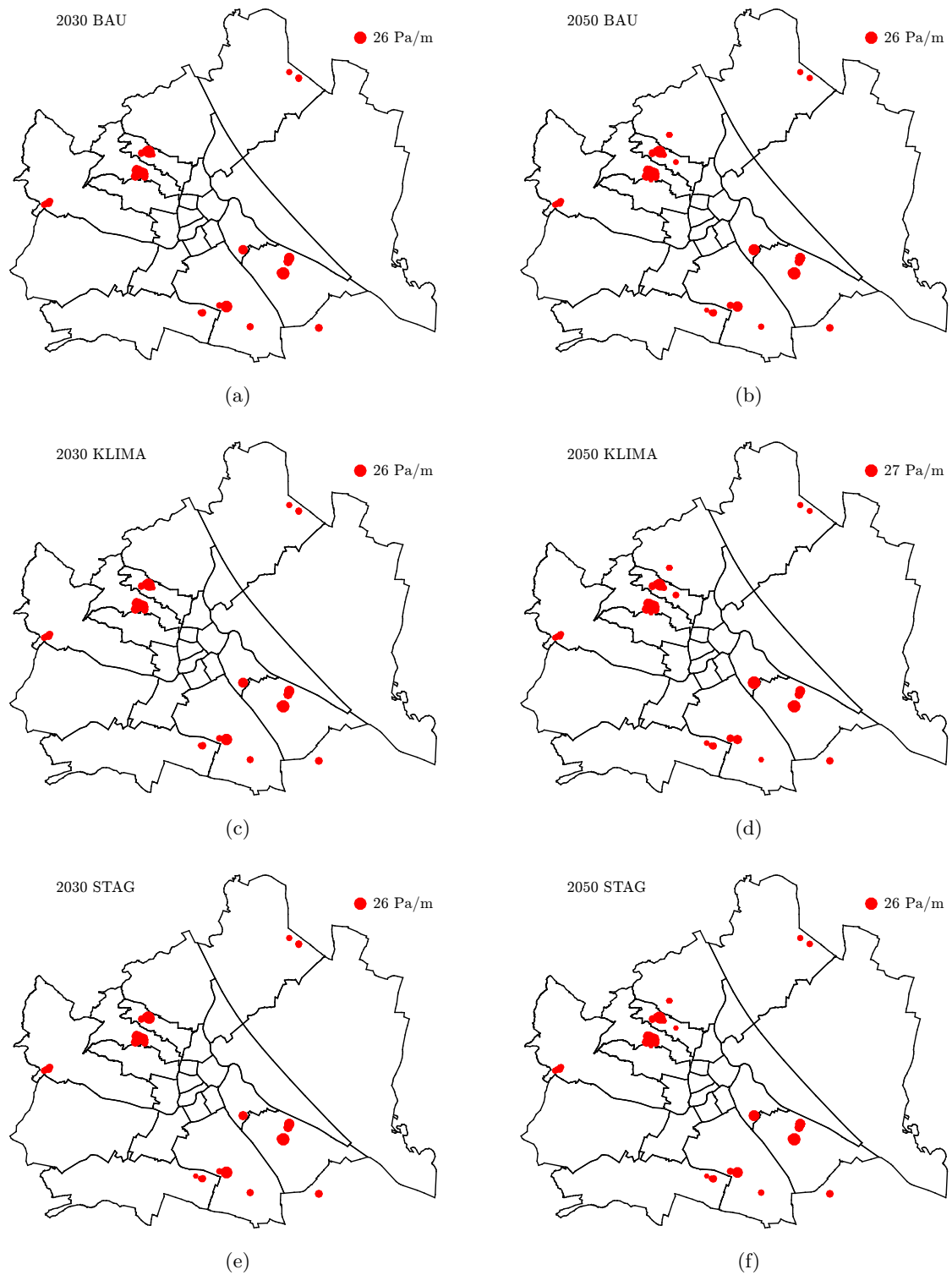


Abbildung 4.14: Positionen von stark belasteten Rohrabschnitten für das Business-as-usual-, Klimaschutz- und Stagnations-Szenario der Jahre 2030 und 2050

4.3 Einbindung von dezentralen Einspeisern und Speichern in das FW-Netz

Die Frage 2 behandelt die Auswirkungen der Einbindung dezentraler Einspeiser und dem Einsatz von Speichern im primären FW-Netz. Es sollen die möglichen Vorteile im Vergleich zu einem konventionellen Betrieb des FW-Netzes dargestellt werden. Die Simulationen wurden für den kritischen Zeitpunkt im Referenzjahr 2013 durchgeführt.

In [97] wird der ökonomisch optimale Aufstellungsort von Spitzenlastkesseln in Fernwärmesystemen untersucht, die die thermische Energie vorwiegend mit KWK-Kraftwerken zur Verfügung stellen. Das Resultat zeigt, dass die Spitzenlastkesseln auf den Standorten der KWK-Anlagen errichtet werden sollten, wenn der bezogene Strom für die Verteilung der übertragenen Wärme durch die KWK-Anlage bereitgestellt werden kann. Ist dies nicht der Fall oder soll die Effizienz des Fernwärmenetzes erhöht werden, dann sollte der Spitzenlastkessel in Gebieten aufgestellt werden, die eine hohe Anschlussdichte aufweisen. Die Arbeit [22] zeigt das Potential für den Einsatz und die Einbindung von dezentralen Wärmeerzeugungsanlagen aus erneuerbaren Energieträgern auf. In [66] und [104] liegt der Fokus auf der Untersuchung der Einbindung von Solarenergie in Wärmenetzen.

Das allgemeine und umfassende Werk [84] vermittelt die Grundlagen zu verschiedenen Speichertechnologien. Die Speicherung von thermischer Energie im Fernwärmenetz wird in [39], [62] und [65] untersucht. Bei der Planung von Speichern spielen die räumliche Verteilung [28] und die Größenberechnung der Speicher [6] eine wichtige Rolle.

4.3.1 Dezentrale Einspeisung

Um die Veränderungen in der Betriebscharakteristik durch die Integration von dezentralen Einspeisern analysieren zu können, wurden 21 dezentrale Einspeisestellen im FW-Netz definiert (Abb. 4.15).

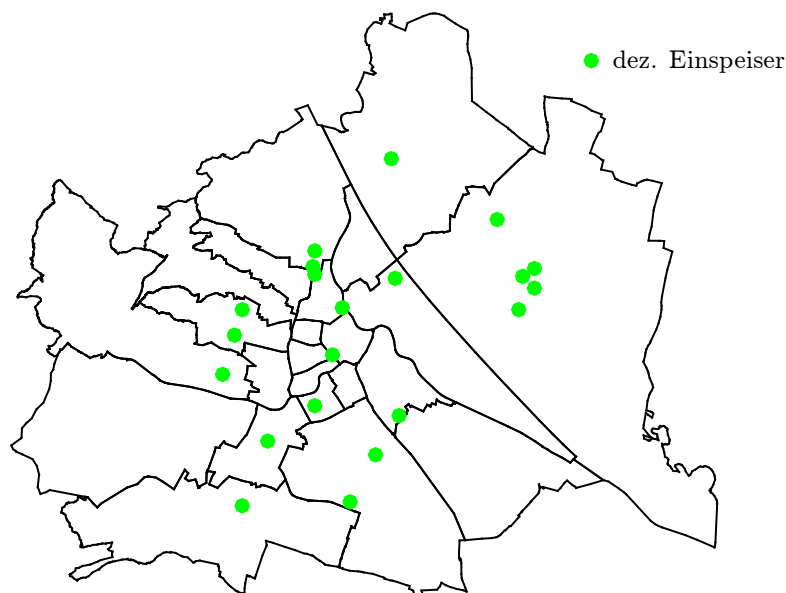


Abbildung 4.15: Übersicht der dezentralen Einspeisestellen

Alle Einspeiser sind an Leitungsabschnitte angeschlossen, die einen größeren Durchmesser aufweisen, um bei der einzuspeisenden Menge flexibler sein zu können. Die thermische Leistung der Einspeiser reicht von wenigen MW bis zu 50 MW.

Durch die vermehrte dezentrale Einspeisung können die Lasten im Netz durch näher gelegene Wärmeerzeuger gedeckt werden. Das hat den Vorteil, dass das Wärmeträgerfluid nicht mehr so weite Strecken fließen muss bis es beim Nutzer angekommen ist. Dieser Effekt spiegelt sich im strömungsinduzierten Druckverlust des Rohrnetzwerkes wieder. Werden die Einzeldruckverluste jedes Rohrstrangs zu einem Gesamtdruckverlust summiert, ergibt sich ein vergleichbarer Kennwert für den Betrieb des FW-Netzes. Abb. 4.16 zeigt den Gesamtdruckverlust für den kritischen Zeitpunkt für das Referenzjahr aus Frage 1 und für das mit dezentralen Einspeisern angepasste FW-Netz. Der Gesamtdruckverlust sinkt durch den Einsatz von dezentralen Einspeisern um fast 8 %.

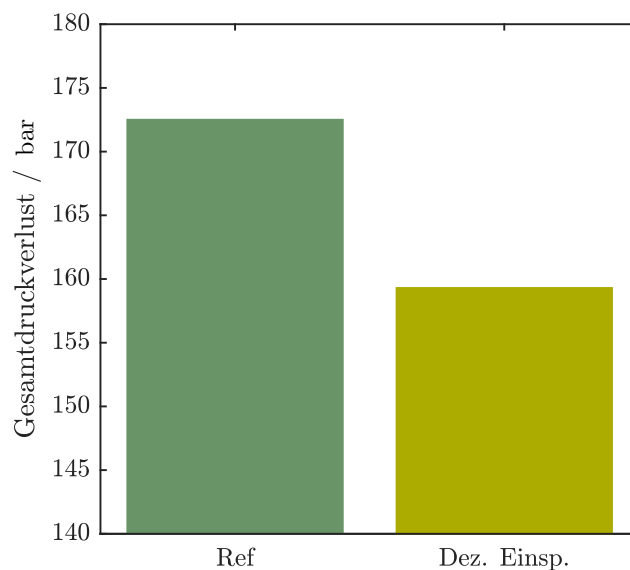


Abbildung 4.16: Vergleich der summierten Einzeldruckverluste zwischen der Referenz-Netzstruktur und Netzstruktur mit dezentralen Einspeisern

Die hydraulische Entlastung kann auch aus der Verringerung des durchschnittlichen spezifischen Druckverlustes (Abb. 4.17) abgelesen werden.

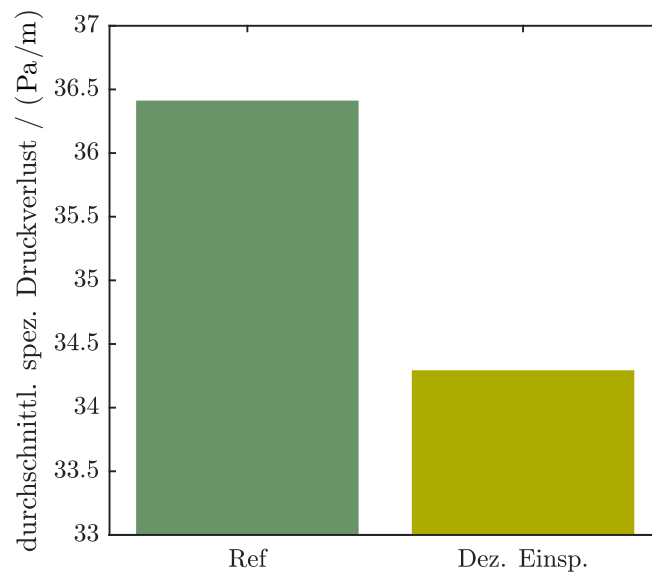


Abbildung 4.17: Vergleich der durchschnittlichen spezifischen Druckverluste zwischen der Referenz-Netzstruktur und der Netzstruktur mit dezentralen Einspeisern

Durch die Verringerung der Druckverluste im Netzwerk sinkt auch der Bedarf an elektrischer Energie für den Betrieb der Netzpumpen. In Abb. 4.18 ist die Reduktion der elektrischen Leistung im Vergleich zum Referenznetz dargestellt. Die Verringerung um fast 20 % hat auch ökonomische Auswirkungen auf den Betrieb des FW-Netzes.

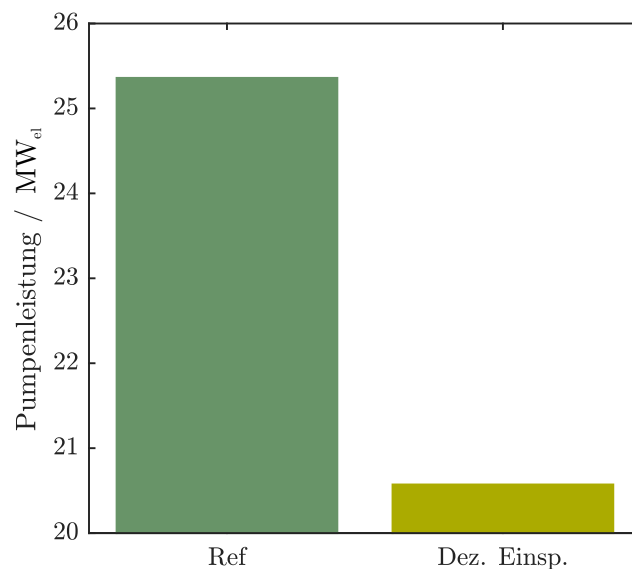


Abbildung 4.18: Vergleich der benötigten Pumpenleistung zwischen der Referenz-Netzstruktur und Netzstruktur mit dezentralen Einspeisern

Durch die Integration von dezentralen Erzeugern kann ein wesentlicher Beitrag zur hydraulischen Entlastung des FW-Netzes erzielt werden. Mit dezentralen Erzeugern können somit auch lokale Überlasten gezielt reduziert werden, indem der kritische Netzbereich durch eine lokale Versorgung entlastet wird.

4.3.2 Speichereinbindung

Die Einbindung von Speichern soll eine zeitliche Entkopplung zwischen Wärmeerzeugung und Wärmeverbrauch ermöglichen. Dadurch erhöht sich die Flexibilität der Wärmeerzeugung, welche nach unterschiedlichen Aspekten angepasst werden kann. So ist es möglich die Lastspitzen der Erzeugungsanlagen während des Betriebes zu minimieren oder die Wärmeerzeuger nach ökonomischen Überlegungen zu betreiben. Das Ziel der durchgeführten Simulationen war, die Lastspitzen der Wärmeerzeuger im FW-Netz zu dämpfen (siehe [94]). Dazu wurde je ein Speicher am Standort des Kraftwerks Leopoldau (Speicher 1) und des Fernheizwerks Inzersdorf (Speicher 2) mit einem Volumen von ca. 12000 m^3 (entspricht dem Wärmespeicher Simmering) platziert. Die Modellierung der Speicher erfolgte analog zur Abbildung von Rohrelementen. Jeder der Speicher ist an dem einen Ende mit dem Vorlaufnetz und an dem anderen Ende mit dem Rücklaufnetz verbunden. Dadurch lassen sich die Speicher als Schichtenspeicher abbilden und Be- und Entladen. Die Speicherbeladung erfolgte aufgrund folgender Kriterien:

- bei niedrigen Lasten ($<1700 \text{ MW}$)
- Beladetemperatur ist höher oder gleich der Speichertemperatur
- Speicher ist nicht voll

In Abb. 4.19 und 4.20 ist der Füllstand der beiden Speicher über den Simulationszeitraum dargestellt. Beide Speicher werden nach den selben Kriterien Be- und Entladen, jedoch ist der maximale Belademassenstrom bei Speicher 2 wesentlich höher als bei Speicher 1. Diese Differenz ergibt sich aufgrund der unterschiedlichen Nennweiten der Anschlussleitungen. Das führt zu kleinen Gradienten der Speicherfüllstandsänderung bei Speicher 1 und zu großen Gradienten bei Speicher 2.

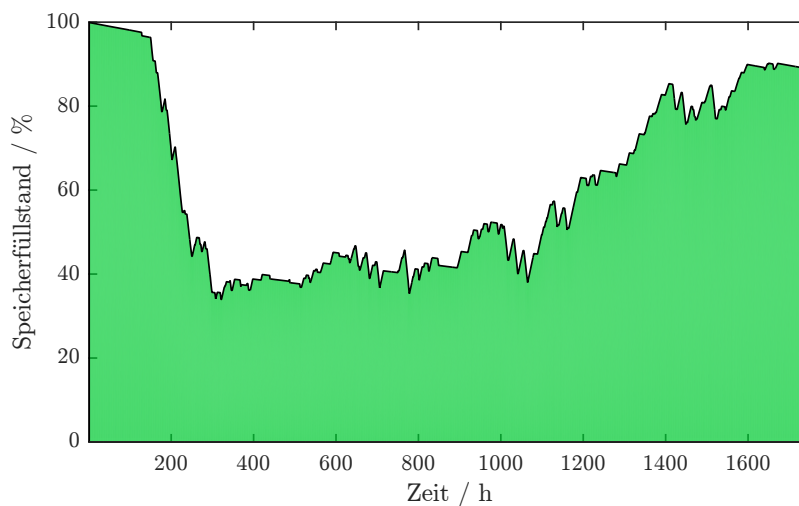


Abbildung 4.19: Verlauf des Füllgrades von Speicher 1

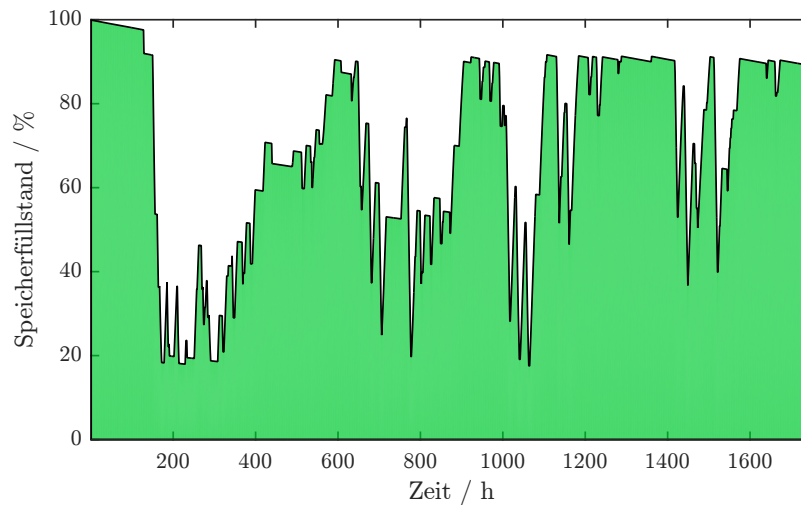


Abbildung 4.20: Verlauf des Füllgrades von Speicher 2

Abb. 4.21 zeigt den Vergleich zwischen dem Betrieb des FW-Netzes ohne und mit Speicher.

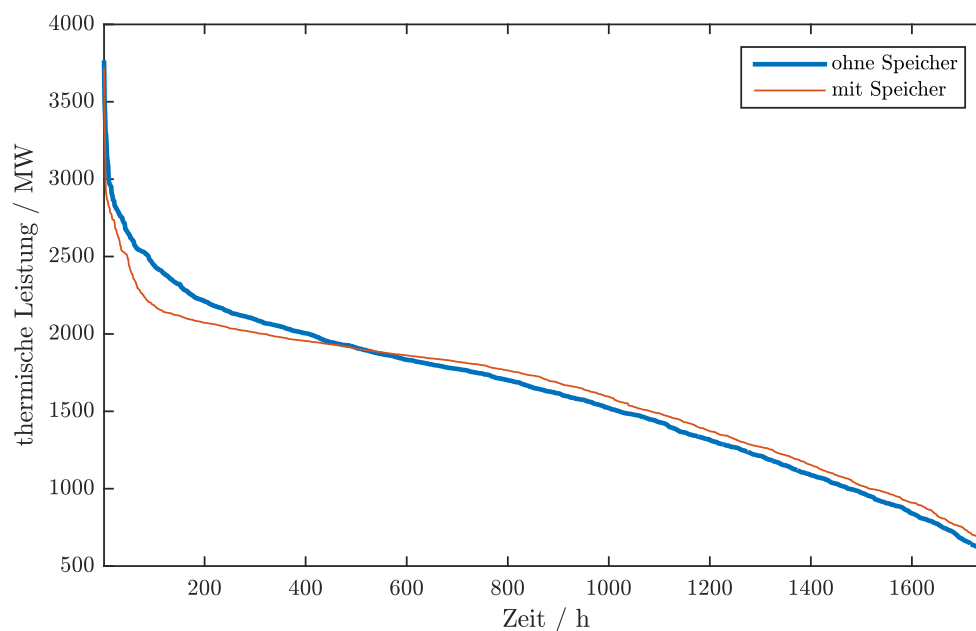


Abbildung 4.21: Vergleich der sortierten Dauerlinien der thermischen Leistung für einen Netzbetrieb mit und ohne Speicher

Ein Großteil der Lastspitzen lässt sich durch den Einsatz der Speicher vermeiden. Jedoch kann der Speicher die Erzeuger nur entlasten, wenn die Kriterien für das Entladen erfüllt sind:

- hohe Last (>2000 MW)
- Speicher ist nicht weniger als 20 % geladen

Die Einbindung von Speichern im FW-Netz ermöglicht einen wesentlich flexibleren Betrieb und kann aus technischer Sicht für die Minimierung der auftretenden Lastspitzen optimal

genutzt werden.

4.4 Versorgung von Stadterweiterungsgebieten mit Gas und Fernwärme

Die Frage 3 befasst sich mit möglichen Energieversorgungsvarianten von zukünftigen Stadterweiterungsgebieten. Als Fallbeispiel für die Beantwortung der Frage wurde das potentielle Ausbaugelände auf dem Areal des Westbahnhofes ausgewählt. Die Definition der Gebäudestruktur und die Bebauung der Ausbauflächen wurde aus [36] übernommen und in ein GIS-System eingepflegt. Das Erweiterungsgebiet besteht aus 12 Gebäudeblöcken, deren elektrischer Verbrauch 13172 MWh und deren thermischer Verbrauch 12975 MWh pro Jahr beträgt. In Zusammenarbeit mit dem Themenbereich der elektrischen Netze [54] sollen die in Tab. 4.1 angeführten Varianten analysiert werden. Die Variante 1 stellt die konventionelle Versorgung des Erweiterungsgebietes mit Strom für den elektrischen Verbrauch und mit Gas oder Fernwärme für den thermischen Verbrauch dar. Dabei soll überprüft werden, ob der Anschluss aller Gebäude jeweils an das Gasnetz oder Fernwärmenetz möglich ist. Für die Variante 2 ändert sich die thermische Versorgung nicht. Die Variante 3 sieht eine reine Stromversorgung für die Deckung des elektrischen und thermischen Energiebedarfs vor. Durch den Einsatz von Energieknoten soll in der Variante 4 die optimale Versorgung des Gebietes unter Berücksichtigung aller Energieträger ermittelt werden.

Tabelle 4.1: Versorgungsvarianten für das Stadterweiterungsgebiet

	Strom	Gas/FW	EE	Speicher
Variante 1	✓	✓	x	x
Variante 2	✓	✓	✓	x
Variante 3	✓	x	x	x
Variante 4	✓	✓	✓	✓

In Abb. 4.22 ist ein möglicher Anschluss des Ausbaugeländes an das primäre FW-Netz und in Abb. 4.23 ein möglicher Anschluss an das Niederdruck-Gasnetz dargestellt.

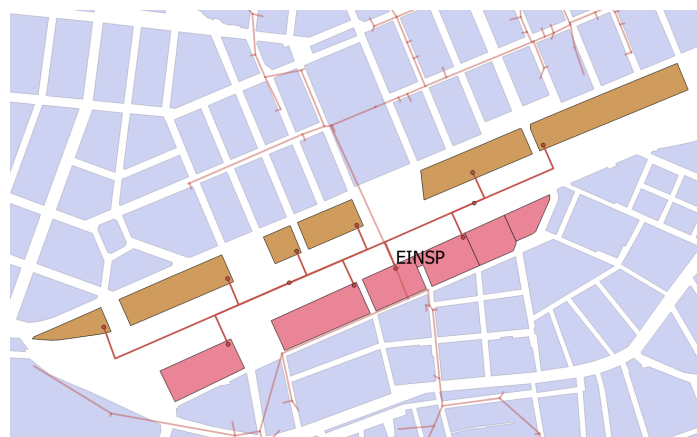


Abbildung 4.22: Ein möglicher Anschluss des Stadterweiterungsgebietes an das Fernwärmenetz

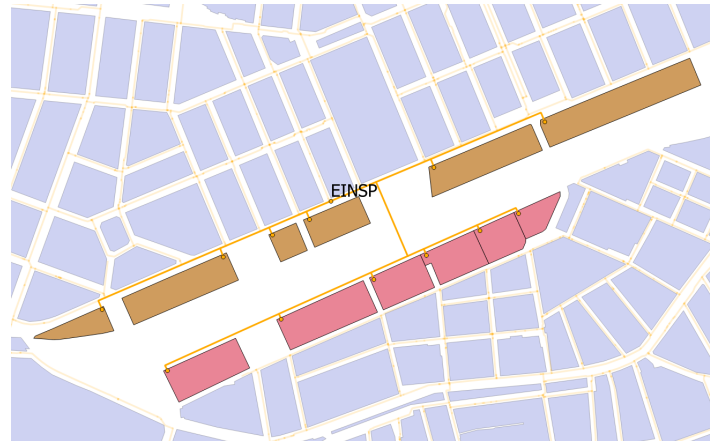


Abbildung 4.23: Ein möglicher Anschluss des Stadterweiterungsgebiets an das Niederdruck-Gasnetz

4.4.1 Fernwärme

Für die Beurteilung der Auswirkungen des möglichen Anschlusses des Neubaugebietes an das FW-Netz, wird der kritische Zeitpunkt des Business-as-usual-Szenario für die Jahre 2013, 2030 und 2050 simuliert. Die Ergebnisse werden mit den Werten der Simulationen verglichen, die ohne Gebietsanschluss berechnet wurden.

In Abb. 4.24 (a), (c) und (e) sind die Differenzdrücke der Referenzsimulationen der Jahre 2013, 2030 und 2050 dargestellt. Die Veränderungen dieser Differenzdrücke aufgrund des Anschlusses des Stadterweiterungsgebiets können in den Abb. 4.24 (b), (d) und (f) abgelesen werden. Im Jahr 2013 sinkt der Differenzdruck in der Umgebung des Stadterweiterungsgebiets um bis zu 250 mbar unter den Referenzwert ab. Im Gegensatz dazu, steigt der Differenzdruck im restlichen Versorgungsgebiet der Fernwärme an. Da der Differenzdruck nur minimal von dem Referenzergebnis abweicht, stellt die thermische Versorgung des Stadterweiterungsgebiets mit Fernwärme kein Problem dar. Die Auswirkungen des Anschlusses in den Jahren 2030 und 2050 sind noch kleiner als im Jahr 2013, da in diesen Zeiträumen die Referenzauslastungen wesentlich geringer sind und ein zusätzlicher Anschluss an das Netz weniger Einfluss auf den Betrieb hat.

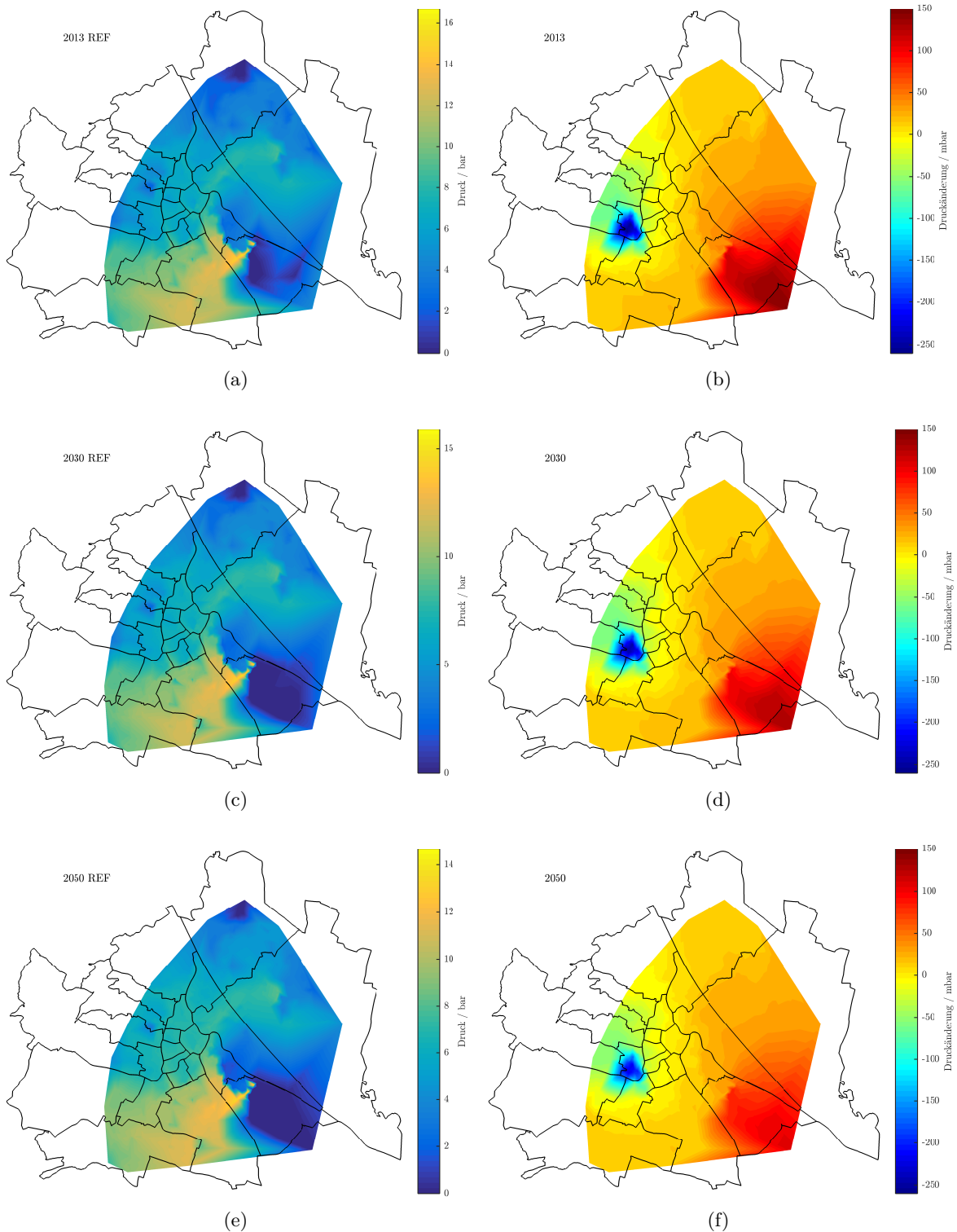


Abbildung 4.24: Differenzdruckänderungen durch Anschluss des Stadterweiterungsgebiets an das FW-Netz für die Jahre 2013, 2030 und 2050 des Business-as-usual-Szenarios

4.4.2 Gas

Die Ergebnisse für den Anschluss des Stadterweiterungsgebiets an das Gasnetz sind in Abb. 4.25 (a)-(f) zu sehen.

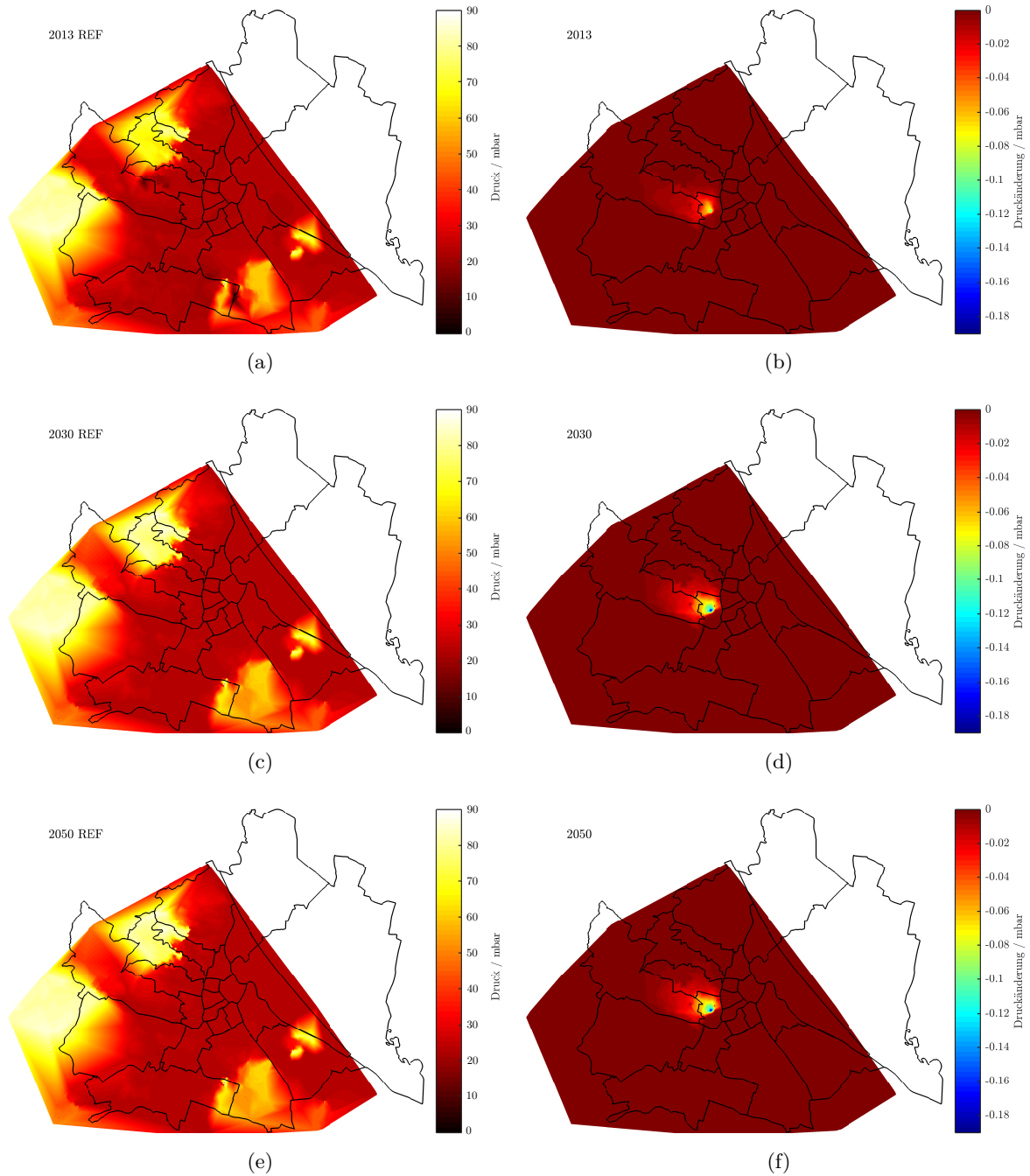


Abbildung 4.25: Druckänderungen durch Anschluss des Stadterweiterungsgebiets an das Niederdruck-Gasnetz für die Jahre 2013, 2030 und 2050 des Business-as-usual-Szenarios

Wie bei dem Anschluss an das FW-Netz, sind die Druckänderung aufgrund der geringen Lasterhöhung im ND-Gasnetz marginal. Die maximale Druckminderung beträgt 0.18 mbar und tritt in der unmittelbaren Umgebung des Anschlusspunktes des Stadterweiterungsgebiets auf. Die großen Differenzen in den Jahren 2030 und 2050 sind auf die sich ändernden Lasten innerhalb des Business-as-usual-Szenarios zurückzuführen.

Aus den Ergebnissen der Netzsimulationen kann geschlossen werden, dass das Erweiterungsgebiet unter Berücksichtigung der Entwicklung des thermischen Energiebedarfs ohne merkliche Auswirkungen an das bestehende FW-Netz oder an das Gasnetz angeschlossen werden könnte.

Kapitel 5

Diskussion

In diesem Kapitel werden die Auswirkungen bestimmter methodischer Annahmen und der Einfluss auf das numerische Verhalten der Simulation diskutiert. Weiters erfolgt ein Simulationsvergleich mit der kommerziellen Software PSS[®]SINCAL.

5.1 Konvergenzverhalten der hydraulischen Berechnungsmethode

Einer der Vorteile der Linearisierungsmethode nach *Wood* und *Charles* ist die sehr hohe Stabilität des iterativen Lösungsansatzes, unabhängig von der initialen Wahl der Startwerte. Inwieweit sich unterschiedliche Startwerte auf das Konvergenzverhalten auswirken, wird anhand eines Fallbeispiels erörtert. Als Testnetz fungiert ein schachbrettartig verzweigtes Rohrnetz mit einer Knotenanzahl von 2504 und einer Rohrstranganzahl von 4904 (siehe Abb. 5.1). Die Länge jedes Rohrstrangs beträgt 10 m und dessen Durchmesser 0.4 m. Die Rohrreibungszahl λ wird einmalig durch einen Zufallsalgorithmus in einem Wertebereich von 0.02 bis 0.6 zugewiesen.

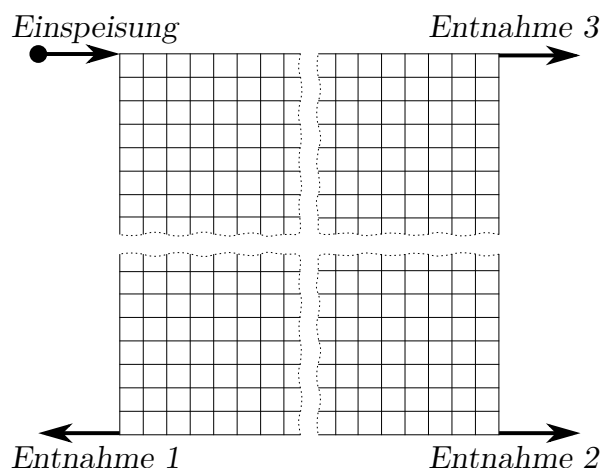


Abbildung 5.1: Topologie des Testnetzes

Als Randbedingungen werden die eingespeiste Menge, die Entnahmemenge bei den Stellen 1 und 2 und der Referenzdruck beim Einspeiser gesetzt. Das Abbruchkriterium während der Iteration beträgt für die Änderung der Strömungsgeschwindigkeit und die Änderung des Drucks

10^{-6} m/s und 10^{-6} Pa. Das Konvergenzverhalten soll anhand der Variation der Startwerte für die Strömungsgeschwindigkeiten und der Drücke untersucht werden. Ergänzend erfolgt die Analyse des Einflusses auf das Lösungsverhalten des entwickelten Verfahrens, bei Variation der Relaxationsfaktoren.

5.1.1 Einfluss der Variation der Startwerte

Um die Abhängigkeit des Konvergenzverhaltens von der Startwertwahl für die Strömungsgeschwindigkeiten darzustellen, erfolgt die Berechnung des zuvor beschriebenen Netzes mit vier verschiedenen Werten für die initiale Zuweisung des Lösungsvektors. Die Werte betragen 0.01 m/s, 0.1 m/s, 1 m/s und 10 m/s. Der Startwert ist für alle Stränge gleich und die initialen Werte für die Knotendrucke bleiben bei allen Variationen mit 10 bar konstant. In Abb. 5.2 sind die Ergebnisse der Simulationen in Form des Verlaufes der Residuen dargestellt.

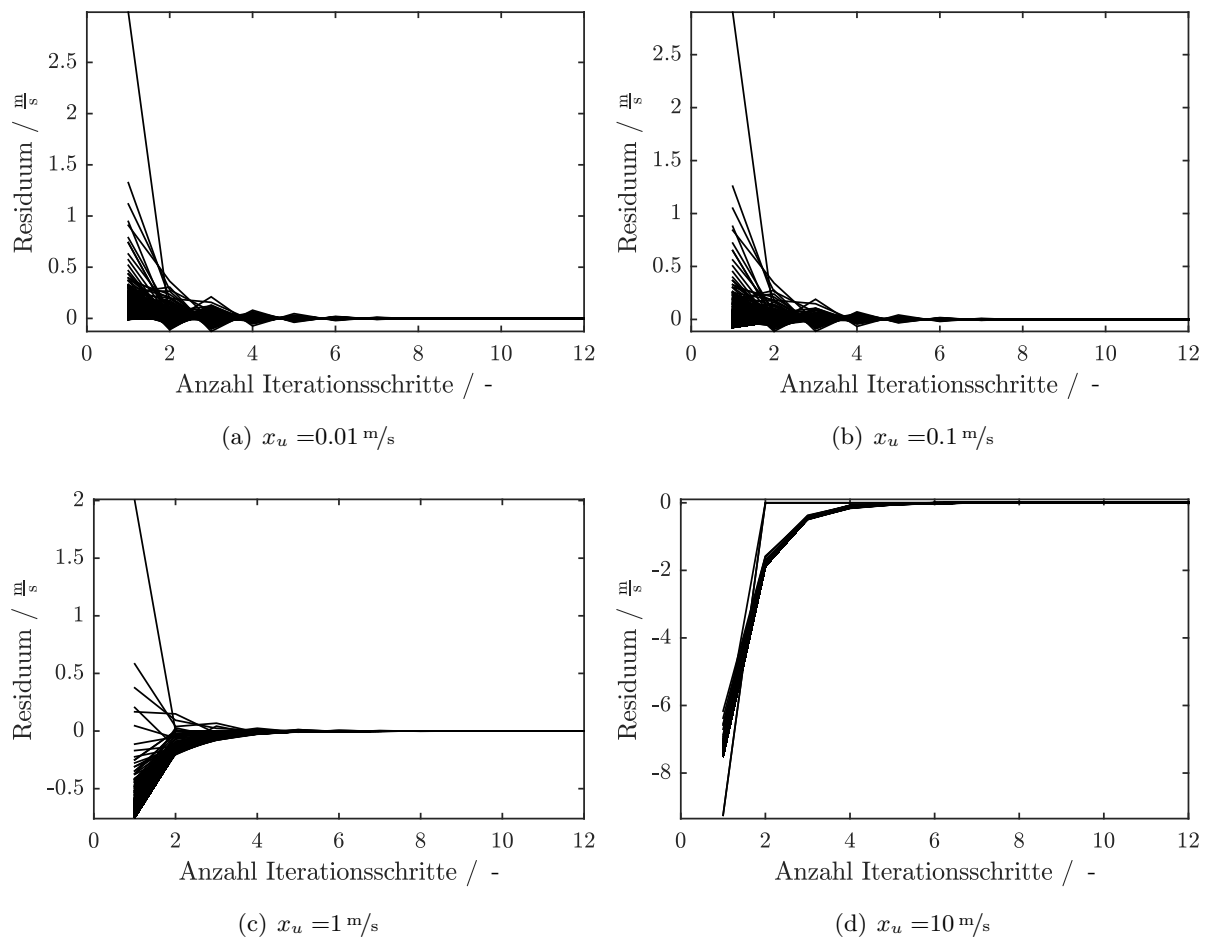


Abbildung 5.2: Einfluss des Startwerts der Strömungsgeschwindigkeiten auf das Konvergenzverhalten

Bei allen Startwerten wird das Konvergenzkriterium sehr rasch erfüllt. Auffallend sind die kleinen Oszillationen bei den Startwerten nahe Null, die jedoch schnell wieder abklingen. Das beste Ergebnis erreicht das Verfahren bei einem Startwert von 1 m/s. Aber auch bei

größeren Startwerten zeigt sich ein ausgezeichnetes Konvergenzverhalten. Das führt zu dem Schluss, dass der Startwert für die Strömungsgeschwindigkeiten sehr geringen Einfluss auf das Konvergenzverhalten hat. Es kann jedoch empfohlen werden die Werte nicht zu klein zu wählen, um eventuell auftretende Oszillationen zu vermeiden.

Die Initialwerte für die Drücke im Testnetz wurden mit 1 Pa, 100 Pa, 10^4 Pa und 10^6 Pa definiert. Die Startwerte der Strömungsgeschwindigkeiten werden wieder für alle Variationen mit 1 m/s konstant gehalten. Abb. 5.3 zeigt die Ergebnisse der vier Simulationen.

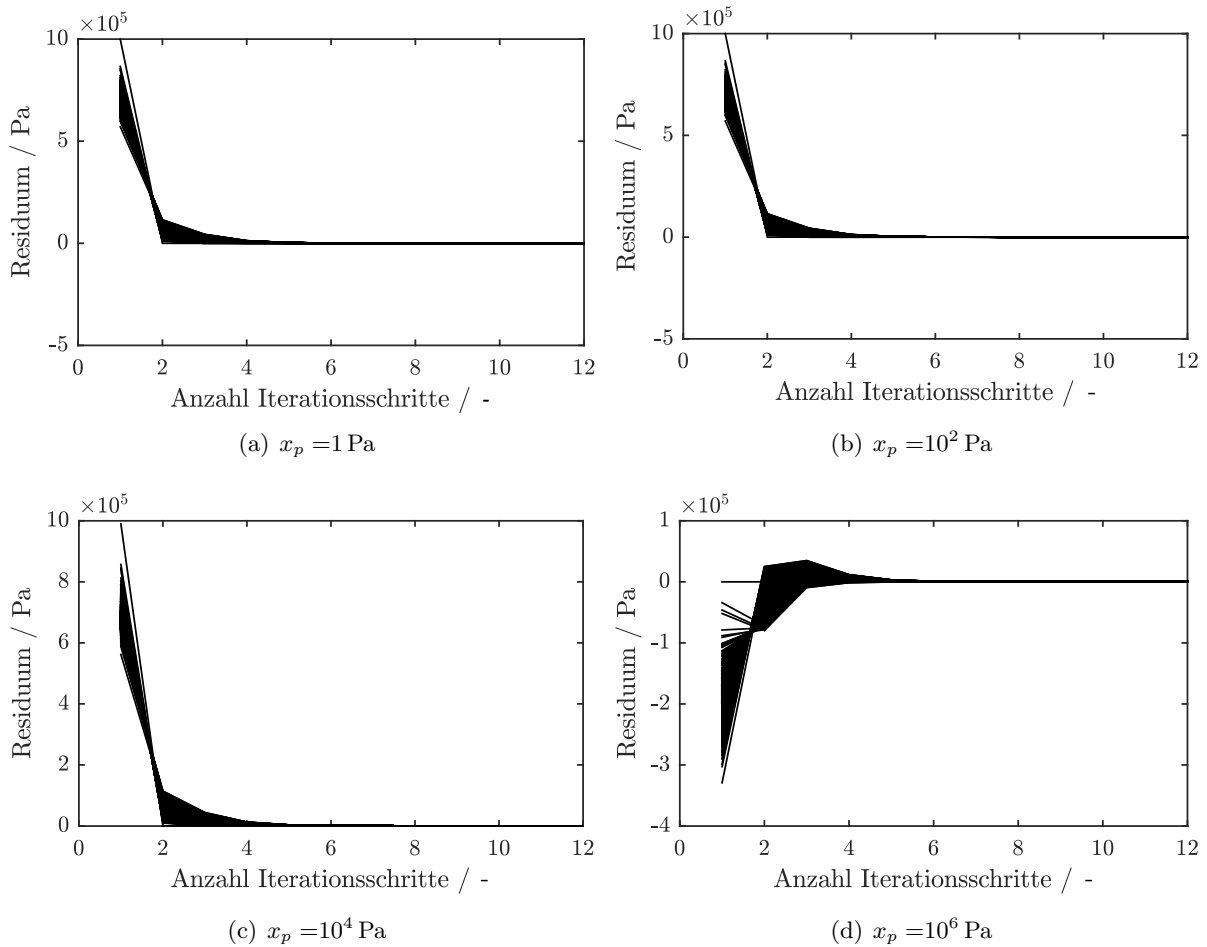


Abbildung 5.3: Einfluss des Startwerts der Drücke auf das Konvergenzverhalten

Auch bei der Variation der Druckstartwerte bleibt das Verfahren stabil und konvergiert sehr schnell. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Geschwindigkeitsvariationen, treten bei der Druckvariation keine Oszillationen auf. Das Konvergenzverhalten des entwickelten Verfahrens ist kaum von den Startwerten der Drücke abhängig.

5.1.2 Einfluss der Variation der Relaxationsfaktoren

Im folgenden wird anhand des bereits vorgestellten Fallbeispiels die Abhängigkeit des Konvergenzverhaltens von der Wahl der Relaxationsfaktoren untersucht. Die Relaxation erfolgt während der Iteration für die Strömungsgeschwindigkeiten und die Drücke mit den gleichen

Werten, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erhöhen. Die Startwerte sind mit 1 m/s für die Strömungsgeschwindigkeit und 10^6 Pa festgelegt. In Abb. 5.4 sind die Resultate der Geschwindigkeitsresiduen für sechs unterschiedliche Werte des Relaxationsfaktors dargestellt.

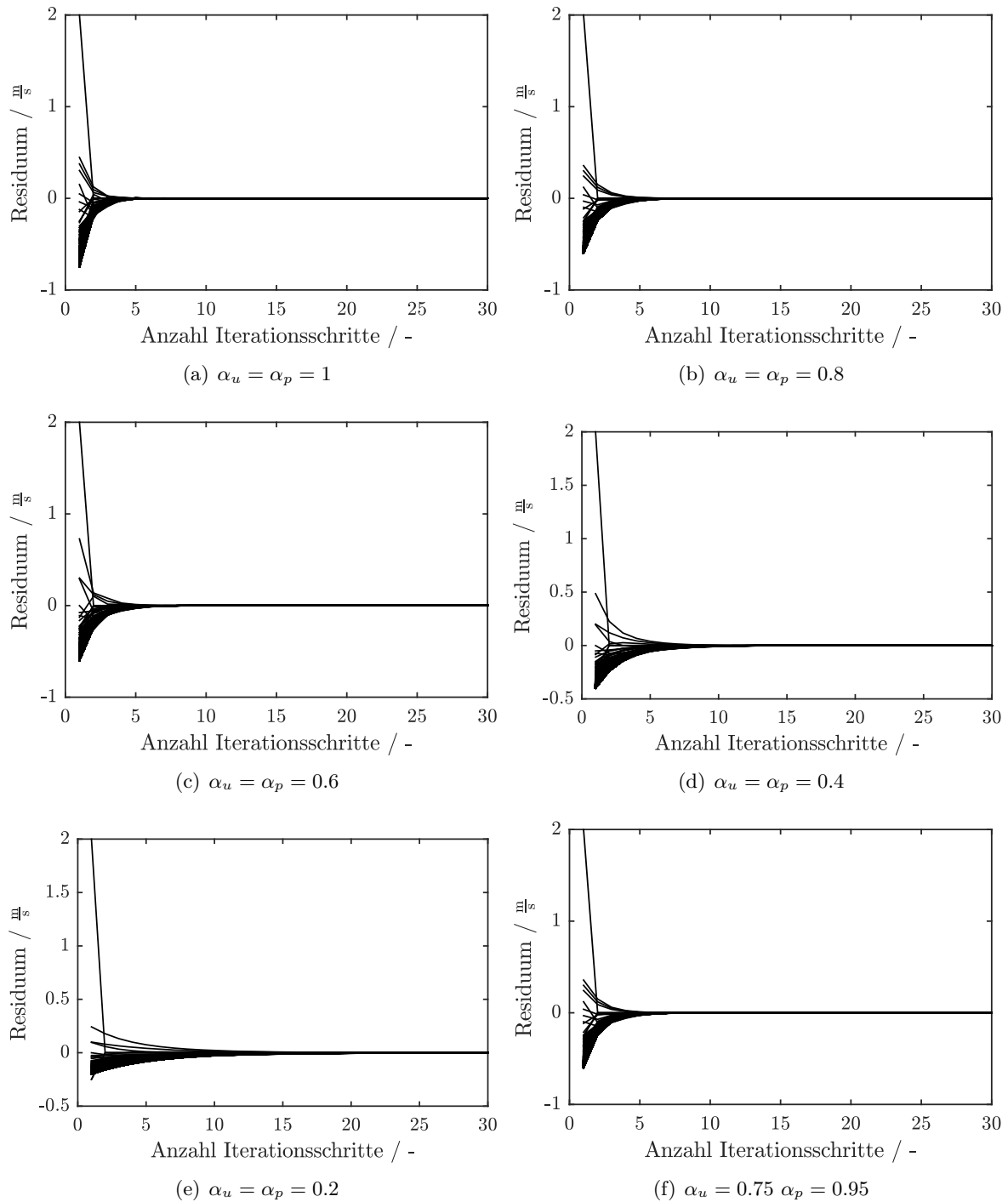


Abbildung 5.4: Einfluss des Relaxationsfaktors α auf die Geschwindigkeitsresiduen

Die Werte für den Relaxationsfaktor variieren von 1 bis 0.2 mit einer Schrittweite von -0.2 .

Ergänzend ist in Abb. 5.4 (f) das Ergebnis für $\alpha_u = 0.75$ und $\alpha_p = 0.95$ dargestellt, da diese Wertekombination bei den meisten Simulationen die wenigste Anzahl an Iterationsschritte benötigte und für die Untersuchung des Fernwärmenetzes der Stadt Wien verwendet wurde. Den Ergebnissen zufolge, können Relaxationsfaktoren für die iterative Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeiten ≥ 0.6 empfohlen werden, um schnelle Konvergenz zu erreichen. Abb. 5.5 zeigt für die selben Simulationläufe die Verläufe der Druckresiduen.

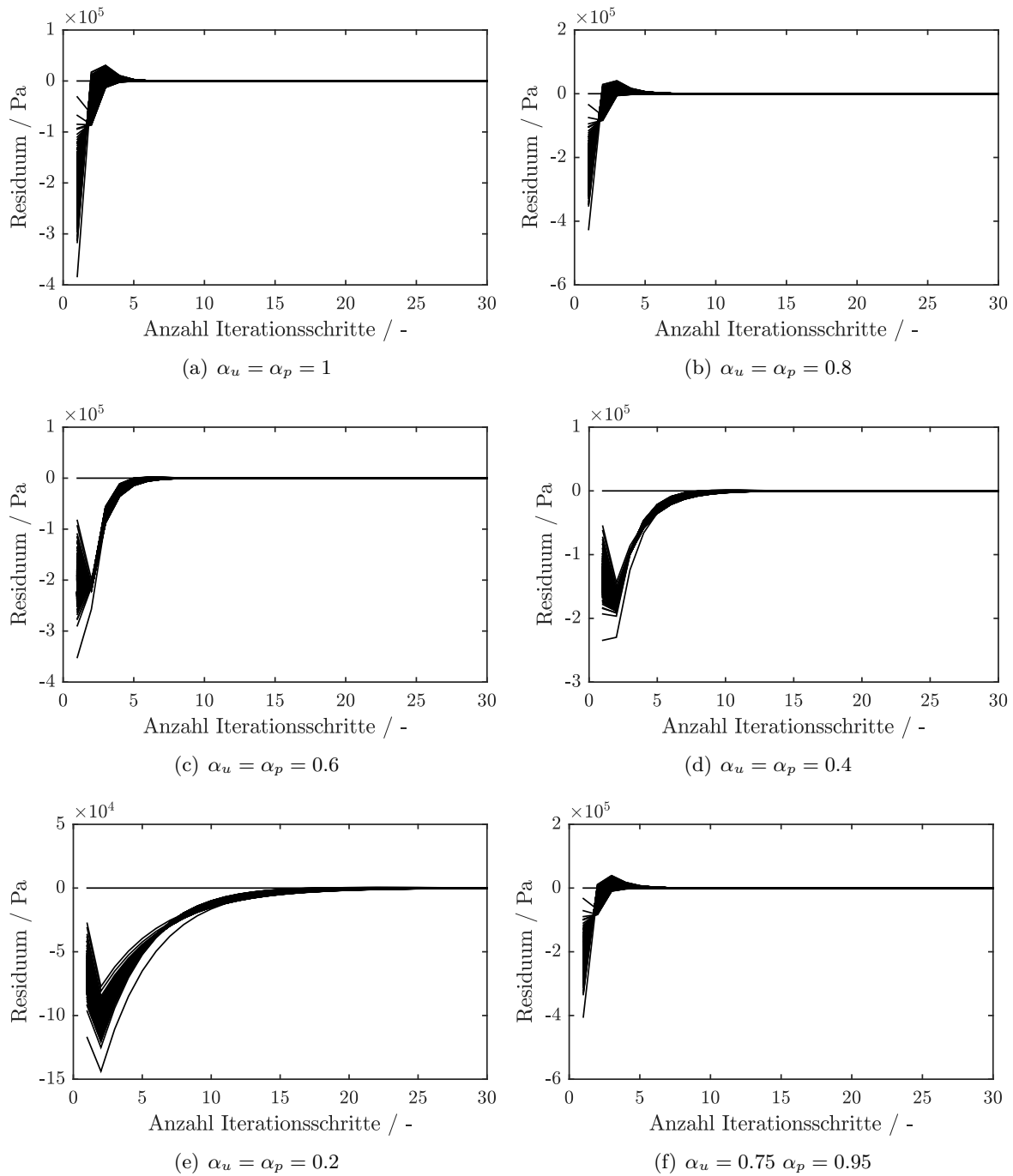


Abbildung 5.5: Einfluss des Relaxationsfaktors α auf die Druckresiduen

Bei großen Relaxationsfaktoren tendiert das Verfahren zu einem Überschwingen, welches sich aber nicht fortpflanzt, sondern unmittelbar gedämpft wird. Für Werte unterhalb 0.8 kann eine wesentlich erhöhte Anzahl an notwendigen Iterationsschritten beobachtet werden. Daher sollte auch der Relaxationsfaktor für die Druckwerte nicht zu niedrig gewählt werden.

5.2 Einfluss der Rohrreibungszahl λ

Um den Einfluss der Rohrreibungszahl zu ermitteln, erfolgt die Betrachtung eines Rohrstrangs, dessen strömungstechnischen Eigenschaften variiert werden. Zuvor werden noch die Möglichkeiten zur Ermittlung der Rohrreibungszahl erläutert.

Ob eine Strömung laminaren oder turbulenten Charakter aufweist, wird durch die Ermittlung der Reynoldszahl festgelegt. Diese stellt das Verhältnis zwischen den Trägheits- zu den Zähigkeitskräften in einer Rohrströmung dar. Die kritische Reynoldszahl $Re = 2300$ legt dabei den Grenzwert fest, ab der sich eine turbulente Strömung aufgrund der Strömungsinstabilität ausbildet. Unterhalb dieses Grenzwertes klingen Störungen im Strömungsfeld ab und eine gleichmäßige verwirbelungsfreie Strömung stellt sich ein. Die Reynoldszahl ist ein dimensionsloser Kennwert, der von der Strömungsgeschwindigkeit u , der kinematischen Viskosität ν und einer charakteristischen Länge (im Fall eines kreisrunden Rohrs der Durchmesser d) abhängt (Gleichung 5.1).

$$Re = \frac{\rho u d}{\eta} = \frac{u d}{\nu} \tag{5.1}$$

Das Moody-Diagramm (Abb. 5.6) stellt den Zusammenhang zwischen der Rohrreibungszahl λ , der relativen Rohrrauigkeit $\frac{k}{d}$ und der Reynoldszahl Re her.

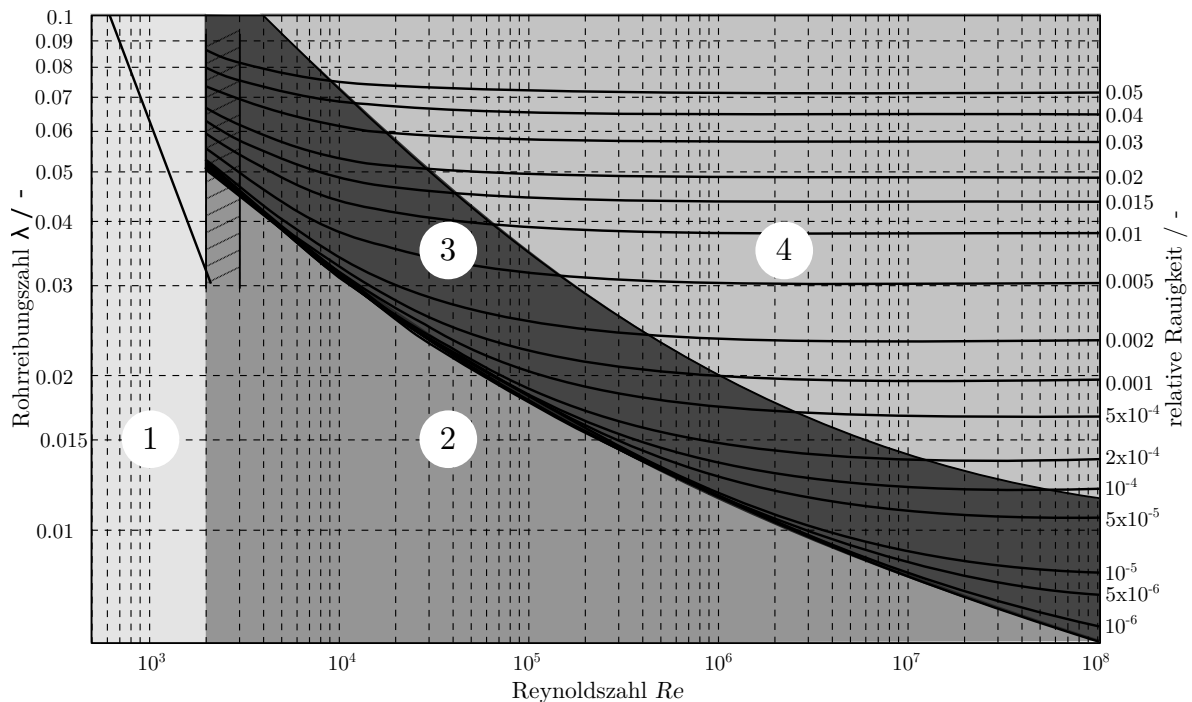


Abbildung 5.6: Ermittlung der Rohrreibungszahl λ mit dem Moody-Diagramm

Das Diagramm kann in 4 charakteristische Bereiche unterteilt werden, die sich in der Ermittlung der Rohrreibungszahl λ unterscheiden. Der Teilbereich 1 stellt Strömungen mit laminarem Charakter und einem parabelförmigen Strömungsprofil dar. Die Rohrreibungszahl ist in diesem Bereich, der sich bis zur kritischen Reynoldszahl erstreckt, nur von der Reynoldszahl abhängig und kann nach dem Gesetz von *Hagen-Poiseuille* berechnet werden:

$$\lambda_1 = \frac{64}{Re} \quad (5.2)$$

Ab dem die kritische Reynoldszahl überschritten wird, erfolgt eine Unterteilung der turbulenten Strömung in Abhängigkeit der wandnahen Strömungsbildung. Bildet sich eine viskose Unterschicht in Wandnähe aus, so bezeichnet man die Strömung als hydraulisch-glatt und die Rohrreibungszahl lässt sich unabhängig von der Rauigkeit berechnen. Je nach Größe der Reynoldszahl stehen unterschiedliche Bestimmungsgleichungen zur Verfügung:

$$\lambda_2 = \frac{0.316}{\sqrt[4]{Re}} \quad \text{nach Blasius für } Re_{kr} \leq Re \leq 10^6 \quad (5.3)$$

$$\lambda_2 = 0.0054 + \frac{0.396}{Re^{0.3}} \quad \text{nach Hermann für } Re \leq 10^6 \quad (5.4)$$

$$\lambda_2 = 0.007 + \frac{0.596}{Re^{0.35}} \quad \text{nach Richter für } 10^5 \leq Re \leq 10^6 \quad (5.5)$$

$$\lambda_2 = 0.0032 + \frac{0.221}{Re^{0.237}} \quad \text{nach Nikuradse für } 10^5 \leq Re \leq 10^8 \quad (5.6)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_2}} = 2 \lg(Re \sqrt{\lambda_2}) - 0.8 \quad \text{nach Prandtl für } Re \geq Re_{kr} \quad (5.7)$$

Das Teilgebiet 3 ist der Übergangsbereich zwischen hydraulisch-glattem und hydraulisch-rauem Gebiet. Die Rohrreibungszahl ist in diesem Bereich von der Reynoldszahl und von der relativen Rauigkeit $\frac{k}{d}$ abhängig. Die Berechnung erfolgt mit der Interpolationsformel nach *Colebrook*:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_3}} = -2 \lg \left(\frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda_3}} + 0.27 \frac{k}{d} \right) \quad (5.8)$$

Ist die viskose Unterschicht verschwindend dünn, sodass die Rauigkeitserhebungen die Strömungsform bestimmend dominieren, dann hat die Reynoldszahl keinen Einfluss auf die Rohrreibung. Die Ermittlung der Rohrreibungszahl erfolgt dann, abhängig von der relativen Rauigkeit, mit der Gleichung nach *Karman-Nikuradse*:

$$\lambda_4 = \frac{1}{\left(2 \lg \left(\frac{d}{k} \right) + 1.14 \right)^2} \quad (5.9)$$

oder nach *Moody*:

$$\lambda_4 = 0.005 + \frac{0.15}{\left(\frac{d}{k} \right)^{\frac{1}{3}}} \quad (5.10)$$

Im folgenden soll die mögliche Schwankungsbreite bei der Ermittlung der Rohrreibungszahl in Abhängigkeit der angenommenen Werte für die Rohrrauigkeit aufgezeigt werden. Dazu wird die Rohrreibungszahl für ein Stahlrohr mit einem Durchmesser von 300 mm ermittelt. Zunächst erfolgt die Berechnung unter der Annahme, dass Wasser mit 20 bar und 150 °C durch das Rohr fließt. In Abb. 5.7 ist der Verlauf der Rohrreibungszahl für verschiedene Rauigkeitswerte über der Strömungsgeschwindigkeit aufgetragen.

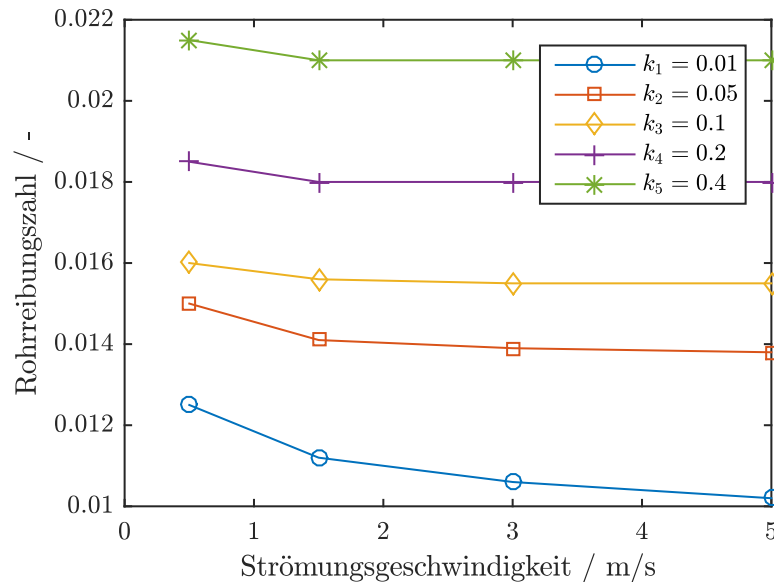


Abbildung 5.7: Entwicklung der Rohrreibungszahl λ für unterschiedliche Rohrrauigkeiten

Der Wert $k_1 = 0.01$ mm wurde in [100] für die Planung und somit für neue Stahlrohre ermittelt. Je nach Betrieb und Alter der Stahlrohre können sich Ablagerungen und Verkrustungen bilden, die wesentlichen Einfluss auf das Strömungsverhalten haben. Leicht verkrustete Stahlrohre weisen nach dem VDI-Wärmeatlas [1] eine mittlere Rauigkeit von $k_5 = 0.4$ mm auf. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0.5 m/s ändert sich die Rohrreibungszahl, aufgrund geänderter Rauigkeitswerte um 72 % und bei 5 m/s bereits um 105 % bezogen auf die niedrigere Rohrreibungszahl.

Da der Druckverlust einer geraden Rohrleitung direktproportional zur Rohrreibung ist, wäre es von Vorteil, die Rohrreibungszahl für jede Rohrleitung in einem Fernwärmenetz empirisch zu ermitteln. Für bestehende Netze ist diese Vorgehensweise jedoch nicht umsetzbar. Deswegen erfolgt bei der Initialisierung der Fernwärmesimulation die einmalige Zuordnung einer angenäherten Rohrreibungszahl. Auf eine explizite Berechnung wird aufgrund der Unsicherheiten bei der Zuordnung von Rauigkeitswerten verzichtet. Im Rahmen einer Netzparameter-Kalibrierung müssen die initial festgelegten Werte für die Rohrreibungszahl anhand von Messwerten angepasst werden.

In Hinblick auf weit verzweigte Netze sollten die vorkommenden Rohreinbauten, wie Ventile, Krümmer oder Verzweigungen berücksichtigt werden. Diese stellen einen wesentlich Beitrag zum Druckverlust in einem hydraulischen Netzwerk dar. Für Rohreinbauten gibt es in der facheinschlägigen Literatur eine Reihe von Näherungswerten, die aber ebenfalls durch Kalibrierungsmaßnahmen auf die individuelle Netzstruktur angepasst werden müssen.

5.3 Einfluss der Kompressibilität auf den Druckverlust

Welchen Einfluss die Kompressibilität eines gasförmigen Fluids auf den Druckverlust hat, soll nachfolgend erläutert werden. Die Ausführungen zu den Auswirkungen auf das Druckverlustverhalten beschränken sich auf die zwei häufig eingesetzten stationären Methoden der inkompressiblen und isothermen kompressiblen Rohrströmungen. Anhand einer durchströmten Rohrleitung mit einer Länge von $L = 10000$ m erfolgt der Vergleich der resultierenden Druckverluste. Der Durchmesser des Rohrs beträgt $d = 200$ mm und die Rohrreibungszahl wird mit $\lambda = 0.02$ angenommen. Der Druckverlauf über die Rohrlänge wird für niedrige (1 bar) und hohe Drücke (70 bar) berechnet. Die Eintrittsgeschwindigkeit der Strömung beträgt für jede Berechnung $u = 10$ m/s. In Tab. 5.1 sind die geometrischen Daten und die Randbedingungen zusammengefasst.

Tabelle 5.1: Geometrische Daten und Randbedingungen des Vergleichs

	Niederdruck	Hochdruck
Rohrlänge	10 km	10 km
Rohrdurchmesser	200 mm	200 mm
Rohrreibungszahl	0.02 -	0.02 -
Eintrittsgeschwindigkeit	10 m/s	10 m/s
Eintrittsdruck	1 bar	70 bar
Eintrittsdichte	0.7 kg/m ³	52 kg/m ³

Abb. 5.8 zeigt den Druckverlauf über die Rohrlänge für niedrige Drücke. Die Differenz der Druckverluste zwischen inkompressibler und isotherm kompressibler Berechnungsmethode über die Rohrleitung beträgt 0.1023 bar. Bezogen auf den absoluten Druckverlust der kompressiblen Berechnung entspricht dieser Wert einer Abweichung von 22.6 %. Für sehr kurze Rohrleitungen wird die Differenz verschwindend gering und kann vernachlässigt werden.

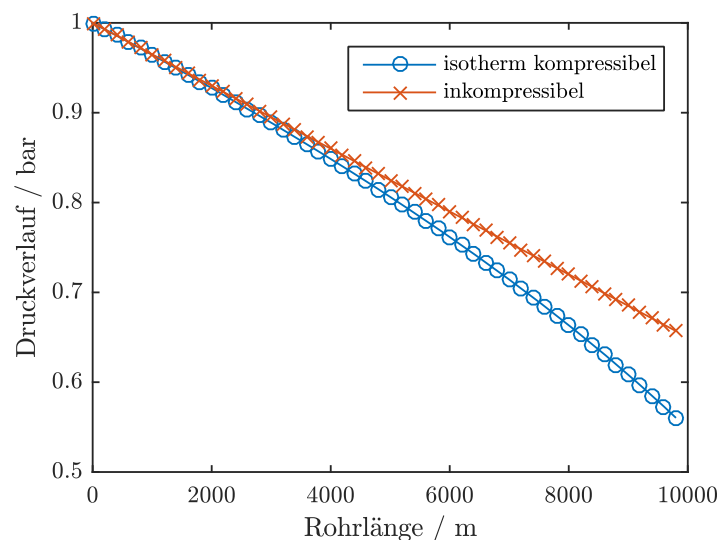


Abbildung 5.8: Vergleich des Druckverlaufes einer inkompressiblen und isothermen kompressiblen Berechnungsmethode für niedrigen Druck

In Abb. 5.9 sind die Druckverläufe für eine Strömung in einem Hochdruckrohr dargestellt. Unter der Annahme der Inkompressibilität beträgt der Druckverlust über die Rohrleitung 26 bar und die kompressible Berechnung des Druckverlusts ergibt einen Druckverlust von 34.5 bar. Daraus resultiert eine Abweichung von 24.6 % bezogen auf den kompressiblen Druckverlust.

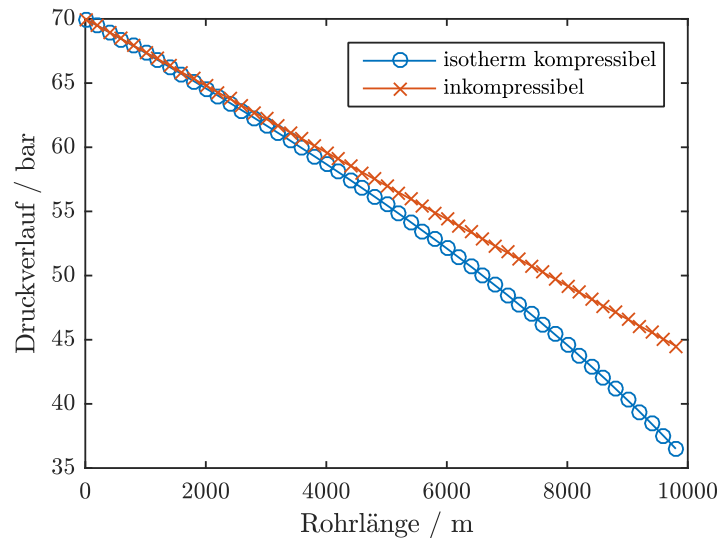


Abbildung 5.9: Vergleich des Druckverlaufes einer inkompressiblen und isothermen kompressiblen Berechnungsmethode für hohen Druck

Die Ausführungen zum Einfluss der Kompressibilität zeigen, dass bei längeren Rohrleitungen die Differenz zwischen inkompressibler und isothermer kompressibler Druckverlustberechnung bis zu 24.6 % betragen. Zwar besteht das Niederdruck-Gasnetz der Stadt Wien hauptsächlich aus vielen kurzen Rohrsträngen, aber die Summe aller Niederdruckleitungen beträgt ungefähr 4150 km. Daher erfolgt die Abbildung der Gasnetze im Rahmen der entwickelten hydraulischen Berechnungsmethode als isotherm und kompressibel.

5.4 Vergleich mit der kommerziellen Software PSS[®]SINCAL

Eine Validierung der entwickelten Netzberechnungsmethodik mit realen Messdaten konnte nicht durchgeführt werden, da keine Messdaten zur Verfügung standen. Daher folgt in diesem Abschnitt ein Vergleich mit dem kommerziellen Programm PSS[®]SINCAL. Allerdings können nur die hydraulischen Methoden verglichen werden, da die thermische Berechnung für Fernwärmenetze in PSS[®]SINCAL stationär erfolgt. Die Struktur des Basisnetzes für die Gegenüberstellung ist ebenfalls schachbrettartig, wie in Kapitel 5.1 gewählt. In Tab. 5.2 sind für ein Fernwärmenetz und ein Gasnetz die Anzahl der vorhandenen Knoten und Rohre, die geometrischen Daten des Netzes und die Randbedingungen für die Testsimulation angegeben.

Tabelle 5.2: Daten des Testnetzes für Fernwärme und Gas

	<i>Fernwärme</i>	<i>Gas</i>
Rohranzahl	544	544
Knotenanzahl	289	289
Rohrelänge	je 100 m	je 100 m
Rohrdurchmesser	je 200 mm	je 100 mm
Geodätische Höhe	je 0 m	je 0 m
Einspeisedruck	20 bar	4 bar
Entnahme Verbaucher 1	100 t/h	150 m ³ /h
Entnahme Verbaucher 2	300 t/h	1000 m ³ /h
Entnahme Verbaucher 3	300 t/h	300 m ³ /h

Die Konvergenzkriterien wurden aus den Standardeinstellungen von PSS[®]SINCAL übernommen. Diese sind für das Fernwärmenetz erfüllt, wenn sich der Druck nicht mehr als 0.001 bar und der Volumenstrom nicht mehr als 0.01 l/s am Ende eines Iterationsschrittes ändern. Der Volumenstrom von 0.01 l/s entspricht bei einem Rohr mit einem Durchmesser von 200 mm einer Strömungsgeschwindigkeit von $3.18 \cdot 10^{-4}$ m/s. Die Konvergenzkriterien für das Gasnetz unterscheiden sich nur in der zulässigen Volumenstromänderung. Diese beträgt 0.01 m³/h und entspricht bei einem Rohrdurchmesser von 100 mm einer Strömungsgeschwindigkeit von $3.5 \cdot 10^{-4}$ m/s. Beim Vergleichen der beiden Anwendungen, stellt PSS[®]SINCAL die Referenz dar. Zunächst erfolgte die Abbildung und Simulation der beiden Netze in PSS[®]SINCAL und anschließend in MATLAB[®]. Die Ermittlung der Rohrreibungszahl wird in PSS[®]SINCAL in Abhängigkeit der Reynoldszahl durchgeführt. Für die laminare Strömung ($Re \leq 2320$) kommt die Beziehung nach *Hagen-Poiseuille* (Gleichung 5.2) und für die turbulente Strömung ($Re \geq 4000$) die Näherungsformel nach *Colebrook* (Gleichung 5.8) zum Einsatz. Liegt die Reynoldszahl im instabilen Bereich ($2320 < Re < 4000$), erfolgt eine lineare Interpolation. Da die in MATLAB[®] entwickelte Methode vereinfachend eine konstante Rohrreibungszahl annimmt, wurde diese in der Vergleichssimulation solange angepasst, bis die Ergebnisse mit denen aus PSS[®]SINCAL ausreichend übereinstimmten. Diese Vorgehensweise ist analog zu einer Kalibrierung der Simulationsparameter mit Messdaten. In Tab. 5.3 und 5.4 sind die Ergebnisse der Simulationen für das Fernwärme- und Gasnetz dargestellt. Der als Ergebnis aufgeführte durchschnittliche Druck ist über alle 289 Knoten und die durchschnittliche Geschwindigkeit ist über alle 544 Rohre gebildet.

Tabelle 5.3: Vergleich der Ergebnisse (Fernwärme)

	PSS [®] SINCAL	ENTW. METHODE	Differenz
Durchschnittlicher Druck	18.564 bar	18.561 bar	-0.0162 %
Minimaler Druck	18.264 bar	18.267 bar	0.0164 %
Durchschnittliche Geschwindigkeit	0.3212 m/s	0.3210 m/s	-0.0623 %
Maximale Geschwindigkeit	3.3405 m/s	3.3394 m/s	-0.0329 %
Anzahl der Iterationen	17	9	-47.1 %

Die Ergebnisse für das Fernwärmenetz zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den beiden Anwendungen. Der Vergleich der notwendigen Iterationsschritte zeigt, dass die in MATLAB[®] entwickelte Methode wesentlich schneller konvergiert als PSS[®]SINCAL. Die

Differenzen sind auf die Ergebnisse der Referenz-Software bezogen. Die geringen Unterschiede sind auf die vorgegebenen Konvergenzkriterien und die verschiedenen Ansätze bei der Berücksichtigung der Rohrreibungszahl zurückzuführen. Für die inkompressible und kompressible Berechnung wendet PSS[®]SINCAL die gleiche Konvergenzschranke von 0.001 bar an.

Der Einfluss einer Geschwindigkeitsänderung ist bei kompressiblen Medien (meist sehr geringe Dichte) um ein vielfaches kleiner als bei inkompressiblen Medien. Zur Veranschaulichung soll der Druckverlust für ein gerades Rohr mit einer Länge von 100 m und einem Durchmesser von 200 mm für zwei verschiedene Fluide berechnet werden. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s ergibt sich für ein Fluid mit einer Dichte von 1000 kg/m³ (Wasser) ein Druckverlust von 50 mbar und für ein Fluid mit einer Dichte von 1 kg/m³ (Gas) ein Druckverlust von 0.05 mbar. Daher erfolgt für die Vergleichssimulationen des Gasnetzes eine Verkleinerung der maximalen zulässigen Änderung der Druckerwerte während der Iteration. Anstatt 0.001 bar wird der Wert um den Faktor 1000 auf 0.1 Pa herabgesetzt. Das entspricht ungefähr dem Dichteverhältnis zwischen Gas und Wasser.

Tabelle 5.4: Vergleich der Ergebnisse (Gas)

	PSS [®] SINCAL	ENTW. METHODE	Differenz
Durchschnittlicher Druck	3.5386 bar	3.5347 bar	-0.11 %
Minimaler Druck	3.2970 bar	3.2965 bar	-0.015 %
Durchschnittliche Geschwindigkeit	2.4858 m/s	2.4877 m/s	0.076 %
Maximale Geschwindigkeit	21.5670 m/s	21.6115 m/s	0.206 %
Anzahl der Iterationen	51	13	-74.5 %

Die Unterschiede bei den Ergebnissen für das Gasnetz sind ebenfalls sehr gering. Bemerkenswert ist die große Differenz bezüglich der Anzahl der benötigten Iterationsschritte. Das, im Rahmen dieser Arbeit, entwickelte Verfahren braucht um 74.5 % weniger Iterationen als die Vergleichsberechnung in PSS[®]SINCAL. Aus dem Vergleich der beiden Simulationsanwendungen kann der Schluss gezogen werden, dass die unterschiedlichen Berechnungsmethoden eine sehr hohe Übereinstimmung bei den Ergebnissen haben und, dass die Konvergenzgeschwindigkeit der entwickelten Methode wesentlich höher ist als die der Software PSS[®]SINCAL.

5.5 Einfluss der Netzgröße auf die Rechenzeit

Die folgenden Ausführungen dienen dazu, die benötigten Zeiten für die Berechnung eines Netzes, dessen Topologie analog zu dem Testnetz aus Kapitel 5.1 ist und von einem inkompressiblen Medium durchströmt wird, zu eruieren. Allerdings wird die Größe des Netzes variiert, um den Einfluss der Knoten- und Stranganzahl auf das zeitliche Verhalten des Aufstellens der Gleichungen und des Lösen des Gleichungssystems zu untersuchen. Die Knotenanzahl bzw. Stranganzahl beträgt für das kleinste Netz 29 bzw. 44. Für das größte berechnete Netz, werden 62504 Knoten und 124504 Stränge berücksichtigt. In Abb. 5.10 ist die benötigte Zeit für die Aufstellung der Knotengleichungen dargestellt.

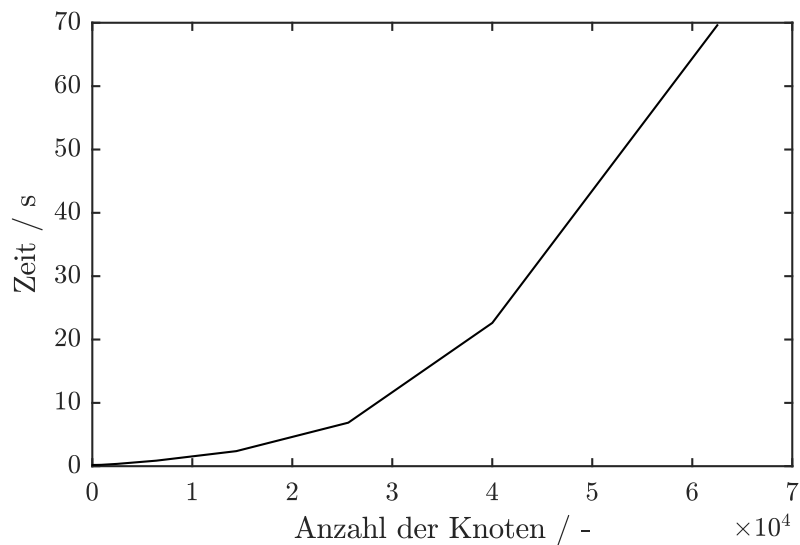


Abbildung 5.10: Benötigte Rechenzeit für die Aufstellung der Knotengleichungen in Abhängigkeit der Knotenanzahl

Die Dauer für die Gleichungsaufstellung steigt überproportional mit der Anzahl der Knoten an. Dieses Verhalten hängt mit den noch nicht optimierten Matrizenoperationen zusammen, die sequentiell aufgebaut sind. Obwohl die MATLAB[®] Funktion *parfor* angewendet wird, kann der Anstieg der Berechnungszeit nicht gedämpft werden. Die Funktion *parfor* teilt parallelisierbare Rechenoperationen in einer *for*-Schleife auf die vorhandenen Rechenkerne der CPU auf und beschleunigt dadurch das Durchlaufen der Schleife.

Der in Abb. 5.11 dargestellte Verlauf zeigt, dass das Aufstellen der Stranggleichungen nur einen Bruchteil der Zeit beansprucht, die für die Aufstellung der Knotengleichungen benötigt wird.

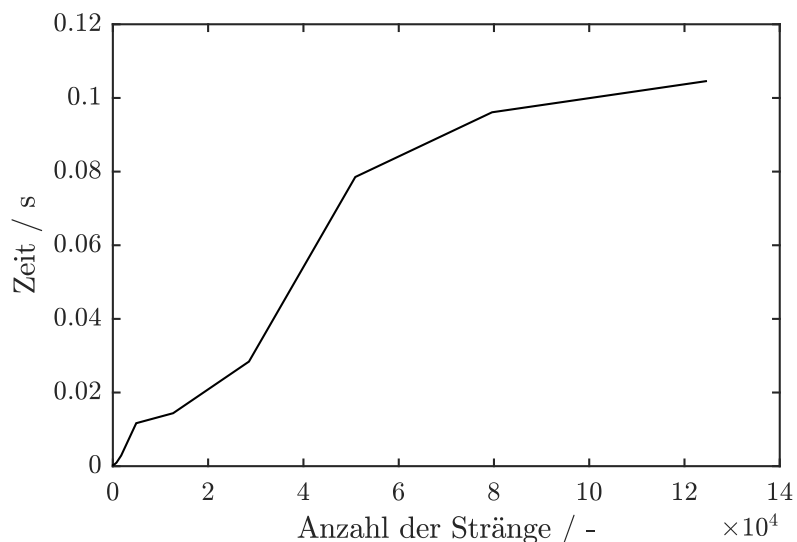


Abbildung 5.11: Benötigte Rechenzeit für die Aufstellung der Stranggleichungen in Abhängigkeit der Stranganzahl

Die Rechenoperationen beschränken sich auf einfache Additionen und die Erstellung von Diagonalmatrizen aus Vektoren. Aufgrund der Speicherformates der Matrizen (*sparse*-Format), stellen diese Operationen keine zeitkritischen Prozesse dar.

Abb. 5.12 zeigt den Verlauf der benötigten Zeit für die iterative Lösung eines Gleichungssystems in Abhängigkeit der Gleichungszahl. Nach einem anfänglichen näherungsweise linearen Verlauf, nimmt die beanspruchte Zeit mit steigender Gleichungszahl ab. Bei der Lösung der großen linearen Gleichungssysteme mit schwachbesetzter Koeffizientenmatrix ist man auf die zur Verfügung stehenden mathematischen Verfahren angewiesen. Der MATLAB[®] Operator bietet sich zur Lösung vieler linearer Gleichungssysteme an. Da aber im Fall der Netzberechnung, bei jeder Iteration ein Gleichungssystem von gleicher Gestalt gelöst werden muss, könnte eine manuelle Hinterlegung eines LU-Lösers eine Beschleunigung der Lösung herbeiführen.

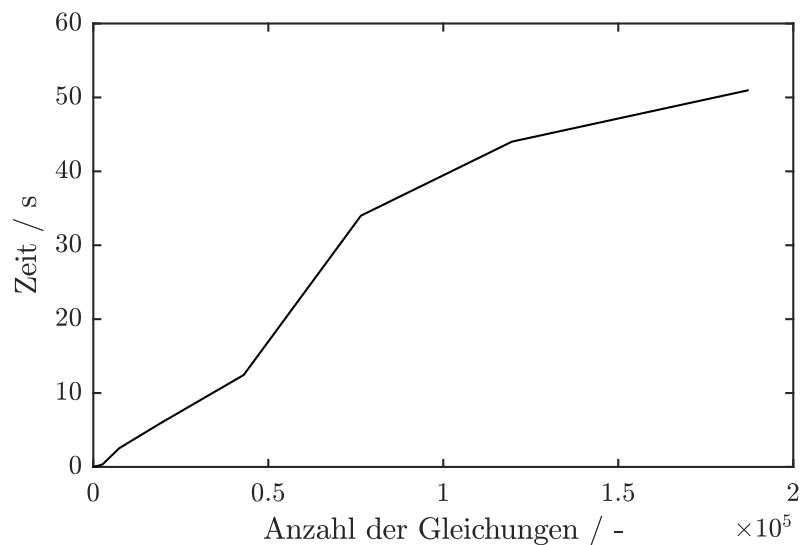


Abbildung 5.12: Benötigte Rechenzeit für die Lösung des linearen Gleichungssystems in Abhängigkeit der Gleichungszahl

Grundsätzlich stellt die benötigte Zeit für die Rechenprozedur der stationären, inkompressiblen hydraulischen Berechnung eines vermaschten Rohrnetzwerkes einen guten Wert dar. Auf Basis der bestehenden Ausführungen des hydraulischen Berechnungsverfahrens ergeben sich weitere Möglichkeiten der Verbesserungen des Rechenalgorithmus, die in Kapitel 6 beschrieben sind.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag zur Beantwortung der interdisziplinären Fragestellungen, die im Rahmen des Kooperationsprojekts URBEM behandelt wurden. Das Projekt URBEM umfasst 10 Themenbereiche, die 8 verschiedene wissenschaftliche Fachdisziplinen abdecken und miteinander interagieren. Ein zentrales Ziel des Projekts war die Untersuchung von bestimmten Entwicklungen urbaner Gebiete über einen längeren Zeitraum. Daher erfolgte zunächst themenübergreifend die Definition von Szenarien der wirtschaftlichen, technologischen und gesellschaftlichen Entwicklungen bis zu dem Jahr 2050.

Im Zusammenhang mit den auftretenden Fragen des Themenfelds der *thermischen Netze* und *Gasnetze*, wurden Methoden für die Modellierung und Simulation von großen vermaschten Strömungsnetzen entwickelt. Mit diesen Methoden sollte eine detaillierte thermohydraulische Analyse von Fernwärmenetzen und eine hydraulische Analyse von Gasnetzen möglich sein. Ergänzend musste der Informationsaustausch mit bestimmten anderen Themenbereichen von URBEM sichergestellt werden. Die Umsetzung der Berechnungsansätze für thermische Netze erfolgte durch die Kombination einer quasistationären inkompressiblen hydraulischen Berechnung mit einer transienten thermischen Berechnung auf Basis der Finite Volumen Methode. Ausgehend von der Annahme einer isothermen kompressiblen Rohrströmung, wurde die quasistationäre hydraulische Berechnungsmethode für die Untersuchung von Gasnetzen entwickelt.

Durch die Anwendung der weiterentwickelten Berechnungsmethoden auf das primäre Fernwärmenetz und das Niederdruck-Gasnetz der Stadt Wien, konnten die Auswirkungen der verschiedenen Szenarien auf das Betriebsverhalten der Netze gezeigt werden. Es wurden Simulationen des Fernwärmenetzes mit dezentralen Einspeisern durchgeführt, um die daraus resultierenden Veränderungen einer Dezentralisierung der Erzeugerstruktur zu untersuchen. Weitere Berechnungsvariationen bezogen sich auf den Einsatz von thermischen Speichern für die Spitzenlastsenkung im Fernwärmesystem. Hinsichtlich der Anbindung von Stadterweiterungsgebieten an die städtischen Versorgungsnetze, erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Themenbereich der elektrischen Netze [54] die Analyse mehrerer Anschlussvariationen an das Strom-, Gas- und Fernwärmenetz.

In Hinblick auf das numerische Verfahren der hydraulischen Berechnungsmethoden, wurde das Konvergenzverhalten untersucht und ein Vergleich mit der kommerziell verfügbaren Software PSS[®]SINCAL in Bezug auf deren Ergebnisübereinstimmung und Konvergenzgeschwindigkeit durchgeführt. Aufgrund der Analysen des numerischen Verhaltens des entwickelten Berechnungsverfahrens, zeigt sich, dass die hydraulische Berechnungsmethode durchwegs stabil

ist und eine höhere Konvergenzgeschwindigkeit als PSS[®]SINCAL aufweist.

Durch weitere Entwicklungen könnte man das numerische Simulationsmodell um folgende Komponenten oder Methoden erweitern:

- Abbildung des Sekundärnetzes eines Fernwärmesystems:
Derzeit beschränkt sich das Fernwärmemodell auf das primäre Netz mit definierten Einspeise- und Entnahmestellen. Durch die Bereitstellung der entsprechenden Topologien und Betriebsdaten eines Sekundärnetzes, lässt sich die entwickelte thermohydraulische Berechnungsmethode problemlos auf dieses anwenden.
- Einsatzplanung der thermischen Erzeugereinheiten:
Für eine genauere Vorgabe der einzuspeisenden thermischen Leistung der vielen Erzeuger, bietet sich die Integration oder Koppelung der thermohydraulischen Berechnung mit einer Einsatzplanung für thermische Einspeiser an. Abhängig vom Betriebszustand des Netzes und den energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen für die Einsatzplanung, kann das reale Betriebsverhalten eines Fernwärmesystems besser angenähert werden.
- Weiterentwicklung des numerischen Modells
 - Der für die Lösung der linearen Gleichungssysteme mit großen schwach besetzten Koeffizientenmatrizen verwendete MATLAB[®] Operator, könnte trotz der bereits hohen Rechengeschwindigkeit, durch einen eigenen Löser substituiert werden. Diese Option macht daher Sinn, da die Grundstruktur des Gleichungssystems immer gleich bleibt und speziell darauf angepasste Lösungsalgorithmen die Rechenoperationen schneller ausführen können.
 - Die Berechnung von Stoffwerten von Wasser, wie die Dichte oder die spezifische Wärmekapazität, ist derzeit mit einer Funktion der industriellen Formulierung der IAPWS hinterlegt. Während der Jahressimulationen des Fernwärmesystems wird diese Funktion sehr oft aufgerufen und beansprucht dadurch einen Teil der Rechnerkapazität. Zur Erhöhung der Rechengeschwindigkeit könnte daher eine vereinfachte Berechnung der Stoffwerte für Wasser erfolgen.
 - Während der Implementierung der Rechenalgorithmen in MATLAB[®] wurde bereits ansatzweise versucht, Berechnungen parallel durchzuführen. Bei einer Weiterentwicklung des Programms könnte die Parallelisierung weiterer Rechenoperationen fokussiert werden, um dadurch die Rechengeschwindigkeit bei der Behandlung großer vermaschter Netze zu erhöhen.
- Implementierung einer Regelung für Pumpen und Ventile:
Mit einer Einbindung von Regelalgorithmen für den Betrieb der Pumpen und Ventile können quasistationäre Simulationen von Fernwärmesystem noch genauer durchgeführt werden.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Inhaltliche Themenfelder von URBEM	2
1.2	Schnittstellen zwischen den Themenfeldern von URBEM	5
2.1	Netztopologien von Fernwärmenetzen	7
2.2	Fahrweisen der Vorlauftemperatur im primären Fernwärmenetz	8
2.3	Darstellung der verschiedenen Leitungsebenen des Gastransports und der Gasverteilung (in Anlehnung an [56])	9
2.4	Ableiten eines Knoten-Strang-Netzwerkes	10
2.5	Differenzdruckverlauf zwischen Vor- und Rücklauf in Abhängigkeit der Entfernung vom Einspeiser	11
2.6	Grafische Darstellung der erweiterten Bernoulli Gleichung	15
2.7	Beispiel für ein vermaschtes Rohrnetzwerk, bestehend aus 5 Rohren, 4 Knoten, einer Quelle und zwei Senken	16
2.8	Anwendung des <i>Hardy-Cross</i> -Verfahrens auf ein vermaschtes Rohrnetz	19
2.9	Berechnung einer Nullstelle mit dem <i>Newton-Raphson</i> Verfahren	22
3.1	Unterschied zwischen quasistationärer und transientser Betrachtung	28
3.2	Ableitung der Inzidenzmatrix anhand einer gegebenen Netzstruktur	29
3.3	<i>Q-H</i> Pumpenkennlinie einer Kreiselpumpe mit Radiallauf und allgemeine Ventilkennlinie	33
3.4	Flussbilanz über ein Volumenelement	36
3.5	Erhaltung und Transport einer physikalischen Größe	38
3.6	Eindimensionale Diskretisierung einer Rohrströmung	40
3.7	Ermittlung der Temperaturen an den KV-Grenzwänden durch lineare Interpolation	42
3.8	Ermittlung der Temperaturen an den KV-Grenzwänden durch das 1 st Order <i>Upwind-Schema</i>	42
3.9	Programmablauf der thermohydraulischen Berechnung für <i>n</i> Zeitschritte	45
3.10	Darstellung des Verlaufs der Zustandsgrößen einer isothermen kompressiblen eindimensionalen Rohrströmung	46
3.11	Programmablauf der isothermen kompressiblen Strömungsberechnung für einen Zeitschritt	51
3.12	Reduzierung der Anzahl von Strängen	52
3.13	Reduzierung der Verbraucherstränge	53
4.1	Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser, bereitgestellt durch Fernwärme [37]	55

4.2	Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser, bereitgestellt durch Gas [37]	56
4.3	Differenzdruckverteilung im primären FW-Netz für das Referenzjahr 2013	57
4.4	Differenzdruckänderungen des primären Fernwärmenetzes, bezogen auf das Referenzjahr 2013	58
4.5	Positionen von Rohrabschnitten mit hohem spezifischen Druckverlust im Vorlauf des primären Fernwärmenetzes, Referenz 2013	59
4.6	Veränderung der Positionen von stark belasteten Rohrabschnitten des primären Fernwärmenetzes für das Business-as-usual-, Klimaschutz- und Stagnations-Szenario der Jahre 2030 und 2050	60
4.7	Relativer Anteil an stark belasteten Rohrabschnitten mit einem spezifischen Druckverlust von mehr als 300 Pa/m	61
4.8	Relativer Anteil an thermischen Verlusten für das Business-as-usual-, Klimaschutz- und Stagnations-Szenario der Jahre 2030 und 2050	62
4.9	Durchschnittlich benötigter elektrischer Pumpenenergiebedarf für die Bereitstellung von einer MWh_{th}	62
4.10	Druckverteilung im Niederdruck-Gasnetz von Wien im Referenzjahr 2013	63
4.11	Druckänderungen des Niederdruck-Gasnetzes für das Business-as-usual-, Klimaschutz- und Stagnations-Szenario der Jahre 2030 und 2050	64
4.12	Relativer Anteil an stark belasteten Rohrabschnitten mit einem höheren spezifischen Druckverlust als 1.5 Pa/m	65
4.13	Positionen von stark belasteten Rohrabschnitten mit einem höheren spezifischen Druckverlust als 10 Pa/m im Niederdruck-Gasnetz im Referenzjahr 2013	66
4.14	Positionen von stark belasteten Rohrabschnitten für das Business-as-usual-, Klimaschutz- und Stagnations-Szenario der Jahre 2030 und 2050	67
4.15	Übersicht der dezentralen Einspeisestellen	68
4.16	Vergleich der summierten Einzeldruckverluste zwischen der Referenz-Netzstruktur und Netzstruktur mit dezentralen Einspeisern	69
4.17	Vergleich der durchschnittlichen spezifischen Druckverluste zwischen der Referenz-Netzstruktur und der Netzstruktur mit dezentralen Einspeisern	70
4.18	Vergleich der benötigten Pumpenleistung zwischen der Referenz-Netzstruktur und Netzstruktur mit dezentralen Einspeisern	70
4.19	Verlauf des Füllgrades von Speicher 1	71
4.20	Verlauf des Füllgrades von Speicher 2	72
4.21	Vergleich der sortierten Dauerlinien der thermischen Leistung für einen Netzbetrieb mit und ohne Speicher	72
4.22	Ein möglicher Anschluss des Stadterweiterungsgebiets an das Fernwärmenetz	73
4.23	Ein möglicher Anschluss des Stadterweiterungsgebiets an das Niederdruck-Gasnetz	74
4.24	Differenzdruckänderungen durch Anschluss des Stadterweiterungsgebiets an das FW-Netz für die Jahre 2013, 2030 und 2050 des Business-as-usual-Szenarios	75
4.25	Druckänderungen durch Anschluss des Stadterweiterungsgebiets an das Niederdruck-Gasnetz für die Jahre 2013, 2030 und 2050 des Business-as-usual-Szenarios	76
5.1	Topologie des Testnetzes	78
5.2	Einfluss des Startwerts der Strömungsgeschwindigkeiten auf das Konvergenzverhalten	79
5.3	Einfluss des Startwerts der Drücke auf das Konvergenzverhalten	80

5.4	Einfluss des Relaxationsfaktors α auf die Geschwindigkeitsresiduen	81
5.5	Einfluss des Relaxationsfaktors α auf die Druckresiduen	82
5.6	Ermittlung der Rohrreibungszahl λ mit dem Moody-Diagramm	83
5.7	Entwicklung der Rohrreibungszahl λ für unterschiedliche Rohrrauigkeiten . . .	85
5.8	Vergleich des Druckverlaufes einer inkompressiblen und isothermen kompressiblen Berechnungsmethode für niedrigen Druck	86
5.9	Vergleich des Druckverlaufes einer inkompressiblen und isothermen kompressiblen Berechnungsmethode für hohen Druck	87
5.10	Benötigte Rechenzeit für die Aufstellung der Knotengleichungen in Abhängigkeit der Knotenanzahl	90
5.11	Benötigte Rechenzeit für die Aufstellung der Stranggleichungen in Abhängigkeit der Stranganzahl	90
5.12	Benötigte Rechenzeit für die Lösung des linearen Gleichungssystems in Abhängigkeit der Gleichungsanzahl	91

Tabellenverzeichnis

2.1	Kommerziell verfügbare Softwarepakete	10
2.2	Näherungsgleichungen zur Berechnung von Druckverlusten in Rohren	13
2.3	Ansätze für die Aufstellung der Systemgleichungen	14
4.1	Versorgungsvarianten für das Stadterweiterungsgebiet	73
5.1	Geometrische Daten und Randbedingungen des Vergleichs	86
5.2	Daten des Testnetzes für Fernwärme und Gas	88
5.3	Vergleich der Ergebnisse (Fernwärme)	88
5.4	Vergleich der Ergebnisse (Gas)	89

Literaturverzeichnis

- [1] L1 Einphasige Strömungen. In *VDI-Wärmeatlas*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013, S. 1221–1284.
- [2] ABEYSEKERA, M., WU, J., JENKINS, N., UND REES, M. Steady state analysis of gas networks with distributed injection of alternative gas. *Applied Energy* 164 (2016), 991–1002.
- [3] ABRAHAM, E., UND STOIANOV, I. Efficient Preconditioned Iterative Methods for Hydraulic Simulation of Large Scale Water Distribution Networks. *Procedia Engineering* 119 (2015), 623–632.
- [4] AFSHAR, M. H. An element by element algorithm for pipe network analysis. *International Journal of Engineering Science (Tehran)* 12, 3 (2001), 87–99.
- [5] AFSHAR, M. H. Energy Formulation of the Pipe Network Analysis. *International Journal of Civil Engineering* 1, 1 (2003), 48–56.
- [6] AL-ADDOUS, M. *Berechnen der Größe von Wasserspeichern zum saisonalen Speichern von Wärme bei der ausschließlichen Wärmeversorgung von Häusern mit Solarkollektoren*. Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2006.
- [7] ALMBAUER, R. *Numerische Methoden in der angewandten Thermodynamik*. Skriptum, Technische Universität Graz, 2015.
- [8] ALTMAN, T., UND BOULOS, P. F. Convergence of Newton method in nonlinear network analysis. *Mathematical and Computer Modelling* 21, 4 (1995), 35–41.
- [9] BANDA, M. K., HERTY, M., UND KLAR, A. Gas flow in pipeline networks. *American Institute of Mathematical Sciences* 1, 1 (2006), 41–56.
- [10] BAUMANN, W. W., BUNGE, U., FREDERICH, O., SCHATZ, M., UND THIELE, F. *Finite-Volumen-Methode in der Numerischen Thermofluidodynamik*. Skriptum, Technische Universität Berlin, 2006.
- [11] BECKHAUS, P. *Simulation und Anlagenmanagement für dezentrale Energieversorgungssysteme*. Logos-Verl., Berlin, 2002.
- [12] BERMÚDEZ, A., GONZÁLEZ-DÍAZ, J., GONZÁLEZ-DIÉGUEZ, F. J., GONZÁLEZ-RUEDA, Á. M., UND CÓRDOBA, M. P. F. D. Simulation and Optimization Models of Steady-state Gas Transmission Networks. *Energy Procedia* 64 (2015), 130–139.

- [13] BOJAKOWSKI, A. *Hydraulische Berechnung und Optimierung des Trinkwasserverteilungsnetzes im Versorgungsgebiet des Wasserwerkes "Greiz-Schönfeld"*. Diplomarbeit, Staatl. Studienakademie Glauchau, 2008.
- [14] BOJAXHIU, E. *Auf der MultiFrontal-Methode basierende ILU-Zerlegungen*. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, 2007.
- [15] BÖRM, S. *Iterative Lösungsverfahren für große lineare Gleichungssysteme*. Skriptum, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2013.
- [16] BÖSWIRTH, L. Rohrströmung und Druckverlust. In *Technische Strömungslehre*, Viewegs Fachbücher der Technik. Vieweg+Teubner Verlag, 2004, S. 165–204.
- [17] BOULOS, P., UND ALTMAN, T. A graph-theoretic approach to explicit nonlinear pipe network optimization. *Applied Mathematical Modelling* 15, 9 (1991), 459–466.
- [18] BOULOS, P. F., UND ALTMAN, T. An explicit approach for modelling closed pipes in water networks. *Applied Mathematical Modelling* 17, 8 (1993), 437–443.
- [19] BOULOS, P. F., LANSEY, K. E., UND KARNEY, B. W. *Comprehensive Water Distribution Systems Analysis Handbook for Engineers and Planners*. MWH Soft, Incorporated, 2006.
- [20] BRKIC, D. An improvement of Hardy Cross method applied on looped spatial natural gas distribution networks. *Applied Energy* 86, 7-8 (2009), 1290–1300.
- [21] BRKIĆ, D. Iterative Methods for Looped Network Pipeline Calculation. *Water Resources Management* 25, 12 (2011), 2951–2987.
- [22] BUCAR, G., SCHWEYER, K., FINK, C., RIVA, R., NEUHÄUSER, M., MEISSNER, E., STREICHER, W., UND HALMDIENST, C. Dezentrale erneuerbare Energie für bestehende Fernwärmenetze. *Berichte aus Energie- und Umweltforschung*, Schriftenreihe 78/2006 (2006).
- [23] CHUA, T.-S. *Mathematical Software For Gas Transmission Networks*. Dissertation, The University of Leeds, 1982.
- [24] COLLINS, M., COOPER, L., HELGASON, R., KENNINGTON, J., UND LEBLANC, L. Solving the pipe network analysis problem using optimization techniques. *Management science* 24, 7 (1978), 747–760.
- [25] CROSS, H. *Analysis of Flow in Networks of Conduits Or Conductors*. Bulletin No.286. University of Illinois, 1936.
- [26] DEMIR, S., YETILMEZSOY, K., UND MANAV, N. Development of a modified Hardy-Cross algorithm for time-dependent simulations of water distribution networks. *Fresenius environmental bulletin* 17, 8 (2008), 1045–1053.
- [27] DEUERLEIN, J. *Zur hydraulischen Systemanalyse von Wasserversorgungsnetzen*. Dissertation, Universität Fridericiana zu Karlsruhe, 2002.

- [28] DROEGE, P., BACHMAIER, A., NARMSARA, S., EGGERS, J.-B., UND HERKEL, S. Spatial Distribution of Thermal Energy Storage Systems in Urban Areas Connected to District Heating for Grid Balancing. *Energy Procedia* 73 (2015), 3–11.
- [29] ECK, B. J., UND MEVISSSEN, M. Fast non-linear optimization for design problems on water networks. *World Environmental and Water Resources Congress* (2013), 696–705.
- [30] EDER-NEUHAUSER, P. *A Model for Malware Containment and Resilience in Smart Grid Communication Systems*. Dissertation, TU Wien, to be published 2017.
- [31] ELLIS, D. J. *The behaviour of pipe network analysis solution techniques*. Dissertation, The University of Adelaide, 2001.
- [32] ELLIS, D. J., UND SIMPSON, A. R. *Convergence of Iterative Solvers for the Simulation of a Water Distribution Pipe Network*. Research Report No. R138, The University of Adelaide, 1996.
- [33] EPP, R., UND FOWLER, A. G. Efficient code for steady-state flows in networks. *Journal of the Hydraulics division* 96, 1 (1970), 43–56.
- [34] EPPLE, B., LEITHNER, R., LINZER, W., UND WALTER, H., Eds. *Simulation von Kraftwerken und Feuerungen*. Springer, Wien, 2012.
- [35] FERZIGER, J. H., UND PERIĆ, M. *Numerische Strömungsmechanik*. Springer, Berlin, 2008.
- [36] FORSTER, J. *Strategische raumbezogene Visualisierung im Kontext der Innenentwicklung urbaner Siedlungs-, Energie- und Mobilitätssysteme am Beispiel der Stadt Wien*. Dissertation, TU Wien, 2016.
- [37] FRITZ, S. *Economic assessment of the long-term development of buildings' heat demand and grid-bounded supply*. Dissertation, TU Wien, 2016.
- [38] GABRIELAITIENE, I., BOHM, B., UND SUNDEN, B. Modelling temperature dynamics of a district heating system in Naestved, Denmark - A case study. *Energy Conversion and Management* 48, 1 (2007), 78–86.
- [39] GROSS, S. *Untersuchung der Speicherfähigkeit von Fernwärmenetzen und deren Auswirkungen auf die Einsatzplanung von Wärmeerzeugern*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2012.
- [40] GROSSWINDHAGER, S., VOIGT, A., UND KOZEK, M. Efficient Physical Modelling of District Heating Networks. In *Modelling and Simulation* (7/4/2011-7/6/2011).
- [41] GUELPA, E., SCIACOVELLI, A., UND VERDA, V. Thermo-fluid dynamic model of complex district heating networks for the analysis of peak load reductions in the thermal plants. In *ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*.
- [42] GUPTA, R. K. *Analysis and control of flows in pressurized hydraulic networks*. Dissertation, UNESCO-IHE Institute for Water Education, 2006.
- [43] HÄHNLEIN, C. *Numerische Modellierung zur Betriebsoptimierung von Wasserverteilnetzen*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2008.

- [44] HAMAM, Y. M., UND BRAMELLER, A. Hybrid method for the solution of piping networks. *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of* 118, 11 (1971), 1607–1612.
- [45] HASSINE, I. B., UND EICKER, U. Simulation and optimization of the district heating network in Scharnhäuser Park. *Proceedings of 2nd Polygeneration Conference (2nd ECP), Tarragona* (2011).
- [46] HAUFE, N. *Energiekonsum, Stadt und soziale Milieus*. Dissertation, TU Wien, to be published 2017.
- [47] HENSEL, P. *Optimierung des Ausbaus von Nah- und Fernwärmenetzen: unter Berücksichtigung eines bestehenden Gasnetzes*. Dissertation, Universität Paderborn, 2013.
- [48] HERTY, M., MOHRING, J., UND SACHERS, V. A new model for gas flow in pipe networks. *Mathematical Methods in the Applied Sciences* 33, 7 (2010), 845–855.
- [49] HUKÉ, L. *Energetische Optimierung der öffentlichen Gasversorgung*. Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2002.
- [50] JEPPSON, R. W., UND LABORATORY, U. W. R. *Steady Flow Analysis of Pipe Networks: An Instructional Manual*. Department of Civil and Environmental Engineering and Utah Water Research Laboratory, Utah State University, 1974.
- [51] JIE, P., TIAN, Z., YUAN, S., UND ZHU, N. Modeling the dynamic characteristics of a district heating network. *Energy* 39, 1 (2012), 126–134.
- [52] JIE, P., ZHU, N., UND LI, D. Operation optimization of existing district heating systems. *Applied Thermal Engineering* 78, 0 (2015), 278–288.
- [53] JOHANSSON, C. *Towards intelligent district heating*. Dissertation, Blekinge Institute of Technology, 2010.
- [54] KAUFMANN, T. *Modellierung und Simulation von urbanen Stromversorgungsnetzen in einem multiskalaren Gesamtmodell*. Dissertation, TU Wien, 2016.
- [55] KÖCHER, R. *Beitrag zur Berechnung und Auslegung von Fernwärmenetzen*. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2000.
- [56] KONSTANTIN, P. *Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin Heidelberg, 2013.
- [57] KRIEL, A. J. *Pressure formulation and adaptive control of numerical algorithms for transient flow in pipe networks*. Dissertation, Potchefstroom Campus of the North-West University, 2012.
- [58] KROPE, J., TROP, P., UND GORICANEC, D. Flow-pressure analysis of loop gas networks. *International Journal of Systems Applications* 4, 5 (2011).
- [59] LANG, C., UND STACHE, N. *Hydraulik von Rohrsystemen*. Skriptum, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe.

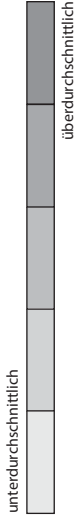
- [60] LARSEN, H. V., BOHM, B., UND WIGBELS, M. A comparison of aggregated models for simulation and operational optimisation of district heating networks. *Energy Conversion and Management* 45, 7-8 (2004), 1119–1139.
- [61] LOPES, A. M. G. Implementation of the Hardy-Cross method for the solution of piping networks. *Computer Applications in Engineering Education* 12, 2 (2004), 117–125.
- [62] LORENZEN, P. *Das Wärmenetz als Speicher im Smart Grid: Betriebsführung eines Wärmenetzes in Kombination mit einem stromgeführten Heizkraftwerk*. Masterthesis, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2013.
- [63] MARTIN, H. *Numerische Strömungssimulation in der Hydrodynamik: Grundlagen und Methoden*. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [64] MATKO, D., GEIGER, G., UND GREGORITZA, W. Pipeline simulation techniques. *Mathematics and Computers in Simulation* 52, 3-4 (2000), 211–230.
- [65] MATTAUSCH, K. *Zuverlässigkeitsanalyse von Fernwärmenetzen*. Diplomarbeit, Technische Universität Graz, 2006.
- [66] MÜLLER, A., BÜCHELE, R., KRANZL, L., TOTSCHNIG, G., MAUTHNER, F., HEIMRATH, R., UND HALMDIENST, C. Solarenergie und Wärmenetze: Optionen und Barrieren in einer langfristigen, integrativen Sichtweise. *Neue Energien 2020* (2014).
- [67] NIELSEN, H. B. Methods for Analyzing Pipe Networks. *Journal of Hydraulic Engineering* 115, 2 (1989), 139–157.
- [68] NOLL, B. *Numerische Strömungsmechanik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo Hong Kong Barcelona Budapest, 1993.
- [69] OFFNER, G. *Numerische Methoden in der angewandten Thermodynamik*. Skriptum, Technische Universität Graz, 2015.
- [70] OPPELT, T. *Modell zur Auslegung und Betriebsoptimierung von Nah- und Fernkältenetzen*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2015.
- [71] PAAR, A., HERBERT, F., PEHNT, M., OCHSE, S., RICHTER, S., MAIER, S., HUTHER, H., KÜHNE, J., UND WEIDLICH, I. Transformationsstrategien Fernwärme. *AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V* (2013).
- [72] PONWEISER, K. *Instationäre nichtadiabate Strömung in Rohrsystemen*. Dissertation, Technische Universität Wien, 1992.
- [73] RAB, N. *Modern Portfolio Theory applied to District Heating Generation Expansion Planning*. Dissertation, TU Wien, Wien, 2016.
- [74] ROBBI, S. *LowEx-Fernwärme Vergleichende Bewertung von Maßnahmen für eine effiziente, multifunktionale Fernwärmeversorgung*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2013.
- [75] RÜDIGER, J. *Gasnetzsimulation durch Potentialanalyse*. Dissertation, Helmut-Schmidt-Universität/ Universität der Bundeswehr Hamburg, 2009.

- [76] SARBU, I. Nodal Analysis of Urban Water Distribution Networks. *Water Resources Management* 28, 10 (2014), 3143–3159.
- [77] SCHACHT, W. Gasnetzsimulation mit Hilfe des Charakteristiken - Verfahrens. *GWF, Gas/Erdgas* 142, 5 (2001), 356–367.
- [78] SCHLEICHER, J. M. *Engineering and Management of heterogenous Smart City Application Ecosystems*. Dissertation, TU Wien, to be published 2017.
- [79] SCHMITT, F., CASPAR, J., HOLLER, S., UND KLÖPSCH, M. Wärmetransport im Wettbewerb zu dislozierter Wärmezeugung. *MVV Energie AG, Konzernabteilung Technologie und Innovation* (2013).
- [80] SCHOLZ, D., UND ENGELHARDT, J. Direct Steady State Calculations of Hydraulic Power Systems. *Palmberg: The Fifth Scandinavian Conference on Fluid Power 2* (1997), 249–263.
- [81] SCHOLZ, G. *Heisswasser- und Hochdruckdampfanlagen: Planungshandbuch für Industrie- und Fernwärmeversorgung*. Springer Vieweg, 2013.
- [82] SCHWARZE, R. *CFD-Modellierung, Grundlagen und Anwendungen bei Strömungsprozessen*. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [83] STEPHENSON, D. *Pipeflow Analysis*. Developments in water science. Elsevier, Amsterdam, 1984.
- [84] STERNER, M., UND STADLER, I. *Energiespeicher: Bedarf, Technologien, Integration*. Springer Vieweg, Berlin, 2014.
- [85] STEVANOVIC, V. D., PRICA, S., MASLOVARIC, B., ZIVKOVIC, B., UND NIKODIJEVIC, S. Efficient numerical method for district heating system hydraulics. *Energy Conversion and Management* 48, 5 (2007), 1536–1543.
- [86] STEVANOVIC, V. D., ZIVKOVIC, B., PRICA, S., MASLOVARIC, B., KARAMARKOVIC, V., UND TRKULJA, V. Prediction of thermal transients in district heating systems. *Energy Conversion and Management* 50, 9 (2009), 2167–2173.
- [87] SUREK, D., UND STEMPIN, S. Stationäre kompressible Strömung; Gasdynamik. In *Technische Strömungsmechanik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 161–269.
- [88] SZOPLIK, J. Improving the natural gas transporting based on the steady state simulation results. *Energy* 109 (2016), 105–116.
- [89] TESCHL, G., UND TESCHL, S. Grundlagen der Graphentheorie. In *Mathematik für Informatiker: Band 1: Diskrete Mathematik und Lineare Algebra*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013, S. 415–441.
- [90] THALMANN, S., NUSSBAUMER, T., GOOD, J., UND JENNI, A. Analyse und Optimierung von Fernwärmenetzen. *Bundesamt für Energie BFE* (2013).
- [91] TODINI, E. On the convergence properties of the different pipe network algorithms. *Proceedings of the 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium, Cincinatti* (2016).

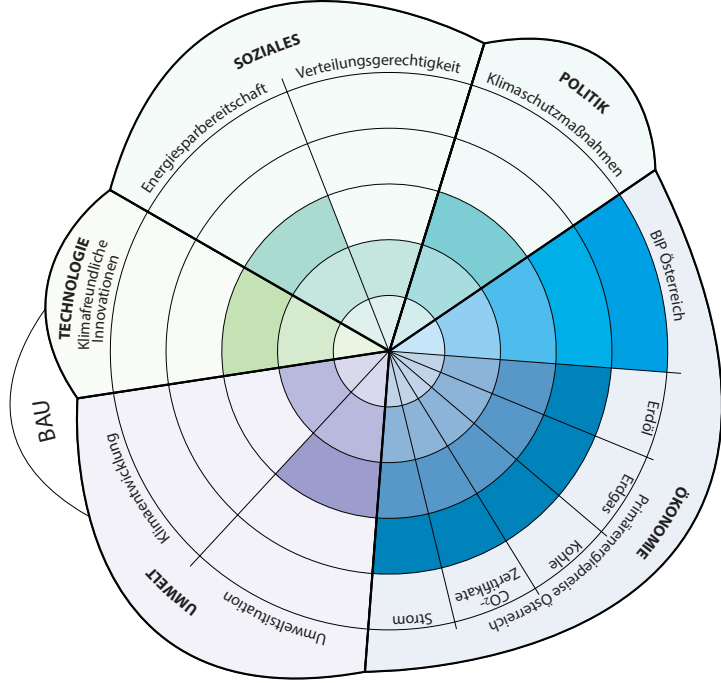
- [92] TODINI, E., UND PILATI, S. *A Gradient Method for the Analysis of Pipe Networks*. International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution, 1987.
- [93] VALDIMARSSON, P. District Heat Distribution Networks. *UNU-GTP and LaGeo* (2014).
- [94] VERDA, V., UND COLELLA, F. Primary energy savings through thermal storage in district heating networks. *Energy* 36, 7 (2011), 4278–4286.
- [95] WAHEED, A. *Computer Aided Design and Analysis of Closed Loop Piping Systems*. Masterthesis, N.E.D University of Engineering and Technology, Karachi, Pakistan, 1992.
- [96] WALTER, H. *Numerische Simulation des transienten Verhaltens von Naturumlaufdampf-erzeugern*. Dissertation, Technische Universität Wien, 2000.
- [97] WANG, H., LAHDELMA, R., WANG, X., JIAO, W., ZHU, C., UND ZOU, P. Analysis of the location for peak heating in 5CHP6 based combined district heating systems. *Applied Thermal Engineering* 87 (2015), 402–411.
- [98] WANG, W., CHENG, X., UND LIANG, X. Optimization modeling of district heating networks and calculation by the Newton method. *Applied Thermal Engineering* 61, 2 (2013), 163–170.
- [99] WINTER, W., UND OBERNBERGER, I. Netzberechnungsprogramm zur optimierten Dimensionierung und integrativen Berechnung von kleineren und mittleren unvermaschten Biomassenahwärmenetzen. *Technische Universität Graz* (2002).
- [100] WINTER, W., PROMITZER, F., KLASNIC, R., UND OBERNBERGER, I. Hydraulische Rohrrauigkeit von Stahlmediumrohren für Fernwärmenetze. *Euroheat & Power*, Volume 29, pp. 24-33 (05/2000).
- [101] WIRTHS, A. Einfluss der Netzzrücklauf-temperatur auf die Effizienz von Fernwärme-systemen. In *13. Dresdner Fernwärmekolloquium 23.-24. September 2008*.
- [102] WOOD, D. J., UND CHARLES, C. O. A. Hydraulic network analysis using linear theory. *Journal of the Hydraulics division* 98, 7 (1972), 1157–1170.
- [103] ZIEGLER, M. *Method for Establishing Scalable Load Profiles for Residential and Office Buildings to run an Urban Simulation Environment considering Construction and Mechanical Engineering Technologies as well as the Impact of Social Differentiation*. Dissertation, TU Wien, 2016.
- [104] ZINGANELL, C. *Ökonomische Analyse von unterschiedlichen solarthermischen Systemen für eine Einbindung in das bestehende Fernwärmenetz der Fernwärme Wien*. Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur Wien, 2013.

Anhang A

A.1



Referenz-Szenario «BAU-Szenario»



Das Referenz-Szenario entspricht einem business-as-usual-Ansatz für die Klimaschutzpolitik und schreibt dabei bestehende Entwicklungen fort. Hierbei etabliert sich eine staatliche Klimaschutzpolitik mit noch begrenzten Anreizen, sodass marktwirtschaftliche Impulse noch eine bedeutendere Rolle im Energie- und Mobilitätssektor besitzen.

Ökonomie

Trotz eines internationalen schwierigen Umfeldes kann sich die österreichische Wirtschaft in der Gesamtbilanz gut behaupten (BIP: durchschnittlich 1,8% pro Jahr). Eine schwache Handelsdynamik im Euroraum belastet vor allem KMUs und ländliche Regionen. Dies führt zu erhöhter Arbeitslosigkeit und Landflucht.

Politik

Die Klimaschutzpolitik hat vor allem in der EU große Priorität. In Entwicklungsländern ist sie jedoch im Vergleich zur Wirtschaftspolitik stark nachrangig. Die USA forcieren unkonventionelle fossile Ressourcen. Investitionen in erneuerbare Technologien sind auch in Österreich grundsätzlich ökonomisch getrieben und unterliegen nur bedingt staatlichen Anreizen. Die langfristig moderaten CO₂-Zertifikatspreise können noch keine größeren Steuerungseffekte zugunsten eines stärkeren Klimaschutzes hervorrufen.

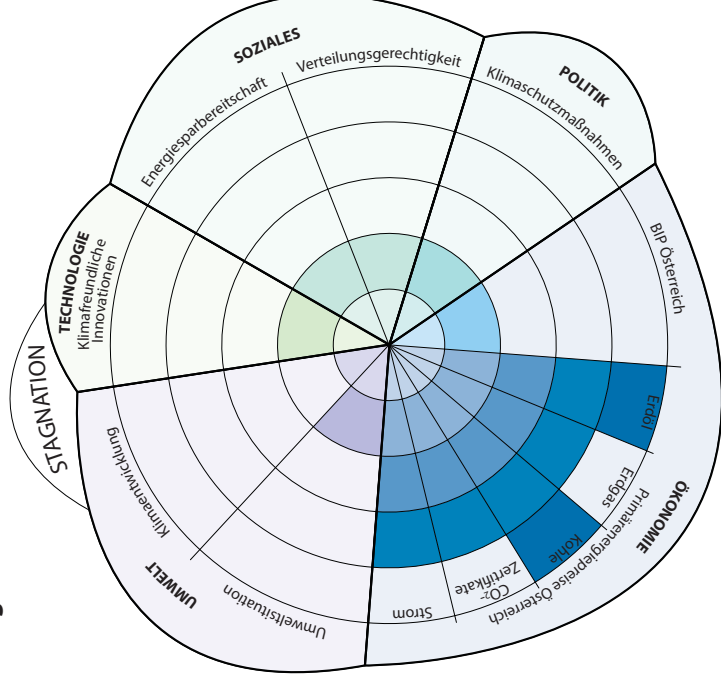
Soziales

Der Wohlstand stagniert und die Verteilung wird zunehmend ungleicher. Höhere Arbeitslosigkeit und Sparmaßnahmen im Sozialbereich führen zu steigenden sozialen Disparitäten. Energiesparen wird von Teilen der Bevölkerung als wichtig wahrgenommen und eingefordert.

Technologie

Die Integration erneuerbarer Energie ist stärker von ihrer Wirtschaftlichkeit abhängig, durch die politische Priorität im EU-Raum werden technologische Neuentwicklungen entsprechend gefördert. Die durchschnittliche Verbesserung der Energieeffizienz liegt jährlich bei 0,7%.

Alternativ-Szenario I «Stagnations-Szenario»



Die Weltwirtschaft stagniert. Maßnahmen zum Klimaschutz werden nur noch durchgeführt, sofern sie die zunehmend wichtigeren wirtschaftlichen Interessen nicht beeinträchtigen.

Ökonomie

Wenig zufriedenstellende wirtschaftliche Entwicklung Österreichs durch starken Einbruch des Exports in Drittländern (BIP: 1,0% durchschnittlich pro Jahr). Kein genügender Ausgleich durch erneuerbare Technologien möglich. Instabile Lagen in den öl- und gasfördernden Ländern des nahen Ostens sorgen für Knappheit fossiler Energieträger. Dies mündet in einem hohen Niveau der Primärenergiepreise für Österreich. Sinkende Nachfrage der USA durch Eigenenergieversorgung wird durch eine stark steigende Nachfrage von Schwellenländern (insbesondere China) kompensiert.

Politik

Das begrenzte Wirtschaftswachstum und das schlechte private Investitionsverhalten macht erneuerbare Technologien stärker abhängig von staatlichen Subventionen bzw. Finanzierung. Insbesondere stehen weniger Fördermittel für erneuerbare Energie als im Referenz-Szenario zur Verfügung. Verstärkter Protektionismus und nationale Abschottung erschweren ein supranationales Vorgehen auch in Klimaschutzfragen.

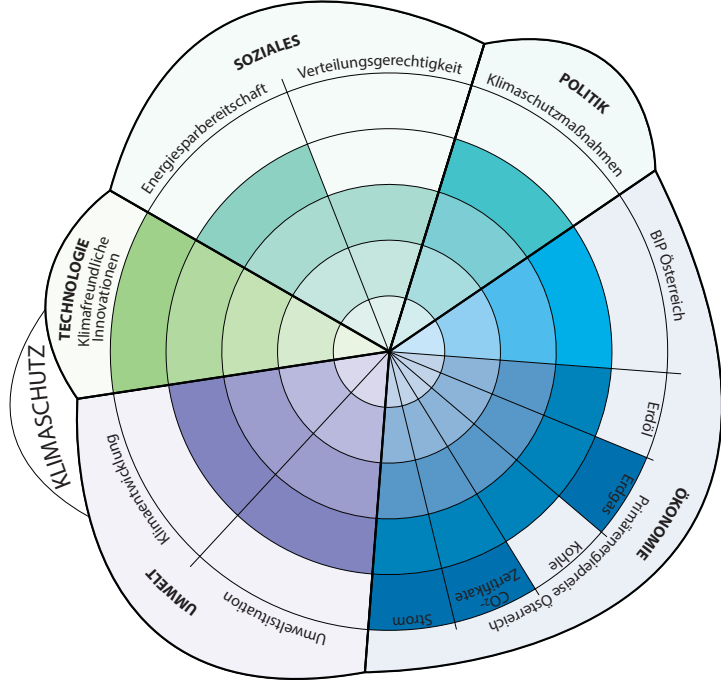
Soziales

Probleme am Arbeitsmarkt und sinkende Löhne führen zu einem Öffnen der sozialen Schere. Jener Teil der Bevölkerung, der es sich leisten kann, investiert in erneuerbare und energieeffiziente Energieformen, während der sozial schwächere Teil aufgrund mangelnder Perspektiven an steigenden Strompreisen - und somit immer öfter an Energiearmut - leidet.

Technologie

Die Erhöhung der Energieeffizienz wird vor allem im Produktionsbereich durch hohe Energiekosten getrieben. Die konsumgetriebene Gesellschaft entwickelt jedoch keine Präferenz für energiesparende Technologien. Fortschritte im Bereich der Gebäudesanierung sind im Vergleich zum Referenzszenario deutlich geringer, insgesamt ist die jährliche Energieeffizienz mit einer durchschnittlich jährlichen Verbesserung von 0,5% gering. Die Entwicklung klimafreundlicher Technologien ist zudem durch das allgemein schlechte Investitionsklima erschwert.

Alternativ-Szenario II «Klimaschutz-Szenario»



In der EU genießen Klimaschutz-Maßnahmen höchste Priorität. Auch weltweit werden sie als wichtig wahrgenommen. Damit verbunden sind starke Investitionen in neue Technologien, die sektorübergreifend große wirtschaftliche Impulse setzen.

Ökonomie

Die konsequente Ausrichtung der Weltwirtschaft auf erneuerbare Energiesysteme bedingt hohe Investitionen in den Energiesektor. Dies führt unter anderem zu einer starken Substitution von Kohle als Energieträger zu Gas. Solide wirtschaftliche Entwicklung Österreichs (BIP: 1,6%), mit Ausnahme energieintensiver Branchen. Die stark zurückgehende unkonventionelle Gasförderung durch erhöhten öffentlichen Druck in Europa und den USA führt zu starken Preissteigerungen im Vergleich zum Referenzszenario.

Politik

CO₂-Zertifikate sind ein wichtiges Steuerungsmittel zum Übergang in ein nachhaltiges Energiesystem. Es wird ein globaler Konsens in der Klimaschutzpolitik erreicht und insbesondere in der EU Investitionen in erneuerbare Techniken und Produkte stark gefördert.

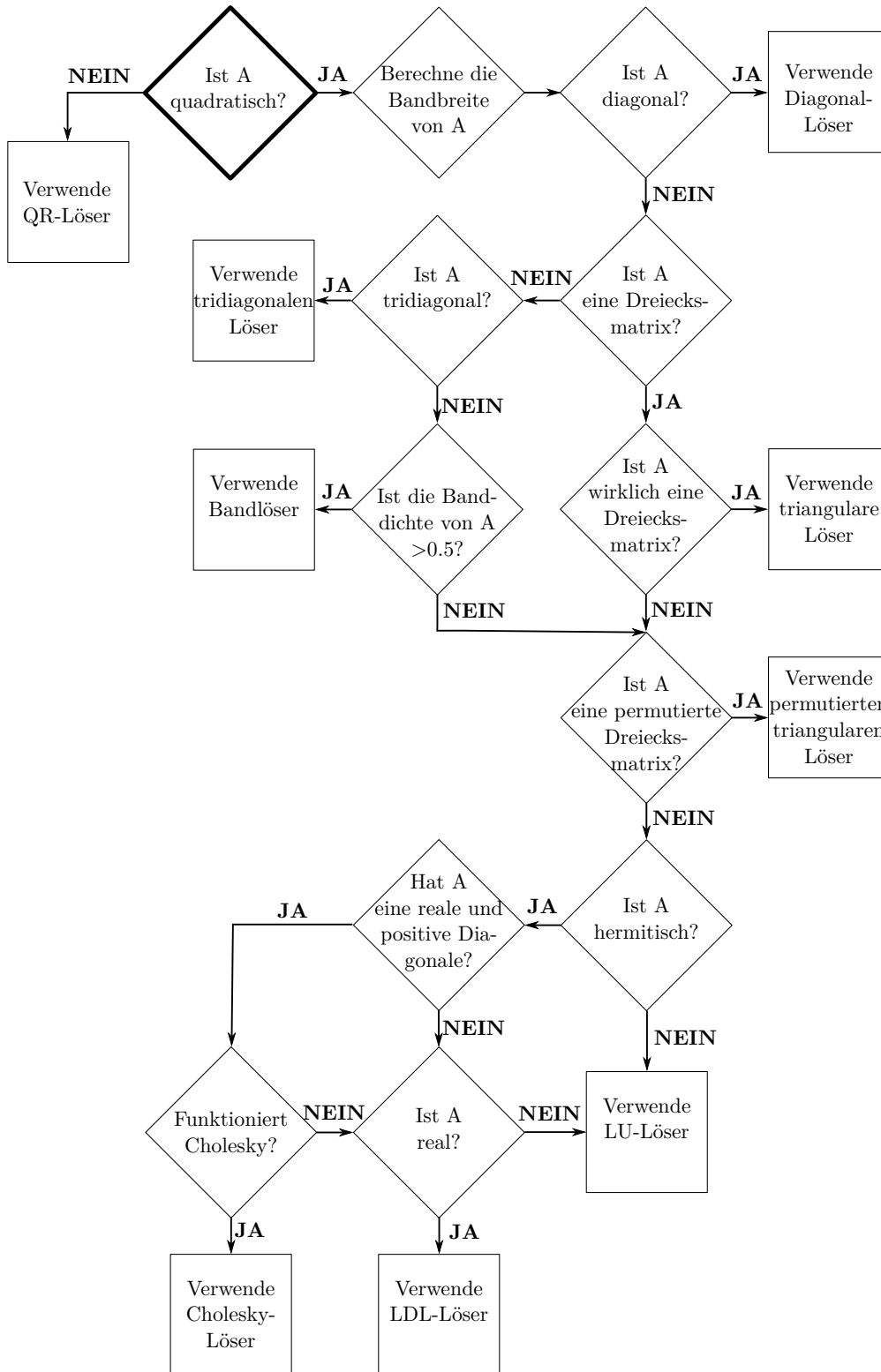
Soziales

Die Klimaschutzpolitik erreicht ein hohes Maß an Energiebewusstsein in der Bevölkerung, stärker als im Referenzszenario. Aufgrund der vorherrschenden positiven Rahmenbedingungen (solide wirtschaftliche Entwicklung Österreichs, erfolgreiche Klimapolitik und rasante Technologieentwicklungen) finden keine verstärkenden sozialen Disparitäten statt.

Technologie

Verstärkte Investitionen in Energieeffizienz führen zu einer durchschnittlichen jährlichen Verbesserung von 1%. Es kommt zu einer starken Entwicklung energieeffizienter Produkte und Technologien, auch am Wettbewerbsstandort Österreich; mit starken sektorübergreifenden Wirtschaftsimpulsen.

A.2



■ Persönliches

Geburtsdatum 02.Oktober 1985
Geburtsort Wien, Österreich
Staatsbürgerschaft Österreich
Email dominik.bothe@gmail.com

■ Berufserfahrung

- 05/2013–dato **Projektassistent**, *Institut für Energietechnik und Thermodynamik, TU Wien.*
- Modellierung und Simulation wärmetechnischer Prozesse
- 09/2012–dato **Vertragslehrer**, *TGM - Technologisches Gewerbemuseum, HTBLuVA Wien XX.*
- Unterrichtender der 4.Jahrgänge im Fach Mechanik - Lehrstoff Thermodynamik
- 06/2007–02/2013 **Selbstständiger**, *Automatische Datenverarbeitung und Informationstechnik.*
- Abteilungsadministrator der Fachrichtung Maschinenbau der HTBLuVA Wien XX
- 08/2006–05/2007 **Angestellter**, *Merkur Direkt (Merkur Warenhandels AG).*
- Arbeitsvorbereitung und Kommissionierung
- 04/2006 **Angestellter**, *IKEA Möbelvertrieb OHG.*
- Abwicklung kaufmännischer Tätigkeiten
- 06/2005–07/2005 **Praktika**, *Siemens VDO Automotive GmbH.*
- Entwicklung und Erprobung von PKW-Steuergeräten
- 2001–2004 **Praktika (je einen Monat)**, *Citroen Österreich GmbH.*
- Arbeitsvorbereitung und Kommissionierung

■ Ausbildung

- 2013–dato **Doktoratsstudium der technischen Wissenschaften**, *TU Wien.*
- Modellierung und Simulation von weit verzweigten, vermaschten Netzen für thermische Energie und Gas
- 2011–2013 **Masterstudium Maschinenbau**, *TU Wien.*
- Vertiefung: Energietechnik/Thermodynamik
- 2006–2011 **Bachelorstudium Maschinenbau**, *TU Wien.*
- 2000–2005 **HTBLuVA Wien XX.**

■ Zusatzqualifikationen

Programme MS Office, CATIA, Mathcad, Matlab, Epsilon Professional, APROS
Zertifikate ÖNORM 287-1, Quality Coach
Führerscheine A, B, Stapler, flurgesteuerte Kräne