

Gasfernleitungsnetze und deren Umstellung auf Wasserstoff

Tobias Alexander Triesch

Energie & Umwelt / Energy & Environment
Band / Volume 729
ISBN 978-3-95806-979-4

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

JÜLICH
Forschungszentrum

Gasfernleitungsnetze und deren Umstellung auf Wasserstoff

Gas Transmission Networks and their Reassignment for Hydrogen

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Tobias Alexander Triesch

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Stolten

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Wirsum

Tag der mündlichen Prüfung: 26.08.2025

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Forschungszentrum Jülich GmbH
Institute of Climate and Energy Systems (ICE)
Jülicher Systemanalyse (ICE-2)

Gasfernleitungsnetze und deren Umstellung auf Wasserstoff

Tobias Alexander Triesch

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment Band / Volume 729

ISSN 1866-1793 ISBN 978-3-95806-979-4

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek.
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte Bibliografische Daten
sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Herausgeber und Vertrieb:	Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek, Verlag 52425 Jülich Tel.: +49 2461 61-5368 Fax: +49 2461 61-6103 zb-publikation@fz-juelich.de www.fz-juelich.de/zb
Umschlaggestaltung:	Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH
Druck:	Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH
Copyright:	Forschungszentrum Jülich 2026

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment, Band / Volume 729

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2025)

ISSN 1866-1793
ISBN 978-3-95806-978-7 (Print)
ISBN 978-3-95806-979-4 (E-Book)

Vollständig frei verfügbar über das Publikationsportal des Forschungszentrums Jülich (JuSER)
unter www.fz-juelich.de/zb/openaccess.



This is an Open Access publication distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

A Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbständig und ohne Hilfe Dritter angefertigt zu haben. Gedanken und Zitate, die ich aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommen habe, sind als solche unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht. Dasselbe gilt sinngemäß für Tabellen, Karten und Abbildungen. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen und wurde bisher nicht veröffentlicht.

_____, den _____ _____

(Ort, Datum) (Tobias Alexander Triesch)

B Kurzfassung

In dieser Arbeit wird ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem zur Nominierungsvalidierung (NoVa) präsentiert und eingesetzt, um eine szenariobasierte Betrachtung möglicher Betriebszustände in Wasserstoff- und Erdgasinfrastrukturen durchzuführen. Zum einen wird das Modell eingesetzt, um mögliche Betriebszustände und Engpässe im von den Fernleitungsnetzbetreibern Gas im Rahmen des Netzentwicklungsplan Gas 2020 (NEP-Gas 2020) antizipierten initialen Wasserstoffnetz bis 2025 und bis 2030 zu analysieren. Zum anderen wird das Modell eingesetzt, um anhand einzelner, stündlicher Extremlastfälle den Einfluss eines Gasaustauschs von Erdgas durch Wasserstoff im deutschen Fernleitungsnetz für hochkalorisches Erdgas (H-Gas) zu quantifizieren. Das initiale Wasserstoffnetz der Fernleitungsnetzbetreiber wird dazu auf Basis öffentlich verfügbarer Daten modelliert. Für die Betrachtung des H-Gas-Netzes wird ein Datensatz aus einer verwandten Arbeit herangezogen und überarbeitet. Die Betrachtungen werden eingebettet in den Gesamtrahmen der Umstellung bestehender Erdgasleitungssysteme auf Wasserstoff im Rahmen der Energiewende. Dabei wird auf wichtige Themen, wie die Netzregulierung und die Eignung bestehender Systeme für den Wasserstofftransport, eingegangen.

Die Rechenergebnisse zeigen, dass in der hiesigen Modellierung des Wasserstoffnetzes 2025 und 2030, bei geeigneter Betriebsweise, keine unmittelbaren Engpässe vorliegen. Die H-Gas-Netz Betrachtung zeigt, dass, im Rahmen des Szenarios Lastfälle existieren, die die Netzkapazitäten für Wasserstoff übersteigen. In Summe erweisen sich NoVa-Modelle sehr hilfreich zur physikalischen Modellierung von großen und kleinen Gasinfrastrukturen bei beschränkter Datenkenntnis. Gleichzeitig zeigen die Rechnungen, dass eine präzise Datenkenntnis essenziell für physikalische Modelle und deren Aussagekraft bei der Anwendung auf echte Systeme ist.

Schlagwörter: Gasnetz, Wasserstoff, Netzentwicklungsplan

C Abstract

In this thesis a mixed-integer optimization problem for nomination validation (NoVa) is presented. It is employed to assess possible operating conditions in hydrogen and natural gas infrastructures, for a given set of scenarios. On the one hand, the model is used to assess possible operating conditions and bottlenecks for the future German hydrogen network by 2025 and 2030, as per the network development plan gas 2020 of the transmission system operators. On the other hand, the model is used to quantify the effect of a gas exchange of natural gas with hydrogen in the German high-calorific natural gas network. To this end, the initial hydrogen network of the TSOs is modelled, based on openly available data. For the examination of the highcalorific gas network a data set from related work is used and adapted. The assessments are embedded within the context of the reassignment of existing natural gas infrastructures for hydrogen as part of the energy transition. In the course of this embedding, important topics, such as network regulation and fitness of current natural gas systems for hydrogen, are addressed.

The calculation results show, that, given suitable operating conditions, no immediate bottlenecks are present for the hydrogen network by 2025 and 2030, as modelled within this work. Results from the high-calorific gas network examination show that there exist cases where the network capacity is exceeded, based on the assumed transport scenarios within this work. Overall, NoVa models are shown to be a useful tool for the physical modeling of large- and small-scale gas infrastructures given limited data. At the same time, calculations show that precise data is essential to physical models and their significance when applied to real-world systems.

Keywords: Gas network, hydrogen, gas network development plan

D Vorbemerkungen zum Sprachgebrauch

In dieser Arbeit wird zur Reduzierung der sprachlichen Komplexität auf einen explizit geschlechterbewussten Sprachgebrauch verzichtet, da die Vermittlung wissenschaftlicher Zusammenhänge und Resultate im Vordergrund der Betrachtung steht. Die Verwendung der grammatikalisch maskulinen Form eines Substantivs ist in dieser Arbeit im Sinne des generischen Maskulinums als *geschlechtsneutral* zu verstehen.

Zitate in englischer Sprache werden nicht übersetzt.

Englische Begriffe werden kursiv geschrieben.

E Inhaltsverzeichnis

A Eidesstattliche Erklärung ... 3
B Kurzfassung ... 4
C Abstract ... 5
D Vorbemerkungen zum Sprachgebrauch ... 6
E Inhaltsverzeichnis ... 7
F Formelverzeichnis ... 11
G Abkürzungsverzeichnis ... 18
H Glossar ... 20
1. Einleitung ... 21
1.1. Motivation und Fokus der Arbeit ... 21
1.1.1. Hintergrund ... 22
1.1.2. Neuigkeitswert der Arbeit ... 23
1.2. Struktur der Arbeit ... 24
2. Grundlagen der Gasversorgung ... 25
2.1. Gastransport in Deutschland und Europa ... 25
2.1.1. Struktur und Komponenten des Gasnetzes ... 27
2.1.2. Gase – Beschreibung und Eigenschaften ... 29
2.2. Status Quo der Umstellung auf Wasserstoff-Transport ... 30
2.2.1. Gesetzliche/Regulatorische Rahmenbedingungen ... 30
2.2.2. Status Quo der Wasserstoffnetzregulierung ... 32
2.2.3. Stakeholder ... 33
2.2.4. Technische Eignung bestehender Systeme ... 35
2.3. Stand der Gasnetzmodellierung ... 52
2.3.1. Stationäre Gasnetzoptimierung ... 54
2.3.2. Instationäre Gasnetzoptimierung ... 58
2.3.3. Kommerzielle und öffentlich verfügbare Programme ... 59
2.4. Datenaufbereitung ... 61
2.4.1. Netzdatensätze ... 63
2.4.2. Lastfälle ... 66
2.4.3. Netzentwicklungspläne und das deutsche Wasserstoffnetz 2030 ... 67
3. Szenarien ... 74
3.1. Szenario 1: Modellierung des deutschen Wasserstoffnetzes bis 2025 und bis 2030 ... 74

3.1.1. Beschreibung/kurzer Abriss 74
3.1.2. Fragestellungen 74
3.1.3. Datenbasis und allgemeines Vorgehen 74
3.1.4. Beschreibung des Wasserstoffnetzmodells 2025 77
3.1.5. Lastfallerzeugung für das Wasserstoffnetzmodell 2025 81
3.1.6. Beschreibung des Wasserstoffnetzmodells 2025 82
3.1.7. Lastfallerzeugung für das Wasserstoffnetzmodell 2030 84
3.1.8. Semizufällige Lastfallerzeugung 87
3.1.9. Addendum: Lastprofil-basierte Lastfallerzeugung und Modellierung des Wasserstoffnetzmodells gemäß Entwurf Szenariorahmen des NEP-Gas 2022 89
3.2. Szenario 2: Energieäquivalente Wasserstoff Lastflüsse im deutschen H-Gas-Netz 93
3.2.1. Beschreibung/kurzer Abriss 93
3.2.2. Fragestellungen 93
3.2.3. Datenbasis 93
4. Methodik 101
4.1. Modellbeschreibung 101
4.1.1. Netzwerk 101
4.1.2. Pipelines 102
4.1.3. Absperrventile 103
4.1.4. Druckregelventile 104
4.1.5. Sicherheitsventile 104
4.1.6. Verdichter 105
4.1.7. Künstliche Widerstände 106
4.1.8. Die Erweiterte Inkrementelle Methode (Extended Incremental Method) 107
4.1.9. Verdichter- und Druckregelstationen 108
4.1.10. Fernkopplung von schaltbaren Komponenten 110
4.2. Hilfsproblem zur Minimierung der Anzahl an Diskretisierungsvariablen 111
4.3. Weitere Beschränkungen 112
4.4. Preprocessing 113
4.5. Zielfunktion 114
4.6. Implementierung 115
4.7. Validierung 118
5. Ergebnisse 126
5.1. Wasserstoffnetz 2025 126

5.2. Wasserstoffnetz 2030 134
5.2.1. Basisszenario 135
5.2.2. Variation 1 137
5.2.3. Variation 2 140
5.3. Screening-Rechnungen 143
5.4. Addendum: Ergebnisse: Lastprofil-basierte Lastfallerzeugung und Modellierung des Wasserstoffnetzmodells gemäß Entwurf Szenariorahmen des NEP-Gas 2022 156
5.5. Diskussion: Wasserstoffnetz 2030 157
5.6. Ergebnisse H-Gasnetz 158
5.7. Diskussion H-Gasnetz 180
6. Evaluation 181
7. Zusammenfassung 182
7.1. Ausgangslage 182
7.2. Grundlagen der Gasversorgung 182
7.3. Material- und Komponenteneignung 183
7.4. Sicherheitstechnik 183
7.5. Systemeignung 183
7.6. Methodik 184
7.7. Szenarien 2025 184
7.8. Szenarien 2030 185
7.9. Szenarien H-Gasnetz 187
7.10. Abschließende Bewertung 188
I Anhang 189
I.1 Algorithmen zum Bound-Strengthening 189
I.2 Farben des Wasserstoffs 203
I.3 Beispiel einer Ausbaumaßnahme in der FNB-Gas Datenbank 204
I.4 Semi-zufällige Lastfallerzeugung – Optimierungsproblem 207
I.5 Gesamt-/Detailansichten: Zuordnung fein aufgelöster Netzknoten zu Einlastungsknoten des reduzierten Netzwerks. 208
I.6 Verwendete Sektorzeitreihen für Deutschland im Jahr 2015. 211
I.7 Tabellen: Wasserstoffnetz 2025 und 2030 226
I.7.1 Recherchierte Daten zu den Knoten des modellierten Wasserstoffnetzes 2025 226
I.7.2 Recherchierte Daten zu den Knoten des modellierten Wasserstoffnetzes 2030 231
I.8 Rechenergebnisse 237

I.8.1 Farblegende für die dargestellten Ergebnis-Screenshots 237
I.8.2 Basisszenario 2025: Rohrrauigkeit: 1 mm, max. Druck: 30 bar 237
I.8.3 Basisszenario 2025: Rohrrauigkeit: 0,1 mm, max. Druck: 30 bar 242
I.8.4 Basisszenario 2025: Rohrrauigkeit: 1 mm, max. Druck: 60 bar 247
I.8.5 Basisszenario 2025: Rohrrauigkeit: 0,1 mm, max. Druck: 60 bar 252
I.8.6 Basisszenario 2030: Rohrrauigkeit: 1 mm, max. Druck: 30 bar 258
I.8.7 Basisszenario 2030: Rohrrauigkeit: 0,1 mm, max. Druck: 30 bar 258
I.8.8 Basisszenario 2030: Rohrrauigkeit: 1 mm, max. Druck: 60 bar 264
I.8.9 Basisszenario 2030: Rohrrauigkeit: 0,1 mm, max. Druck: 60 bar 270
I.8.10 Variation 1 Szenario 2030: Rohrrauigkeit: 1 mm, max. Druck: 30 bar 276
I.8.11 Variation 1 Szenario 2030: Rohrrauigkeit: 0,1 mm, max. Druck: 30 bar 282
I.8.12 Variation 1 Szenario 2030: Rohrrauigkeit: 1 mm, max. Druck: 60 bar 288
I.8.13 Variation 1 Szenario 2030: Rohrrauigkeit: 0,1 mm, max. Druck: 60 bar 294
I.8.14 Variation 2 Szenario 2030: Rohrrauigkeit: 1 mm, max. Druck: 30 bar 300
I.8.15 Variation 2 Szenario 2030: Rohrrauigkeit: 0,1 mm, max. Druck: 30 bar 300
I.8.16 Variation 2 Szenario 2030: Rohrrauigkeit: 1 mm, max. Druck: 60 bar 306
I.8.17 Variation 2 Szenario 2030: Rohrrauigkeit: 0,1 mm, max. Druck: 60 bar 312
I.8.18 Energieäquivalente Wasserstoff Lastflüsse im deutschen H-Gasnetz (Visualisierung) 318
J Abbildungsverzeichnis 336
K Tabellenverzeichnis 350
L Literaturverzeichnis 354

F Formelverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
Kapitel 2		
p	$Pa;\ bar$	Druck
V	m^3	Volumen
n	mol	Stoffmenge
R	$\frac{J}{molK}$	Universelle Gaskonstante
R_s	$\frac{J}{kgK}$	Spezifische Gaskonstante
T	K	Temperatur
z	-	Realgasfaktor
H^+	-	Wasserstoffion/Proton
H_2	-	Wasserstoffmolekül
v_g	$\frac{m}{s}$	Gasgeschwindigkeit
v_{H_2}	$\frac{m}{s}$	Gasgeschwindigkeit Wasserstoff
$v_{g,zul.}$	$\frac{m}{s}$	Zulässige Gasgeschwindigkeit
$v_{G,max.}$	$\frac{m}{s}$	Maximale Gasgeschwindigkeit
$v_{g,krit}$	$\frac{m}{s}$	Kritische Gasgeschwindigkeit für den Tropfenmitriss
$v_{Mitriss}$	$\frac{m}{s}$	Tropfen-/Partikelgeschwindigkeit
$d_{S,50}$	m	Medianwert der Partikelkorngrößenverteilung
D_R	m	Rohrdurchmesser
ρ_G	$\frac{kg}{m^3}$	Gasdichte
ρ_{H_2}	$\frac{kg}{m^3}$	Gasdichte Wasserstoff
ρ_L	$\frac{kg}{m^3}$	Flüssigkeitsdichte
ρ_P	$\frac{kg}{m^3}$	Partikeldichte
σ_L	Pa	(Mechanische) Oberflächenspannung der Flüssigkeit

$C_{14}H_{30}$	-	Tetradecan
$v_{g,pu}$	$\frac{m}{s}$	Pickup-Geschwindigkeit
η_G	$Pa\ s$	Dynamische Viskosität des Gases
g	$\frac{m}{s^2}$	Erdbeschleunigung
τ_W	Pa	Wandschubspannung
$\overline{\tau}_{W,zul.}$	Pa	Mittlere, zulässige Wandschubspannung
λ	-	Rohrreibungsbeiwert
σ	Pa	(Mechanische) Spannung
σ_{max}	Pa	Maximale Zugspannung
CH_4	-	Methan
q	$\frac{kg}{s}$	Massenfluss
η	-	Wirkungsgrad
P	W	Leistung
$\dot{m}$	$\frac{kg}{s}$	Massenstrom
$v_{t,i}$	$\frac{m}{s}$	$i \in \{in, out\}$, tangentiale Eintritts- bzw. Austrittsgeschwindigkeit des Gases an einer Turbinenschaufel
u_i	$\frac{m}{s}$	$i \in \{in, out\}$, Umfangsgeschwindigkeit des Impellers am Ein- bzw. Austritt des Schaufelrades
M	$\frac{kg}{mol}$	Molekulargewicht
μ_{JT}	$\frac{K}{Pa}$	Joule-Thomson-Koeffizient als die Ableitung der Temperatur T nach dem Druck p bei konstanter Enthalpie H: $\mu_{JT} = (\partial T / \partial p)_H$.
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	Massendichte
e	$\frac{J}{m^3}$	Energiedichte
u	$\frac{J}{m^3}$	Innere Energiedichte
k_w	$\frac{W}{m^2 K}$	Wärmeübergangskoeffizient der Rohrwand
T_w	K	Rohrwand-Temperatur

k	$\frac{J}{m^3}$	Kinetische Energiedichte
ϕ	$\frac{J}{m^3}$	Potentielle Energiedichte
h	m	Höhe
v_x	$\frac{m}{s}$	Gasgeschwindigkeit in x-Richtung
c_v	$\frac{J}{kgK}$	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen
c_p	$\frac{J}{kgK}$	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck

Kapitel 3

L	-	Menge der Ein-/Ausspeiseorte bei der semizufälligen Lastfallerzeugung
N_C	-	Menge der Cluster des Netzwerks für die bei der semizufälligen Lastfallerzeugung eine Nullsumme garantiert werden soll
N_E	-	
C_i	-	Menge der Ein-/Ausspeiseorte des Clusters i
k_i	-	gemeinsame Einspeiseoberschranken für die Summe der Einspeisungen aus Einspeiseknoten
$\underline{x_i}^+, x_i^+, \overline{x_i}^+$	kg/s	Lastflussvariable(n) für Einspeiseknoten (+) i in der semizufälligen Lastfallerzeugung und deren untere und obere Schranken (dargestellt durch Unter-/Überstrich)
$\underline{x_i}^-, x_i^-, \overline{x_i}^-$	kg/s	Lastflussvariable(n) für Ausspeiseknoten (-) i in der semizufälligen Lastfallerzeugung und deren untere und obere Schranken (dargestellt durch Unter-/Überstrich)
y_i	-	Binärvariable zur Modellierung der Bedingung, dass eine gleichzeitige Ein- und Ausspeisung an dem gleichen Ein-/Ausspeiseort unzulässig ist
u_{1i}^+, u_{1i}^-, u_{2i}^+, u_{2i}^-	kg/s	Hilfsvariablen zur Darstellung der betragsmäßigen Abweichung zwischen einem Kandidaten-Lastfall und dem tatsächlichen Lastfall in der semizufälligen Lastfallerzeugung
d_i	kg/s	Der Lastfallkandidat für den Einspeisefluss am Knoten i
R_0^+	-	Menge der positiven reellen Zahlen einschließlich der Null
B	-	Menge der Binärzahlen {0,1}

Kapitel 4

$G(V,A)$	-	Netzwerkgraph G bestehend aus Knoten in V und Kanten in A
V	-	Knoten des Netzwerkgraph
A	-	Kanten des Netzwerkgraph
A_{pi}	-	Untermenge der Netzwerkkanten $a = (i,j) \in A_{pi} \subset A$, die Pipelines darstellen
A_{va}	-	Untermenge der Netzwerkkanten $a = (i,j) \in A_{va} \subset A$, die Absperrventile darstellen
A_{cv}^{aut}	-	Untermenge der Netzwerkkanten $a = (i,j) \in A_{cv}^{aut} \subset A$, die Druckregelventile darstellen
A_{cv}^{man}	-	Untermenge der Netzwerkkanten $a = (i,j) \in A_{cv}^{man} \subset A$, die Sicherheitsventile darstellen
A_{cs}	-	Untermenge der Netzwerkkanten $a = (i,j) \in A_{cs} \subset A$, die Verdichter darstellen
A_{rs}^{lin}	-	Untermenge der Netzwerkkanten $a = (i,j) \in A_{rs}^{lin} \subset A$, die lineare Widerstände darstellen
A_{rs}^{nl}	-	Untermenge der Netzwerkkanten $a = (i,j) \in A_{rs}^{nl} \subset A$, die nichtlineare Widerstände darstellen
$\underline{q}_a, q_a, \overline{q}_a$	kg/s	Flussvariable für Kante $a = (i,j) \in A$ und ihre untere und obere Schranke (dargestellt durch Unter-/Überstrich)
$\underline{p}_i, p_i, \overline{p}_i$	$Pa;\ bar$	Druckvariable am Knoten i und ihre untere und obere Schranke (dargestellt durch Unter-/Überstrich)
d_i	kg/s	Quell-/Senkenfluss am Knoten i
α_a	-	Parameter, der die, durch Höhenunterschiede zwischen Knoten i und j (d.h. auf der Kante a), resultierende Druckdifferenz zusammenfasst
S_a	-	Hilfsvariable (großgeschrieben)
β_a	-	Reibungskoeffizient, der sowohl Eigenschaften und Zustand des Gases in der Pipeline als auch die Reibungscharakteristik des Rohres auf Basis der Länge L_a, des Durchmessers D_a und der inneren Rohrrauigkeit k_a beinhaltet
L_a	m	Länge einer Pipeline a
D_a	m	Durchmesser einer Pipeline a
k_a	mm	Rohrrauigkeit einer Pipeline a

λ_a	-	Rohrreibungskoeffizient
$p_{m,a}$	$Pa;\ bar$	Mittlerer Druck auf der Pipeline a als a-priori Abschätzung aus den gegebenen Druckschranken an den anliegenden Knoten
T_m	K	Mittlere Gastemperatur im Netzwerk
z_m	-	Mittlerer Kompressibilitätsfaktor berechnet auf Basis des mittleren Drucks und der mittleren Temperatur
p_c	$Pa;\ bar$	Kritischer Druck (im Sinne der Thermodynamik)
T_c	K	Kritische Temperatur (im Sinne der Thermodynamik)
a_i, b_i, c_i	-	Koeffizienten der Virialgleichung für Wasserstoff
R_s	$\frac{J}{kgK}$	Spezifische Gaskonstante
g	$\frac{m}{s^2}$	Erdbeschleunigung
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	Dichte
$s_a, s_a^{ac}, s_a^{bp}, s_a^{ac}$	-	Binäre Schaltvariablen (kleingeschrieben)
p_a^{set}	$Pa;\ bar$	Gesetzte Druckschranke für Sicherheitsventile
$\underline{\Delta}_a, \overline{\Delta}_a$	$Pa;\ bar$	Minimale und maximale erzielbare Druckabsenkung eines Druckregelventils a
$\underline{\epsilon_a}, \overline{\epsilon_a}$	-	Minimales und maximales Verdichtungsverhältnis eines Verdichters
$\underline{\Delta p_a}, \overline{\Delta p}_a$	$Pa;\ bar$	Minimale und maximale, erzielbare Druckdifferenz eines Verdichters
r_a	-	Binäre Indikatorvariable zur Anzeige der Fließrichtung bei Widerständen
ζ_a	$Pa;\ bar$	Widerstandskoeffizient bei linearen, künstlichen Widerständen
ϵ	-	Numerischer Parameter (positive Zahl nahe Null)
c_a	$\frac{s^2}{m^2}$	Widerstandsparameter für nicht lineare Widerstände
Δ_a	$Pa;\ bar$	Druckdifferenz zwischen Widerstandseingang und -ausgang bei einem nichtlinearen Widerstand
x	-	Zu diskretisierende Größe bei der *Erweiterten Inkrementellen Methode*
$\hat{x}_i$	-	Stützstellen, der zu diskretisierenden Größe bei der *Erweiterten Inkrementellen Methode*

y	-	Diskretisierte Funktion bei der *Erweiterten Inkrementellen Methode*
f	-	Zu diskretisierende quadratische Funktion bei der *Erweiterten Inkrementellen Methode*
δ_i	-	Schrittweite bei der *Erweiterten Inkrementellen Methode*
e	-	Variable zur Abbildung der Abweichung einer Einhüllenden im Vergleich zur einfachen Diskretisierung bei der *Erweiterten Inkrementellen Methode*
e_u^i, e_o^i	-	Untere und obere Abweichungswerte der Einhüllenden an der i-ten Stützstelle bei der *Erweiterten Inkrementellen Methode*
z_i	-	Diskrete Hilfsvariable bei der *Erweiterten Inkrementellen Methode*
$\boldsymbol{s}_{v_c^{cv}(S)}, \boldsymbol{s}_{v_b^{cv}(S)}$, $\boldsymbol{s}_{v_i^{cv}(S)}, \boldsymbol{s}_{v_o^{cv}(S)}$	-	Binäre Schaltvariablen zur Kopplung von schaltbaren Elementen in einer Druckregelstation
$\boldsymbol{s}_C, \boldsymbol{s}_{v_i^{cs}(S)}, \boldsymbol{s}_{v_o^{cs}(S)}$, $\boldsymbol{s}_{v_i^{S}(C)} \boldsymbol{s}_{v_o^{S}(C)}$	-	Binäre Schaltvariablen zur Kopplung von schaltbaren Elementen in einer Verdichterstation
$\boldsymbol{S_{cv}}$	-	Menge aller Druckregelstationen
$\boldsymbol{S_{cs}}$	-	Menge aller Verdichterstationen
$\boldsymbol{C_s}$	-	Menge aller Konfigurationen einer Verdichterstation
$\boldsymbol{A(C)}$	-	Menge aller aktiven Elemente einer Konfiguration
$\mathcal{D}$	-	Menge aller Schaltgruppen von ferngekoppelten Elementen
$N_0^D(j)$	-	Eine Indexmenge die für eine Komponente n_j einer Schaltgruppe alle Schaltungen beinhaltet, in denen die Komponente geschlossen ist
$N_1^D(j)$	-	Eine Indexmenge die für eine Komponente n_j einer Schaltgruppe alle Schaltungen beinhaltet, in denen die Komponente geöffnet ist
b_i^D	-	Binärvariable für eine Entscheidung in einer Schaltgruppe von ferngekoppelten Elementen
$V^{\mathcal{D}}$	-	Menge der Ventile einer Schaltgruppe D
$S_{cs}^{\mathcal{D}}$	-	Menge der Verdichterstationen einer Schaltgruppe D
$S_{cv}^{\mathcal{D}}$	-	Menge der Druckregelstationen einer Schaltgruppe D

α_i^p	-	Binärvariable, die beim Hilfsproblem zur Minimierung der Anzahl an Diskretisierungsvariablen angibt, ob eine nichtquadrierte Druckvariable eingeführt werden muss
α_i^π	-	Binärvariable, die beim Hilfsproblem zur Minimierung der Anzahl an Diskretisierungsvariablen angibt, ob eine quadrierte Druckvariable eingeführt werden muss
τ	$Pa;\ bar$	Toleranz τ für die Diskretisierung des Druckintervalls $\left[\underline{p}_i, \overline{p}_i\right]$ beim Hilfsproblem zur Minimierung der Anzahl an Diskretisierungsvariablen
A_p	-	Menge aller Kanten, die zwingend die Einführung einer nichtquadrierten Druckvariable benötigen (beim Hilfsproblem zur Minimierung der Anzahl an Diskretisierungsvariablen)
A_π	-	Menge aller Kanten, die zwingend die Einführung einer quadrierten Druckvariable benötigen (beim Hilfsproblem zur Minimierung der Anzahl an Diskretisierungsvariablen)
s_j^+, s_j^-	kg/s	Knoten-Slack-Variablen für zusätzliche Quellen- oder Senkenflüsse, die im Falle nicht übertragbarer Lastfälle echt größer Null sind

G Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AGA	American Gas Association
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.
AGSI+	Aggregated Gas Storage Inventory
AMPP	Association for Materials Protection and Performance (ehemals NACE International)
API	American Petroleum Institute
ARGEV	Anreizregulierungsverordnung
ASME	American Society of Mechanical Engineers
BFS	Breitensuche (Breadth-First-Search)
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BNetzA	Bundesnetzagentur
DIN	Deutsche Industrienorm
DIN EN	Deutsche und europäische Industrienorm
DIN ISO	Deutsche und internationale Industrienorm
DV	Design Velocity
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
EIGA	European Industrial Gases Association
EIM	Erweiterte Inkrementelle Methode
EN ISO	Europäische und internationale Norm
ENTSO-G	European Network of Transmission System Operators for Gas
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
ESM(s)	Energiesystemmodell(e)
EU	Europäische Union
EU-27	27 Mitgliedsstaaten der Europäischen Union
FNB	Fernleitungsnetzbetreiber
GasHDrLtgV	Gashochdruckleitungsverordnung
GasNEV	Gasnetzentgeltverordnung
GasNZV	Gasnetzzugangsverordnung
GDRM-Stationen	Gas-Druck-Regel-und-Mess-Stationen
GIE	Gas Infrastructure Europe

Abkürzung	Bedeutung
GIS	Geoinformationssystem
H-Gas	Hochkalorisches Erdgas
HTML	Hypertext Markup Language
L-Gas	Niederkalorisches Erdgas
LNG	Liquified Natural Gas
MILP	Gemischt-ganzzahlig-lineares Programm
MINLP	Gemischt-ganzzahlig-nichtlineares Programm
MIP	Gemischt-ganzzahliges Programm
MOV	Maximum Operating Velocity
NEP-Gas 2020	Netzentwicklungsplan Gas 2020
NLP	Nichtlineares Programm
NoVa	Nominierungsvalidierung
NUTS	Nomenclature des Unités Territoriales Statistiques
OOP	Objekt-orientierte Programmierung
OV	Operating Velocity
Penalty-ADM	Penalty Alternating Direction-Methode
SGERG	Standard du Groupe Europeen de Recherches Gazières
THG	Treibhausgas
TSO(s)	Transmission System Operator(s)
TYNDP	Ten-Year-Network-Development-Plan
UGS	Untergrundspeicher
VGE	Verlag Glückauf Essen
VNB	Verteilnetzbetreiber
XML	Extensible Markup Language
XSD	XML Schema Definition

H Glossar

Begriff	Bedeutung
Breitensuche/Breadth-First-Search (BFS)	Eine Suchstrategie auf mathematischen Bäumen, die erst alle Knoten auf gleicher Tiefe im Baum absucht, bevor die nächsttiefere Ebene betrachtet wird.
Nominierung	Eine gebuchte, angemeldete oder antizipierte (Gas-) Transportmenge (Nominierung)
Nominierungsvalidierung (NoVa)	Der modellgestützte Prozess der Validierung, dass eine gebuchte, angemeldete oder antizipierte (Gas-) Transportmenge (Nominierung) auch physikalisch durch das Gasnetz übertragen werden kann.

1. Einleitung

1.1. Motivation und Fokus der Arbeit

Die Frage, die am Anfang dieser Arbeit stand, ist: "Welcher Beitrag kann, durch geschickte Anwendung und Entwicklung von Gastransport-Modellen im Rahmen der deutschen und europäischen Energiewende geleistet werden, um diese zum Erfolg zu führen?" Dies betrifft insbesondere Hindernisse, Herausforderungen und Lösungen, um die Integration des Energieträgers Wasserstoff in die bestehende Energiesystem-Landschaft erfolgreich umzusetzen. Einen guten Ausgangspunkt bietet der Blick auf bestehende Energiesystemmodelle und ihre Fähigkeiten hinsichtlich der korrekten und präzisen Abbildung von Teilsystemen - hier, des Gasnetzes. Energiesystemmodelle werden eingesetzt, um Kosten, Betrieb und Strukturwandel eines gesamten Energiesystems zu analysieren und zu bewerten. Bei Energiesystemmodellen handelt es sich häufig um Multi-Commodity-Minimum-Cost-Flow-Probleme auf Graphen mit einer gleichzeitigen, diskreten, örtlichen und zeitlichen Auflösung. Energieflüsse durch bestehende Infrastrukturen werden durch Flüsse auf Kanten fixer Kapazität abgebildet, die unabhängig voneinander sind. Gleichzeitig werden Teile von Infrastrukturen räumlich aggregiert. Dabei handelt es sich um Vereinfachungen, die der Komplexitätsreduktion in Anbetracht begrenzter Rechenleistung und Ressourcen geschuldet sind. In vielen Fällen sind derartige Vereinfachungen zulässig. Dies trifft jedoch nicht auf Potentialfluss-basierte Netze, wie das Stromnetz oder das Gasnetz, zu. Streng genommen dürfen diese Infrastrukturen weder bilanziell aggregiert werden, noch sind die Leitungsflüsse unabhängig voneinander. Der Potentialfluss induziert eine Kopplung weiter Teile solcher Netze. Folglich bedarf es einer separaten Betrachtung dieser Infrastrukturen, die den besonderen, physikalischen Aspekten dieser Netze Rechnung trägt, um bestimmte Fragen zu beantworten. Dies wird in dieser Arbeit aufgegriffen. Das hier implementierte Gasnetzmodell hilft folgende Fragen zu beantworten: Ist ein Lastfall tatsächlich übertragbar und, wenn ja, bei welchen Betriebsbedingungen, charakterisiert durch Druck, Fluss und Schaltzustände schaltbarer Elemente? Existieren netzseitige Engpässe im Normalbetrieb? Außerdem gibt das Modell Einblick in die lokale Netzauslastung. Perspektivisch können derartige Modelle auch genutzt werden, um mithilfe zeit-kohärenter Lastkurven mögliche Druckschwankungen und daraus resultierende Materialbelastungen zu evaluieren (Quasi-Steady-State). Durch diese wertvollen Auskünfte stellt ein physikalisches Gasnetzmodell nicht nur eine zweckmäßige Ergänzung eines Energiesystemmodells dar, sondern ist auch in frühen Planungsphasen neuer Infrastrukturen von Nutzen, wie im Falle des initialen Wasserstoffnetzes in dieser Arbeit. Das Modell wird genutzt, um das im Rahmen des Netzentwicklungsplan Gas 2020[1] der Fernleitungsnetzbetreiber antizipierte initiale Wasserstoffnetz zu analysieren und darüber hinaus eine Studie zur Austauschbarkeit von Erdgas durch Wasserstoff in einem Netzmodell des hochkalorischen Erdgas-(H-Gas) -Netzes Deutschland durchzuführen.

[1] Das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) verpflichtet die Fernleitungsnetzbetreiber (FNB), in jedem geraden Jahr einen gemeinsamen, deutschlandweiten Netzentwicklungsplan (NEP) zu erstellen. Der Plan muss alle wirksamen Maßnahmen zur bedarfsgerechten Optimierung, Verstärkung und zum bedarfsgerechten Ausbau des Netzes und zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit enthalten, die in den nächsten zehn Jahren für einen sicheren und zuverlässigen Netzbetrieb netztechnisch erforderlich sind. In den ungeraden Jahren ist von den FNB bis zum 1. April ein gemeinsam erarbeiteter Umsetzungsbericht vorzulegen.

1.1.1. Hintergrund

A "[...] vector for renewable energy storage, alongside batteries, and transport, ensuring back up for seasonal variations and connecting production locations to more distant demand centres."[1]

Deutschland und die Europäische Union (EU) sehen einvernehmlich Wasserstoff als Schlüsseltechnologie zur Erreichung der Klimaziele [2], [1]. In der europäischen Wasserstoffstrategie wird Wasserstoff (H2) als " [...] vector for renewable energy storage, alongside batteries, and transport, ensuring back up for seasonal variations and connecting production locations to more distant demand centres." [1] gesehen. In der Tat ist Wasserstoff ein nicht-toxisches, treibhausgasneutrales Molekül, das direkt als Energieträger und Treibstoff, aber auch als Edukt für die Synthese anderer Energieträger, Chemie- und Stahlprodukte genutzt werden kann. In der Chemieindustrie ist grauer Wasserstoff[2] schon vielfach im Einsatz und kann relativ leicht ersetzt werden. In der Stahlindustrie wird die Umstellung der Primärstahlproduktion auf das Verfahren der H2-Direktreduktion derzeit implementiert (thyssenkrupp Steel [3], Salzgitter AG [4], ArcelorMittal [5]). Der Einsatz von grünem Wasserstoff kann hier einen wichtigen Beitrag zur Dekarbonisierung[3] leisten, die Schlüsselrolle liegt jedoch im systemischen Beitrag. Der Übergang von fossilen und nuklearen Energieträgern zur volatilen, erneuerbaren Energieerzeugung geht mit dem Verlust der uneingeschränkten Grundlastabdeckung einher und erfordert die Erschließung von Speichermöglichkeiten, um langfristig die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Dem Wegfall fossiler und nuklearer Energieträger muss durch alternative Erzeugungspfade basierend auf langfristig speicherbaren, und in großen Mengen transportierbaren, Energieträgern begegnet werden. Eine robuste Transportinfrastruktur bietet Kapazitäten zur effizienten Verteilung der dezentral erzeugten Energie, während die enthaltenen Speicher die Entkopplung von Energieverfügbarkeit und -nachfrage auf verschiedenen Zeitskalen möglich machen. Durch den graduellen Wegfall des Erdgases bietet sich, aus logistischen und ökonomischen Gründen, die Nutzung der bestehenden Erdgasinfrastruktur samt Speichern für Wasserstoff an. Aber nicht nur der Dekarbonisierungsbedarf im Rahmen der Energiewende ist Anlass für einen Energie-Shift, weg vom Erdgas. Die imminente Gas-Krise im Zusammenhang mit dem Ukraine-Krieg zeigt die geostrategisch nachteilige Abhängigkeit Europas von russischem Erdgas auf und verlangt, nicht nur mittel- bis langfristig, sondern auch kurzfristig, nach alternativen diversifizierten Energie-Supply-Chains. Folglich ist die Schaffung eines deutschen und pan-europäischen Wasserstoffnetzes ein politisch fest gesetzter Plan. Infolgedessen haben die Fernleitungsnetzbetreiber im Vorfeld des NEP-Gas 2020 eine Marktpartnerabfrage zur Feststellung möglicher Wasserstoffquellen und -senken durchgeführt (Szenariorahmen: [6], NEP-Gas 2020 [7]). Das Ergebnis dieser Umfrage ist in den NEP-Gas 2020 in Form der sog. Grüngasvariante eingeflossen. Hier wurden erstmalig umzustellende Bestandspipelines zur Verbindung von H2-Erzeugungsstandorten und Verbrauchszentren ausgewiesen. Ausgehend von Inselnetzwerken bzw. Clustern, ist ein gradueller Ausbau

[2] Eine Erklärung der Farben des Wasserstoffs befindet sich im Anhang I.2

[3] Das geschätzte Dekarbonisierungspotential beträgt in diesem Sektor 70-100 $MtCO_2/a$ [1]

des Netzes in den folgenden Dekaden geplant, hin zu einem zusammenhängenden paneuropäischen Wasserstoffnetz. Zweifelsohne stellt die Etablierung einer Wasserstoffinfrastruktur eine Herausforderung dar, die zeit- und ressourcenintensiv ist und bei der viele Hindernis überwunden werden müssen. Hier sind insbesondere wirtschaftliche (Markthochlauf), gesetzlich-regulatorische (Regulierung von Wasserstoffnetzen) und Aspekte der technischen Umsetzung zu nennen. Die Stärkung des Anteils erneuerbarer Energien im Endenergieverbrauch wird in naher Zukunft eine stärkere Sektorkopplung zwischen Erdgas, Wasserstoff und Strom zur Folge haben. Dies rückt die Single- und Multi-Commodity-Netzwerk-Simulation in den Fokus von Wissenschaft und Industrie, um planbare und nicht planbare Szenarien zu adressieren und eine sichere Energieversorgung zu gewährleisten. Das initiale deutsche Wasserstoffnetz wird zwar voraussichtlich ein vorwiegend industriell geprägtes Netz sein [7], allerdings besteht die Möglichkeit, dass es später auch das Leben der breiten Öffentlichkeit beeinflusst, beispielsweise, wenn Rückverstromung im größeren Maße stattfinden sollte. Daher sind Transparenz und Diskurs über die laufenden Entwicklungen wichtig. Auch für wissenschaftliche Studien, die den Umbau des Energiesystems leiten sollen, ist eine Bewertung der Infrastrukturentwicklungen und technischen Möglichkeiten unabdingbar. Die Frage nach der grundsätzlichen Netzkapazität des deutschen Fernleitungsnetzes für Wasserstoff hat eine erste Gasaustauschstudie von hochkalorischem H-Gas[4] durch Wasserstoff, im derzeitigen H-Gas-Leitungsnetz, motiviert.

1.1.2. Neuigkeitswert der Arbeit

Die vorliegende Arbeit untersucht erstmalig klein- und großskalige Gasnetze im Betrieb mit Wasserstoff anhand von Szenarien mit Realitätsbezug. Dazu wird ein optimierungsbasiertes, hydraulisches Gasnetzmodell genutzt, das aus Teilmodellen aus der Literatur besteht. Diese Teilmodelle werden, im Rahmen dieser Arbeit, in Form eines Python-Computerprogramms zusammengeführt. Die Erstellung dieses Computerprogramms ist Bestandteil dieser Arbeit. Darauf aufbauend werden Szenariorechnungen mit dem Computermodell durchgeführt. Diese sind zweigeteilt. Einerseits wird erstmalig die Übertragbarkeit von, zum Erdgas-Fall energieäquivalenten, Wasserstoff-Lastfällen in einem Netzmodell des deutschen Fernleitungsnetzes für hochkalorisches Erdgas betrachtet. Andererseits wird erstmalig ein Netzmodell des deutschen initialen Wasserstoffnetzes bis 2025 und 2030, auf Basis von Angaben aus der Datenbank der Fernleitungsnetzbetreiber Gas, dem NEP-Gas 2020, sowie weiteren Projektquellen erzeugt. Dieses wird mit Hilfe des zuvor genannten Gasnetzmodells unter verschiedenen Lastfällen betrachtet, um mögliche Betriebszustände zu erörtern und gegebenenfalls Schwachstellen und Entwicklungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Dabei ermöglicht das Modell die Handhabung großer Netze mit aktiven sowie passiven Elementen und den Betrieb mit unterschiedlichen Gasen. Durch die physikalische Flussmodellierung

[4] Als Brenngas wird bestehendes Erdgas je nach Energiegehalt grob in niederkalorisches (L-Gas) und hochkalorisches (H-Gas) Gas kategorisiert. Der niedere Energiegehalt des L-Gases ergibt sich aufgrund der Zusammensetzung, da hier fördergebietsbedingt höhere Inertgas-Anteile vorhanden sind. Die Buchstabenbezeichnung ist dem Englischen entlehnt: L für low-calorific (niederkalorisch) und H für high-calorific (hochkalorisch).

können Einblicke und Schlussfolgerungen gezogen werden, die mit allgemeinen Energiesystemmodellen nicht möglich sind.

1.2. Struktur der Arbeit

Der weitere Verlauf der Arbeit ist wie folgt: Das Kapitel 2: Grundlagen der Gasversorgung gibt zunächst einen Überblick über den Gastransport in Fernleitungsnetzen und die dabei relevanten Komponenten (2.1). Darauf folgt eine Betrachtung des Status Quo der Umstellung auf Wasserstoff (2.2). Dabei wird sowohl auf gesetzlich-regulatorische Rahmenbedingungen für den Wasserstoffnetzbetrieb eingegangen als auch die beteiligten Stakeholder-Gruppen vorgestellt. Weiterhin wird die technische Eignung bestehender Netze für die Umstellung auf Wasserstoff erörtert, vom Material hin zum System. Aus der Systembetrachtung leitet sich die Diskussion des aktuellen Standes der Gasnetzmodellierung in der Literatur und der dazugehörigen Daten und ihrer Aufbereitung ab. In Kapitel 3 werden die Wasserstoff-Szenarien beschrieben, die den Rechnungen in dieser Arbeit zugrunde liegen. Es folgt die, für diese Arbeit gewählte, mathematische Modellbeschreibung in Kapitel 4. Um den Lesefluss nicht zu stören, wurden manche mathematischen Beschreibungen in den Anhang I verschoben. Ergebnisse werden in Kapitel 5 präsentiert und diskutiert. Eine Gesamtevaluation (Kapitel 6) der Ergebnisse und Entwicklungen, gefolgt von einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf offene Fragestellungen und Entwicklungsmöglichkeiten (Kapitel 7) schließen die Arbeit ab.

2. Grundlagen der Gasversorgung

In diesem Kapitel werden relevante Grundlagen für das weitere Verständnis dieser Arbeit erörtert und die Gasnetzmodellierung in den Gesamtkontext eingebettet. Dazu gehört zunächst eine Abgrenzung der betrachteten Systemebene gegenüber seiner Umwelt. Anschließend soll ein grundlegendes Verständnis der relevanten Systemkomponenten geschaffen werden. Auf dieser Basis kann dann auf Fragen und Herausforderungen in Bezug auf die Umstellung und den Betrieb bestehender Pipelines mit Wasserstoff eingegangen werden. Eine Betrachtung von bestehenden Entwicklungen, sowie des Standes der Technik bei der Gasnetzmodellierung setzen den Fokus für die Rechnungen in den darauffolgenden Kapiteln.

2.1. Gastransport in Deutschland und Europa

Abbildung 2.1 zeigt einen Graphen des Europäischen Fernleitungsnetzes. Wie man deutlich erkennt, ist das Netz stark vermascht und hoch komplex. Es verbindet Förderorte und -gebiete mit Abnehmern und Speichern[5].

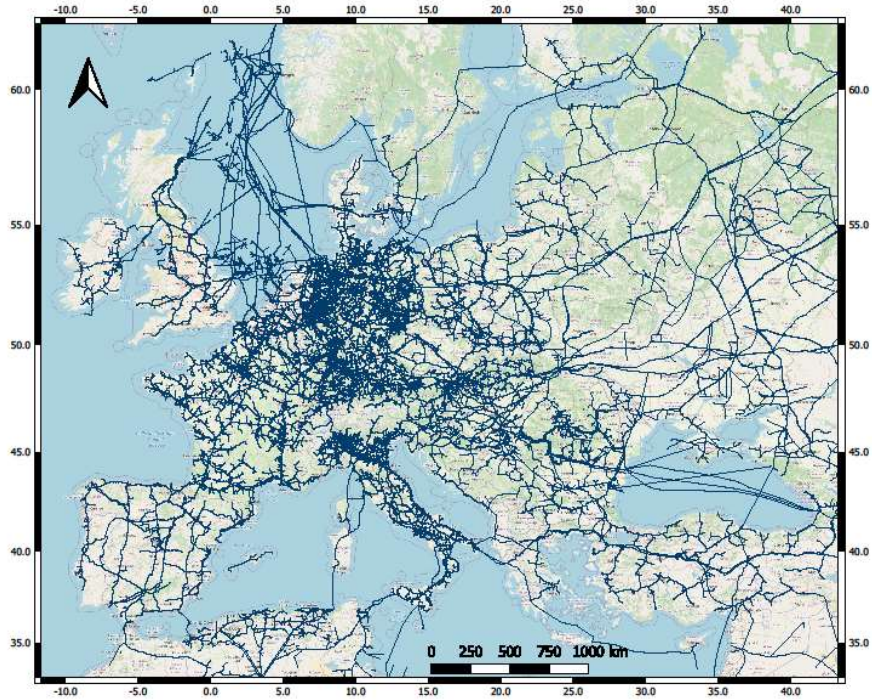


Abbildung 1.1.2.1: Überblick: Europäisches Gasnetz. Eigene Darstellung nach [10]

Das Transmissionsnetz der EU inklusive Großbritannien umfasst ca. 198.500 km Leitungslänge aufgeteilt auf 46 Gasnetzbetreiber (Transmission System Operators (TSOs))

[5] PDF- oder Papierkarten mit Grundinformationen zum Leitungsnetz, Ein- und Ausspeisekapazitäten und Speichern können auch über [8] und [9] bezogen werden.

und einer insgesamt installierten Verdichterleistung von ca. 9,5 GW_{el} [11]. Von der Gesamtleitungslänge entfallen etwa 30.000 km auf Deutschland. Nimmt man noch die Verteilnetzebene hinzu, so sind es allein für Deutschland sogar ca. 540.000 km [12]. Tatsächlich besteht das Gasnetz aus mehreren Ebenen, die nach Druckstufen unterschieden werden können: Auf oberster Druckstufe besteht das Fernleitungsnetz, das von maximal 100 bar(g) bis zu einem minimalen Druck von ca. 16 bar(g) betrieben wird, wobei oberhalb >16 bar Anzeigeverfahren gemäß Gashochdruckleitungsverordnung (GasHDrLtgV) notwendig sind, [13]. In der Praxis wird das Netz meist über den 16 bar(g) betrieben. Vom Fernleitungsnetz wird in der Regel in das überregionale Verteilnetz, ca. 50-16 bar, und von dort aus in das unterlagerte örtliche Verteilnetz unterhalb 16 bar ausgespeist. Die Übergänge sind hier fließend, allerdings wird sicherheitstechnisch der Hochdruckbereich, der bei 1 bar(g) anfängt, bei 4 bar(g) und bei 16 bar(g) nochmals unterteilt. Bestimmungen zum Gasnetz und seinen Komponenten sind im Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) und der GasHDrLtgV zu finden, sowie in technischen Regeln in Form von Datenblättern des Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW), der Deutsche Industrienorm (DIN)/Deutsche und europäische Industrienorm (DIN EN), der European Industrial Gases Association (EIGA) und ähnlichen Institutionen (siehe auch Tafel 5.1 in [13]). Das Gas kann, zeitlich, sowohl untertägig, zum Beispiel in Gasballons oder saisonal, insbesondere in Untergrundspeichern (Salzkavernen und Aquiferen), gespeichert werden. Abbildung 1.1.2.1 lässt sich weiterhin entnehmen, dass Deutschland im europäischen Gasnetz eine zentrale Rolle zukommt. Tatsächlich kann Deutschland als Gashub für Westeuropa betrachtet werden. Nicht nur die geografisch zentrale Lage in Verbindung mit primären Gasflussrichtungen von Ost nach West tragen dazu bei, sondern auch die geologische Beschaffenheit ermöglicht, besonders in der nördlichen Hälfte von Deutschland, große Untergrundspeicher zu betreiben. Die starke Wirtschaft und Industrie, sowie der allgemeine Heizbedarf sorgen dafür, dass Deutschland mit ca. 91 Milliarden Normkubikmetern im Jahr 2020 etwa für 22,8% des Erdgasverbrauchs der 27 Mitgliedstaaten der Europäischen Union (EU-27) verantwortlich zeichnete [14]. In Anbetracht dessen stellt die Dekarbonisierung der Erdgas-abhängigen Sektoren eine Herausforderung dar. Allerdings bietet die bereits vorhandene, dichte Gasinfrastruktur auch Chancen, durch Umstellung bestehender Infrastruktur, Synergien zu schaffen und den Umbau des Energiesystems zügig voranzutreiben. Ein interessanter Aspekt des europäischen Gasnetzes ist, dass seit der sogenannten Gasmarktliberalisierung in Europa die Erzeugung, der Transport und der Vertrieb getrennt sind. Der Gasmarkt ist in mehrere, geografisch abgegrenzte Marktgebiete mit jeweils einem virtuellen Handelspunkt unterteilt. An den Handelspunkten können räumlich ungebundene Ein- und Ausspeisekapazitäten von Transportkunden (Marktteilnehmern) auf Auktionen[6] gekauft und einen Gastag im Voraus zur Nutzung angemeldet, man sagt auch “nominiert“, werden. Nicht genutzte Kapazitäten können an einer Tagesbörse erworben und im Stundentakt nachnominiert werden. Dies hat Konsequenzen für die Gasnetzbetreiber. Sie sind zum einen regulatorisch dazu verpflichtet, maximale Ein- und Ausspeisekapazitäten zur Vermarktung auszuweisen, und zum anderen stehen sie vor der Herausforderung, die eigenen Netzkapazitäten für unterschiedlichste, unbekannte, zukünftige Lastszenarien zu evaluieren. Aus Netzbetreibersicht ist es von Vorteil große freie Kapazitäten zu niedrigen Transportkosten

[6] zum Beispiel auf der Online-Buchungsplattform PRISMA [15]

anbieten zu können. Im Umkehrschluss sind nicht nur die Kapazitäten zu evaluieren und zu validieren, sondern auch die eigenen Kosten zu minimieren. Gerade aus dieser Notwendigkeit heraus ist im letzten Jahrzehnt verstärkt an der Gasnetzmodellierung geforscht worden. Es sei an dieser Stelle auf das Werk [16] verwiesen, dass sich der Gasnetzmodellierung vor diesem Hintergrund widmet und einen guten Einstieg in das Thema bietet. Um im weiteren Verlauf der Arbeit auf die Eignung bestehender Systeme für die Umstellung auf Wasserstoff eingehen zu können, sollen in den folgenden Abschnitten kurz die technischen Komponenten des Fernleitungsnetzes erläutert werden. Dabei kann nicht auf jedweden Aspekt eingegangen werden. Der interessierte Leser sei hier für weiterführende technische Aspekte auf [13] verwiesen.

2.1.1. Struktur und Komponenten des Gasnetzes

Grundsätzlich können die technischen Komponenten des Gasnetzes mit unmittelbarem Einfluss auf den Gasfluss in die Kategorien aktive und passive Elemente eingeordnet werden. Aktive Elemente sind dabei solche, die, durch Ansteuerung von außen, Einfluss auf den Zustand des Gases und seine Flussrichtung nehmen. Passive Elemente, hingegen, werden lediglich durchströmt. Zu den passiven Elementen gehören hauptsächlich die Gaspipelines und verfahrenstechnische Anlagen an Verdichterstationen, wie Filteranlagen und Wärmeübertrager. Im Rahmen einer Modellierung kann es jedoch angezeigt sein noch weitere passive Elemente zu implementieren, um eine höhere Flexibilität in der Systemabbildung zu erreichen oder Sondereffekte zu berücksichtigen. Dies können künstliche Widerstände oder auch vereinfachte Rohrverbindungen sein. Zu den aktiven Elementen gehören insbesondere sämtliche Typen von Ventilen und natürlich alle Verdichter mit ihren Antrieben. All diese Elemente, ihre Aufgaben und Verschaltungen werden im Folgenden kurz vorgestellt, um ein grundlegendes Verständnis für die Komponenten eines Gastransportnetzes zu vermitteln und die spätere Modelldarstellung knapp zu halten.

2.1.1.1. Pipelines

Gaspipelines sind, von Gas durchströmte, verschweißte Stahl- oder Kunststoffrohre[7], die über eine Druckbeständigkeit bis zu einem bestimmten Nenndruck verfügen. Moderne Ausführungen haben eine Epoxidharz-Beschichtung auf der Innenseite, um den Strömungswiderstand des Gases zu minimieren, und eine Polymerbeschichtung aus Polyethylen oder Polypropylen auf der Außenseite. Letztere schützt die Stahlpipelines vor äußeren mechanischen Einwirkungen und sorgt gleichzeitig für einen passiven Korrosionsschutz gegenüber der Umwelt. Für besondere Einsätze wie die Unterseeverlegung kommen auch andere Beschichtungen zum Einsatz. Neben dem passiven Korrosionsschutz gibt es auch einen aktiven Korrosionsschutz - den kathodischen Korrosionsschutz mit Fremdstrom bei dem der Potentialausgleich durch Gleichstrom herbeigeführt wird, oder ohne Fremdstrom bei dem die Anbringung einer Opferanode aus unedlerem Metall die Korrosion des eigentlichen Rohres verhindert. Die Stähle selbst müssen, je nach Einsatzbereich- und -ort, den Anforderungen unterschiedlicher Normen entsprechen. Hier sind insbesondere die Normen 5L [17] des American Petroleum Institute

[7] Kunststoffrohre nur für Anwendung <10 bar(g) [13]

(API) und die Europäische und internationale Norm (EN ISO) 3183) [18] zu nennen. Diese definieren Stähle in Bezug auf ihre mechanischen Eigenschaften, zum Beispiel ihre Streckgrenze, ihre Zusammensetzung und ggf. die einzusetzenden Testverfahren. Ein Stahl mit der Bezeichnung L485 oder äquivalent X70 hat eine minimale Streckgrenze von 485 MPa beziehungsweise 70300 psi, dies entspricht ungefähr 70 kpsi, und weist Oberschranken für Spuren- und Legierungsmetalle[8] auf. So gesehen ist die Stahlbezeichnung nach der mechanischen Streckgrenze keine exakte Definition im Sinne der Zusammensetzung, aber dennoch üblich und technisch hinreichend eingegrenzt.

2.1.1.2. Ventile

Bei Ventilen kann man zwischen Absperrventilen und Druckregelventilen unterscheiden. Absperrventile können passiver oder aktiver Natur sein. Sie kommen zum Einsatz, um den Gasfluss in einem Leitungsnetzwerk aktiv zu steuern oder, passiv, Leitungsabschnitte zu Wartungszwecken manuell vom Netz zu trennen. Druckregelventile drosseln den Druck des sie durchströmenden Gases. Dies kann nötig sein, um Druckschranken stromabwärts einzuhalten oder mehrere Gasströme unterschiedlichen Drucks zusammenzuführen. Für sehr große Druckunterschiede, beispielsweise vom Transport- ins Verteilnetz, kann es sich sogar lohnen, die im Druckniveau gespeicherte Energie in Entspannungsturbinen zurückzugewinnen.

2.1.1.3. Verdichter

Verdichter, oder auch Kompressoren genannt, dienen der Druck- und damit der Potentialerhöhung des zu transportierenden Gases. Erst durch ein Potentialgefälle wird der Transport ermöglicht. Verdichter existieren in vielen, dem Anwendungszweck angepassten, Ausführungen. Im Gasnetz kommen meist Turboverdichter zum Einsatz. Sie gehören zu den Strömungsmaschinen. Den Strömungsmaschinen gegenüber stehen die Verdrängermaschinen. Während Turboverdichter die Gasteilchen durch Umleitung an den Schaufelrädern beschleunigen und somit Energie zuführen, verrichten Verdrängermaschinen Arbeit, indem sie das Gas gegen einen inneren Druck, durch Volumenverkleinerung, verdrängen. Für Gase, die sich schwer durch Strömungsmaschinen verdichten lassen, kommen in der Regel Verdrängermaschinen wie Kolbenverdichter zum Einsatz. Für geringere Flüsse, zum Beispiel in Tankstellenanwendungen, lassen sich auch Membranverdichter einsetzen, die, statt über Kolben, über eine hydraulisch verformbare Membran die Volumenänderung herbeiführen. Welcher Verdichter nun einzusetzen ist, variiert von Anwendung zu Anwendung. Für die unterschiedlichen Ausführungen und Konzepte bestehen Tradeoffs im Hinblick auf Volumenstrom, Druckerhöhung, Antriebsleistung und Wartungsaufwand.

2.1.1.4. Antriebe

Verdichter sämtlicher Couleur benötigen Antriebe, um die zur Verdichtung benötigte Energie bereitzustellen. Hier sind, im Erdgasnetz, Gasturbinen am gebräuchlichsten. Diese gehören auch zu den Turbomaschinen und können hohe Leistungen bereitstellen, üblicherweise ca. 30 MW pro Turbine, vgl. [19], [20]. Außerdem nutzen sie in der Regel

[8] insbesondere für Kohlenstoff (C), Silizium (Si), Mangan (Mn), Phosphor (P), Schwefel (S), Vanadium (V), Niob (Nb), Titan (Ti)

direkt das Gas aus der Pipeline, und sind folglich nicht vom Stromnetz abhängig. Es existieren allerdings auch Gas-Kolbenmotoren und elektrische Antriebe. Der Energiebedarf der Antriebe stellt die größten Betriebskosten für den Leitungstransport dar.

2.1.1.5. GDRM- und Verdichterstationen

Aktive Elemente, wie Druckregelventile oder Verdichter und ihre Antriebe werden typischerweise in Gas-Druck-Regel-und-Mess-Stationen (GDRM-Stationen) oder Verdichterstationen angeordnet, da ihr Betrieb komplexer Natur ist und zusätzliche Betriebsmittel wie Steuereinrichtungen und Prozessleitsysteme mit Netzwerkintegration benötigt. Außerdem ermöglicht die Anordnung mehrerer Verdichter in einer Verdichterstation diese je nach Lastfall unterschiedlich zu betreiben und Redundanzen für Ausfälle und Wartungsarbeiten bereitzustellen. Es existieren noch weitere periphere Komponenten wie Wärmetauscher zum Abkühlen des verdichteten Gases oder Aufheizen des zu entspannenden Gases, sowie Gasfilter. Letztere sind im Rahmen einer Netzmodellierung meist nicht von Interesse.

2.1.2. Gase – Beschreibung und Eigenschaften

Gase werden physikalisch-makroskopisch über sogenannte thermodynamische Zustandsgleichungen beschrieben. Dies sind empirische oder semiempirische Gleichungen, die die thermodynamischen Zustandsgrößen Temperatur, Druck, Volumen, Stoffmenge und innere Energie in charakteristischer Weise miteinander koppeln. Dabei sind nicht alle Zustandsgrößen frei wählbar, sondern über die sogenannte Gibbs'sche Phasenregel gekoppelt. Ist die Zustandsgleichung als Funktion der Zustandsgrößen Temperatur, Druck, Volumen und Stoffmenge ausgedrückt, so spricht man von einer thermischen Zustandsgleichung (im Gegensatz zu einer kalorischen Zustandsgleichung). Die wohl bekannteste, und im Erdgasbereich populärste, thermische Zustandsgleichung für die Beschreibung von realen Gasen ist das ideale Gasgesetz mit Realgasfaktor:

$$\frac{\mathbf{pV}}{\mathbf{nRT}} = \mathbf{z}(\mathbf{p}, \mathbf{T}). \qquad \textit{Gl. 2.1}$$

Hier steht p für den Druck, V für das Volumen, n für die Stoffmenge, R für die universelle Gaskonstante, T für die Temperatur und z für den Realgasfaktor. Der Realgasfaktor z kann wiederum eine Funktion der Zustandsgrößen sein. Im Falle eines idealen Gases gilt $z = 1$. Bei nicht-Reinstoff-Gasen, wie Erdgas, spielt auch die Zusammensetzung eine Rolle. Diese kann im Erdgasbereich je nach Gasherkunft variieren, siehe [13] Tafel 2.2 oder auch DVGW-Datenblatt G 260 Gasbeschaffenheit, für übliche Erdgaszusammensetzungen. Übliche Verfahren zur Berechnung der Gemischeigenschaften von Erdgas sind insbesondere das Standard du Groupe Europeen de Recherches Gazières (SGERG)-88-Verfahren, siehe auch DVGW-G 486, und das American Gas Association (AGA)-8-Verfahren, siehe Deutsche und internationale Industrienorm (DIN ISO) 12213, [13]. In städtischen Gebieten werden dem Erdgas aus Sicherheitsgründen Odorierungsmittel zugesetzt, die den bekannten "Gasgeruch" hervorrufen. Der Energiegehalt eines Brenngases wird durch den Heiz- beziehungsweise Brennwert[9] charakterisiert, der die Energiefreisetzung bei idealer stöchiometrischer Verbrennung angibt. Um die

[9] Manchmal werden Heiz- und Brennwert auch unterer und oberer Heizwert genannt.

Austauschbarkeit von Gasen in der Anwendung zu charakterisieren, bedarf es unterschiedlicher Kennwerte, wie den Wobbe-Index, die Primärluftansaugung, die Flammenstabilität (Flammengeschwindigkeit, Zündtemperatur) und die Verbrennungsgüte. Interessierte LeserInnen seien an dieser Stelle auf [13] verwiesen.

2.2. Status Quo der Umstellung auf Wasserstoff-Transport

Derzeit wird Wasserstoff vornehmlich am Ort des Verbrauchs erzeugt. Ausnahmen bilden die Netze der AirLiquide im Ruhrgebiet (240 km) und das durch die Linde AG betriebene Wasserstoffnetz im Mitteldeutschen Chemiedreieck (Bitterfeld, Schkopau, Leuna) (150 km) [21]. Diese Netze unterliegen derzeit keiner Regulierung. Damit steht schon mal fest, dass der leitungsgebundene Wasserstofftransport kein Novum ist und hier in der Industrie bereits jahrzehntelange Erfahrung vorhanden ist. In diesem Kapitel wird ein Überblick darüber gegeben, wie der Status Quo in Bezug auf die Umstellung auf Wasserstoff ist. Dazu werden zunächst die aktuellen gesetzlichen beziehungsweise regulatorischen Rahmenbedingungen beleuchtet, gefolgt von der Nennung einzelner Stakeholder bei der Umstellung und ihrer jeweiligen Rollen und Kompetenzen. Im Anschluss wird in einem Bottom-Up Vorgehen die technische Eignung bestehender Systeme von Materialien über Komponenten hin zur Systemeignung bewertet. Letztere wird Ausgangspunkt und Motivation zur Betrachtung von Gasnetzmodellen in der Literatur sein.

2.2.1. Gesetzliche/Regulatorische Rahmenbedingungen

Die gesetzlich-regulatorischen Rahmenbedingungen regeln das faire und sichere Miteinander bestehender und etwaiger Marktteilnehmer, sowie Fragen des Entflechtungsrechts, Berichtspflichten, Entgelte, etc. Relevante normative Texte in Bezug auf die Gaserzeugung, -förderung und -transport sind vor allem im EnWG zu finden. Daraus abgeleitet besteht eine Vielzahl an Verordnungen, die die Normen implementieren, in Form von Prozessen zu ihrer Einhaltung, aber auch in Form von Befugniszuweisungen an Rechtspersonen und Organe/Institutionen oder in Form von Verboten. Hier sind insbesondere die Gasnetzzugangsverordnung (GasNZV), die Gasnetzentgeltverordnung (GasNEV), die GasHDrLtgV Gashochdruckleitungsverordnung und die Anreizregulierungsverordnung (ARegV) zu nennen. Eine Institution die beispielsweise Befugnisse erhält, ist der DVGW [22], der, im Sinne einer Selbstverwaltung, die technischen Regeln und Normen für die Gas- und Wasserversorgung aufsetzt. Kernpunkte der Debatte um die Wasserstoffnetz-Regulatorik aus Betreibersicht, sind Fragen der Wirtschaftlichkeit, Planungssicherheit und Anlagensicherheit, sowie die Frage, inwiefern Wasserstoff getrennt vom Erdgas betrachtet werden muss. Ein klarer rechtlicher Rahmen induziert dabei Planungssicherheit und sichert gegebenenfalls die Finanzierung getätigter Investitionen. Andererseits existieren bereits industriell integrierte Wasserstoffnetze, für die eine Regulierung zu Ungunsten der Betreiber ausfallen könnte. Dabei ist die Regulierungsbedürftigkeit aus ökonomischer Sicht zu prüfen, also weder optional noch zwingend angewiesen. Man befindet sich also in einem Spannungsfeld aus Beschränkungen, Erwägungen, Unsicherheiten und Interessen und es gilt im Rahmen des dadurch definierten, zulässigen Gebiets eine Lösung im Sinne aller Beteiligten zu finden. Eine ausgezeichnete Aufarbeitung der Thematik der Regulierungsbedürftigkeit von Wasserstoffnetzen und der rechtlichen Ausgangslage findet sich in einer Einschätzung der Bundesnetzagentur [23]. Es muss darauf hingewiesen werden, dass das Dokument die

Einschätzung vor der Veröffentlichung der EnWG-Novelle vom 26. Juli 2021 (Verkündung) wiedergibt. Dennoch haben viele Aspekte, Zusammenhänge und Erwägungen nach wie vor Gültigkeit.

Die Frage danach, ob Wasserstoff gesondert betrachtet werden muss, rührt zum einen daher, dass in der Vergangenheit in normativen Texten häufig nicht zwischen Erdgas und anderen Gasen unterschieden wurde und häufig Begriffe wie Gas-, Gasleitung, etc. synonym als Erdgas beziehungsweise Erdgasleitung verstanden wurden. Zum anderen findet durch Wasserelektrolyse hergestellter Wasserstoff in grüner und grauer Form bereits in Gesetzestexten Erwähnung. Hintergrund ist die Einspeisung beziehungsweise Beimischung in bestehende Gasnetze. Dabei ist Wasserstoff je nach Grünstromanteil als Gas im Sinne von EnWG §3 19a oder als Biogas mit Grünstromanteil >80%, siehe zum Beispiel EnWG §3 10f, zu werten. Hier lagen und liegen an manchen Stellen also mehr sprachliche Problem vor, die Uneindeutigkeiten im Lichte des aktuellen Verständnisses hervorrufen und daher rühren, dass Wasserstoff stets nicht als eigenständiges Gut angesehen wurde.

Der Bericht [23] geht auch auf die Regulierungsbedürftigkeit von Wasserstoffnetzen ein. Regulierung meint dabei die Regulierung natürlicher Monopole im ökonomischen Sinne. Ein natürliches Monopol liegt dann vor, wenn die Kostenfunktion subadditiv ist, also ein Unternehmen die Netzinfrastruktur immer günstiger bereitstellen kann als mehrere Unternehmen. Die BNetzA weist auch darauf hin, dass dies gesamtkostenseitig durchaus ein positiver Aspekt ist, allerdings aufgrund fehlenden Wettbewerbs ein Missbrauch der Marktmacht, in Form zu hoher Preise oder Einflussnahme auf die Marktteilnehmer, die auf die Infrastruktur angewiesen sind, möglich sei [23]. Insbesondere, wenn keine effizienten Alternativen existieren. Eine Regulierung soll also Wettbewerb simulieren, ist aber auch nur dann notwendig, wenn ein Missbrauch der Marktmacht oder eine Diskriminierung von Marktteilnehmern nahe liegt. Zwei Beispiele dazu:

“Eine Zugangsregulierung wäre notwendig, wenn die Gefahr,
dass es z.B. zur Verweigerung von Durchleitungen oder zur Verweigerung
der Abnahme von Wasserstoff Dritter kommt, wahrscheinlich
oder zumindest nicht zu vernachlässigen ist.“ [23]

“Eine Entgeltregulierung wäre notwendig, wenn z.B. eine
ineffiziente Preissetzung für den Wasserstofftransport
zu befürchten ist und die Netzbetreiber Monopolrenditen
abschöpfen könnten.“ [23]

Insgesamt stellt die BNetzA, nach einer sachlichen und räumlichen Abgrenzung des Marktes, fest, dass die Regulierungsbedürftigkeit zu jenem Zeitpunkt noch nicht gegeben war und allgemein von der sich entwickelnden Netzstruktur abhängt, die noch mit Unsicherheiten behaftet ist [23]. Daher wurden verschiedene Netzstrukturszenarien betrachtet (siehe Tabelle 2.1).

Tabelle 2.2.1.1: Denkbare Netzstrukturszenarien nach [23].

Szenario	Netzstruktur	Einflussfaktor
Gilt für alle Szenarien	Parallel zum Gasnetz	Bedarf an verschiedenen Energieträgern/Rohstoffen (reines Erdgas, reiner Wasserstoff)
Szenario I	Lokale Inselnetze	Verbrauch in der Industrie; Erzeugung ausschließlich in den Verbrauchszentren
Szenario II	Lokale Inselnetze, einzelne lange Transportleitungen	Verbrauch in der Industrie; Erzeugung auch außerhalb der Verbrauchszentren
Szenario III	Engmaschige Verteilernetze, einzelne lange Transportleitungen	Verbrauch in der Industrie und im Verkehr; Erzeugung aus verschiedenen Standorten

2.2.2. Status Quo der Wasserstoffnetzregulierung

Mit der EnWG-Novelle vom 26. Juli 2021 (Verkündung) [24] hat die Bundesregierung das "Gesetz zur Umsetzung unionsrechtlicher Vorgaben und zur Regelung reiner Wasserstoffnetze im Energiewirtschaftsrecht" verabschiedet. Darin werden erste rechtliche Rahmenbedingungen zum Thema Wasserstoffnetze und Regulierung festgesetzt. Die neuen Wasserstoff-relevanten Passagen im EnWG sind die folgenden: Teil 3, Abschnitt 3b §28j-q; Teil 5, §43l; Teil 10, §112b, §113a-c. Hier sollen einige Kernerkenntnisse wiedergegeben werden. Zunächst ist eine Regulierung nicht verpflichtend. Wasserstoffnetzbetreiber können freiwillig, aber unwiderruflich, eine Erklärung abgeben, dass sie unter die Regulierung, wie sie im EnWG geschildert ist, fallen wollen. Wasserstoffnetzbetreiber sind "zur Gewährleistung von Transparenz sowie diskriminierungsfreier Ausgestaltung und Abwicklung des Netzbetriebs verpflichtet. Um dieses Ziel zu erreichen, haben sie die Unabhängigkeit des Netzbetriebs von der Wasserstofferzeugung, der Wasserstoffspeicherung sowie vom Wasserstoffvertrieb sicherzustellen. Betreibern von Wasserstoffnetzen ist es nicht gestattet, Eigentum an Anlagen zur Wasserstofferzeugung, zur Wasserstoffspeicherung oder zum Wasserstoffvertrieb zu halten oder diese zu errichten oder zu betreiben." [24]. Wasserstoffnetzbetreiber sind verpflichtet einen Jahresabschluss und Lagebericht, nach den für Kapitalgesellschaften geltenden Vorschriften, anzufertigen, prüfen zu lassen, und zu veröffentlichen. Wasserstoffnetzbetreiber, die weitere Tätigkeiten ausüben, müssen "in ihrer internen Rechnungslegung ein eigenes Konto" [24] für die Wasserstofftätigkeiten führen. Dies dient der "Vermeidung von Diskriminierung und Quersubventionierung" [24]. "Kosten werden jährlich anhand der zu erwartenden Kosten für das folgende Kalenderjahr sowie der Differenz zwischen den erzielten Erlösen und den tatsächlichen Kosten aus Vorjahren ermittelt und über Entgelte erlöst." [24]. Diese Kosten werden durch die Bundesnetzagentur festgelegt und es dürfen nur solche Kosten geltend gemacht werden, für die eine positive Bedarfsprüfung durch die Bundesnetzagentur vorliegt. Wegerechte, die

bereits für Erdgasleitungen bestehen, gehen auf umgestellte Wasserstoffleitungen über. Betreiber müssen die Zulässigkeit einer Leitungsumstellung auf Wasserstoff nachweisen und Umstellungsbegehren der Bundesnetzagentur zur Prüfung der Bedarfsgerechtigkeit vorlegen. Wasserstoffnetze sind nicht Bestandteil des Netzentwicklungsplans Gas, die Identifikation von umzustellenden Leitungen allerdings schon. Für das Erdgasnetz muss nachgewiesen werden, dass es, trotz Entfernung dieser Leitungen, die im Szenariorahmen zugrunde gelegten Kapazitätsbedarfe erfüllen kann. Dazu sind geringfügige Ausbaumaßnahmen zulässig. In jedem geraden Kalender Jahr soll ein, noch nicht formal implementierter, "Netzentwicklungsplan Wasserstoff", durch die der Regulierung unterliegenden Wasserstoffnetzbetreiber angefertigt und der Bundesnetzagentur vorgelegt werden. Auch nicht-regulierte Wasserstoffnetzbetreiber sind hier in dem Maße zur Zusammenarbeit verpflichtet, dass die sachgerechte Erstellung des Berichts möglich ist. Dieser Bericht soll erstmals bis spätestens 1. September 2022 erscheinen und einen Zeithorizont bis 2035 umfassen. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) ist verpflichtet bis zum 31. Dezember 2022 "ein Konzept zum weiteren Aufbau des deutschen Wasserstoffnetzes" [24] zu veröffentlichen. Dieses soll Überlegungen zu einer Transformation von Gasnetzen zu Wasserstoffnetzen einschließlich einer schrittweise integrierten Systemplanung beinhalten" [24] und unionsrechtlichen Entwicklungen, hinsichtlich einer gemeinsamen Regulierung und Finanzierung der Gas- und Wasserstoffnetze, Rechnung tragen. Die Auffassung des Autors ist, dass diese Rechtsgrundlage, obwohl sie nicht jedweden Aspekt voll-umfänglich klärt, ausreicht, um eine gesicherte Handlungsgrundlage für Wasserstoffnetzbetreiber zu bieten. Sie stellt einen geschickten Spagat dar, der einerseits notwendige Aspekte implementiert und andererseits Aspekten, deren Ausgestaltung zeitaufwendig ist, Zeit einräumt. Wie im Vorfeld durch die BNetzA festgestellt, ist eine Regulierung zurzeit nicht zwingend. Dies ermöglicht den derzeitigen Betreibern von Wasserstoffnetzen ihr bisheriges Geschäftsmodell fortzuführen. Ein Problem, das jenseits des rechtlichen Rahmens zu klären bleibt, ist das des Markthochlaufs für Wasserstoff und wie dieser zu gestalten ist. Dieses Thema liegt jedoch jenseits des Fokus dieser Arbeit. Dennoch hilft es einen Blick auf die Stakeholder zu werfen und deren Rolle im Rahmen der Umstellung zu verstehen.

2.2.3. Stakeholder

Die Frage nach den Stakeholdern, im Rahmen der Umstellung auf Wasserstoff, ist im Wesentlichen die Frage danach, wer welchen Beitrag bei der Umstellung leisten kann? Die Beantwortung dieser Frage verlangt Kompetenzen, Zuständigkeiten und Ressourcen zuzuordnen, als auch abzugrenzen und zu verdeutlichen, wer derzeit welchen Beitrag leisten oder auch nicht leisten kann. Dies schließt auch die Wissenschaft ein. Im Rahmen dieser Arbeit zeigt die Auseinandersetzung mit der Fragestellung Grenzen auf, was eine Arbeit wie diese leisten kann.

2.2.3.1. Industrie

Der CO2-intensiven Industrie, als Zielgruppe der Umstellung, kommt die Konzeption und Umsetzung der eigenen Energie- und Rohstoffnutzung zu, sowie die Anpassung und Analyse der eigenen Wertschöpfungsketten, unter den geänderten Randbedingungen. Dies verlangt kurzfristig mitunter kapitalintensive Maßnahmen bei gleichzeitig langen

Planungshorizonten und hoher Unsicherheit. Als Hersteller von weltweit gehandelten Massengütern mit geringem Alleinstellungsmerkmal (zum Beispiel Stahl, Ammoniak, etc.), sind sie besonders abhängig von niedrigen Bezugskosten für Energie und Rohstoffe, um im internationalen Wettkampf bestehen zu können. Das heißt, man benötigt große Mengen zu sehr niedrigen Preisen. Dies ist insofern problematisch, weil bei einem Markthochlauf typischerweise genau das Gegenteil der Fall ist: Das Angebot ist beschränkt und die Kosten hoch, da Skaleneffekte noch keine Rolle spielen und der Wettbewerb gering ist. Hier gilt es folglich, im Austausch mit anderen Stakeholdern, den Markthochlauf so zu organisieren, dass Skaleneffekte schnell greifen können, die Bezugskosten vertretbar bleiben und gegebenenfalls Maßnahmen gefördert werden.

2.2.3.2. Gasnetzbetreiber

Die Gasnetzbetreiber stellen das Bindeglied zwischen den Produzenten und Verbrauchern der entsprechenden Gase her. Sie sind zuständig für die Detailplanung der Infrastruktur und verfügen über die Datenhoheit in Bezug auf ihre Anlagen und Netzdetails. Sie stehen einerseits im Austausch mit der Industrie über die geplanten Transportvolumina und müssen andererseits untereinander ein Initialnetz aus bestehenden und neuen Pipelines entwickeln, das ausreichend Transportkapazitäten für Szenarien in näherer und fernerer Zukunft bereitstellt. Bei diesen Entscheidungen und Entwicklungen sind sie nicht vollständig unabhängig, sondern unterstehen gesetzlichen Regularien, die durch die Gesetzgebung bestimmt und durch die Bundesnetzagentur kontrolliert werden.

2.2.3.3. Politik

Der Staat, als souveränes Organ, bestimmt die Strategie in Form der Gesetzgebung und hat die Regulierung der Gasnetze und angebundener Infrastrukturen als Aufgabe. Ein wichtiges Organ in Deutschland ist dabei die Bundesnetzagentur, die, als Exekutive, die Kontrolle und Implementierung der normativen Regulierung vornimmt. Darüber hinaus kann der Staat durch Förderung und Subventionierung Initiativen schaffen und Impulse setzen.

2.2.3.4. Bundesnetzagentur (BnetzA)

Die BNetzA sorgt für die Umsetzung und Einhaltung der aus den Gesetzestexten abgeleiteten Verordnungen und prüft die Bedarfsgerechtigkeit von Maßnahmen in den regulierten Infrastrukturen.

2.2.3.5. Wissenschaft

Die Rolle der Wissenschaft ist eine interessante, da ihr auf den ersten Blick keine tragende Rolle in Bezug auf die Planung und Umsetzung zu zukommen scheint. Bei genauerer Betrachtung ist die Wissenschaft gedanklicher Treiber und Bindeglied zwischen den einzelnen Akteuren. Sie vermag es die Entwicklungen in den einzelnen Sektoren und Kompetenzbereichen im Sinne einer ganzheitlichen Systembetrachtung zusammenzuführen und durch Beratung, Kritik und Impulsen bei der Ausgestaltung und Umsetzung mitzuwirken, zum Beispiel Technik und Ökonomie. Dies findet in der Regel Ausgestaltung in Form von unabhängiger Beratung, Projekten, Studien und wissenschaftlichen Arbeiten. Die technisch-physikalische Kompetenz erlaubt es den

wissenschaftlichen Akteuren mit Hilfe flexibler Modelle unterschiedliche Fragestellungen bei variierender Datenlage zu beantworten.

2.2.4. Technische Eignung bestehender Systeme

Die technische Eignung bestehender Systeme und Gasleitungen für die Umstellung auf Wasserstoff ist eine noch nicht abschließend geklärte Frage und von zentraler Bedeutung für die kosteneffektive Umsetzung eines deutschen und pan-europäischen Wasserstoffnetzes und damit für die Erreichung der Klimaziele. Die Planung, Genehmigung und Verlegung von Pipelines beansprucht viel Zeit und Ressourcen und bedarf hoher Investitionen. Darüber hinaus kann es, gerade in dicht besiedelten Gebieten, problematisch sein, geeignete Trassen zu finden, um neue Leitungen zu verlegen. Folglich ist es, sowohl aus ökonomischer als auch aus gesellschaftlicher Sicht, naheliegend zu prüfen, ob bestehende Erdgas-Pipelines und -Anlagen auf Wasserstoff umgestellt werden können. Diese technische Eignungsprüfung kann man in verschiedene Bereiche aufteilen. Hier wurde ein Bottom-Up Ansatz verfolgt, von kleinen zu großen Skalen. Zum einen ist die Materialeignung, insbesondere der Pipelines, aber auch von weiteren verbauten Netzkomponenten und -armaturen zu prüfen. Zum anderen hilft es nicht, wahllos Pipelines zu entfernen. Systemische Betrachtungen müssen Leitungen identifizieren, die zum einen sicher, das heißt unter stetiger Gewährleistung der Versorgungssicherheit im Erdgasnetz, entfernt werden können und zum anderen zweckmäßig im Wasserstoffnetz bereitgestellt werden können. Die veränderten Gaseigenschaften von Wasserstoff gegenüber Erdgas machen auch eine Prüfung, und gegebenenfalls Anpassung, der bestehenden Gasnetzkomponenten und der anzuwendenden Sicherheitsmaßnahmen notwendig. Daher soll in den folgenden Abschnitten kurz auf die Eignung bestehender Systeme und Komponenten eingegangen werden.

2.2.4.1. Materialeignung

Das Thema Materialeignung befasst sich primär mit der sogenannten Wasserstoffversprödung und ihrer Auswirkung auf Pipelinestähle. Tatsächlich ist das Problem der Wasserstoffversprödung in seinen facettenreichen Formen, aufgrund seiner Verbreitung in der Öl- und Gasindustrie, aber auch in der Elektrochemie, schon lange bekannt, mit ersten Arbeiten ab dem Jahr 1874 [25]. Dabei ist der Begriff der Wasserstoffversprödung nicht immer klar abgegrenzt und ist eher als Sammelbegriff für unterschiedliche Phänomene zu sehen, die sich in Wasserstoff-induzierten, charakteristischen Schadensbildern widerspiegeln und gemeinsam haben, dass sie die Duktilität und Festigkeit des metallischen Werkstoffs herab-, und die Risswachstumsgeschwindigkeit unter schwingender Beanspruchung heraufsetzen. In extremen Fällen kommt es zu einem verzögerten, katastrophalen Bauteilversagen unter niedriger bis zu keiner Beanspruchung[10]. Das Verhalten ist als eine Systemeigenschaft aus Wasserstoff, Material und Belastungszustand zu verstehen [27] (siehe auch DIN 50969-1) und dementsprechend facettenreich.

[10] wie im historischen Fall der sogenannten Liberty-Schiffe zur Zeit des 2. Weltkriegs, die an Schweißnähten auseinanderbrachen [26].

Für die Bewertung von Bestandspipelines besteht die Aufgabe darin, für das spezielle System, relevante Mechanismen zu identifizieren und zu prüfen. Dabei können Aspekte, die für Bestandsleitungen im Betrieb mit Erdgas sowieso schon Anwendung finden, außenvor gelassen werden.

Da das Thema über diese Arbeit hinaus geht, werden an dieser Stelle ein paar Literaturhinweise, für den interessierten Leser gegeben, um den Einstieg in das Thema zu erleichtern. Ein ausgezeichnetes und recht vollumfängliches Review[11] und fortführende Referenzen finden sich bei [28]. Reviews mit einem stärkeren Fokus auf Mechanismen finden sich bei [27], [29]. [26] gibt Auskunft über die historische Entwicklung der Schadensmechanismen der reversiblen Wasserstoffversprödung, zusammen mit assoziierten experimentellen Meilensteinen, kategorisiert nach Dekohäsions- und Scherlokalisierungsmodellen. Grundlegende Arbeiten zu den am weitesten akzeptierten dieser Schadensmechanismen/-modelle finden sich bei [30] (HEDE), [31], [32] (HELP) und [33] (AIDE). Überblicke über Messmethoden zur Bestimmung der Wasserstoffkonzentration in Metallen und seiner Permeation durch Metalle finden sich unter anderem bei [28], [34]. Der Einfluss von metallurgischen Variablen auf die Wasserstoffversprödung von sehr unterschiedlichen Metallen wird in [35] thematisiert. Einflüsse der Mikrostruktur beziehungsweise des Gefüges werden auch bei [28] diskutiert und [36] gibt unter anderem ein tabellarisches Material-Screening, hinsichtlich der Anfälligkeit konkreter Metalle für Wasserstoffversprödung. [37] und [38], [39] thematisieren die Bruchmechanik und Modellierung des Risswachstums unter Wasserstoffatmosphäre und präsentieren ein semiempirisches Modell zur Anpassung der ASME B31.12 Richtlinie. Detaillierte Ausführungen, zu fast allen Aspekten der Wasserstoffversprödung durch eine Gasphase, finden sich in [40], [41]. Einen Einblick in die Adsorption von Wasserstoff an Metalloberflächen im Speziellen, verleiht [42]. Allgemeinere Hintergründe zu Adsorptionsvorgängen finden sich beispielsweise in [43]. [44] erklärt Hintergründe der Pipeline-Technologieentwicklung über die Jahrzehnte des letzten Jahrhunderts. Relevante Richtlinien in Bezug auf Wasserstoffpipelinesysteme sind die ASME B31.12, ASME BPVC, DVGW G 409 (verweist zurzeit auf ASME B31.12) und die EIGA IGC Doc 121/14. Pipelinestahl-Spezifikationen entsprechen üblicherweise der Norm API 5L und dem europäischen/internationalen Äquivalent EN ISO 3183. Korrosionsrichtlinien finden sich in den Association for Materials Protection and Performance (AMPP) Standards (ehemals NACE International). Die konkrete Eignungsprüfung beziehungsweise Umstellung einer Bestandspipeline[12] auf Wasserstoff im Rahmen eines Pilotprojekts von Gasunie wird in [45] beschrieben. Anhaltspunkt zur Materialprüfung von Bestandspipelines gibt auch [46].

Grundlagen

Abbildung 2.2.4.1 fasst den Zusammenhang zwischen Wasserstoff-Herkunft, Versprödungsmechanismen und resultierenden Schadensphänomenen zusammen. Ganz oben steht die Herkunft des Wasserstoffs, die in die Kategorien Absorption aus der Atmosphäre, Anwesenheit H_2-erzeugender Stoffe und elektrochemischer Reaktionen, und Einbringung bei der Fertigung unterschieden werden können [28]. Man kann auch nach im

[11] Das Review hat einen leichten Fokus auf korrosionsbedingte Wasserstoffversprödung.

[12] Stahlsorten: St.E415.7 TM/L415/X60M.

Betrieb erworbenem[13] und aus der Fertigung mitgebrachtem Wasserstoff unterscheiden. Das Novum stellt hier die Absorption aus einer Hochdruck-Atmosphäre im Betrieb dar und ist daher grün hinterlegt.

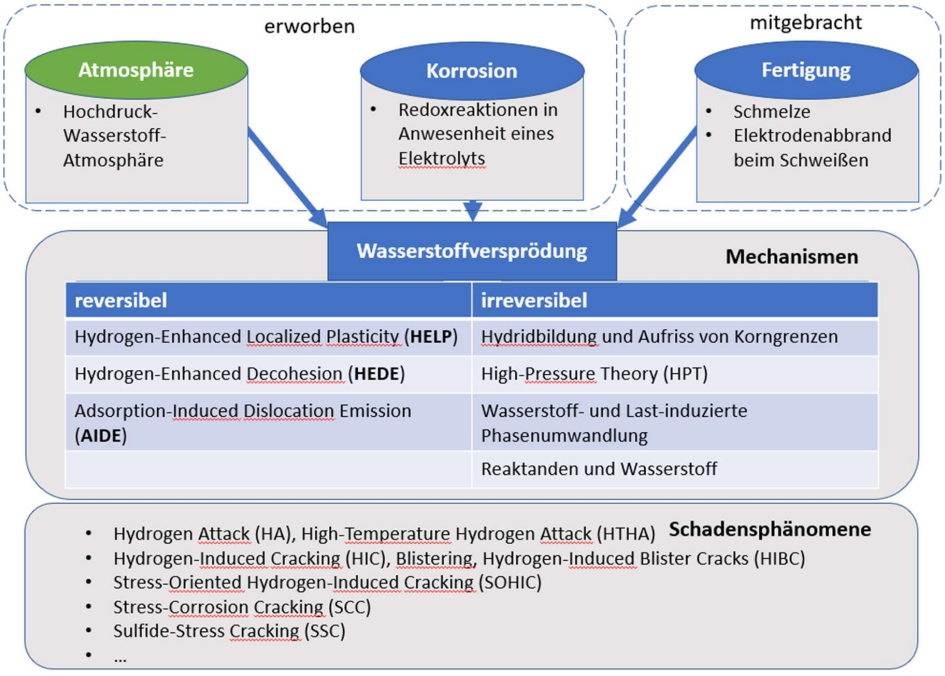


Abbildung 2.2.4.1: Eigene Darstellung: Übersicht zur Wasserstoffversprödung, von der Herkunft (oben) über die unterliegenden Mechanismen (Mitte) zu den zutage tretenden Schadensphänomenen (unten).

Absorption aus einer Wasserstoff-haltigen Atmosphäre geschieht in einem mehrschrittigen Prozess (siehe Abbildung 2.3).

[13] im Englischen auch: Hydrogen Environment Embrittlement (HEE)

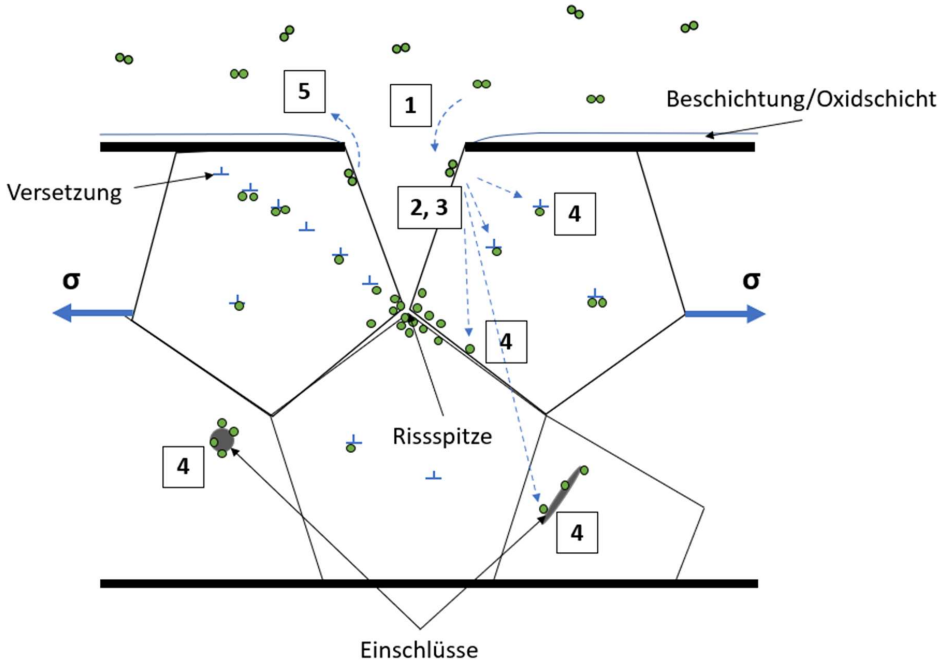


Abbildung 2.2.4.2: Eigene Darstellung in Anlehnung an [28]: Interaktion zwischen Wasserstoff und metallischer Oberfläche. (1): Physisorption aus der Gasphase an die oxid-freie, metallische Oberfläche. (2): Chemisorption einer Monolage. (3): Dissoziation zu atomarem Wasserstoff. (4): Diffusion des atomaren H^+ durch das Metallgitter und Trapping an energetisch günstigen Stellen (Versetzungen, Einschlüsse, Korngrenzen). (5): Rekombination von atomarem H^+ zu H_2 und Desorption.

Wasserstoff aus der Gasphase trifft auf die Metalloberfläche. Hier kann der Wasserstoff physisorbieren (1), und an oxidfreien metallischen Oberflächen chemisorbieren (2)[14]. Die chemisorbierten Moleküle können zu atomarem Wasserstoff, H^+ (Protonen), dissoziieren (3), wenn, im Sinne der Molekülorbitaltheorie, die antibindenden Orbitale des H_2-Moleküls, durch Elektronen des Metalls, besetzt werden [42]. Die so freigewordenen H^+ können durch das Metallgitter wandern und an energetisch günstigen Stellen[15], wie Versetzungen, Fehlstellen, Einschlüssen und Korngrenzen gebunden werden, aber auch mit Sekundärelementen irreversibel reagieren (irreversible Versprödung) (4) [43], [47] oder an inneren Oberflächen zu molekularem Wasserstoff rekombinieren. Mobiler Wasserstoff, der nicht in energetisch tiefen Traps gefangen ist, kann durch das Metallgitter wandern und auch wieder desorbieren (5). Es kann also nur atomarer Wasserstoff in das Metall eindringen. In der Mitte von Abbildung 2.2.4.1 finden sich die am weitesten akzeptierten Mechanismen der reversiblen und irreversiblen Wasserstoffversprödung[16]. Die irreversible

[14] Ausführungen zu Physisorption und Chemisorption finden sich zum Beispiel bei [43].

[15] sogenannte “Traps“, zu Deutsch: Fallen.

[16] Tatsächlich ist in vielen Schriftsätzen unter Wasserstoffversprödung gerade die reversible Wasserstoffversprödung gemeint [47].

Wasserstoffversprödung wird dadurch charakterisiert, dass sie dem Metallgitter und -gefüge schweren Schaden verursacht, der durch eine Entfernung des Wasserstoffs aus dem Material nicht umkehrbar ist. Auf der irreversiblen Seite findet sich die Bildung weicher Hydride und anderer intermetallischer Phasen aus Legierungselementen mit Wasserstoff und die damit verbundene direkte Materialschädigung oder Materialschwächung. Darüber hinaus kann bei austenitischen Stählen, unter Belastung eine Phasenumwandlung zu sogenanntem Verformungsmartensit stattfinden. Austenite gelten als sehr Wasserstoff-beständig, während das Gegenteil für Martensite der Fall ist [36]. Die High-Pressure Theory liegt auf der Grenze zwischen reversibel und irreversibel. Sie besagt, dass eine hohe Wasserstoffbeladung im Stahl zu sehr hohen Fugazitäten in Mikrohohlräumen führen kann, die, unter dem inneren Druck des dort rekombinierenden H_2, aufreißen können und damit zur Rissinitiierung führen. Auf der reversiblen Seite stehen Effekte, die mit der Entfernung des Wasserstoffs aus dem Stahl verschwinden. Diese Effekte beeinflussen die Bruchmechanik auf Gitterebene, durch Wechselwirkungen des Wasserstoffs mit der Versetzungsbewegung im Metallgitter, vgl. Abbildung 2.2.4.2. Besonders kritisch sind hier Orte an denen Spannungsspitzen auftreten, wie zum Beispiel Rissspitzen. Hier sammelt sich Wasserstoff bevorzugt an. Die HELP-Theorie besagt, dass Wasserstoff die Mobilität von Versetzungen an Rissspitzen erhöht und damit die festigkeitserhöhenden Eigenschaften durch blockierte oder aufgestaute Versetzungen reduziert. Die HEDE-Theorie hingegen besagt, dass die Bindungskräfte zwischen den Eisenatomen des Metallgitters, in der Gegenwart von atomarem Wasserstoff, abnehmen. Gemäß der AIDE-Theorie führt adsorbierter Wasserstoff zu einer Reduktion der Bindungskräfte an der Metalloberfläche, die die Versetzungserzeugung und -bewegung vereinfacht. Während diese Mechanismen weite Akzeptanz gefunden haben, sind sie nach wie vor Gegenstand wissenschaftlichen Diskurses [48]. In der Anwendung ist jedoch selten die Rede von den Mechanismen, sondern eher von dem, was in Abbildung 2.2.4.1 als Schadensphänomene bezeichnet wird.

Pipeline-Material

Bei Pipelinestählen für den Gastransport handelt es sich in der Regel um so genannte HSLA- oder auch hoch-feste, mikrolegierte Kohlenstoffstähle mit einem geringen Kohlenstoffgehalt (nach API 5L oder EN ISO 3183), die ursprünglich in den 1970-er Jahren für die Automobilindustrie entwickelt wurden [49], [50]. Dabei ist die Angabe hoch-fest eher in Relation zu anderen niedriglegierten Stählen zu sehen, und als Kontrastierung des niedrigen Legierungsgehalts zur erzielbaren Festigkeit, da die Festigkeit auf einer absoluten Skala eher im mittleren bis unteren Bereich angesiedelt ist. Tatsächlich erlaubt die EIGA-Richtlinie [49] zurzeit lediglich mikrolegierte Stähle der Festigkeitsklasse X42 und X52 und empfiehlt auch sonst eine maximale Zugfestigkeit von 800 MPa und betont, dass ein Austausch niederfester durch höherfeste Stähle keine Verbesserung darstelle. Dies steht im Kontrast zu den immer höheren Festigkeiten der Pipelinestähle mit denen Hersteller werben. Die mikrolegierten Stähle erhalten ihre Festigkeit durch Ausscheidungshärtung und eine Korngrößenverfeinerung, durch thermo-mechanische Bearbeitung[17] [50]. Gleichzeitig verfügen sie, aufgrund der niedrigen Legierung, über gute Schweißeigenschaften und, eine hohe Zähigkeit. Ihre Gefügestruktur ist in der Regel

[17] zum Beispiel normalisierendes Walzen

ferritisch-perlitisch. Ältere Pipelinestähle sind gesondert zu betrachten. Typischerweise sind sie, nominell, niederfester als X52 und dadurch zäher, was sich positiv auf ihre Wasserstoffverträglichkeit auswirkt. Gleichzeitig kann ihre Zusammensetzung und Mikrostruktur deutlich abweichen, was bei einer Umstellung unbedingt zu beachten ist[18]. Ebenso ist zu beachten, dass auch eine Festigkeitsklasse von X52 lediglich eine Mindestanforderung darstellt und Stähle variieren können [46].

Offensichtlich ist die Charakterisierung durch eine Festigkeitsklasse nicht ausreichend. Gerade bei Korrosionsvorgängen kommt es auch auf die Zusammensetzung und Mikrostruktur, sowie die geeignete Überwachung des Pipelinezustandes an [28].

Beurteilung

In Anbetracht der Fülle an Einflussfaktoren auf die Wasserstoffversprödung ist zunächst genau festzustellen, welches Material in den umzustellenden Pipelines verbaut ist. Die ASME B31.12 Richtlinie schlägt hier mindestens eine Probennahme zur destruktiven Untersuchung pro Meile Länge der Pipeline [46] vor. Darüber hinaus müssen auch Armaturenstähle, zum Beispiel in Sicherheitsventilen, geprüft werden. Diese können aus anderen Legierungen bestehen oder andere metallische Komponenten enthalten, die Wasserstoff-ungeeignet sind, wie zum Beispiel martensitische Federstähle. Diese Art der Prüfung ist hoch ineffizient. Daher schlägt [46] vor, mittels Inline-Prüfung, die lokalen Eigenschaften des Materials zu bestimmen und, mithilfe dessen, Pipeline-Chargen, sowie Ausreißer, zu identifizieren. Somit wäre lediglich eine Probennahme pro Charge nötig und 100% der Pipelinelänge könnten getestet werden. Eine Bewertung welche Schadensphänomene relevant und zu prüfen sind, gibt die Umstellung einer Pipeline von Gasunie im Rahmen eines Pilotprojekts [45]. Die AutorInnen führen Hydrogen-Induced Cracking (HIC), High-Temperature Hydrogen Attack (HTHA) und Cold Cracking als potenziell relevante Schadensphänomene an. HIC bezeichnet die Rekombination von atomarem Wasserstoff zu molekularem Wasserstoff im Metallgitter oder Hohlräumen. Die AutorInnen argumentieren, dass die für das Auftreten von HIC nötige Wasserstoffbeladung im Bereich 50 – 500 ppm (atomar) liegen müsste, jedoch ein Druck von 101 bar lediglich zu einer Beladung von 0.5 führe. Bei höheren Temperaturen (> 200 °C) kann der mobile Wasserstoff im Metall mit gelösten Eisenkarbiden reagieren und dabei Eisen und Methan bilden, man spricht von HA oder HTHA. Da das Methan nicht im Eisen löslich ist, lagert es sich primär an Korngrenzen an und induziert so die Bildung von Mikrorissen. Gleichzeitig gehen, durch die Reaktion, festigkeitssteigernde Eisenkarbide verloren [47]. Solch hohe Temperaturen sollen jedoch im Normalbetrieb nicht auftreten[19] [45]. Cold Cracking meint den Wasserstoffeintrag durch Elektrodenabbrand beim Schweißen (vgl. Abbildung 2.2.4.1), gefolgt von Rissbildung beim Abkühlen. Dies ist kein neues Problem und sollte durch die Auswahl eines geeigneten Schweißverfahrens und einer geeigneten Wärmebehandlung handhabbar sein. Hydridbildung und weitere reaktionsbedingte Versprödungsmechanismen benötigen meist höhere Temperaturen [47]. Nimmt man hinzu, dass die HSLA-Stähle, zumindest nominell, sehr geringe Anteile an potenziell Hydrid

[18] Ein Beispiel ist die Bildung von Gefügebändern in Walzrichtung.

[19] In der Literatur findet man dazu die sogenannten Nelson-Kurven dokumentiert (siehe auch API RP 941) [45].

bildenden Legierungselementen enthalten, lässt die Einschätzung zu, dass diese keine Rolle spielen sollten. Folglich liegt der Fokus auf den Mechanismen der reversiblen Versprödung (bei niedrigen Temperaturen) und ihrer Wechselwirkung mit der Bruchmechanik. Die AutorInnen von [45] zeigen, dass die reversible Versprödung zu einer reduzierten Bruchzähigkeit und Bruchdehnung, sowie einem früher ansetzenden und schneller fortschreitenden Ermüdungsrisswachstum führt. Auch [38], [39] und [37] zeigen, dass ein negativer Einfluss auf das Ermüdungsrisswachstum durch Wasserstoff nicht von der Hand zu weisen ist. Gleichzeitig kann das Verhalten modelliert werden [37] und Grenzwerte für den zyklischen Spannungsintensitätsfaktor ausgewiesen werden, unterhalb dessen kein signifikantes Risswachstum zu erwarten ist [45]. Was an dieser Stelle jedoch zu prüfen bleibt, ist, ob die für den Betriebsfall notwendigen Spannungsamplituden, und damit Spannungsintensitätsfaktoren, in diesen Bereich fallen. Hier können frühzeitige, computergestützte Netzanalysen helfen, Lastprofile zu erstellen, die mit Ermüdungsrisswachstumsanalysen verglichen werden können. [45] gehen nämlich lediglich von einer maximalen Druckschwankung von 5 bar (61,2 bar - 66,2 bar) aus. Dies erscheint sehr konservativ. Zusammenfassend kann die Materialeignung vorsichtig positiv bewertet werden. Relevante Effekte können identifiziert und modelliert werden. Gleichzeitig bedarf es auch der Untersuchung von Armaturenwerkstoffen, sowie Erfahrungswerte aus der Praxis. Ein intensives Monitoring, insbesondere in den Anfangsphasen des Betriebs, erscheint empfehlenswert.

2.2.4.2. Komponenteneignung

Im Rahmen der Materialeignung wurde im Wesentlichen bereits auf die Eignung von Pipelines eingegangen. Ein paar weitere Aspekte sind dennoch offen oder auch zu nennen. Während darauf hingewiesen wurde, dass Wasserstoff lediglich an einer oxidfreien Metalloberfläche dissoziieren und in das Metallgitter eindiffundieren kann, konnte der Literatur nicht entnommen werden, ob Pipelines mit Innenbeschichtungen zur Reduktion der Rohrreibung (Flow-Beschichtung) auch eine solche Oxidschicht unter der Flow-Beschichtung aufweisen. Gerade im Anfangsstadium der Netzerprobung wird erhöhter Molchungsbedarf und Monitoring des Pipelinezustands aller Leitungen notwendig sein. In Anbetracht der Risswachstumsuntersuchungen ist zu erwarten, dass auch dem Monitoring der Lastwechselhistorie einer Pipeline in Zukunft mehr Bedeutung zukommen wird, um Wartungsarbeiten und Molchungen zielgerichtet einsetzen zu können. Ein Thema, das auch mehr dem praktischen Betrieb entlehnt ist, ist das Thema Hot-Tapping, das heißt das Anzapfen einer Pipeline im laufenden Betrieb, um beispielsweise ein neues T-Stück für eine abzweigende Leitung anzubringen oder Pipelinesegmente auszutauschen. Dieses Verfahren ist für Erdgasleitungen Standard. Für das Medium Wasserstoff birgt dies jedoch ein erhöhtes Gefahrenpotential. Daher empfiehlt [51] stets erst alle alternativen Optionen zu prüfen. Darüber hinaus wird empfohlen ein Programm zur Wärmeflussanalyse zu nutzen, um den Fluss und die Schweißparameter für den Hot-Tap zu analysieren. Der Leitungsdruck soll möglichst reduziert werden, der Fluss soll jedoch aufrechterhalten werden, da er dem Wärmeabtransport auf der Innenseite der Leitung dient. Außerdem werden einige Empfehlungen ausgesprochen, wann kein Hot-Tap durchgeführt werden sollte. Diese sind in Tabelle 2.2.4.1 dargelegt.

Tabelle 2.2.4.1: Kriterien, wann Hot-Tapping von Wasserstoffleitungen vermieden werden sollte (gemäß AIGA [51]).

Vermeidungskriterien für Hot-Tapping
Wanddicke < 6,4 mm (0,250”)
Stähle mit Streckgrenze > 360 MPa (X52)
bei Betriebstemperatur ≥ 121 °C
bei Umgebungstemperatur < 0 °C
bei Betriebsdruck > 6,2 MPa
bei einer Pipelinehärte > 225 BHN (Brinnell)
bei Abständen zum nächsten Schweißflansch < 46 cm
bei Abständen zur nächsten Umfangsschweißnaht < 7,6 cm
bei interner Pipelinebeschichtung
falls sich der Ort stromaufwärts von rotierenden Komponenten ohne Filter oder Abscheider befindet.

Es ist auch darauf hinzuweisen, dass gerade solche Bearbeitungsschritte zwangsläufig freie metallische Oberflächen hinterlassen.

Immer wieder diskutiert wird auch die Frage nach den zulässigen Fließgeschwindigkeiten von Wasserstoff in Pipelines im Vergleich zu Erdgas. Dahinter steckt letztendlich die Frage nach der Übertragbarkeit gleicher Energiemengen bei der Umstellung des Fluids von Erdgas auf Wasserstoff, aber auch Erwägungen hinsichtlich der Lärmbelästigung und des Verschleißes. Die unterschiedlichen Stoffeigenschaften von Wasserstoff im Vergleich zu Erdgas, insbesondere die wesentlich geringere Dichte, sorgen hier trotz einer höheren massenspezifischen Energiedichte (Heiz-/Brennwert) des Wasserstoffs unweigerlich zu höheren Fließgeschwindigkeiten bei Übertragung gleicher Energiemengen durch die Gase. Es stellt sich daher die Frage, auf welcher physikalischen oder auch sicherheitstechnischen Grundlage die entsprechenden Oberschranken beziehungsweise Richtwerte für die Fließgeschwindigkeiten in bestehenden Erdgaspipelines und -armaturen beruhen, um daraus etwaige Kapazitätseinbußen im Betrieb, beim Wechsel des Fluids, quantifizieren zu können. Im Zweifelsfall könnten Kapazitätseinbußen kapitalintensive Ausbaumaßnahmen nach sich ziehen. Die Abhandlung [52] setzt sich genau mit diesem Thema auseinander - der analytischen Berechnung von zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten in Gasleitungen und soll an dieser Stelle aufgegriffen werden. Dabei verweist der Autor auf Fachliteratur und Regelwerke (u.a. [13], [22]), wo konkrete Angaben über zulässige Strömungsgeschwindigkeiten gemacht werden. Hier wird entweder nicht hinreichend begründet oder auf Möglichkeiten erhöhter Geräuschentwicklung und Erosion, sowie die Notwendigkeit strömungsabhängige Pulsationsrechnungen zu machen verwiesen. [52] schlussfolgert, dass es sich bei den genannten Werten keineswegs um harte physikalische Grenzen handelt, sondern mehr um Richtwerte, die der Erfahrung und dem Netzbetrieb entspringen [13]. Hier ist die Rede von Grenzgeschwindigkeiten von 10 m/s für die Auslegung und 20 m/s für den Betrieb, wobei diese Schranke im Betrieb durchaus

überschritten werden kann. Hintergrund für diese Unterscheidung ist eine historisch konservative Auslegung der Pipelines, die mittlerweile dank verbesserter Modelle und numerischer Methoden dynamischer genutzt werden können. In Abwesenheit harter physikalischer Schranken betrachtet [52] drei Phänomene: Den Mitriss von Staubpartikeln (Rost/Verunreinigungen), den Mitriss von Tropfen ($C_{14}H_{30}$, Wasser), und den Einfluss der durch das Gas auf die Leitung ausgeübten Wandschubspannung. Dabei wird final letztere als ausschlaggebendes Kriterium vorgeschlagen [52].

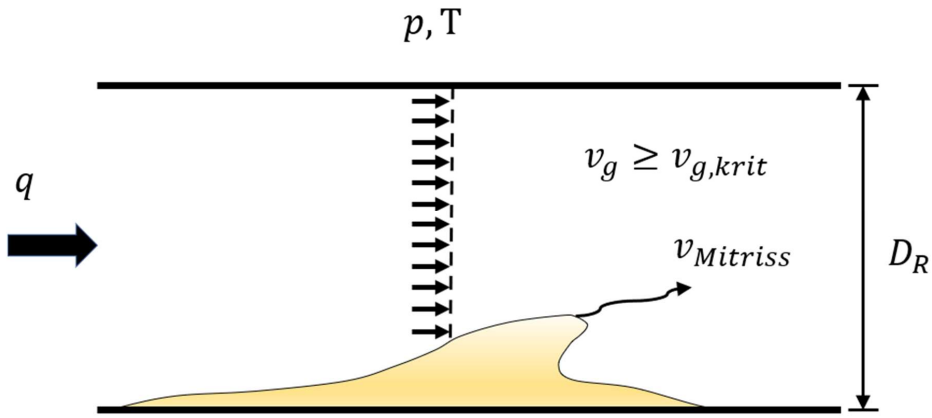


Abbildung 2.2.4.3: Eigene Darstellung nach [52]: Mitriss von Staubpartikeln und Flüssigkeitstropfen. q: Fluss, p: Druck, T: Temperatur, v_g: Gasgeschwindigkeit, $v_{g,krit}$: kritische Gasgeschwindigkeit für den Mitriss, $v_{Mitriss}$: Partikel-/Tropfengeschwindigkeit

Zur Analyse des Staubmitriss wird als Sekundärverweis auf empirische Daten[20] verwiesen. Hier wurden die Einflussgrößen Korngröße und Transportdruck variiert und die resultierende Aufwirbelungsgeschwindigkeit und Transportgeschwindigkeit erfasst. Zum einen ist die Aufwirbelungsgeschwindigkeit fast doppelt so hoch wie die Transportgeschwindigkeit, wobei größere Partikel höhere Gasgeschwindigkeiten erfordern und höhere Drücke niedrigere. Zum anderen sind sowohl Aufwirbelungsgeschwindigkeit als auch Transportgeschwindigkeit deutlich kleiner als die maximale Fließgeschwindigkeit von 20 m/s. Die empirischen Zusammenhänge motivieren einen gesetzmäßigen Zusammenhang in der Form

$$v_{G,krit.} \sim \frac{1}{\sqrt{\rho_G}}. \qquad \textit{Gl. 2.2}$$

Zur analytischen Berechnung wird eine empirische Gleichung für die sogenannte Pickup-Geschwindigkeit aus dem Bereich des pneumatischen Transports herangezogen (*Gl. 2.3* [53]).

[20] „Bolzinger, A.: On the Entrainment of Dust in Transmission and Distribution Pipelines. In: Institution of Gas Engineers, Journal, 1971, Band 11“, bzw. „Bolzinger, A.: Gaz d‘ Aufourd’hui, Jan. 1971, 95 (1), 3-17“ (Arbeit wurde nicht gefunden)

$$v_{G,pu} = \left[0,0428\left(\frac{d_{S,50}\rho_G}{\eta_G}\right)^{0,175}\left(\frac{D_R}{d_{S,50}}\right)^{0,25}\left(\frac{\rho_P}{\rho_G}\right)^{0,75}\sqrt{g d_{S,50}}\right]^{\frac{1}{0,825}}. \qquad \textit{Gl. 2.3}$$

Hier steht ρ für die jeweilige Dichte von Gas und Partikel, D_R für den Rohrdurchmesser, η_G für die dynamische Viskosität des Gases, und $d_{S,50}$ für den Medianwert der Korngrößenverteilung. Mit Hilfe dieser Gleichung werden die Pickup-Geschwindigkeiten für Erdgas und Wasserstoff berechnet. Die sich ergebenden Werte für Erdgas, bei einer Partikeldichte von 3.600 kg/m^3 liegen in einer vergleichbaren Größenordnung wie die Aufwirbelungsgeschwindigkeiten in den empirischen Daten[21]. Hieraus wird geschlussfolgert, dass die Gleichung für das betrachtete Problem anwendbar ist und die Werte für Wasserstoff repräsentativ sind. Diese sind etwa dreimal so hoch wie für Erdgas, für die im Hochdrucknetz üblichen Bedingungen allerdings immer noch deutlich niedriger als die Grenzgeschwindigkeit von 20 m/s. Für die Aufwirbelungsgeschwindigkeit ergeben sich hier Werte von 0,3 bis 0,9 m/s bei 70 bar und Korngrößen im Bereich > 20 µm bis > 200 µm. Für die Pickup-Geschwindigkeiten ergeben sich analog 1,3 bis 4,4 m/s. Analoge Überlegungen können für den Mitriss von Tropfen einer Flüssigkeitslache in der Gasleitung angestellt werden. Eine entsprechende Gleichung für die kritische Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Dichten, Erdbeschleunigung g und Oberflächenspannung der Flüssigkeit σ_L, wird hier [54], [55] entnommen (*Gl. 2.4*).

$$v_{Gas,krit.} = \sqrt{\frac{4g\sigma_L(\rho_L - \rho_G)}{\rho_G^2}}\sqrt{\frac{(\rho_L + \rho_G)}{\rho_L}}. \qquad \textit{Gl. 2.4}$$

Der Vergleich ergibt qualitativ einen ähnlichen Zusammenhang wie der für den Mitriss von Staub und Partikeln. Da die kritischen Werte für diese beiden Phänomene deutlich unter den Referenzen von 10-20 m/s liegen, wird geschlussfolgert, dass diese nicht maßgeblich für die Referenzgeschwindigkeiten sein können. Daher schlägt [52] vor die, im Betrieb, durch das Gas auf die Gasleitung ausgeübte Wandschubspannung als Ähnlichkeitsreferenz anzusetzen. Daraus ergibt sich der Zusammenhang (*Gl. 2.5*) für die Wandschubspannung für Erdgas und Wasserstoff.

$$\tau_W = \frac{\lambda}{4}\left(\frac{\rho_G}{2}v_G^2\right) = \frac{\lambda}{4}\left(\frac{\rho_{H_2}}{2}v_{H_2}^2\right) = const. \qquad \textit{Gl. 2.5}$$

Schätzt man die Rohrreibungsbeiwerte $\lambda = \lambda(D, k, Re)$ zur turbulenten Seite im Moody-Diagramm (siehe auch Abbildung 4.1.10.1) ab $Re \to \infty$, so sind die Rohrreibungszahlen unabhängig von der Reynoldszahl Re und damit vom Fluid und müssen gleich sein. Damit vereinfacht sich *Gl. 2.5* zu

$$v_{H_2} = v_G\sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_{H_2}}}. \qquad \textit{Gl. 2.6}$$

[21] „Bolzinger, A.: On the Entrainment of Dust in Transmission and Distribution Pipelines. In: Institution of Gas Engineers, Journal, 1971, Band 11“, bzw. „Bolzinger, A.: Gaz d'Aufourd'hui, Jan. 1971, 95 (1), 3-17“ (Arbeit wurde nicht gefunden)

Durch Einsetzen von Stoffdaten erhält man Geschwindigkeitsverhältnisse v_{H2}/v_G von 2,823 (bei 1 bar) - 3,219 (bei 100 bar). Möchte man die zulässigen Fließgeschwindigkeiten direkt über die Schubspannung charakterisieren, so kann man *Gl. 2.6* so umstellen, dass folgender Zusammenhang gilt:

$$v_{G,zul.} = \sqrt{\frac{8\bar{\tau}_{W,zul.}}{\frac{\lambda}{\rho_G}}} = \frac{C}{\sqrt{\rho_G}}. \qquad \textit{Gl. 2.7}$$

Dies entspricht wiederum dem qualitativen, empirischen Zusammenhang aus *Gl. 2.2*. [52] schlägt hier einen Sicherheitsfaktor von 2 für die Auslegung vor

$$v_{G,max.} \approx \frac{1}{2} v_{G,zul.}. \qquad \textit{Gl. 2.8}$$

Außerdem wird die Einführung einer “design velocity (DV)“, einer “maximum operating velocity (MOV)“ und einer “operating velocity (OV)“ in den einschlägigen Regelwerken vorgeschlagen. Damit kommt der Autor auf die Werte in Tabelle 2.2.4.2 (abgelesen) für reinen Wasserstoff bei 10°C und Sicherheitsfaktor von 2.

Tabelle 2.2.4.2: Anhaltswerte: Maximale Fließgeschwindigkeiten Wasserstoff in Abhängigkeit des Betriebsdrucks.

Druck [bar]	$v_{G,max}$ **[m/s]**
100	35
80	39
50	49
25	68
10	108

Insgesamt erscheint das Vorgehen valide, allerdings werden weder die anfangs genannte Geräuschentwicklung noch der Effekt möglicher Gaspulsation erörtert. Geräuschentwicklung ist ein komplexes Phänomen, das primär auf Strömungsturbulenz zurückzuführen ist und dem entsprechend schwer zu analysieren ist. Neben gleichmäßigen Strömungsgeräuschen über eine Pipeline ist vor allem an Druckregelventilen eine erhöhte Geräuschentwicklung zu erwarten. Pulsationsrechnungen sind insbesondere am Eingang und am Ausgang von Verdrängungsmaschinen, wie Kolbenverdichtern, durchzuführen. Hier kann die zyklische Gasförderung Schwingungen induzieren, aber auch Abzweigungen und Kreuzungspunkte in Gasnetzen können dazu führen. Die API 618 (2007), 7.9 [56] definiert bereits allgemeine Regeln zur Auslegung von schwingungsbelasteten Rohrleitungen im Anschluss an Kolbenverdichter. Unter anderem gibt sie an, dass die Eigenfrequenzen jedes Kompressors oder angeschlossener Komponente mindestens 2,4-fach über der maximalen Drehzahl des Kolbenverdichters liegen soll. Außerdem sollen die vorhergesagten mechanischen Eigenfrequenzen mindestens 20% Abstand von nennenswerten Anregungsfrequenzen haben. Solche Analysen sind folglich Standard und es existieren Einbauten und Elemente, um die entstehenden Schwingungen zu dämpfen. Pulsationsrechnungen sind allerdings mit größeren Unsicherheiten behaftet. Sie können

näherungsweise auf Basis der gedämpften 1D-Wellengleichung berechnet werden [57]. Diese Analysen können dann wiederum, nachgelagert, für eine mechanische Festigkeitsanalyse genutzt werden. Dieses Thema soll hier nicht weiter vertieft werden, wäre jedoch ein interessanter Aufhänger für weiterführende Arbeiten zur gekoppelten Analyse von zyklischer Materialbeanspruchung und Netzbetrieb. Zusammenfassend kann man sagen, dass die Fließgeschwindigkeit an sich eine betrieblich leicht zu extrahierende Kenngröße ist, die allerdings keine direkte physikalische Schranke für den Betrieb darstellt. Auf Basis von Ähnlichkeitsbetrachtungen lässt sich sowohl ein Betrieb von Pipelines mit Wasserstoff bei höheren Fließgeschwindigkeiten motivieren als auch die Notwendigkeit stets technisch-physikalische Grundzusammenhänge zur Konstatierung technisch-normativer Texte anzusetzen. Die Validität dieser Betrachtungen sollte allerdings durch Experimente geprüft werden. Über die Pipelines hinaus sind aktive Netzkomponenten, wie Verdichter, Ventile, aber auch Dichtungen zu betrachten. Materialbetrachtungen finden auch überall Anwendung. Oftmals als einfach austauschbare Komponenten hintenangestellt, sind Ventile in großer Stückzahl in Netzen vorzufinden. Hier finden vielfach unterschiedliche Materialien gleichzeitig Anwendung, sei es aus fertigungstechnischen Gründen oder aus funktionalen, zum Beispiel im Falle einer Materialpaarung für eine Metall-Metall-Dichtung. Dem Autor sind hier keinerlei Untersuchungen bekannt, die sich diesen Komponenten und Materialien widmen.

In Turbomaschinen, wie Turbokompressoren und Gasturbinen, kommen mitunter Spezialwerkstoffe zum Einsatz, deren Eignung auch in Frage steht, allerdings sind hier tendenziell andere Gründe entscheidend. Bestehende Gasturbinen sind mit großer Wahrscheinlichkeit nicht für den Betrieb mit Wasserstoff geeignet. Die hohen Abgastemperaturen bei Gasturbinen können bei unvollständiger Verbrennung materialseitig zu erhöhten Wasserstoff-Diffusionsraten und höheren Wasserstoff-Konzentrationen im Metall führen. Dies kann insbesondere beim Abkühlen nach dem Betrieb zur Rissbildung führen. Die hohe Verbrennungstemperatur führt auch zu einer vermehrten Stickoxidbildung im Abgas und damit verbundenem Aufreinigungsaufwand. Außerdem ist das Abgas deutlich feuchter und kann leichter in der Abgasbehandlung auskondensieren und Korrosion begünstigen. Viel wichtiger jedoch ist das Brennerdesign und der Strömungszustand darin. Da Wasserstoff eine sehr hohe Flammengeschwindigkeit aufweist, muss die Strömungsgeschwindigkeit des Wasserstoff-Luftgemischs deutlich höher sein, was voraussichtlich ein anderes Brennerdesign und damit eine andere Turbine benötigt. Auf Basis des Wirkungsgrades wäre ohnehin ein elektrischer Antrieb der Verdichter vorzuziehen, solange keine Kraft-Wärmekopplung vorliegt.

Die Eignung bestehender Erdgasverdichter wird prominenter diskutiert und soll hier kurz thematisiert werden. Wichtige technische Faktoren für die Auslegung von Gas-Pipeline-Verdichtern sind in Tabelle 2.2.4.3 dargelegt.

Tabelle 2.2.4.3: Technische Faktoren für die Auslegung von Gas-Pipeline-Verdichtern

Faktor	Beschreibung
Gaszusammensetzung	Beeinflusst Korrosion, Materialwahl, Sicherheit und thermodynamische Eigenschaften (klassischerweise z. B. CO_2, H_2S, Wassergehalt).
Durchflussrate/Kapazität	Bestimmt die Größe des Verdichters; berücksichtigt Spitzenlast und zukünftige Erweiterungen.

Druckanforderungen	Einlass- und Auslassdruck definieren das Verdichtungsverhältnis; ggf. mehrstufige Verdichtung erforderlich.
Thermodynamik und Wirkungsgrad	Optimierung von Energieverbrauch und Effizienz; Berücksichtigung der Wärmeentwicklung.
Verdichtertyp	Auswahl zwischen Kreisel-, Kolben- oder Axialverdichter je nach Anwendung, Druck und Volumenstrom.
Antriebssystem	Gasturbine, Elektromotor oder Verbrennungsmotor; abhängig von Standort, Energiequelle und Emissionen.
Materialien und mechanische Auslegung	Auslegung für hohe Drücke und Temperaturen; Beständigkeit gegen Korrosion und Erosion.
Kühlung und Wärmemanagement	Einsatz von Zwischen- und Nachkühlern zur Temperaturkontrolle und Effizienzsteigerung.
Steuerung und Regelung	Regelung von Druck und Durchfluss; Anti-Surge-Systeme und Automatisierung.
Zuverlässigkeit und Wartung	Minimierung von Stillständen durch robuste Auslegung, Redundanz und Zustandsüberwachung.
Sicherheitsaspekte	Notabschaltung (ESD), Gasdetektion, Explosionsschutz und sichere Druckentlastungssysteme.
Umwelt- und regulatorische Anforderungen	Einhaltung von Emissionsgrenzen, Lärmschutz und gesetzlichen Vorgaben.

Bei den aktuell verbauten Verdichtern handelt es sich in den meisten Fällen um Turboverdichter mit mehreren Stufen. Dabei kann jede Stufe den Druck um ein bestimmtes Verdichtungsverhältnis von Ausgangsdruck zu Eingangsdruck erhöhen. Bei Verdichtern dieser Bauart ist die Verdichtungsleistung stark vom zu verdichtenden Gas abhängig. Leichtere Gase lassen sich hier tendenziell schwerer verdichten. Das heißt, dass für bestehende Verdichter das zu erzielende Verdichtungsverhältnis pro Verdichterstufe sinkt. In einem begrenzten Maße ließe sich dieser Gegebenheit durch eine höhere Umlaufgeschwindigkeit des Impellers entgegenwirken. Hier bestehen allerdings Beschränkungen einerseits durch die maximal zulässige Zugspannung im rotierenden Impeller und andererseits durch die Schallgeschwindigkeit des zu verdichtenden Gases. Am Übergang zur Schallgeschwindigkeit können Schockwellen Schwingungen induzieren und das Gasverhalten verändert sich sprunghaft. Demnach dürften für bestehende Verdichter, falls die verbauten Materialien Wasserstoff-verträglich sind, Einschränkungen des Betriebsbereichs zu erwarten sein. Neu einzubauende Turboverdichter müssten voraussichtlich mehr Verdichterstufen in Reihe aufweisen als aktuelle Erdgasverdichter oder man müsste auf Verdrängungsmaschinen, wie Kolbenverdichter, umsteigen. Dabei sind Zentrifugalkompressoren mit mehreren Stufen auf einer Welle durchaus gebräuchlich. In der chemischen Industrie hingegen werden häufiger Kolbenverdichter für Wasserstoff eingesetzt. Auf welche Technologie die Wahl fällt ist eine Einzelfallentscheidung, die die Faktoren in Tabelle 2.2.4.3 nebst wirtschaftlichen Aspekten berücksichtigt und entsprechend den Anforderungen zueinander gewichtet und dabei auch vom zu erwartenden Netzbetrieb abhängt (kontinuierlicher Betrieb oder diskontinuierlich mit längeren Stillstandszeiten).

Ein weiterer interessanter Aspekt im Zusammenhang mit der Verdichtung ist die Umkehr des Joule-Thomson-Effekts beim Wechsel von Erdgas zu Wasserstoff. Formal ist der Joule-Thomson-Koeffizient als die Ableitung der Temperatur nach dem Druck bei konstanter Enthalpie definiert $\mu_{JT} = (\partial T / \partial p)_H$. Er gibt also an, ob sich das Gas bei der Verdichtung aufheizt oder abkühlt. Dabei verhalten sich die Gase meist so, dass sie unterhalb der sogenannten Inversionstemperatur bei der Entspannung abkühlen und darüber sich erwärmen und umgekehrt. Eine starke Temperaturabsenkung kann Messeinrichtungen beeinflussen und zum Auskondensieren von Wasserdampf führen, was wiederum Korrosion begünstigt. Daher gibt es in mehrstufigen Verdichtern zuweilen Zwischenkühlungen und vor manchen Ventilen zur Druckabsenkung Heizelemente. Für Wasserstoff dreht sich der Effekt um, beim Verdichten kühlt sich das Gas ab und bei der Entspannung heizt es sich auf. Dieser Effekt ist allerdings betragsmäßig deutlich weniger ausgeprägt als beim Erdgas und bedarf voraussichtlich keiner besonderen Handhabe [58].

Neben Verdichtern sind auch Messeinrichtungen auszutauschen oder anzupassen [45] und die Dichtheitsklassen bestehender Dichtungen zu prüfen. Zwar sind die Leitungen selbst verschweißt, dennoch existieren gerade in Einrichtungen des Betriebs, wie Verdichterstationen, auch Flanschverbindungen.

Sicherheitsaspekte

Sicherheitsrelevante Informationen und technische Regeln zur Handhabung der Gase Wasserstoff und Erdgas, sowie seinen Komponenten, können aus öffentlich einsehbaren Stoffdatenblättern entnommen werden (siehe [59]). Demnach weisen beide Gase keine direkte Toxizität für Menschen auf und gelten als einfache Stickgase, die in höherer Konzentration Luftsauerstoff aus der Atemluft verdrängen und so zu Sauerstoffmangel- und Erstickungssymptomen führen können. Beide Gase sind geruchlos. Aus diesem Grund müssen gemäß DVGW Arbeitsblatt G 280 2018-12 Gase die den DVGW Arbeitsblättern G 260 und G 262 beziehungsweise den Normen DIN EN 16723-1 und -2 sowie DIN EN 16726 entsprechen, mit denen “über ein Leitungssystem die Allgemeinheit und sicherheitstechnisch vergleichbare Abnehmer versorgt werden“, odoriert werden. Bei der Odorierung werden Gase zugemischt, die in geringer Konzentration einen starken Warngeruch absondern. Die Odorierung kann für manche industriellen Prozess unerwünscht sein. Dies gilt insbesondere auch für Brennstoffzellen, deren Katalysatoren empfindlich auf schwefelhaltige Odoriermittel wie Thiophene und Merkaptan-Gemische reagieren können. Aber auch in Brennwertkesseln können enthaltene Schwefelverbindungen zur Bildung von SO_2 und SO_3 führen, die mit dem Wasserdampf im Abgas zu schwefeliger beziehungsweise Schwefelsäure umgesetzt werden können und korrosiv auf die metallischen Werkstoffe wirken. Daher sind vermehrt Acrylat-basierte Odoriermittel im Einsatz (siehe zum Beispiel [60]). Inwiefern diese auch für den Einsatz mit reinem Wasserstoff geeignet sind, ist unklar.

Im Vergleich zu Erdgas weist Wasserstoff keine klimaschädliche Wirkung auf. Der sicherheitstechnisch gravierendste Unterschied zwischen Wasserstoff und Erdgas liegt in der Reaktivität und der Explosionsgefahr. Die Explosionsgrenzen liegen bei Wasserstoff deutlich weiter auseinander (siehe Tabelle 2.2.4.4).

Tabelle 2.2.4.4: Auszug explosionsgefahrrelevanter Kennwerte für Wasserstoff und Methan (stellvertretend für Erdgas) gemäß [59]. UEG: untere Explosionsgrenze, OEG: obere Explosionsgrenze.

Verbindung	UEG	OEG	Explosionsgruppe
Wasserstoff	4,0 Vol.-% 3,4 g/m³	77 Vol.-% 65 g/m³	IIC
Methan	4,4 Vol.-% 29 g/m³	17 Vol.-% 113 g/m³	IIA

Die Explosionsgruppe kategorisiert dabei die Stoffe u.a. nach der Mindestzündenergie, die benötigt wird, um das zündwilligste Gemisch bei Standardbedingungen zu zünden (IIA: ca. 0,3 mJ, IIB: ca. 0,15 mJ, IIC: < 0,05 mJ). Hier liegt Wasserstoff mindestens eine Größenordnung unter Erdgas und in der gefährlichsten Explosionsgruppe. Bereits sehr kleine statische Entladungen können hier zur Zündung führen. Daher besteht bei hohen Austrittsgeschwindigkeiten Gefahr der Selbstentzündung, auch wenn streng genommen keine tatsächliche Selbstentzündung im Sinne einer spontanen Reaktion stattfindet (auch Hypergolität genannt). Die betriebstechnischen Anpassungen halten sich laut [45] in Grenzen. Letztendlich ist die Handhabung von Wasserstoff kein Novum per se, sondern in einem industriellen Umfeld üblich. Die Herausforderungen in der Sicherheitstechnik bestehen primär im Anpassungsbedarf bestehender Anlagen und der Ausdehnung der Wasserstoffinfrastruktur aus dem industriellen, kontrollierten Umfeld in den öffentlichen Raum und der Einschätzung der damit einhergehenden Risikopotenziale.

Endgeräte und Bestandsanlagen

Während sich diese Arbeit auf das Gasnetz fokussiert, können bei der Eignungsbetrachtung Endgeräte und Bestandsanlagen - das heißt die weitere Nutzung des Wasserstoffs - nicht ganz außer Acht gelassen werden. Wie im Abschnitt 2.1.2 bereits erwähnt, gibt es wichtige Gasbeschaffenheitsparameter, die die Austauschbarkeit von Gasen charakterisieren. Einen gewissen Aufschluss über den Einfluss auf diese Parameter gibt der Bericht [58]. Hier wurde der Einfluss einer Wasserstoffbeimischung zum Erdgas auf Parameter, wie den Wobbe-Index, geprüft. Während der volumetrische Heizwert deutlich sinkt, sinkt auch die relative Dichte, sodass sich der Wobbe-Index tatsächlich nur geringfügig ändert. Die Zündeigenschaften hingegen verändern sich stark. Wie im vorangegangenen Abschnitt bereits erwähnt, ändern sich die Zündgrenzen auf einen weiten Bereich (4-77 Vol.-%). Der stöchiometrische Sauerstoffbedarf geht zurück und damit auch der Luftbedarf. Die laminare Brenngeschwindigkeit von Wasserstoff ist aufgrund der hohen Reaktivität (geringere Aktivierungsenergie) und Diffusivität[22] sehr hoch (max. 3,5 m/s, vgl. Erdgas ca. 0,4 m/s). Die AutorInnen erklären, dass dies auch sicherheitstechnisch relevant ist, da leichter Flammenrückschlag in den Brenner und die Leitung stattfinden kann und der Übergang von Deflagration zu Detonation leichter stattfindet. Während die Zündtemperaturen ähnlich sind, ist die Zündenergie eine Größenordnung kleiner und auch die Zündverzugszeit ist zwei Größenordnungen kleiner. Letztere ist ein Maß für die Neigung zur Selbstzündung. Wie im

[22] Im Sinne der kinetischen Gastheorie weist H_2 gegenüber CH_4 bei gleicher Temperatur eine längere mittlere freie Weglänge auf, da es sich um ein kleineres Molekül handelt, das sich schneller bewegt.

vorherigen Abschnitt bereits erwähnt, ist auch die Zündenergie deutlich kleiner, was eine quasi-Selbstzündung zum Beispieldurch elektrostatische Entladung des menschlichen Körpers möglich macht. Aber es gibt auch positive Einflüsse. Wasserstoff kann bei Zumischung flammenstabilisierend wirken und der geringe Löschabstand, das heißt der Abstand zu einer Wärmesenke, bei der die Verbrennung stoppt, ist geringer, wodurch die Verbrennung in Kolbenmotoren, durch den vollständigeren Zylinderausbrand, verbessert wird. Ein weiterer wichtiger Faktor, der betrachtet wurde, ist die Änderung des Wärmestrahlungsspektrums beim Übergang zu Wasserstoff. Dies ist in einigen Anwendungen, wie der Glasverhüttung sehr wichtig. Es wird angemerkt, dass die Wärmeübertragung bei Wasserstoffverbrennung primär über konvektive Prozesse und weniger über Strahlung stattfindet. Gleichzeitig wird darauf hingewiesen, dass sowohl Experiment als auch Simulation, bei entsprechender Kompensation anderer Änderungen durch den Brennstoffwechsel, keine weitere Beeinträchtigung der Wärmeübertragung festzustellen ist. Es wird auch auf die Flammengeometrie in Form der Länge, des Sitzes relativ zur Brennerdüse und der Temperaturverteilung innerhalb der Flamme eingegangen. Ohne Leistungs- und Luftzahl-Kompensation nimmt hier die Flammenlänge ab und der Sitz der Flamme rückt näher an den Brenner, was die thermische Materialbelastung des Brenners erhöht. Flammenüberwachungsstrategien können nach wie vor mit Ionisationsstrommessungen und optischen Verfahren[23] durchgeführt werden. Ein Gas-Charakteristikum von Wasserstoff gegen über Erdgas bei Raumtemperatur ist auch der negative Joule-Thomson-Effekt, der bei der isenthalpen Entspannung für einen Temperaturanstieg des Wasserstoffs beziehungsweise die Abkühlung des Erdgases sorgt und umgekehrt. Allerdings ist der Effekt, absolut, deutlich weniger ausgeprägt, was sich positiv auf den Kühl- beziehungsweise Heizbedarf an Verdichter- und GDRM-Station auswirken sollte. In [58] wurden auch Feldversuche an einem BHKW mit Leistungs- und Luftzahl-Regelung, sowie an einem Brennwertgerät durchgeführt. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass für das BHKW der thermische und elektrische Nutzungsgrad geringfügig zurückgehen. Gleichzeitig steigen die NO_x-Emissionen durch die sich, durch die Lambda-Regelung einstellende, erhöhte Verbrennungstemperatur. Anders ist dies beim Brennwertgerät, das über keine Lambda-Regelung verfügt. Hier sinkt die Verbrennungs- und die Vorlauftemperatur, aufgrund des sich einstellenden Luftüberschusses. Auch die NO_x-Konzentrationen im Abgas sinken. Aus den Konzentrationsangaben ist allerdings nicht ersichtlich, ob diese alleinig durch die Abgasverdünnung hervorgerufen wird. Aus diesen Betrachtungen lässt sich Schlussfolgern, dass durchaus Anpassungsbedarf in Verbrennungsanlagen und -motoren besteht. Dies war zu erwarten, da diese für einen bestimmten Nutzungsfall entworfen und optimiert wurden. Darüber hinaus besteht auch hier die Notwendigkeit Sicherheitseinrichtungen auf ihre Zulässigkeit zu prüfen.

2.2.4.3. Systemeignung

Fällt die Frage der Komponenteneignung überwiegend positiv aus, so bleibt die Frage der Systemeignung zu beantworten, die sich mit dem zweckmäßigen Einsatz und der zweckmäßigen Verknüpfung der Komponenten untereinander und mit der Umwelt befasst. Kernfragen mit Bezug zur Umstellung auf Wasserstoff sind in Tabelle 2.2.4.5 dargestellt.

[23] Hier ist ein Wechsel der Wellenlänge in den UV-Bereich notwendig.

Tabelle 2.2.4.5: Kernfragen zur Systemeignung von Wasserstoff- und Erdgasnetz im Rahmen der Wasserstoffumstellung.

Nr.	Frage
1	Wo werden Produktion, Nachfrage und Speichermöglichkeiten zukünftig anfallen?
2	Welche Möglichkeiten bestehen Produktion und Nachfrage zu verknüpfen?
3	Gibt es Pipelines, die man umstellen kann, um diese Orte zu verknüpfen oder sollen neue Pipelines gebaut werden?
4	Welche Pipelines können und sollen, wann, umgestellt werden? (Raum- und Zeitaspekt)
5	Was sind die Kosten und Kostentreiber bei der Umstellung?
6	Kann das alte System (Erdgas) und das neue System (Wasserstoff), unter Gewährleistung der Versorgungssicherheit, betrieben werden?
7	Was braucht es zur Beantwortung der Fragen 1-6?
8	Welche der Fragen kann ich beantworten?

Zu Beginn dieser Arbeit war der NEP-Gas 2020 noch nicht veröffentlicht. Gleichzeitig wurde die Umstellung von Bestandsleitungen des Erdgasnetzes für Wasserstoff bereits diskutiert. Die erste Frage, die sich folglich stellt, ist die, wo Produktion, Nachfrage und Speichermöglichkeiten für Wasserstoff zukünftig anfallen (Frage 1). Sind diese Orte identifiziert, so muss geklärt werden, ob und, wenn ja, wie diese Anlagen zweckmäßig verknüpft werden können (Frage 2). Im Rahmen dessen können möglicherweise auch Pipelines identifiziert werden, die, unter stetiger Garantie der Versorgungssicherheit, aus dem Erdgasnetz für ein neues Wasserstoffnetz bereitgestellt werden können. Diese Frage hat sowohl einen Raum-Aspekt als auch einen Zeit-Aspekt, einen Erdgasnetz-Aspekt und einen Wasserstoffnetz-Aspekt. Räumlich: Wo werden die Pipelines benötigt? Gibt es Bestandsleitungen die nach einem bestimmten Abstandsmaß “in der Nähe“ liegen und dafür in Frage kommen? (Wie) Sollen Kandidatenpipelines und Neubauleitungen zu einem zusammenhängenden Netz verbunden werden? Zeitlich: Wann können, oder sollen, welche Pipelines zweckmäßigerweise umgestellt werden (Frage 4)? Welche Kosten Fallen beim Netzaus- und -umbau an (Frage 5)? Wie verändert sich das daraus resultierende Netzverhalten im Wasserstoffnetz und wie im Erdgasnetz (Frage 6)? Entstehen Engpässe in einem der Netze? Zur Beantwortung dieser Fragen benötigt man insbesondere zwei Dinge: Die Fähigkeit Lastflussberechnungen für ein Wasserstoff- und ein Erdgasnetz durchführen zu können und dazugehörige Daten zur Netztopologie und zu historischen oder typischen Lastfällen. Aus akademischer Sicht ließen sich hier sicherlich interessante Multilevel-Optimierungsprobleme zur direkten Beantwortung einzelner Fragen aufstellen. Praktisch gesehen erscheinen diese Probleme mit heutigen Ressourcen und Algorithmen, für realistische Größenskalen, nicht zu lösen zu sein, da in solchen Problemen die ohnehin schon schwer zu lösenden Transportprobleme als Subprobleme gelöst werden müssen. Darüber hinaus wurde bereits beim Thema Stakeholder festgestellt, dass die Datenhoheit für Netz- und Lastfälle bei der Industrie und den Netzbetreibern liegt und im Allgemeinen nicht der Öffentlichkeit zugänglich ist. Hinzu kommt, dass, mit der Veröffentlichung der

Grüngasvariante des NEP-Gas 2020, erste Umstellungsmaßnahmen zum initialen Wasserstoffnetz veröffentlicht wurden, die den Fokus neu setzen. Die Grüngasvariante beantwortet Fragen 1-5 aus der Sicht der Experten und Inhaber der Datenhoheit. Wie lässt sich hier also ein Mehrwert schaffen? Das komplexe Flussverhalten von Gasen, in Kombination mit dem konzeptionellen Charakter der antizipierten Netztopologie und der Fülle an Projektpartnern, erschwert eine frühzeitige Betrachtung möglicher Betriebsszenarien des initialen Wasserstoffnetzes. Die im Rahmen des NEP-Gas 2020 ausgewiesenen Maßnahmen, in Verbindung mit angepassten, physikalischen Modellen, ermöglichen jedoch eine solche frühzeitig Bewertung, die im Rahmen dieser Arbeit vorgenommen wird.

Nachdem in den letzten Abschnitten die Eignung bestehender Systeme beleuchtet und motiviert wurde, dass in vielen Bereichen die Netzmodellierung hilfreich ist, soll im Folgenden der Stand der Gasnetzmodellierung und der dazugehörigen Daten dargelegt werden, der dann die Grundlage für die Modellsynthese und -darstellung in Kapitel 4 bildet.

2.3. Stand der Gasnetzmodellierung

Gasnetzmodelle sind genau so vielfältig wie die Aufgaben und Fragestellungen, die diesen unterliegen. Gemeinsam haben die Modelle, dass sie in unterschiedlicher Form den Gastransport durch das Netz als Ganzes oder in Teilaspekten adressieren. Kernaufgabe des Gasnetzes ist es, den Gastransport von Einspeisern zu Ausspeisern physikalisch zu ermöglichen. Die fundamentale Frage des Gasnetztransports ist daher “Kann ein gegebener Lastfall bestehend aus Ein- und Ausspeiseflüssen durch das Netz transportiert werden? Und, wenn ja, unter welchen Bedingungen und welchem Ressourceneinsatz?“ Da der Gasfluss potentialgetrieben, von hohem zu niedrigem Potential stattfindet, ist die Beantwortung dieser Fragen keineswegs trivial. Es existieren im Allgemeinen keine fixen, unabhängigen Transportkapazitäten für Transportrouten im Netz [16]. Vielmehr ergibt sich der Fluss durch eine Pipeline im stationären Zustand als Funktion der anliegenden Drücke[24]. Der am Eingang einer Pipeline anliegende Druck ist gleichzeitig der am Ausgang einer anderen Komponente anliegende Druck. Damit induziert der Potentialfluss eine starke Kopplung aller Komponenten im Netz, die verallgemeinernde Aussagen über das Netzverhalten deutlich erschwert und damit die modellseitige Abbildung und Analyse von Gasnetzen zur Grundvoraussetzung für den erfolgreichen Gasnetzbetrieb macht. Im instationären Fall ist das Verhalten nochmals komplizierter. Es existiert eine Fülle an Fragestellungen die aus dieser Grundfragestellung abgeleitet oder darauf aufbauend formuliert werden können (siehe Tabelle 2.2.4.1).

[24] Dies ist oberflächlich vergleichbar mit der Beziehung zwischen Gleichstrom und Spannung an einem Widerstand in einem Stromkreis.

Tabelle 2.2.4.1: Fragen die mithilfe der Gasnetzmodellierung beantwortet werden können.

Nr.	Fokus	Frage
1	wirtschaftlich	Wie kann auf Seiten der Gasnetzbetreiber der Ressourceneinsatz für den Transport minimiert werden?
2	wirtschaftlich	Welche Ein- und Ausspeisekapazitäten können von Gasnetzbetreibern an einem liberalisierten Markt ohne Kenntnis des zukünftigen Netzzustands vermarktet werden?
3	wirtschaftlich	Wie kann der Anteil an frei zuordenbaren Kapazitäten kostengünstig erhöht werden?
4	betrieblich	Existieren Engpässe im Netz?
5	betrieblich	Wie steht es um die Versorgungssicherheit unter planbaren und nicht-planbaren Szenarien?
6	betrieblich	Welches Versorgungsdruckniveau kann einem Kunden garantiert werden?

Auch im Rahmen der Energiewende ergeben sich zusätzlich Fragestellungen hinsichtlich der Sektorkopplung von Gas und Elektrizität. Die Fragen haben gemeinsam, dass sie implizit nach der optimalen Regelung des Gasflusses fragen. Daher ist hier auch manchmal die Rede von „Optimal Control Problems“. Gasnetzmodellierung, -simulation und -optimierung sind folglich unerlässlich, sowohl für den Markt als auch für den Betrieb und kann sogar bei der Bewertung der Materialeignung nützlich sein. Daher wird im Folgenden ein Überblick über den aktuellen Stand der Gasnetzmodellierung und die prominenten Ansätze gegeben. Die dazugehörigen Daten und ihre Aufbereitung werden im Anschluss diskutiert.

Typischerweise kann man zwischen Simulationsansätzen, die einen Zustand in die Zukunft fortschreiben und Optimierungsansätzen, die alle Zeitschritte gleichzeitig berücksichtigen unterscheiden. Hier soll der Fokus auf Optimierungsansätzen liegen, die die explizite Vorgabe einer Zielfunktion erlauben und Netze mit aktiven und passiven Elementen enthalten. Diese sind flexibler zur Beantwortung mehrerer Fragestellungen einsetzbar. Mathematisch wird ein Gasnetz als Graph $G = (V, E)$, bestehend aus Kanten E und Knoten V, modelliert. Dabei stellen die Kanten in der Regel die Komponenten, wie Pipelines, Ventile, Verdichter, dar, und die Knoten Ein-, Ausspeise- und Kreuzungspunkte. Ausgangspunkt zur Beschreibung der Gasdynamik in Pipelinenetzwerken sind die 1-D Euler-Gleichungen [25][16], [61], [62], [63]. Dabei handelt es sich mathematisch um Systeme von hyperbolischen partiellen Differentialgleichungen (PDE(s)) [63], [64]. Sie umfassen die differentiellen Erhaltungsgleichungen für die Massendichte (*Gl. 2.9*), die Impulsdichte (*Gl. 2.10*) und die Gesamtenergiedichte (*Gl. 2.11*) in Kombination mit einer Zustandsgleichung des betrachteten Gases (*Gl. 2.12*).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_x)}{\partial x} = 0 \text{ (Massenerhaltung)} \qquad \textit{Gl. 2.9}$$

[25] In diesem Kontext ist die Euler’sche Betrachtungsweise gemeint.

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial t} + \frac{\partial\left(\rho v_x^2\right)}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} = -\rho g \frac{\partial h}{\partial x} - \lambda \frac{\rho v_x^2}{2D} \text{ (Impulserhaltung)} \qquad \textit{Gl. 2.10}$$

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \frac{\partial\left((\rho e + p) v_x\right)}{\partial x} + \frac{k_w}{D}(T - T_w) = 0 \text{ (Energieerhaltung)} \qquad \textit{Gl. 2.11}$$

$$\mathbf{p} = \rho \mathbf{R_s T z(p, T)} \text{ (Zustandsgleichung)} \qquad \textit{Gl. 2.12}$$

Hier steht ρ für die Dichte, t für die Zeit und v_x für die Geschwindigkeit in x-Richtung. p bezeichnet den Druck, g die Erdbeschleunigung, h die geografische Höhe, λ den Reibungskoeffizienten des universellen Widerstandsgesetzes und D den Durchmesser der Pipeline. Die Gesamtenergiedichte $e = u + k + \phi$ in *Gl. 2.11* setzt sich aus innerer $u = c_v T$, kinetischer $k = \frac{1}{2}||v||^2$ und potentieller Energiedichte $\phi = gh$ zusammen. Es findet ein vereinfachtes Wärmeübergangsgesetz mit Wärmeübergangskoeffizienten k_w, Gastemperatur T und Wandtemperatur T_w Anwendung. Als Zustandsgleichung wird meist das ideale Gasgesetz mit Realgasfaktor z und spezifischer Gaskonstante R_s genutzt. Für den Realgasfaktor kommen systemspezifische empirische Gleichungen zum Einsatz (zum Beispiel Virialgleichung). Populäre Vereinfachungen sind zum einen die Vernachlässigung der Zeitabhängigkeit, das heißt Betrachtung des stationären Zustandes $\partial\rho/\partial t = \partial(\rho v)/\partial t = \partial e/\partial t = 0$ (siehe unten), die Vernachlässigung des Terms $\partial(\rho v_x^2)/\partial x$ in *Gl. 2.10* für kleine Geschwindigkeiten v_x (siehe z.B. [16], [65]), sowie die Annahme isothermer Bedingungen oder auch Kombinationen daraus. Ein kompakter Überblick über Lösungsansätze und Vereinfachungen der 1-D Euler-Gleichungen in Zusammenhang mit der Gasnetzmodellierung ist in [62] zu finden. Tatsächlich ist die Lösung hyperbolischer und parabolischer PDEs ein Hauptforschungsgebiet in der numerischen Analysis und äußerst kompliziert. Daher existiert auch eine Vielzahl an theoretischen Sätzen (siehe. zum Beispiel [64]) und Diskretisierungsverfahren (Finite-Differenzen,-Elemente,-Volumen, spektrale Ansätze), wobei Finite-Volumen-Diskretisierungen [63], basierend auf der sogenannten schwachen Formulierung, am populärsten sind. Aktive, das heißt schaltbare Komponenten eines Netzwerks, wie Ventile und Verdichter, werden meist über klassische gemischt-ganzzahlige Programm (MIP)-Techniken abgebildet. Bei Verdichtern wird meist eine isentrope oder polytrope Zustandsänderung angenommen. Der zulässige Betriebsbereich (charakteristisches Diagramm) mit Isolinien für die Drehzahl und den Wirkungsgrad kann in Form von biquadratischen Approximationen angegeben werden [66]. Gekoppelt mit den Verdichtern sind ihre jeweiligen Antriebe. Auch hierfür können vereinfachte Gleichungen für den Verbrauch angesetzt werden. Je nach Modellcharakter, Fragestellung und Komplexität, werden die Verdichter und ihr Antriebsstrang auch stärker abstrahiert dargestellt (vgl. [16] Kapitel 6).

Im Folgenden sollen, aufgeteilt nach stationärer und instationärer Gasnetzoptimierung, einige Publikationen näher beschrieben werden, um einen Eindruck über gängige Ansätze, Methoden und ihre Anwendbarkeit auf Probleme relevanter Größe zu vermitteln.

2.3.1. Stationäre Gasnetzoptimierung

[67] und [16] erklären, dass beim Gasfluss in Netzwerken zwischen dem Verhalten im stationären Zustand (Steady-State) und dem instationären/dynamischen Verhalten zu

unterscheiden ist. Während der Steady-State durch differential-algebraische Gleichungssysteme (DAE), bestehend aus gewöhnlichen Differentialgleichungssystemen (ODE) und algebraischen Un-/Gleichungen oder rein durch algebraische Gleichungssysteme beschrieben werden kann, erfordert der instationäre Gasfluss die Beschreibung durch parabolische oder hyperbolische partielle Differentialgleichungssysteme (PDE), die versuchen *Gl. 2.9 - Gl. 2.12* oder verwandte Formulierungen direkt zu lösen. Solche Systeme sind deutliche schwerer zu lösen, da Druck, Dichte und Geschwindigkeit als zeit- und ortsabhängige Felder modelliert werden müssen. Die AutorInnen führen aus, dass daher in der Praxis auf Steady-State Modelle zurückgegriffen wird, wenn keine ausreichende Datenbasis für eine transiente Rechnung gegeben ist. [16] erklärt, dass dies insbesondere bei der Bestimmung von vermarktbaren Netzkapazitäten und der Überprüfung von am Markt nominierten Kapazitäten der Fall ist. Ein Überblick zu Methoden in diesem Bereich ist nicht nur in Form von Modellen in [16] und den Referenzen in Kapitel 5 darin gegeben, sondern auch in [68]. [67] führen weiterhin aus, dass Steady-State Berechnungen helfen können, korrekte Startwerte für dynamische Simulatoren auf komplexen Netzen zu bestimmen. Sowohl [67] als auch [16] erklären, dass eine Problematik der Netzberechnung für allgemeine Transportnetze darin besteht, dass man sowohl diskrete Schaltzustände (Kompressoren, Ventile, Komponentenkopplung) abzubilden hat, als auch hoch nichtlineare physikalische Zusammenhänge. Die gleichzeitige Berücksichtigung beider Aspekte ist für große Netze meist nicht effizient handhabbar. Die AutorInnen heben hervor, dass daher ein übliches Vorgehen in einem zweistufigen Ansatz besteht. Es werden zunächst mittels eines gemischt-ganzzahligen-linearen Programms (MILP-Formulierung) mit vereinfachten physikalischen Zusammenhängen die Schaltzustände der Netzkomponenten und, näherungsweise, die Flüsse und Drücke im Netz bestimmt (siehe zum Beispiel Kapitel 6 [16], [69]). Anschließend werden diese in ein nichtlineares Programm (NLP) eingesetzt, um das Ergebnis zu überprüfen, zu verfeinern und beispielsweise die Transportkosten zu evaluieren (siehe zum Beispiel Kapitel 10 [16], [69]). Tatsächlich ist die Minimierung der Transportkosten in Form des Energieverbrauchs von Verdichtern das wohl prominenteste und relevanteste Problem in der Praxis. Trotz der zuvor erwähnten Schwierigkeit Modelle mit gleichzeitiger Abbildung nichtlinearer und diskreter Aspekte zu lösen, wurden auch hier Modelle entwickelt (siehe zum Beispiel [70], [71], [72]). Da die Abbildung des Gasflusses von fundamentaler Bedeutung ist, lassen sich mithilfe derartiger Modelle beispielsweise auch Fragestellungen zum Netzausbau [71], [73] beantworten oder sie stellen unterlagerte Problemstellungen dar. Die Komponenten mit der höchsten Modellkomplexität sind die Pipelines und die Verdichterstationen. Entsprechend viel Zuwendung hat die Modellierung in diesem Bereich in der Literatur gefunden. Ausführungen zur Modellierung von Verdichtern und Verdichterstationen finden sich bei [16], [66], [70] und Ausführungen zum Einfluss von Verdichtern auf die Druck- und Dichteentwicklung in den angeschlossenen Pipelines bei [74].

Osiadacz, Kwestarz [67] [67] lösen das praktisch und ökonomisch relevante Problem der Transmissionskostenminimierung im Steady-State Fall in Form eines nichtlinearen Optimierungsproblems. Die AutorInnen heben das übliche Vorgehen hervor, dass man zunächst mithilfe von MILPs die Schaltzustände der Netzkomponenten und, näherungsweise, die Flüsse und Drücke im Netz bestimmt und anschließend ein nichtlineares, kontinuierliches Problem, wie das in ihrer Arbeit präsentierte, einsetzt, um die

tatsächlichen Transportkosten zu evaluieren. Dazu verwenden sie einen Steady-State-Optimierungsalgorithmus der auf dem Verfahren der Sequentiellen Quadratischen Programmierung[26] (SQP) beruht. Das Problem findet Anwendung auf zwei Netzwerke, eines mit 39 Pipelines, 38 Knoten, 2 Verdichterstationen, 2 Quellen und 1 Ventil, und eines mit 95 Knoten, 890 Pipelines, und 32 nicht-Pipeline-Elementen. Letzteres ist ein Modell des südlichen Teils des National Transmission System (Vereinigtes Königreich). MILPs, wie das erwähnte, finden sich beispielsweise in [70], [75]. Letztere Arbeiten liegen auch dieser Arbeit zugrunde.

Ekhtiari et al. [76] [76] leiten die 1-D Euler-Gleichungen her und lösen die isothermen 1-D Euler-Gleichungen auf Basis gemittelter Stoffdaten mittels der Newton-Raphson Methode in MATLAB. Das Modell wird auf zwei Netztopologien des irischen Gasnetzes angewendet, eine reduzierte mit 13 Knoten und eine detailliertere mit 109 Knoten, und mit der Lösung der kommerziellen Software SAInt [77] verglichen.

Pandapipes [78] Ein ähnlicher Ansatz wie bei Ekhtiari et al. [76], allerdings ohne gemittelte Stoffdaten, wird hier verwendet.

van Westering et al. [79] (Paper), [80] (zugehöriger Report) Die AutorInnen lösen das isotherme Steady-State Transportproblem für das Gasverteilnetz der Insel Texel (>40000 Pipelines, keine Verdichter oder schaltbaren Elemente) und befassen sich mit der Leckage-Minimierung und der Gasverbrauchsmodellierung. Methodisch werden bei der Flussberechnung die Maschen des Netzwerkgraph aufgeschnitten, sodass sich Bäume ergeben. Für jeden Baum können die Flüsse berechnet werden. Anschließend wird das Kirchhoff'sche Gesetz zur Potentialerhaltung (Druck) innerhalb einer Masche in Form einer unbeschränkten Kleinste-Quadrate-Minimierung (Least-Squares, LSQ) angesetzt, um eine Flusskorrektur zur berechnen. Die AutorInnen berichten eine Lösungszeit von 0,2 Sekunden bei einem maximalen Fehler von 10^{-3} bar für das gesamte Netzwerk auf einem normalen Computer.

Bermudez et al. 2015 [69] [69] beschreiben ein nichtlineares, isothermes Steady-State Model mit Verdichtern. Das resultierende nichtlineare Gleichungssystem kann mit Newton-ähnlichen Verfahren gelöst werden. Auch hier nutzen die AutorInnen einen zweistufigen Ansatz, um zunächst die Schaltzustände im Netz bestimmen zu können und anschließend das Ergebnis zu präzisieren. Methodisch wird dazu in der ersten Stufe ein modifiziertes Verfahren des Sequentiellen Linearen Programmierens[27] verwendet, das in jeder Iteration ein MIP löst. Der Algorithmus wird in [81] beschrieben. Die zweite Stufe beruht laut AutorInnen auf Ansätzen aus der Regelungstechnik, wird aber in [69] nicht präzisiert. Das beschriebene Verfahren hat Eingang in das Computerprogramm GANESO [82] gefunden (FORTRAN 2008) und wird von den AutorInnen auf das spanische Fernleitungsnetz (500 Knoten) angewendet.

Domschke et al. 2021 [62] [62] vermitteln einen Überblick über Modellierungsalternativen für Gasnetzwerke im Steady-State, aber auch im transienten Fall. Dabei gehen die AutorInnen von den 1-D Euler-Gleichungen aus und zeigen auf, dass der

[26] Im Englischen: Sequential Quadratic Programming (SQP)

[27] Im Englischen: Sequential Linear Programming (SLP)

Modellierungsprozess durch Approximation und vereinfachende Annahmen eine inhärente hierarchische Struktur aufweist, die eine Modellhierarchie induziert. Es werden sowohl Hierarchien für den isothermen als auch für den temperaturabhängigen Bereich vorgestellt. Darüber hinaus wird auch knapp auf die Modellierung weiterer Netzelemente eingegangen und einzelne, zusammengesetzte Modellalternativen genannt. Darüber hinaus adressieren die AutorInnen übliche Ansätze und Methoden zur Diskretisierung von Systemen hyperbolischer Bilanzgleichungen der Form $\partial \boldsymbol{u} / \partial t + \partial f(\boldsymbol{u}) / \partial x = g(x, \boldsymbol{u})$, da sich, insbesondere in deren Abbildung, Modelle unterscheiden. Die AutorInnen erklären, dass die üblichen Methoden zur Diskretisierung solcher Bilanzgleichungen Finite-Volumen Methoden (FVM) sind, da diese Methoden zahlreiche, positive Eigenschaften aufweisen. Eine gute Einführung zu FVM ist beispielsweise in [63] zu finden. Es wird auf unterschiedliche numerische Verfahren verwiesen (Lax-Friedrichs, Godunov, MUSCL, ENO, WENO). Alternative Verfahren seien stark stabilitätserhaltende (SSP-) Runge-Kutta-Ansätze, die Diskontinuierliche-Galerkin-Methode (DG) und Relaxierungsmethoden basierend auf der sogenannten Entropielösung. Abschließend stellen [62] die unterschiedlichen Modelle als sogenannte Port-Hamilton'sche Systeme (siehe auch [83]) dar.

Koch et al. 2015, Kapitel 6 [16] In Kapitel 6 [16] stellen die AutorInnen eine MILP-Relaxierung eines Steady-State gemischt-ganzzahligen nichtlinearen Programms (MINLP) mit gemittelten Gaseigenschaften vor, das mit [70] verwandt ist. Dabei werden schaltbare Komponenten wie Ventile, Druckregelventile und Kompressoren und deren Verschaltung in Verdichterstationen explizit berücksichtigt. Ziel ist es, die Abweichung der Verdichter von einem Soll-Arbeitspunkt zu minimieren und die dazugehörigen Schaltzustände, Flüsse und Drücke im Netz herauszufinden. Um den linearen Charakter zu erhalten, wird der Arbeitsbereich der Verdichter zunächst durch Box-Constraints approximiert[28] und mittels eines Cutting-Plane Algorithmus verfeinert. Im Vorfeld wird auch die Anzahl an einzuführenden Diskretisierungsvariablen über ein Hilfsproblem minimiert. Es wird auch darauf verwiesen, dass ein nominierungsspezifisches Preprocessing zum Einsatz kommen kann, um den Lösungsraum a-priori einzuschränken (Bound-Strengthening). Ein solches Preprocessing ist beispielsweise in [70] beschrieben.

Koch et al. 2015, Kapitel 10 [16] In Kapitel 10 [16] wird ein NLP zur stationären Gasnetzoptimierung auf Basis realer Gaseigenschaften und detaillierter Komponentenbeschreibung mittels einer Ortsdiskretisierung beschrieben. Das Modell wird durch Fixierung diskreter Schaltvariablen aus einem ursprünglichen MINLP abgeleitet und kann somit genutzt werden, um Lösungen einer MILP-Relaxierung (siehe auch Kapitel 6 [16]) des MINLP zu validieren.

Geißler (Dissertation) [70] Der Autor präsentiert einen Algorithmus zur Lösung von MINLPs der auf der Lösung adaptiv verfeinerter MIP-Relaxierungen beliebiger Genauigkeit beruht. Dazu werden MIP-Techniken zur Modellierung stückweiser Funktionen erweitert, sodass sich konvexe Unterschätzer ergeben, die die nichtlinearen Funktionen, bis auf eine a-priori bestimmte Abweichungstoleranz, approximieren. Der Algorithmus findet Anwendung zur Lösung eines stationären Gastransportproblems mit schaltbaren

[28] Dies verlangt die Lösung von Hilfsproblemen in Form von NLPs.

Netzwerkkomponenten und Fernkopplung dieser. Dabei kommt auch ein elaboriertes Preprocessing zum nominierungsspezifischen Bound-Strengthening und Variable-Fixing zum Einsatz.

Geißler et al. 2018 [72], 2015 [84] präsentieren einen Dekompositionsansatz (Penalty Alternating Direction Methode (Penalty ADM)) zur Lösung detaillierter, großskaliger Gastransport-MINLPs mit schaltbaren Komponenten, wie Verdichtern und Ventilen und wenden dies zur Lösung von stationären Problemen für das echte niederkalorisches Erdgas (L-Gas) - und H-Gas-Netz des Netzbetreibers Open Grid Europe an. In dem verwandten Paper [84] stellen die AutorInnen heraus, dass es sich dabei um die größten gelösten Netzwerkinstanzen mit schaltbaren Elementen handelt, deren Lösung je in der Literatur berichtet wurde (> 4000 Knoten). Das Ausgangsmodell ist sehr ähnlich zu dem in [70] beschriebenen Modell. Die Idee des Dekompositionsansatzes ist eine bestimmte Problemstruktur auszunutzen. Gemäß [72] ist die auszunutzende Struktur der Penalty ADM, dass sich die Variablen des Problems in zwei Mengen aufteilen lassen, wobei die meisten Nebenbedingungen entweder die eine oder die andere Menge betreffen und nur wenige Nebenbedingungen beide Mengen verknüpfen. Die Idee ist nun eine konvergente Sequenz an partiellen Optima einer Straffunktion zu berechnen. Die Straffunktion enthält dabei sowohl die ursprüngliche Zielfunktion als auch Strafterme für Nichterfüllung der Nebenbedingungen.

2.3.2. Instationäre Gasnetzoptimierung

Neben der stationären Betrachtung hat die Modellierung des zeitabhängigen Gasflusses in Transportnetzen viel Aufmerksamkeit erhalten. Hauptschwierigkeit liegt hier darin, dass nicht nur algebraische Gleichungen oder gewöhnliche Differentialgleichungen (ODE) gelöst werden müssen, sondern partielle Differentialgleichungen (PDE). Zur praktischen Lösung dieser Gleichungen muss im Allgemeinen sowohl eine Zeit- als auch eine Ortsdiskretisierung stattfinden. Das komplexe Wechselspiel zwischen Nichtlinearität, und deren Approximation, und unterschiedlichen Zeit- und Ortsdiskretisierungen kann hier leicht zu numerischen Problemen führen und zwangsweise zu einer Fülle an Ansätzen. Auch die Abbildung von diskreten Events wie die Schaltung eines Absperrventils ist problematisch konsistent abzubilden. Eine gutes Literaturübersicht zu Ansätzen in der transienten Gasnetzmodellierung bietet [85]. Daher sollen hier einige jüngere Ergebnis genannt werden.

Burlacu et al. 2018 [85] [85] präsentieren einen “discretize-then-optimize“-Ansatz zur transienten Gasnetzoptimierung basierend auf einer 1-D Finite-Volumen-Diskretisierung. Das resultierende Pipelinemodell kann als Erweiterung eines stationären Modells angesehen werden. Ziel der Optimierung ist die, über einen Zeithorizont zusätzlich transportierbare, Gasmenge zwischen einer Menge an Quellen- und Senkenknoten zu maximieren. Dabei wird die Netzatmung[29] (im Englischen auch Line-Pack genannt) ausgenutzt. Dabei muss die über den Zeitraum insgesamt ausgetauschte Gasmenge

[29] Die Netzatmung ist ein Verfahren zur Steigerung der Flexibilität und Kosteneffizienz des Gasnetzbetriebs und bezeichnet die Fähigkeit temporär zusätzliche Gasmengen in das Rohrleitungsnetzes einzuspeisen („atmen“) und später wieder auszuspeisen („abatmen“).

bilanziell zu null aufgehen. Das Modell findet Anwendung auf das 11-knotige Beispielnetzwerk GasLib-11.

Domschke et al. 2018 [86] Die AutorInnen präsentieren eine neuartige, adaptive Modellverfeinerungsstrategie der isothermen 1D-Eulergleichung zur Simulation und Optimierung von Gasnetzen. Ziel ist die Reduktion der Rechenzeit, bei gleichzeitiger Einhaltung von Fehlertoleranzen. Die Strategie beruht, im Gegensatz zu üblichen Ansätzen der flexiblen Zeit- und Orts-Schrittweitenanpassung, auf einer Modellanpassung. Dazu nutzen die AutorInnen eine Modellhierarchie, die durch sukzessive Vereinfachung der isothermen 1-D Eulergleichungen hergeleitet wird. Die AutorInnen demonstrieren Rechenzeitverbesserungen einer Simulation gegen über einer kommerziellen Software-Lösung anhand des 24-knotigen Beispielnetzwerks GasLib-24. Eine verwandte Arbeit, die sich mit der konsistenten Kopplung von Komponenten befasst, findet sich bei [87].

Qiu et al. 2020 [88] Die AutorInnen beschreiben einen Finite-Volumen-Ansatz zur schnellen Berechnung passiver Gasflussnetzwerke, basierend auf den isothermen 1-D Eulergleichungen. Das voll diskretisierte Gleichungssystem wird mittels Newton-(Raphson-)Verfahren gelöst, wobei die untere Dreiecksmatrix-Struktur ausgenutzt wird und eine Vorkonditionierung der, in jedem Newtonschritt zu berechnenden, Jacobi-Matrix stattfindet. Das Newton-Verfahren kann als klassisches Lösungsverfahren gesehen werden, das hier problemspezifisch verbessert wird. Seine Vorteile sind die lokale quadratische Konvergenz und relative Einfachheit. Nachteil ist, dass sich ganzzahlige Variablen nicht so einfach berücksichtigen lassen und auch zusätzliche Nebenbedingungen gesondert adressiert werden müssen.

2.3.3. Kommerzielle und öffentlich verfügbare Programme

In Anbetracht des bereits langanhaltenden Interesses an der Netzberechnung für Gas existieren zahlreiche kommerzielle Software-Lösungen zur numerischen Netzberechnung. Dabei sind die Softwarelösungen für den professionellen Einsatz durch die Netzbetreiber gedacht. Die Anforderungen dieser Zielgruppe spiegeln sich in den Features der Programme wider: Sie verfügen in der Regel über grafische Benutzeroberflächen, hoch detaillierte Komponentenmodelle, und die Möglichkeit den aktuellen Netzzustand zu verfolgen und im Sinne einer Steuerung oder auch Echtzeit-Regelung darauf Einfluss zu nehmen. Dazu bieten sie Schnittstellen zur Integration von Datenbanken und SCADA[30]-Systemen. Die Programme enthalten Rechenkerne zur stationären, quasi-stationären, sowie instationären Simulation von Gas-, und in einigen Fällen auch Wärme-, Strom- und Wassernetzen. Diese werden zur vorausschauenden Simulation und Planung eingesetzt. Zur Verfolgung des Systemzustands kommen auch Zustandsschätzer und Zustandsbeobachter zum Einsatz. Abgeleitete Anwendungen sind die Leckage-Erkennung und Schätzung von Modellparametern wie der effektiven Rohrrauigkeit. Allerdings bieten bisher kaum Tools Rechenkerne zur rigorosen mathematischen Optimierung der Transportkosten oder anderer Zustände im Betrieb. In Simulationen können Transportkosten lediglich ausgewiesen werden. Populäre Software-Lösungen sind u.a. SIMONE [89], PSI Ganesi [90], Emerson PipelineStudio [91], Synergi Gas [92], sowie SAInt [77] und MYNTS [93]. Ein interessanter Aspekt ist, dass die letzteren, noch recht junge

[30] Supervisory Control and Data Acquisition Architecture

Programme sind, und einen Fokus auf gekoppelten Strom- und Gasnetzen haben. SAInt wirbt auch mit der Möglichkeit zur Einbindung erneuerbarer Energien. Für den wissenschaftlichen Einsatz sind all diese Programme nur bedingt geeignet, da hier häufig der Eingriff in die mathematische Programmformulierung notwendig ist, um neue Fragestellungen zu beantworten. Ein solcher Eingriff ist in der Regel aus lizenz- und urheberrechtlichen Gründen nicht erlaubt. Während viele Modellformulierungen in der wissenschaftlichen Literatur veröffentlicht wurden, bestehen erstaunlich wenige open-source Software-Lösungen und -Projekte zur Gasnetzsimulation. Hier sind das Python-basierte Pandapipes [78] und das Julia/JuMP-basierte GasModels-Package [94] zu nennen. Letzteres bietet Funktionalitäten zur Gasnetzoptimierung.

Kritische Würdigung im Kontext dieser Arbeit

Es ist ersichtlich, dass die vorgestellten Ansätze sich in der Handhabung von Komplexität und ihrem beabsichtigten Einsatzbereich stark unterscheiden. So sind die Steady-State-Modelle in [76], [78], [79], sowie das transiente Modell in [88] auf passive Netze ohne schaltbare Komponenten fokussiert. Es zeigt sich, dass mittels dieser Verfahren Flüsse in sehr großen Netzen berechnet werden können bei mitunter sehr schnellen Konvergenzzeiten. Bei passiven Netzen handelt es sich, wie auch am Beispiel von [79] ersichtlich, meist um örtliche Verteilnetze. Erwartungsgemäß zeigen diese Ansätze für allgemeinere Netze der höheren Netzebenen Schwächen auf. Die Berücksichtigung von allgemeinen Nebenbedingungen und schaltbaren Elementen gestaltet sich hier mit Ansätzen der unbeschränkten Optimierung schwierig bis unmöglich. Hier setzen Ansätze der beschränkten Optimierung wie bei [16], [67], [69], [70] an, die in Zusammenarbeit mit Transportnetzbetreibern entstanden sind. Vor diesem Hintergrund zielen die Ansätze auf maximal rechenbare Netzgrößen allgemeiner Netze ab, das heißt solcher Netze, die sowohl Pipelines als auch schaltbare Elemente wie Verdichter und Ventile enthalten können. Infolgedessen ist die Modellkomplexität vergleichsweise hoch. Diese Ansätze zeichnen sich durch die Gemeinsamkeit aus, dass sie auf mehrstufigen Verfahren beruhen, um die Komplexität herunterzubrechen und größere Netze rechenbar zu machen. Teilweise kommen auch Preprocessing-Methoden zum Einsatz, um die Modellgröße zu reduzieren [70]. In Bezug auf die instationäre Gasnetzoptimierung zeigt sich, dass die rechenbaren Netzgrößen sehr beschränkt sind, wie das 11-knotige Netz in [85] und das 24-knotige Netz in [86] zeigen. Bemerkenswert ist noch, dass [86] und [62] auch mögliche Wege aufzeigen, wie in sich konsistente Modellhierarchien für die Pipelinemodellierung generiert werden können und gleichzeitig in einem Modell genutzt werden können. Im Kontext dieser Arbeit erscheinen stationäre Modelle für allgemeine Netze als vielversprechendste Ansätze, um großskalige Netzberechnungen durchführen zu können, gegebenenfalls erweitert um ein geeignetes Preprocessing. Ein Vorteil dieser Methoden ist auch, dass im Vergleich zu instationären Modellen der Anfangszustand des Netzes nicht bekannt sein muss.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Gasflussprobleme methodisch mit vielen Ansätzen angegangen werden: Stationär und instationär, als MINLPs direkt und deren Relaxierung in MIP und zugehöriges NLP, durch Heuristiken zur globalen Optimierung und Dekompositionsansätze, sowie Modellhierarchien und adaptive Verfeinerungsstrategien. Viele der Ansätze sind Versuche die Komplexität des unterliegenden Systems zu reduzieren.

Es zeigt sich, dass trotz des Forschungsaufwands die stationäre Optimierung und Simulation (hier auch instationär) der Stand der Technik für Netzwerke realistischer Größe sind. Während auf akademischer Seite großes Interesse an der instationären Gasnetzoptimierung besteht, zeigt die Literatur auf, dass bereits die stationäre Optimierung großer Netze eine Herausforderung darstellt und von hoher praktischer Relevanz ist. Die Publikationen zeigen, dass Vorkonditionierung, Modellhierarchien und Dekomposition, sowie datenabhängiges Preprocessing genutzt werden können, um die resultierenden Optimierungsprobleme zu vereinfachen und zu beschleunigen.

2.4. Datenaufbereitung

In der angewandten Forschung kann man häufig keine mathematische Modellentwicklung losgelöst von verfügbaren Daten betreiben, da das primäre Ziel im Erkenntnisgewinn durch die Datenverarbeitung liegt und nicht in der Erkenntnis über die Datenverarbeitung selbst. Das heißt, die Sachlage muss aus zwei Perspektiven betrachtet werden. Einerseits muss man die Frage stellen, welche Daten man benötigt, um ein Modell zu besetzen, das alle wesentlichen Aspekte des betrachteten Systems abbildet. Andererseits muss man auch fragen, welche Daten überhaupt verfügbar sind. Wenn man hier keine hinreichende Überlappung feststellen kann, ist das Problem in seiner Ausgangsform unlösbar. Folglich muss man entweder Abstriche bei der Aussagekraft des Modells machen oder versuchen, die fehlenden Daten zu generieren. Eine Aufarbeitung der Herausforderungen bei der Datenaufbereitung für Gasnetze ist in [95] zu finden. Diese deckt sich mit den Erfahrungen des Autors dieser Arbeit. Die AutorInnen und ihre Projektpartner haben sich im Rahmen ihrer Arbeit ausführlich mit der Datenaufbereitung für Gasnetzberechnungen befasst und ihre Erfahrungen, sowie die Herausforderungen und mögliche Lösungsansätze zusammengetragen. Dabei unterscheiden die AutorInnen zwischen der Datenaufbereitung im Kontext einer Forschungszusammenarbeit mit einem Gasnetzbetreiber, das heißt dem Datenerzeuger, zur Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems und der Datenaufbereitung allein auf Basis öffentlich verfügbarer Daten, worauf vor allem bei wissenschaftlichen Studien zurückgegriffen wird. Die AutorInnen stützen sich hier ausschließlich auf öffentliche Datenquellen, also keine kommerziellen Datensätze, siehe auch Abschnitt 2.4.1. Letztere Datensätze sind jedoch auch rar und erfüllen häufig wenige Kriterien hinsichtlich der Datenkonsistenz, Vollständigkeit und Verifizierbarkeit. Die AutorInnen unterscheiden vier Ansätze zur Verbesserung der Datenbasis und erklären, wie sie diese eingesetzt haben, siehe Tabelle 2.4.1.

Tabelle 2.4.1: Ansätze zur Datenaufbereitung von Gasnetzdaten nach [95].

Name	Beschreibung
S1	händische Anpassungen und Ergänzungen
S2	Prävention von Dateninkonsistenz und Strategien zum Umgang damit (insbesondere bei Echtzeitanwendungen)
S3	Data-in-the-loop: Fehlerberichterstellung und Korrektur auf dem Basisdatenlevel, durch Feedback an den Datenerzeuger (aufwendig und beschränkter Anwendungsbereich)
S4	Für nicht verfügbare Daten: Anwendungsspezifische Annahmen und Heuristiken

Für die Erkenntnisse in der Datenaufbereitung in Kooperation mit dem Datenerzeuger sei an dieser Stelle auf die Quelle verwiesen, da diese geringe Relevanz für diese Arbeit haben. Als notwendige Daten für die mittel- bis langfristige Planung konstatieren die AutorInnen:

1. Daten zur Netzwerkbeschreibung
2. Daten zur Beschreibung der Verdichterstationen
3. Nominierungen im Sinne ausgeglichener Ein- und Ausspeiseflüsse

Die Daten entsprechen im Wesentlichen den in der GasLib [96] Benchmark-Datenbank spezifizierten Daten. Die AutorInnen präzisieren zwingend notwendige und optionale Daten gemäß Tabelle 2.4.2.

Tabelle 2.4.2: Notwendige und optionale Daten zur Gasnetzbeschreibung nach [95].

Typ	Feature	Beschreibung
notwendig	F1	Geographische Lage von Knoten und Kanten
notwendig	F2	Lage von Verdichterstationen, Druckregel- und einfachen Ventilen
notwendig	F3	Pipelinedurchmesser
notwendig	F4	Lage von Quell- und Senkenknoten
notwendig	F5	Zuordnung der Art der, den Quellen/Senken hinterlagerten, Einrichtungen, z.B. Speicher, Grenzübergangspunkte, Verbraucher, etc.
optional	F6	Gaszusammensetzung bei der Einspeisung
optional	F7	Technische Details: Rohrrauigkeit, Wärmeübergangskoeffizienten der Pipelines, Beschreibung der inneren Konfiguration von Verdichterstationen und der verbauten Verdichter, Antriebe, Ventile
optional	F8	Druckschranken an den Knoten, insbesondere an den Quellen- und Senkenknoten

Die AutorInnen zeigen auf, dass auf allen Ebenen Daten nicht so vorliegen, als dass sie direkt in einem stationären Gasnetzoptimierungsproblem genutzt werden könnten. Die AutorInnen erklären, dass erhältliche Daten über viele Quellen (European Network of Transmission System Operators for Gas (ENTSO-G), Fernleitungsnetzbetreiber (FNB), Gas Infrastructure Europe (GIE), Aggregated Gas Storage Inventory (AGSI+)) und Formate (Bild, Text, Tabelle) gestreut vorliegen und darüber hinaus auch in ihrer Granularität variieren. Hier bedarf es der ressourcenintensiven Konsolidierung der Daten. Problematisch sind hierbei selbst die unterschiedlichen Datenmodelle und Namenskonventionen für gleiche Daten. Um Szenarien und Nominierungen zu generieren, müssen kumulative Jahresnachfrage-Daten pro Marktgebiet räumlich und zeitlich disaggregiert werden. Auch die geographische Zuweisung von Ein-/Ausspeisepunkten aus Datenbanken erweist sich als Herausforderung. Als Ausgangsbasis zur Netzmodellierung nutzen die AutorInnen den sogenannten LKD-EU-Datensatz[31] aus [98]. Sie stellen fest, dass dieser Datensatz in seiner Ausgangsform nicht für die stationäre Gasnetzoptimierung geeignet ist, da fehlende Pipelinedurchmesser zu grob geschätzt wurden und zu wenig Informationen über schaltbare Netzelemente, wie Ventile und Verdichterstationen, vorliegen. Sowohl zur Verbesserung der Pipelinedurchmesser-Schätzung als auch zur Erzeugung bilanziell ausgeglichener Nominierungen auf Basis der Versorgungs-/Nachfrage-Zeitreihen an virtuellen Verknüpfungspunkten, nutzen die AutorInnen Hilfsoptimierungsprobleme. Die Veröffentlichung des fertigen Datensatzes ist im Rahmen des Projekts plan4res [99] geplant.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass ein hohes Mindestmaß an Daten und Datenqualität notwendig ist, nicht nur, um signifikante Aussagen machen zu können, sondern um überhaupt rechenfähig zu sein. Die Datenaufbereitung ist eine der größten Herausforderungen bei der anwendungsorientierten Gasnetzmodellierung und extrem zeitaufwendig (viele Personenjahre).

2.4.1. Netzdatensätze

In Anbetracht der ressourcenintensiven Datenaufbereitung erscheinen kommerzielle Datensätze attraktiv. Es werden kurz verfügbare Datensätze und Quellen genannt und eine kurze Bewertung hinsichtlich ihrer Qualität und Konsistenz nach Tabelle 2.4.2 gegeben, soweit der Autor dieser Arbeit damit Kontakt hatte oder dies auf Basis der Datendokumentation, möglich ist.

S&P Global Platts [10] S&P Global Platts bietet unter dem Produktnamen Map Data Pro ein Subscription-Modell für eine Sammlung an 38 Infrastrukturkarten in GIS-Formaten aus den Bereichen Elektrizität, Erdgas, Liquified Natural Gas (LNG) und Rohöl an. Die geografische Ausdehnung fokussiert sich hier auf Europa und Nordamerika. Im Erdgasbereich liegen Informationen über Pipelines, Verdichterstationen, Ein- und Ausspeisepunkte, Gashubs, LNG-Terminals, Speicher, Gasfelder und Shalegasfelder, Verarbeitungsanlagen und lokale Vertriebsgesellschaften vor.

Verlag Glückauf Essen (VGE)-Gasnetzkarte [100] Die sogenannte VGE-Gasnetzkarte bildet das komplette Leitungsnetz der Bundesrepublik Deutschland mit seinen Knoten und

[31] In der Datendokumentation [97] finden sich auch Beispiele für Datenformate wie sie bei den Netzbetreibern zu finden sind.

Kreuzungspunkten auf dem Stand von 2010 ab. Verfügbare Attribute sind insbesondere Versorgungsunternehmen, Leitungsverläufe mit Informationen zum Leitungsbetreiber, dem Nenndruck und Nenndurchmesser, sowie Knoten und Kreuzungsinformationen. Außerdem hat der Datensatz den Anspruch eine zusammenhängende Netztopologie zu bilden, die ein Netzrouting über das gesamte Leitungsnetz ermöglichen soll.

SciGridGas [101] Das SciGridGas Projekt ist ein Versuch einen konsolidierten und konsistenten öffentlichen Datensatz zur Nutzung in Energiesystemstudien aus verschiedenen Quellen zusammenzuführen. Dabei wurden unterschiedliche Datensätze zusammengeführt und fehlende Dateneinträge geschätzt. Das Ergebnis ist eine Sammlung europäischer Gasnetzdatensätze mit unterschiedlicher Auflösung und Bearbeitungsgrad. Manche Datensätze weisen eine vollständige Datenbesetzung auf.

plan4res [99] Das EU-geförderte plan4res-Projekt widmet sich der ganzheitlichen Energiesystemmodellierung des europäischen Energiesystems. In der Arbeit [95] wird darauf verwiesen, dass im Rahmen dieses Projekts auch ein Gasnetzdatensatz erzeugt und anschließend veröffentlicht werden solle. Dies scheint bislang noch nicht erfolgt zu sein.

LKD-EU [98],[97] Dieser Datensatz wurde im Rahmen des “LKD-EU“-Projektes (Long-term planning and short-term optimization of the German electricity system within the European framework: Further development of methods and models to analyze the electricity system including the heat and gas sector), einer Kooperation zwischen DIW Berlin, TU Berlin, TU Dresden und der Universität Duisburg-Essen erstellt. Der LKD-EU-Datensatz wurde aus unterschiedlichen Datenquellen der Fernnetzbetreiber zusammengetragen und wurde sowohl im plan4res Projekt als auch im SciGridGas-Projekt als Ausgangsbasis genutzt. Für Details sei auf die Datendokumentation [97] verwiesen.

Benchmark-Datensätze: GasLib [96] Die GasLib-Datenbank bietet eine Reihe von Datensätzen samt Nominierungen und Daten zur Konfiguration von Verdichterstationen und Fernkopplung von schaltbaren Elementen. Es existieren 4 künstliche Datensätze (11, 24, 40, 135 Knoten) und 3 basierend auf realen, verfälschten Infrastrukturen (134, 582, 4197 Knoten) Die Daten liegen im Extensible Markup Language (XML)-Format, zusammen mit einem XML Schema Definition (XSD) -Validierungsschema vor. Die Datensätze sind aus zwei Projekten (ForNe, Technical Capacities of Gas Networks) in Kooperation mit Gasnetzbetreibern hervorgegangen.

Transparenzportale Transparenzportale wie das der ENTSO-G [8], [102] und GIE /AGSI+ [9], [103] oder die Fernnetzbetreiber-Datenbank [104] bieten zuweilen auch Kartendarstellungen und Informationen über Pipelines und Kapazitäten. Allerdings sind die Informationen von anderer Qualität als die der Geoinformationssystem (GIS)-Datensätze. Sie bieten zwar hohe Verlässlichkeit, sind aber nicht auf einfache Weise in eine GIS-Darstellung zu überführen und enthalten nur solche Daten, die im Rahmen der Transparenzverpflichtungen veröffentlicht werden müssen.

Insgesamt kann die Datenlandschaft als überschaubar bezeichnet werden. In Abwesenheit einer geeigneten Referenz als Grundwahrheit ist die Qualität der Datensätze relativ schwierig zu bewerten. Dies kann lediglich an abgebildeten Merkmalen und der Datenkonsistenz im Sinne der Vollständigkeit und Übereinstimmung von Daten unterschiedlicher Datensätze geschehen. Der Autor hatte Zugriff auf eine ältere Variante

der kommerziellen S&P Global Platts und VGE-Gasnetzkarten. Mit dem Interactive World Gas Dashboard liegen dem Autor keinerlei Erfahrungen vor. Die SciGridGas-Karte(n) sind kostenlos online erhältlich. Während bei der S&P Global Platts Karte der Abdeckungsgrad an Pipelines, die Ausdehnung und die dargestellten Features gut sind, fehlen häufiger Daten über Pipelinedurchmesser. Die unterschiedlichen Layer liefern nicht nur Daten über Pipelineverläufe, sondern auch über Speicher und ähnliche Einrichtungen. Die Verdichterstationen sind als Punkte des Netzgraphen modelliert und es sind keinerlei Ventile gekennzeichnet. Letzteres ist ein wiederkehrendes Problem aller Datensätze, die das echte System abbilden und verhindert in Verbindung mit fehlenden Werten und Angaben über Verdichterstationen die direkte Nutzbarkeit solcher Datensätze. Da es sich um ein altes Kartendokument handelt, ist dem Autor unklar, inwiefern in der Zwischenzeit die derzeit verfügbaren Kartendarstellungen (bei S&P Global Platts) verbessert wurden. In Bezug auf die Pipelinedurchmesser und den Detailgrad sticht die VGE Gasnetzkarte Deutschland hervor, da sie hier für jede Pipeline einen Durchmesser angibt und versucht, Verbindungen topologisch korrekt darzustellen. Es ist auch eine Vielzahl an Durchleitungsknoten angegeben. Allerdings ist der Datensatz statisch auf dem Stand von 2010 und wird nicht laufend aktualisiert. Der SciGridGas Datensatz bietet sich aufgrund seiner Datenkonsistenz in Bezug auf die Pipelines und Graphenstruktur für Rechnungen mit Europa-Fokus an. Dem Autor sind bisher keine Studien bewusst, die diesen Datensatz für Potentialfluss-basierte Rechnungen nutzen und Aufschluss darüber geben, inwieweit die Darstellung wesentliche Netzbetriebscharakteristika erhält. Während zahlreiche Verdichterstationen eingetragen sind, fehlen auch hier Ventile und die innere Verschaltung der Stationen. Auch hier wurden, entgegen den rechenmodellnahen Modellierungsansätzen, die Stationen als Knoten und nicht als Kanten eines Graphen identifiziert. Es ist also dem Nutzer überlassen, geeignete Annahmen über die genaue lokale Topologie zu treffen. Dies macht auch diesen Datensatz für die physikalische Gasnetzsimulation und -optimierung nicht direkt nutzbar. Eine vorgeschaltete Netzmodellierung ist folglich eine Voraussetzung für jede Gasnetzsimulation und -Optimierung mit Realitätsbezug. An dieser Stelle soll nochmal auf die GasLib-Datenbank hingewiesen werden. Diese bietet nicht nur sinnvolle Beispielprobleme für die Erprobung von Modellen und Algorithmen, sondern erweist sich auch als praktischer Leitfaden zum Aufbau geeigneter Datenstrukturen und Datenanforderungen.

Tabelle 2.4.1.1: Vor- und Nachteile unterschiedlicher, verfügbarer Gasnetz-Datensätze.

Vorteile	Nachteile
S&P Global Platts	
- GIS-Daten für Knoten und Kanten sind vorhanden - Lage von Quell-/Senkenknoten ist gegeben (auch Typ) - Die Lage von Verdichterstationen ist gegeben - Der Fokus liegt auf Europa und Nordamerika	- Pipelinedurchmesser sind nicht überall gegeben - Es sind keine Ventile oder GDRM-Anlagen gegeben - Verdichterstationen sind als Knoten dargestellt, ohne innere Konfigurationen - Nominell sind Updates verfügbar
VGE-Gasnetzkarte	
- GIS-Daten für Knoten und Kanten sind vorhanden - Pipelinedurchmesser sind überall gegeben - Die Netztopologie ist zusammenhängend - Knotentypen sind spezifiziert - Hat eine hohe Auflösung	- Die Karte bildet den Status im Jahr 2010 ab - Keine Verdichterstationen, Ventile oder GDRM-Anlagen sind gegeben - Der Fokus liegt auf Deutschland
SciGridGas	
- GIS-Datensätze mit zusammenhängender Netztopologie sind gegeben - Voll besetzte Pipelinedurchmesser-Daten und ausgestaltete Knotentypen sind gegeben - Es sind Verdichterstationen vorhanden - Die Netztopologie ist zusammenhängend	- Keine Darstellung von Ventilen oder GDRM-Anlagen - Die Verdichterstationen sind als Knoten dargestellt
LKD-EU	
- Der Datensatz basiert auf Primärdaten - Der Datensatz ist gut dokumentiert	- Keine Darstellung von Ventilen oder GDRM-Anlagen
GasLib	
- Entspricht als Benchmark-Datensatz allen Daten-Anforderungen typischer Rechenmodelle - Der Datensatz ist gut dokumentiert	- Die hinterlegten Netzdatensätze basieren teilweise auf echten Infrastrukturen, die Daten wurden jedoch aus datenschutzrechtlichen Gründen verfälscht
Transparenz-Portale	
- Hohe Verlässlichkeit da Primärdaten	- Es handelt sich nicht um GIS-Datensätze - Die Daten sind verteilt über viele Quellen - Die Netzdarstellung findet häufig in Form abstrahierter Bilder statt - Dargestellte Knoten entsprechen meist keinen physikalischen Netzknoten - Es sind keine Pipelinedurchmesser gegeben

Da sich die Datenseite einer Gasnetzberechnung stets in Netztopologie und Lastfälle aufteilt, macht es Sinn, sich im folgenden Abschnitt kurz mit der Erzeugung letzterer zu befassen.

2.4.2. Lastfälle

Ein Lastfall im Gasnetz ist normalerweise synonym mit einer Nominierung, also einem Transportauftrag bestehend aus einem Satz an balancierten Netzeinspeisungen und Ausspeisungen. Balanciert meint hier, dass die Einspeisungen genau den Ausspeisungen entsprechen. Dies verhindert, dass das Netz langfristig Gas akkumuliert oder leerläuft [16]. Zur Analyse und vorausschauenden Berechnung können im Falle des Erdgasnetzes

sinnvolle Lastfälle auf Basis statistischer Analysen historischer Daten an einzelnen Ein- und Ausspeisepunkten erzeugt werden (siehe Kapitel 13 & 14 in [16]). Verfügt man lediglich über aggregierte historische Daten, zum Beispiel eine Jahresbilanz Erdgas nach Sektoren, oder kumulierte Flussbilanzen für Marktgebiete, so können Disaggregationsmethoden verwendet werden, um die fehlende Auflösung zu rekonstruieren (siehe zum Beispiel [95], [105]). Existieren keine historischen Daten, wie im Falle eines initialen Wasserstoffnetzes, so muss man sich Expertenwissens und/oder Heuristiken bedienen. Von den letzteren beiden Ansätzen wird im Rahmen dieser Arbeit Gebrauch gemacht.

2.4.3. Netzentwicklungspläne und das deutsche Wasserstoffnetz 2030

Netzentwicklungspläne dienen der transparenten und bedarfsgerechten Netzentwicklung regulierter Netze. Als solche bieten sie teilweise detailliertere Informationen zu geplanten Ausbaumaßnahmen und sind potenzielle Quellen nützlicher Topologie und Szenarioinformationen. Hier soll kurz auf drei Studien beziehungsweise Pläne Bezug genommen werden, die das zukünftige Wasserstoffnetz in Deutschland und Europa thematisieren. Die Grüngasvariante des NEP-Gas 2020 ist im Anschluss die Ausgangsbasis zur Modellierung des deutschen Wasserstoffnetzes bis 2025 beziehungsweise 2030 im nächsten Kapitel.

Ten-Year-Network-Development-Plan (TYNDP) ENTSO-G Neben Netzentwicklungsplänen auf nationaler Ebene existieren auch Studien und Pläne mit europäischem Fokus und Zeithorizonten jenseits 2030. Die ENTSO-G publiziert, analog zu den nationalen Netzentwicklungsplänen, im 2-Jahres-Takt einen europäischen Netzentwicklungsplan mit rollendem 10-Jahres-Horizont [11]. Dieser trägt allerdings primär gemeldete, nationale Projekte, deren Kosten und Fortschritte zusammen und bietet Ausblicke, Prognosen und Schwerpunkte, die eher den Ergebnissen einer regionsbasierten Energiesystemmodellierung ähneln, aber bei der technischen Implementierung nicht ins Detail gehen.

“European Hydrogen Backbone“-Studie Eine interessante Studie, die konkrete Ausblicke hinsichtlich der Wasserstoffnetzwerktopologie bietet, ist die 2020 veröffentlichte “European Hydrogen Backbone“-Studie [106], die von einem Konsortium aus Gasnetzbetreibern[32] zusammen mit der Beratungsfirma Guidehouse erstellt wurde. Es wird ein möglicher, schrittweiser Ausbaupfad über die Jahre 2030-2035-2040 aufgezeigt, der ausgehend von sogenannten “hydrogen valleys“ durch einen stetigen Netzausbau in einer vollvernetzten, europäischen Wasserstoffinfrastruktur mündet. Das resultierende Netzwerk soll dann eine Gesamtlänge von 22.900 km haben und zu 75% aus umgestellten Erdgaspipelines bestehen. Darüber hinaus werden Kostenabschätzungen für den Gesamtausbau und anschließenden Betrieb (CAPEX und OPEX) des Netzwerks gemacht. Die Ausbaukosten sollen sich in Summe auf 27-64 Milliarden Euro belaufen und die Betriebskosten auf Basis einer Vollaststundenzahl von 5.000 Stunden pro Jahr bei 1,6-3,5 Milliarden Euro[33] liegen. Ein interessanter Aspekt für die technische Netzmodellierung ist, dass hier von einem Saugdruck, das heißt Eingangsdruck an den Verdichterstationen, von

[32] Enagás, Energinet, Fluxys Belgium, Gasunie, GRTgaz, NET4GAS, OGE, ONTRAS, Snam, Swedegas, Teréga

[33] inkl. Betriebs- und Wartungskosten (O&M), sowie Stromkosten für den Verdichterbetrieb

30-40 bar ausgegangen wird. Dahinter steht das Kalkül, die Kosten für die Verdichtung gering zu halten, indem man den Druck-Arbeitsbereich des Netzes beschränkt. Es wird argumentiert, dass es mitunter günstiger sein kann, eine neue Parallelleitung zur Kapazitätssteigerung zu bauen, als den Druck-Arbeitsbereich zu erweitern. Dieser Aspekt zeigt, dass auch für Fragen des Netzausbaus eine rein kapazitive Betrachtung ohne Berücksichtigung des Betriebs kein vollständiges Bild ergibt.

Netzentwicklungsplan Gas 2020 der Fernleitungsnetzbetreiber - Grüngasvariante 2030

Vermerk: Netzentwicklungsplan Gas 2022 Zum Zeitpunkt der Verschriftlichung dieser Arbeit (1. Halbjahr 2022) ist der Netzentwicklungsplan Gas 2022 der Fernleitungsnetzbetreiber in der Erstellung. Der Szenariorahmen wurde bereits veröffentlicht und darin auch eine weiterentwickelte Variante des sogenannten visionären Wasserstoffnetzes gezeigt. Aus zeitlichen Gründen wurde dieser in dieser Arbeit nicht mehr betrachtet. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass eine Masterarbeit betreut wurde, die sich mit der Modellierung und Analyse dieses erweiterten Netzes beschäftigt.

Netzentwicklungsplan Gas 2020 Der Netzentwicklungsplan Gas der Fernleitungsnetzbetreiber Deutschland wird in jedem geraden Kalenderjahr durch eben diese erstellt und der Bundesnetzagentur (BNetzA) als Regulierungsbehörde vorgelegt[34]. Er umfasst stets einen Horizont von zehn Jahren. Darin werden „alle wirksamen Maßnahmen zur bedarfsgerechten Optimierung, Verstärkung und zum bedarfsgerechten Ausbau des Netzes sowie zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit“ dargelegt, „welche in den nächsten zehn Jahren netztechnisch für einen sicheren und zuverlässigen Netzbetrieb erforderlich sind.“ [7]. Die Erforderlichkeit von Maßnahmen ergibt sich sowohl aus Entwicklungen im Marktgebiet, zum Beispiel durch veränderte Kapazitätsbedarfe[35], der L-Gas zu H-Gas-Umstellung oder dem Kohleausstieg, als auch aus exogenen Einflüssen, wie einer veränderten Gasförderung oder einer veränderten Versorgungssituation in Nachbarländern. Dabei soll der Netzentwicklungsplan auch den europäischen Netzentwicklungsplan berücksichtigen, siehe Artikel 8 Abs. 3b europäische Verordnung Nr. 715/2009. Um die Vielzahl an Einflüssen zusammenzuführen, liegt dem Netzentwicklungsplan ein Szenariorahmen [6] zugrunde, der im Vorfeld abgesteckt wird. Die Öffentlichkeit kann im Rahmen einer Konsultation Fragen und Anregungen zum Netzentwicklungsplan-Entwurf einbringen und die BNetzA kann Änderungsverlangen geltend machen. Gemäß dem Szenariorahmen enthält der Netzentwicklungsplan Gas 2020 erstmalig auch eine Grüngasvariante (Kapitel 8), die die Planung für ein deutsches Wasserstoffnetz bis 2030 enthält. Diese konkretisiert Teile des im Frühjahr 2019 von den FNBs vorgestellten visionären Wasserstoffnetzes.

Im Folgenden werden kurz das Vorgehen sowie die Erkenntnisse der Grüngasvariante in Bezug auf das initiale Wasserstoffnetz wiedergegeben. Dies ist die Grundlage für die Modellierung des zukünftigen Wasserstoffnetzes 2025 und 2030 in dieser Arbeit.

[34] siehe auch §15a EnWG

[35] langfristige Kapazitätsbedarfe im Marktgebiet sind nach §17 Gasnetzzugangsverordnung zu ermitteln

Das Vorgehen war wie folgt: Zunächst wurde eine Marktpartnerabfrage durchgeführt (bis 12. Juli 2019), in der Grüngasprojekte[36] zusammengetragen wurden. Hier wurden bis zum genannten Stichtag 31 Projekte gezählt, siehe Tabelle 2.4.3.1.

Tabelle 2.4.3.1: Grüngasprojekte Marktpartnerabfrage

Nr.	Bezeichnung	Gas	Beteiligte Unternehmen	Quelle/ Senke	Geplante Inbetrieb-nahme
1	Green Hydrogen Integration	H_2	BASF	Senke	2022
2	HySynGas/ ARGE Brunsbüttel	H_2, syn. CH_4	ARGE Netz GmbH & Co. KG, MAN, Vattenfall	Quelle	bis 2025
3	SALCOS	H_2	Salzgitter Flachstahl GmbH	Senke	ab 2025
4	GET H2	H_2	enertrag, Forschungszentrum Jülich, hydrogenious, IKEM, nowega, RWE, SIEMENS, Stadtwerke Lingen	Quelle/ Senke	2023
5	Audi Industriegas	H_2, syn. CH_4	Audi Industriegas	Quelle	in Betrieb
6	Power to Gas Ibbenbüren	H_2	innogy	Quelle	2015
7	RWE-Gaskavernen-speicher	H_2	RWE	Senke	2030
8	Westküste 100	H_2	EDF, Holcim, Ørsted, Raffinerie Heide, Stadtwerke Heide, thyssenkrupp, TWT, UKE	Quelle	ab 2025
9	Bad Lauchstädt	H_2	VNG, ONTRAS	Quelle/ Senke	ab 2025
10	H2-Infrastruktur Ost-deutschland	H_2	ONTRAS, VNG	Quelle/ Senke	2030
11	Energiepark Bad Lauchstädt	H_2	ONTRAS, VNG	Quelle	ab 2025
12	RH2INE	H_2	Thüga	Quelle	ab 2025
13	CEPRO	H_2	Uniper	Quelle/ Senke	ab 2025
14	H2morrow steel	H_2	thyssenkrupp Steel, OGE, Equinor	Senke	ab 2025
15	H2-Initiative Nordrhein-Westfalen	H_2	verschiedene Unternehmen	Quelle/ Senke	ab 2025
16	AQUAVOLT	H_2	Uniper	Quelle	ab 2025
17	AQUAVOLT	H_2	Uniper	Quelle	ab 2025
18	Chemiepark Marl	H_2	Evonik, bp	Senke	ab 2025

[36] Diese beschränken sich vornehmlich auf Wasserstoff, aber auch Biogas und synthetisches Methan sind enthalten.

19	H2-Cluster Rheinland	H_2	Shell, Wuppertaler Stadtwerke, Air Liquide, u. a.	Quelle/ Senke	ab 2025
20	H2-Mobility	H_2	H2-Mobility	Senke	ab 2025
21	GASAG/E.dis AG	H_2	GASAG/E.dis AG	Quelle	2020/ 2021
22	BGEA Schwarze Pumpe	Biogas	Zweckverband Industriepark Schwarze Pumpe	Quelle	2022
23	ELEMENT EINS	H_2	Thyssengas GmbH (TG), TenneT TSO GmbH, Gasunie Deutschland Transport Services GmbH (GUD)	Quelle	bis 2030
24	BGEA Krefeld	Biogas	EGK Entsorgungsanlagengesellschaft Krefeld GmbH & Co. KG	Quelle	in Betrieb
25	BGEA Coesfeld	H_2	GFC mbH - Gesellschaft des Kreises Coesfeld zur Förderung regenerativer Energien mbH	Quelle	bis 2025
26	Salzbergen	H_2	keine Angabe	Senke	2023
27	Statkraft Emden	H_2	Statkraft Markets GmbH	Quelle	2022

Die Projekte mit ausschließlichem Anschluss an das Verteilnetz wurden nicht weiter berücksichtigt und sollen gegebenenfalls zu einem späteren Zeitpunkt durch die Verteilnetzbetreiber (VNB) an die FNB herangetragen werden. Ebenso wurden keine Grüngasprojekte berücksichtigt, die ausschließlich eine lokale Erzeugung und Versorgung ohne Anschlussnotwendigkeit an das Leitungsnetz aufweisen. Anschließend wurden die einzelnen Projekte in Relation zueinander und zu Kandidatenpipelines des visionären Wasserstoffnetzes verortet (siehe Abbildung 2.4.3.1).

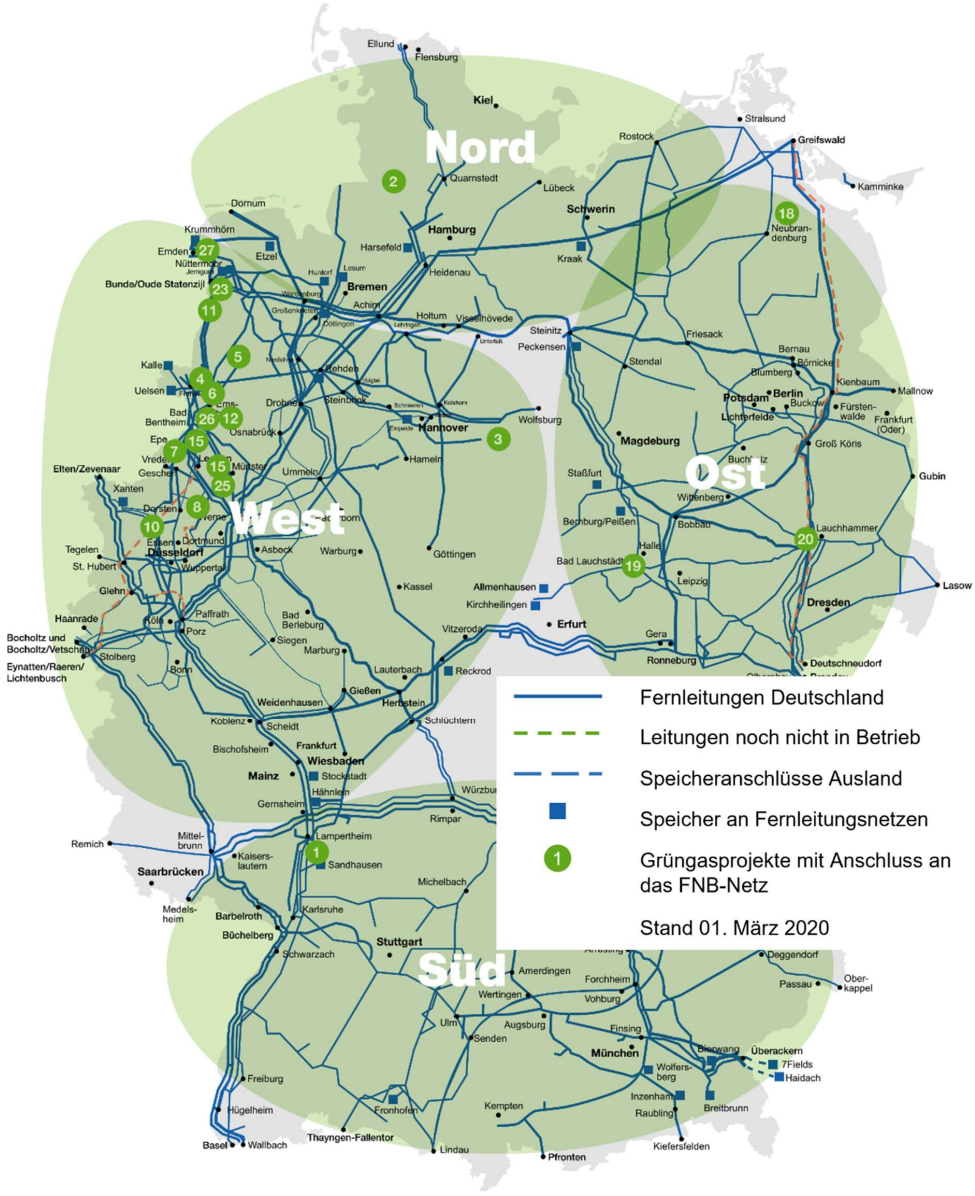


Abbildung 2.4.3.1: Bild: Cluster der Grüngasvariante im NEP-Gas 2020 [7]. Quelle: FNB Gas e.V.

Die Kandidatenpipelines sind dabei potenziell umzustellende Erdgaspipelines. Hierbei ergaben sich auf natürliche Weise vier Cluster von räumlich nahen Projekten. Regionale Leistungsbilanzen wurden aufgestellt, um Quellen und Senken zu koppeln und Unterdeckungen der Nachfrage zu adressieren. Es zeigt sich, dass die absehbaren Ausspeisekapazitäten bis 2030 deutlich über den zum aktuellen Zeitpunkt vorliegenden Einspeisekapazitäten liegen, siehe Tabelle 2.4.3.2.

Tabelle 2.4.3.2: Prognostizierte Entwicklung der H_2-Ein- und Ausspeisekapazitäten gemäß [7].

Jahr	Elektrolysekapazität [MW_{el}]	H_2-Entry [MW_{th}]	H_2-Exit [MW_{th}]	Zusatzbedarf [MW_{th}]
2020	67	50	1	0
2021	119	89	147	58
2022	338	253	1248	995
2023	943	707	1922	1215
2024	1042	793	1922	1130
2025	1397	1044	2210	1166
2026	1397	1044	2260	1216
2027	1397	1044	2260	1216
2028	1417	1058	2989	1931
2029	1417	1058	2989	1931
2030	1467	1095	3002	1906

Trotzdem wurde versucht Unterdeckungen in den regionalen Leistungsbilanzen durch Erschließung zusätzlicher Wasserstoffquellen zu minimieren. Hierzu wurde auf vier zusätzliche Optionen zurückgegriffen: Auf Zusatzleistungen aus dem Netzentwicklungsplan Strom, auf Onshore-Windkraftkapazitäten mit ausgelaufener EE-Förderung, auf Importe, und auf Speicher. Die entsprechenden Zusatzbedarfe wurden gemäß Tabelle 2.4.3.3 angesetzt.

Tabelle 2.4.3.3: Eigene Darstellung nach [7]: Deckung von Zusatzbedarfen durch Onshore-Windkraft ohne EE-Förderung, Importe aus den Niederlanden und aus Speichern.

Zusatzquelle	2025 [MW_{th}]	2030 [MW_{th}]
Import von dekarbonisiertem Wasserstoff aus den Niederlanden	500	1066
Inländische Produktion von grünem Wasserstoff von Onshore-Windparks, deren EE-Förderung ausgelaufen ist	235	305
Speicher	152	152
Summe Zusatzbedarfe	887	1523

Mit Hilfe der sogenannten Erdgasmodellierung wurde geprüft, ob und welche Kandidatenpipelines zwischen den Projekten eines Clusters, ohne Einschränkung der Versorgungssicherheit im Erdgasnetz, für Wasserstoff bereitgestellt werden können. Anschließend wurde der Wasserstofftransport in den umzustellenden und gegebenenfalls neu zu bauenden Pipelines geprüft. Dies ist die sogenannte Wasserstoffmodellierung. Das gesamte Vorgehen ist in Abbildung 2.4.3.2 skizziert.

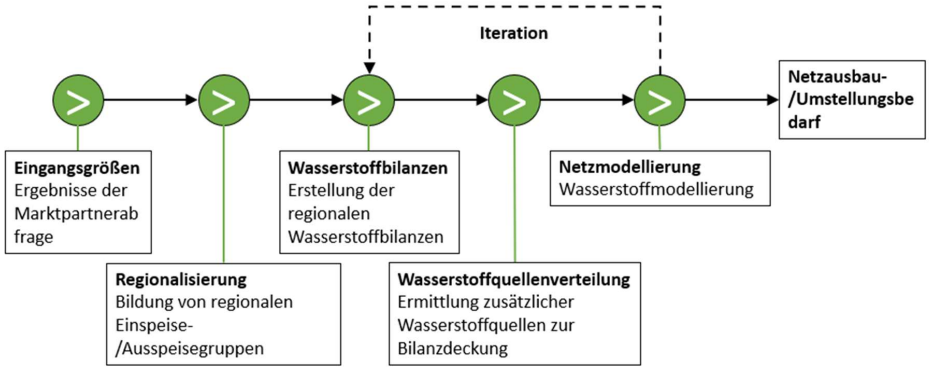


Abbildung 2.4.3.2: Eigene Darstellung nach [7]: Vorgehen bei der Grüngasvariante im NEP-Gas 2020.

Ergebnis des gesamten Vorgehens ist eine Liste an geplanten Ausbaumaßnahmen, die in die Transparenz-Datenbank der FNBs übernommen wurden. Auf diese Maßnahmen wurde bei der Modellierung des Wasserstoffnetzes 2025 und 2030 in dieser Arbeit zurückgegriffen. Tatsächlich ist die Methodik der Analyse mittels Erdgasmodellierung und Wasserstoffmodellierung aus wissenschaftlichen Gesichtspunkten weder methodisch noch datenseitig hinreichend transparent. Hier entsteht insofern eine Diskrepanz, weil die Wissenschaft immer wieder gefragt ist, beratend Umstellungsprozesse zu begleiten, aber dazu nur sehr eingeschränkte Daten und Informationen öffentlich bereitgestellt werden. Dies ist ein Aspekt, der in dieser Arbeit aufgegriffen wird. Die Modellierung des initialen deutschen Wasserstoffnetzes bis 2025 und 2030 in dieser Arbeit soll zeigen, mit welchem Aufwand, welche Aussagequalität bei welcher Datenlage möglich ist und, sofern möglich, Erkenntnisse bezüglich des Betriebs und möglicher Engpässe liefern.

3. Szenarien

In diesem Kapitel werden die für diese Arbeit erarbeiteten Szenarien vorgestellt. Das ist zum einen die Modellierung des deutschen Wassserstoffnetzes bis 2025 und 2030 und zum anderen ein Was-wäre-wenn-Szenario, das ausgewählte, energieäquivalente Wasserstofflastfälle in einem Netzmodell des deutschen H-Gas-Netzes betrachtet.

3.1. Szenario 1: Modellierung des deutschen Wasserstoffnetzes bis 2025 und bis 2030

3.1.1. Beschreibung/kurzer Abriss

Ziel dieses Szenarios ist es, die in der Grüngasvariante im NEP-Gas 2020 dargelegten Maßnahmen zur Schaffung eines deutschen Wasserstoffnetzes zu modellieren und, anhand von stationären Lastfällen, mögliche Betriebszustände zu bewerten. Dabei werden zwei Zeithorizonte betrachtet: Das Wasserstoffnetz bis 2025 und bis 2030. Bei dem hier beschriebenen Netz handelt es sich de-facto um ein rein durch die Industrie genutztes Wasserstoffnetz. In der Einleitung wurde bereits motiviert, dass insbesondere der Anschluss der Stahl- und Chemieindustrie im Rahmen der Energiewende sinnvoll erscheint.

3.1.2. Fragestellungen

Eine nähere Betrachtung dieser Fragestellung ist aus mehreren Gründen von Interesse. Die hydraulische Modellierung der Netze und die damit verbundenen Rechenergebnisse sind nicht Teil von Berichtspflichten der FNBs gegenüber der Öffentlichkeit. Daten bezüglich der Netzinfrastruktur und ihres Betriebs sind mitunter Betriebsgeheimnisse, potenziell sicherheitsrelevant und daher nicht öffentlich zugänglich. Dennoch ist es aus wissenschaftlicher Sicht von Interesse, diese Netze zu modellieren und zu analysieren, um unabhängige Bewertungen der Entwicklungen zu ermöglichen. Dies kann in Bezug auf eine integrierte Betrachtung des Fortschritts bei der Energiewende geschehen, aber auch frühzeitig Erkenntnisse über den Netzbetrieb, mögliche Probleme dabei oder auch Erweiterungsoptionen aufzeigen. Dies ist insbesondere dann vorteilhaft, wenn das Gesamtvorhaben in Form vieler Einzelprojekte abgewickelt wird und potenzielle Kommunikationsbarrieren bestehen. Daher ist eine solche Betrachtung für alle Beteiligten von Interesse. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf Erkenntnissen über den Netzbetrieb, Identifikation von möglichen Engpässen, aber auch eine Abschätzung der auftretenden Fließgeschwindigkeiten. Letztere werden mit den Erkenntnissen aus der Betrachtung zulässiger Fließgeschwindigkeiten in Abschnitt 2.2.4 verglichen.

3.1.3. Datenbasis und allgemeines Vorgehen

Die Datenbasis für die Modellierung der Netzwerktopologie des deutschen Wasserstoffnetzes in dieser Arbeit bieten die Ausbaumaßnahmen für Wasserstoff in der Transparenzdatenbank der Fernleitungsnetzbetreiber [104].

Die hier hinterlegten Einzelmaßnahmen bieten gerade eine ausreichende Datenbasis, um einen potenziellen Netzwerkgraphen zu erstellen. Ein Beispiel einer solchen Maßnahme ist im Anhang I.3 zu finden. Für die Quellen- und Senkenbeschreibung wurde der NEP-Gas 2020, in Kombination mit weiteren recherchierten Quellen, herangezogen. Der

Bilanzrahmen umfasst hier Maßnahmen und Projekte, die den Entwicklungen im Rahmen des NEP-Gas 2020 zuzuordnen sind. Dies ist eine Entscheidung, die der heterogenen Datenlage geschuldet ist. Teilweise wurden zwar weitere Wasserstoffprojekte gefunden, für die jedoch weder ein klarer Zeitrahmen noch ein sinnvoller Netzanschluss auf Basis der Netzmodellierung gefunden werden konnte. Um das Szenario möglichst realistisch zu gestalten, wurde auf die Integration solcher Projekte verzichtet. Die in der Transparenzdatenbank hinterlegten Maßnahmen beinhalten neben den Hauptstammdaten der jeweiligen Ausbaumaßnahme, einer kurzen Beschreibung und Informationen zum derzeitigen Projektstatus, auch Kartendarstellungen der Pipelineverläufe einer Maßnahme im Bildformat, siehe Anhang I.3. Diese Daten wurden im Rahmen dieser Arbeit exportiert und die Bilder der Pipelineverläufe in der frei verfügbaren GIS-Software QGIS [107] georeferenziert. Dies ist ein Verfahren, bei dem anhand von übereinstimmenden Stützpunkten auf Bild und Referenz-Geo-Projektion das Bild gestreckt und verzerrt wird, so, dass es sich in die Geo-Projektion einfügt. Klassischerweise wird das Verfahren zum Abgleich existenter Karten verwendet. Anschließend werden die auf dem Bild dargestellten Pipelineverläufe von Hand durch datenbehaftete GIS-Objekte nachgezogen und erfasst. Dieses Vorgehen wird für alle, zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit verfügbaren, Maßnahmen des NEP-Gas 2020 angewendet. Das Ergebnis ist ein Roh-Geodatensatz aller Pipelineverläufe. Diese müssen anschließend durch geschickte Verknüpfungen zu einer zusammenhängenden Netztopologie ergänzt werden. Die Natur der jeweiligen Verknüpfung von Pipelineabschnitten ist nicht in der Datenbank dokumentiert. Hier kommt eine Ersatzverschaltung zum Einsatz, die im Rahmen der mathematischen Modellbeschreibung in Abschnitt 4.1.9 genauer erläutert wird. Ein Kreuzungspunkt von mehr als zwei Pipelines wird durch eine Sternverschaltung aus Druckregelventilen, Absperrventilen und einem zentralen Shortcut, statt einem Pseudo-Verdichter, dargestellt. Dies entkoppelt die Drücke der eingehenden Ströme und ermöglicht ein fast beliebiges Flussrouting[37]. Zu netzinternen Verdichtern wurden keinerlei Angaben gefunden, und es muss davon ausgegangen werden, dass der Plan ist das Netz vorerst passiv zu betreiben, das heißt das notwendige Druckniveau für den Transport muss an den Einspeisepunkten aufgeprägt werden.

Für die Verteilung der Ein- und Ausspeisepunkte wird auch zunächst der NEP-Gas 2020 herangezogen. Hier zeigt sich jedoch, dass die Angaben mitunter zu unpräzise sind, um diese explizit aufzuteilen (Daten liegen geclustert bzw. kumuliert vor.). Daher muss eine eigene, separate Recherche zu geplanten Wasserstoffprojekten angestellt werden. Bei einem Zeithorizont von zehn Jahren in die Zukunft beschränkt sich der nutzbare Informationsgehalt meist auf eine ungefähre Lage und eine angestrebte Elektrolyseleistung (z.B. 100 MW_{el}) bei Erzeugern bzw. eine maximale Ausspeiseleistung (z.B. 20000 Nm^3/h) bei den Verbrauchern. Aus den so gewonnenen Ein- und Ausspeiseschranken können dann konkrete Lastfälle für die Analyse konstruiert werden. Da hier keine historischen Daten verfügbar sind, bieten sich drei verschiedene Verfahrensweisen an (siehe Tabelle 3.1.3.1):

[37] Die ausgehenden Flüsse weisen den gleichen Druck auf.

Tabelle 3.1.3.1: Varianten der Lastfallerzeugung.

Variante	Beschreibung
1	Händische Lastfallerzeugung innerhalb der recherchierten Ein- und Ausspeiseschranken
2	Ziehung von pseudo-Zufallslastfällen aus den gegebenen Ein- und Ausspeiseschranken
3	Ableitung von Lastfällen aus exogenen Last-/Nachfrageprofilkurven und Verschneidung mit den gegebenen Ein-/Ausspeiseschranken

3.1.4. Beschreibung des Wasserstoffnetzmodells 2025

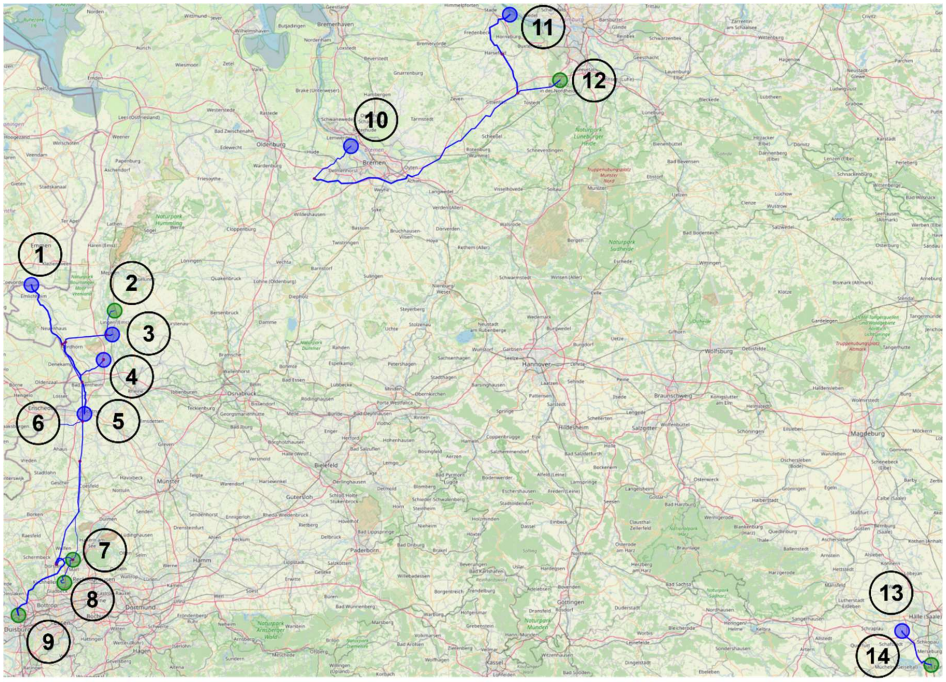


Abbildung 3.1.4.1: Überblick: Modellierte Wasserstoffnetzwerktopologie 2025. Blaue Kreise stehen für Quellen, und Grüne Kreise für Senken (siehe Tabelle 3.1.4.1). In dieser Darstellung dienen die Kreise lediglich der Verortung der Quellen und Senken und geben keinerlei Auskunft über Ein- oder Ausspeisemengen.

Tabelle 3.1.4.1: Legende zu Abbildung 3.1.4.1: (*): Nutzung unbekannt oder jenseits 2025

Nummer	Quellen und Senken
1	Vlieghuis
2	BP Lingen
3	RWE Lingen Kraftwerksgelände/Elektrolyse
4	Emsbüren
5	Ochtrup
6	UGS Epe (erst nach 2025)
7	Chemiepark Marl
8	BP Gelsenkirchen (Scholven)
9	TK Steel Europe Duisburg
10	Stahlwerk Bremen
11	Elbe Süd (*)
12	Eckel (*)
13	UGS Bad Lauchstädt/Elektrolyse
14	Chemiepark Leuna

Farblegende	
	Quellenknoten
	Senkenknoten
	Verbindungsknoten
	Pipeline
	Absperrventil
	Kurzleitung
	Druckregelventil
	Kompressor
	Nichtlinearer Widerstand
	Linearer Widerstand
	Sicherheitsventil
	Komponente mit einem fixierten Fluss

Die sich ergebende Netzwerktopologie für 2025 ist in Abbildung 3.1.4.1 dargestellt. Es sind die, in der Grüngasvariante genannten, Cluster West, Nord und Ost zu erkennen. Quellen sind hier in Blau und Senken in Grün dargestellt. Der Cluster Süd findet in keiner der Modellierungen Berücksichtigung, da das Projekt der BASF Ludwigshafen keiner Wasserstofferzeugung im Cluster Süd zugewiesen werden konnte und eine Anbindung an den Cluster West bis 2030 nicht möglich erscheint (vgl. Abbildung 2.4.3.1, Nummer 1). Der Leser sei dazu angeregt die Darstellung der Leitungsverläufe im NEP-Gas 2020 (Abbildung 3.1.4.2 (grün dargestellt)) mit der Modellierung in Abbildung 3.1.4.1 zu vergleichen.

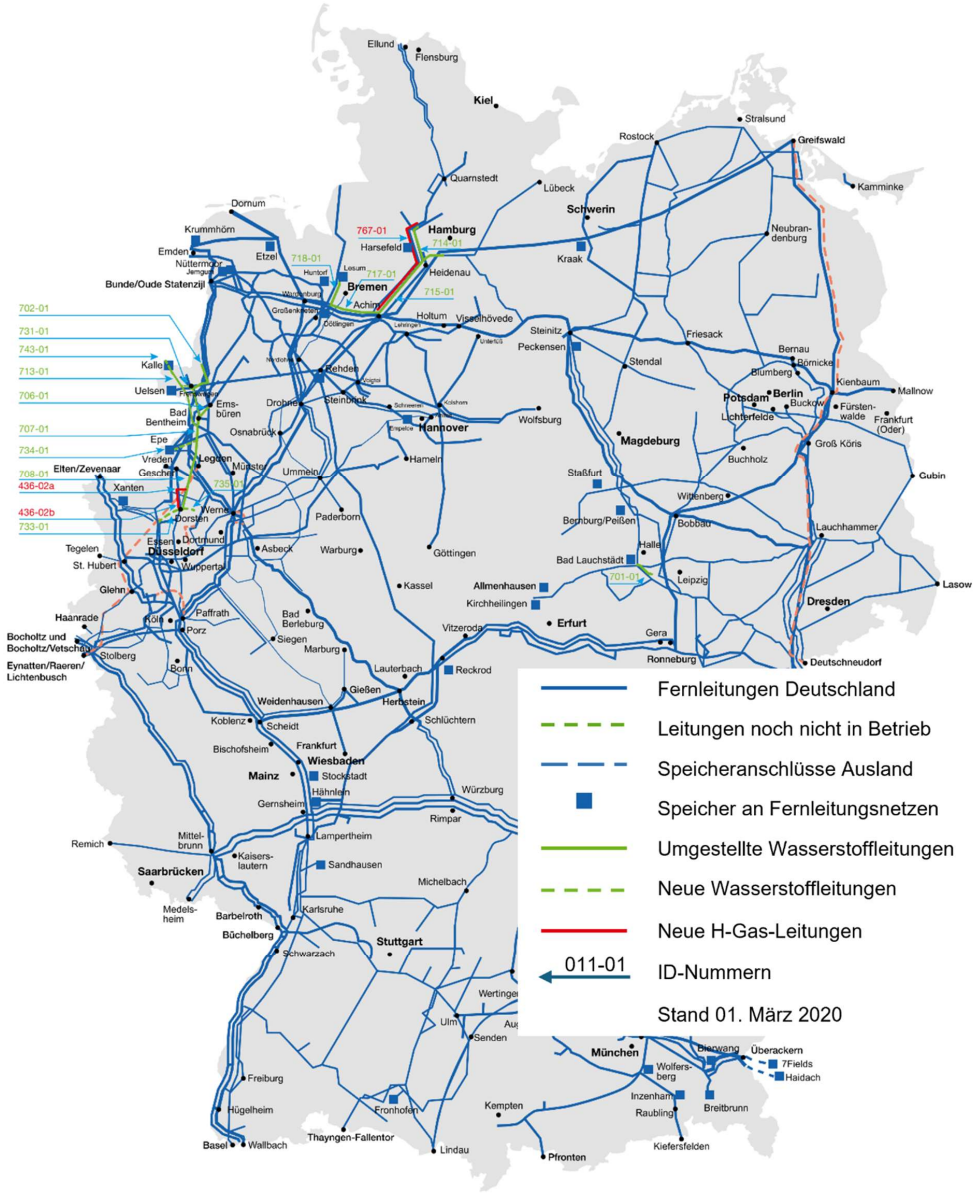


Abbildung 3.1.4.2: Überblick: Wasserstoffnetzwerktopologie 2025 (in Grün) gemäß Netzentwicklungsplan Gas 2020 [7].

Zur Erläuterung: Im Cluster Ost ist der UGS im Energiepark Bad Lauchstädt [108] mit einer Elektrolyse ausgestattet und mit dem Chemiepark Leuna verbunden. Auch wenn nicht explizit erwähnt, bietet sich hier ein Anschluss an das Wasserstoffnetz des Mitteldeutschen Chemiedreiecks an. Im Cluster Nord sind die Stahlwerke Bremen an das Netz angeschlossen, sowie die Endpunkte Elbe Süd und Eckel, wobei bei Letzteren keine genaue Funktion aus dem Netzentwicklungsplan ersichtlich war. Der NEP-Gas 2020 nennt lediglich ein Projekt im Cluster Nord. Am plausibelsten ist, dass Elbe Süd sowohl einen

zukünftigen Anschluss von Dow Deutschland und nach Brunsbüttel ermöglicht als auch als Anschlussleitung Richtung Dänemark, über die DEUDAN-Trasse, genutzt werden kann. Mit Perspektive jenseits 2030 könnte hier auch off-shore oder in Übersee erzeugter Wasserstoff angelandet werden, siehe zum Beispiel [109]. In Eckel ist vermutlich ein Anknüpfungspunkt an das Hamburger Verteilnetz gegeben. Eine Recherche ergab, dass am Kraftwerksstandort Hamburg-Moorburg [110] potentiell um das Jahr 2030 eine Elektrolyse entstehen könnte. Hier liegen lediglich Absichtserklärungen vor. Neben diesen beiden Standorten sind die Stahlwerke Bremen an das Netz im Cluster Nord angeschlossen. Hier ist allerdings anfangs eine Versorgung mit Wasserstoff durch eine Elektrolyse vor Ort geplant. Daraus ergibt sich im Rahmen hiesiger Modellierung für das Jahr 2025 keine Netznutzung des Clusters Nord. Dies ist allerdings nicht als faktische Feststellung zu sehen, sondern eher als Zeugnis geringer Transparenz. Regere Nutzung hingegen erfährt der Cluster West, in dem das Emsland mit dem Ruhrgebiet zusammenkommt. Hier existieren auf der Erzeugungs- bzw. Quellenseite, gemäß Netzentwicklungsplan, Windkraft-basierte Elektrolysen in Emsbüren und Ochtrup, sowie eine Elektrolyse auf dem RWE-Kraftwerksgelände in Lingen, im Rahmen des GET H2 Projekts, und eine große, in Vlieghuis angesetzte, Importkapazität aus den Niederlanden. Auf der Abnehmerseite sind die Chemiewerke von BP in Lingen und in Scholven (Gelsenkirchen) und der Chemiepark Marl, sowie das Stahlwerk von ThyssenKrupp Europe in Duisburg-Hamborn zu nennen. Während mögliche Abnahmemengen der Chemiewerke aus assoziierten Projekten vorlagen, ist die Abschätzung der anteilsmäßigen Umstellung der Stahlproduktion auf die Wasserstoffroute, die sich noch in der Erprobung befindet, schwieriger. Zudem ist zunächst auch eine lokale Versorgung über eine zu bauende Elektrolyseanlage auf dem benachbarten Werksgelände der STEAG geplant [111]. Gemäß eigenen Aussagen plant ThyssenKrupp eine Emissionsreduktion für Prozesse und Produktion um 30% [3] bis 2030. Demnach wurde hier, als Abschätzung für 2025, eine Nachfragemenge basierend auf 10% der recherchierten, jährlichen Stahlproduktion angesetzt. Langfristig existiert auch eine Kooperation zwischen Ørsted und BP Lingen zur Errichtung einer Elektrolyseanlage zur Erzeugung von grünem Wasserstoff aus Windenergie im Projekt Lingen Green Hydrogen [112]. Derzeit ist eine 50 MW_{el} Elektrolyse bis zum Jahr 2024 geplant mit langfristigem Ausbaupotential jenseits der 500 MW_{el}. Im Rahmen der Modellierung wurde hier BP Lingen trotzdem für 2025 als Netto-Verbraucher angesehen, später jedoch als Quelle. Ähnlich wie im Cluster Ost, existiert im Cluster West ein Untergrundspeicher in Epe mit möglicher Anbindung an das Wasserstoffnetz. Dieser soll allerdings erst 2026 in Betrieb gehen und fällt somit für das 2025 Szenario weg. Tabellen mit den zusammengetragenen Daten finden sich im Anhang I.7.

3.1.5. Lastfallerzeugung für das Wasserstoffnetzmodell 2025

Tabelle 3.1.5.1 gibt eine Übersicht über die Lastfallszenarien zum Jahr 2025.

Tabelle 3.1.5.1: Übersicht: Gerechnete Lastfallszenarien für das Jahr 2025.

2025	
Händisch erzeugte Lastfälle, d.h. durch den Autor modelliert	
Name	**Beschreibung**
Basisszenario	Marl, Scholven, Hamborn und Lingen beziehen Gas; Einspeisung primär durch Import in Vlieghuis und kleinere Quellen in Emsbüren, Hanekenfähr und Ochtrup. Bremen versorgt sich autark.
Zufällig erzeugte Lastfälle, d.h. Erzeugung von bilanziell ausgeglichenen Lastfällen mit Hilfe eines Hilfsoptimierungsproblems (siehe auch Kapitel I.4)	
Name	**Beschreibung**
-	-

Aufgrund der einschlägigen Quellen-/Senken-Situation wird für das Jahr 2025 ein händisch erzeugter Basislastfall bei zwei maximalen Druckniveaus, 30 bar und 60 bar, untersucht. Der minimale Abgabedruck an die Senken ist dabei pauschal 5 bar. Hintergrund der Unterscheidung nach maximalem Druckniveau ist zum einen das Bestreben, die Verdichtungskosten für den Betrieb gering zu halten. Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass keine netzinternen Verdichter zum Einsatz kommen und der notwendige Transportdruck an den Elektrolysestandorten und Importpunkten aufgebracht werden muss. Der andere Aspekt, der über Variation des maximalen Druckniveaus beleuchtet werden soll, ist der Einfluss eines höheren Druckniveaus auf die sich einstellenden Netzzustände, insbesondere auf die Fließgeschwindigkeiten. Der minimale Abgabedruck ist mit 5 bar frei gewählt. Ein Wert in dieser Größenordnung lässt sich wie folgt plausibilisieren: Im Erdgas-Fernleitungsnetz sieht man häufig eine untere Schranke von 16 bar Betriebsdruck am Übergang vom Fernleitungsnetz zu regionalen Verteilnetzen. Diese ist auf die geltenden Bestimmungen für die maximal zulässigen Betriebsdrücke von Anlagen und Armaturen des Gasbetriebs zurückzuführen. Ab einem Betriebsdruck $\geq$ 16 bar gilt die Gashochdruckleitungsverordnung (GasHDrLtgV), wodurch hier eine Unterteilung in der Armaturenklassifikation stattfindet. Es ist allerdings zu bedenken, dass der Abgabedruck an regionale Verteilnetze zu einem großen Teil von den Transportbedarfen in den Netzen abhängt. Für das initiale, deutsche Wasserstoffnetze mit seinen industriellen Betreibern ist vorerst nicht von weitreichenden Transportbedarfen jenseits der modellierten Ausspeisepunkte auszugehen und daher eine niedrigere Schwelle gerechtfertigt.

3.1.6. Beschreibung des Wasserstoffnetzmodells 2025

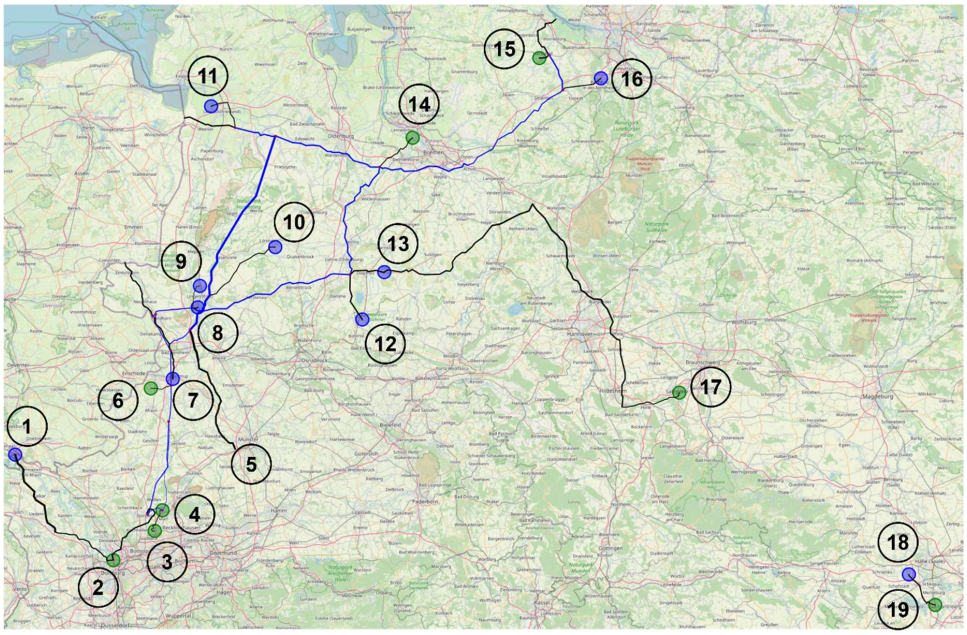


Abbildung 3.1.6.1: Überblick: Modellierte Wasserstoffnetzwerktopologie 2030. Blaue Kreise stehen für Quellen, und Grüne Kreise für Senken (siehe Tabelle 3.1.6.1). In dieser Darstellung dienen die Kreise lediglich der Verortung der Quellen und Senken und geben keinerlei Auskunft über Ein- oder Ausspeisemengen.

Tabelle 3.1.6.1: Legende zu Abbildung 3.1.6.1.

	Quellen und Senken		
Nummer		**Nummer**	
1	Elten (Import)	11	Nüttermoor/UGS Jemgum
2	TK Steel Europe Duisburg	12	Drohne
3	BP Gelsenkirchen (Scholven)	13	Rehden
4	Chemiepark Mark	14	Stahlwerke Bremen
5	Münster-Albachten	15	UGS Harsefeld
6	UGS Epe	16	Eckel
7	Ochtrup	17	Salzgitter Flachstahl
8	RWE Lingen Kraftwerksgelände/ Elektrolyse	18	UGS Bad Lauchstädt/Elektrolyse
9	BP Lingen	19	Chemiepark Leuna
10	Löningen		

Farblegende
Quellenknoten
Senkenknoten
Verbindungsknoten
Pipeline
Absperrventil
Kurzleitung
Druckregelventil
Kompressor
Nichtlinearer Widerstand
Linearer Widerstand
Sicherheitsventil
Komponente mit einem fixierten Fluss

Die geo-referenzierte Netzwerktopologie für 2030 ist in Abbildung 3.1.6.1 dargestellt, und zum Vergleich die Topologieabbildung aus dem NEP-Gas 2020 in Abbildung 3.1.6.2.

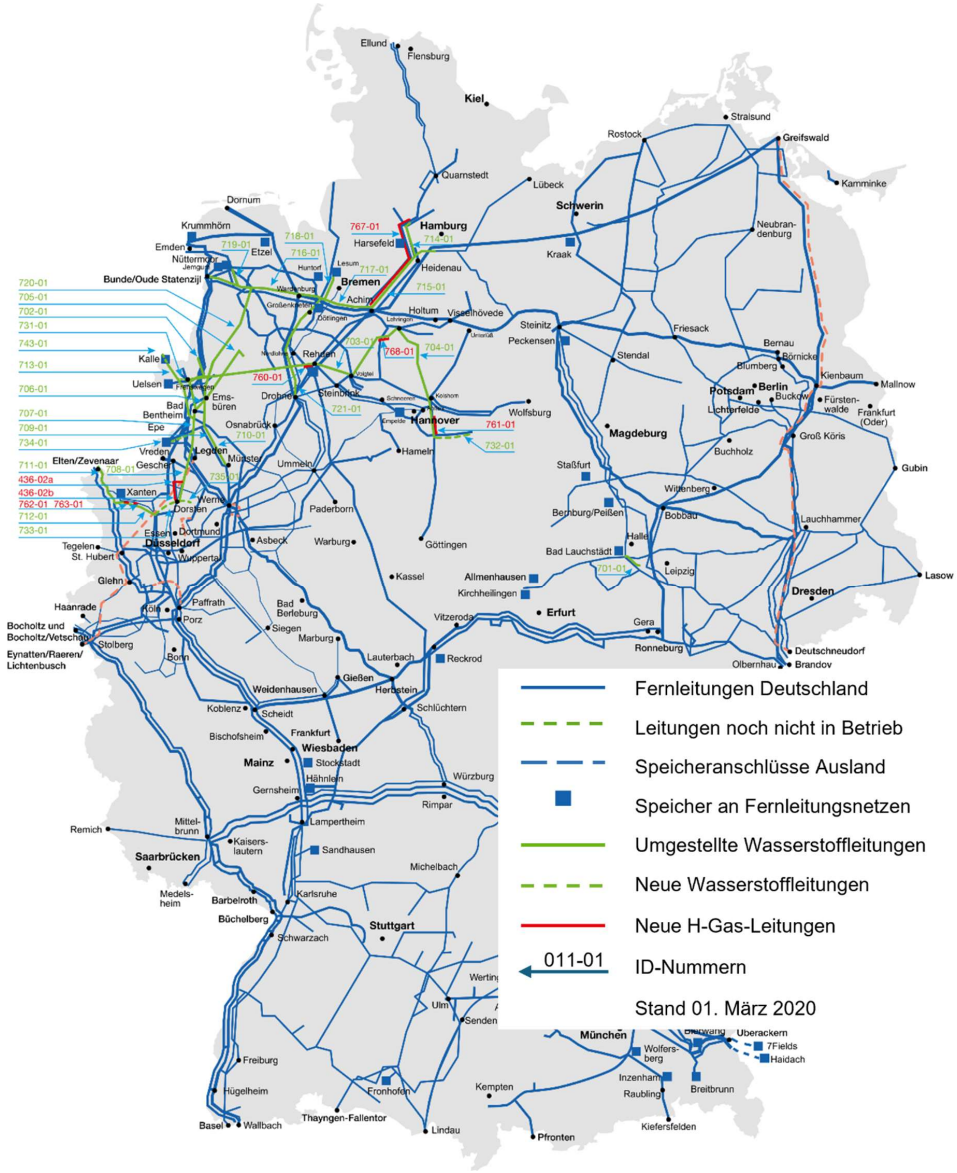


Abbildung 3.1.6.2: Überblick: Wasserstoffnetzwerktopologie 2030 (in Grün) gemäß Netzentwicklungsplan Gas 2020 [7]. Quelle: FNB Gas e.V.

Es ist ersichtlich, dass bis 2030 die Cluster West und Nord zusammengewachsen sind. Nun ist auch der UGS Epe an das Wasserstoffnetz angeschlossen, sowie weitere UGS in Nüttermoor/Jemgum und Harsefeld. Der Import aus den Niederlanden wurde, vom Szenariojahr 2025 zum Szenariojahr 2030, im Netzentwicklungsplan, auf den Grenzübergangspunkt Elten umgelegt, ohne weitere Erklärung. Eine mögliche Erklärung ist die größere Pipelineanbindung in Verbindung mit der zu erwartenden großen Nachfrage im Ruhrgebiet. Andererseits wäre zu erwarten, dass weiterhin beide Routen für den Import zur

Verfügung stünden. Auf der Abnehmerseite ist Salzgitter Flachstahl an das Wasserstoffnetz angebunden. Am Standort Münster-Albachten war unklar, ob hier Ein- oder Ausspeisung stattfindet, oder was überhaupt dort angeschlossen ist. Daher wurde hier keinerlei Ein- oder Ausspeisekapazität angesetzt. Mit Drohne und Rehden sind weitere Elektrolysestandorte zur Erzeugung von Wasserstoff aus Windkraft hinzugekommen. Insgesamt ergibt sich für 2030 eine verbesserte Vernetzung der Cluster, erweiterte Speicheroptionen und leicht erhöhte Einspeisekapazitäten, sowie höhere Ausspeisekapazitäten. In der Tat sind die im NEP-Gas 2020 genannten Einspeisekapazitäten deutlich unter den gemeldeten Ausspeisekapazitäten (vgl. Tabelle 2.4.3.2). Das heißt hier wird ein Engpass auf der Produktionsseite antizipiert, der in den kommenden Jahren dringend adressiert werden muss.

3.1.7. Lastfallerzeugung für das Wasserstoffnetzmodell 2030

Tabelle 3.1.7.1 gibt eine Übersicht über die Szenarien zum Jahr 2030.

Tabelle 3.1.7.1: Übersicht: Gerechnete Lastfallszenarien für das Jahr 2030.

2030	
Händisch erzeugte Lastfälle, d.h. durch den Autor modelliert	
Name	**Beschreibung**
Basisszenario	Bremen versorgt sich lokal autark. Hamborn, Hallendorf, Marl, Scholven, und Leuna sind Verbraucher. UGS Epe und Harsefeld am Netz, aber ohne Last. Bedarfsdeckung durch Elten (Import), Lingen Industriepark und Lingen Hanekenfähr, Löningen, Nüttermoor(UGS), Eckel, Drohne, Rehden, Ochtrup.
Variation 1	Hamborn lokal versorgt. Nachfrage in Hallendorf, Scholven, Bremen, Marl, Epe, Harsefeld und Leuna. Deckung durch Elten, Lingen, Hanekenfähr, Löningen, Rehden, Ochtrup, Eckel, Drohne, Nüttermoor, Bad Lauchstädt.
Variation 2	Hamborn lokal autark versorgt. Weitere Nachfrage in Hallendorf, Bremen, Scholven, Epe, Marl, Harsefeld, Leuna. Primär gedeckt durch Import in Elten, sowie Produktion in Lingen und Hanekenfähr.
Zufällig erzeugte Lastfälle, d.h. Erzeugung von bilanziell ausgeglichenen Lastfällen mit Hilfe eines Hilfsoptimierungsproblems (siehe auch Kapitel I.4)	
Screening 1	200 Lastfälle, keine künstlichen, globalen Druckschranken. Druckmaximierung mit 10% zulässigem Optimality-Gap.
Screening 2	Screening 1 mit zusätzlicher, globaler Druckunterschranke von 30 bar.
Screening 3	200 Lastfälle, Druckoberschranke von 30 bar. Druckminimierung mit 10% zulässigem Optimality-Gap.
Screening 4	200 Lastfälle, 80% zu deckende Mindestnachfrage bei der Industrie. Druckmaximierung mit 10% zulässigem Optimality-Gap.

Für das Jahr 2030 werden drei händisch erzeugte Lastfälle betrachtet (Basisszenario, Variation 1, Variation 2) und nach maximalem Druckniveau (30 bar, 60 bar), sowie nach der angesetzten Rohrrauigkeit der Pipelines unterschieden (0,1 mm, 1 mm), um dessen Einfluss auf Rechnungen zu beleuchten, da es sich hier um pauschal angesetzte Literaturwerte handelt (vgl. auch Tabelle 4.1.10.2). Während einzelne Lastfälle gut greifbar sind, sind sie wenig aussagekräftig hinsichtlich des Netzverhaltens jenseits der betrachteten Ein-/Ausspeisesituation und die zu betrachtenden Fälle fächern sich schnell

in eine Vielzahl auf. Daher wurden, neben händisch erzeugten Szenarien, drei Screening-Rechnungen à 200 Lastfällen durchgeführt. Die Lastfälle wurden mittels einer Zufallsheuristik erzeugt.

Im Szenariojahr 2030 werden die Chemieparks nach wie vor durch das Netz versorgt. Für die Stahlwerke Bremen wird weiterhin eine lokale Versorgung angenommen. Beim Chemiewerk von BP in Lingen hingegen wurde aufgrund der geplanten Elektrolyse in Kooperation mit Ørsted eine Netto-Einspeisung angesetzt. Es werden große Abnahmemengen durch ThyssenKrupp in Duisburg-Hamborn berücksichtigt, in Übereinstimmung mit den beabsichtigten Umstellungszielen. In späteren Szenarien wird die Nachfrage auf andere Stahlwerke und Speicher umverteilt, unter der Annahme lokaler Versorgung von ThyssenKrupp.

Im Basisszenario ist der Hauptverbraucher ThyssenKrupp in Duisburg-Hamborn mit einer geschätzten Abnahme von 6,65 kg/s, gefolgt von Salzgitter Flachstahl (2,11 kg/s) und den Chemieparks in Scholven, Marl und Leuna. Versorgt werden diese primär über den Import aus den Niederlanden in Elten (5,58 kg/s) gefolgt von den Elektrolysen am Kraftwerksstandort Lingen-Hanekenfähr (1.59 kg/s) und im Chemiepark Lingen (1,4 kg/s), sowie kleineren verteilten Einspeisungen im Bereich von 0,16 - 0,72 kg/s.

Abbildung 3.1.7.1 gibt einen Überblick über die Quellen-/Senkenverteilung im Basisszenario.

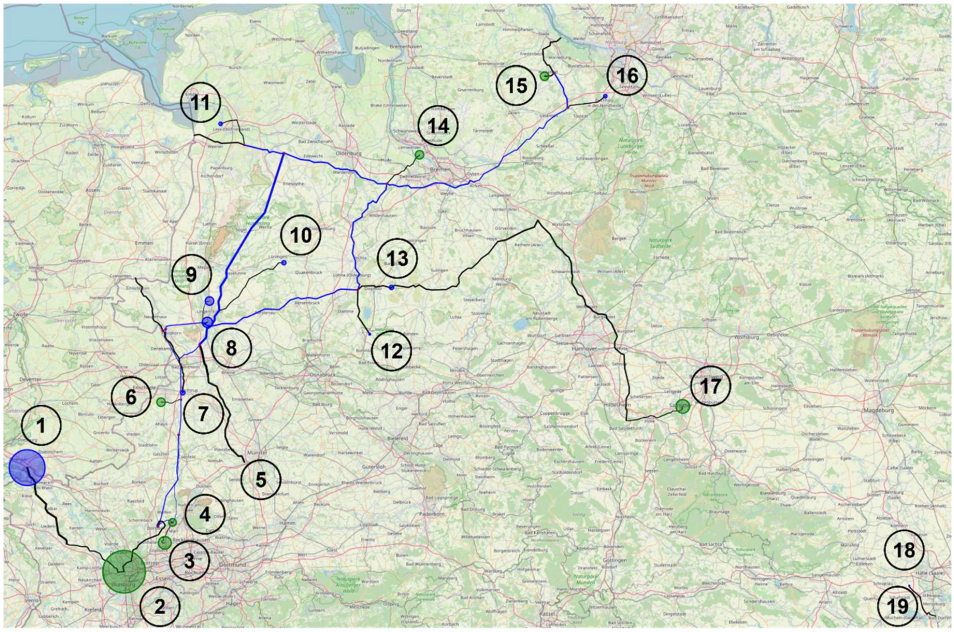


Abbildung 3.1.7.1: Überblick über die Quellen- und Senkenverteilung im Basisszenario 2030. Die Kreisgrößen stellen die relative lokale Ein-/Ausspeisung im Verhältnis zur maximalen Ein-/Ausspeisung innerhalb des Szenarios dar, wobei die Skalierung über den Radius (nicht die Fläche) erfolgt. Zur Wahrung der Lesbarkeit sind Mindest- und Maximalradien definiert. Ein Vergleich der Kreisgrößen zwischen verschiedenen Szenarien ist daher nicht zulässig.

Tabelle 3.1.7.2: Legende zu Abbildung 3.1.7.1

Nummer	Quellen und Senken
1	Elten (Import)
2	TK Steel Europe Duisburg
3	BP Gelsenkirchen (Scholven)
4	Chemiepark Mark
5	Münster-Albachten
6	UGS Epe
7	Ochtrup
8	RWE Lingen Kraftwerksgelände/Elektrolyse
9	BP Lingen
10	Löningen
11	Nüttermoor/UGS Jemgum
12	Drohne
13	Rehden
14	Stahlwerke Bremen
15	UGS Harsefeld
16	Eckel
17	Salzgitter Flachstahl
18	UGS Bad Lauchstädt/Elektrolyse
19	Chemiepark Leuna

Farblegende	
	Quellenknoten
	Senkenknoten
	Verbindungsknoten
	Pipeline
	Absperrventil
	Kurzleitung
	Druckregelventil
	Kompressor
	Nichtlinearer Widerstand
	Linearer Widerstand
	Sicherheitsventil
	Komponente mit einem fixierten Fluss

Im Szenario Variation 1 wurde die sehr einseitige Nachfrage aufgelöst. Es wird angenommen, dass sich ThyssenKrupp vollständig durch lokale Elektrolyse versorgt und demnach mehr H_2 andernorts zur Verfügung steht. Die Nachfragen der Chemieparks sind hier gleich, allerdings werden die UGS in Harsefeld und Epe mit 0,53 kg/s, respektive 1,07 kg/s befüllt. Die Einspeiseverteilung ist vergleichbar mit dem Basisszenario, wobei deutlich weniger in Elten importiert wird. Da dieses Szenario ein reduziertes darstellt, wurde im folgenden Szenario Variation 2 die Importmenge in Elten angehoben (7,51 kg/s) und eine erhöhte Nachfrage in Hallendorf (4,82 kg/s) und in Bremen (4,29 kg/s) angesetzt.

Wie bereits erwähnt, wurde eine Vielzahl an Lastfällen semi-zufällig erzeugt. Durch eine breite Abdeckung möglicher Flusskombinationen soll das kumulative Netzverhalten untersucht werden. Hier sind beispielsweise die Lösbarkeit der Flussprobleme, die maximale auftretende Fließgeschwindigkeit, sowie die sich einstellenden Drücke an den Knoten zu betrachten. Vorausgesetzt die Stichprobe und Netzmodellierung sind repräsentativ, so können letztere Anhaltspunkte für mögliche garantierbare Abgabedrücke bei der Ausspeisung liefern. Die Methode zur Erzeugung dieser Lastfälle soll kurz vorgestellt werden.

3.1.8. Semizufällige Lastfallerzeugung

Im Rahmen einer durch den Autor betreuten Masterarbeit [113] wurde eine Methode entsprechend Variante 2 der vorgeschlagenen Alternativen zur Lastfallerzeugung (Tabelle 3.1.3.1) implementiert. Die Grundproblematik liegt darin, dass bei vielen Recherchen lediglich Ober- und Unterschranken für die zulässigen Netz-Ein- und -Ausspeisungen zu finden sind[38] und die Extrapolationsfähigkeit auf Basis einiger weniger Lastfälle gering ist. Hinzu kommt, dass die lokale Bilanzierung für Wasserstoff Ein- oder Ausspeisung einzelner Betriebe unklar ist. Folglich ist es erstrebenswert viele Lastfälle zu rechnen, falls der Ressourcenaufwand es zulässt. Die zufällige Ziehung von Kandidaten aus diesen Intervallen führt in der Regel zu einem Lastfall, der keine Nullsumme bildet - dies ist jedoch in den meisten Fällen sinnvoll und von stationären Modellen gefordert. Daher wurde eine, hier als semi-zufällige Lastfallerzeugung betitelte, Methode formuliert, die der Idee eines Regressionsproblems folgt. Dabei wird ein zufällig gezogener Lastfallkandidat, bestehend aus Ein- und Ausspeisungen, als fehlerbehafteter Messdatensatz interpretiert. Es wird nun ein Lastfall gesucht, der die Zusatzbedingung der Nullsumme erfüllt und minimalen Abstand (hier: in der $||\cdot||_1$-Norm) zum initialen Lastfallkandidaten aufweist. Es handelt sich also um eine Zufallsheuristik. Das zugehörige Optimierungsproblem ist in *Gl. 7.1 - Gl. 7.12* dargestellt.

Weitere Einschränkungen können nach Belieben ergänzt werden. Dazu gehören beispielsweise Schranken für die maximale Abweichung einer Lösung vom Kandidaten oder auch der Ausschluss von Lastfällen, deren Nettofluss im Vergleich zu einer Referenz zu gering ist, als dass er im Rahmen eines Szenarios als interessant bewertet werden kann. Praktischerweise lassen sich auch weitere Einschränkungen einfach handhaben. Im NEP-Gas 2020 sind mitunter mehrere Standorte mit einer gemeinsamen maximalen Einspeiseleistung angegeben. Eine solche Nebenbedingung lässt sich hier problemlos integrieren. Das Ergebnis einer solchen Ziehung ist in Abbildung 3.1.8.1 dargestellt.

[38] z.B. geplante Elektrolyseleistung von 30 MW_{el}

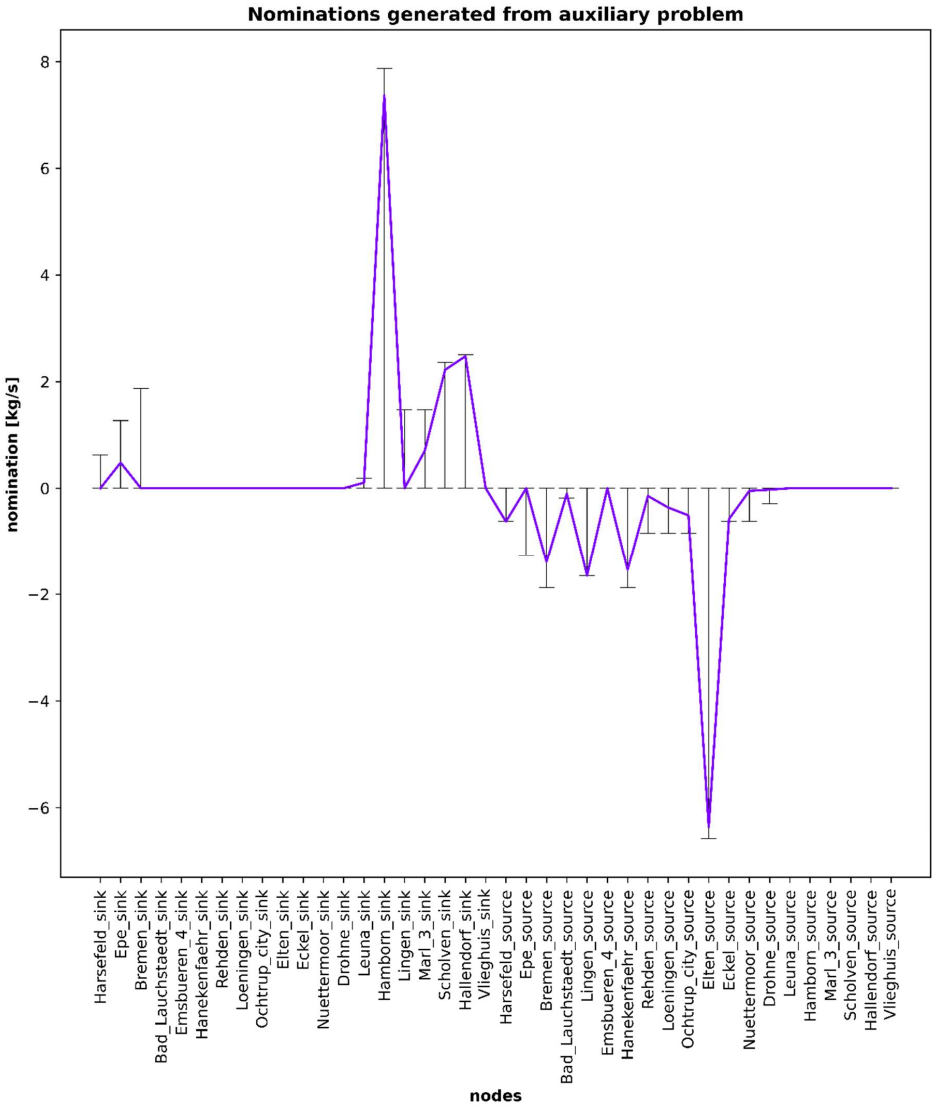


Abbildung 3.1.8.1: Beispielhafter Lastfall: Ein-/Ausspeiseintervalle mit darauf verorteten Lastflüssen. In diesem Beispiel wird eine Mindestnachfrage für jene Standorte angenommen, deren untere Intervallgrenze nicht auf der Nulllinie liegt. Hinweis zur Darstellung: Die Linienverbindung dient lediglich der verbesserten Sichtbarkeit, falls mehrere Lastfälle gleichzeitig abgebildet sind. Jeder Quellen-/Senkenknoten ist, analog zur Problemformulierung in *Gl. 7.1 - Gl. 7.12*, einmal als Senke (linke Hälfte) und einmal als Quelle (rechte Hälfte) aufgeführt.

3.1.9. Addendum: Lastprofil-basierte Lastfallerzeugung und Modellierung des Wasserstoffnetzmodells gemäß Entwurf Szenariorahmen des NEP-Gas 2022

Wie zuvor erwähnt wurde Variante 3 gemäß Tabelle 3.1.3.1 im Rahmen einer Masterarbeit [114] für ein deutschlandweites Wasserstoffnetzmodell umgesetzt. Dabei wurden industrielle Wasserstoffverbraucher und ihre potenziellen Nachfragemengen recherchiert Tabelle 3.1.9.1, sowie Wasserstofferzeugungsprojekte und ihre Erzeugungskapazitäten Tabelle 3.1.9.2 und Tabelle 3.1.9.3.

Für die Verbraucher wurden Standardlastprofile [140] angesetzt, während eine Wasserstofferzeugung aus erneuerbaren Energien angenommen wurde. Erzeugungsprofile wurden durch Skalierung von mittels GlobalEnergyGIS [141] erzeugten EE-Potenzialen abgebildet.

Tabelle 3.1.9.1: Zukünftige Wasserstoffverbraucher NEP-Gas 2020 nach [114]

Id	Firmenname	Gasnachfrage [MWh]	Industrie
1	SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH	13,606,000 [115]	Chemie
2	Chemiepark Knapsack	7,569,219*	Chemie
3	Chemiepark Marl	1,200,000 [116]	Chemie
4	Chemie- und Industriepark Zeitz	13,203,770*	Chemie
5	Ruhr Oel GmbH - BP Gelsenkirchen	1,920,000 [116]	Chemie
6	Infraserv Höchst	12,961,501*	Chemie
7	CHEMPARK Leverkusen	6,282,394*	Chemie
8	Chemiepark Bitterfeld-Wolfen GmbH	7,136,549*	Chemie
9	Chemiestandort Leuna	1,563,000 [117]	Chemie
10	Industriepark Solvay Bernburg	6,492,529*	Chemie
11	Sasol Germany GmbH	676,111 [118]	Chemie
12	Dow	1,508,000*	Chemie
13	BP Raffinerie Lingen	1,200,000 [116]	Chemie
14	Bayernoil Raffinerie Neustadt	1,762,287 [119]	Chemie
15	Bayernoil Raffinerie Vohburg	1,762,287 [119]	Chemie
16	Saarstahl	503,000 [120]	Stahl
17	Salzgitter AG	798,804*	Stahl
18	ArcelorMittal Eisenhüttenstadt	1,625,000 [121]	Stahl
19	ArcelorMittal Bremen	1,625,000 [121]	Stahl
20	Thyssenkrupp Steel	1,237,500 [121]	Stahl

Tabelle 3.1.9.2: Geplante Wasserstoffprojekte gemäß NEP-Gas 2020 nach [114]

Id	Projektname	Kapazität [MW]	Ort
21	Statkraft Emden	50 [122]	Emden
22	Element EINS	100 [123]	Diele
23	HySynGas	50 [124]	Brunsbüttel
24	Audi Industriegas	6 [125]	Werlte
25	BW Bürgerwindpark Fehndorf/Lindloh	2 [126]	Fehndorf
26	Hybridge	100 [127]	Lingen
27	PtG STEAG	500 [128]	Duisburg
28	Wasserstoffeinspeisung Mainz	2 [129]	Mainz

Tabelle 3.1.9.3: Geplante Wasserstoffprojekte die in den IPCEI[39] veröffentlich wurden, nach [114]

Id	Projektname	Kapazität [MW]	Ort
29	HGHH Hamburg	100 [130]	Hamburg
30	Clean Hydrogen Coastline	200 [131]	Oldenburg
31	GET H2	100 [132]	Emsland
32	GreenMotionSteel	120 [133]	Duisburg
33	Doing Hydrogen APEX	100 [134]	Rostock
34	Doing Hydrogen ENERTRAG	210 [135]	Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt
35	Green Hydrogen Hub	24 [136]	Saalekreis
36	Hydrohub Fenne	17.5 [137]	Saarbrücken
37	GH@BD	1500 [138]	Bayern
38	HyTechHafen	1000 [139]	Rostock

[39] Important Projects of Common European Interest

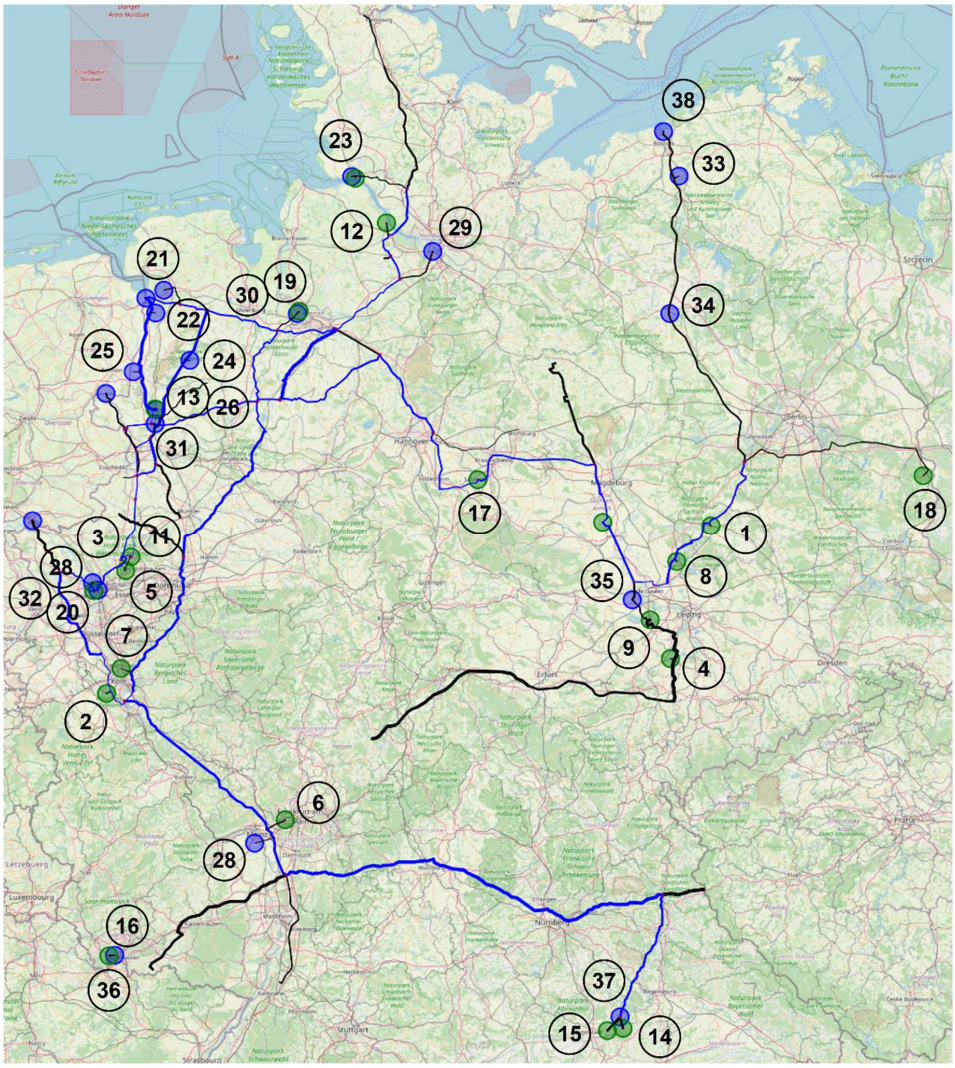


Abbildung 3.1.9.1: Überblick: Modellierte Wasserstoffnetzwerktopologie 2030 ([114]) gemäß Entwurf Szenariorahmen NEP-Gas 2022 (Stand Juni 2022). Blaue Kreise stehen für Quellen, und grüne Kreise für Senken, wobei in dieser Darstellung die Kreise lediglich der Verortung der Quellen und Senken dienen und keinerlei Auskunft über Ein- oder Ausspeisemengen geben. Die Nummerierung der Quellen und Senken entspricht der „Id"-Spalte aus Tabelle 3.1.9.1, Tabelle 3.1.9.2 und Tabelle 3.1.9.3.

Tabelle 3.1.9.4: Farblegende zu Abbildung 3.1.9.1

Farblegende							
	Quellenknoten		Kompressor		Absperrventil		Fixierter Fluss
	Senkenknoten		Nichtlinearer Widerstand		Kurzleitung		Druckregelventil
	Verbindungs-knoten		Linearer Widerstand				
	Pipeline		Sicherheitsventil				

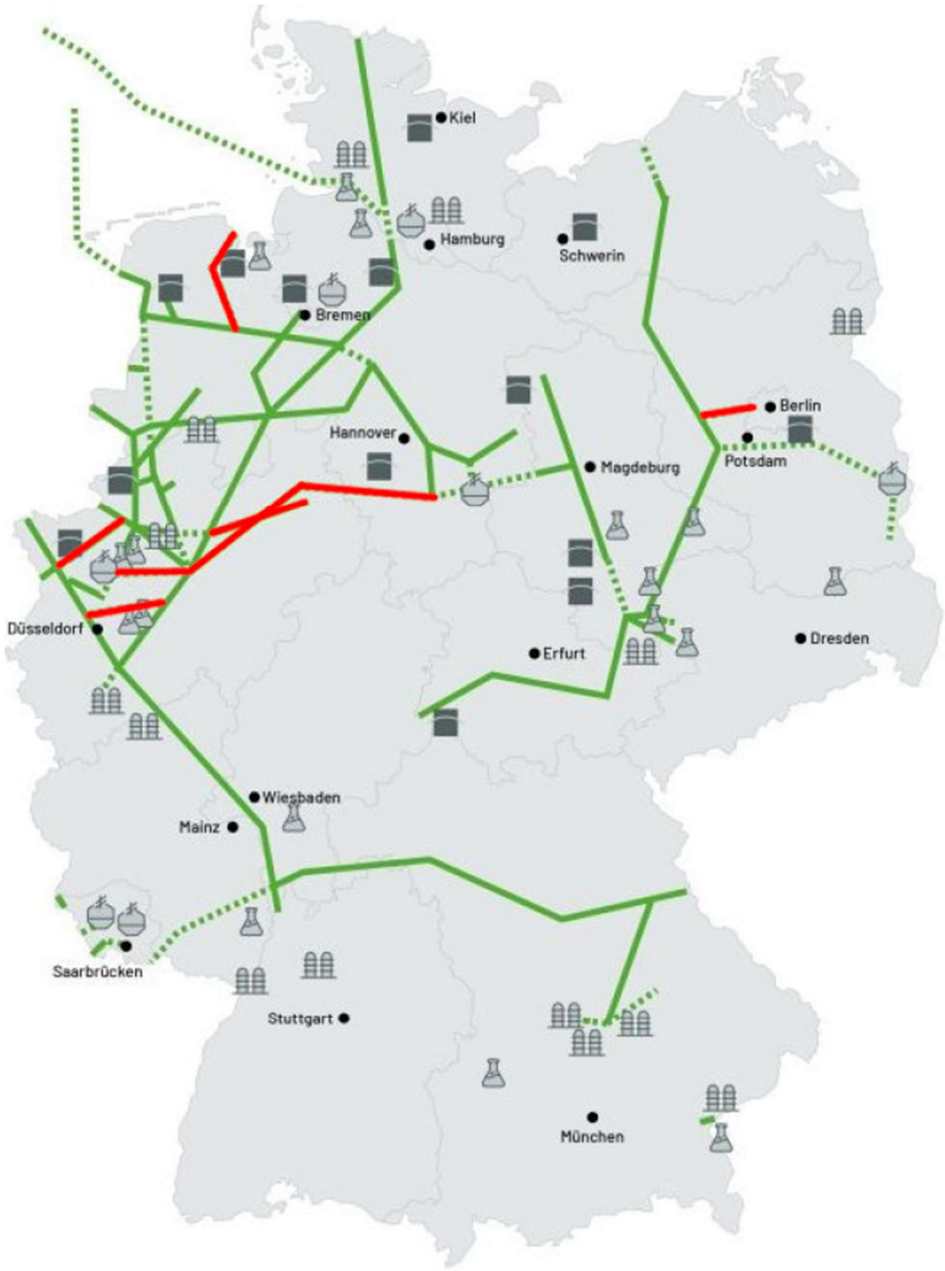


Abbildung 3.1.9.2: Skizze des geplanten Netzes 2030 gemäß Entwurf Szenariorahmen NEP-Gas 2022

Zur Erzeugung stündlicher Lastfälle wurde angenommen, dass Stahlwerke in 2030 30% ihres Gasverbrauchs durch Wasserstoff ersetzen können. Für Chemieparks wurden 10% angesetzt. Mögliche Importe aus dem Ausland wurden in Vlieghuis, Oude-Statenzijl und

Elten allokiert. Ziel der Szenariorechnungen an dieser Stelle war es eine chronologische Abfolge stündlicher Lastfälle durchzuführen. Dazu wurden drei aufeinander folgende Wochentage ab dem 07.01.2030 betrachtet (Stunde 145 bis Stunde 217 des Jahres = 72 Stunden).

3.2. Szenario 2: Energieäquivalente Wasserstoff Lastflüsse im deutschen H-Gas-Netz

3.2.1. Beschreibung/kurzer Abriss

Wenn die Zukunft des deutschen Erdgasnetzes betrachtet wird, gehen die Meinungen häufig auseinander, wo die Entwicklung hingeht, insbesondere wenn ein Zielhorizont von 2050 und darüber hinaus anvisiert wird. Die Frage, ob sich das deutsche Erdgasnetz zu einem reinen Wasserstoffnetz entwickeln wird, ist sicherlich eine facettenreiche und mit großer Unsicherheit behaftet - nicht zuletzt da Deutschland quasi als Gashub für Europa fungiert. Dieses Szenario betrachtet folglich, ob eine energieäquivalente Gasversorgung bei einem Gasaustausch von Erdgas durch Wasserstoff denkbar wäre und wenn ja, unter welchen Einschränkungen.

Zu diesem Zweck werden auf Basis eines modifizierten Datensatzes aus [105] Extremlastfälle in einem Modell des deutschen H-Gas-Netzes betrachtet. Die Größe- und Allokation von Ein- und Ausspeisungen in diesem Szenario ist für Erdgas und Wasserstoff gleich. Dies ist zwar unrealistisch für die Jahre 2050+, aber um eine erste Einschätzung zu tätigen, wie sich Erdgas- und Wasserstoffkapazitäten zueinander verhalten, gerechtfertigt. Darüber hinaus bietet das große Netzmodell Anhaltspunkte zur aktuellen Rechenzeit und damit für zukünftige Verbesserungen von Modell und Implementierung.

3.2.2. Fragestellungen

Auch in diesem Szenario werden Flüsse, Drücke und Schaltzustände im Netz betrachtet. Ebenso werden Fließgeschwindigkeiten ausgewiesen. Der Fokus liegt allerdings auf der reinen Lösbarkeit der Lastfälle und dem Vergleich, ob ein lösbarer Erdgas-Lastfall energetisch auch durch Wasserstoff transportiert werden könnte. Falls dies nicht der Fall ist, soll eine Knoten-Slack-Formulierung darüber Aufschluss geben, welche Menge an Erdgas oder Wasserstoff nicht transportierbar ist.

3.2.3. Datenbasis

Ausgangspunkt für dieses Szenario ist eine vereinfachte Netztopologie des H-Gas-Netzes samt eines sektorscharfen, stündlichen Verteilschlüssels und Sektor-Absolutwerten für das Jahr 2015. Die Daten wurden im Rahmen der Dissertation [105] zusammengetragen und für diese Arbeit zur Verfügung gestellt. Dabei basiert die Netztopologie ursprünglich auf den Datensätzen [10], [100], und die Absolutwerte der Sektor-Lastfalldaten auf einer Erdgasbilanz der AGEB aus dem Jahr 2015. Zur Verteilschlüsselerzeugung wurden verschiedene Daten und Datenquellen verschnitten - hier sei auf die Arbeiten [105], [142] verwiesen. Die resultierenden Sektoren und ihre Einteilung in knotenscharf und flächig können der Tabelle 3.2.3.1 entnommen werden.

Tabelle 3.2.3.1: Liste der als knotenscharf und als flächig angesetzten Sektoren.

knotenscharf	flächig
Import	Heizkraftwerke
Export	Haushalte
Inländische Produktion/Förderung	Industrie
Speicher-Ein	Mobilität
Speicher-Aus	nicht-energetischer Verbrauch
Kraft-Wärme-Kopplung Industrie	Dienstleistungen
Kraft-Wärme-Kopplung öffentlich	Bio-Methan
Kraftwerke öffentlich	Andere

Zeitverläufe der jeweiligen Sektoren sind in Abbildung 5.2.3.1 - Abbildung 5.2.3.16 im Anhang abgebildet. Ein paar Eckdaten zur Größe der repräsentierten Netzwerktopologie können Tabelle 3.2.3.2 entnommen werden.

Tabelle 3.2.3.2: Eckdaten: Netztopologie H-Gas.

Ausprägung	Wert
# Senken	1061
# Quellen	30
# Zwischenknoten	280
# Pipelineabschnitte	1243
# Verdichter/Verdichterstationen	34
# Kurzrohre	54
# Absperrventile	109
# Druckregelventile	151
Gesamtlänge	>17854 km
Druckniveau (Überdruck)	16 - 100 bar
Pipelinedurchmesser-Klassen	100 mm - 1400 mm

Dabei weisen die Sektoren sektorspezifische, charakteristische Verläufe auf. Während der eine Teil der Sektoren knotenscharf gegeben ist, muss der flächige Anteil erst noch aufgeteilt werden. Hier fand eine eigene Heuristik Anwendung. Die knotenscharfe Zuweisung von geoflächenbezogenen Größen ist eine häufige Aufgabe in der Energiesystemmodellierung. Dies liegt daran, dass viele öffentlich verfügbare Daten pro

NUTS-Level[40] erhoben werden. Das heißt, es liegt beispielsweise eine Zahl für die gesamte beheizte Wohnfläche eines Landkreises vor, d.h. es ist eine mittlere beheizte Wohnfläche pro Flächeneinheit der in diesem Fall NUTS-3-Region ausweisbar. Sollen nun flächenbezogene Erdgasbedarfe auf Netzknoten zugewiesen werden, so ist es notwendig, die Gesamtfläche hinsichtlich ihrer Netzknotenzugehörigkeit neu aufzuteilen. Eine verbreitete Herangehensweise ist, jeden Punkt der Ebene genau dem Netzknoten zuzuordnen, der die kürzeste Distanz zu diesem aufweist. Dies ist die Idee der so genannten Voronoi-Polygone. Wird anschließend die Flächenaufteilung durch die Voronoi-Polygone über die Flächenaufteilung der NUTS-Regionen gelegt, so ergeben sich Schnittmengen einzelner NUTS-Regionen, die einem bestimmten Netzknoten flächenanteilig zugewiesen werden können. Wie repräsentativ diese Aufteilung ist, hängt sowohl von der ursprünglichen räumlichen Auflösung (z.B. NUTS-3-Level) als auch von der Anzahl und Verteilung der Netzknoten (neue räumliche Aufteilung) ab. Das heißt, eine geringe Anzahl und heterogene Verteilung von Netzknoten führt potenziell dazu, dass einzelne Netzknoten nichtrepräsentativ hohe Flächenanteile zugewiesen bekommen. Dies wiederum kann zur nichtrepräsentativen Einlastung der Flächenlasten ins Netz führen. Nähere Betrachtung der Abbildung 3.2.3.1 zeigt, dass gerade in der Mitte Deutschlands größere Gebiete existieren, die entweder in den Bereich der L-Gasversorgung fallen oder durch große überregionale Verteilnetze abgedeckt werden. Hier ist folglich Vorsicht geboten.

[40] NUTS bezeichnet eine hierarchische Systematik zur eindeutigen Identifizierung und Klassifizierung der räumlichen Bezugseinheiten der amtlichen Statistik in den Mitgliedstaaten der Europäischen Union. [143]



Abbildung 3.2.3.1: Überblick: Graph der repräsentierten Netztopologie des deutschen H-Gas-Netzes. Die Breite der dargestellten Kanten ist proportional zum jeweiligen Pipelinedurchmesser. Das blaue Rechteck im Raum Nürnberg-Erlangen ist als Vergrößerung in Abbildung 3.2.3.2 dargestellt.

Abbildung 3.2.3.2 soll verdeutlichen, dass, obwohl im Überblick Abbildung 3.2.3.1 nicht zu erkennen, mehrsträngige Leitungen auch als solche ausgeführt sind.

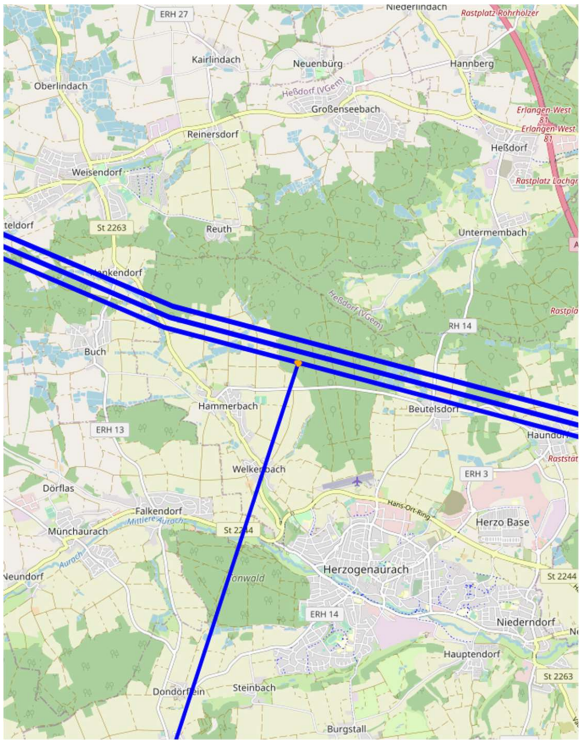


Abbildung 3.2.3.2: Mehrsträngig-ausgeführte Pipelines wurden auch als solche modelliert (siehe die in Abbildung 3.2.3.1 markierte MEGAL-Abzweigung (Box in der südlichen Hälfte).

Um nun eine verbesserte, feinere Aufteilung der Flächenlasten zu erzielen, wird ein höher aufgelöster Datensatz herangezogen auf dessen Netzknoten die Voronoi-Polygone gebildet werden. Anschließend werden mittels einer Breitensuche (BFS[41]) von jedem Knoten aus alle fein aufgelösten Voronoi-Knoten entlang des Pipelineverlaufs zum nächsten tatsächlich repräsentierten Netzknoten aggregiert. Bei gleichmäßiger räumlicher Knotenverteilung entlang der Pipelineverläufe sollte eine solche Zuordnung eine kürzeste Distanz entlang der Pipelineverläufe zum nächsten repräsentierten Netzknoten annähern. Weitere Kriterien, wie der jeweilige Pipelinedurchmesser, werden dabei außenvor gelassen. Als höher aufgelöster Datensatz wurde hier der größte, zusammenhängende Cluster der VGE-Gasnetzkarte herangezogen. Dieser enthält deutlich über 99% aller im Gesamtdatensatz enthaltenen Knoten. Der Datensatz wurde nicht direkt für die Berechnungen verwendet, da es sich um einen Rohdatensatz handelt und die Aufbereitung solch großer Datensätze sehr ressourcenintensiv ist. Das Prozedere der Knotenzuordnung ist in Abbildung 3.2.3.3 - Abbildung 3.2.3.5 veranschaulicht. Abbildungen, die diese Einlastung in Deutschland insgesamt darstellen, sind im Anhang in Abbildung 5.2.3.1 - Abbildung 5.2.3.3 zu finden.

[41] im Englischen: Breadth-First-Search

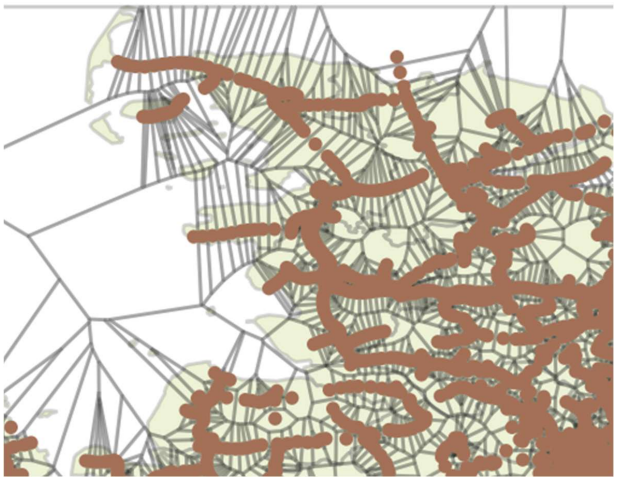


Abbildung 3.2.3.3: Verbesserte Einlastung flächenspezifischer Lasten unter Zuhilfenahme eines höher aufgelösten Datensatzes in Verbindung mit einer Breitensuche (BFS). Veranschaulichung der Knotenzuordnung auf Basis eines Zoom-Ausschnitts von Norddeutschland: 1. Schritt: Erzeugung von Voronoi-Polygonen um die Netzknoten des feinaufgelösten Datensatzes.

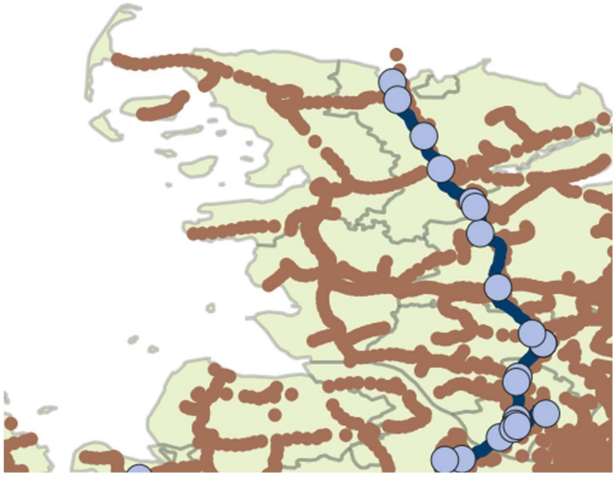


Abbildung 3.2.3.4: Verbesserte Einlastung flächenspezifischer Lasten unter Zuhilfenahme eines höher aufgelösten Datensatzes in Verbindung mit einer Breitensuche (BFS). Veranschaulichung der Knotenzuordnung auf Basis eines Zoom-Ausschnitts von Norddeutschland: 2. Schritt: Zuordnung der Knoten des reduzierten Netzwerkdatensatzes zu den nächsten Nachbarknoten des feinaufgelösten Netzwerks (Voronoi-Knoten).

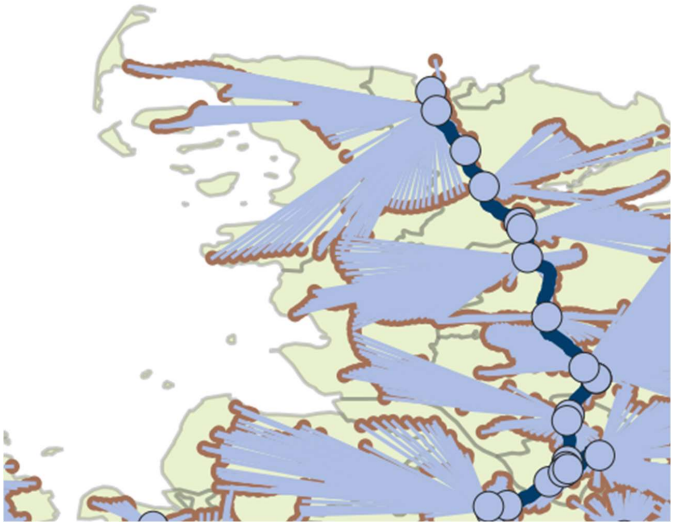


Abbildung 3.2.3.5: Verbesserte Einlastung flächenspezifischer Lasten unter Zuhilfenahme eines höher aufgelösten Datensatzes in Verbindung mit einer Breitensuche (BFS). Veranschaulichung der Knotenzuordnung auf Basis eines Zoom-Ausschnitts von Norddeutschland: 3. Schritt: Finale Zuordnung der fein aufgelösten Netzknoten zu den Einlastungsknoten des reduzierten Netzwerks. Dies geschieht mittels der Breitensuche, die es ermöglicht für jeden Knoten des feinaufgelösten Netzwerks diesen entlang des Pipelineverlaufs zu einem Knoten des reduzierten Netzwerks zurückzuverfolgen. Die sich ergebende Zugehörigkeit dieser Voronoi-Knoten zu den Knoten des reduzierten Netzwerks wird durch die blauen Verbindungslinien symbolisiert. Daraus lässt sich erkennen welche Flächenbereiche welchen Netzknoten zuzuordnen sind.

Als Lastfälle werden hier eine Reihe von randständigen stündlichen Nominierungen betrachtet. Die Nominierungen und ihre Auftrittszeitpunkte sind in Tabelle 3.2.3.3 aufgelistet. Diese sind randständig in dem Sinne, dass sie entweder minimale oder maximale Werte bezüglich einer Sektor-Ein- oder -Ausspeisung aufweisen. Somit werden nicht nur Spitzenlastfälle betrachtet, die potenziell die größte Herausforderung für die Übertragbarkeit des Netzes darstellen, sondern auch Lastfälle mit moderateren Bedingungen, die deutlich wahrscheinlicher lösbar sind.

Tabelle 3.2.3.3: Betrachtete stündliche Nominierungen nach Zeit und Auswahlkriterium.

Zeit	Auswahlkriterium
11.08.2015 15:00	max. Import
27.11.2015 17:00	min. Import
02.12.2015 05:00	max. Export
17.08.2015 09:00	min. Export
06.02.2015 06:00	max. Verbrauch Haushalte/ max. Aufkommen
04.07.2015 00:00	min. Verbrauch Haushalte

Im Folgenden Kapitel wird das verwendete Gasnetzmodell vorgestellt, bevor die Ergebnisse der Szenarien betrachtet werden.

4. Methodik

Das in dieser Arbeit zur Flussberechnung genutzte MILP-Modell basiert auf dem Ansatz von Kapitel 6 des Buches [16], erweitert um Preprocessing sowie Stations- und Fernkopplungsmodellierung aus [70] und zusätzlicher Möglichkeit Kanten-/Knoten-Slack zu betrachten gemäß [73]. Ein Ansatz zur Modellierung von Verdichterstationen in Abwesenheit präziserer Daten wurde [105] entnommen. Die Synthese gerade dieses Modells entspringt der gemischten Anforderung einerseits möglichst große Netze rechnen zu können, bei andererseits limitiertem Detailgrad exogener Daten, ohne den charakteristischen Potentialfluss aufgeben zu müssen. Darüber hinaus ist die explizite Berücksichtigung von schaltbaren Komponenten auch aus Modelliersicht praktisch und das Modell bzw. die Grundstruktur ist erweiterbar. Das Preprocessing wurde zu einem späteren Zeitpunkt hinzugefügt und ist gerade bei unklarer Datenlage mit infolgedessen weiten Variablenschranken sowie beim Debugging unlösbarer Lastfälle wertvoll. Dies ist ein Aspekt, der zu beachten ist, da ein Charakteristikum von Optimierungsmodellen ist, dass sie keinerlei direkten Aufschluss über die Unlösbarkeit eines Problems liefern. Das hier verwendete Preprocessing erlaubt es mitunter Bottlenecks frühzeitig zu lokalisieren.

4.1. Modellbeschreibung

4.1.1. Netzwerk

Das Gasnetz wird als endlicher, gerichteter Graph $G(V, A)$ ohne Selbstschleifen modelliert. Hierbei stellt jede Kante eine Komponente des Gasnetzes dar. Es werden (Gas-) Flussvariablen und zugehörige Wertebereiche auf jeder Kante aus A definiert:

$$\underline{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{a}} \leq \boldsymbol{q}_{\boldsymbol{a}} \leq \overline{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{a}} \forall \boldsymbol{a} \in \boldsymbol{A}. \qquad \textit{Gl. 4.1}$$

Falls $q_{i,j} > 0$ gilt, so fließt Gas von i nach j. Umgekehrt, falls $q_{i,j} < 0$, so fließt Gas von j nach i. Damit Gas fließen kann benötigt man jedoch ein treibendes Potentialgefälle in Form einer Druckdifferenz. Daher werden, zusätzlich zu den Flüssen auf den Kanten, Drücke $p_i \in R_{\mathbb{0}}^{+}$ an allen Knoten $i \in V$ des Graphen definiert:

$$\underline{\boldsymbol{p}}_{\boldsymbol{i}} \leq \boldsymbol{p}_{\boldsymbol{i}} \leq \overline{\boldsymbol{p}}_{\boldsymbol{i}} \forall \boldsymbol{i} \in \boldsymbol{V}. \qquad \textit{Gl. 4.2}$$

Unter Hinzunahme eines Quell-/Senkenfluss d_j können die fließenden Gasströme and den Kreuzungspunkten des Netzwerks bilanziert werden. Die Bilanz-/Kontinuitätsgleichung lautet:

$$\sum_{\boldsymbol{k}:(\boldsymbol{j},\boldsymbol{k})\in\boldsymbol{A}} \boldsymbol{q}_{\boldsymbol{j},\boldsymbol{k}} - \sum_{\boldsymbol{i}:(\boldsymbol{i},\boldsymbol{j})\in\boldsymbol{A}} \boldsymbol{q}_{\boldsymbol{i},\boldsymbol{j}} = \boldsymbol{d}_{\boldsymbol{i}} \forall \boldsymbol{i} \in \boldsymbol{V}. \qquad \textit{Gl. 4.3}$$

Der besagte Quell-/Senkenterm d_j kann, je nach Fragestellung, eine beschränkte Variable oder einen Parameter darstellen.

Die bis hier hin definierten Variablen, Parameter und Nebenbedingungen sind alles, was es braucht, um die allgemeine Netzwerkcharakteristik abzubilden. Allerdings fehlt ein wichtiger Bestandteil: Die Drücke und die Flüsse im Netzwerk sind bisher nicht gekoppelt. Daher benötigt man zusätzliche Nebenbedingungen, die das charakteristische Verhalten der

Kantenkomponenten implementieren. Dies beinhaltet insbesondere die Kopplung der Drücke an den Knoten an den beiden Enden einer Kante aber auch die Implementierung der Schaltbarkeit von Komponenten, z.B. an/aus für Verdichter oder offen/geschlossen für Ventile und deren Fernkopplung wo nötig.

4.1.2. Pipelines

Zur Modellierung von Pipelines $a = (i,j) \in A_{pi} \subset A$ kann man die bekannte Weymouth-Gleichung heranziehen. Sie kann aus der Impulsbilanz der Euler-Gleichungen im Gleichgewichtszustand hergeleitet werden und koppelt die quadrierten Drücke am Eingangs- (p_i) und Ausgangsknoten (p_j) einer Pipeline mit dem vorzeichenerhaltenden, quadrierten Massenfluss q_a durch die Pipeline *Gl. 4.4*. Für eine Herleitung sei der interessierte Leser auf [16] verwiesen.

$$\boldsymbol{p_j^2 - \alpha_a p_i^2 = \beta_a |q_a| q_a \forall a = (i,j) \in A_{pi}.} \qquad \textit{Gl. 4.4}$$

α_a in *Gl. 4.4* stellt einen Parameter dar, der die durch Höhenunterschiede zwischen Knoten i und j, resultierende Potentialdifferenz abbildet.

$$\boldsymbol{\alpha_a = e^{-S_a}} \qquad \textit{Gl. 4.5}$$

$$\boldsymbol{S_a = 2g \frac{b_a L_a}{R_s z_m T_m}} \qquad \textit{Gl. 4.6}$$

$$\boldsymbol{z_m = z(p_{m,a}, T_m)} \qquad \textit{Gl. 4.7}$$

In *Gl. 4.6* bezeichnet g die Erdbeschleunigung, b_a das Pipelinegefälle, L_a die Länge der Pipeline, R_s die spezifische Gaskonstante, T_m die gemittelte Gastemperatur im Netzwerk und z den Kompressibilitätsfaktor. Letzterer beschreibt die Abweichung des Realgasverhaltens vom idealen Gasgesetz gemäß $p/(\rho R_s T) = z(p,T)$. Für Erdgas wird in dieser Arbeit die sogenannte Pápay-Gleichung verwendet. Sie ist über einen weiten Druckbereich anwendbar und gleichzeitig simpel in ihrer Darstellung. In der Gasindustrie sind jedoch auch andere Zustandsgleichungen gebräuchlich, wie die GERG-2008 Zustandsgleichung oder die AGA8-DC92 (ISO 12213-2) Zustandsgleichung. Beide berechnen Stoffeigenschaften auf Basis einer vollständigen Gasanalyse. Die GERG-2008 Zustandsgleichung ist jedoch aktueller und stellt den akzeptierten ISO-Standard (ISO 20765-2) zur Berechnung thermo-physikalischer Eigenschaften von Erdgasgemischen dar. Sie zeichnet sich durch Anwendbarkeit in einem großen Temperatur- und Druckbereich aus und umfasst die Gas- und Flüssigphase, den überkritischen Bereich sowie Gas-Flüssig-Gleichgewichtszustände. Die Pápay-Gleichung lautet wie folgt:

$$\boldsymbol{z(p,T) = 1 - 3.52 \frac{p}{p_c} e^{-2.26 \frac{T}{T_c}} + 0.247 \left(\frac{p}{p_c}\right)^2 e^{-1.878 \frac{T}{T_c}}} \qquad \textit{Gl. 4.8}$$

Sie ist über den reduzierten Druck $\frac{p}{p_c}$ und die reduzierte Temperatur $\frac{T}{T_c}$ gegeben, wobei p_c und T_c den kritischen Druck und die kritische Temperatur des Gases bezeichnen.

Zur Darstellung des Verhaltens von Wasserstoff wird eine Virialgleichung herangezogen [144]:

$$z(p,T) = 1 + \sum_{i=1}^{9} a_i \left(\frac{100K}{T}\right)^{b_i} \left(\frac{p}{1MPa}\right)^{c_i} \qquad \textit{Gl. 4.9}$$

Tabelle 4.1.2.1: Koeffizienten der Virialgleichung für Wasserstoff (*Gl. 4.9*) [144].

i	a_i	b_i	c_i
1	0.05888460	1.325	1.0
2	-0.06136111	1.87	1.0
3	-0.002650473	2.5	2.0
4	0.002731125	2.8	2.0
5	0.001802374	2.938	2.42
6	-0.001150707	3.14	2.63
7	0.9588528×10^{-4}	3.37	3.0
8	$-0.1109040 \times 10^{-6}$	3.75	4.0
9	0.1264403×10^{-9}	4.0	5.0

Der Parameter β_a in *Gl. 4.4* stellt einen Reibungskoeffizienten dar, der sowohl Eigenschaften und Zustand des Gases in der Pipeline als auch die Reibungscharakteristik des Rohres auf Basis der Länge L_a, des Durchmessers D_a und der inneren Rohrrauigkeit k_a beinhaltet.

$$\beta_a = \begin{cases} -\frac{L_a \lambda_a R_s z_m T_m}{A_a^2 D_a} \frac{e^{b_a} - 1}{S_a e^{b_a}}, & \text{falls Pipelinegefälle } b_a \neq 0 \\ -\frac{L_a \lambda_a R_s z_m T_m}{A_a^2 D_a}, & sonst. \end{cases} \qquad \textit{Gl. 4.10}$$

$$\lambda_a = \frac{1}{\left(2log_{10}\frac{D_a}{k_a} + 1.138\right)^2}; (nach\ Nikuradse) \textbf{ [145]} \qquad \textit{Gl. 4.11}$$

Bei näherer Betrachtung von *Gl. 4.4* fällt auf, dass die Drücke und der Fluss in quadrierter Form, also nichtlinear, vorliegen. Diese Darstellung ist für die Implementierung als MILP ungeeignet, da man hier nur gemischtganzzahlig-lineare Nebenbedingungen nutzen kann. Die Handhabung dieser Problematik wird in einem eigenen Abschnitt erklärt.

4.1.3. Absperrventile

Ein Absperrventil kann einen von zwei Zuständen einnehmen - offen oder geschlossen. Je nach Zustand erlaubt oder verhindert das Absperrventil den Gastransport zwischen benachbarten Knoten. Gleichzeitig müssen bei geschlossenem Ventil die Drücke auf beiden Seiten unabhängig voneinander sein. Die binäre Entscheidung wird folglich durch Einführung einer Binärvariable s_a für jedes Ventil $a = (i,j) \in A_{va}$ implementiert. Unter Hinzunahme der jeweiligen Fluss- und Druckschranken kann dann das erwünschte Verhalten implementiert werden:

$$\underline{q}_a s_a \leq q_a \leq \overline{q}_a s_a \forall a = (i,j) \in A_{va}, \quad \text{Gl. 4.12}$$

$$\left(\overline{p_j} - \underline{p_i}\right) s_a + p_j - p_i \leq \overline{p_j} - \underline{p_i} \forall a = (i,j) \in A_{va}, \quad \text{Gl. 4.13}$$

$$\left(\overline{p_i} - \underline{p_j}\right) s_a + p_i - p_j \leq \overline{p_i} - \underline{p_j} \forall a = (i,j) \in A_{va}. \quad \text{Gl. 4.14}$$

4.1.4. Druckregelventile

Druckregelventile sind richtungsbehaftete Komponenten ($q_a \geq 0$) und haben die Fähigkeit, den Druck in Flussrichtung vom jeweiligen Eingangs- zum jeweiligen Ausgangsknoten innherhalb definierter Schranken $0 \leq \underline{\Delta}_a \leq \overline{\Delta}_a$ zu reduzieren. Genau wie die Absperrventile können sie geschlossen werden und benötigen daher die Einführung einer Binärvariable für jedes Druckregelventil $a = (i,j) \in A_{cv}^{aut}$. Es sei darauf hingewiesen, dass abgesehen von den zulässigen minimalen $\underline{\Delta}_a$ und maximalen $\overline{\Delta}_a$ Druckabsenkungen die Gleichungen in *Gl. 4.12* - *Gl. 4.14* und *Gl. 4.15* - *Gl. 4.17* identisch sind:

$$\underline{q}_a s_a \leq q_a \leq \overline{q}_a s_a \forall a = (i,j) \in A_{cv}^{aut}, \quad \text{Gl. 4.15}$$

$$\left(\overline{p_j} - \underline{p_i} + \underline{\Delta}_a\right) s_a + p_j - p_i \leq \overline{p_j} - \underline{p_i} \forall a = (i,j) \in A_{cv}^{aut}, \quad \text{Gl. 4.16}$$

$$\left(\overline{p_i} - \underline{p_j} - \overline{\Delta}_a\right) s_a + p_i - p_j \leq \overline{p_i} - \underline{p_j} \forall a = (i,j) \in A_{cv}^{aut}. \quad \text{Gl. 4.17}$$

4.1.5. Sicherheitsventile

Sicherheitsventile im hier vorliegenden Zusammenhang sind Ventile, die die Einhaltung von Druckschranken in hinterlagerten Netzabschnitten sicherstellen sollen. Falls ein bestimmter Stelldruck überschritten wird, schließt sich das Sicherheitsventil, um die hinterlagerten Netzkomponenten vor Überbelastung durch zu hohe Drücke zu schützen. Dies ist zum Beispiel beim Übergang zur Verteilnetzebene sinnvoll. Folglich hat das Sicherheitsventil drei mögliche Zustände: Aktiv druckbeschränkend, passiv, d.h. im Bypass-Modus oder geschlossen. Die Beschreibung ist etwas länger, aber ähnelt in vielen Aspekten der Absperrventil-Beschreibung, wobei einem weiteren Zustand Rechnung getragen wird:

$$s_a^{ac} + s_a^{bp} = s_a \forall a = (i,j) \in A_{cv}^{man}, \quad \text{Gl. 4.18}$$

$$p_i - p_j \leq \left(1 - s_a^{bp}\right)\left(\overline{p}_i - \underline{p}_j\right) \forall a = (i,j) \in A_{cv}^{man}, \quad \text{Gl. 4.19}$$

$$p_i - p_j \geq \left(1 - s_a^{bp}\right)\left(\underline{p}_i - \overline{p}_j\right) \forall a = (i,j) \in A_{cv}^{man}, \quad \text{Gl. 4.20}$$

$$p_j + s_a^{bp}\left(\overline{p}_j - p_a^{set}\right) \leq \overline{p}_j \forall a = (i,j) \in A_{cv}^{man}, \quad \text{Gl. 4.21}$$

$$p_j + s_a^{ac}\left(\overline{p}_j - p_a^{set}\right) \leq \overline{p}_j \forall a = (i,j) \in A_{cv}^{man}, \quad \text{Gl. 4.22}$$

$$p_j + s_a^{ac}\left(\underline{p}_j - p_a^{set}\right) \geq \underline{p}_j \forall a = (i,j) \in A_{cv}^{man}, \quad \text{Gl. 4.23}$$

$$\boldsymbol{p_i - p_j \geq (1 - s_a^{ac}) \left(\underline{p_i} - \overline{p}_j \right) \forall a = (i,j) \in A_{cv}^{man},} \quad \textit{Gl. 4.24}$$

$$\boldsymbol{q_a \geq (1 - s_a^{ac}) \underline{q}_a \forall a = (i,j) \in A_{cv}^{man},} \quad \textit{Gl. 4.25}$$

$$\boldsymbol{p_j + \left(p_a^{set} - \underline{p}_j \right) \geq p_a^{set} \forall a = (i,j) \in A_{cv}^{man},} \quad \textit{Gl. 4.26}$$

$$\boldsymbol{q_a \leq \overline{q}_a s_a \forall a = (i,j) \in A_{cv}^{man},} \quad \textit{Gl. 4.27}$$

$$\boldsymbol{q_a \geq \underline{q}_a s_a \forall a = (i,j) \in A_{cv}^{man}.} \quad \textit{Gl. 4.28}$$

4.1.6. Verdichter

Im Gasnetz verwendete Verdichter sind meist Turbomaschinen oder gelegentlich auch Verdrängungsmaschinen. Letztere kommen im Erdgasnetz am ehesten in Anwendungen mit moderaten Flüssen und hohen Drücken zum Einsatz, wie der Untergrundspeicherung. Beide Maschinentypen haben ihre Vor- und Nachteile. Turbomaschinen sind relativ wartungsarm und können bei moderaten Verdichtungsverhältnissen große Flüsse realisieren. Das realisierbare Verdichtungsverhältnis hängt jedoch von den Gaseigenschaften ab. Kolbenverdichter hingegen sind etwas wartungsaufwendiger, können allerdings sehr hohe Verdichtungsverhältnisse erreichen, bei moderaten Flüssen. Das heißt, die Verdichterwahl hängt vom Anwendungsfall und dem zu verdichtenden Gas ab. Insbesondere für sehr leichte Gase, wie Wasserstoff, lassen sich mit Turboverdichtern nur geringe Verdichtungsverhältnisse erreichen, weshalb hier gerne Verdrängungsmaschinen zum Einsatz kommen. Im Rahmen dieser Arbeit soll eine vereinfachte Verdichterdarstellung zur Anwendung kommen:

$$\boldsymbol{\underline{q}_a s_a \leq q_a \leq \overline{q}_a s_a \forall a = (i,j) \in A_{cs},} \quad \textit{Gl. 4.29}$$

$$\boldsymbol{p_j - p_i \geq \underline{\Delta p}_a s_a + \left(\underline{p_j} - \overline{p_i} \right) (1 - s_a) \forall a = (i,j) \in A_{cs},} \quad \textit{Gl. 4.30}$$

$$\boldsymbol{p_j - p_i \leq \overline{\Delta p}_a s_a + \left(\overline{p_j} - \underline{p_i} \right) (1 - s_a) \forall a = (i,j) \in A_{cs},} \quad \textit{Gl. 4.31}$$

$$\boldsymbol{p_j \geq \underline{\epsilon}_a p_i - (1 - s_a) \left(\underline{\epsilon}_a \overline{p_i} + \underline{p_j} \right) \forall a = (i,j) \in A_{cs},} \quad \textit{Gl. 4.32}$$

$$\boldsymbol{p_j \leq \overline{\epsilon}_a p_i - (1 - s_a) \left(\overline{\epsilon_a} \underline{p_i} - \overline{p_j} \right) \forall a = (i,j) \in A_{cs}.} \quad \textit{Gl. 4.33}$$

Hier wird ein Verdichter über die Parameterpaare minimales/maximales Verdichtungsverhältnis ($\underline{\epsilon}_a, \overline{\epsilon}_a$) und minimale/maximale erreichbare Druckerhöhung ($\underline{\Delta p}_a, \overline{\Delta p}_a$), sowie den erzielbaren minimalen/maximalen Fluss charakterisiert ($\underline{q}_a, \overline{q}_a$). Als schaltbare Komponente hat ein Verdichter mindestens zwei Betriebszustände: Aktiv und inaktiv, die über eine Binärvariable s_a je Verdichter implementiert werden.

Die vereinfachte Verdichterabbildung, die dem linearen Modellcharakter geschuldet ist, kann je nach Datenlage verbessert werden. Beispielsweise können die Schranken für das minimale/maximale Verdichtungsverhältnis und die minimale/maximale Druckerhöhung aus

einer Approximation des zulässigen Betriebsbereichs des Verdichters angenähert werden. Hier muss man zwischen Turbo und Kolbenverdichtern unterscheiden. Bei Turboverdichtern können Messdaten als Tripel aus Volumenfluss, adiabater Enthalpieänderung und Drehzahl in biquadratische Funktionen überführt werden, die sowohl Isolinien für konstante Drehzahl enthalten als auch die so genannte Pump- und Stopfgrenze darstellen[42]. Kolbenverdichter lassen sich einfacher über das Hubvolumen, Kolbenanzahl, Drehzahl- und Drehmomentgrenzen beschreiben.

4.1.7. Künstliche Widerstände

Im Rahmen der hier gewählten Modellgranularität können nicht alle möglichen Effekte durch implizite physikalische Abbildung realisiert werden, sondern müssen teilweise explizit modelliert werden. Dazu gehören insbesondere Druckverluste durch Verrohrung in Verdichterstationen, aber auch datenseitig nicht modellierte, zu überwindende Höhenunterschiede. Zur Berücksichtigung solcher Effekte ist die Einführung künstlicher Widerstandselemente sinnvoll. Hier wird zwischen linearen und nichtlinearen Widerständen unterschieden. Lineare Widerstände reduzieren den Druck des sie durchströmenden Gases um einen fixen Betrag ξ_a, z.B. 0,5 bar. Nichtlineare Widerstandselement hingegen reduzieren den Druck des sie durchströmenden Gases abhängig von der Größe des Gasstroms. Sie werden über einen Widerstandskoeffizienten ζ_a und einen effektiven Rohrdurchmesser D_a charakterisiert. Da in beiden Fällen die Druckabsenkung von der Fließrichtung abhängt, wird eine binäre Indikatorvariable r_a eingeführt, um die Fließrichtung anzuzeigen.

Somit ergibt sich für die linearen Widerstände:

$$\underline{q}_a r_a \leq q_a \leq \overline{q}_a (1 - r_a) \forall a = (i,j) \in A_{rs}^{lin}, \qquad \textit{Gl. 4.34}$$

$$p_i - p_j = \begin{cases} -\zeta_a, & q_a \leq -\epsilon \\ \frac{\zeta_a}{\epsilon}, & -\epsilon \leq q_a \leq \epsilon \\ \zeta_a, & q_a \geq \epsilon \end{cases}, \forall a = (i,j) \in A_{rs}^{lin} \qquad \textit{Gl. 4.35}$$

Hier stellt ϵ einen positiven, kleinen Parameter dar. Die stückweise lineare Funktion in *Gl. 4.35* wird mittels der sog. inkrementellen Methode (incremental method) [70] diskretisiert. Die nichtlinearen Widerstandselemente werden wie folgt abgebildet,

$$\underline{q}_a r_a \leq q_a \leq \overline{q}_a (1 - r_a) \forall a = (i,j) \in A_{rs}^{nl}, \qquad \textit{Gl. 4.36}$$

$$p_i^2 - p_j^2 + |\Delta_a| \Delta_a = 2 c_a |q_a| q_a \forall a = (i,j) \in A_{rs}^{nl}, \qquad \textit{Gl. 4.37}$$

$$\Delta_a = p_i - p_j \forall a = (i,j) \in A_{rs}^{nl}, \qquad \textit{Gl. 4.38}$$

$$p_i - p_j \leq \left(\overline{p}_i - \underline{p}_j\right)(1 - r_a) \forall a = (i,j) \in A_{rs}^{nl}, \qquad \textit{Gl. 4.39}$$

$$p_j - p_i \leq \left(\overline{p}_j - \underline{p}_i\right) r_a \forall a = (i,j) \in A_{rs}^{nl}. \qquad \textit{Gl. 4.40}$$

[42] Beispieldaten in einem solchen Format sind in [96] zu finden

wobei $c_a = 8\frac{\zeta_a R_s T_m z_{m,a}}{\pi^2 D_a^4}$ gilt. *Gl. 4.37* erinnert an eine modifizierte Weymouth-Gleichung und kann auch so interpretiert werden. Aus *Gl. 4.37* ist auch ersichtlich, dass für diese Nebenbedingung auch Diskretisierungen der (quasi-)quadratischen Terme benötigt werden.

4.1.8. Die Erweiterte Inkrementelle Methode (Extended Incremental Method)

Die sogenannte EIM wurde in [70] entwickelt und ist einer stückweise linearen Diskretisierungsmethode ähnlich. Allerdings ersetzt sie die zu diskretisierende Funktion nicht durch stückweise lineare Funktionen, sondern durch stückweise polyedrische Einhüllende der ursprünglichen Funktion. Sie erzeugt also eine Relaxierung der ursprünglichen Beziehung und ermöglicht es, im hiesigen Zusammenhang, quadrierte und quasi-quadrierte Terme, durch stückweise polyedrische Einhüllende, zu ersetzen.

$$\boldsymbol{x} = \hat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{0}} + \sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{k}} (\hat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i}} - \hat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i-1}})\boldsymbol{\delta}_{\boldsymbol{i}} \qquad \textit{Gl. 4.41}$$

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{f}(\hat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{0}}) + \sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{k}} \big(\boldsymbol{f}(\hat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i}}) - \boldsymbol{f}(\hat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i-1}})\big)\boldsymbol{\delta}_{\boldsymbol{i}} + \boldsymbol{e} \qquad \textit{Gl. 4.42}$$

$$\boldsymbol{e} \leq \boldsymbol{e}_{\boldsymbol{u}}^{\boldsymbol{1}} + \sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{k-1}} \boldsymbol{z}_{\boldsymbol{i}}\big(\boldsymbol{e}_{\boldsymbol{u}}^{\boldsymbol{i+1}} - \boldsymbol{e}_{\boldsymbol{u}}^{\boldsymbol{i}}\big) \qquad \textit{Gl. 4.43}$$

$$\boldsymbol{e} \geq -\boldsymbol{e}_{\boldsymbol{o}}^{\boldsymbol{1}} - \sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{k-1}} \boldsymbol{z}_{\boldsymbol{i}}\big(\boldsymbol{e}_{\boldsymbol{o}}^{\boldsymbol{i+1}} - \boldsymbol{e}_{\boldsymbol{o}}^{\boldsymbol{i}}\big) \qquad \textit{Gl. 4.44}$$

$$\boldsymbol{\delta}_{\boldsymbol{i+1}} \leq \boldsymbol{z}_{\boldsymbol{i}} \forall \boldsymbol{i} \in \{\boldsymbol{1}, \boldsymbol{2}, \dots, \boldsymbol{k-1}\} \qquad \textit{Gl. 4.45}$$

$$\boldsymbol{z}_{\boldsymbol{i}} \leq \boldsymbol{\delta}_{\boldsymbol{i}} \forall \boldsymbol{i} \in \{\boldsymbol{1}, \boldsymbol{2}, \dots, \boldsymbol{k-1}\} \qquad \textit{Gl. 4.46}$$

$$\boldsymbol{z}_{\boldsymbol{i}} \in \{\boldsymbol{0}, \boldsymbol{1}\} \forall \boldsymbol{i} \in \{\boldsymbol{1}, \boldsymbol{2}, \dots, \boldsymbol{k-1}\} \qquad \textit{Gl. 4.47}$$

$$\boldsymbol{\delta}_{\boldsymbol{1}} \leq \boldsymbol{1} \qquad \textit{Gl. 4.48}$$

$$\boldsymbol{\delta}_{\boldsymbol{k}} \geq \boldsymbol{0}. \qquad \textit{Gl. 4.49}$$

Die Variable x in *Gl. 4.41* wäre beispielsweise eine Druckvariable, deren diskretisierte Darstellung über die rechte Seite in Gleichung *Gl. 4.41* gegeben ist. Die zugehörige quadrierte Druckvariable wäre y in *Gl. 4.42*, wobei f durch $f: x \mapsto x^2$ gegeben wäre. Die Beziehungen in *Gl. 4.45* - *Gl. 4.49* regeln dabei lediglich die zulässige Abfolge der Diskretisierungsintervalle. Die zusätzliche Variable e in *Gl. 4.42* - *Gl. 4.44*, hingegen, sorgt für den Einhüllenden-Charakter, im Vergleich zu einer einfachen Diskretisierung, wobei die zulässige Abweichung auf jedem Diskretisierungsintervall über e_u^i und e_o^i eingestellt werden kann.

4.1.9. Verdichter- und Druckregelstationen

Sowohl Verdichter als auch Druckregelventile sind für gewöhnlich nicht als alleinstehende Komponente in einem Gasnetzwerk aufzufinden, sondern sind, in der Regel, in Verdichter- beziehungsweise Druckregelstationen verbaut. Ein Verdichter kann in einer Station zusammen mit weiteren Verdichtern in einer oder mehreren Konfigurationen betrieben werden (in Reihe, parallel). Darüber hinaus bieten viele Stationen die Möglichkeit den Fluss um eine Station herumzuleiten, für den Fall, dass diese nicht benötigt wird oder außer Betrieb ist. Die interne Verrohrung sorgt häufig für zusätzliche Druckverluste, die über künstliche Widerstände modelliert werden müssen. Ähnliches gilt für Druckregelstationen, wobei diese, lediglich, über ein einziges Druckregelventil verfügen, statt über aufwendige Verschaltungen aus Kompressoren. Die Stationen stellen, modellseitig, Subgraphen des Netzwerkgraph dar und können, bis auf die jeweilige, stationsspezifische Kompressorkonfiguration, auf generische Weise gestaltet werden (siehe Abbildung 4.1.9.1).

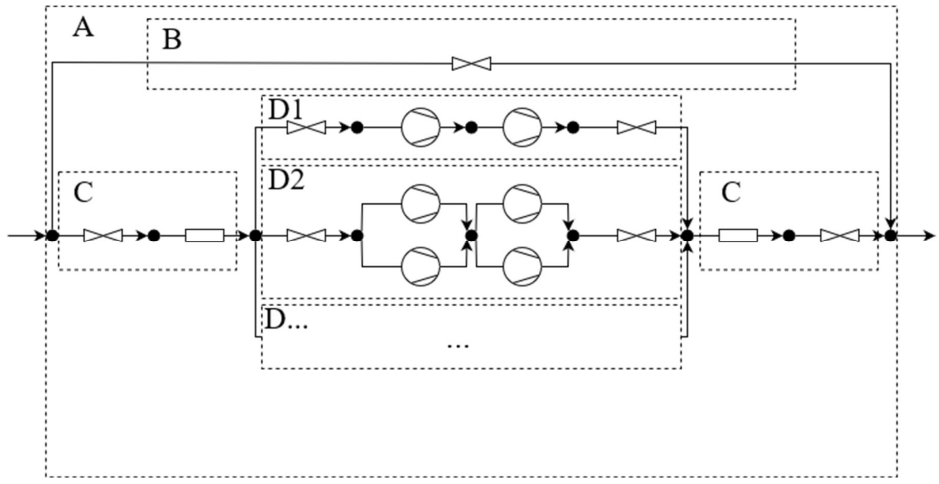


Abbildung 4.1.9.1: Abbildung einer generischen Verdichterstation; A: Station; B: internes Bypass-Ventil; C: Einlass-/Auslassventil mit künstlichem Widerstand zur Abbildung interner Verrohrungsverluste; D1-D...: Verdichterkonfigurationen, flach ausgelegt, schaltbar über Ein-/Ausgangsventile; D1: Reihenschaltung von zwei Verdichtern; D2: Parallelschaltung zweier Verdichter mit zwei Stufen in Reihe; D...: weitere Konfigurationen analog zu D1 und D2.

Jede Verdichterstation verfügt über ein Eingangs- und ein Ausgangsventil mit jeweiligen Verrohrungswiderständen. Intern können alle verfügbaren Verdichterkonfigurationen nebeneinander ausgelegt und über Ventilpaare aktiviert werden. Die zulässigen Schaltkombinationen/Stationskonfigurationen sollten explizit, in Form von Nebenbedingungen, berücksichtigt werden, um den kombinatorischen Rechenaufwand nicht unnötig in die Höhe zu treiben.

Stationskonfigurationen

Druckregelstationen

Für die Druckregelstationen gilt, dass stets nur das Bypass-Ventil oder das Druckregelventil aktiv sein kann (*Gl. 4.50*). Außerdem existiert jeweils ein minimaler Ein- und Ausgangsdruck

für das Druckregelventil. Zusätzliche Absperrventile entkoppeln das Druckregelventil vom Rest des Netzes für den Fall, dass es nicht betrieben wird (vgl. A, B, C in Abbildung 4.1.9.1). Das heißt, dass Einlass-, Auslass und Druckregelventil stets den gleichen Zustand haben (*Gl. 4.51*). Durch die Entkopplung werden auch die Regelventil-spezifischen Druckschranken nur forciert, wenn dies sinnvoll ist.

$$s_{v_c^{cv}(S)} + s_{v_b^{cv}(S)} \leq 1 \forall S \in S_{cv}, \quad \text{Gl. 4.50}$$

$$s_{v_i^{cv}(S)} = s_{v_o^{cv}(S)} = s_{v_c^{cv}(S)} \forall S \in S_{cv}. \quad \text{Gl. 4.51}$$

Verdichterstationen

Für die Verdichterstationen gilt, dass keine Kompressor-Konfiguration aktiv sein kann, wenn das Bypass-Ventil auch aktiv ist (vgl. *Gl. 4.50* und *Gl. 4.52*). Darüber hinaus müssen die schaltbaren Elemente einer Konfiguration genau dann aktiv sein, wenn die Konfiguration aktiv ist (*Gl. 4.53*).

$$\sum_{C \in \mathcal{C}_s} s_C + s_{v_b^{cs}(S)} \leq 1 \forall S \in S_{cs}, \quad \text{Gl. 4.52}$$

$$s_C = s_a \forall S \in S_{cs}, \forall C \in \mathcal{C}_s, \forall a \in A(C), \quad \text{Gl. 4.53}$$

$$s_{v_i^{cs}(S)} = \sum_{C \in \mathcal{C}_s} s_C \, \forall S \in S_{cs}, \forall C \in \mathcal{C}_s, \quad \text{Gl. 4.54}$$

$$s_{v_o^{cs}(S)} = \sum_{C \in \mathcal{C}_s} s_C \, \forall S \in S_{cs}, \forall C \in \mathcal{C}_s, \quad \text{Gl. 4.55}$$

$$s_{v_i^{s}(C)} = s_C \forall S \in S_{cs}, \forall C \in \mathcal{C}_s, \quad \text{Gl. 4.56}$$

$$s_{v_o^{s}(C)} = s_C \forall S \in S_{cs}, \forall C \in \mathcal{C}_s, \quad \text{Gl. 4.57}$$

Die Ein- und Auslassventile der Station müssen geöffnet sein, wenn eine der Kompressor-Konfigurationen aktiv ist (*Gl. 4.54 - Gl. 4.55*). Außerdem sind die Ein- und Auslassventile einer Konfiguration genau dann offen/geschlossen, wenn die Konfiguration aktiv/inaktiv ist (*Gl. 4.56 - Gl. 4.57*).

Alternative Darstellung von Verdichterstationen bei einem geringen Informationsstand

In der Praxis stößt man auf das Problem, dass die genaue Ausstattung, interne, sowie externe Verschaltung von Verdichterstationen unbekannt ist. Dies spiegelt sich häufig auch in der Darstellung der Netzwerkgraphen in öffentlich und kommerziell zugänglichen Datenbanken wider, wo Verdichterstationen, aufgrund ihrer geringen Ausdehnung und mangelnder Kenntnis ihrer Peripherie und inneren Aufbaus, als Knoten dargestellt werden. In diesem Fall muss man sich mit einer Ersatzverschaltung behelfen, die den Grundaufgaben der "Blackbox Verdichterstation" Rechnung trägt. Wie in [105], lässt sich

dies über zwei symmetrische Sternschaltungen, deren Sternpunkte über einen (Pseudo-) Verdichter verbunden sind, erreichen (siehe Abbildung 4.1.9.2).

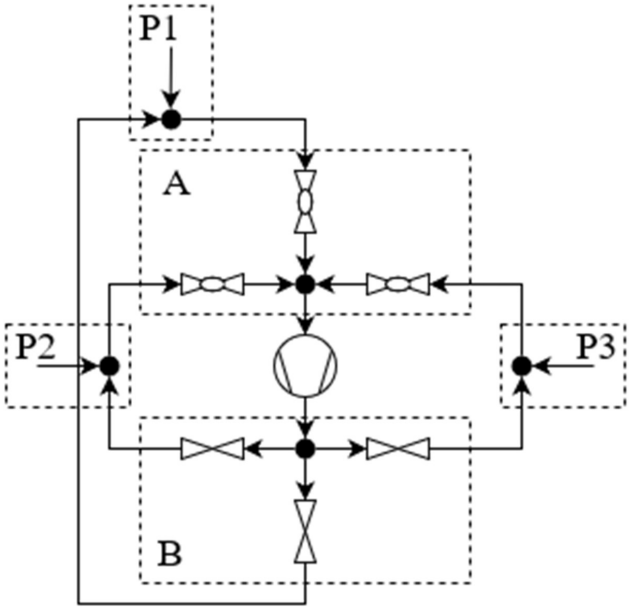


Abbildung 4.1.9.2: Vereinfachte Darstellung von Verdichterstationen mit Peripherie als Verknüpfung zweier Sternschaltungen aus Druckregelventilen auf der Eingangsseite und Absperrventilen auf der Ausgangsseite. Hier beispielhaft für 3 angeschlossene Pipelines P1-P3; A: Eingangssternschaltung aus Druckregelventilen; B: Ausgangssternschaltung aus Absperrventilen.

Dabei besteht der eine Stern ausschließlich aus Druckregelventilen (A) und der andere Stern ausschließlich aus Absperrventilen (B). Die ein- und ausgehenden benachbarten Komponenten (in der Regel Pipelines) werden jeweils an ein Druckregelventil und ein Absperrventil angeschlossen. Diese Verschaltung sorgt dafür, dass jedwede Flussrichtung ermöglicht werden kann, solange die ausgehenden Flüsse ($q_a > 0$) den gleichen Druck aufweisen. Die eingehenden Flüsse können unterschiedliche Drücke aufweisen. Alle eingehenden Flüsse treten durch Druckregelventile ein, die das Druckniveau vor dem gemeinsamen Eintritt in den (Pseudo-)Verdichter angleichen. Allerdings muss man gesondert der kombinatorischen Explosion, durch die Einführung vieler aktiver Elemente, und damit Einführung vieler ganzzahliger Variablen, Rechnung tragen, denn für jede Ersatzverschaltung ist nur ein Bruchteil der Fahrwege zulässig.

4.1.10. Fernkopplung von schaltbaren Komponenten

Wie im vorangegangenen Abschnitt erklärt, ist es sinnvoll, schaltbare Elemente innerhalb von Verdichter-/Druckregelstationen zu koppeln. Es mag aber auch aus Gründen des Netzbetriebs notwendig sein, dass sich bestimmte Zustände über weitere Distanzen ausschließen, sei es, dass zwei Ventile gleichzeitig geöffnet/geschlossen sind oder zwei Stationen gleichzeitig betrieben oder nicht betrieben werden. Die hier verwendete Formulierung zur Fernkopplung von Komponenten entspricht der Formulierung in [70].

Für jede Sammlung an ferngekoppelten, schaltbaren Komponenten (Verdichterstationen, Druckregelstationen, Ventile) wird eine Schaltgruppe $D = (n, B) \in \mathcal{D}$ eingeführt, die alle zulässigen Schaltungen und den Schaltstatus der einzelnen Komponenten in jeder der Schaltungen enthält. Der Vektor $n = (n_1, \dots, n_{k_D})$ enthält dabei die jeweiligen Komponenten $n_i \in S_{cv} \cup S_{cs} \cup A_v, i = 1, \dots, k_D$. $B = (b_1, \dots, b_{l_D}) \subset \{0,1\}^{k_D}$ ist dabei eine Reihe an Vektoren, die für jede Schaltung den jeweiligen Zustand einer Komponente beschreibt. Darüber hinaus ist es für die Formulierung notwendig, zwei Sorten Indexmengen einzuführen. Für jede Komponente n_j einer Schaltgruppe beinhaltet $N_0^D(j) \coloneqq \{i: b_{ij} = 0\}$ alle Schaltungen i in der Komponente n_j geschlossen ist und umgekehrt enthält $N_1^D(j) \coloneqq \{i: b_{ij} = 1\}$ für jede Komponente n_j alle Schaltungen i in der Komponente n_j der Schaltgruppe geöffnet ist. Schlussendlich wird für jede Entscheidung in jeder Schaltgruppe eine Binärvariable $b_i^D i = 1, \dots, l_D$ eingeführt. Somit gelangt man zu folgender Formulierung (vgl. [70]):

$$\boldsymbol{s_{n_j} \leq \sum_{i \in N_1^D(j)} b_i^D \; \forall D \in \mathcal{D}, j \in V^{\mathcal{D}},} \qquad \textit{Gl. 4.58}$$

$$\boldsymbol{s_{v_b^{cv}(n_j)} + s_{v_c^{cv}(n_j)} \leq \sum_{i \in N_1^D(j)} b_i^D \; \forall D \in \mathcal{D}, j \in S_{cv}^{\mathcal{D}},} \qquad \textit{Gl. 4.59}$$

$$\boldsymbol{s_{v_b^{cs}(n_j)} + \sum_{C \in \mathcal{C}_{n_j}} s_C \leq \sum_{i \in N_1^D(j)} b_i^D \; \forall D \in \mathcal{D}, j \in S_{cs}^{\mathcal{D}},} \qquad \textit{Gl. 4.60}$$

$$\boldsymbol{\left(1 - s_{n_j}\right) \leq \sum_{i \in N_0^D(j)} b_i^D \; \forall D \in \mathcal{D}, j \in V^{\mathcal{D}},} \qquad \textit{Gl. 4.61}$$

$$\boldsymbol{\left(1 - s_{v_b^{cv}(n_j)} - s_{v_c^{cv}(n_j)}\right) \leq \sum_{i \in N_0^D(j)} b_i^D \; \forall D \in \mathcal{D}, j \in S_{cv}^{\mathcal{D}},} \qquad \textit{Gl. 4.62}$$

$$\boldsymbol{\left(1 - s_{v_b^{cs}(n_j)} - \sum_{C \in \mathcal{C}_{n_j}} s_C\right) \leq \sum_{i \in N_0^D(j)} b_i^D \; \forall D \in \mathcal{D}, j \in S_{cs}^{\mathcal{D}},} \qquad \textit{Gl. 4.63}$$

$$\boldsymbol{\sum_{i=1}^{l_D} b_i^D = 1 \forall D \in \mathcal{D}.} \qquad \textit{Gl. 4.64}$$

Die Mengen $S_{cs}^{\mathcal{D}} \coloneqq \{1, \dots, k_D \cap \{k: n_k \in S_{cs}\}$, $S_{cv}^{\mathcal{D}} \coloneqq \{1, \dots, k_D \cap \{k: n_k \in S_{cv}\}$ und $V^{\mathcal{D}} \coloneqq \{1, \dots, k_D \cap \{k: n_k \in A_v\}$ enthalten dabei die Verdichterstationen einer Schaltgruppe ($S_{cs}^{\mathcal{D}}$), die Druckregelstationen einer Schaltgruppe ($S_{cv}^{\mathcal{D}}$) und die Ventile einer Schaltgruppe ($V^{\mathcal{D}}$).

4.2. Hilfsproblem zur Minimierung der Anzahl an Diskretisierungsvariablen

Wie bereits festgestellt, stellen die an den Knoten des Graphen angeschlossenen Komponenten unterschiedliche Anforderungen an die Verfügbarkeit von quadrierten oder

nicht-quadrierten Druckvariablen. An Knoten, an denen Pipelines oder nichtlineare Widerstände angeschlossen sind, benötigt man mindestens quadrierte Variablen, an Knoten wo Druckregelventile, Verdichter oder Widerstände angeschlossen sind, benötigt man auf jeden Fall den nicht-quadrierten Druck. Hieraus ergibt sich ein Spielraum innerhalb dessen man versuchen kann, die Anzahl der für die Diskretisierung von Druckvariablen benötigten, Zusatzvariablen zu minimieren. Dies funktioniert jedoch nur, wenn man die Anzahl der benötigten Diskretisierungselemente je Knoten explizit angeben kann. Dies ist hier der Fall.

Daraus resultiert das folgende Hilfsproblem (aus [16]):

$$\mathbf{min} \sum_{i \in V} \left\lceil \frac{\overline{p}_i - \underline{p}_i}{2\sqrt{\tau}} \right\rceil \left(\alpha_i^p + \alpha_i^\pi\right) \qquad \textit{Gl. 4.65}$$

$$\alpha_i^p + \alpha_j^\pi \geq 1 \quad \forall (i,j) \in A \setminus \left(A_p \cup A_\pi\right) \qquad \textit{Gl. 4.66}$$

$$\alpha_i^\pi + \alpha_j^p \geq 1 \quad \forall (i,j) \in A \setminus \left(A_p \cup A_\pi\right) \qquad \textit{Gl. 4.67}$$

$$\alpha_i^p + \alpha_j^\pi \geq 1 \quad \forall i \in V \qquad \textit{Gl. 4.68}$$

$$\alpha_i^p = \alpha_j^p = 1 \quad \forall (i,j) \in A_p \qquad \textit{Gl. 4.69}$$

$$\alpha_i^\pi = \alpha_j^\pi = 1 \quad \forall (i,j) \in A_\pi \qquad \textit{Gl. 4.70}$$

$$\alpha_i^p, \alpha_i^\pi \in \{0,1\} \quad \forall i \in V. \qquad \textit{Gl. 4.71}$$

Jeder Knoten $i \in V$ bekommt zwei Variablen α_i^p, α_i^π, die anzeigen, ob man eine nicht-quadrierte oder eine quadrierte Variable an dem jeweiligen Knoten einführen muss. Das *oder* ist hier nicht-exklusiv. Der Term $\left\lceil \frac{\overline{p}_i - \underline{p}_i}{2\sqrt{\tau}} \right\rceil$ gibt die Anzahl an Diskretisierungselementen an, die man mit der EIM (*Gl. 4.41 - Gl. 4.49*), bei einer Toleranz τ für die Diskretisierung des Intervalls $\left[\underline{p}_i, \overline{p}_i\right]$ erhält. Die Flussvariablen der Pipelines müssen leider vollständig diskretisiert werden. Daher kann ein gutes Preprocessing, das die Flussschranken stärkt, großen Einfluss auf die Problemgröße und damit auf die Rechenlaufzeit haben.

4.3. Weitere Beschränkungen

Im Falle großer Diskretisierungstoleranzen in der Erweiterten Inkrementellen Methode kann es sinnvoll sein die linearen Teile der konvexen/konkaven Einhüllenden von $x \mapsto x^2$ und $x \mapsto |x|x$ als beschränkende Nebenbedingungen hinzuzunehmen. Für (quadrierte) Druckvariablen $(x,y) \in \{(p_u, \pi_u), (p_v, \pi_v)\}, (u,v) \in A_{pi} \cup A_{rs}^{nl}$ wird daher folgende Ungleichung hinzugefügt ([16]):

$$y \leq \left(\underline{x} + \overline{x}\right)x - \underline{x}\overline{x} \qquad \textit{Gl. 4.72}$$

Zusätzlich werden für die (quasi-quadrierten) Flüsse $(x, y) = (q_a, \phi_a), a \in A_{pi} \cup A_{rs}^{nl}$ und die quasi-quadrierte Druckdifferenz $(x, y) = (\Delta_a, \omega_a), a \in A_{rs}^{nl}$, fallbedingt, die folgenden Ungleichungen angewandt:

$$\text{falls } \overline{\boldsymbol{x}} < \mathbf{0}\text{: } \boldsymbol{y} \geq -\left(\underline{\boldsymbol{x}} + \overline{\boldsymbol{x}}\right)\boldsymbol{x} + \underline{\boldsymbol{x}}\overline{\boldsymbol{x}}, \qquad \textit{Gl. 4.73}$$

$$\text{falls } \underline{\boldsymbol{x}} > \mathbf{0}\text{: } \boldsymbol{y} \leq \left(\underline{\boldsymbol{x}} + \overline{\boldsymbol{x}}\right)\boldsymbol{x} - \underline{\boldsymbol{x}}\overline{\boldsymbol{x}}, \qquad \textit{Gl. 4.74}$$

$$\text{falls } \mathbf{0} \in \left[\underline{\boldsymbol{x}}, \overline{\boldsymbol{x}}\right]\text{: } \boldsymbol{y} \geq \underline{\boldsymbol{x}}\left(\mathbf{2} - \sqrt{\mathbf{8}}\right)\boldsymbol{x} + \underline{\boldsymbol{x}}^{\mathbf{2}}\left(\sqrt{\mathbf{8}} - \mathbf{3}\right), \qquad \textit{Gl. 4.75}$$

$$\text{falls } \mathbf{0} \in \left[\underline{\boldsymbol{x}}, \overline{\boldsymbol{x}}\right]\text{: } \boldsymbol{y} \leq \overline{\boldsymbol{x}}\left(\sqrt{\mathbf{8}} - \mathbf{2}\right)\boldsymbol{x} + \overline{\boldsymbol{x}}^{\mathbf{2}}\left(\mathbf{3} - \sqrt{\mathbf{8}}\right). \qquad \textit{Gl. 4.76}$$

4.4. Preprocessing

Das Preprocessing kann nicht nur einen entscheidenden Einfluss in Bezug auf die Rechenlaufzeit haben, sondern auch sehr nützlich beim Debugging von Lastfällen und Datenproblemen sein. Während das allgemeine Problem bereits sehr eng formuliert ist, ergeben sich für konkrete Lastfälle dennoch Möglichkeiten zur Verbesserung. Die Vorgabe von konkreten Quell- und Senkenflüssen an den Knoten des Netzwerkgraph erlaubt es, die zu diskretisierenden Fluss- und Druckintervalle weiter zu schrumpfen und damit die Anzahl an benötigten Diskretisierungsvariablen zu reduzieren. Konzeptionell geschieht dies durch Aufprägung der Quell- und Senkenflüsse auf die angeschlossenen Komponenten und anschließender Propagation der neuen Fluss-/Druckschranken durch den Netzwerkgraph. Im Falle einer randständigen Quelle/Senke, d.h. eines Quell-/Senkenknotens i vom Grad $\delta(i) = 1$, lassen sich beispielsweise die Flussschranken durch Bildung der Schnittmenge der aktuellen Schranken mit dem Quell-/Senkenfluss aktualisieren. Allgemeiner ausgedrückt lassen sich iterativ Knotenflussbilanzen auf Basis von Intervallarithmetik lösen, um potenziell engere Schranken an den, am Knoten angeschlossenen, Komponenten zu erzielen. Die genaue Prozedur entstammt der Doktorarbeit [70] und ist in Appendix I zu finden. Hier sollen lediglich kurz die Hauptschritte erklärt werden (siehe Algorithmus 4.1, bzw. Algorithmus 7.1: Bound Strengthening: Main Loop im Appendix I).

`boundStrengthening`(G, P) `Algorithm 7.1 from` [70]

Data: `A gas network` $G = (V, A)$ `and a model` P `with components as stated in this chapter.`

`Initialize the vector of flow and pressure bounds` B `with initial bounds given in model` P `such that` $B_v = \left[\underline{p}_v, \overline{p}_v\right] \forall v \in V$ `and` $B_a = \left[\underline{q}_a, \overline{q}_a\right] \forall a \in A$.

`strengthenFlowBoundsDueToNetFlow`(B);

`setBoundaryFlows`(B);

while $n \neq 0$ **do**

  $n \leftarrow 0$;

  $n \leftarrow n +$ `strengthenFlowDueToPressure`(B);

```
    n ← n + propagateFlows(B);
    n ← n + pressureBoundStrengthening(B);
end
Update bounds in P according to B;
fixBinaries(B);
```

Algorithmus 4.1: Bound Strengthening: Main Loop

Zunächst wird als grobe Schranke der angestrebte Nettofluss durch das Netzwerk mit den bestehenden Flussschranken geschnitten (`strengthenFlowBoundsDueToNetFlow`). Hieraus ergeben sich potentiell engere Flussschranken. Anschließend werden, wie bereits erwähnt, die randständigen Quell-/Senkenflüsse mit den Flussschranken der angeschlossenen Komponente verschnitten (`setBoundaryFlows`). Darauf wird eine While-Schleife über drei weitere Algorithmen gestartet. Dabei gibt jeder der Algorithmen innerhalb der Schleife stets die Anzahl der veränderten Druck- und Flussschranken zurück. Die Schleife endet, sobald das erste Mal keine Schranken angepasst wurden. Dabei garantiert eine Fehlertoleranz der speziellen Verschneidungsmethode (Algorithmus 7.3: Bound Strengthening: Intervallverschneidung), die in jedem der inneren Algorithmen genutzt wird, dass die Schleife in endlicher Zeit stoppt. `strengthenFlowDueToPressure` stärkt potentiell die Flussschranken, aufgrund verbesserter Druckschranken. `propagateFlows` bildet iterativ die erwähnten, intervallarithmetischen Knotenflussbilanzen und `pressureBoundStrengthening` stärkt im Nachgang potenziell die Druckschranken aufgrund der verbesserten, propagierten Flussschranken. Nach der While-Schleife kann noch der Schaltstatus aktiver Elemente angepasst werden. Dies ist dann der Fall, wenn z.B. die neuen Flussschranken eines Absperrventils beide strikt größer/strikt kleiner null sind ($\underline{q}_a, \overline{q}_a > 0$ oder $\underline{q}_a, \overline{q}_a < 0$) oder identisch gleich null sind ($\underline{q}_a, \overline{q}_a = 0$). Im ersten Fall müsste das Ventil stets aktiv, d.h. offen sein und im zweiten Fall stets geschlossen. Dies gilt analog für andere aktive Elemente.

4.5. Zielfunktion

Als Zielfunktion möchte der Netzbetreiber klassischerweise die Verdichterkosten im Betrieb minimieren. In einer linearen Problemformulierung ist dies allerdings nicht direkt möglich, da der Zusammenhang zwischen Verdichterleistung und Druckerhöhung nichtlinear ist. Man kann a-priori angestrebte Betriebszustände der Verdichter berechnen und versuchen, eine Lösung in die entsprechende Richtung zu leiten, wie in Kapitel 6 [16] angedacht. Im Rahmen dieser Arbeit waren allerdings keine Daten in hinreichender Auflösung verfügbar, als dass es sinnvoll gewesen wäre, einen solchen Ansatz hier weiter zu verfolgen. In Fällen mit ausreichender Datenqualität ist es jedoch einfach die Zielfunktion anzupassen. Je nach Fragestellung kann es sinnvoll sein, Knoten- oder Kanten-Slack-Variablen einzuführen. Dies ist beispielsweise bei der Betrachtung von Netzausbaumaßnahmen von Interesse [73] und wurde hier auch angewendet, allerdings aus anderem Grund. Ein Nachteil einer optimierungsbasierten Modellierung ist, dass, falls das Problem unlösbar ist, man in der Regel nicht auf einfache Weise Anhaltspunkte darüber erlangt, woran dies liegen könnte. Bei unsicherer Datenlage, wie es bei den hier betrachteten Szenarien der Fall ist, treten

Unlösbarkeiten schnell auf. Eine Knoten- oder Kanten-Slack-Formulierung führt hier auch im Falle eines nicht übertragbaren Lastfalls zu einer Lösung und kann Anhaltspunkte geben, wo die Ursache liegt und wie weit man sich von einem lösbaren Grundproblem befindet. Dies ist allerdings kein präziser Prozess, sondern eher ein Indikator. Für eine Knoten-Slack-Formulierung wird *Gl. 4.3* um Slack-Variablen $s_j^+ \geq 0$, $s_j^- \geq 0$ erweitert:

$$\sum_{k:(j,k)\in A} q_{j,k} - \sum_{i:(i,j)\in A} q_{i,j} = d_j - s_j^+ + s_j^-, \forall i \in V. \qquad \textit{Gl. 4.77}$$

Diese werden dann minimiert:

$$\sum_{j\in V} s_j^+ + s_j^- \rightarrow min. \qquad \textit{Gl. 4.78}$$

Ein Nachteil ist, dass zulässige Betriebszustände bei losen, weil unbekannten, Druckschranken mitunter relativ weit vom tatsächlichen Betrieb des Netzes entfernt liegen. Dies hängt auch damit zusammen, dass die zulässige Fließgeschwindigkeit nicht explizit als Nebenbedingung gesetzt werden kann, da der Zusammenhang zwischen Druck, Fluss und Geschwindigkeit nichtlinear ist (siehe Gl. 4.79).

$$\frac{q\ R\ T\ z(p,T)}{M\ p\ A} \leq v_{max} \qquad \textit{Gl. 4.79}$$

In *Gl. 4.79* steht A für den Strömungsquerschnitt der jeweiligen Pipeline und M für das Molekulargewicht des Gases. Heuristische Einschränkungen sind zwar stets möglich, wurden hier allerdings nicht getroffen. Insbesondere, wenn man Rechnungen mit Datensätzen anstellen möchte für die kaum enge Druckschranken gegeben sind, kann man auch eine Maximierung der Summe aller Knotendrücke anstreben, um das sich ergebende Netzverhalten in eine der Realität nähere Gegend zu rücken[43]. Ein Nachteil bei dieser Variante sind (nach eigenen Erfahrungen) höhere Rechenzeiten und geringe Kompatibilität mit der selektiven Anpassung der Druckvariablen in Kapitel 4.2, da man hier entweder die Drücke vollständig diskretisieren muss oder eine Mischung aus einfachen und quadrierten Druckvariablen maximieren muss. Beides ist eigentlich wenig erstrebenswert, kann aber datenbedingt notwendig sein.

4.6. Implementierung

Das zuvor beschriebene Modell wurde in Python implementiert. Als Solver-Schnittstelle wurde hier Pyomo [146], [147] verwendet, da diese eine Solver-unabhängige Syntax bietet. Gleichzeitig ist die Pyomo-Syntax etwas umständlicher und bietet schlechtere Möglichkeiten Solver-abhängige Callbacks zu implementieren[44]. Als Solver wurde für alle

[43] Zur Erinnerung: Normalerweise wäre erstmal nur von Interesse, ob ein Lastfall innerhalb der gegebenen Schranken übertragbar ist - Ein Feasibility-Problem ohne eindeutige Lösung, die von der Realität des Netzbetriebs weit entfernt sein kann.

[44] Dies ist ein Erfahrungswert des Autors.

Rechnungen Gurobi [148] genutzt, wobei die Implementierung in Pyomo die Nutzung anderer Solver ermöglicht.

Die Gasnetzkomponenten lassen sich im Sinne der OOP auch softwareseitig als Objekte einer Klasse auffassen.

Da in der Gasbranche mitunter nicht-SI-Einheiten, wie Normkubikmeter (eine quasi-Masseneinheit), gebräuchlich sind und die Beispieldatensätze [96], die bei der Entwicklung der Implementierung genutzt wurden, unterschiedliche Einheiten für die gleichen Größen enthielten, wurden sämtliche Größen mittels des units-Moduls aus dem astropy-Python-Package [149], [150] als einheitenbehaftete Objekte implementiert. Mit diesen Objekten kann normal gerechnet werden, während gleichzeitig die Einheiten mitgeführt werden. Dies hilft einheitenbedingte Rechenfehler auszuschalten und bietet einfache Einheitenumrechnung nach Wunsch des Nutzers. Dies ist insbesondere praktisch, da die bevorzugte Flusseinheit in der Erdgasbranche Normkubikmeter pro Zeiteinheit ist, aber in der Wasserstoffbranche Kilogramm pro Zeiteinheit. Hier gibt es sicherlich Tradeoffs zu machen und Möglichkeiten zur Verbesserung.

Ein möglicher Output für eine Nominierung aus dem GasLib-582-v2 Benchmark-Netzwerk ist in Abbildung 4.1.10.1 dargestellt. Abbildung 4.1.10.2 zeigt das sich nach Anklicken einer Pipelinekante öffnende Popup mit den relevanten Daten des Netzwerkelements. Eine weitere Herausforderung bei der Implementierung ist die Visualisierung. Die Herausforderung besteht darin, dass man eine große Fülle an Informationen gleichzeitig, verständlich und übersichtlich, zugänglich machen möchte. Insbesondere möchte man Komponenten und ihre Eigenschaften sowie den Netzzustand in einem betrachteten Lastfall, eingebettet in eine geographische Karte, einsehen können. Die beste Lösung ist daher ein interaktiver Plot, bei dem man zusätzliche Komponenteninformationen durch Schweben über oder anklicken einer Komponente einblenden kann. Hier wurde das folium-Python-Package genutzt, das im Wesentlichen ein Wrapper um die JavaScript-Bibliothek leaflet.js ist, und alle genannten Anforderungen erfüllt. Der Output ist eine HTML-Datei, die in gängigen Webbrowsern geöffnet werden kann. Ein Nachteil einer interaktiven Visualisierung ist, dass sie sich weniger gut für die Darstellung in Printmedien eignet und Bibliotheken für interaktive Plots häufig Animationen zur Anzeige der Flussrichtung in einem Graphen nutzen, die sich nicht in Printform übertragen lassen.

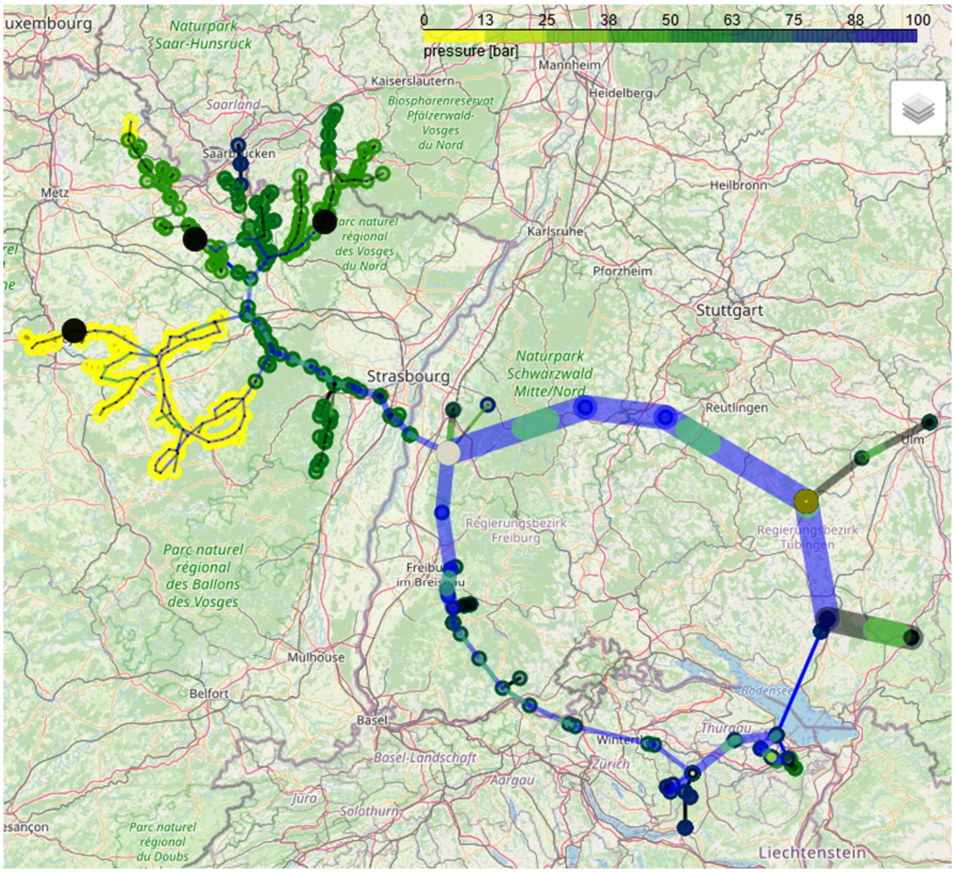
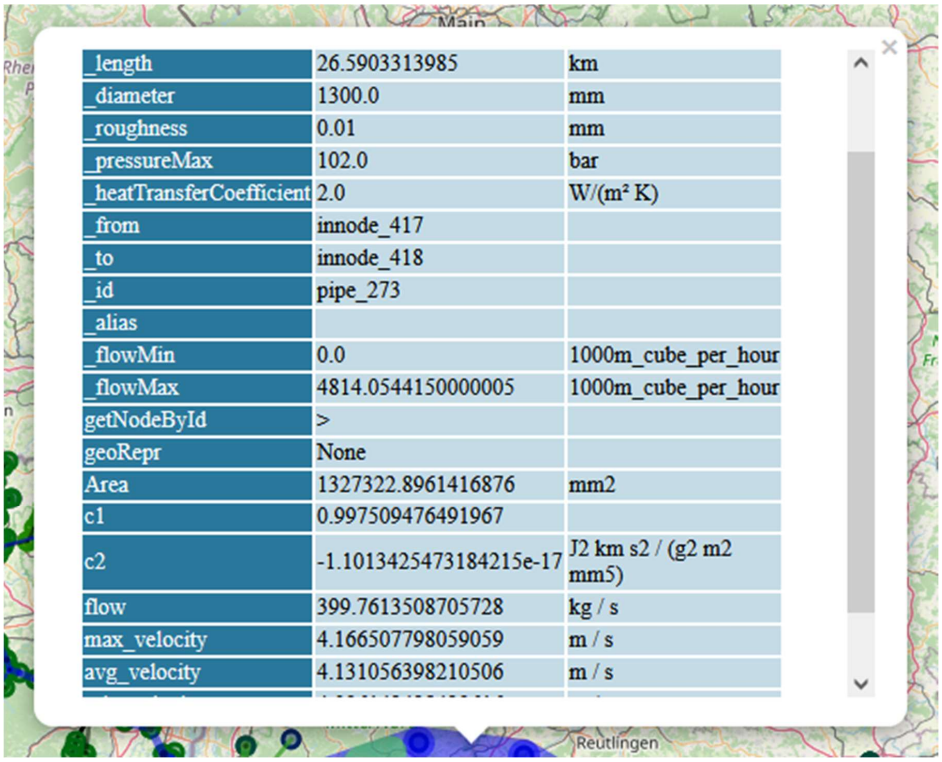


Abbildung 4.1.10.1: Beispiel-Plot für das Ergebnis einer Nominierung im GasLib-582-v2 Benchmark-Netzwerk. Die Druckverteilung über die Knoten, gemäß der Farbkennung, ist klar erkennbar. Die Dicke der dargestellten Kanten ist proportional zum Fluss über die jeweilige Kante.



_length	26.5903313985	km
_diameter	1300.0	mm
_roughness	0.01	mm
_pressureMax	102.0	bar
_heatTransferCoefficient	2.0	W/(m² K)
_from	innode_417	
_to	innode_418	
_id	pipe_273	
_alias		
_flowMin	0.0	1000m_cube_per_hour
_flowMax	4814.0544150000005	1000m_cube_per_hour
getNodeById	>	
geoRepr	None	
Area	1327322.8961416876	mm2
c1	0.997509476491967	
c2	-1.1013425473184215e-17	J2 km s2 / (g2 m2 mm5)
flow	399.7613508705728	kg / s
max_velocity	4.166507798059059	m / s
avg_velocity	4.131056398210506	m / s

Abbildung 4.1.10.2: Beispiel einer interaktiv auswählbaren Komponententabelle im Ergebnisplot einer Nominierung im GasLib-582-v2 Benchmark-Netzwerk.

4.7. Validierung

Die Validierung von Modellen ist sehr wichtig, um die Aussagekraft dieser bezüglich des jeweils abgebildeten Systems zu verifizieren und zu quantifizieren. Während Modelle, basierend auf einem physikalischen Grundverständnis des Systems (im Englischen *first principles* genannt), die wesentlichen Charakteristika abbilden, sind auch sie lediglich Annäherungen an die Wirklichkeit und man muss erwarten, dass sie, zumindest in Bereichen, von dieser abweichen. Der klassische Ansatz hier ist gleichzeitig auch die Basis wissenschaftlicher Arbeit - es ist das Wechselspiel aus wissenschaftlicher Hypothese und Experiment.

Im hier vorliegenden Fall ist die Hypothese, dass die bei der Modellbildung getroffenen Vereinfachungen im betrachteten Kontext zulässig sind, das heißt eine, unter praktischen Gesichtspunkten, quantifizierbare, hinreichend kleine, Abweichung gegenüber der Realität aufweisen.

Der Entwurf des dazugehörigen Experiments gestaltet sich schwieriger. Dem Autor standen keine Messdatensätze zur Verfügung und es ist ohnehin kaum möglich, mit bestehenden Infrastrukturen, die sich im permanenten Betrieb befinden, Experimente zu fahren, allerdings können Betreiber bestimmte charakteristische Parameter aus dem laufenden

Betrieb schätzen. Dies war hier nicht möglich. Daher wurde im Kontext dieser Arbeit eine mittelbare Validierung über ein bereits validiertes Modell gewählt. Dabei kann lediglich das Modellverhalten für vergleichbare Parameter gegeneinander getestet werden. Hierzu wurde das pandapipes Python-Paket PANDAPIPES [78] als Referenz herangezogen. Dies wurde bereits gegen die kommerziell genutzten Softwaretools STANET [151] und OpenModelica [152] validiert.

Schlüsselelement der Validierung muss die korrekte Abbildung des Druckabfalls in den Pipelines sein, da dieser entscheidend die Übertragbarkeit eines Transportszenarios bestimmt und gleichzeitig starke Vereinfachungen komplexer Phänomene enthält.

Die in dieser Arbeit verwendete Erweiterte Inkrementelle Methode (*Gl. 4.41 - Gl. 4.49*) führt mit ihrer Toleranz potenziell zusätzliches Rauschen ein, das nicht direkt auf die Wahl physikalischer Modelle zurückzuführen ist. Daher sollte man zunächst die verwendete Pipelinegleichung *Gl. 4.4* isoliert betrachten. Unterschiede können aufgrund der Stoffdatenberechnung und der, im Rahmen des linearen Modells notwendigen, a-priori Mittelung selbiger auftreten.

Darüber hinaus ist die Anwendbarkeit der empirischen Modellierung des Druckverlustkoeffizienten λ_a nach Nikuradse zu prüfen.

Zur Orientierung siehe Abbildung 4.1.10.1.

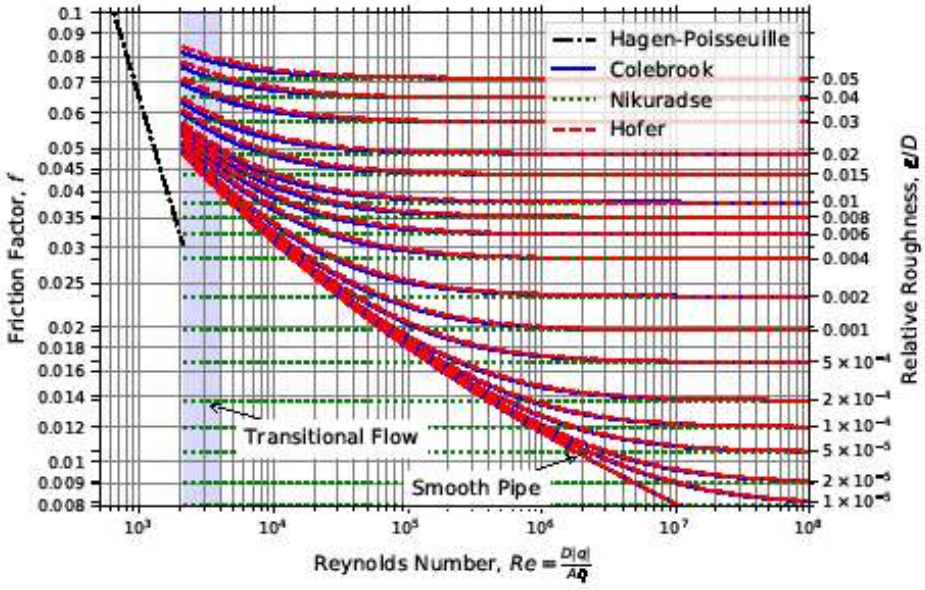


Abbildung 4.1.10.1: Eigene Darstellung: Moody-Diagramm: Darstellung des Druckverlustkoeffizienten (y-Achse links) in Abhängigkeit der Reynoldszahl (x-Achse) und der relativen Rauigkeit (y-Achse rechts) für verschiedene Modelle (Hagen-Poiseuille (laminar), Nikuradse (Re → ∞), Hofer (explizit), Colebrook-White (implizit).

Zum einen stellt die Gleichung einen Grenzfall dar (Reynoldszahl → ∞) und zum anderen kann die angesetzte mittlere integrale Rohrrauigkeit k_a aus Literaturwerten anpassungsbedürftig sein. Für k_a = 1 mm bewegt sich die relative Rauigkeit im Bereich

7,143× $10^{-}5$ - 0,005 (200 mm - 1400 mm Pipelinedurchmesser). Typische Reynoldszahlen bewegen sich im Bereich $Re = \frac{D|q|}{A\eta} > 10^6 - 10^7$. Nur für sehr kleine Flüsse und Pipelinedurchmesser fällt der Wert deutlich darunter. Das heißt man bewegt sich in den meisten Fällen im Zulässigkeitsbereich der Nikuradse-Gleichung.

Im Rahmen des vereinfachenden Charakters der empirischen Gleichung ist die Rohrrauigkeit nicht mehr als die tatsächliche Oberflächenbeschaffenheit zu sehen, sondern viel mehr als das, was man im Ingenieursbereich besser effektive Rohrrauigkeit nennen würde. Man vergleiche dazu die tatsächliche Oberflächenrauigkeit verschiedener Pipelinematerialien in Tabelle 4.1.10.1 mit den anzusetzenden Richt- und Erfahrungswerten für die Berechnung in Tabelle 4.1.10.2 und Tabelle 4.1.10.3.

Tabelle 4.1.10.1: Materialrauigkeitswerte, [13] Tafel 4.4 (Auszug)

material, state	degree of roughness	roughness k [mm]
steel, plastic coated	marginally rough	0.010, ..., 0.032
gas pipeline, new		0.020, ..., 0.065
steel, seemless drawn		0.01, ..., 0.06
steel, welded		0.02, ..., 0.10
steel pipe, seemless, new		0.02, ..., 0.06
steel pipe, seemless rolled, new		0.03, ..., 0.05
steel pipe, welded, new		0.04, ..., 0.10
steel pipe, drawn, new		0.04 (0.02, ..., 0.10
steel pipe, welded, new		0.05 (up to 0.10)
natural gas pipeline, old	mildly rough	0.10, ..., 0.14

Tabelle 4.1.10.2: Anhaltswerte integrale Rauigkeit, Tafel 4.5 [13] (nach DVGW-G 464).

k [mm]	material	deposits	configuration	internals	example
0.1	steel, cast, plastic	none	not/mildly meshed	almost none	transport pipeline
0.5	steel, cast, plastic	none	more meshed	yes	distribution pipeline
1.0	steel, cast	few	strongly meshed	yes	low-pressure pipeline networks
3.0	steel, cast	a lot	strongly meshed	yes	old distribution pipeline

Tabelle 4.1.10.3: Erfahrungswerte integrale Rauigkeit, [13] Tafel 4.6.

configuration	pipe material	roughness k [mm]
strongly meshed	steel pipeline	1.0
strongly meshed	plastic pipeline	0.2
strongly meshed	cast-iron pipeline	2.0, ..., 4.0
not meshed	steel pipeline	0.2
not meshed	plastic pipeline	0.1

Typische Rohrrauigkeiten für unbeschichtete Stahlrohre bewegen sich im Bereich 0,05-0,15 mm. Dabei variieren die Werte über mehrere Größenordnungen, aber auch die entsprechend anzusetzenden Werte für die integrale Rauigkeit liegen ein bis zwei Größenordnungen darüber und variieren ebenfalls über eine Größenordnung. Das heißt, hier verbirgt sich sowohl Fehlerpotential durch Interpretation der integralen Rauigkeit als Materialeigenschaft, als auch durch den weiten zulässigen Wertebereich der integralen Rauigkeit selbst. Die Wahl von 1 mm als Wert der integralen Rauigkeit scheint eine konservative Schätzung zu sein. Für größere Transportpipelines sollte ein Wert von 0,5 mm oder auch 0,1 mm in Erwägung gezogen werden.

In Abbildung 4.1.10.2 sind Ausgangsdrücke für verschiedene Pipelinelängen und -durchmesser bei einem Fluss von 300 kg/s Erdgas, einem Eingangsdruck von 86 bar und identischer Rohrrauigkeit von 1 mm im Vergleich dargestellt.

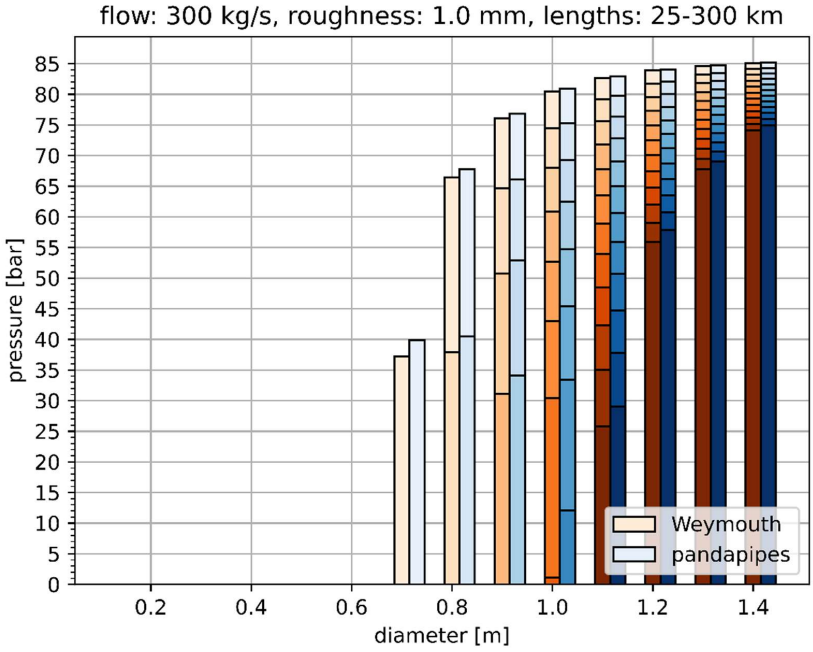


Abbildung 4.1.10.2: Vergleich Druckabfall Gleichung *Gl. 4.3* gegenüber pandapipes: Fluss 300 kg/s Erdgas, Rohrrauigkeit 1 mm, Eingangsdruck 86 bar. Variiert über den Rohrdurchmesser (x-Achse, 100 mm Schritte) und über die Rohrlänge (Bildtiefe, 25 km Schritte).

Die Abbildung ist so zu lesen, dass die Stufen (Ausgangsdrücke bei einer fix gesetzten Pipelinelänge) der beiden Modelle idealerweise parallel verlaufen sollten. Als Beispiel sei der Fall für den Durchmesser von 1 m betrachtet. Hier sieht man am oberen Ende der Balken auf beiden Seiten die Stufe, die der Länge von 25 km entspricht. Man kann hier den Unterschied zwischen den Ausgangsdrücken in beiden Modellen ablesen (ca. 80,5 bar links und 81 bar rechts). Man sieht hier geringe gleichmäßige Abweichungen und eine steigende Abweichung für sehr niedrige Ausgangsdrücke. Dabei ist die gleichmäßige Abweichung auf eine unterschiedliche Stoffdatenberechnung zurückzuführen[45]. Die steigende Abweichung für sehr große Druckabfälle dürfte dadurch zu begründen sein, dass bei niedrigen Drücken die auf Basis der eingangs gegebenen oberen und unteren Druckschranken berechneten mittleren Stoffwerte tatsächlich stärkere Änderungen erfahren als bei höheren Drücken.

Ein analoger Vergleich für Wasserstoff findet sich in Abbildung 4.1.10.3 und ein Screening der jeweiligen Abweichungen über einen weiten Bereich an Kombinationen ist in Abbildung 4.1.10.4 dargestellt. Schwarze Bereiche sind hier solche, wo das Referenzmodell keine zulässigen Flüsse mehr findet.

[45] Die Mischungseigenschaften für Erdgas wurden als Linearkombination berechnet. Hier sollte in Zukunft z.B. das AGA-8 Verfahren angewendet werden.

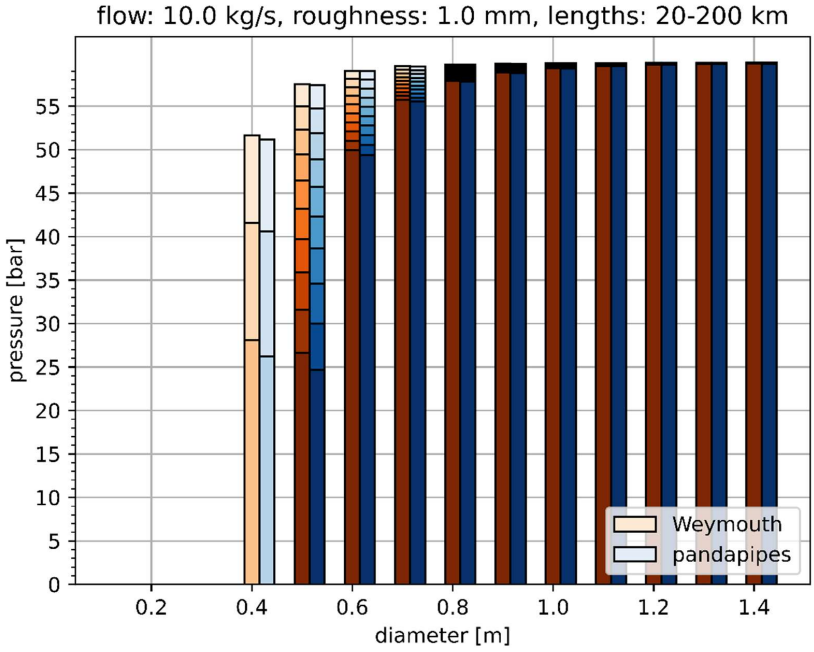


Abbildung 4.1.10.3: Vergleich Druckabfall Gleichung *Gl. 4.3* gegenüber pandapipes: Fluss 10 kg/s Wasserstoff, Rohrrauigkeit 1 mm, Eingangsdruck 60 bar. Variiert über den Rohrdurchmesser (x-Achse, 100 mm Schritte) und über die Rohrlänge (Bildtiefe, 20 km Schritte).

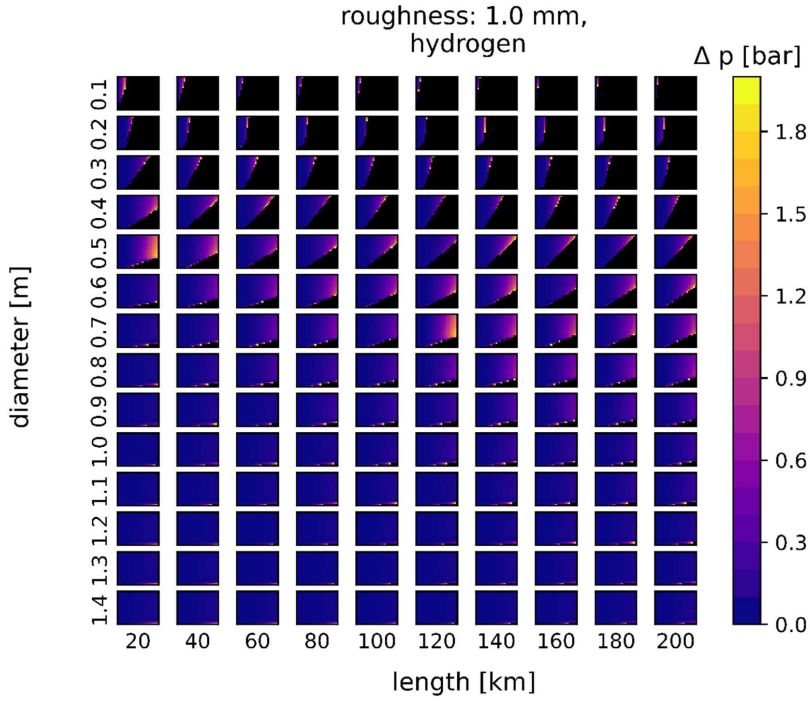


Abbildung 4.1.10.4: Screening: Differenz des Ausgangsdrucks nach Gleichung *Gl. 4.3* gegenüber pandapipes: Für jede Kachel: Flüsse (x-Achse): [0,1 kg/s - 0,5 kg/s, 1 - 20 kg/s], Eingangsdrücke (y-Achse): 5-100 bar, Wasserstoff, Rohrrauigkeit 1 mm.

Sowohl im Falle von Erdgas als auch im Fall von Wasserstoff kann durch Anpassung des Rohrrauigkeitswertes ein besserer Fit erreicht werden. Siehe, beispielsweise, Abbildung 4.1.10.5.

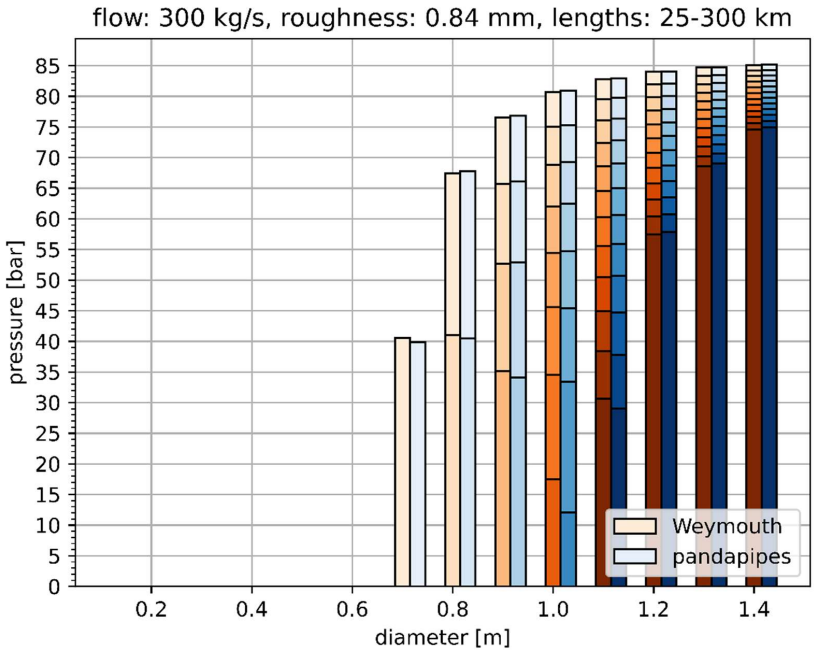


Abbildung 4.1.10.5: Vergleich Druckabfall Gleichung *Gl. 4.3* gegenüber pandapipes: Fluss 300 kg/s Erdgas, Rohrrauigkeit 0.84 mm, Eingangsdruck 86 bar. Variiert über den Rohrdurchmesser (x-Achse, 100 mm Schritte) und über die Rohrlänge (Bildtiefe, 25 km Schritte).

Es ist vielleicht an dieser Stelle sinnvoll hervorzuheben, dass die Modelle in der Regel nicht in Konkurrenz zueinander stehen, sondern unterschiedliche Schwerpunkte setzen. Pandapipes zielt mit seiner nichtlinearen Formulierung auf die möglichst präzise Abbildung des Flusses in Netzwerken ab, wobei alle Schaltzustände im Netz vorgegeben werden müssen, während das hier vorgestellte Modell eine direkte Berücksichtigung der Schaltzustände als Variablen ermöglicht, dabei aber Abstriche hinsichtlich der Berücksichtigung von Nichtlinearitäten machen muss. Um sich die Vorteile beider Ansätze nutzbar zu machen, wäre, falls möglich, eine sequenzielle Kopplung beider Modelle erstrebenswert. Die genaue Prüfung dieser Möglichkeit steht zum Zeitpunkt des Schreibens noch aus. Eine erste Sichtung ergab, dass es nicht für jede Komponente eine Eins-zu-eins-Korrespondenz zwischen den Modellen zu geben scheint (z.B. Druckregelventile). Auch muss in Pandapipes stets ein externer Netzknoten benannt werden dessen Druckniveau bekannt ist und der als Slack-Knoten für die Berechnung genutzt wird. Die Auswahl eines solchen Knotens beim Übertrag eines Szenarios aus dem in dieser Arbeit vorgestellten Modell nach Pandapipes erscheint nicht trivial, da anfangs im Szenario kein Druck bekannt ist und dies auch durch das hier vorgestellte Modell nicht gefordert wird.

5. Ergebnisse

5.1. Wasserstoffnetz 2025

Als Zielfunktion wurde die Maximierung der Summe aller Drücke an den Netzknoten angesetzt, die, wie bereits erwähnt, den unklaren Druckschranken des Feasibility-Problems geschuldet ist. Für die Rechnungen wurden die Diskretisierungstoleranzen für die quadrierten Drücke, Flüsse und Druckdifferenzen der nichtlinearen Widerstandselemente auf die Werte 0,05 bar, 0,1 kg/s, 0,1 bar gesetzt. Die Fließgeschwindigkeiten wurden, als Postprocessing-Schritt, aus den Pipelineflüssen in Kombination mit den Knotendrücken am Eingang und am Ausgang des jeweiligen Pipelineabschnitts berechnet. Neben dem maximalen Druck (30 bar, 60 bar) wurde die universell angesetzte Rohrrauigkeit variiert (0,1 mm, 1 mm).

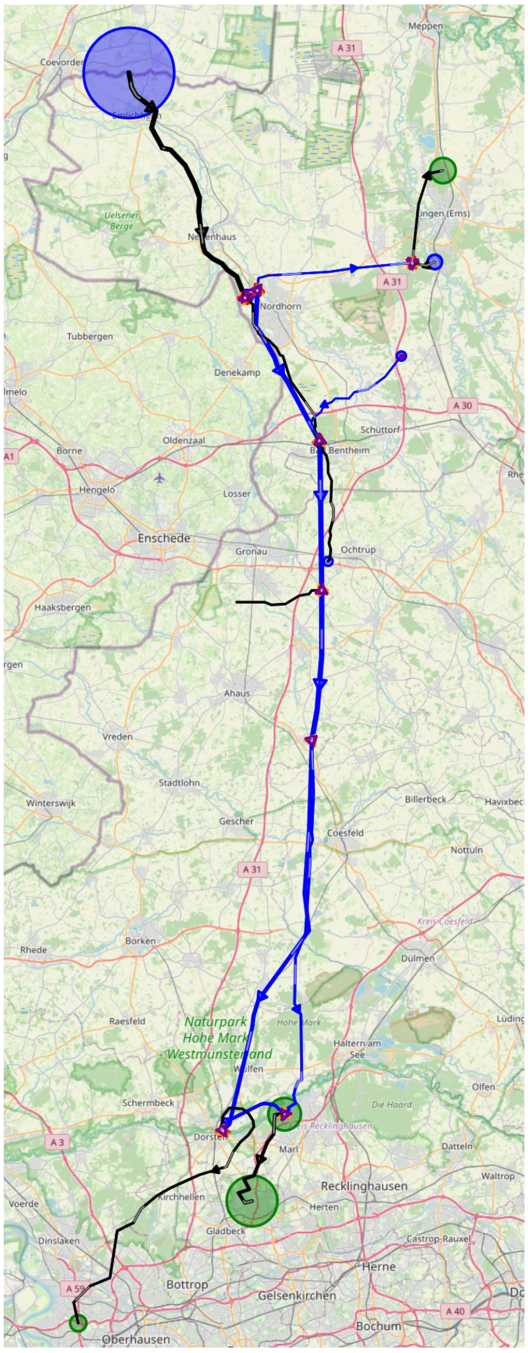
Zum Zwecke der Übersichtlichkeit sind die Ergebnisdaten der Rechnungen für 2025 im Anhang I.8.1 - Anhang I.8.5 hinterlegt und sollen hier nur ausschnittsweise dargestellt werden.

Ein Überblick über das Ergebnis des Basisszenarios 2025 (maximal 30 bar, 0,1 mm) ist in Abbildung 4.1.10.1 und Abbildung 4.1.10.2 dargestellt. Man erkennt, dass die primären Verbraucher Chemieparks sind und die Stahlwerke im Vergleich noch keine großen Mengen Wasserstoff beziehen (siehe Hamborn im Süden).

Tabelle 4.1.10.1: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im 2025 Basisszenario, 30 bar max., 0,1 mm.

Quellen		
Id	**p [bar]**	**q [kg/s]**
Bremen	30.0	0.0
Elbe Süd	30.0	0.0
Vlieghuis	30.0	3.52
Hanekenfähr	30.0	0.55
Bad Lauchstädt	30.0	0.16
Emsbüren	30.0	0.39
Ochtrup (city)	30.0	0.39
Senken		
Id	**p [bar]**	**q [kg/s]**
Hamborn	24.0	0.63
Scholven	21.72	2.0
Lingen	29.25	0.97
Eckel	30.0	0.0
Leuna	30.0	0.16
Marl	5.13	1.25

Die sich einstellenden Flüsse und Drücke können qualitativ Abbildung 4.1.10.1 und Abbildung 4.1.10.2 und quantitativ Tabelle 4.1.10.1 und Tabelle 4.1.10.2 entnommen werden. Die Drücke an den nicht-Quellen-/Senkenknoten wurden in der tabellarischen Aufstellung, der Übersichtlichkeit halber, weggelassen. Falls sie nicht komplett vom Netz abgekoppelt sind, liegen sie, in einem Netz ohne interne Verdichter, wie diesem, zwischen den Quellen- und den Senkendrücken. In Abbildung 4.1.10.1 ist die Ein-/Ausspeisesituation nach Ort und relativer Größe (Kreisdurchmesser), sowie die Pipelineflüsse nach Richtung (Pfeil) und Größe (Dicke der Kante) dargestellt. Schwarz gefärbte Pipelinestränge symbolisieren, dass die dort herrschenden Flüsse bereits, durch die Anwendung des Preprocessings, bestimmt werden konnten. In Abbildung 4.1.10.2 ist das Druckgefälle von den Einspeisern im nördlichen Teil zu den Abnehmern im südlichen Netzteil zu erkennen. Einen Überblick über die geschätzten Geschwindigkeiten gibt Abbildung 4.1.10.3.



Farblegende
Quellenknoten
Senkenknoten
Verbindungsknoten
Pipeline
Absperrventil
Kurzleitung
Druckregelventil
Kompressor
Nichtlinearer Widerstand
Linearer Widerstand
Sicherheitsventil
Komponente mit einem fixierten Fluss

Abbildung 4.1.10.1: Flüsse im Cluster West des Basisszenarios für das Jahr 2025. Die Ein-/Ausspeisemengen sind als Kreise dargestellt und relativ zueinander skaliert. Quellen sind blau gefärbt und Senken grün. Die jeweilige Ein-/Ausspeisemenge ist proportional zum Kreisdurchmesser. Die Dicke einer Kante des Graphen ist proportional zum Fluss über die Kante. Die größte Einspeisung hier liegt bei 3,52 kg/s in Vlieghuis.

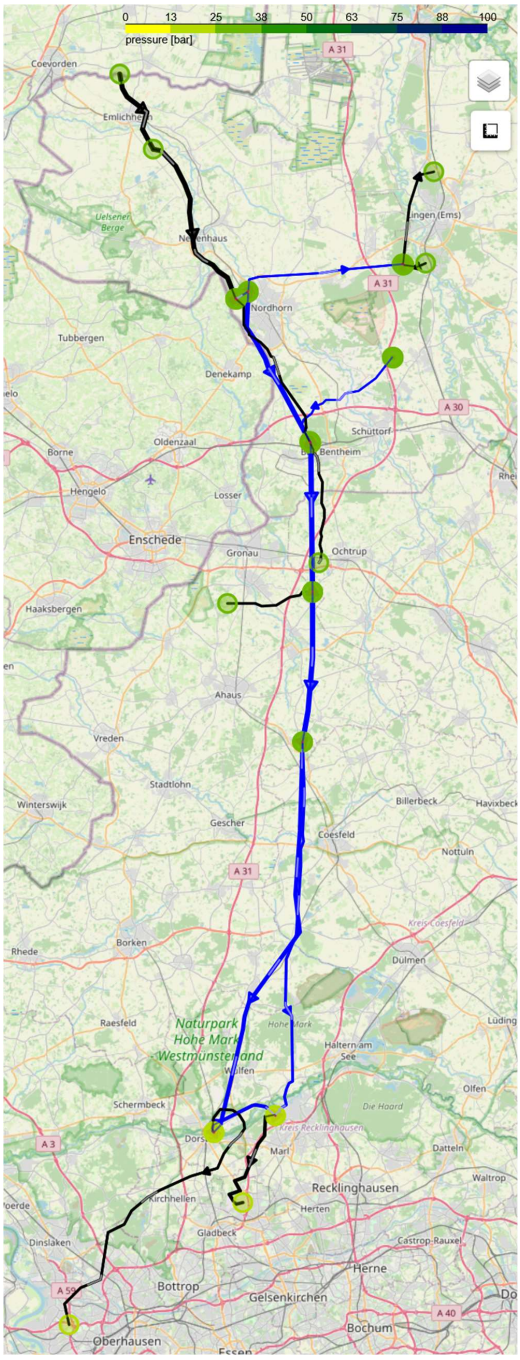


Abbildung 4.1.10.2: Flüsse und Drücke im Cluster West des Basisszenarios für das Jahr 2025. Die Drücke an den Netzknoten sind farblich entsprechend der Farbskala kodiert. Die Dicke einer Kante des Graphen ist proportional zum Fluss über die Kante. Einige Knoten erscheinen ausgefüllt, dies ist jedoch nur auf die Überlagerung von nahe beieinander liegenden Knoten zurückzuführen.

Tabelle 4.1.10.2: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im 2025 Basisszenario (durchschnittlich) bei 30 bar Maximaldruck und Rohrrauigkeit von 0,1 mm.

Id	l [km]	d [mm]	q [kg/s]	v_{min} [m/s]	v_{avg} [m/s]	v_{max} [m/s]
Bad Lauchstädt-Leuna	20.0	500.0	0.16	0.32	0.32	0.32
Lingen-Schepsdorf	11.3	250.0	-0.97	7.88	7.95	8.03
Frenswegen-Bad Bentheim	18.0	350.0	3.49	14.47	14.97	15.51
Schepsdorf-Frenswegen	18.0	450.0	-0.42	1.06	1.06	1.06
Bad-Bentheim-Emsbüren	15.0	400.0	-0.39	1.22	1.22	1.22
Bad Bentheim-Ochtrup	15.3	400.0	3.88	13.19	13.46	13.75
Ochtrup-Legden	15.7	400.0	3.88	13.75	14.06	14.39
Legden-Dorsten	38.0	400.0	2.63	9.76	10.04	10.33
Kalle-Frensdorfer Buchgraben	18.9	600.0	3.52	4.95	4.96	4.97
Frensdorfer Buchgraben-Ochtrup	29.9	600.0	-0.39	0.54	0.54	0.54
Elbe Süd-Weissenfelde	22.1	600.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Achim-Heidenau	54.2	450.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Heidenau-Eckel	19.2	450.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ganderkesee-Achim	40.8	600.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ganderkesee-Bremen	17.1	400.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Frensdorfer Buchgraben-Frenswegen	1.4	600.0	3.91	5.51	5.52	5.52
Hamborn-Dorsten	37.0	600.0	-0.63	1.11	1.11	1.11
Epe-Ochtrup	10.0	300.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Dorsten-Marl	8.0	300.0	2.0	13.94	14.17	14.41
Vlieghuis-Kalle	6.7	600.0	3.52	4.94	4.94	4.95
Legden-Marl	40.4	200.0	1.25	18.52	30.63	90.62
Marl-Scholven	14.0	300.0	2.0	14.41	14.88	15.38
Schepsdorf-Hanekenfähr	2.3	500.0	-0.55	1.11	1.11	1.11
Weissenfelde-Heidenau	19.0	600.0	0.0	0.0	0.0	0.0

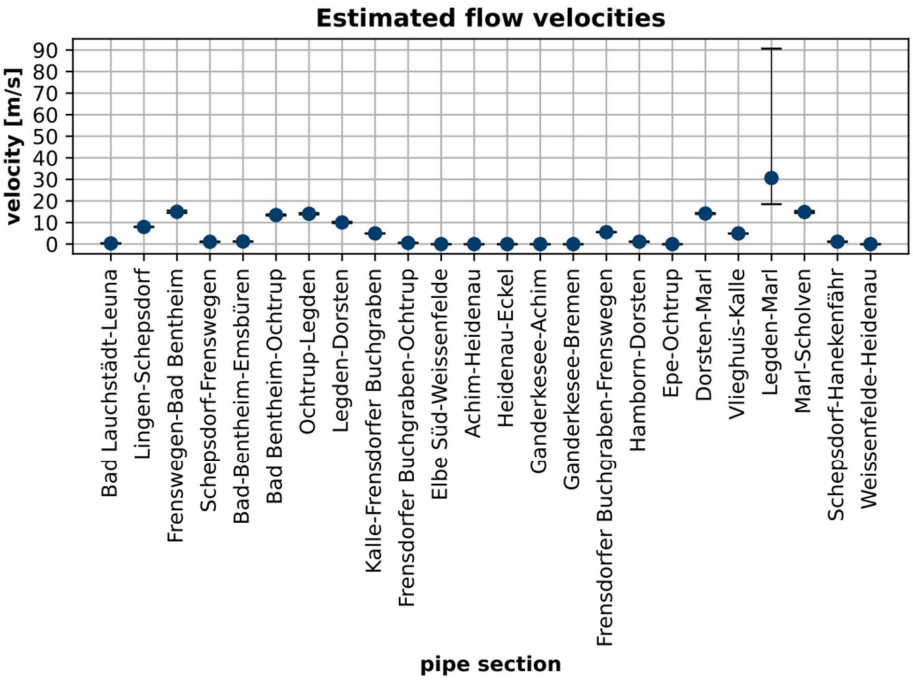


Abbildung 4.1.10.3: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im 2025 Basisszenario (durchschnittlich) bei 30 bar Maximaldruck. Die „Fehlerschranken“ geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an.

Es ist ersichtlich, dass trotz der relativ moderaten Transportmengen mitunter bereits sehr hohe Fließgeschwindigkeiten auftreten können, insbesondere auf dem Abschnitt Legden-Marl. Hier sorgt ein Fluss von 1,25 kg/s durch die 200-mm-Leitung zu einer Höchstgeschwindigkeit von 90,62m/s und einem Abgabedruck von lediglich 5,13 bar - knapp über dem gesetzten minimalen Abgabedruck von 5bar. Während die Transportmengen relativ gering wirken, scheint hier das Netz lokal bereits kurz vor einem Engpass zu stehen. Wie im Abschnitt Modellvalidierung bereits angesprochen wurde, kann die Wahl der angesetzten Rohrrauigkeit einen großen Einfluss auf den vorhergesagten Druckabfall über den Leitungsverlauf haben. Dies verdeutlicht die Variation auf eine universale Rohrrauigkeit von 1 mm. Während 0,1 mm, in Anbetracht der Unkenntnis über die tatsächlichen Rauigkeiten, gemäß Tabelle 4.1.10.2 und Tabelle 4.1.10.3 sicherlich die angemessene Wahl ist, könnte man versucht sein, zu meinen, dass man mit einer höheren Rohrrauigkeit stärker zur „sicheren Seite“ in Bezug auf die Fließgeschwindigkeiten abschätzt. Hier trügt die Intuition. Durch die höhere Rauigkeit im gesamten Netz, verschiebt sich der Fluss so, dass mehr über die Leitung Legden-Dorsten fließt und die höchste Fließgeschwindigkeit von 47 m/s auf dem Abschnitt Marl-Scholven auftritt. Der Abgabedruck liegt hier, mit ca. 7 bar, in einer ähnlichen Größenordnung wie bei einer Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Dieses Beispiel zeigt, wie grundlegend und unintuitiv kleinere Änderungen das Netzverhalten beeinflussen können.

Zur weiteren Beurteilung des Lastfalls kann auch ein Blick auf die Druckabsenkungen in den Druckregelventilen der Kreuzungspunkte geworfen werden. Im Rahmen der Netztopologie-Modellierung wurden hier Druckregelventile zum Druckangleich ankommender Ströme vorgesehen, um das Flussverhalten nicht unnötig einzuschränken. In Bad Bentheim tritt eine größere Druckabsenkung von ca. 2,22 bar auf (siehe Tabelle 4.1.10.3). Dies ist sicherlich für den normalen Netzbetrieb nicht gewollt, falls vermeidbar. Denn eine nicht zwingende Drosselung bedeutet letztendlich eine ineffiziente Netzführung. Eine kurze Rechnung, hier nicht aufgeführt, zeigt, dass sich auch ohne irgendwelche Druckregelventile auskommen ließe, bei sehr ähnlichen Bedingungen.

Beim Blick auf die Anhaltswerte für die zulässige Fließgeschwindigkeit Wasserstoff (Tabelle 2.2.4.2), sieht man, dass auch die sehr hohen Geschwindigkeiten in Bezug auf das Wandschubspannungskriterium noch im Rahmen sind. Die praktische Gültigkeit des Wandschubspannungskriteriums ist allerdings noch zu prüfen, stellt jedoch einen nützlichen Anhaltspunkt dar, der hier aufgegriffen wird.

Tabelle 4.1.10.3: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im 2025 Basisszenario bei 30 bar, 0,1 mm Rohrrauigkeit.

Id	p_{in} [bar]	p_{out} [bar]	Δp [bar]
Bad Bentheim$_{3,\ in}$	29.99	27.77	2.22
Frensdorfer Buchgraben$_{3,\ in}$	30.00	29.83	0.17
Schepsdorf$_{2,\ in}$	30.00	29.81	0.19

Bei einer Anhebung des maximalen Einspeisedrucks auf 60 bar sinken die Fließgeschwindigkeiten deutlich, wie Abbildung 4.1.10.4 zu entnehmen ist.

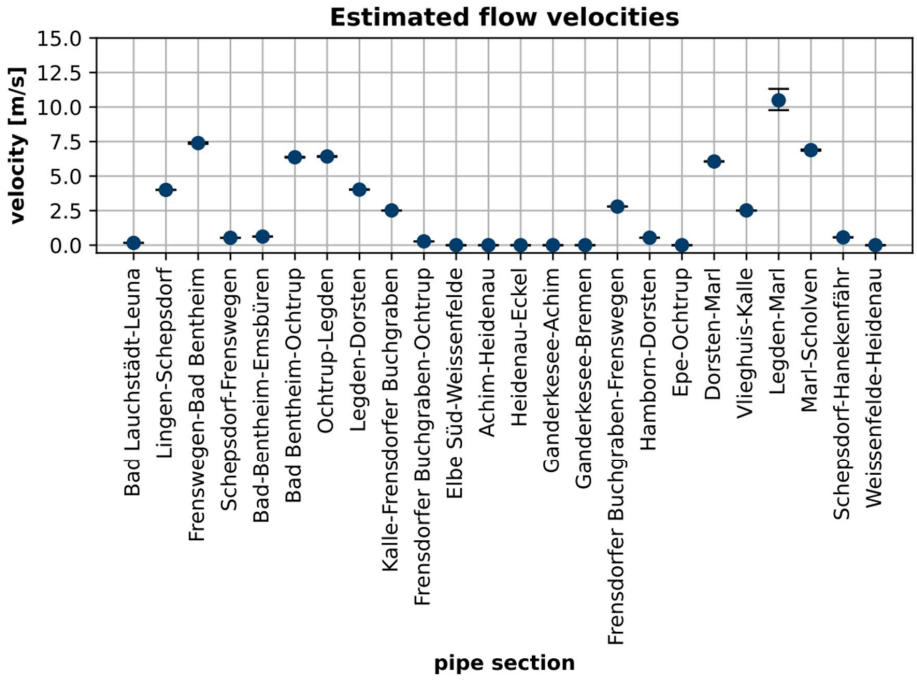


Abbildung 4.1.10.4: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im 2025 Basisszenario (durchschnittlich) bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an.

Der Druckregelbedarf steigt in Summe leicht an (siehe Tabelle 4.1.10.4).

Tabelle 4.1.10.4: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im 2025 Basisszenario bei 60 bar, 0,1 mm Rohrrauigkeit.

Id	p_{in} [bar]	p_{out} [bar]	Δp [bar]
Bad Bentheim$_{3,\ in}$	60.00	58.91	1.09
Dorsten$_{3,\ in}$	57.32	50.00	7.31
Frensdorfer Buchgraben$_{3,\ in}$	60.00	59.91	0.09
Marl$_{3,\ in}$	49.72	49.70	0.01
Schepsdorf$_{2,\ in}$	60.00	59.91	0.09

Doch auch hier zeigt eine kurze Rechnung ohne Druckregelventile, dass dies auch ohne zusätzliche lokale Druckabsenkung möglich wäre. Für den Betrieb bei maximal 60 bar, fällt der Druck an den Ausspeisepunkten nicht unter 48 bar.

Während dieses Basisszenario im Rahmen der gesetzten Schranken als übertragbar gilt, zeigt der Vergleich der Varianten für maximal 30 bar und für maximal 60 bar, dass die Fließgeschwindigkeiten im 30-bar-Fall mit bis zu 90,62 m/s hoch und der minimale Abgabedruck sehr knapp über der bereits niedrigen Unterschranke liegt. Nimmt man

mögliche Approximationsfehler des Modells, siehe Abschnitt 4.7, für große Druckabfälle hinzu, so wäre sicherlich auch in einem frühen Stadium ein Netzbetrieb bei einem höheren Druckniveau anzustreben und somit der 60-bar-Fall zu bevorzugen. Durch Kenntnis präziser Rohrrauigkeitswerte könnte die Aussagekraft der Abschätzung sicherlich noch präzisiert werden. Es ist davon auszugehen, dass der sich tatsächlich im Betrieb einstellende Netzzustand irgendwo zwischen den hier gerechneten Fällen liegt und zum einen die Verdichtungskosten an der Einspeisung minimiert und zum anderen ausreichend Abstand zu den vertraglich vereinbarten Abgabedrücken bietet.

Die Modellierung des Wasserstoffnetz 2025 anhand eines einzelnen Basisszenarios liefert bereits interessante und vor allem greifbare Erkenntnisse über das mögliche Netzverhalten dieser initialen Infrastruktur(en). Während das Wasserstoffnetz, wie abgebildet, bei niedrigen und bei höheren Druckniveaus betreibbar erscheint, können mit dem hier verwendeten Modell bereits frühzeitig mögliche, kritische Betriebszustände oder Engpässe im Netz identifiziert werden. Hier ist insbesondere die Pipeline Legden-Marl mit ihrer sehr hohen Fließgeschwindigkeit zu nennen. Gleichzeitig wird der Einfluss des Flusswiderstands auf das Flussmuster bei vorhandenen Netzmaschen, das heißt alternative Flusswege, deutlich. Derartige Einblicke sind mit gewöhnlichen Energieflussproblemen, ohne Potentialfluss, nicht zu erzielen. Erkenntnisse über transportnotwendige Druckniveaus im Netz können genutzt werden, um den an der Einspeisung notwendigen Verdichtungsbedarf und das an der Ausspeisung zusagbare Druckniveau abzuschätzen. Davon profitieren die vor- und nachgelagerten Stakeholder bei der Planung ihrer Erzeugungs- und Nutzungsanlagen. Gleichzeitig dient die Modellierung, zu einem gewissen Grad der Veranschaulichung der heterogenen Maßnahmen und Projekte im Zusammenhang mit der geplanten Infrastruktur, aber auch des Grades an Transparenz und an Übersicht. Die Tatsache, dass in der Modellierung zum Jahr 2025 kein Transport im Cluster Nord stattfindet, ist in diesem Lichte zu sehen. So gesehen ist weder das Wasserstoffnetz 2025 noch 2030, als extremal im Sinne der garantiert vollständigen Berücksichtigung aller Projekte zu sehen. Eine Problematik, die insbesondere die händische Lastfallerzeugung erschwert, ist, dass zahlreiche Quellen auch als Senken operieren können und umgekehrt. Dies ist darin begründet, dass viele Industrieparks lokale Erzeugungsanlagen planen, aber gleichzeitig, als Netzsenken anzusetzen sind. Man weiß nicht, welcher Anteil des Gesamtbedarfs lokal erzeugt werden soll, und welcher aus dem Netz bezogen werden soll. In Bezug auf das Netz spiegelt sich hier das gleiche Phänomen wider, wie es im Stromnetz der Fall ist: Es vollzieht sich ein Wandel, von hierarchisch gerichtetem Fluss, hin zu dezentralen Mustern. Ein Übergabepunkt ist nicht mehr nur Ausspeisepunkt oder Einspeisepunkt, sondern beides. Dies war ursprünglich eher Speichern und Sonderfällen vorbehalten.

5.2. Wasserstoffnetz 2030

Für das Jahr 2030 wurden drei händisch erzeugte Szenarien gerechnet (Basisszenario, Variation 1, Variation 2) und jeweils nach dem maximalen Druckniveau 30 bar und 60 bar sowie der universell angesetzten Rohrrauigkeit (1 mm, 0,1 mm) unterschieden. Außerdem wurden Screening-Rechnungen für einen Satz von 200 Zufallslastfällen durchgeführt. Die gesammelten Daten zu Projekten und Ein-/Ausspeisekapazitäten können den Tabellen in Anhang I.7.2 entnommen werden.

Die Ergebnisdarstellungen und Tabellen sind aus Gründen der Übersichtlichkeit in den Appendizes I.8.6 - I.8.9, I.8.10 - I.8.13 und I.8.14 - I.8.17 zu finden. Hier sollen lediglich einzelne, interessante Aspekte aufgegriffen werden. Der minimale Abgabedruck an den Senken ist, wie im Szenariojahr 2025, 5 bar und auch die Diskretisierungstoleranzen sind die gleichen (0,05 bar, 0,1 kg/s, 0,1 bar).

5.2.1. Basisszenario

Die erste interessante Erkenntnis im Basisszenario 2030 ist, dass für eine konservative angenommene Rohrrauigkeit von 1 mm der Lastfall bei einem Druckniveau von 30 bar durch das Netz nicht übertragbar ist, für eine Rohrrauigkeit von 0,1 mm jedoch schon. Das heißt es kommt bei diesem Druckniveau auf die Rohrcharakteristik an, ob der Lastfall übertragbar ist. In letzterem Fall, dem realistischeren mit 0,1 mm Rohrrauigkeit, sind die Drücke im Netz relativ hoch (Minimum 19,47 bar) und auch die höchste Fließgeschwindigkeit ist mit ca. 20 m/s moderat (siehe Abbildung 5.2.1.1). Dies ist in der Nähe zwischen den Großquellen und Großverbrauchern begründet, sowie dem geringen Nettofluss von 12,03 kg/s im Netzwerk. Die Umlegung des Importpunktes von Vlieghuis nach Elten scheint hier anderweitig Netzkapazitäten freizugeben, da der Nutzungsgrad des Gesamtnetzwerks gering ist (siehe Abbildung 5.2.1.1 und Appendix I.8.7). Die Tatsache, dass bereits im Szenariojahr 2025 unvorteilhafte Netzzustände auftreten können, hat möglicherweise diese Umlegung des Transportpunktes zum Szenariojahr 2030 motiviert und kommt hier zum Tragen.

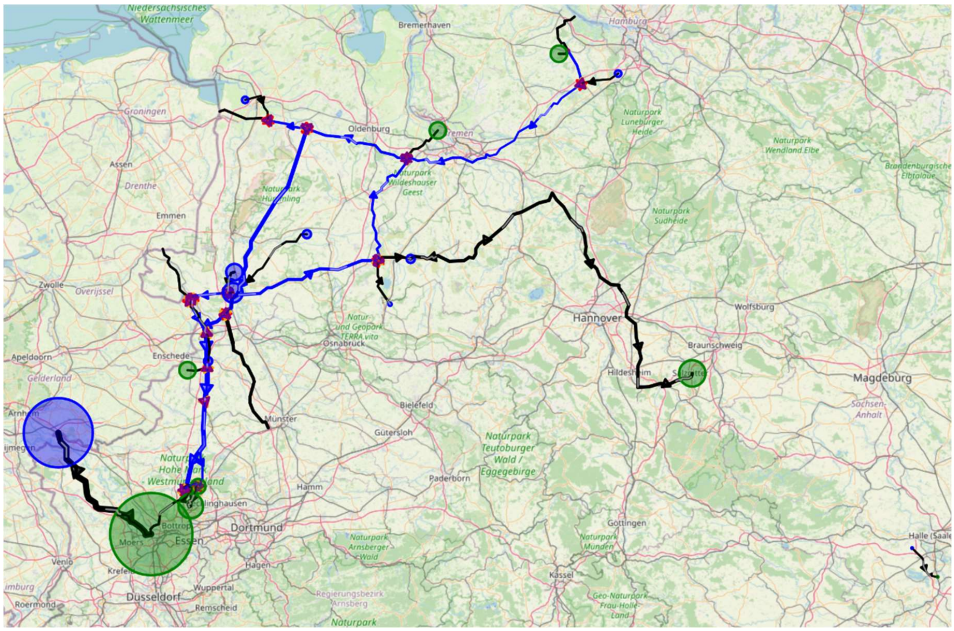


Abbildung 5.2.1.1: Flüsse im 2030 Basisszenario bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Die Ein-/Ausspeisemengen sind als Kreise dargestellt und relativ zueinander skaliert. Quellen sind blau gefärbt und Senken grün. Die jeweilige Ein-/Ausspeisemenge ist proportional zum Kreisdurchmesser. Die Dicke einer Kante des Graphen ist proportional zum Fluss über die Kante. Die größte Ausspeisung hier liegt bei 6,65 kg/s in Hamborn (ThyssenKrupp). Zum Vergleich siehe auch Tabelle 5.2.1.2.

Tabelle 5.2.1.1: Farblegende zu Abbildung 5.2.1.1.

Farblegende							
	Quellenknoten		Kompressor		Absperrventil		Fixierter Fluss
	Senkenknoten		Nichtlinearer Widerstand		Kurzleitung		Druckregelventil
	Verbindungs-knoten		Linearer Widerstand				
	Pipeline		Sicherheitsventil				

Eine Verteilung der Drücke im Netz für den (30 bar 0,1 mm) -Fall kann Abbildung 5.2.1.2 und Tabelle 5.2.1.2 entnommen werden.

Tabelle 5.2.1.2: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im Basisszenario 2030.

Id	p [bar]	q [kg/s]
Quellen		
Elten	24.51	5.58
Lingen	30.0	1.4
Löningen	30.0	0.72
Nüttermoor	30.0	0.53
Eckel	30.0	0.53
Drohne	30.0	0.24
Rehden	28.68	0.72
Hanekenfähr	30.0	1.59
Bad Lauchstädt	30.0	0.16
Ochtrup (city)	30.0	0.72

Id	p [bar]	q [kg/s]
Senken		
Hamborn	22.51	6.65
Scholven	19.47	2.0
Epe	30.0	0.0
Bremen	30.0	0.0
Hallendorf	27.69	2.11
Leuna	30.0	0.16
Marl	21.12	1.25
Harsefeld	30.0	0.0

Auch hier ist die geringe Netzauslastung anhand der sehr einheitlichen Knotendrücke über das Netz ersichtlich. Gleichzeitig ist zu sehen, dass im Südwesten, wo größere Flüsse stattfinden, diese von Druckabfällen begleitet werden.

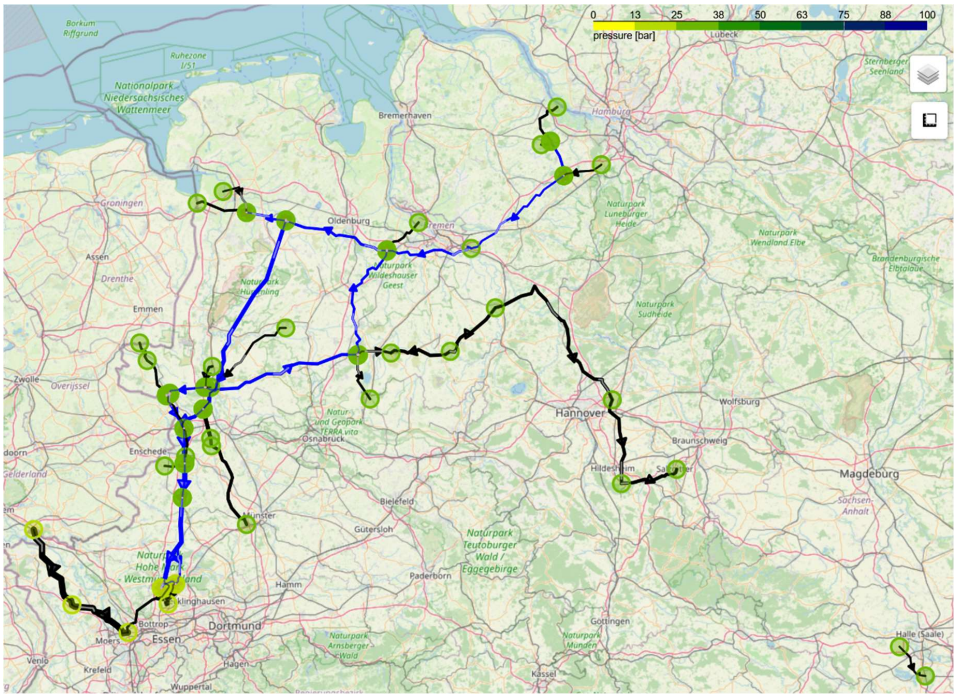


Abbildung 5.2.1.2: Drücke im Basisszenario 2030 bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0.1 mm. Die Drücke an den Netzknoten sind farblich entsprechend der Farbskala kodiert. Die Dicke einer Kante des Graphen ist proportional zum Fluss über die Kante. Einige Knoten erscheinen ausgefüllt, dies ist jedoch nur auf die Überlagerung von nahe beieinander liegenden Knoten zurückzuführen.

Im (60 bar, 0,1mm) -Fall sind die Drücke sämtlich über 48 bar. Und es treten keine kritischen Zustände im Netz auf (hier nicht aufgeführt, siehe Appendix). In Anbetracht des geringen Netznutzungsgrads und Nettoflusses war dies auch zu erwarten.

5.2.2. Variation 1

Aufgrund der antizipierten Installation einer großen Elektrolyse auf dem Gelände der STEAG in Duisburg wurde im Variation-1 Szenario eine lokale Wasserstoffversorgung von ThyssenKrupp angesetzt. Das heißt, dass ThyssenKrupp bei diesem Lastfall keinen Wasserstoff aus dem Netz bezieht. Gleichzeitig wurde die Netzversorgung der UGS in Epe und Harsefeld sowie der Stahlwerke Bremen eingeleitet. Die Quellen-/Senkensituation ist qualitativ auch Abbildung 5.2.2.1 zu entnehmen und quantitativ der Tabelle 5.2.2.2.

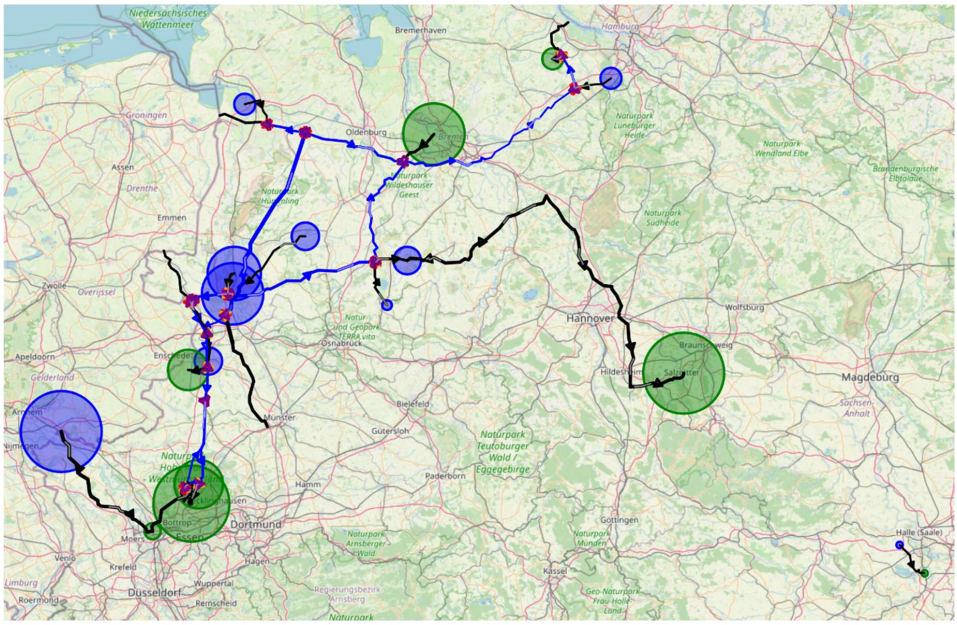


Abbildung 5.2.2.1: Flüsse im Variation 1 Szenario 2030 bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Die Ein-/Ausspeisemengen sind als Kreise dargestellt und relativ zueinander skaliert. Die jeweilige Ein-/Ausspeisemenge ist proportional zum Kreisdurchmesser. Quellen sind blau gefärbt und Senken grün. Die Dicke einer Kante des Graphen ist proportional zum Fluss über die Kante. Die größte Ausspeisung hier liegt bei 2,11 kg/s in Hallendorf (Salzgitter Flachstahl). Zum Vergleich siehe auch Tabelle 5.2.2.2.

Tabelle 5.2.2.1: Farblegende zu Abbildung 5.2.1.1.

Farblegende
Quellenknoten
Senkenknoten
Verbindungsknoten
Pipeline
Absperrventil
Kurzleitung
Druckregelventil
Kompressor
Nichtlinearer Widerstand
Linearer Widerstand
Sicherheitsventil
Komponente mit einem fixierten Fluss

Tabelle 5.2.2.2: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im Variation 1 Szenario 2030.

Id	p [bar]	q [kg/s]
Quellen		
Elten	30.0	2.11
Lingen	30.0	1.4
Löningen	30.0	0.72
Nüttermoor	30.0	0.53
Eckel	30.0	0.53
Drohne	30.0	0.24
Rehden	28.71	0.72
Hanekenfähr	30.0	1.59
Bad Lauchstädt	30.0	0.16
Ochtrup (city)	30.0	0.72

Id	p [bar]	q [kg/s]
Senken		
Hamborn	29.77	0.0
Scholven	27.87	2.0
Epe	27.47	1.07
Bremen	28.52	1.59
Hallendorf	27.72	2.11
Leuna	30.0	0.16
Marl	11.95	1.25
Harsefeld	29.99	0.53

Durch die größeren Distanzen zwischen Ein- und Ausspeisern im Vergleich zum Basisszenario und die zusätzlichen Nachfrager, treten bei einer Druckoberschranke von 30 bar höhere Fließgeschwindigkeiten von bis zu 39 m/s auf (siehe auch Abbildung 5.2.2.2). Der minimale Abgabedruck hat mit knapp 12 bar noch etwas Abstand zur 5 bar Untergrenze. Eine Änderung der Rohrrauigkeit führt hier zu keinen nennenswerten Änderungen. Für die Oberschranke von 60 bar sind die Fließgeschwindigkeiten unabhängig von der Rohrrauigkeit unter 10 m/s und die Drücke sämtlich über 47 bar. Der Druckregelbedarf ist mit bis zu 3,25 bar im 30-bar-Fall und bis zu 4 bar im 60-bar-Fall erhöht. Doch auch hier zeigt eine kurze Kontrollrechnung, dass auf die Druckregelventile bei diesem Lastfall verzichten werden könnte.

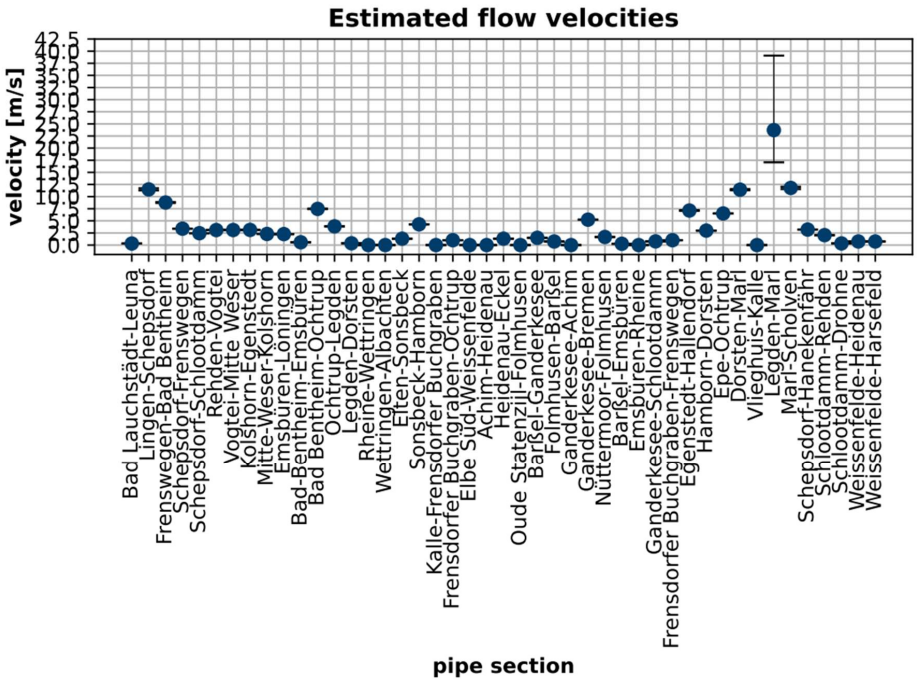


Abbildung 5.2.2.2: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im Variation 1 Szenario 2030 (durchschnittlich) bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0.1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an.

5.2.3. Variation 2

Während das Basisszenario und das Szenario Variation 1 gut motivierte Lastfälle darstellen, ist der im Netzwerk transportierte Nettofluss recht gering (Basisszenario: 5,01 kg/s; Variation 1: 8,72 kg/s). Daher wurde für das Szenario Variation 2 der Nettofluss angehoben (14,12 kg/s).

Die nachgefragte Wasserstoffmenge der Stahlwerke in Bremen und Salzgitter wurde gesteigert und ebenso der Import aus den Niederlanden, der vom Basisszenario zum Szenario Variation 1, durch die lokale Versorgung ThyssenKrupps zurückgegangen war (siehe Tabelle 5.2.3.1 und Abbildung 5.2.3.1).

Tabelle 5.2.3.1: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im Variation 2 Szenario 2030.

Id	p [bar]	q [kg/s]
Quellen		
Elten	30.0	7.51
Lingen	30.0	1.4
Löningen	30.0	0.72

Id	p [bar]	q [kg/s]
Senken		
Hamborn	27.0	0.0
Scholven	21.66	2.0
Epe	20.39	1.07

Nüttermoor	30.0	0.53
Eckel	30.0	0.53
Drohne	30.0	0.24
Rehden	18.52	0.72
Hanekenfähr	30.0	1.59
Bad Lauchstädt	30.0	0.16
Ochtrup (city)	30.0	0.72

Bremen	15.32	4.29
Hallendorf	7.21	4.82
Leuna	30.0	0.16
Marl	23.15	1.25
Harsefeld	29.99	0.53

Bei diesem Lastfall zeigt sich ein ähnliches Verhalten, wie im Szenario Variation 1. Bei erhöhter Rohrrauigkeit von 1 mm und Druckoberschranke von 30 bar ist das Problem nicht lösbar, das heißt der Lastfall ist nicht übertragbar. Für den realistischeren Rohrrauigkeitswert von 0,1 mm ist der Lastfall zwar übertragbar, allerdings ist der Abgabedruck in Hallendorf (Salzgitter Flachstahl) mit 7,21 bar recht niedrig. Damit einher geht dort eine hohe geschätzte Fließgeschwindigkeit von ca. 62 m/s auf dem letzten Abschnitt Egenstedt-Hallendorf (siehe Abbildung 5.2.3.1 und Appendix I.8.15).

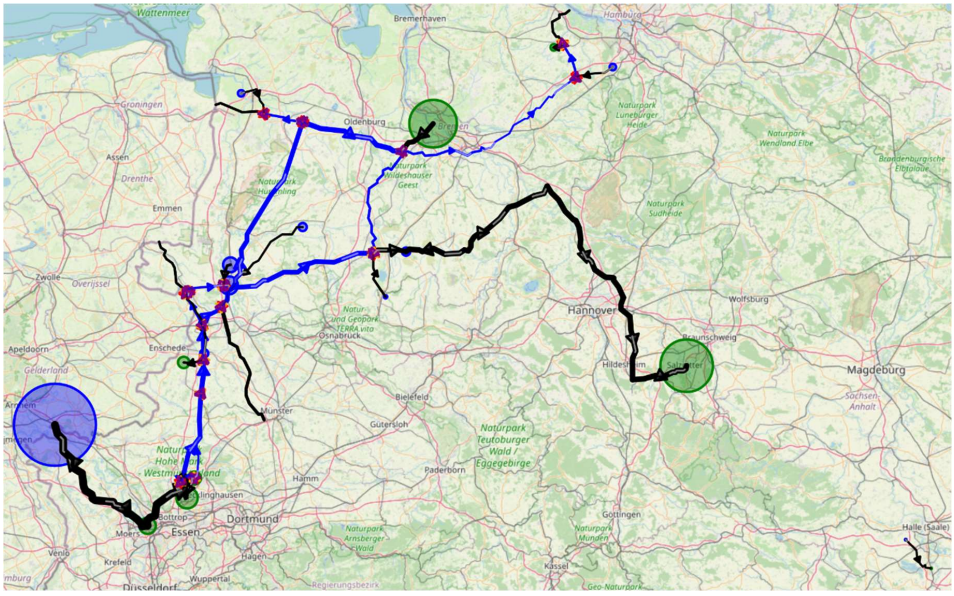


Abbildung 5.2.3.1: Flüsse im Variation 2 Szenario 2030 bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Die Ein-/Ausspeisemengen sind als Kreise dargestellt und relativ zueinander skaliert. Die jeweilige Ein-/Ausspeisemenge ist proportional zum Kreisdurchmesser. Quellen sind blau gefärbt und Senken grün. Die Dicke einer Kante des Graphen ist proportional zum Fluss über die Kante. Die größte Einspeisung liegt hier bei 7,51 kg/s in Elten. Zum Vergleich siehe auch Tabelle 5.2.3.1.

Tabelle 5.2.3.2: Farblegende zu Abbildung 5.2.3.1

Farblegende							
	Quellenknoten		Kompressor		Absperrventil		Fixierter Fluss
	Senkenknoten		Nichtlinearer Widerstand		Kurzleitung		Druckregelventil
	Verbindungs-knoten		Linearer Widerstand				
	Pipeline		Sicherheitsventil				

Hier fallen allerdings die hohen Druckabsenkungen in einer Reihe von Kreuzungspunkt-Ersatzverschaltungen auf. Eine Kontrollrechnung zeigt, dass auch hier die Druckregelventile nicht notwendig sind. Dies hat jedoch kaum einen Einfluss auf die sich einstellenden Fließgeschwindigkeiten. Auch in diesem Lastfall wäre ein Betrieb bei höherem Netzdruckniveau sicherlich ratsam. Andererseits sind die meisten Fließgeschwindigkeiten und Abgabedrücke moderat (siehe Abbildung 5.2.3.2).

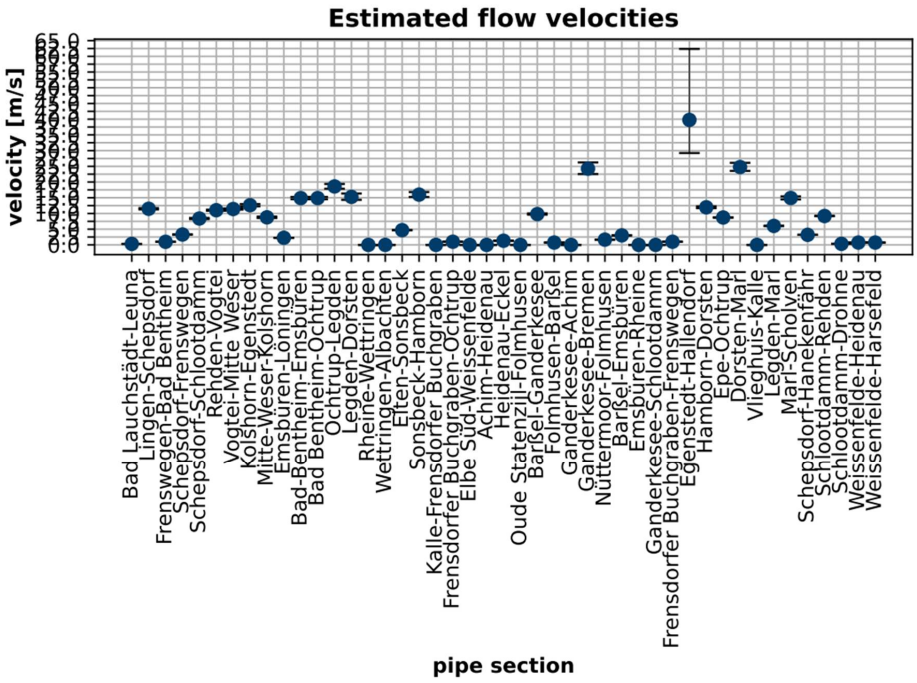


Abbildung 5.2.3.2: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im Variation 2 Szenario 2030 (durchschnittlich) bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an.

Demnach könnte auch ein Leitungszubau auf dem kurzen Stück Egenstedt-Hallendorf von Interesse sein, falls die Fließgeschwindigkeiten und Druckabfälle in der Praxis zu hoch werden. Bei einem oberen Drucklimit von 60 bar lässt sich der Lastfall der Variation 2 auch bei moderaten Flüssen und Abgabedrücken jenseits von 36 bar mit oder ohne Druckabsenkung in der Ersatzverschaltung betreiben.

5.3. Screening-Rechnungen

Während händisch erzeugte, einzelne Lastfälle einfach interpretierbar und anschaulich sind, ist ihre Aussagekraft für das gesamte Netzverhalten unter Umständen gering, da sie nicht notwendigerweise die größte Herausforderung für das Netz darstellen und nur geringe Extrapolationsfähigkeit über den Lastfall hinaus bieten. Daher wurde, wie in Abschnitt 3.1.8 beschrieben, eine Reihe an Zufallslastfällen erzeugt, mit der Absicht das kumulative Netzverhalten besser einzufangen (siehe auch Tabelle 5.2.3.1). Grundannahme muss hier sein, dass die erzeugten Lastfälle repräsentativ für die tatsächlich auftretenden Lastfälle sind. Inwiefern dies zutrifft, ist zu diskutieren. Ein Vorteil bei dieser Art der Lastfallerzeugung ist, dass sich auch Ein- und Ausspeicherung an Speichern problemlos mitberücksichtigen lassen.

Als Ausgangsbasis der Betrachtung soll das kumulative Ergebnis der Berechnung von 200 zufällig erzeugten Lastfällen dienen. Bei der anfänglichen Berechnung wurde für einige Lastfälle ein stagnierender Fortschritt bei der Druckmaximierung, ab einem Optimality-Gap[46] von 6-7%, festgestellt. Da es sich bei der Druckmaximierung sowieso um eine Heuristik handelt, die den Netzbetrieb in eine realistischere Richtung drängen soll, bietet eine leicht suboptimale Lösung annähernd gleichen Erkenntnisgewinn und stellt in Bezug auf die Fließgeschwindigkeiten im Netz eher eine Abschätzung zur sicheren Seite dar. Daher wurde zur Beschleunigung der Screening-Rechnungen eine Terminierung ab einem Optimality-Gap kleiner 10% zugelassen. Für die Screening-Rechnungen wurde zunächst keine künstliche Druckoberschranke angesetzt und das volle Ein-/Ausspeise-Intervall ausgenutzt. Da aus den Einzelrechnungen zunächst keine Notwendigkeit hervorging, Druckabsenkungen an Kreuzungspunkten vorzunehmen, wurde hier auch darauf verzichtet.

Tabelle 5.2.3.1: Lastfallerzeugungsszenarien: Screening-Rechnungen

Jahr	Erzeugung	Name	Beschreibung
2030	zufällig	Screening 1	200 Lastfälle, keine künstlichen, globalen Druckschranken. Druckmaximierung mit 10% zulässigem Optimality-Gap.
2030	zufällig	Screening 2	Screening 1 mit zusätzlicher, globaler Druckunterschranke von 30 bar.
2030	zufällig	Screening 3	200 Lastfälle, Druckoberschranke von 30 bar. Druckminimierung mit 10% zulässigem Optimality-Gap.
2030	zufällig	Screening 4	200 Lastfälle, 80% zu deckende Mindestnachfrage bei der Industrie. Druckmaximierung mit 10% zulässigem Optimality-Gap.

[46] Der Optimality-Gap, zu Deutsch: Optimalitätslücke oder -abstand, gibt bei MIP-Problemen den relativen Abstand zwischen bester oberer Schranke (bei Minimierung) des primalen Problems und bester unterer Schranke des dualen Problems an. Diese Schranken sind in der Regel zulässige, jedoch nicht optimale Lösungen.

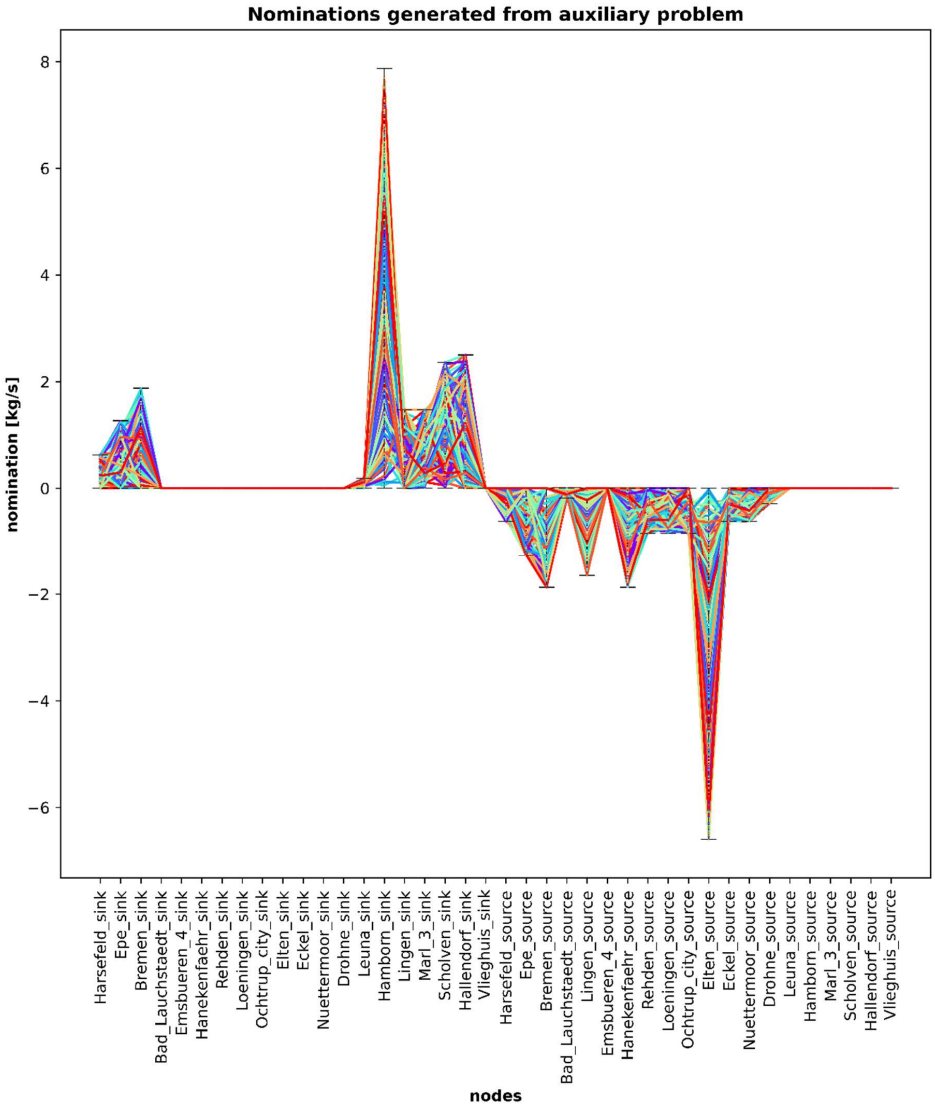


Abbildung 5.2.3.1: 200 Zufällige Lastfälle mit angesetzten Ein-/Ausspeiseintervallen. Die Linienverbindung dient lediglich der Orientierung, da mehrere Lastfälle gleichzeitig abgebildet sind. Jeder Quellen-/Senkenknoten ist, analog zur Problemformulierung in *Gl. 7.1* - *Gl. 7.12*, einmal als Senke (linke Hälfte) und einmal als Quelle (rechte Hälfte) aufgeführt.

Abbildung 5.2.3.1 zeigt auf der x-Achse gemäß der Definition des Hilfsproblems zur Lastfallerzeugung jeden Quellen-/Senkenknoten einmal als Quelle und einmal als Senke. Für einen solchen Knoten stellen die auf der y-Achse aufgetragenen Balken die Ein- bzw. Ausspeiseschranken dar. Ein konkreter Lastfall wird durch eine durchgängige, farbige Linie dargestellt, die gedanklich die für einen Lastfall gezogenen Ein-/Ausspeisemengen verknüpft. Abbildung 5.2.3.1 ist zu entnehmen, dass die gezogenen Lastfälle insgesamt die Ein-/Ausspeiseintervalle gut abzudecken scheinen, da für jeden Knoten die ihm

zugeordneten Lastfälle über das Ein-/Ausspeiseintervall verteilt sind. 199 der 200 Lastfällen waren direkt lösbar. Eine Kontrollrechnung mit Knoten-Slack-Variablen ergab, dass es sich bei dem einzelnen nicht lösbaren Lastfall höchstwahrscheinlich um ein numerisches Artefakt handelt, da der Knoten-Slack im Bereich 10^{-15} kg/s liegt. Somit sollte auch dieser Lastfall lösbar sein.

Das Ergebnis der kumulativen Lastfallbetrachtung, in Bezug auf die sich einstellenden Fließgeschwindigkeiten und Druckverhältnisse, ist in Abbildung 5.2.3.2 und Abbildung 5.2.3.3 dargestellt.

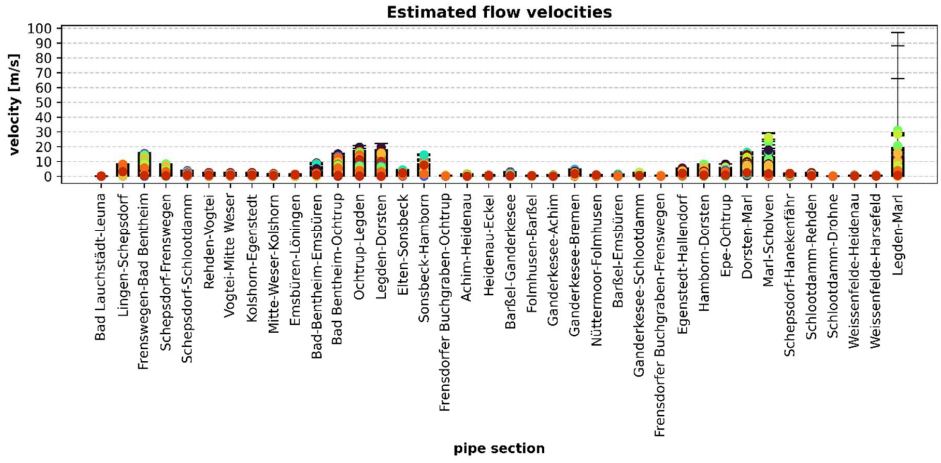


Abbildung 5.2.3.2: 200 Zufällige Lastfälle: Resultierende Fließgeschwindigkeiten bei Druckmaximierung im Netz mit 10% Optimality-Gap. Unterschiedliche Farben stehen für unterschiedliche Lastfälle. Kernpunkt ist jedoch, dass man erkennt, dass nur auf wenigen Pipelines die Geschwindigkeit stärker schwankt.

Abbildung 5.2.3.2 zeigt, dass in diesem Betriebsszenario mit Ausnahme der Pipeline Legden-Marl die maximalen Fließgeschwindigkeiten in allen Szenarien unter 30 m/s meist sogar deutlich unter 20 m/s liegen. Das ist der Fall, obwohl der 10%-Optimality-Gap leicht höhere Geschwindigkeiten als ohne Optimality-Gap zulässt. Wie aus den Einzelszenarien antizipiert, kommt es auf dem Abschnitt Legden-Marl mehrfach zu Überschreitungen dieser Werte, bis hin zu Fließgeschwindigkeiten von 100 m/s. Dies spiegelt sich in der Regel auch in sehr niedrigen Knotendrücken wider (vgl. Abbildung 5.2.3.2).



Abbildung 5.2.3.3: 200 Zufällige Lastfälle: Kumulative Betrachtung: Resultierende Drücke bei Druckmaximierung im Netz mit 10% Optimality-Gap. Unterschiedliche Farben stehen für unterschiedliche Lastfälle. Es ist einerseits zu erkennen, dass nur an wenigen Stellen die 25-bar-Marke unterschritten wird, und anderseits ist zu erkennen, dass es bestimmte Knoten gibt, wo die Drücke über die Lastfälle hinweg stark schwanken.

Abbildung 5.2.3.3 zeigt, für Knoten assoziiert mit Scholven und Marl mehrfache Unterschreitungen der 25-bar-Marke. Insgesamt ist die Druckschwankungsbreite über die Nominierungen hinweg in diesem Teil des Netzes (Ochtrup, Legden, Dorsten, Marl, Scholven) am ausgeprägtesten. Es ist zu sehen, dass sich für die Drücke dieser Knoten keinerlei Häufungspunkt oder schmale Häufungsintervalle ergeben und die Drücke breit nach unten streuen. Falls nun diese Lastfälle den echten Netzbetrieb wiedergäben, wäre dies kritisch in Bezug auf die Materialbelastung der Pipelines zu sehen, da hier eine hohe lokale Druckschwankungsbreite unerwünscht ist.

In Zusammenhang mit den Fließgeschwindigkeiten ergibt sich auch eine interessante Betrachtung, wenn diese mit den Aussagen/Thesen zu zulässigen Fließgeschwindigkeiten auf Basis des Schubspannungskriteriums aus Abschnitt 2.2.4 gekoppelt werden. In Tabelle 2.2.4.2 waren entsprechende Grenzwerte als Paare aus Betriebsdruck und Fließgeschwindigkeit angegeben. Für einen bestimmten Betriebsdruck darf eine zugehörige Fließgeschwindigkeitsgrenze nicht überschritten werden. Diese Grenzwertpaare lassen sich grafisch zusammen mit den analogen Wertepaaren aus den Lastfallrechnungen auftragen. Daraus lässt sich der Abstand der einzelnen Netzzustände zu der Grenzwertkurve abschätzen. Eine solche Grafik ist in Abbildung 5.2.3.4 dargestellt.

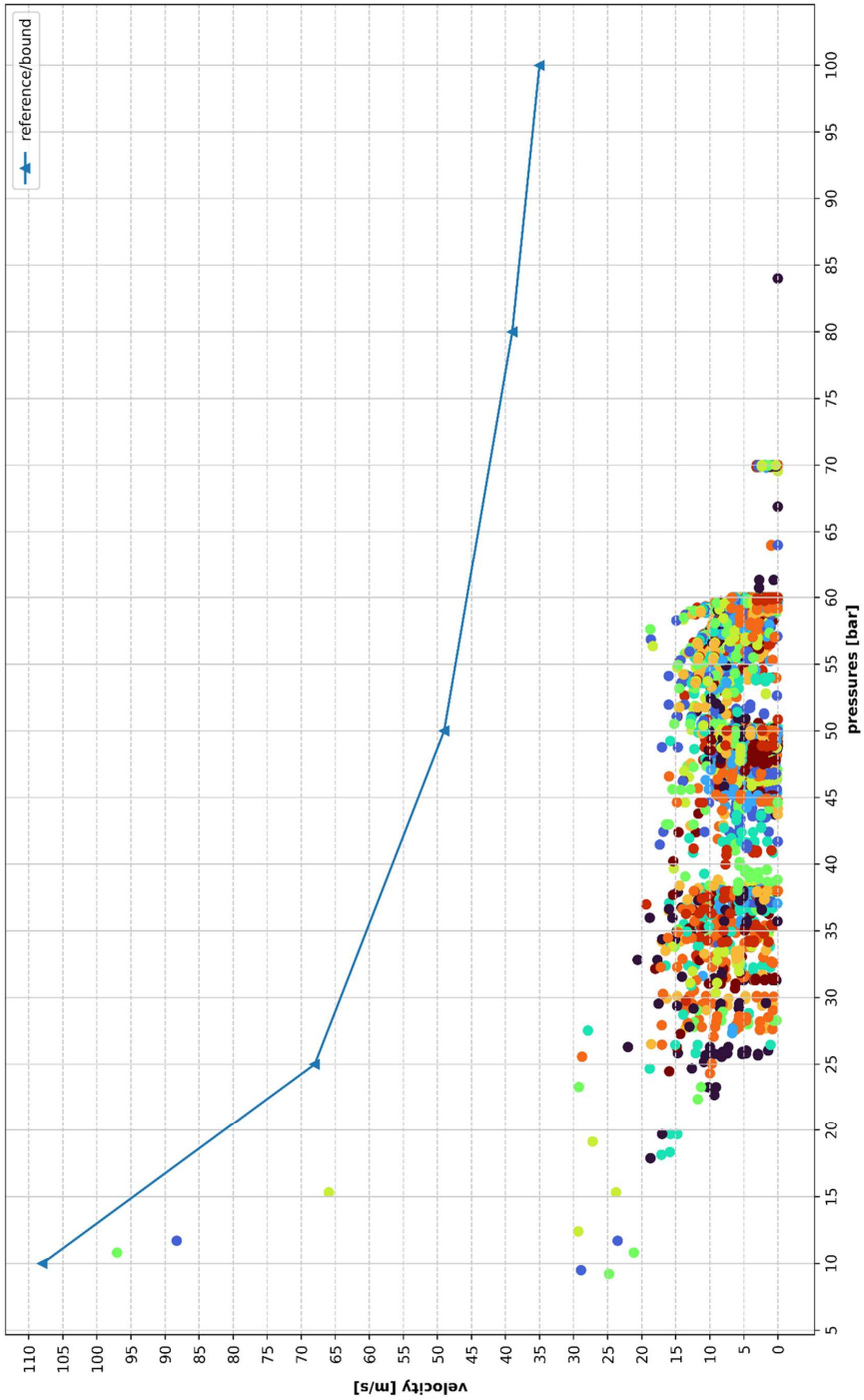


Abbildung 5.2.3.4: 200 Zufällige Lastfälle: Druck-Geschwindigkeits-Paare im Verhältnis zur Grenzwertkurve gemäß Tabelle 2.2.4.2. Unterschiedliche Farben stehen für unterschiedliche Lastfälle. Unterschiedliche Farben stehen für unterschiedliche Lastfälle.

Es ist zu sehen, dass sämtliche Werte unterhalb der Kurve liegen, also gemäß dem Kriterium zulässig sind. Insbesondere weisen die allermeisten einen deutlichen Abstand zu der Grenzwertkurve auf. Solange das Schubspannungskriterium die Limitierung der Fließgeschwindigkeitseignung dominiert, ist dies positiv zu bewerten.

Aufgrund der starken Ausbrüche der Druckwerte in den niedrigen zwei- bis einstelligen Bereich stellt sich die Frage, ob über alle Lastfälle hinweg ein Mindestdruck im Netz zu garantieren wäre. Daher wurde für die gleichen 200 Lastfälle untersucht, ob sie bei einer 30 bar Druckunterschranke lösbar sind. Die 30 bar sind dabei relativ willkürlich gewählt, aber sollen praktisch gesehen der Netzstabilisierung bei Lastwechseln dienen. Die Rechnung zeigt, dass dies für die 200 Lastfälle in der Tat gilt. Ein weiterer Effekt der Anhebung der globalen unteren Druckschranke ist, dass die maximalen Fließgeschwindigkeiten auch in ihren Maximalwerten zurückgehen. Abbildung 5.2.3.5 zeigt, dass hier die Fließgeschwindigkeiten sämtlich unter 26 m/s liegen. Abbildung 5.2.3.5 zeigt auch, dass hier die Datenpunkte zwangsweise zusammenrücken und insgesamt unkritischer werden.

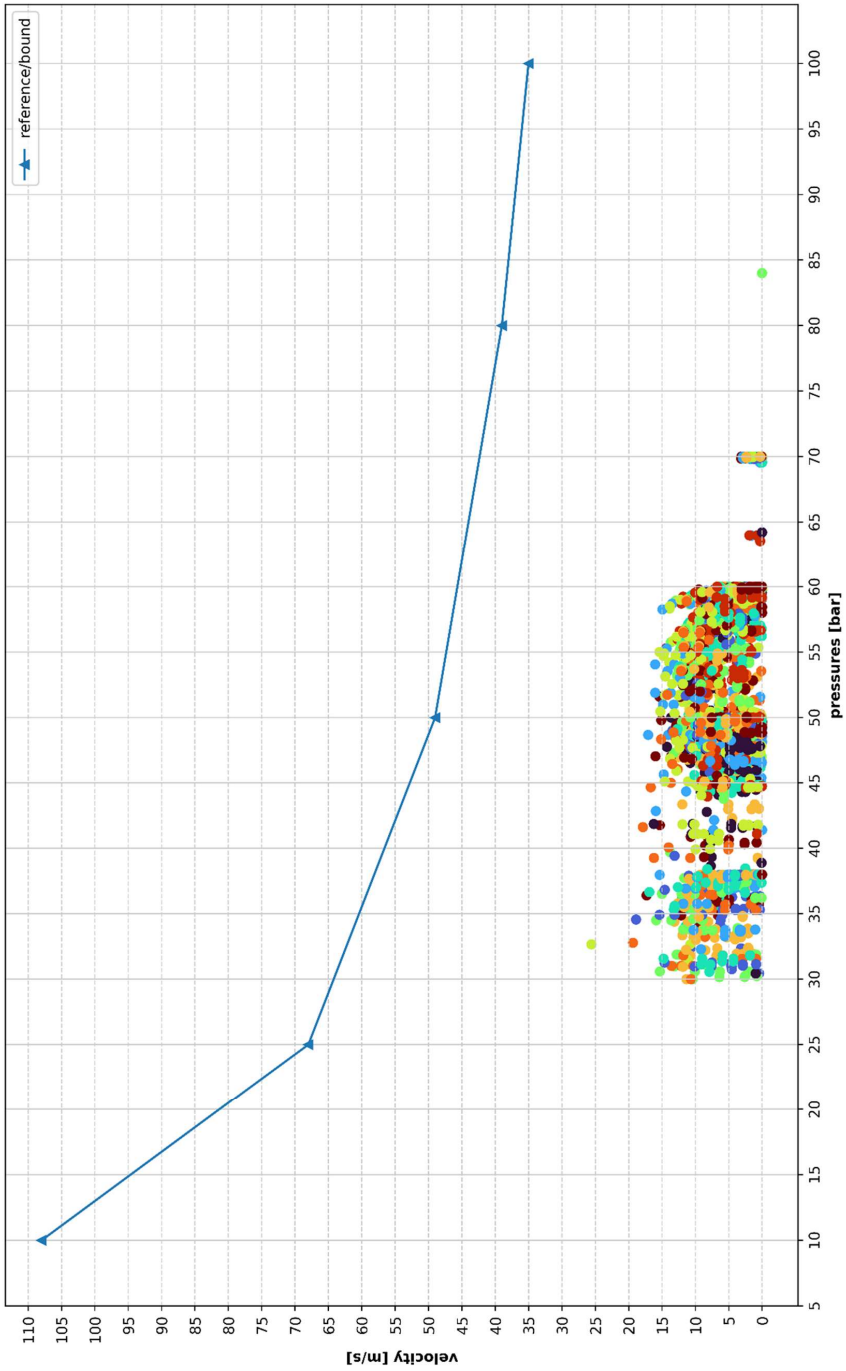


Abbildung 5.2.3.5: 200 Zufällige Lastfälle: Druck-Geschwindigkeits-Paare im Verhältnis zur Grenzwertkurve gemäß Tabelle 2.2.4.2 bei einer globalen Druck-Unterschranke von 30 bar ohne Druckregelventile an den Kreuzungspunkten. Unterschiedliche Farben stehen für unterschiedliche Lastfälle.

Da die Druckmaximierung hier das Bild möglicherweise verzerrt und nicht so hohe Fließgeschwindigkeiten zulässt, wurde eine Variante mit 30 bar oberer Druckschranke und Druckminimierung (bei 10% zulässigem Optimality-Gap) gerechnet. Hier sind 11 von 200 Lastfällen nicht lösbar. Die Fließgeschwindigkeiten aus den übrigen Lastfällen im Vergleich zur Grenzwertlinie sind in Abbildung 5.2.3.6 dargestellt.

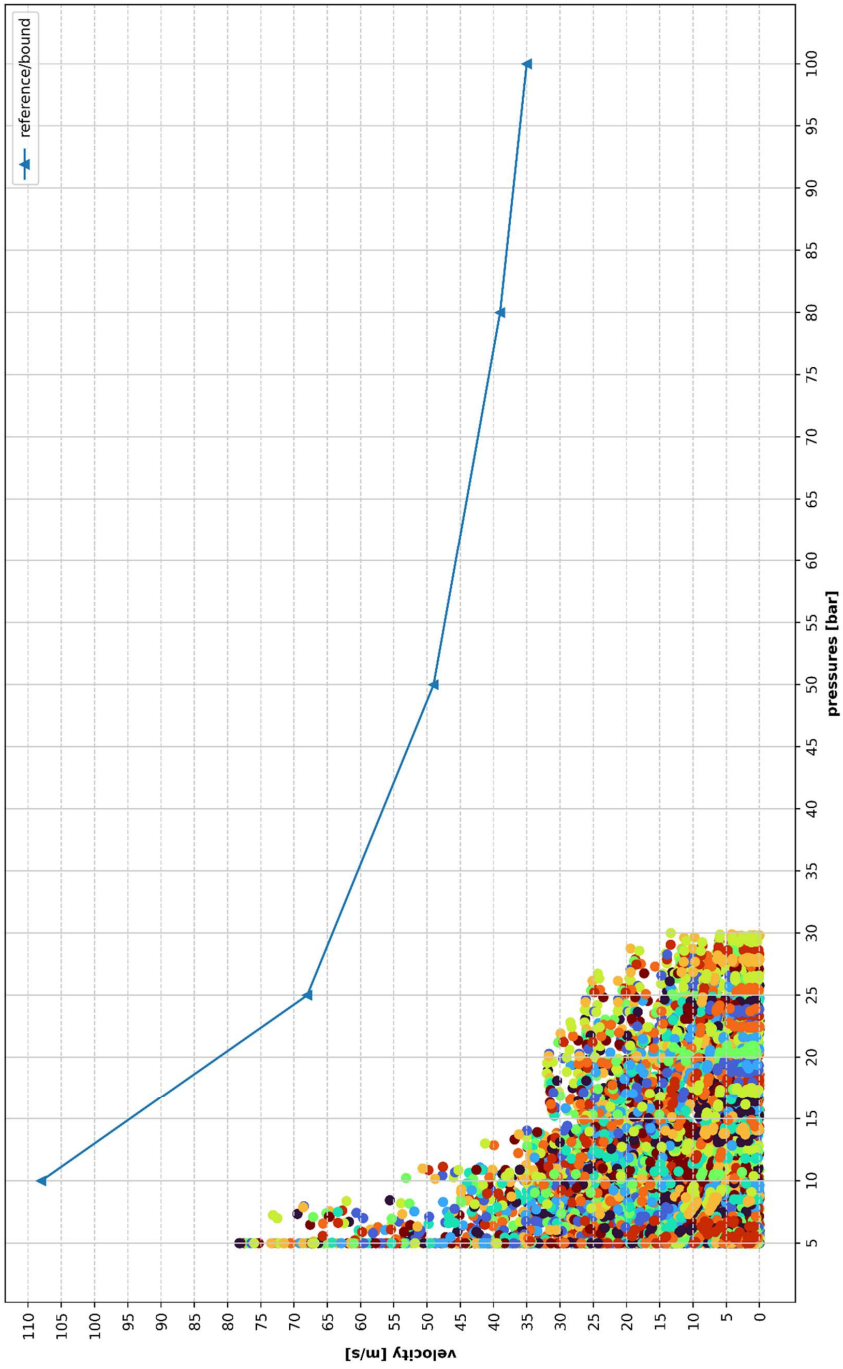


Abbildung 5.2.3.6: 200 Zufällige Lastfälle: Druck-Geschwindigkeits-Paare im Verhältnis zur Grenzwertkurve gemäß Tabelle 2.2.4.2 bei einer globalen Druck-Oberschranke von 30 bar ohne Druckregelventile an den Kreuzungspunkten und Minimierung der Drücke (10% Optimality-Gap zugelassen). Unterschiedliche Farben stehen für unterschiedliche Lastfälle.

Es ist ersichtlich, dass zwar hohe Fließgeschwindigkeiten auftreten, diese aber nach wie vor unter der Grenzwertkurve liegen. Daraus ist zu schlussfolgern, dass der zu transportierende Massenstrom scheinbar nicht ausreicht, um höhere Fließgeschwindigkeiten zu verursachen.

Eingangs wurde die Frage gestellt, inwiefern die Zufallslastfälle repräsentativ für den Betrieb sind. Fest steht, dass sie die Ein- und Ausspeiseintervalle relativ gut abdecken und dadurch eine Einschätzung des Netzverhaltens über einen weiten Lastbereich ermöglichen. Andererseits lässt sich auch argumentieren, dass die Industrie eine konstante Mindestnachfrage haben wird, die stets bedient werden muss. Daher wurde noch ein letztes Screening-Szenario erzeugt, das für alle Stahl- und Chemiewerke eine Mindestnachfrage von 80% der oberen Ausspeiseschranken ansetzt. Interessanterweise scheint das Hilfsproblem zur Zufallslastfallerzeugung hier nur wenige unterschiedliche Lastfälle zuzulassen (vgl. Abbildung 5.2.3.7).

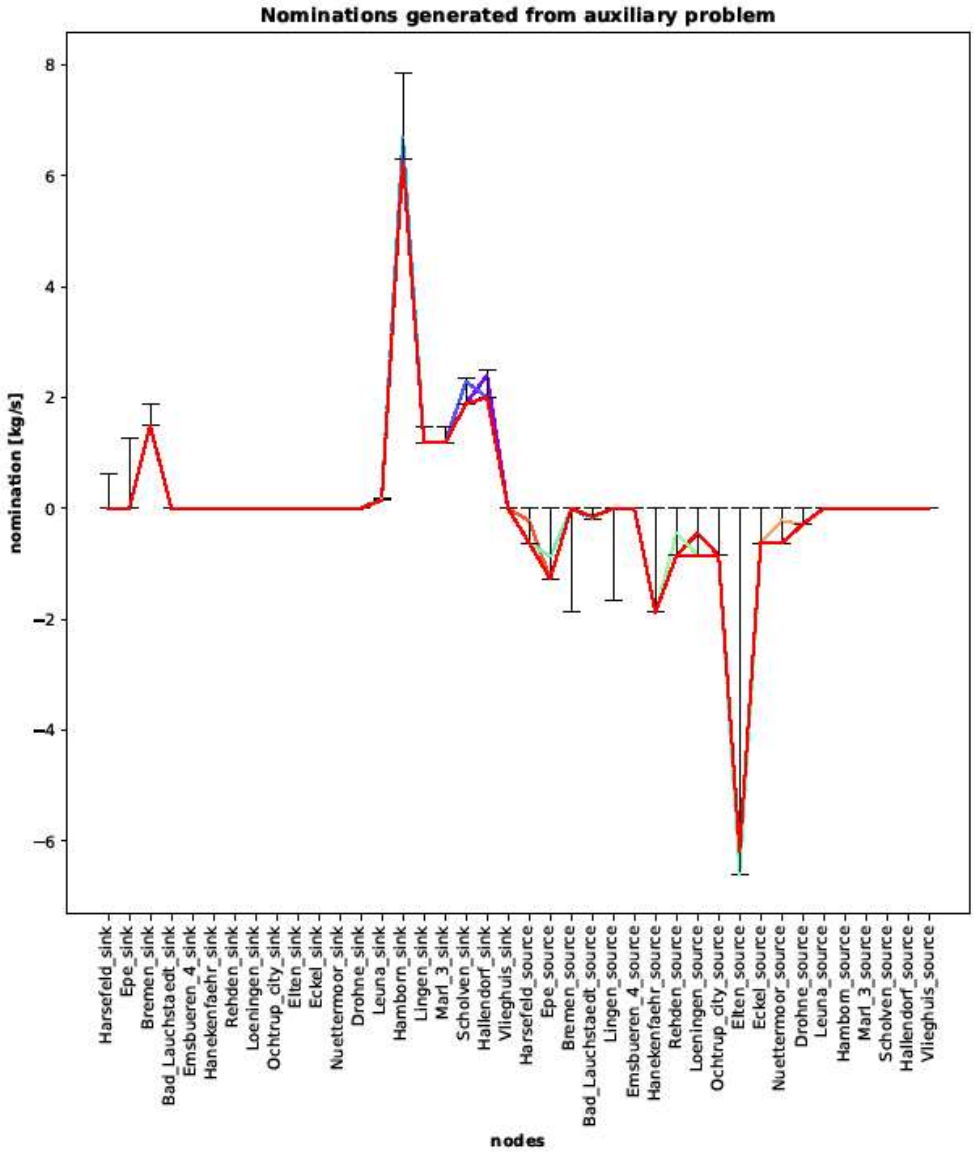


Abbildung 5.2.3.7: 200 Zufällige Lastfälle mit angesetzten Ein-/Ausspeiseintervallen und einer zu deckenden Mindestnachfrage von 80% der jeweiligen maximalen Ausspeisung bei der Industrie.

Es ist zu sehen, dass an fast allen Quellen die Nominierung an der oberen Einspeiseschranke liegt. Gleichzeitig sind die Drücke recht hoch und die Fließgeschwindigkeiten infolgedessen niedrig (siehe Abbildung 5.2.3.8). Die Drücke sind sämtlich größer als 37 bar.

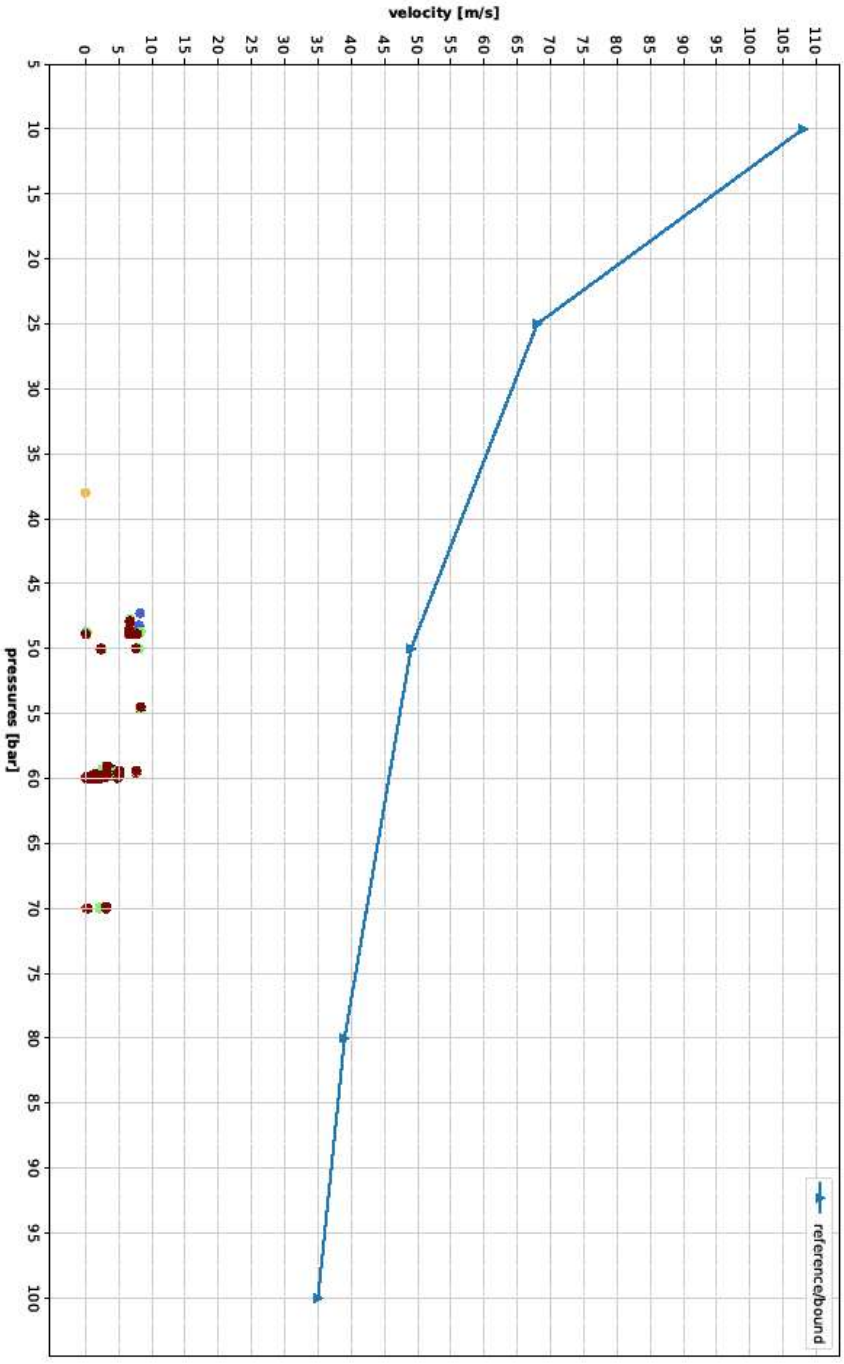


Abbildung 5.2.3.8: 200 Zufällige Lastfälle: Druck-Geschwindigkeits-Paare im Verhältnis zur Grenzwertkurve gemäß Tabelle 2.2.4.2 bei einer zu deckenden Mindestnachfrage von 80% der jeweiligen maximalen Ausspeisung bei der Industrie. (10% Optimality-Gap zugelassen). Unterschiedliche Farben stehen für unterschiedliche Lastfälle.

Dieses Ergebnis betont die Wichtigkeit der Erschließung neuer Wasserstoffquellen, aber auch die der Speicher. Vor dem Hintergrund volatiler erneuerbarer Erzeugung müssen Speicher nicht nur genügend Speicherkapazitäten aufweisen, sondern insbesondere auch hinreichende Aus- und Einspeisekapazitäten, das heißt Fluss.

5.4. Addendum: Ergebnisse: Lastprofil-basierte Lastfallerzeugung und Modellierung des Wasserstoffnetzmodells gemäß Entwurf Szenariorahmen des NEP-Gas 2022

Im Rahmen der Berechnungen für das Wasserstoffnetzmodell gemäß dem Entwurf des Szenariorahmens des NEP-Gas 2022 wurden 72 chronologische, stündliche Lastfälle berechnet. Die Berechnungen wurden auf einem Server-Cluster aus 12 3,0 GHz CPUs mit 216 Kerne und 6 TB RAM ausgeführt. Die gesamte Berechnungsdauer betrug dabei 28 Stunden. Als direkte Erkenntnis aus der Modellierung und anfänglichen Versuchen der Netzberechnung ergaben sich drei Bottlenecks auf den Pipelineabschnitten Landsberg-Braschwitz, Niederkassel-Grengel and Keldenich-Niederkassel (vgl. Abbildung 5.2.3.2 und Abbildung 5.2.3.2).

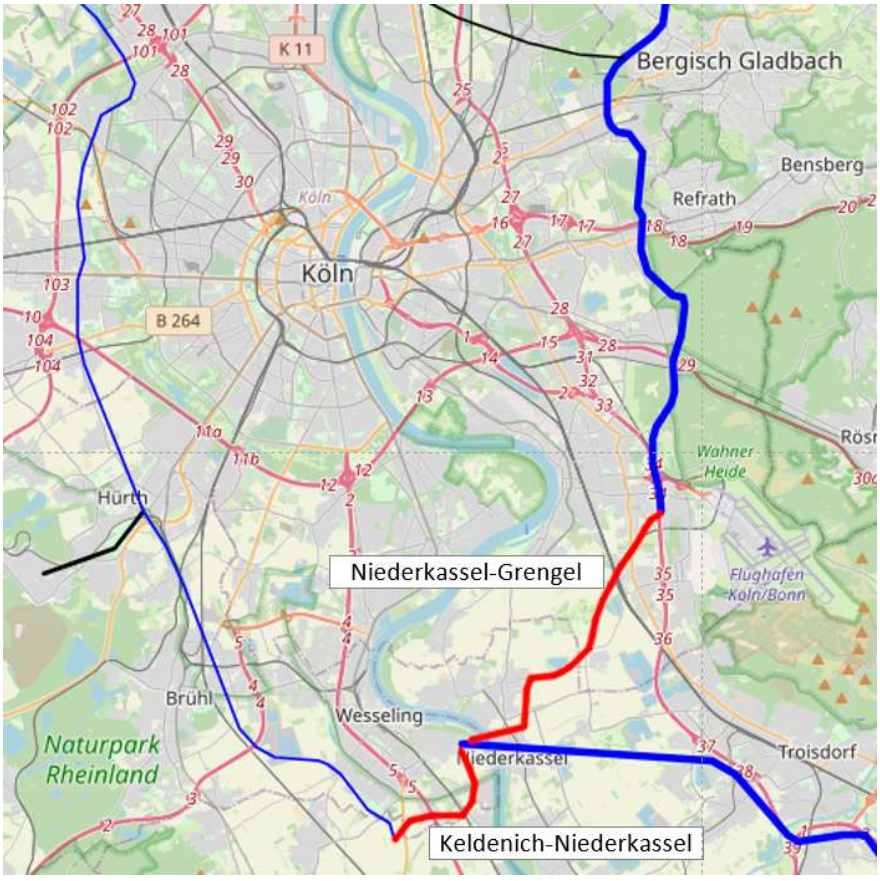


Abbildung 5.2.3.1: Bild: Bottlenecks auf den Pipelineabschnitten Niederkassel-Grengel and Keldenich-Niederkassel.

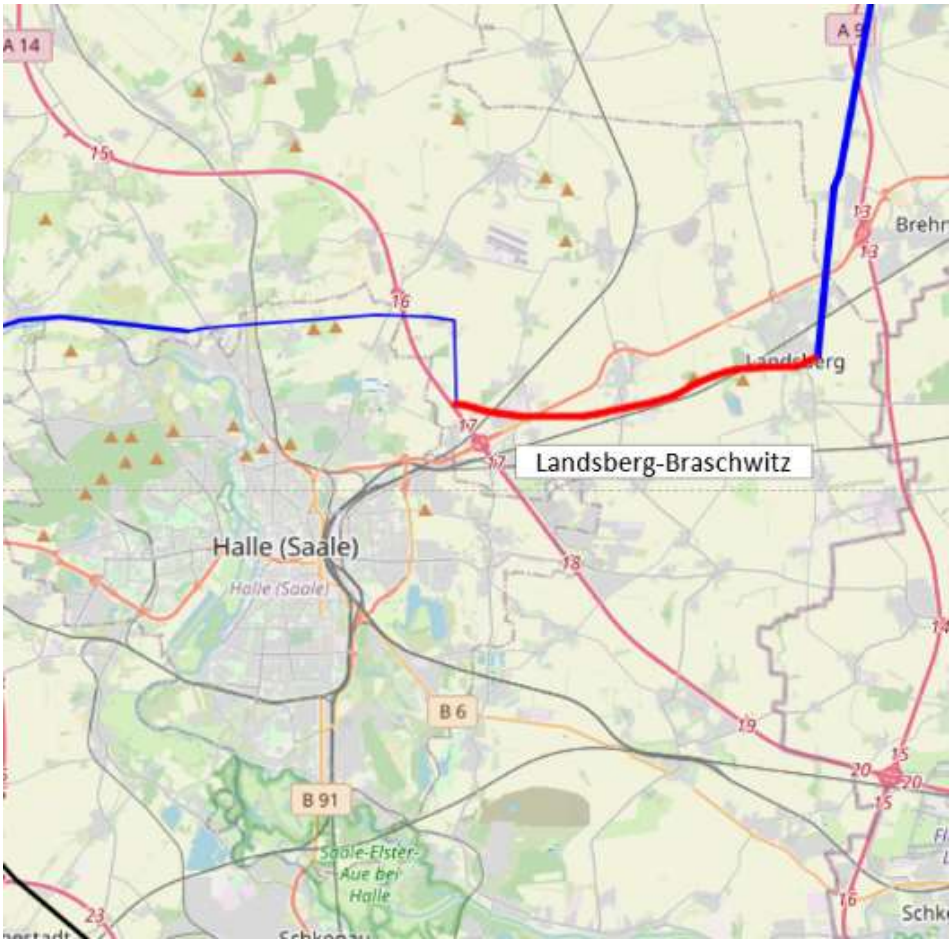


Abbildung 5.2.3.2: Bild: Bottleneck auf dem Pipelineabschnitt Landsberg-Braschwitz.

Die Pipelines auf diesen Abschnitten weisen allesamt einen minimalen Durchmesser von 111 mm auf. Zu Zwecken der Berechnung wurde empirisch bestimmt, dass hier ein minimaler Durchmesser von 333 mm anzusetzen ist, um den Transport zu ermöglichen. Bei den Abschnitten handelt es sich glücklicherweise um relativ kurze Pipelinestücke, die also auch in der Praxis verhältnismäßig einfach austauschbar wären. Von außen betrachtet wäre ein solcher Bottleneck an dieser Stelle auch zu erwarten gewesen, da dieser Teil des Netzwerks der einzige Netzabschnitt ist, der den nördlichen und den südlichen Teil des deutschlandweiten Netzes verbindet. Die maximale Fließgeschwindigkeit, die im Rahmen der Lastfallberechnungen auftrat, ist 26,8 m/s auf dem Abschnitt Legden-Marl.

5.5. Diskussion: Wasserstoffnetz 2030

Die Modellierung der 2030-Szenarien zeigt, dass auch hier, je nach Bedingungen, durchaus hohe Fließgeschwindigkeiten erreicht werden können. Darüber hinaus steigt mit steigender Netzwerkgröße, bei unsicherer Datenlage, auch die Dimension der Größen, die variiert werden können oder auch müssen, um das Netzverhalten zu evaluieren. Aufgrund der

relativ geringen Rechenzeiten war es möglich hier, mittels Zufallserzeugung, eine Fülle an Lastfällen zu generieren, die Aufschluss über das kumulative Netzverhalten geben können. Es konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, abhängig von den Randbedingungen, wie Druckschranken und Art der Zielfunktion, gewisse Mindestdruckniveaus zu etablieren. Gleichzeitig konnte gezeigt werden, dass für die betrachteten Lastfälle das Schubspannungskriterium für die maximale, zulässige Fließgeschwindigkeit in keinem Fall überschritten wurde. Daraus ist zu schlussfolgern, dass der zu transportierende Massenstrom an H_2 auf Basis der hier angesetzten Ein-/Ausspeiseschranken nicht ausreicht, um, im Sinne des Schubspannungskriteriums, unzulässige Fließgeschwindigkeiten zu verursachen, ohne das Problem unlösbar zu machen.

Es wurde auch gezeigt, dass ohne eng gesetzte Druckschranken, die Drücke von Lastfall zu Lastfall stark variieren können. Dies ist aus Sicht der Materialbelastung von Nachteil. Daher erscheint es besonders wichtig, die Lastfälle auf solche einzuschränken, die für den Netzbetrieb realistisch erscheinen. Im Rahmen dessen ist natürlich zu hinterfragen, ob die Zufallserzeugung der Ein-/Ausspeisungen vom gesamten potenziellen Ein-/Ausspeiseintervall Gebrauch machen sollte, oder beispielsweise eine gewisse Mindestgrundlast auf Abnehmerseite ansetzen sollte. Letzteres erscheint sinnvoll, für den nominalen Netzbetrieb, allerdings werden dabei Randereignisse potentiell übersehen. Folglich ist die hiesige Lastfallerzeugung, unter Berücksichtigung der vollen Ein-/Ausspeiseintervalle gerechtfertigt, obgleich nicht notwendigerweise repräsentativ für den nominalen Netzbetrieb. Hier sollte in Zukunft von Zeitreihendaten Gebrauch gemacht werden. Ein solcher Ansatz wird zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Arbeit im Rahmen einer betreuten Masterarbeit verfolgt.

Über alle Lastfälle und Szenarien hinweg erscheint ein Betrieb bei höherem Druckniveau attraktiver, weniger aus einer Argumentation über die Fließgeschwindigkeiten heraus, sondern mehr aus dem Argument der Materialbelastung heraus. Es mag widersprüchlich erscheinen, allerdings hilft ein höheres Druckniveau dabei, die Druckschwankungsamplituden bei Lastwechseln zu reduzieren. Dies würde sich positiv auf ein mögliches Risswachstum und damit auf die Lebensdauer der Pipelines auswirken. Bei hinreichend träger Dynamik können auch hier Zeitreihendaten von Nutzen sein, um einen ersten Eindruck über Lastwechselamplituden und Häufigkeit in betriebsnahen Szenarien zu erlangen. Die Berechnungen für das deutschlandweite Wasserstoffnetz im Rahmen der betreuten Masterarbeit zeigt jedoch, dass ohne geeignete Entkopplung der erneuerbaren Energieerzeugung und des Netztransports die Zustände stark schwanken und es schwierig erscheint Lastfälle so zu erzeugen, dass aufeinander folgende Zeitschritte eine stärkere Kopplung aufweisen. An dieser Stelle geraten Steady-State-Modelle an ihre Grenzen und ein dynamisches Modell sollte herangezogen werden, sofern die Rechenbarkeit auf Basis der Netzgröße und Datenlage gegeben ist.

5.6. Ergebnisse H-Gasnetz

Für die H-Gas-Netz-Lastfallrechnungen wurde als Rohrrauigkeit durchgehend 0,15 mm angesetzt und als untere Druckschranke 16 bar über Atmosphärendruck. Es wurde eine Knoten-Slack-Formulierung verwendet, um bei etwaigen Unlösbarkeiten aufgrund zu

großer Lastfälle die Distanz zur Lösbarkeit quantifizieren zu können. Die Lastfälle wurden in einem zweistufigen Prozess gelöst. In der ersten Stufe wurden die Diskretisierungstoleranzen für die quadrierten Drücke, Flüsse und Druckdifferenzen der nichtlinearen Widerstandselemente auf die groben Werte 3 bar, 3 kg/s, 3 bar gesetzt. Wurde hier eine zulässige Lösung gefunden, so wurde anschließend ein neues Problem mit feineren Diskretisierungstoleranzen von 0,1 bar, 0,1 kg/s, 0,1 bar in beiden Fällen aufgesetzt und die Schaltvariablen s_a der aktiven Elemente auf die vorherige Lösung fixiert. Gleichermaßen wurden die Flüsse auf den Kanten auf das jeweilige Intervall $[q_a - \tau_q, q_a + \tau_q]$ eingeschränkt.

Ohne die zuvor beschriebene BFS-basierte Umverteilung der flächenspezifischen Lasten, d.h. mittels direkter Voronoi-Polygone um die Netzknoten, ergeben sich hier nicht übertragbare Lastfälle, die das Preprocessing als unlösbar erkennt. Unter Verwendung der Umverteilung ist die Einlastung deutlich besser und das Preprocessing läuft bei allen betrachten Nominierungen, mit Ausnahme der Nominierung am 06.02.2015 um 06:00 Uhr, durch. Die Ein-/Ausspeisesituation in diesem Lastfall ist in Abbildung 5.2.3.1 dargestellt.

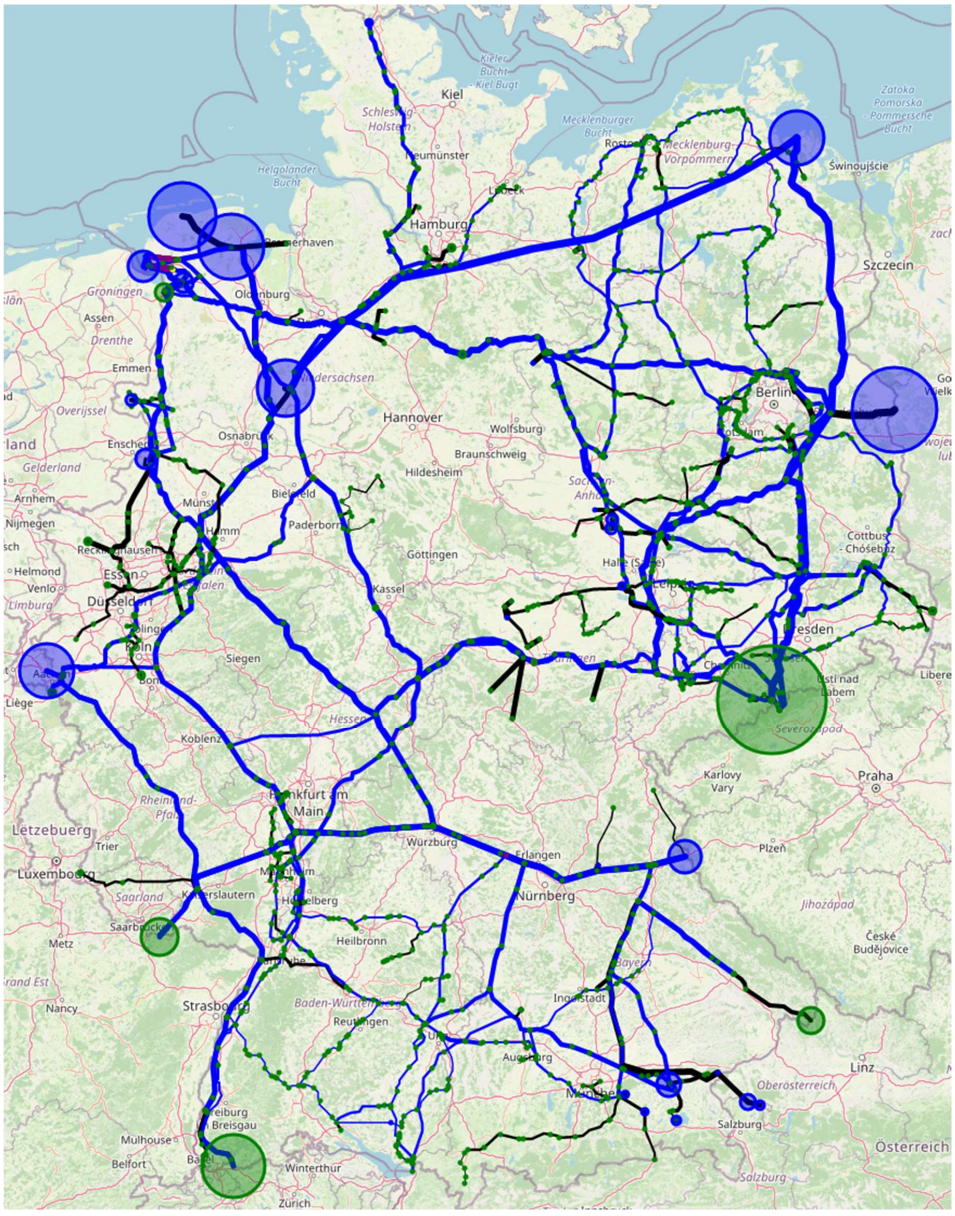


Abbildung 5.2.3.1: Ein-/Ausspeisesituation der Erdgas-Nominierung des 06.02.2015 um 06:00 Uhr. Blaue Kreise repräsentieren Einspeisungen und grüne Kreise Ausspeisungen. Ihre Größe ist proportional zur Größe der Ein-/Ausspeisung. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Durchmesser der jeweiligen Pipeline. Auf schwarz gefärbten Kanten (Pipelines) wurde der Fluss durch das Preprocessing auf einen festen Wert fixiert. Es ist darauf hinzuweisen, dass parallele Pipelinestränge aufgrund des Zoomlevels nicht erkennbar sind, aber abgebildet sind.

Auch hier bringt das Preprocessing Aufschluss und erkennt eine Einlastung eines geringfügig zu hohen Flusses auf eine kleine Pipeline in der Nähe des Chiemsees (siehe Abbildung 5.2.3.2).

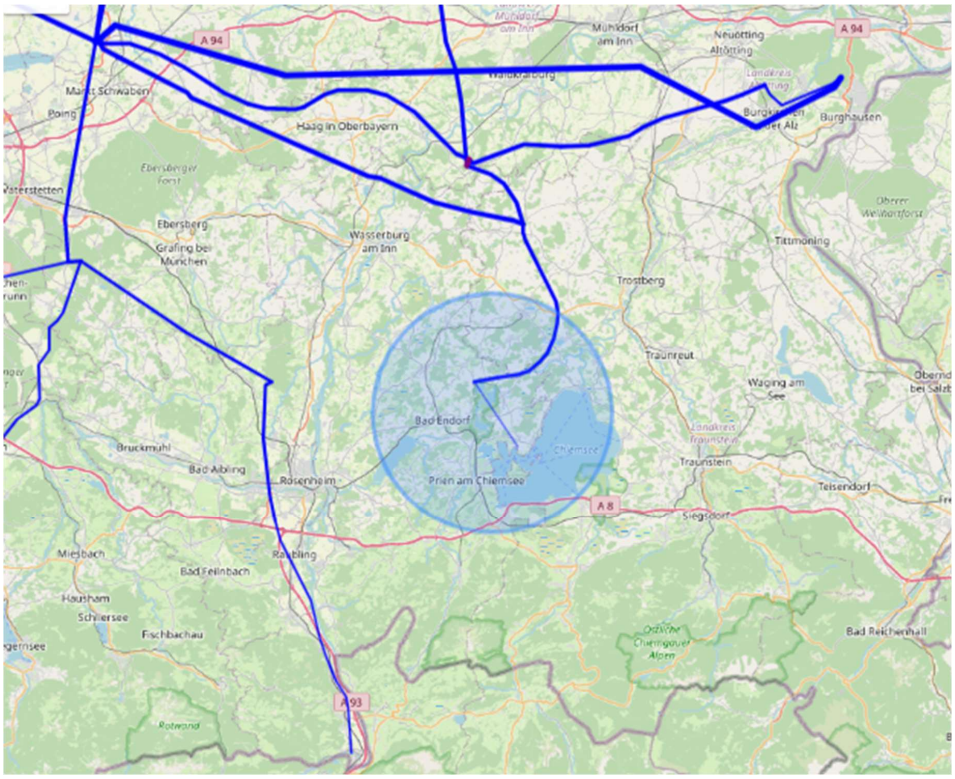


Abbildung 5.2.3.2: Bottleneck: Die Nominierung für den 06.02.2015 um 06:00 Uhr zeigt einen Bottleneck am Chiemsee auf.

Auf Abbildung 5.2.3.2 ist zu erkennen, dass die Pipelinerepräsentation hier nicht sehr dicht ist. Ein Vergleich mit den Rohdatensets S&P Global Platts [10] und VGE-Gasnetzkarte [100] ergab keine neuen Erkenntnisse hinsichtlich etwaiger fehlerhafter oder unterrepräsentierter Leitungen. Daher wurde probeweise der Pipelinedurchmesser von 200 mm auf 300 mm erweitert, was zur Lösbarkeit der Nominierung führt. Es ist nicht auszuschließen, dass eine präzisere Kenntnis der Rohrrauigkeiten hier auch zur Lösbarkeit führen würde. Dies zeigt zum einen, dass bei unsicherer Datenlage sehr leicht Engpässe auftreten können und physikalische Modelle mitunter sehr sensibel diesbezüglich reagieren können. Zum anderen zeigt es auch, dass ein Preprocessing, wie das hier verwendete, nicht nur die Rechenzeit auf ein handhabbares Maß reduziert, sondern sich auch zum Lokalisieren solcher Engpässe als unverzichtbar erweist.

Die Rechenergebnisse für Erdgas und Wasserstoff sind in Tabelle 5.2.3.1 dargestellt.

Tabelle 5.2.3.1: Stündliche Nominierungen und Ergebnisse.

Zeit	Auswahlkriterium	unlösbar im Preprocessing	Root Relaxation Objective	zulässig/ verbleibender Knoten-Slack
Erdgas				
27.11.2015 17:00	max. Import	nein	-1.477929×10^{-12}	ja
11.08.2015 15:00	min. Import	nein	3.6471134×10^{-1}	3.6471134×10^{-1}
02.12.2015 05:00	max. Export	nein	-1.023182×10^{-12}	ja
17.08.2015 09:00	min. Export	nein	7.673862×10^{-13}	ja
06.02.2015 06:00	max. Verbrauch Haushalte/ max. Aufkommen (modifizierter Pipelinedurchmesser)	ja	-3.069545×10^{-12}	ja
04.07.2015 00:00	min. Verbrauch Haushalte	nein	1.409774×10^{-12}	ja
Wasserstoff				
27.11.2015 17:00	max. Import	nein	2.842171×10^{-13}	ja
11.08.2015 15:00	min. Import	nein	1.403505×10^{-1}	1.403505×10^{-1}
02.12.2015 05:00	max. Export	nein	1.250555×10^{-12}	ja
17.08.2015 09:00	min. Export	nein	-1.634248×10^{-7}	ja
06.02.2015 06:00	max. Verbrauch Haushalte/ max. Aufkommen (modifizierter Pipelinedurchmesser)	ja	8.624971	106.696
04.07.2015 00:00	min. Verbrauch Haushalte	nein	4.136409×10^{-13}	ja

Es ist zu erkennen, dass fast alle Erdgas-Nominierungen lösbar sind und 4 von 6 der Wasserstoff-Nominierungen. Das verschwindend geringe Root Relaxation Objective, das dem Knoten-Slack entspricht und hier bestehen bleibt, ist vermutlich auf Rundungsprobleme zurückzuführen, die der Einlastung entspringen. Daher wird ein verbleibender Knoten-Slack von kleiner 10^{-11} als zulässig angesehen. Nicht nur, weil dieser innerhalb der numerischen Genauigkeitstoleranzen liegt, sondern auch, weil die entsprechende Menge an Gas ohne weiteres über den dynamischen Netzbetrieb, zum Beispiel das sog. Line-Pack, gedeckt werden könnte.

Ein direkter Vergleich zwischen Erdgas- und Wasserstoff-Fluss für die energetisch gleiche Nominierung wäre an dieser Stelle attraktiv. Solch ein Vergleich ist hier nur unter Berücksichtigung, dass die Ergebnisse einer Rechnung nicht eindeutig bestimmt sind,

zulässig. Es soll an dieser Stelle ein Blick auf das jeweilige Ergebnis für die Nominierung vom 02.12.2015 um 05:00 Uhr geworfen werden.

Die Ein-/Ausspeisesituation ist in Abbildung 5.2.3.3 dargestellt. Die zugehörigen Lösungen für Erdgas und Wasserstoff sind in Abbildung 5.2.3.4, respektive Abbildung 5.2.3.5, dargestellt. An dieser Stelle sei nochmal darauf hingewiesen, dass die Netzdrücke, aufgrund der Wahl der Node-Slack-Formulierung, nicht maximiert wurden und deshalb nicht notwendigerweise am oberen Ende der jeweiligen Druckschranken angesiedelt sind. Was man dennoch erkennt, ist, dass beim Wasserstoff-Lastfall, relativ zum Erdgas-Fall, mehr über die EUGAL-OPAL-Route (im Osten) als über die NEL (Nordost-Nordwest) zu fließen scheint. In den meisten Nominierungen erscheinen die Fluss-Muster jedoch recht ähnlich. Dies ist wahrscheinlich auf die weiten, zulässigen Druckschranken zurückzuführen, da sich hier, trotz Wechsel des Mediums, genug Spielraum für stetige Anpassungen bietet. Eine andere, interessante Beobachtung ist, dass im Wasserstoff-Fall die Druckniveaus deutlich heterogener erscheinen. Dies macht Sinn, in Anbetracht dessen, dass die benötigte Potentialdifferenz für energetisch vergleichbaren Gastransport bei Wasserstoff höher ist. Diese steileren Potentialgradienten werden insbesondere an den Knoten-Ansammlungen in den Regionen Brandenburg-Sachsen und Bayern sichtbar (sehr helle und recht dunkle Knoten).

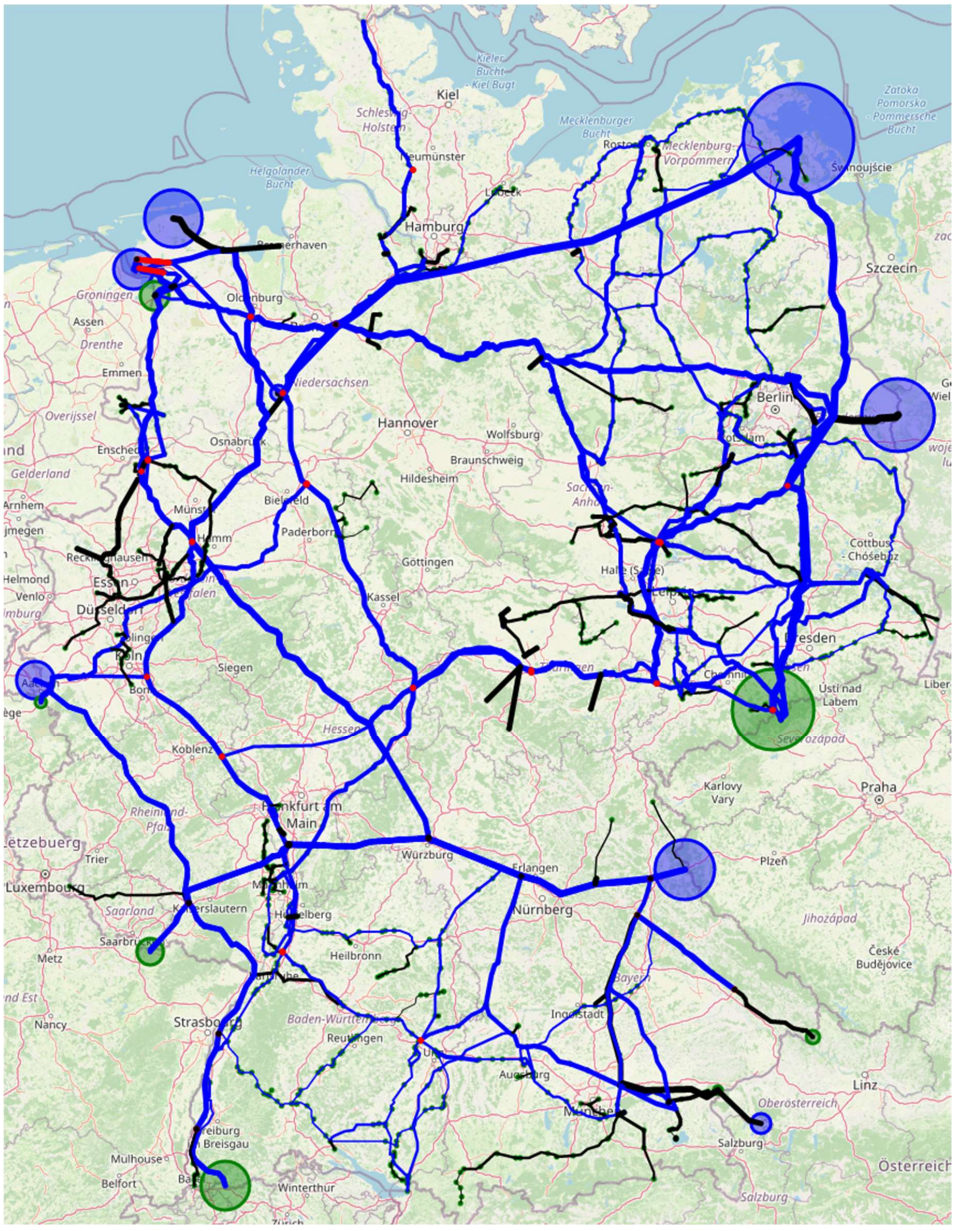


Abbildung 5.2.3.3: Ein-/Ausspeisesituation der *Erdgas-Nominierung* des 02.12.2015 um 05:00 Uhr. Blaue Kreise repräsentieren Einspeisungen und grüne Kreise Ausspeisungen. Ihr Durchmesser ist proportional zur Größe der Ein-/Ausspeisung. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Durchmesser der jeweiligen Pipeline. Auf schwarz gefärbten Kanten (Pipelines) wurde der Fluss durch das Preprocessing auf einen festen Wert fixiert. Es ist darauf hinzuweisen, dass parallele Pipelinestränge aufgrund des Zoomlevels nicht erkennbar sind, aber abgebildet sind.



Abbildung 5.2.3.4: Flüsse und Drücke in der *Erdgas-Nominierung* des 02.12.2015 um 05:00 Uhr. Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber.

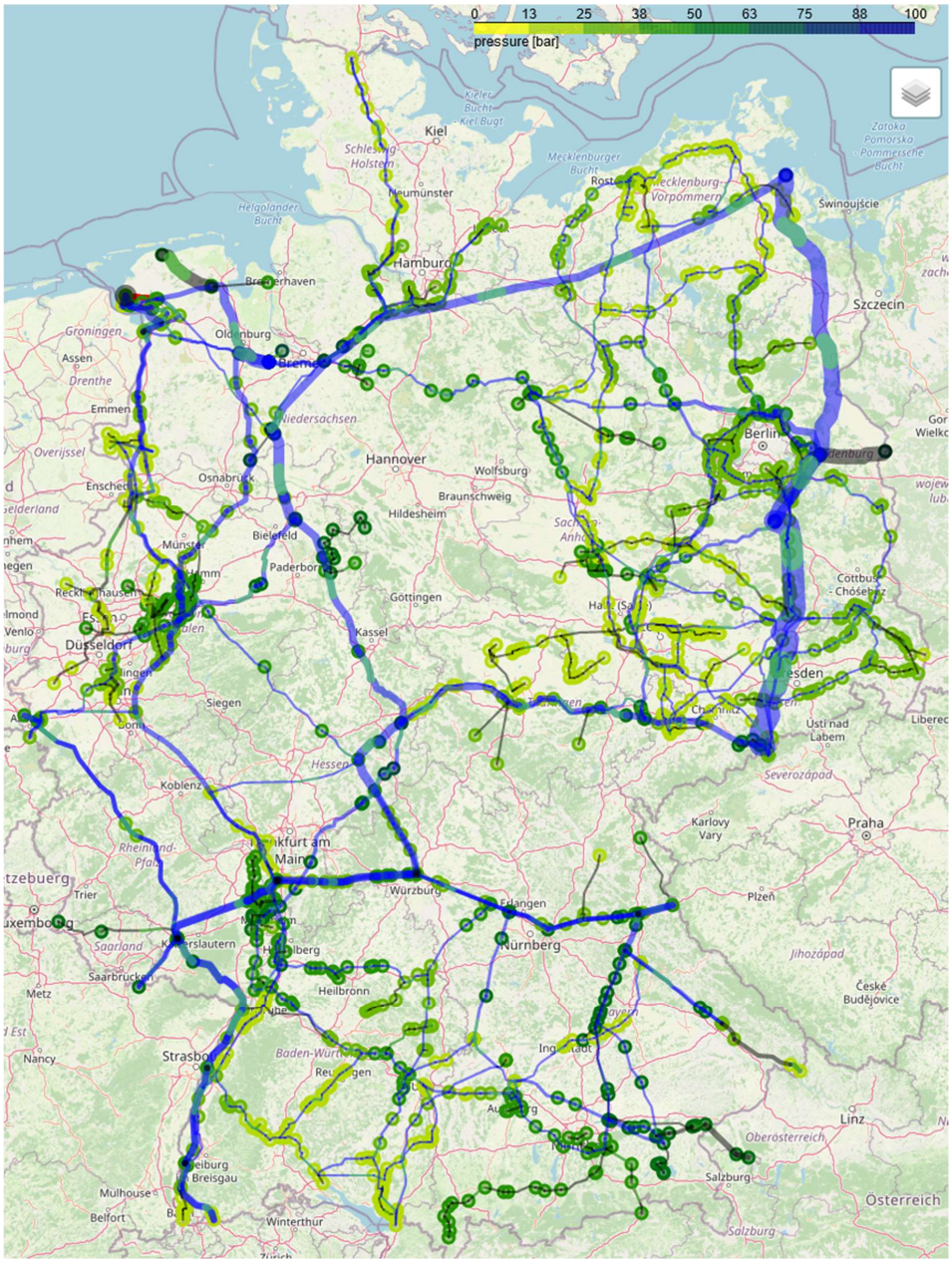


Abbildung 5.2.3.5: Flüsse und Drücke in der *Wasserstoff-Nominierung* des 02.12.2015 um 05:00 Uhr. Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber.

Neben der reinen Lösbarkeit der Nominierungen lohnt sich auch ein Blick auf die geschätzten, resultierenden Fließgeschwindigkeiten im Netz für die jeweilige Nominierung.

Dazu sind in Abbildung 5.2.3.6 - Abbildung 5.2.3.11 die geschätzten Fließgeschwindigkeiten für Erdgas und in den Abbildung 5.2.3.12 - Abbildung 5.2.3.16 die geschätzten Fließgeschwindigkeiten für Wasserstoff über den Pipelineabschnitten dargestellt.

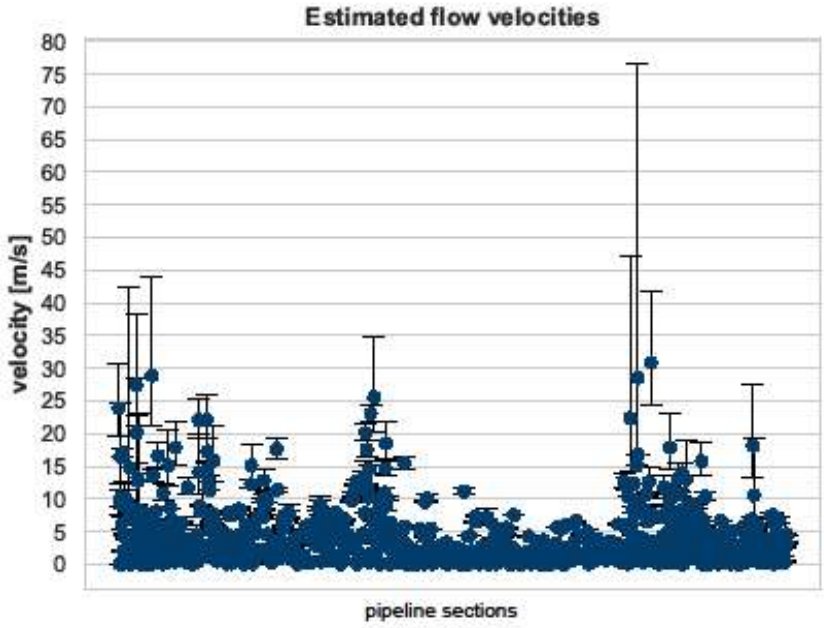


Abbildung 5.2.3.6: Durchschnittlich geschätzte Fließgeschwindigkeiten von *Erdgas* entlang der Pipelineabschnitte (x-Achse) am 06.02.2015 um 06:00 Uhr. Die Fehlerschranken kennzeichnen die Fließgeschwindigkeit am Ein- bzw. Austritt der Pipeline. Mit wenigen Ausnahmen liegen die Geschwindigkeiten unter 15 m/s bzw. unter 10 m/s.

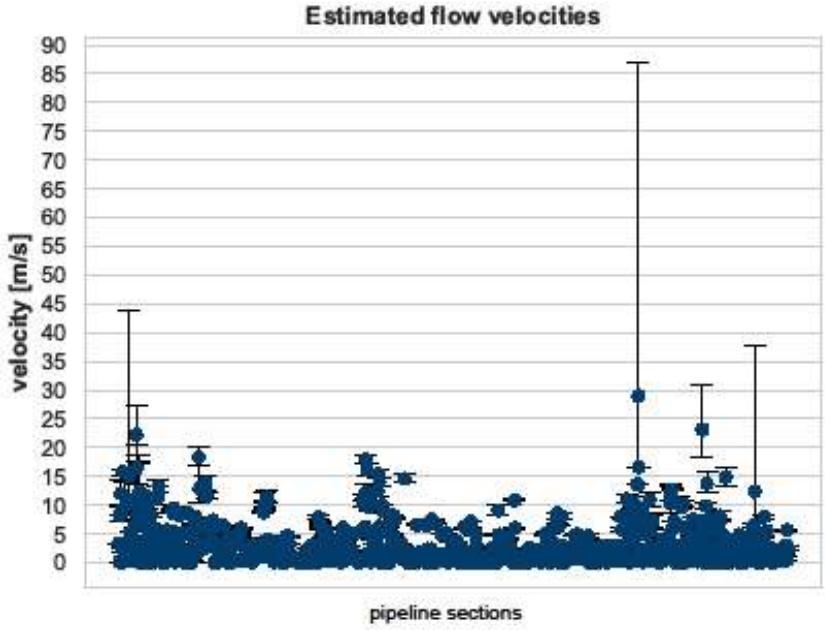


Abbildung 5.2.3.7: Durchschnittlich geschätzte Fließgeschwindigkeiten von *Erdgas* entlang der Pipelineabschnitte (x-Achse) am 04.07.2015 um 00:00 Uhr. Die Fehlerschranken kennzeichnen die Fließgeschwindigkeit am Ein- bzw. Austritt der Pipeline. Mit wenigen Ausnahmen liegen die Geschwindigkeiten unter 10 m/s bzw. unter 5 m/s. Bemerkenswert ist hier ein großer Ausreißer mit bis zu 87 m/s.

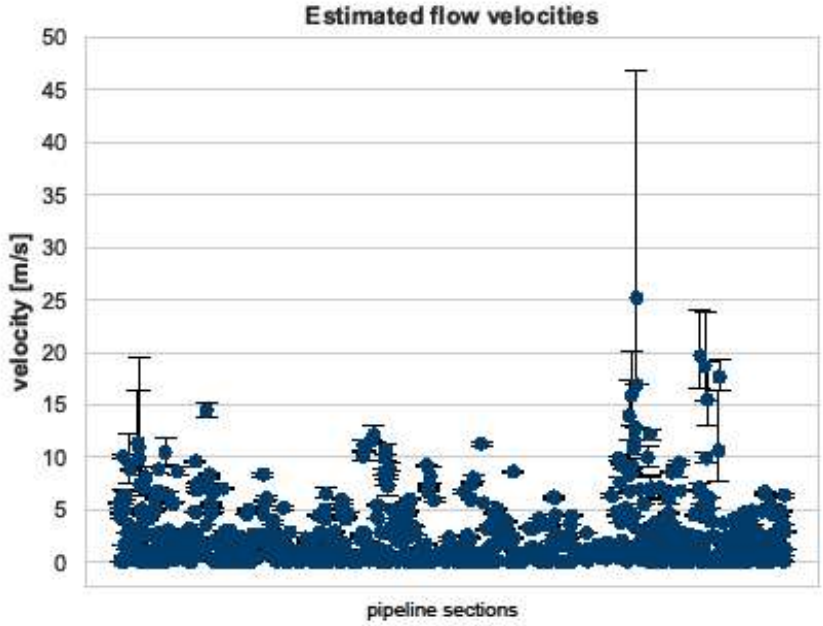


Abbildung 5.2.3.8: Durchschnittlich geschätzte Fließgeschwindigkeiten von *Erdgas* entlang der Pipelineabschnitte (x-Achse) am 11.08.2015 um 15:00 Uhr. Die Fehlerschranken kennzeichnen die Fließgeschwindigkeit am Ein- bzw. Austritt der Pipeline. Mit wenigen Ausnahmen liegen die Geschwindigkeiten unter 10 m/s bzw. unter 5 m/s.

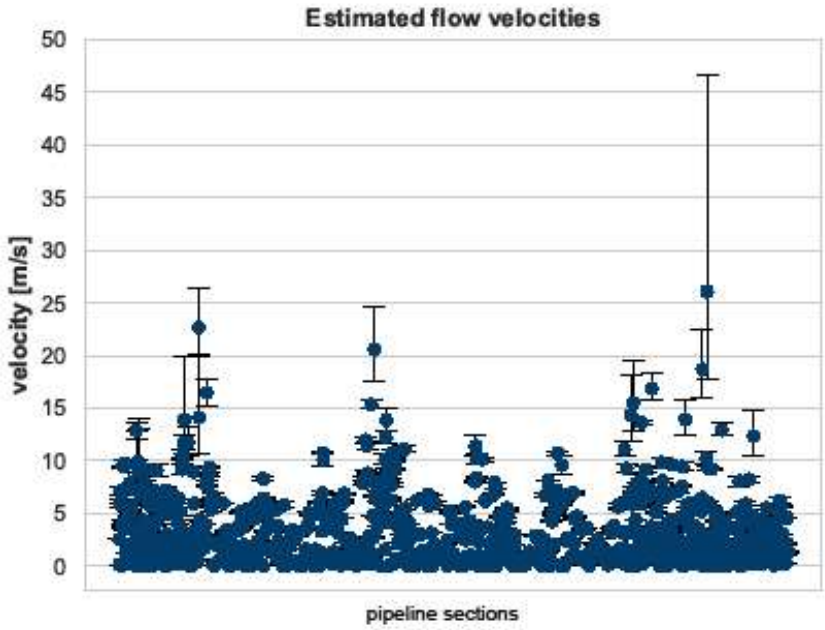


Abbildung 5.2.3.9: Durchschnittlich geschätzte Fließgeschwindigkeiten von *Erdgas* entlang der Pipelineabschnitte (x-Achse) am 17.08.2015 um 09:00 Uhr. Die Fehlerschranken kennzeichnen die Fließgeschwindigkeit am Ein- bzw. Austritt der Pipeline. Mit wenigen Ausnahmen liegen die Geschwindigkeiten unter 10 m/s.

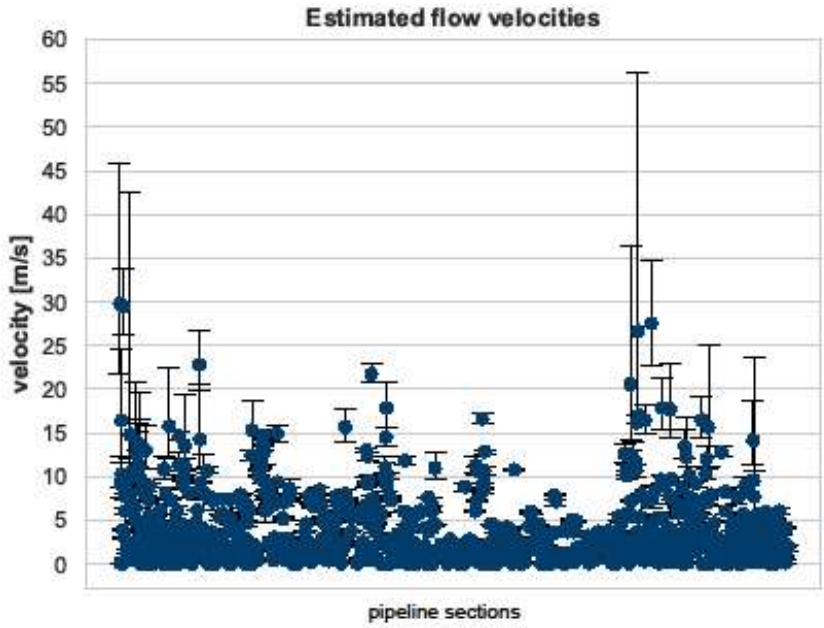


Abbildung 5.2.3.10: Durchschnittlich geschätzte Fließgeschwindigkeiten von *Erdgas* entlang der Pipelineabschnitte (x-Achse) am 27.11.2015 um 17:00 Uhr. Die Fehlerschranken kennzeichnen die Fließgeschwindigkeit am Ein- bzw. Austritt der Pipeline. Mit wenigen Ausnahmen liegen die Geschwindigkeiten unter 10 m/s.

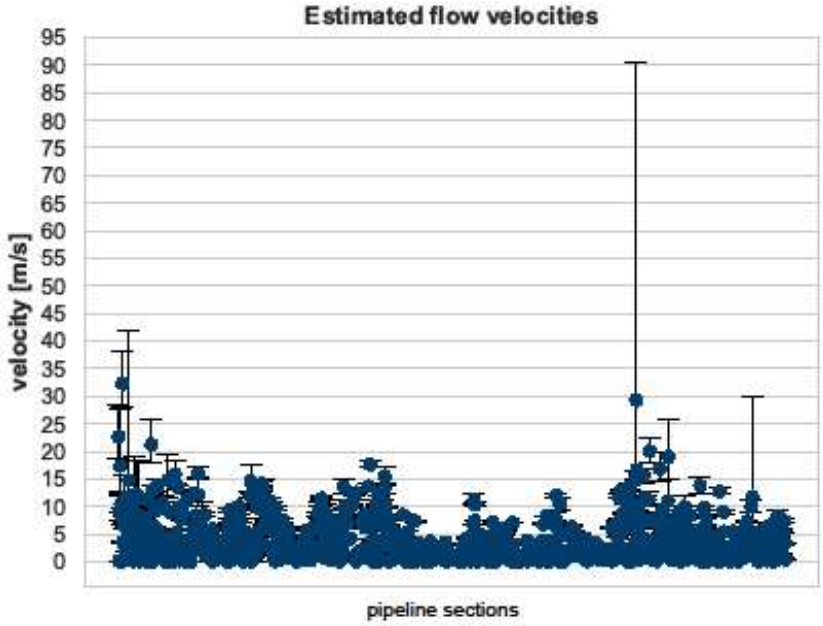


Abbildung 5.2.3.11: Durchschnittlich geschätzte Fließgeschwindigkeiten von *Erdgas* entlang der Pipelineabschnitte (x-Achse) am 02.12.2015 um 05:00 Uhr. Die Fehlerschranken kennzeichnen die Fließgeschwindigkeit am Ein- bzw. Austritt der Pipeline. Mit wenigen Ausnahmen liegen die Geschwindigkeiten unter 10 m/s. Bemerkenswert ist hier ein großer Ausreißer mit bis zu 90 m/s.

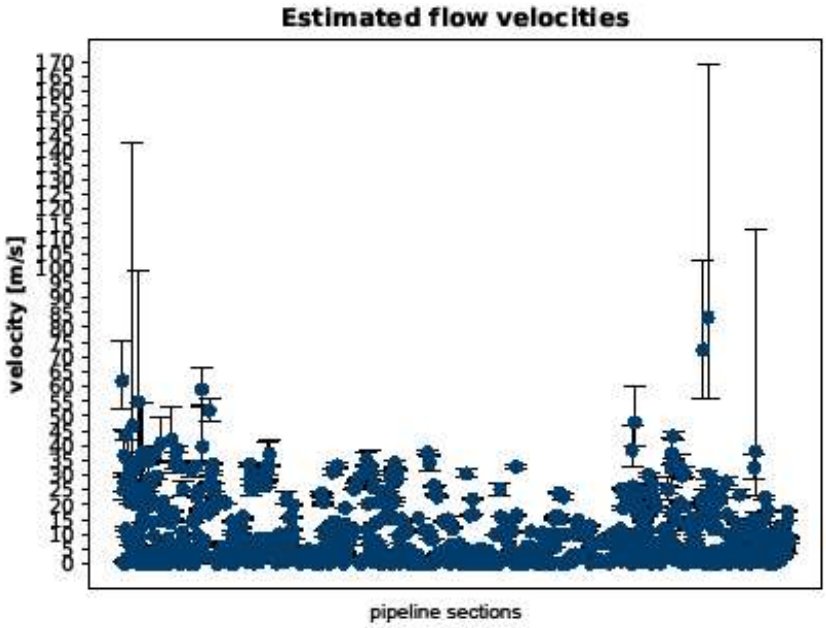


Abbildung 5.2.3.12: Durchschnittlich geschätzte Fließgeschwindigkeiten von *Wasserstoff* entlang der Pipelineabschnitte (x-Achse) am 04.07.2015 um 00:00 Uhr. Die Fehlerschranken kennzeichnen die Fließgeschwindigkeit am Ein- bzw. Austritt der Pipeline. Mit wenigen Ausnahmen liegen die Geschwindigkeiten unter 35 m/s. Die maximal erreichte Fließgeschwindigkeit liegt hier bei 168 m/s.

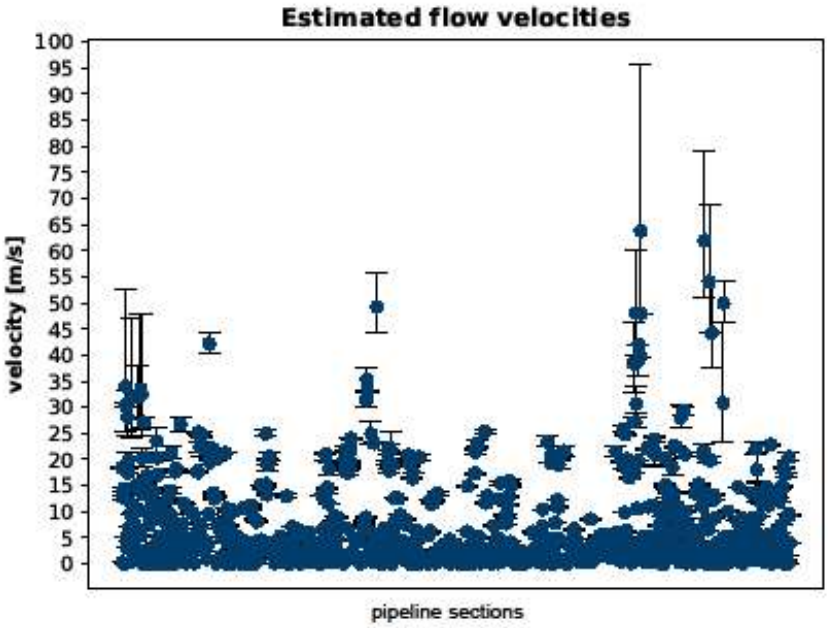


Abbildung 5.2.3.13: Durchschnittlich geschätzte Fließgeschwindigkeiten von *Wasserstoff* entlang der Pipelineabschnitte (x-Achse) am 11.08.2015 um 15:00 Uhr. Die Fehlerschranken kennzeichnen die Fließgeschwindigkeit am Ein- bzw. Austritt der Pipeline. Mit wenigen Ausnahmen liegen die Geschwindigkeiten unter 25 m/s bzw. unter 15 m/s.

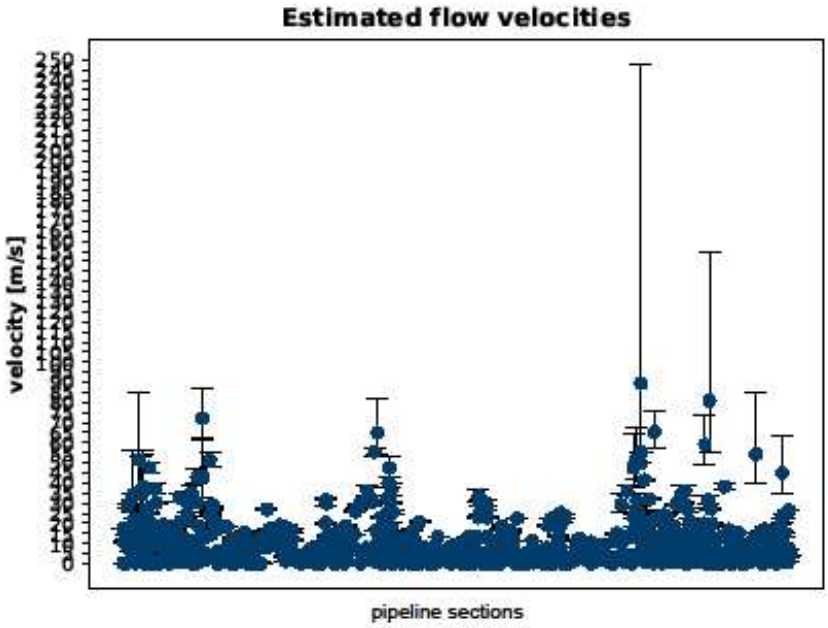


Abbildung 5.2.3.14: Durchschnittlich geschätzte Fließgeschwindigkeiten von *Wasserstoff* entlang der Pipelineabschnitte (x-Achse) am 17.08.2015 um 09:00 Uhr. Die Fehlerschranken kennzeichnen die Fließgeschwindigkeit am Ein- bzw. Austritt der Pipeline. Mit wenigen Ausnahmen liegen die Geschwindigkeiten unter 25 m/s. Die maximal erreichte Fließgeschwindigkeit liegt hier bei 248 m/s.

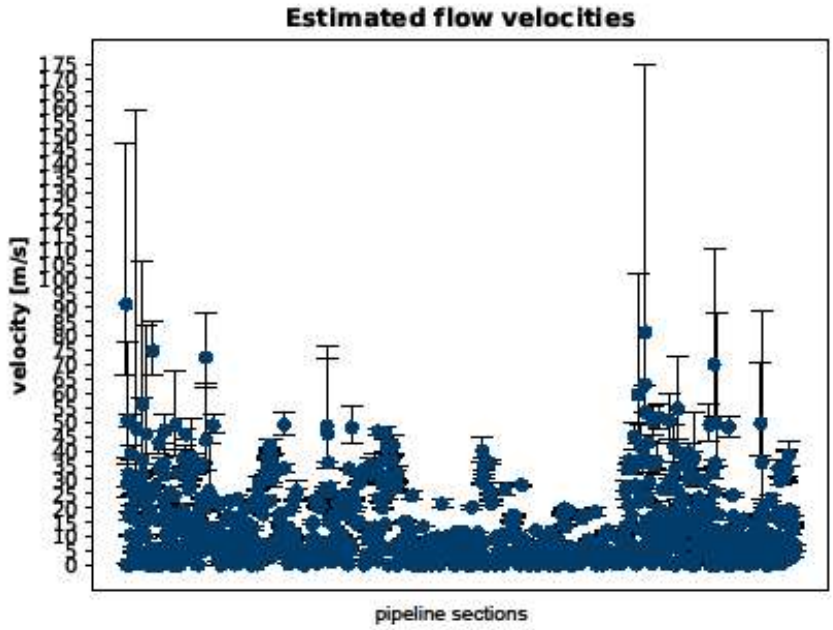


Abbildung 5.2.3.15: Durchschnittlich geschätzte Fließgeschwindigkeiten von *Wasserstoff* entlang der Pipelineabschnitte (x-Achse) am 27.11.2015 um 17:00 Uhr. Die Fehlerschranken kennzeichnen die Fließgeschwindigkeit am Ein- bzw. Austritt der Pipeline. Mit wenigen Ausnahmen liegen die Geschwindigkeiten unter 45 m/s bzw. unter 25 m/s. Die maximal erreichte Fließgeschwindigkeit liegt hier bei 175 m/s.

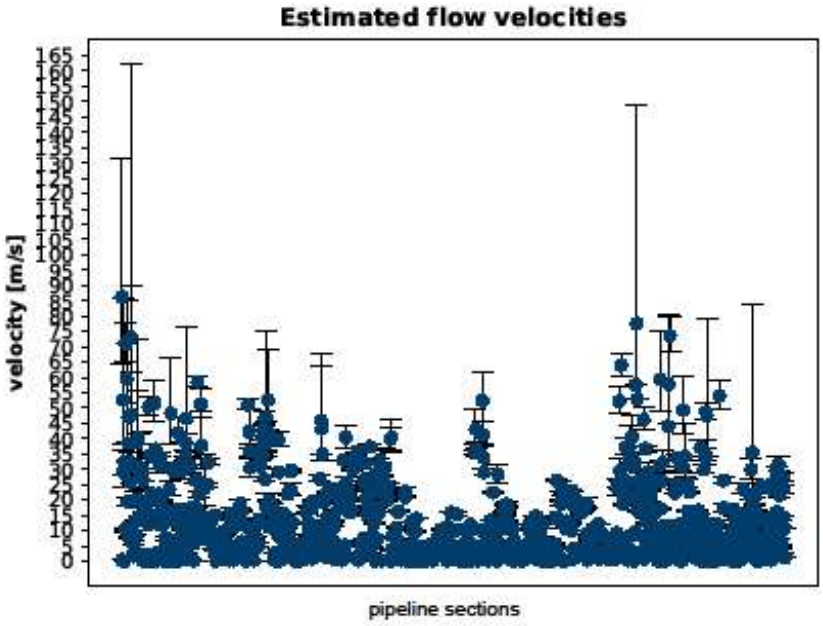


Abbildung 5.2.3.16: Durchschnittlich geschätzte Fließgeschwindigkeiten von *Wasserstoff* entlang der Pipelineabschnitte (x-Achse) am 02.12.2015 um 05:00 Uhr. Die Fehlerschranken kennzeichnen die Fließgeschwindigkeit am Ein- bzw. Austritt der Pipeline. Mit wenigen Ausnahmen liegen die Geschwindigkeiten unter 35 m/s bzw. unter 25 m/s. Die maximal erreichte Fließgeschwindigkeit liegt hier bei 163 m/s.

Die Fließgeschwindigkeiten wurden, als Postprocessing-Schritt, aus den Pipelineflüssen in Kombination mit den Knotendrücken am Eingang und am Ausgang des jeweiligen Pipelineabschnitts berechnet. In Abbildung 5.2.3.6 - Abbildung 5.2.3.16 stehen die Punkte für die durchschnittliche geschätzte Fließgeschwindigkeit und die angedeuteten „Fehlerschranken“ für die geschätzte Fließgeschwindigkeit am Eintritt bzw. am Austritt des jeweiligen Pipelineabschnitts. Starke Unterschiede zwischen Eintritts- und Austrittsgeschwindigkeit sind synonym als hohe Druckabfälle über den Pipelineverlauf zu deuten. In Verbindung mit der Modellvalidierung lässt sich daraus auch qualitativ die Ergebnisgenauigkeit einordnen, da die Modelle gerade für sehr große Druckdifferenzen stärker auseinanderdriften als für kleine.

Es ist zu erkennen, dass die Fließgeschwindigkeiten für Erdgas größtenteils deutlich unter 15-20 m/s liegen, mit einzelnen Ausreißern nach oben. Dieses Ergebnis deckt sich mit Richtwerten aus dem Erdgasnetzbetrieb. Die Fließgeschwindigkeiten für Wasserstoff sind erwartungsgemäß deutlich höher, ca. 2.5- bis 3-mal so hoch wie für Erdgas. Einzelne Ausreißer sind in beiden Fällen zu sehen. Es ist hier wichtig das Konzept des Feasibility-Problems und die Auswirkungen, bzw. Einschränkungen zu verstehen, die dieses, bei losen Druckschranken, mit sich bringt. Die Lösbarkeit der Lastfälle zeigt zunächst nur, dass der Lastfall bei diesen Bedingungen übertragen werden könnte, die Lösung ist jedoch nicht

eindeutig, und muss daher nicht nahe am echten Netzbetrieb liegen. Heuristiken, wie die Maximierung der Drücke an den Netzknoten, können hier helfen, gleichzeitig realistischere Flussbilder und Zustände zu erzeugen. Wie bereits im Methodik-Kapitel erklärt, lässt sich die Fließgeschwindigkeit nämlich, modellseitig, nicht wirklich direkt beschränken.

Den Ausreißern in Sachen Fließgeschwindigkeit wurde trotzdem nachgegangen, in den meisten Fällen war jedoch keine konkrete Ursache ersichtlich. Eine Ausnahme ergibt sich für das Datum 04.07.2015 um 00:00 Uhr und Erdgas als Medium. Hier tritt der große Ausreißer (sichtbar in Abbildung 5.2.3.14) auf einer kurzen Loop-Leitung bei Oldenburg auf (siehe Abbildung 5.2.3.17).

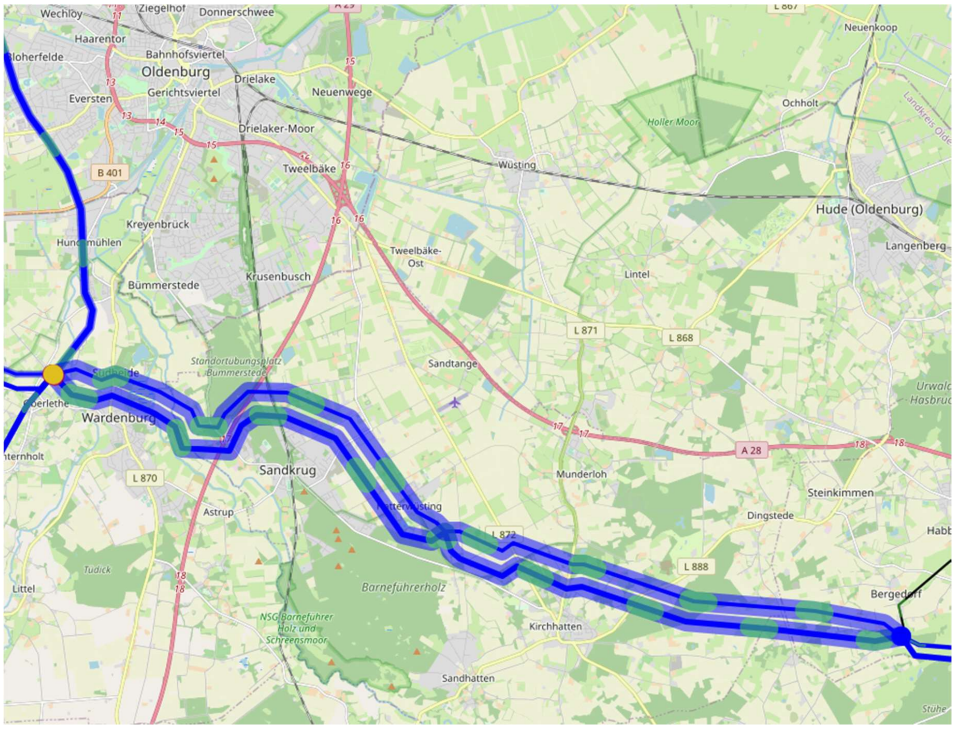


Abbildung 5.2.3.17: Loopleitung mit hoher Fließgeschwindigkeit bei Oldenburg in der Node-Slack-Lösung.

Außer einem hohen Druckabfall auf einer sehr kurzen Strecke waren hier jedoch keine Anomalien zu entdecken. Aufgrund langer Rechenzeiten und numerischer Probleme, die sich auch im verbleibenden, sehr kleinen Knoten-Slack in Tabelle 5.2.3.1 äußern, war es für die meisten Fälle nicht möglich eine vergleichbare Rechnung mit Maximierung der Drücke an den Knoten durchzuführen. Für das hier betrachtete Datum war dies allerdings möglich (auch hier 10% Optimality-Gap). Der Ergebnis-Plot ist in Abbildung 5.2.3.18 dargestellt.

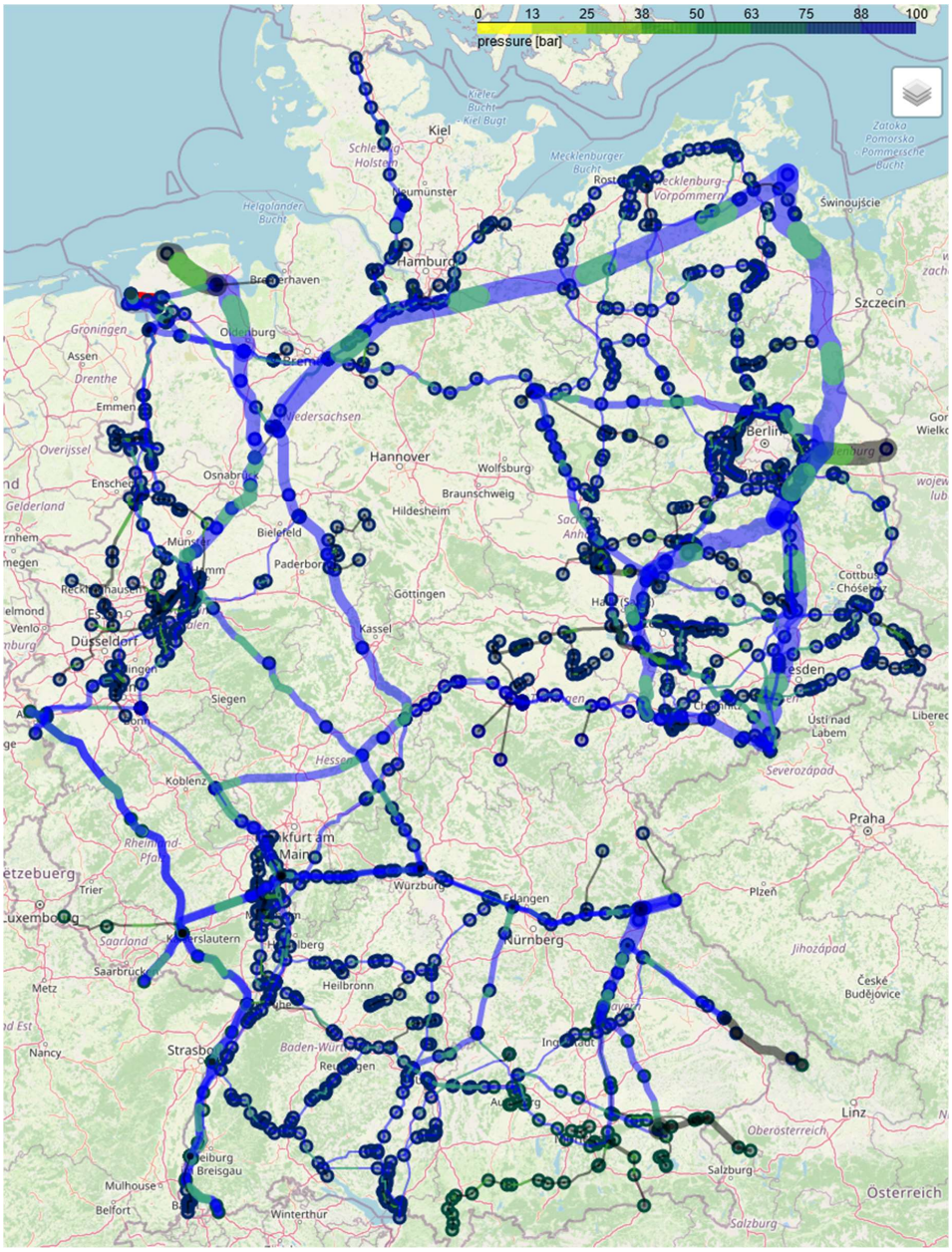


Abbildung 5.2.3.18: Flüsse und Drücke in der Erdgas-Nominierung des 04.07.2015 um 00:00 Uhr. Bei Maximierung (10%-Optimality-Gap) der Drücke an den Netzknoten. Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber.

Anhand der druckbasierten Knoteneinfärbung ist zu erkennen, dass das Druckniveau sehr gleichmäßig hoch ist - in den meisten Fällen in der Größenordnung von 80 bar. Die Anomalie bei Oldenburg tritt hier nicht auf und die Fließgeschwindigkeiten sind meist

deutlich unter 10 m/s. Es scheint sich also, zumindest in diesem Fall, um einen Aspekt zu handeln, der dem niedrigen Druckniveau in der Node-Slack-Rechnung geschuldet ist.

5.7. Diskussion H-Gasnetz

Die vorliegende Modellierung energieäquivalenter Erdgas- bzw. Wasserstoff-Lastfälle im H-Gasnetz legt nahe, dass ein direkter Austausch nicht in allen, aber potenziell in vielen Flussszenarien möglich wäre. Im Spitzenlastfall (06.02.2015 um 06:00 Uhr) fehlen jedoch mindestens 107 kg/s an Transportkapazität, was doch erheblich ist.

Die auftretenden Fließgeschwindigkeiten sind zwar sehr hoch, es konnte jedoch erklärt werden, dass dies der Problem-Formulierung geschuldet ist. Darüber hinaus wird die Aussage zur Lösbarkeit davon nicht berührt. Die Fließgeschwindigkeiten könnten, im Vergleich zu den in Abbildung 5.2.3.6 - Abbildung 5.2.3.16 präsentierten Werten, durch Druckmaximierung, weiter gesenkt werden, wie das Beispiel der Erdgas-Nominierung 04.07.2015 um 00:00 Uhr gezeigt hat. Dazu benötigt es modellseitig in Zukunft eine geeignete Rundungsroutine, um die numerischen Eigenschaften des Problems zu verbessern. Andererseits wären bei einer genaueren Betrachtung die zu erwartenden Druckschwankungen für den Transport in Verbindung mit der Materialbelastung zu betrachten. Dies macht jedoch nur Sinn, wenn auch die entsprechende Ein-/Ausspeisesituation realistisch gestaltet ist. Wie eine solche Ein-/Ausspeisesituation für das Netz im Zeithorizont 2050+ aussehen würde, ist bisher nicht abzusehen. Hier kann gegebenenfalls auf Prognosen und Studien zurückgegriffen werden und/oder Modellkopplung mit Energiesystemmodellen betrieben werden.

Auch die Formulierung selbst kann noch beschleunigt werden. Aufgrund der Nutzung der Ersatzverschaltungen für Verdichterstationen, konnte das in Kapitel 4 beschriebene Preprocessing nicht vollends ausgenutzt werden und es wurden keine speziellen zusätzlichen Nebenbedingungen implementiert. Die Rechenzeiten für die Lastfälle wurden in diesem Abschnitt nicht vertieft betrachtet, da kein Fokus auf der numerischen Effizienz lag. Es ist jedoch zu sagen, dass diese in der Größenordnung von einigen Stunden bis zu 2 Tagen pro Lastfall liegen. Dies liegt vor allem an den weiten – aufgrund der Datenlage unsicheren - Druckschranken im Netz, und dem damit verbundenen Diskretisierungsbedarf, sowie der eingeschränkt wirksamen Beschränkung der Schaltzustände in den Ersatzverschaltungen.

6. Evaluation

Methodische Leistungsfähigkeit der Modellierung

Zweifelsohne ist die Umstellung auf Wasserstoff und Etablierung einer dedizierten Wasserstoffinfrastruktur eine facettenreiche Herausforderung. Dem engen zeitlichen Rahmen für eine erfolgreiche Umsetzung im Kontext der Energiewende steht ein heterogenes Umfeld an Stakeholdern und offenen Fragestellungen gegenüber. In Kapitel 2 konnte motiviert werden, dass Gasnetzmodellierung, -simulation und -optimierung essentieller Bestandteil des Gasnetzbetriebs und der -analyse sind. Gleichzeitig ist die Beschreibung mathematisch-physikalisch anspruchsvoll und die Datenlage oftmals schwierig. Dennoch konnte gezeigt werden, dass sich geeignete Kombinationen aus Modell und Daten finden lassen, um Berechnungen physikalischer Flüsse durchzuführen.

Betriebliche Einordnung der Ergebnisse

Trotz großer Unsicherheiten in den Daten und daraus resultierenden, uneindeutigen Lösungen, konnten im Falle der Wasserstoffnetzmodellierung 2025 favorisierte Betriebsbedingungen gefunden und auf mögliche Engpässe hingewiesen werden. Als modellseitig favorisierte Betriebsbedingungen sind Druckniveaus nahe der oberen Druckschranke anzusetzen, falls das Netz mit häufiger Flussumkehr betrieben werden sollte, da sich hier geringe Fließgeschwindigkeiten und Druckabfälle einstellen und dadurch die zyklischen Schwingungsamplituden reduziert werden. Ist der Netzzustand eher statisch, so sind niedrigere Drücke vorzuziehen, um Verdichtungskosten einzusparen.

Identifikation struktureller Engpässe

Als möglicher Engpass für das Szenariojahr 2025 ist der Pipelineabschnitt Legden-Marl zu nennen. Die Wasserstoffnetzmodellierung 2030 bestätigt, dass ein höheres Druckniveau zu bevorzugen ist. Hier fällt als möglicher zukünftiger Engpass der Pipelineabschnitt Egenstedt-Hallendorf auf. Darüber hinaus konnte die Wandschubspannungshypothese genutzt werden, um die sich einstellenden Fließgeschwindigkeiten zu bewerten. Diese sind danach in sämtlichen Szenarien als unkritisch zu bewerten. Daraus lässt sich schließen, dass über die Lastfälle hinweg der Nettofluss im Netzwerk nicht ausreicht, um höhere Fließgeschwindigkeiten zu induzieren.

Implikationen und Weiterentwicklungsbedarf

Eine Analyse der Knotendrücke über die 200 Screening-Lastfälle hinweg, zeigt große Schwankungsbreiten für bestimmte Knoten und geringere für andere. Dies lässt Knoten hoher Netzdynamik erahnen, vorausgesetzt, dass die 200 Lastfälle repräsentativ für den tatsächlichen Netzbetrieb sind. Ist dies der Fall, und wären hier dynamische Übergänge zwischen diesen Zuständen zu erwarten, so könnten bereits a-priori Orte erhöhter Materialbelastung identifiziert werden. Zur genaueren Bestimmung solcher Lastkollektiv wäre allerdings eine Zeitreihen-basierte Lastfallerzeugung sinnvoll. Ein Aspekt, der gegen die hohe Dynamik der 200 Zufallslastfälle spricht, ist das 80%-Grundlast Screeningszenario mit seiner geringen Variation im Ein-/Ausspeisemuster.

7. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden unterschiedliche Aspekte des Gastransports bei der Umstellung auf Wasserstoff untersucht und diskutiert. Nach einer Einbettung in den Kontext der Energiewende und aktueller Geschehnisse wurden einzelne Komponenten und deren Zusammenspiel im Gasnetz erläutert sowie einzelne Stakeholder vorgestellt. Anschließend wurden die rechtlich-regulatorischen Rahmenbedingungen, zusammen mit der aktuellen Gesetzeslage, beleuchtet. Im Anschluss wurde die technische Eignung bestehender Systeme für den Wasserstofftransport von kleinen zu großen Skalen thematisiert, angefangen bei der Materialeignung über die Komponenteneignung hin zur Systemeignung. Bei der Komponenteneignung wurden neben den Pipelines insbesondere die Eignung bestehender Turboverdichter und ihrer Gasantriebe kritisch diskutiert. Auch Sicherheitsaspekte sowie Aspekte in Bezug auf Endgeräte fanden Beachtung und zeigen den Umfang der zu betrachtenden Facetten und die Reichweite der Konsequenzen einer Umstellung auf Wasserstoff auf. Die Fragen, die in Verbindung mit der Systemeignung auftreten, sind insbesondere solche der Netzsynthese und der nachhaltigen Entwicklung des zukünftigen Wasserstoffnetzes in Deutschland und Europa. Hier liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit. Zur genaueren Analyse von möglichen Netzfluss- und Ausbauszenarien im deutschen Gasnetz wurde hier, aufbauend auf einer Literaturrecherche und unter Berücksichtigung der verfügbaren Netzdatenlage, ein Gasflussmodell implementiert. Dieses Modell wurde genutzt, um einerseits die Netzeignung und -auslastung der gemäß Netzentwicklungsplan Gas 2020 der Fernnetzbetreiber avisierten Initialnetze bis 2025 und 2030 zu bewerten und andererseits, um vergleichend zu analysieren, wie sich der Gasaustausch von Erdgas durch Wasserstoff im deutschen H-Gasnetz auf die Lastflusssituation auswirken würde. Um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen Flusszuständen im Gasnetz in Betrieb mit Erdgas und mit Wasserstoff herstellen zu können, wurde bei der Analyse der Initialnetze eine Äquivalenzhypothese aus der Literatur herangezogen.

7.1. Ausgangslage

Die Einbettung der Umstellung auf Wasserstoff in den Kontext der Energiewende zeigt, dass Wasserstoff als Schlüsseltechnologie zur Erreichung der Klimaziele Deutschlands und der Europäischen Union gesehen wird. Dies liegt neben seiner Treibhausgasneutralität, seinem häufigen Vorkommen in der Natur, seinen nicht-toxischen Eigenschaften insbesondere an seiner Speicherfähigkeit. Durch seine mittel- bis langfristige Speicherfähigkeit ermöglicht Wasserstoff die Entkopplung von Energieverfügbarkeit und -nachfrage, die in einem EE-geprägten Energiesystem zur Grundlastabdeckung und Versorgungssicherheit notwendig ist. Durch seine mögliche energetische sowie stoffliche Nutzung stellt sich Wasserstoff als geeigneter Energieträger dar, um anderweitig schwer zu dekarbonisierende Industrien, wie die Stahl- und Chemieindustrie zu dekarbonisieren.

7.2. Grundlagen der Gasversorgung

Nach einer Einbettung in den Kontext der Energiewende und aktueller Geschehnisse wurden einzelne Komponenten und deren Zusammenspiel im Gasnetz erläutert sowie einzelne Stakeholder vorgestellt. Anschließend wurden die rechtlich-regulatorischen Rahmenbedingungen, zusammen mit der aktuellen Gesetzeslage, beleuchtet. Hier zeigt

sich, dass der in der EnWG-Novelle gesetzte rechtlich-regulatorische Rahmen, wenn auch nicht vollständig, so doch ausreichend ausgestaltet erscheint, um konkret planerisch tätig zu werden, da wesentliche Fragen des Entflechtungsrechts, Berichtspflichten, etc. geklärt wurden. Gleichzeitig zeigt die Stellungnahme der BNetzA, dass die Wasserstoffnetzregulierung keine statische oder gar pauschale Frage darstellt, sondern eine Frage, die von der aktuellen Netz- und Marktstruktur abhängt und parallel zu deren Entwicklung immer wieder neu bewertet werden muss.

7.3. Material- und Komponenteneignung

Die Frage nach der Materialeignung erscheint kompliziert und geht über diese Arbeit hinaus. Die Phänomene der Wasserstoffversprödung sind vielfältig, jedoch nicht neu. Verschiedene Untersuchungen und die Tatsache, dass es bereits über lange Zeit betriebene, industrielle Wasserstoffnetze gibt, motivieren die Eignung gängiger Pipelinewerkstoffe für den Wasserstofftransport, obgleich ein schädigender Einfluss auf das Material, insbesondere unter schwingender Beanspruchung, nicht von der Hand zu weisen ist. Gleichzeitig sind noch Materialuntersuchungen der Bestandskomponenten seitens des DVGW im Gange und es ist zu sehen, dass der ökonomische Mehrwert einer Umstellung gegenüber einem Neubau enorm ist. Dementsprechend sorgfältig sind Eignungsuntersuchungen durchzuführen. Neben den Pipelines ist, auf Seite der Gasnetzkomponenten, insbesondere die Eignung bestehender Turboverdichter und ihrer Gasantriebe von Interesse. Hier sind definitiv Anpassungen notwendig. Zwar gelten Pipelines und Verdichter meist als die wichtigsten Komponenten von Gasnetzen, sonstige Komponenten und Armaturen sollten jedoch bei der Materialbetrachtung nicht außer Acht gelassen werden. So weisen Sicherheitsabsperrventile häufig Stahlfedern auf, die im Gasraum stehen. Dabei gelten Federstähle als anfällig für die Wasserstoffversprödung. Darüber hinaus ist darauf hinzuweisen, dass der DVGW bei seinen Untersuchungen ausschließlich Bestandsarmaturen auf ihre Eignung prüft. Die Hersteller von Armaturen sind aktuell jedoch auf sich gestellt die Wasserstofftauglichkeit ihrer neuen Komponenten und Bauteile sicherzustellen. Hier besteht ein Standardisierungsbedarf für die Eignung von Werkstoffen im Kontakt mit Wasserstoff.

7.4. Sicherheitstechnik

Im Bereich der Sicherheitstechnik werden zwar Anpassungen notwendig sein, um der höheren Explosionsgruppe der Wasserstoff zuzuordnen ist Rechnung zu tragen, diese erscheinen jedoch überschaubar in Sachen Komplexität und Ressourcenaufwand. Auf Seiten der Endgeräte sind mindestens Kalibrierungen notwendig und häufig auch der Austausch von Komponenten wie Brennern. Die höhere Stickoxidproduktion bei stöchiometrischer Verbrennung ist zu adressieren, beispielsweise durch eine Absenkung der Verbrennungstemperatur und/oder durch eine verbesserte Abgasbehandlung.

7.5. Systemeignung

Die Fragen, die im Zusammenhang mit der Systemeignung auftreten, sind insbesondere solche der Netzsynthese und der nachhaltigen Entwicklung des zukünftigen Wasserstoffnetzes in Deutschland und Europa. Modellgestützte Untersuchungen sind hierbei unerlässlich, da sie eine frühzeitige Bewertung möglicher Betriebsszenarien

erlauben und potenzielle Engpässe aufzeigen können. Aufgrund der zu erwartenden volatilen Wasserstofferzeugung, die dem Netz potenziell aufgeprägt wird, ist in Kombination mit den Materialeignungsbetrachtungen ein besonderer Fokus auf die Minimierung materialseitiger Belastungen zu legen.

Die inhärente Datenabhängigkeit bei gleichzeitiger Notwendigkeit, Fragen mit Realitätsbezug zu beantworten, stellen bei der modellgestützten Analyse aus dem öffentlichen Raum heraus eine erhebliche Herausforderung dar und schränkt den sinnvoll adressierbaren Untersuchungsraum einschränken. Eine Analyse der Netzentwicklungspläne hat jedoch gezeigt, dass sich auf Basis der Datenlage für Deutschland die Gelegenheit bietet eine unabhängige Untersuchung von Netzzuständen für das zukünftige deutsche Wasserstoffnetz durchzuführen. Eine solche Analyse wurde folglich in dieser Arbeit vorgenommen.

7.6. Methodik

Es wurde auf die Herausforderungen der Modellierung eingegangen und ein elaboriertes stationäres Gasnetzoptimierungsmodell implementiert, das einen Kompromiss aus Rechenbarkeit großer Netze, Präzision und Datenverfügbarkeit darstellt.

Das Modell verfolgt eine Modellierung als MILP-Optimierungsproblem auf Basis von Ansätzen aus der Literatur. Die Formulierung als MILP-Optimierungsproblem hat viele Vorteile. Es können relativ große Netze berechnet werden und gleichzeitig können schaltbare Elemente, wie Verdichter und Ventile direkt berücksichtigt werden. Dabei müssen weder der Netzzustand noch die Schaltstellung der schaltbaren Elemente a priori bekannt sein. Auch die Modellparameter haben eine Granularität, die sich in der Literatur finden lässt. Durch die Einbindung einer Stoffdatenberechnung auf Basis eines Thermodynamik-Pakets im Rahmen der Implementierung kann das Modell auch für andere Gase als Erdgas oder Wasserstoff herangezogen werden. Das Modell verfügt auch über drei Möglichkeiten, Netzengpässe zu lokalisieren und zu analysieren. Da es sich in seiner Grundform um ein Feasibility-Problem handelt, kann die Zielfunktion frei gewählt werden. Dies ermöglicht die Einrichtung von Knoten-, sowie Kanten-Slack-Variablen und deren Minimierung. So können nicht übertragbare Lastfälle hinsichtlich der Größe ihrer Unzulässigkeit und der Lokalisierung von Bottlenecks analysiert werden. Ergänzt wird dies durch ein Lastfall-spezifisches Bound-Strengthening als Preprocessing-Schritt. Dies hilft teilweise enorm den Rechenaufwand für einzelne Lastfälle zu senken. Außerdem kann es bereits die Übertragbarkeit einzelner Lastfälle feststellen und dabei Anhaltspunkte zur Lokalisierung der Engpässe bieten. Dies ist insbesondere bei Verwendung von bedingt verlässlichen Daten sehr hilfreich. Das Modell wurde für sämtliche Netzflussberechnungen eingesetzt.

7.7. Szenarien 2025

Im Rahmen der Wasserstoffnetz 2025-Modellierung wurden öffentlich zugängliche Daten hinsichtlich der Netztopologie, sowie hinsichtlich möglicher Netz-Ein- und Ausspeiser zusammengetragen. Es wurden Pipelineverläufe auf Basis von Kartenmaterial georeferenziert und mit zusätzlichen Daten angereichert. Hieraus ergaben sich drei Netzcluster: Nord, West und Ost. Anschließend wurden mögliche Flussszenarien bei

variierenden Randbedingungen und Parametern bewertet. Dabei wurde sowohl der maximale Netzdruck als auch die angesetzte Rohrrauigkeit variiert. Es konnte gezeigt werden, dass die antizipierten Flussszenarien übertragbar sind und keinerlei Einsatz von Drosselventilen dafür notwendig ist. Es bedarf auch keiner netzinternen Verdichter. Gleichzeitig wurden maximale Fließgeschwindigkeiten und minimale Abgabedrücke im Netz betrachtet und bewertet. Dabei ergab sich für eine angesetzte Rohrrauigkeit von 0,1 mm, bei 30 bar Maximaldruck im Netz, eine maximale Geschwindigkeit von 90,62 m/s und ein minimaler Abgabedruck von 5,13 bar auf dem Abschnitt Legden-Marl. Bei dem hier angesetzten minimalen Abgabedruck von 5 bar, heißt dies, dass, wenn man Abweichungen der realen Netzparameter von den hier angenommenen Parametern in Betracht zieht, das Netz kurz vor einem Bottleneck steht. Gleichzeitig hat die Variation der Rohrrauigkeit[47] auf einen höheren Wert von 1 mm gezeigt, dass derartige Abweichungen der Parameterwerte von den hier angesetzten nicht zwingenderweise zu einem extremeren Netzverhalten führen müssen, da sich Ströme im Netz anders verteilen können. Entgegen der Intuition ergaben sich hier niedrigere Fließgeschwindigkeiten, maximal 47 m/s auf dem Abschnitt Marl-Scholven und ein minimaler Abgabedruck von 7 bar. Bei einem Maximaldruck von 60 bar im Netz fällt der Druck an den Ausspeisepunkten nicht unter 48 bar. Diese Ergebnisse bieten Anhaltspunkte für den notwendigen Verdichtungsbedarf und das an den Ausspeisepunkten zusagbare Druckniveau. Bei einem Maximaldruck im Netz von 30 bar liegen die zusagbaren Druckniveaus an den Ausspeisepunkten voraussichtlich über 5 bar. Der genau Wert hängt jedoch von den Rohreibungsparametern ab. Dies sind Einblicke von denen Stakeholder bei der Planung ihrer Erzeugungs- und Nutzungsanlagen profitieren können. Es ist hervorzuheben, dass derartige Aussagen mit gewöhnlichen Energieflussproblemen ohne Potentialfluss nicht zu erzielen sind. Die heterogene Datenlage seitens der Wasserstoffprojekte ist kritisch zu betrachten. Der schwierigen Datenlage ist geschuldet, dass für das Jahr 2025 kein Fluss im Cluster Nord zuzuordnen war. Der Netz-Cluster Ost besteht im Jahr 2025 lediglich aus einer Pipeline. Der Fluss ist hier übertragbar und relativ gering.

7.8. Szenarien 2030

Für das Jahr 2030 wurde analog zum Jahr 2025 die Netztopologie durch die Georeferenzierung von dokumentierten Pipelinemaßnahmen der Fernnetzbetreiber erstellt und mögliche Ein- und Ausspeiser samt Erzeugungs- beziehungsweise Abnahmekapazitäten zusammengetragen. Während sich der Cluster Ost gegenüber dem Jahr 2025 nicht verändert hat, sind die Cluster Nord und West zu einem zusammenhängenden Netz zusammengewachsen. Aufgrund der komplizierteren Netztopologie wurden für das Jahr 2030 deutlich mehr Flussszenarien untersucht: Drei händisch erzeugte Szenarien, ergänzt um 200 zufallsgenerierte Screening-Rechnungen, die darauf abzielen den Raum der möglichen Ein- und Ausspeiseströme, auch Nominierungen genannt, abzudecken. Die Screening-Rechnungen wurden dabei nochmals in 4 Varianten unterteilt. Bei den händisch erzeugten Flussszenarien wurde – analog zur Modellierung des Wasserstoffnetzes 2025 - der maximale Netzdruck und die Rohrrauigkeit

[47] Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei der Rohrrauigkeit nicht um die tatsächliche Oberflächenbeschaffenheit handelt, sondern um einen hydraulischen Parameter.

variiert. Im Basisszenario sowie in der Szenariovariante 2 zeigt sich, dass die Lastfälle bei einer einheitlich angesetzten Rohrrauigkeit von 1 mm und einem maximalen Netzdruck von 30 bar nicht übertragbar sind. Bei der Netzerweiterung ist folglich sehr genau zu prüfen, welche Rohrreibungsparameter und Lastfälle vorherrschen und der maximale Netzdruck gegebenenfalls anzuheben. Der Nettonetzfluss ist im Basisszenario und in der Variation 1 relativ gering mit 5,01 kg/s und 8,72 kg/s. Dieser wurde in der Szenariovariante 2 auf 14,12 kg/s angehoben. Hier zeigt sich ein relativ niedriger Abgabedruck in Hallendorf (Salzgitter Flachstahl) von 7,21 bar bei einer Fließgeschwindigkeit von 62 m/s. Um diesem entgegenzuwirken, kann beispielsweise der Netzdruck erhöht werden oder aufgrund der lokalen Begrenzung ein Leitungszubau auf dem kurzen Stück Egenstedt-Hallendorf erfolgen. Die Netzauslastung insgesamt erscheint moderat. Allerdings ist auch hier die Datenlage seitens der Wasserstofferzeugungs- und -abnahmeprojekte kritisch zu betrachten. Darüber hinaus ist der Einfluss angeschlossener Speicher, zum Beispiel des Untergrundspeichers Epe, auf die Netzführung nur bedingt durch ein Steady-State-Modell wie das in dieser Arbeit genutzte einzufangen. Zusätzlich bestehen Pipelineenden, deren Beaufschlagung unklar ist, die jedoch einen möglichen Anschluss weitere Speicher oder Importpunkte andeuten. Um im Rahmen der gegebenen Ein- und Ausspeiseschranken ein besseres Bild über das Netzverhalten zu erlangen, wurden wie bereits erwähnt 200 Screening-Lastfälle erzeugt und durchgerechnet. Dazu wurde ein Hilfsoptimierungsproblem aufgestellt, das sicherstellt, dass zufällig gezogene Ein- und Ausspeisungen auch die Steady-State-Flussbilanz erfüllen. Bei der Screening-Rechnung wurden zunächst keine künstlichen Druckschranken angesetzt. Da alle Lastfälle übertragbar waren, die Drücke und Fließgeschwindigkeiten jedoch stark im Bereich zwischen 8 und 85 bar streuten, sowie bis zu 100 m/s Fließgeschwindigkeit auf dem Abschnitt Legden-Marl erreicht wurden, wurde eine weitere Screening-Rechnung mit einer globalen Druckunterschranke von 30 bar durchgeführt. Dies soll Maßnahmen einer Netzstabilisierung bei häufigen Lastwechseln darstellen. Eine solche Maßnahme erscheint effektiv, da die Drücke weniger streuen und die Fließgeschwindigkeiten sämtlich unter 26 m/s liegen. Erachtet man Fließgeschwindigkeiten als weniger kritisch, so lässt sich auch für einen möglichst niedrigen Betriebsdruck im Sinne der Einsparung von Verdichtungskosten argumentieren. Eine Druckminimierung im Netz mit globaler Oberschranke von 30 bar zeigt hier, dass eine Schranke von 30 bar zu eng ist, da 11 von 200 Lastfällen nicht übertragbar waren. Andererseits zeigt sich auch, dass die Fließgeschwindigkeiten mit Werten unter 80 m/s nicht zu extreme Werte annehmen. Folglich erscheint ein Maximaldruckniveau höher als 30 bar sinnvoll. Als abschließender Fall für die Screening-Rechnungen wurde eine Mindestnachfrage der industriellen Abnehmer von 80% ihrer angesetzten Abnahmeschranken betrachtet. Es ist bemerkenswert, dass es hier im Rahmen der angesetzten Ein- und Ausspeiseschranken nur sehr wenige zulässige Lastfälle zu geben scheint, die die Steady-State-Flussbilanz erfüllen. Die Betriebsbedingungen sind in diesem Fall unkritisch mit Netzdrücken jenseits der 37 bar und Fließgeschwindigkeiten kleiner 10 m/s. Die geringe Variation der Lastfälle, mit vielen Quellströmen an der jeweiligen Einspeiseoberschranke, zeigt allerdings die Wichtigkeit der Erschließung neuer Wasserstoffquellen und -speicher zur Versorgung der industriellen Großabnehmer auf.

Im Rahmen einer betreuten Masterarbeit wurden weitere Analyserechnungen für das Wasserstoffnetz gemäß dem Entwurf zum Szenariorahmen des Netzentwicklungsplan Gas 2022 der Fernnetzbetreiber durchgeführt. Hier wurde ein deutschlandweites Netz betrachtet und versucht chronologische, stündliche Lastfälle zu analysieren, die mit Hilfe eines an der Aalto-Universität entwickelten EE-Potentiale-Rechners erzeugt wurden. Eine chronologische Kopplung der Lastfälle im Rahmen einer Steady-State-Modellierung erweist sich jedoch als kompliziert und wurde letztendlich nicht durchgeführt. Trotzdem konnten drei Bottlenecks unter den betrachteten Nominierungen auf den Pipelineabschnitten Landsberg-Braschwitz, Niederkassel-Grengel und Keldenich-Niederkassel festgestellt werden.

Insgesamt erscheint ein Betrieb bei höherem Druckniveau attraktiver, wenn sich die Strömungsrichtungen im Netz häufig ändern, da die auftretenden Druckschwankungsamplituden bei Lastumkehr für den gleichen Energiefluss geringer sind, wenn das Druckniveau höher ist. Aus Sicht der Verdichtungskosten erscheinen allerdings geringere Druckniveaus vorteilhafter. Ist eine ausreichende Materialeignung gegeben, so wird dies wahrscheinlich der ausschlaggebende Faktor sein.

7.9. Szenarien H-Gasnetz

Neben den Analysen zu den initialen Wasserstoffnetzen wurde mit langfristiger Perspektive ein Blick auf die Eignung des deutschlandweiten H-Gasnetzes für den Transport von Wasserstoff geworfen. Dazu wurde ein reduziertes H-Gas-Netzmodell und Erdgas-Ein- beziehungsweise Ausspeisedaten aus einer vorangegangenen Dissertation genutzt. Die Erdgaseinspeisungen wurden energetisch zu Wasserstoffeinspeisungen umgewandelt. Zur realistischen Einlastung flächenbezogener Nachfragen auf NUTS-3-Niveau auf einzelne Netzknotenpunkte wurde ein eigenes Verfahren basierend auf einer Breitensuche in Verbindung mit der höher aufgelösten VGE-Gasnetzkarte entwickelt und genutzt. Es wurden sechs stündliche Extremlastfälle betrachtet: Die Stunde des maximalen Imports, des minimalen Imports, des maximalen Exports, des minimalen Exports, sowie des minimalen und maximalen Verbrauchs der Haushalte. Die Berechnungen fanden einmal für H-Gas und einmal für Wasserstoff statt. Das implementierte Preprocessing bzw. Bound-Strengthening war hier sehr nützlich, um einerseits eine initial unrealistische Einlastung der flächenbezogenen Nachfragen zu detektieren und andererseits einen Bottleneck, einen Pipelineabschnitt am Chiemsee, zu lokalisieren. Darüber hinaus wäre das Netz bestehend aus 1371 Knoten, 1243 Pipelines und 34 Verdichterstationen ohne das Bound-Strengthening nicht in akzeptabler Zeit rechenbar gewesen. Mit Bound-Strengthening lagen die Rechenzeiten in der Größenordnung von einigen Stunden bis zu zwei Tagen pro Lastfall. Für die Berechnung der Lastfälle wurden Knoten-Slack-Variablen eingeführt, um im Falle der Nicht-Übertragbarkeit eines Lastfalls Anhaltspunkte über die notwendige zusätzliche Ein- oder Ausspeisekapazität zu erlangen. Tatsächlich waren sechs von sechs der betrachteten Lastfälle für H-Gas und fünf von sechs für Wasserstoff übertragbar. Nicht übertragbar war der Spitzenlastfall der maximalen Haushaltsnachfrage, der gleichzeitig der Lastfall des maximalen Gasaufkommens war. Hier betrug der Knoten-Slack, d.h. die nicht übertragbare Menge, 106,7 kg/s, was durchaus eine beachtliche Menge ist. Bei den Berechnungen traten mitunter sehr hohe Fließgeschwindigkeiten auf, die den relativ weiten Druckschranken an den Knoten in Verbindung mit der Knoten-Slack-

Minimierungsformulierung geschuldet sind. Zur Erklärung: Es wurde stets mit einer unteren Druckschranke von 17 bar gerechnet. Aus numerischen Gründen kann es bei großen Netzen sein, dass die Knoten-Flussbilanz minimal nicht erfüllt ist. Daher konnte in vielen Fällen keine Zielfunktion gesetzt werden, die die Drücke im Netz maximiert, da die Minimierung des Knoten-Slacks als Zielfunktion notwendig war. Von einer Anhebung der unteren Druckschranke an allen Knoten oder an einer Auswahl wurde an dieser Stelle abgesehen, da primär die Übertragbarkeit der Lastfälle im Vordergrund stand. Es wurde jedoch beispielhaft eine einzelne Rechnung mit Druckmaximierungszielfunktion durchgeführt, die im Ergebnis auch zu niedrigen Fließgeschwindigkeiten im Netz führte. Insgesamt lässt sich auf Basis der Berechnungen - im Rahmen der Modellannahmen und angenommenen Einspeisesituation[48] - eine relativ gute Eignung des H-Gasnetzes feststellen. Dies ist in Anbetracht der sehr unterschiedlichen Gaseigenschaften von H-Gas und Wasserstoff bemerkenswert.

7.10. Abschließende Bewertung

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass die Eignung der bestehenden Netze für den Wasserstofftransport sowie der antizipierten Initialnetze grundsätzlich positiv zu bewerten ist. Die in dieser Arbeit durchgeführten Recherchen, Analysen und Modellrechnungen haben gezeigt, dass es sich mehr um Fragen der technischen und operativen Ausgestaltung sowie der Regulatorik und weniger um die Frage grundsätzlicher Tauglichkeit handelt. Gleichzeitig besteht eine Fülle an Herausforderungen, die durchaus einen Einfluss haben können, insbesondere auf die Umsetzungsgeschwindigkeit der Wasserstoffnetz-Maßnahmen, aber auch auf den wirtschaftlichen Betrieb. Das heterogene Umfeld aus unterschiedlichsten Stakeholdern mit unterschiedlichsten Kenntnisständen und Problemstellungen erschwert den Wissensaustausch und verlangsamt ultimativ den Fortschritt. Diese Arbeit sollte den LeserInnen einen guten Überblick über relevante technische Fragestellungen im Rahmen der Netzumstellung auf Wasserstoff vermitteln und all jenen als Anhaltspunkt dienen, die sich tiefer mit einzelnen Aspekten der Umstellung auseinandersetzen wollen.

[48] Stand 2015, vor der Gaskrise

I Anhang

I.1 Algorithmen zum Bound-Strengthening

`boundStrengthening`(G,P) `Algorithm 7.1 from` [70]

Data: `A gas network` $G=(V,A)$ `and a model` P `with components as stated in this chapter.`

`Initialize the vector of flow and pressure bounds` B `with initial bounds given in model` P `such that` $B_v = \left[\underline{p}_v, \overline{p}_v\right] \forall v \in V$ `and` $B_a = \left[\underline{q}_a, \overline{q}_a\right] \forall a \in A$.

`strengthenFlowBoundsDueToNetFlow`(B);

`setBoundaryFlows`(B);

while $n \neq 0$ **do**

  $n \leftarrow 0$;

  $n \leftarrow n +$ `strengthenFlowDueToPressure`(B);

  $n \leftarrow n +$ `propagateFlows`(B);

  $n \leftarrow n +$ `pressureBoundStrengthening`(B);

end

`Update bounds in` P `according to` B;

`fixBinaries`(B);

Algorithmus 7.1: Bound Strengthening: Main Loop

`strengthenFlowBoundsDueToNetFlow`(B) `Algorithm 7.3 from` [70]

Data: `The current flow and pressure bounds` B.

$F \leftarrow \sum_{v \in V_D} d_v$;

`setBoundaryFlows`(B);

foreach $a \in A$ **do**

  `strengthen`$\left(q_a, -F, F, TOL_q, B\right)$;

end

Algorithmus 7.2: Bound Strengthening: Nettofluss

`strengthen`(x_e, l, u, TOL, B) `Algorithm 7.2 from` [70]

Data: `A flow or pressure variable` x_e `corresponding to a network element` $e \in V \cup A$, `a lower bound` l `for` x_e, `an upper bound` u `for` x_e, `a tolerance` TOL `and the current set of bounds` B.

Result: `The algorithm returns the number of changed bounds.`

$[x_e^-, x_e^+] \leftarrow B_v;$

$n \leftarrow 0;$

if $[x_e^-, x_e^+] \cap [l, u] =$ **then**

  `report infeasibility;`

if $(l \geq x_e^- + TOL) or (u \leq x_e^+ - TOL)$ **then**

  $n \leftarrow n + 1;$

if $n > 0$ **then**

  $B_e \leftarrow [x_e^-, x_e^+] \cap [l, u];$

return $n;$

Algorithmus 7.3: Bound Strengthening: Intervallverschneidung

`setBoundaryFlows`(B) `Algorithm 7.4 from` [70]

Data: `The current flow and pressure bounds` B.

foreach $v \in V_{source} \cup V_{sink}$ *with* $|\delta(v)| = 1$ **do**

  `Let` a `be the single arc in` $\delta(v)$;

  if $a \in \delta^-(v)$ **then**

    `strengthen`$(q_a, d_v, d_v, TOL_q, B)$;

  else

    strengthen$(q_a, -d_v, -d_v, TOL_q, B)$;

  end

end

Algorithmus 7.4: Bound Strengthening: Aufprägung Randwerte

`propagateFlows`(B) `Algorithm 7.6 from` [70]

Data: `The current flow and pressure bounds` B.

Result: `The algorithm returns the number of changed bounds.`

$n \leftarrow 0;$

foreach $v \in V$ **do**

  foreach $a \in \delta(v)$ **do**

    $\left[\underline{Q}, \overline{Q}\right] = \sum_{a' \in \delta^-(v) \setminus \{a\}} B_{a'} - \sum_{a' \in \delta^+(v) \setminus \{a\}} B_{a'} - d_v;$

    if $a \in \delta^+(v)$ **then**

      $n \leftarrow n +$ `strengthen`$\left(q_a, \underline{Q}, \overline{Q}, TOL_q, B\right);$

    else

      $n \leftarrow n +$ `strengthen`$\left(q_a, -\underline{Q}, -\overline{Q}, TOL_q, B\right);$

    end

  end

end

Algorithmus 7.5: Bound Strengthening: Intervallarithmetische Bilanzen

`pressureBoundStrengthening`(B) `Algorithm 7.7 from` [70]

Data: `The current flow and pressure bounds` B`.`

Result: `The algorithm returns the number of changed bounds.`

$n \leftarrow 0;$

`Q.clear();`

foreach $v \in V$ **do**

  `Q.insert(`v`)`

end

while `Q.not_empty()` **do**

  $v \leftarrow$ `Q.pop();`

  foreach $a = (v, w) \in \delta(v)$ **do**

    $\left[\underline{p}_v, \overline{p}_v\right] \leftarrow B_v;$

    $\left[\underline{p}_w, \overline{p}_w\right] \leftarrow B_w;$

    $\left[\underline{q}_a, \overline{q}_a\right] \leftarrow B_a;$

    switch a **do**

      case $a \in A_p$ **do**

$n \leftarrow$ strengthenPipeInletOutletPressure(a, B, Q, n);

end

case $a \in A_{rs}^{nl}$ **do**

$n \leftarrow$ strengthenResistorInletOutletPressure(a, B, Q, n);

end

case $a \in A_{cs}$ **do**

if $\underline{q}_a > 0$ **then**

$n \leftarrow$ strengthenCompressorInletOutletPressure(a, B, Q, n);

end

end

case $a \in A_s \vee \left((a \in A_v) \wedge \left(0 \notin \left[\underline{q}_a, \overline{q}_a\right]\right)\right)$ **do**

$n \leftarrow$ strengthenShortcutAndValvePressure(a, B, Q, n);

end

case $a \in A_{rs}^{lin}$ **do**

$n \leftarrow$ strengthenLinearResistorInletOutletPressure(a, B, Q, n);

end

case $a \in A_{cv}$ **do**

if $\underline{q}_a > 0$ **then**

$n \leftarrow$ strengthenControlValveInletOutletPressure(a, B, Q, n);

end

end

end

end

end

return n;

Algorithmus 7.6: Bound Strengthening: Druckschranken

`strengthenPipeInletOutletPressure`(a, B, Q, n) `part of algorithm 7.3 from` [70]

Data: `The current flow and pressure bounds` B, `a queue` Q, `a pipeline` a `and the counter of changed bounds` n.

$n \leftarrow n +$ `strengthenPipeInletPressure`(a, B, Q);

$n \leftarrow n +$ strengthenPipeOutletPressure(a, B, Q);

return n;

Algorithmus 7.7: Subroutine: Drücke: Pipeline

strengthenResistorInletOutletPressure(a, B, Q, n) part of algorithm 7.3 from [70]

Data: The current flow and pressure bounds B, a queue Q, a nonlinear resistor a and the counter of changed bounds n.

$n \leftarrow n +$ strengthenResistorInletPressure(a, B, Q);

$n \leftarrow n +$ strengthenResistorOutletPressure(a, B, Q);

return n;

Algorithmus 7.8: Subroutine: Drücke: Widerstände

strengthenCompressorInletOutletPressure(a, B, Q, n) part of algorithm 7.3 from [70]

Data: The current flow and pressure bounds B, a queue Q, a compressor a and the counter of changed bounds n.

$n \leftarrow n +$ strengthenCompressorInletPressure(a, B, Q);

$n \leftarrow n +$ strengthenCompressorOutletPressure(a, B, Q);

return n;

Algorithmus 7.9: Subroutine: Drücke: Verdichter

strengthenShortcutAndValvePressure(a, B, Q, n) part of algorithm 7.3 from [70]

Data: The current flow and pressure bounds B, a queue Q, a shortcut or valve a and the counter of changed bounds n.

$n \leftarrow n +$ strengthen$\left(p_v, \underline{p}_w, \overline{p}_w, TOL_p, B\right)$;

$n \leftarrow n +$ strengthen$\left(p_w, \underline{p}_v, \overline{p}_v, TOL_p, B\right)$;

return n;

Algorithmus 7.10: Subroutine: Drücke: Shortcuts und Ventile

strengthenLinearResistorInletOutletPressure(a, B, Q, n) part of algorithm 7.3 from [70]

Data: The current flow and pressure bounds B, a queue Q, a linear resistor a and the counter of changed bounds n.

$n \leftarrow n +$ strengthen$\left(p_v, \underline{p}_w - \underline{\Delta}_a, \overline{p}_w - \overline{\Delta}_a, TOL_p, B\right)$;

$n \leftarrow n +$ strengthen$\left(p_w, \underline{p}_v - \overline{\Delta}_a, \overline{p}_v - \overline{\Delta}_a, TOL_p, B\right)$;

return n;

Algorithmus 7.11: Subroutine: Drücke: Lineare Widerstände

strengthenControlValveInletOutletPressure(a, B, Q, n) part of algorithm 7.3 from [70]

Data: The current flow and pressure bounds B, a queue Q, a control valve a and the counter of changed bounds n.

$n \leftarrow n +$ strengthen$\left(p_v, \underline{p}_w + \underline{\Delta}_a, \overline{p}_w + \overline{\Delta}_a, TOL_p, B\right)$;

$n \leftarrow n +$ strengthen$\left(p_w, \underline{p}_v - \overline{\Delta}_a, \overline{p}_v - \underline{\Delta}_a, TOL_p, B\right)$;

return n;

Algorithmus 7.12: Subroutine: Drücke: Druckregelventile

strengthenFlowDueToPressure(B) algorithm 7.5 from [70]

Data: The current flow and pressure bounds B.

Result: The algorithm returns the number of changed bounds.

$n \leftarrow 0$;

foreach a $= (v, w) \in A$ **do**

$\left[\underline{p}_v, \overline{p}_v\right] \leftarrow B_v$;

$\left[\underline{p}_w, \overline{p}_w\right] \leftarrow B_w$;

switch a **do**

case $a \in A_p$ **do**

$\underline{Q} \leftarrow \frac{b_a}{\Lambda_a\left(e^{b_a}-1\right)}\left(\left(\underline{p}_v\right)^2 - \left(\overline{p}_w\right)^2 e^{b_a}\right)$;

$\overline{Q} \leftarrow \frac{b_a}{\Lambda_a\left(e^{b_a}-1\right)}\left(\left(\overline{p}_v\right)^2 - \left(\underline{p}_w\right)^2 e^{b_a}\right)$;

$n \leftarrow n +$ strengthen$\left(q_a, \sigma\left(\underline{Q}\right)\sqrt{\left|\underline{Q}\right|}, \sigma\left(\overline{Q}\right)\sqrt{\left|\overline{Q}\right|}, TOL_q, B\right)$;

end

case $a \in A_{rs}^{nl}$ **do**

$\underline{Q} \leftarrow \frac{\pi^2 z_0 T_0}{16 \rho_0 p_0 z_{m,a}} \frac{D^4}{\zeta T} \left(\underline{p}_v^2 - \overline{p}_w^2 + \left| \underline{p}_v - \overline{p}_w \right| \left(\underline{p}_v - \overline{p}_w \right) \right)$;

$\overline{Q} \leftarrow \frac{\pi^2 z_0 T_0}{16 \rho_0 p_0 z_{m,a}} \frac{D^4}{\zeta T} \left(\overline{p}_v^2 - \underline{p}_w^2 + \left| \overline{p}_v - \underline{p}_w \right| \left(\overline{p}_v - \underline{p}_w \right) \right)$;

end

case $a \in A_v$ **do**

if $\left[\underline{p}_v, \overline{p}_v \right] \cap \left[\underline{p}_w, \overline{p}_w \right] = \emptyset$ **then**

$n \leftarrow n + \text{strengthen}(q_a, 0, 0, TOL_q, B)$;

end

end

case a $\in A_{cv}$ **do**

if $\left[\underline{p}_v + \underline{\Delta p}_a, \overline{p}_v + \overline{\Delta p}_a \right] \cap \left[\underline{p}_{v\underline{\epsilon}_a}, \overline{p}_{v\overline{\epsilon}_a} \right] \cap \left[\underline{p}_w, \overline{p}_w \right] = \emptyset$ **then**

$n \leftarrow n + \text{strengthen}(q_a, 0, 0, TOL_q, B)$;

end

end

case a $\in A_{cs}$ **do**

if $\left[\underline{p}_v + \underline{\Delta p}_a, \overline{p}_v + \overline{\Delta p}_a \right] \cap \left[\underline{p}_{v\underline{\epsilon}_a}, \overline{p}_{v\overline{\epsilon}_a} \right] \cap \left[\underline{p}_w, \overline{p}_w \right] = \emptyset$ **then**

$n \leftarrow n + \text{strengthen}(q_a, 0, 0, TOL_q, B)$;

else if $\underline{q}_a \geq TOL_q$ **then**

$\underline{Q} \leftarrow \frac{\kappa - 1}{\kappa} \frac{\eta_{ad,a} M}{\rho_0 R T z_{m,v}} \underline{P}_a \left(\left(\frac{\overline{p}_w}{\underline{p}_v} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right)^{-1}$;

$\overline{Q} \leftarrow \frac{\kappa - 1}{\kappa} \frac{\eta_{ad,a} M}{\rho_0 R T z_{m,v}} \overline{P}_a \left(\left(\frac{\underline{p}_w}{\overline{p}_v} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right)^{-1}$;

$n \leftarrow n + \text{strengthen}\left(q_a, \underline{Q}, \overline{Q}, TOL_q, B \right)$;

end

end

end

end

return n;

Algorithmus 7.13: Bound Strengthening: Flüsse

`strengthenPipeInletPressure`(a, B, Q, n) `part of algorithm` Algorithmus 7.6

Data: `The current flow and pressure bounds` B, `a queue` Q, `a pipeline` $a = (v, w)$ `and the counter of changed bounds` n.

Result: `The algorithm returns the number of changed bounds.`

$\left[\underline{p}_w, \overline{p}_w\right] \leftarrow B_w$;

$\left[\underline{q}_a, \overline{q}_a\right] \leftarrow B_a$;

$\underline{P}_v \leftarrow \sqrt{\left(\underline{p}_w\right)^2 + \max\{-\left(\underline{p}_w\right)^2, \Lambda_a |\overline{q}_a| \overline{q}_a \frac{e^{b_a - 1}}{b_a}\}}$;

$\overline{P}_v \leftarrow \sqrt{\left(\overline{p}_w\right)^2 + \max\{-\left(\overline{p}_w\right)^2, \Lambda_a \left|\underline{q}_a\right| \underline{q}_a \frac{e^{b_a - 1}}{b_a}\}}$;

$n \leftarrow \text{strengthen}\left(p_v, \underline{P}_v, \overline{P}_v, TOL_p, B\right)$;

if $n > 0$ **then**

  `Q.insert`(v);

end

return n;

Algorithmus 7.14: Subroutine: Drücke: Pipeline-Einlass

`strengthenPipeOutletPressure`(a, B, Q, n) `part of algorithm` Algorithmus 7.6

Data: `The current flow and pressure bounds` B, `a queue` Q, `a pipeline` $a = (v, w)$ `and the counter of changed bounds` n.

Result: `The algorithm returns the number of changed bounds.`

$\left[\underline{p}_v, \overline{p}_v\right] \leftarrow B_v$;

$\left[\underline{q}_a, \overline{q}_a\right] \leftarrow B_a$;

$\underline{P}_w \leftarrow \sqrt{\left(\underline{p}_v\right)^2 - \min\{\left(\underline{p}_v\right)^2, \Lambda_a |\overline{q}_a| \overline{q}_a \frac{e^{b_a - 1}}{b_a}\}}$;

$\overline{P}_w \leftarrow \sqrt{\left(\overline{p}_v\right)^2 - \min\{\left(\overline{p}_v\right)^2, \Lambda_a \left|\underline{q}_a\right| \underline{q}_a \frac{e^{b_a - 1}}{b_a}\}}$;

$n \leftarrow \text{strengthen}\left(p_w, \underline{P}_w, \overline{P}_w, TOL_p, B\right)$;

if $n > 0$ **then**

  `Q.insert`(v);

end

return n;

Algorithmus 7.15: Subroutine: Drücke: Pipeline-Auslass

`strengthenResistorInletPressure`(a, B, Q, n) `part of algorithm` Algorithmus 7.6

Data: `The current flow and pressure bounds` B, `a queue` Q, `a resistor` $a = (v, w)$ `and the counter of changed bounds` n.

Result: `The algorithm returns the number of changed bounds.`

$n \leftarrow 0$;

$\left[\underline{p}_w, \overline{p}_w\right] \leftarrow B_w$;

$\left[\underline{q}_a, \overline{q}_a\right] \leftarrow B_a$;

$\underline{P}_v \leftarrow \frac{\underline{p}_w}{2} + \sqrt{\left(\frac{\underline{p}_w}{2}\right)^2 + \frac{8\rho_0 p_0}{\pi^2 z_0 T_0} \frac{\zeta T z_{m,a}}{D_a^4} \left(\underline{q}_a\right)^2}$;

$\overline{P}_v \leftarrow \frac{\overline{p}_w}{2} + \sqrt{\left(\frac{\overline{p}_w}{2}\right)^2 + \frac{8\rho_0 p_0}{\pi^2 z_0 T_0} \frac{\zeta T z_{m,a}}{D_a^4} \left(\overline{q}_a\right)^2}$;

$\underline{Q}_v \leftarrow \underline{p}_w - \frac{8\rho_0 p_0}{\pi^2 z_0 T_0} \frac{\zeta T z_{m,a}}{D^4} \frac{\left(\overline{q}_a\right)^2}{\underline{p}_w}$;

$\overline{Q}_v \leftarrow \overline{p}_w - \frac{8\rho_0 p_0}{\pi^2 z_0 T_0} \frac{\zeta T z_{m,a}}{D^4} \frac{\left(\underline{q}_a\right)^2}{\overline{p}_w}$;

if $\underline{q}_a \geq 0$ **then**

  $n \leftarrow n +$ `strengthen`$\left(p_v, \underline{P}_v, \overline{P}_v, TOL_p, B\right)$;

else if $\overline{q}_a \leq 0$ **then**

  $n \leftarrow n +$ strengthen$\left(p_v, \underline{Q}_v, \overline{Q}_v, TOL_p, B\right)$;

else

  $n \leftarrow n +$ strengthen$\left(p_v, \underline{Q}_v, \overline{P}_v, TOL_p, B\right)$;

end

if $n > 0$ **then**

  `Q.insert`(v);

end

return n;

Algorithmus 7.16: Subroutine: Drücke: Widerstände: Einlass

`strengthenResistorOutletPressure`(a, B, Q, n) `part of algorithm` Algorithmus 7.6

Data: `The current flow and pressure bounds` B, `a queue` Q, `a resistor` $a = (v, w)$ `and the counter of changed bounds` n.

Result: `The algorithm returns the number of changed bounds.`

$n \leftarrow 0;$

$\left[\underline{p}_v, \overline{p}_v\right] \leftarrow B_v;$

$\left[\underline{q}_a, \overline{q}_a\right] \leftarrow B_a;$

$\underline{P}_w \leftarrow \underline{p}_v - \frac{8\rho_0 p_0}{\pi^2 z_0 T_0} \frac{\zeta T z_{m,a}}{D_a^4} \frac{\left(\overline{q}_a\right)^2}{\underline{p}_v};$

$\overline{P}_w \leftarrow \overline{p}_v - \frac{8\rho_0 p_0}{\pi^2 z_0 T_0} \frac{\zeta T z_{m,a}}{D_a^4} \frac{\left(\underline{q}_a\right)^2}{\overline{p}_v};$

$\underline{Q}_w \leftarrow \frac{\underline{p}_v}{2} + \sqrt{\left(\frac{\underline{p}_v}{2}\right)^2 + \frac{8\rho_0 p_0}{\pi^2 z_0 T_0} \frac{\zeta T z_{m,a}}{D_a^4} \left(\underline{q}_a\right)^2};$

$\overline{Q}_w \leftarrow \frac{\overline{p}_v}{2} + \sqrt{\left(\frac{\overline{p}_v}{2}\right)^2 + \frac{8\rho_0 p_0}{\pi^2 z_0 T_0} \frac{\zeta T z_{m,a}}{D_a^4} \left(\overline{q}_a\right)^2};$

if $\underline{q}_a \geq 0$ **then**

  $n \leftarrow n + \text{strengthen}\left(p_w, \underline{P}_w, \overline{P}_w, TOL_p, B\right);$

else if $\overline{q}_a \leq 0$ **then**

  $n \leftarrow n + \text{strengthen}\left(p_w, \underline{Q}_w, \overline{Q}_w, TOL_p, B\right);$

else

  $n \leftarrow n + \text{strengthen}\left(p_w, \underline{P}_w, \overline{Q}_w, TOL_p, B\right);$

end

if $n > 0$ **then**

  `Q.insert`(v);

end

return n;

Algorithmus 7.17: Subroutine: Drücke: Widerstände: Auslass

`strengthenCompressorInletPressure`(a, B, Q, n) `part of algorithm` Algorithmus 7.6

Data: The current flow and pressure bounds B, a queue Q, a a compressor $a = (v, w)$ and the counter of changed bounds n.

Result: The algorithm returns the number of changed bounds.

$\left[\underline{p}_w, \overline{p}_w\right] \leftarrow B_w$;

$\left[\underline{q}_a, \overline{q}_a\right] \leftarrow B_a$;

$\underline{X} \leftarrow \max\{\underline{p}_w \left(\frac{\underline{P}_a}{\frac{\kappa}{\kappa-1}\frac{\rho_0 RTz_{m,v}}{\eta_{ad,a} M}\overline{q}_a} + 1\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}, \underline{p}_w - \overline{\Delta p}_a, \frac{\underline{p}_w}{\overline{\epsilon}_a}\}$;

$\overline{X} \leftarrow \min\{\overline{p}_w \left(\frac{\overline{P}_a}{\frac{\kappa}{\kappa-1}\frac{\rho_0 RTz_{m,v}}{\eta_{ad,a} M}\underline{q}_a} + 1\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}, \overline{p}_w - \underline{\Delta p}_a, \frac{\overline{p}_w}{\underline{\epsilon}_a}\}$;

$n \leftarrow \text{strengthen}(p_v, \underline{X}, \overline{X}, TOL_p, B)$;

if $n > 0$ **then**

  Q.insert(v);

end

return n;

Algorithmus 7.18: Subroutine: Drücke: Kompressoren: Einlass

strengthenCompressorOutletPressure(a, B, Q, n) part of algorithm Algorithmus 7.6

Data: The current flow and pressure bounds B, a queue Q, a a compressor $a = (v, w)$ and the counter of changed bounds n.

Result: The algorithm returns the number of changed bounds.

$\left[\underline{p}_v, \overline{p}_v\right] \leftarrow B_v$;

$\left[\underline{q}_a, \overline{q}_a\right] \leftarrow B_a$;

$\underline{X} \leftarrow \max\{\underline{p}_v \left(\frac{\overline{P}_a}{\frac{\kappa}{\kappa-1}\frac{\rho_0 RTz_{m,v}}{\eta_{ad,a} M}\underline{q}_a} + 1\right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}, \underline{p}_v + \underline{\Delta p}_a, \underline{p}_{v\underline{\epsilon}_a}\}$;

$\overline{X} \leftarrow \min\{\overline{p}_v \left(\frac{\underline{P}_a}{\frac{\kappa}{\kappa-1}\frac{\rho_0 RTz_{m,v}}{\eta_{ad,a} M}\overline{q}_a} + 1\right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}, \overline{p}_v + \overline{\Delta p}_a, \overline{p}_{v\overline{\epsilon}_a}\}$;

$n \leftarrow \text{strengthen}(p_w, \underline{X}, \overline{X}, TOL_p, B)$;

if $n > 0$ **then**

  Q.insert(v);

end

return n;

Algorithmus 7.19: Subroutine: Drücke: Kompressoren: Auslass

`fixBinaries(`B`) part of algorithm 7.3 from` [70]

Data: `The current flow and pressure bounds` B.

foreach $a = (v, w) \in A_v \cup A_{cv} \cup A_{cs}$ **do**

  if $0 \notin \left[\underline{q}_a, \overline{q}_a\right]$ **then**

    $s_a \leftarrow 1$;

  else if $\left[\underline{q}_a, \overline{q}_a\right] = \{0\}$ **then**

    $s_a \leftarrow 0$;

  else

    if $a \in A_v$ **then**

      if $\left[\underline{p}_v, \overline{p}_v\right] \cap \left[\underline{p}_w, \overline{p}_w\right] = \emptyset$ **then**

        $s_a \leftarrow 0$;

      end

    if $a \in A_{cv}$ **then**

      if $\left[\underline{p}_v - \overline{\Delta}_a, \overline{p}_v - \overline{\Delta}_a\right] \cap \left[\underline{p}_w, \overline{p}_w\right] = \emptyset$ **then**

        $s_a \leftarrow 0$;

      end

    if $a \in A_{cs}$ **then**

      if $\left[\underline{p}_v + \underline{\Delta p}_a, \overline{p}_v + \overline{\Delta p}_a\right] \cap \left[\underline{p}_{v\underline{\epsilon}_a}, \overline{p}_{v\overline{\epsilon}_a}\right] \cap \left[\underline{p}_w, \overline{p}_w\right] = \emptyset$ **then**

        $s_a \leftarrow 0$;

      end

    end

  end

end

foreach $a = (v, w) \in A_{rs}$ **do**

  if $\underline{q}_a \geq 0 \vee \overline{p}_w < \underline{p}_v$ **then**

    $d_a \leftarrow 0$;

```
        else if  q̄_a ≤ 0 ∨ p̄_v < p_w  then
            d_a ← 1;
        End
    End
    fixConfigurations();
    fixCombinedDecisions();
```

Algorithmus 7.20: Bound Strengthening: Fixierung ganzzahliger Variablen

```
fixConfigurations() part of algorithm 7.3 from [70]
```

```
    foreach S ∈ S_cs  do
        foreach Configuration C of S  do
            if  ∃a ∈ A(C)  with  s_a = 0 ∧ ∃a' ∈ A(C)  with  s_a' = 1  then
                report infeasibility;
            Else
                if  ∃a ∈ A(C)  with  s_a = 0  then
                    s_C ← 0;
                    s_a' ← 0 ∀a' ∈ A(C);
                end
                if  ∃a ∈ A(C)  with  s_a = 1  then
                    s_C ← 1;
                    s_a' ← 1 ∀a' ∈ A(C);
                    foreach ConfigurationC' ≠ CofS  do
                        s_C' ← 0;
                        s_a' ← 0 ∀a' ∈ A(C');
                    end
                End
            End
        End
    End
```

Algorithmus 7.21: Bound Strengthening: Fixierung Konfigurationen

`fixCombinedDecisions() part of algorithm 7.3 from` [70]

foreach $D \in \mathcal{D}$ **do**
  foreach $i = 1, \dots, k_D$ **do**
    if $s_{n_i} = 0$ **then**
      $b_j^D \leftarrow 0 \forall j \in N_1^D(i);$
    end
    if $s_{n_i} = 1$ **then**
      $b_j^D \leftarrow 0 \forall j \in N_0^D(i);$
    end
  if $b_j^D = 0 \forall j \in \{1, \dots, l_D\}$ **then**
    `report infeasibility;`
  end
end

Algorithmus 7.22: Bound Strengthening: Fixierung Fernkopplung

I.2 Farben des Wasserstoffs

Tabelle 5.2.3.1: Die Farben des Wasserstoffs [153].

Farbe	Bedeutung/ Herkunft	Vorteile	Nachteile
grün	Wasser-Elektrolyse mittels erneuerbaren Stroms	speicherbar, THG-neutral, hohe Reinheit	volatile Erzeugung, da an EE-Verfügbarkeit gekoppelt, kaum Infrastruktur oder großskalige Erzeugung vorhanden
blau	Dampf-Reformierung von Erdgas mit anschließender CO_2-Abscheidung zur Wiederverwertung (Carbon Capture and Utilization) oder Endlagerung (Carbon Capture and Storage)	etablierte, großskalige Prozesse können genutzt werden	Problem der Endlagerung und damit verknüpfter Risiken, lediglich verlängerte Nutzung endlicher Ressourcen
grau	Dampf-Reformierung von Erdgas	etablierter großskaliger Prozess	hohe prozess-bedingte CO_2-Emissionen, daher nicht nachhaltig
türkis	Pyrolyse von Erdgas zu Wasserstoff und Feststoff-Kohlenstoff	vereinfachte Lagerung/ Handhabung des Feststoff-Kohlenstoffs	geringe Technologiereife, lediglich verlängerte Nutzung endlicher Ressourcen
violett, gelb, rot	unter Nutzung von Atomstrom/ Atom-Strommix durch Wasser-Elektrolyse hergestellt	einfache Umsetzung	nicht nachhaltig, in Anbetracht des Atomausstiegs irrelevant für Deutschland
braun	Kohlevergasung, Produkt vergleichbar mit grauem Wasserstoff	(alter) etablierter Prozess	hohe prozess-bedingte CO_2-Emissionen, daher nicht nachhaltig
weiß	Nebenprodukt aus bestehenden Prozessen	ggfs. CO_2-neutral	nur als gekoppeltes Nebenprodukt erhältlich
orange	Erzeugung über Biomasse resp. Strom aus Müllheizkraftwerken	Nutzung vorhandener Ressourcen	Größe beschränkt durch Ressourcenverfügbarkeit, nicht THG-neutral

I.3 Beispiel einer Ausbaumaßnahme in der FNB-Gas Datenbank

Detailansicht zur Ausbaumaßnahme 720-01 (2020 - NEP Bestätigt)

Hauptstammdaten der Ausbaumaßnahme

Kürzel:	720	Maßnahmenart:	Leitung
Versionsnummer:	01	Netzgebiete:	GUD
Geplante Länge:	108,5 km	Bundesländer:	Niedersachsen
Nenndurchmesser (DN):	1.000 mm		
Druckstufe (DP):	38 bar		
Verdichterzusammensetzung:	-		
Gesamte Verdichterleistung:	-		
Anlagenleistung:	-		
Sonstiges:	-		

Kartendarstellung



Name der Ausbaumaßnahme

Umstellung Leitungssystem Barßel-Rheine

Beschreibung

Das Leitungssystem Barßel-Rheine wird derzeit für den Transport von Erdgas verwendet und kann für einen potenziellen zukünftigen Wasserstofftransport umgestellt werden.

Gasart

Wasserstoff

Abbildung 5.2.3.1: Beispiel einer Ausbaumaßnahme in der FNB-Gas Datenbank, Teil 1

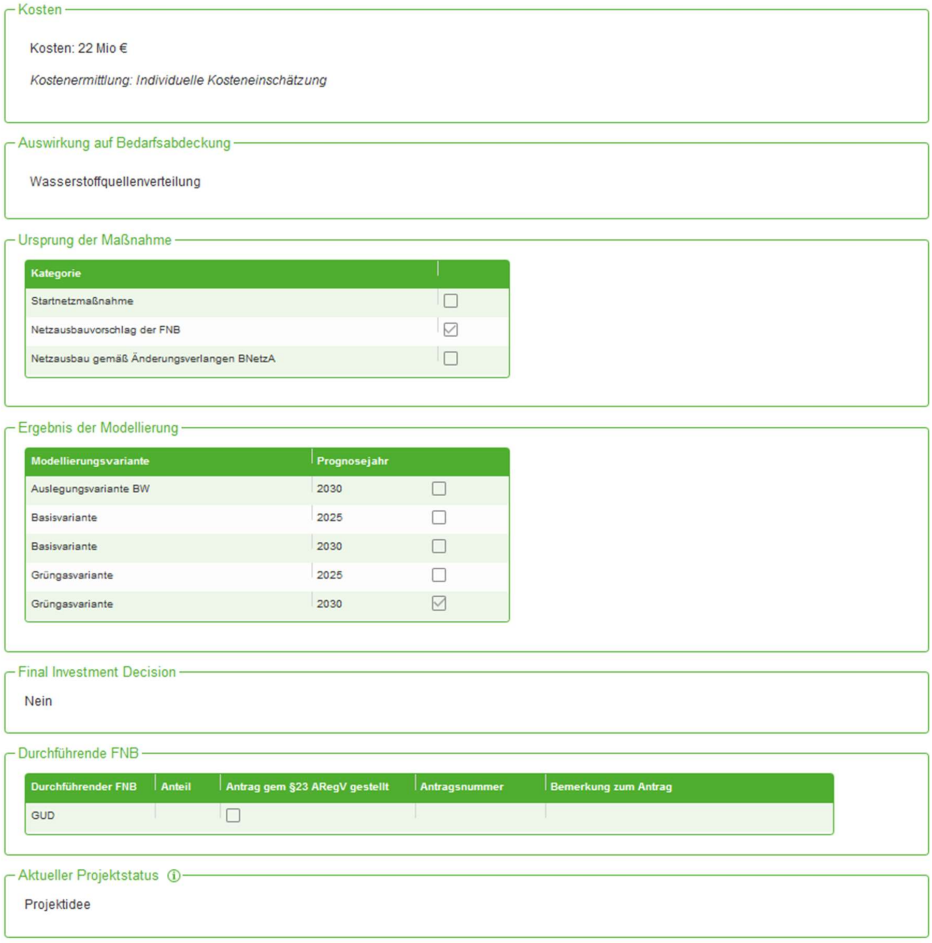


Abbildung 5.2.3.2: Beispiel einer Ausbaumaßnahme in der FNB-Gas Datenbank, Teil 2

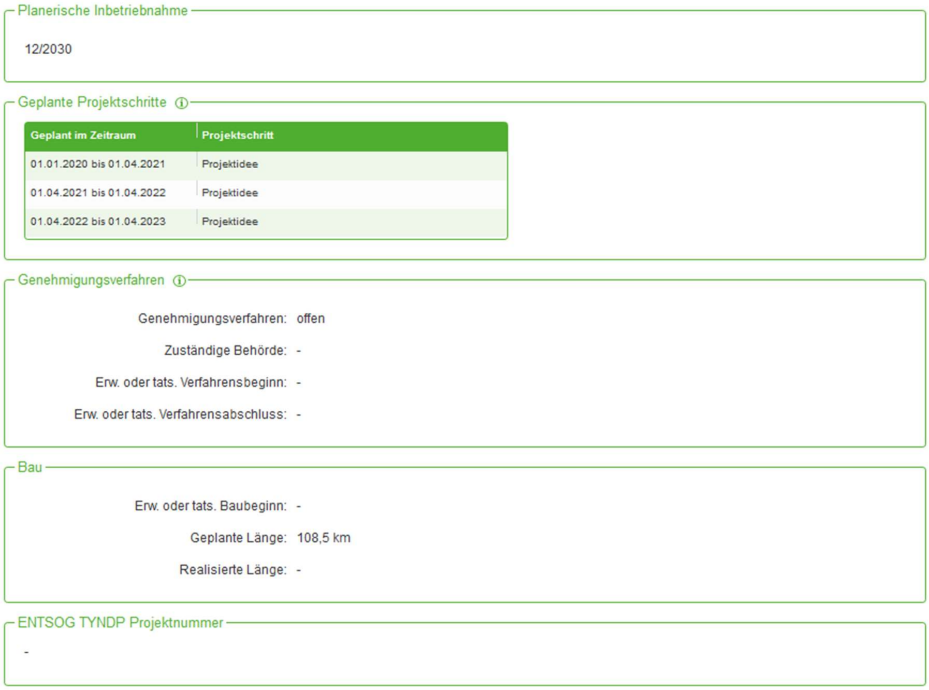


Abbildung 5.2.3.3: Beispiel einer Ausbaumaßnahme in der FNB-Gas Datenbank, Teil 3

I.4 Semi-zufällige Lastfallerzeugung – Optimierungsproblem

$$\min_{\mathbf{u}} \sum_{\mathbf{i}\in\mathbf{L}} \mathbf{u}_{\mathbf{1i}}^{+} + \mathbf{u}_{\mathbf{1i}}^{-} + \mathbf{u}_{\mathbf{2i}}^{+} + \mathbf{u}_{\mathbf{2i}}^{-} \qquad \textit{Gl. 7.1}$$

$$\underline{\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{i}}}^{+} \leq \boldsymbol{x}_{\boldsymbol{i}}^{+} \leq \overline{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i}}^{+} \forall \boldsymbol{i} \in \boldsymbol{L}, \qquad \textit{Gl. 7.2}$$

$$\underline{\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{i}}}^{-} \leq \boldsymbol{x}_{\boldsymbol{i}}^{-} \leq \overline{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i}}^{-} \forall \boldsymbol{i} \in \boldsymbol{L}, \qquad \textit{Gl. 7.3}$$

$$\boldsymbol{u}_{\boldsymbol{1i}}^{+}, \boldsymbol{u}_{\boldsymbol{1i}}^{-}, \boldsymbol{u}_{\boldsymbol{2i}}^{+}, \boldsymbol{u}_{\boldsymbol{2i}}^{-} \in \boldsymbol{R}_{\boldsymbol{0}}^{+} \forall \boldsymbol{i} \in \boldsymbol{L}, \qquad \textit{Gl. 7.4}$$

$$\boldsymbol{y}_{\boldsymbol{i}} \in \boldsymbol{B} \forall \boldsymbol{i} \in \boldsymbol{L}, \qquad \textit{Gl. 7.5}$$

$$\sum_{\boldsymbol{i}\in\boldsymbol{L}} \boldsymbol{x}_{\boldsymbol{i}}^{+} + \boldsymbol{x}_{\boldsymbol{i}}^{-} = \mathbf{0}, \qquad \textit{Gl. 7.6}$$

$$\sum_{\boldsymbol{j}\in\boldsymbol{C}_{\boldsymbol{i}}} \boldsymbol{x}_{\boldsymbol{j}}^{+} + \boldsymbol{x}_{\boldsymbol{j}}^{-} = \mathbf{0}, \forall \boldsymbol{i} \in \boldsymbol{N}_{\boldsymbol{C}}, \qquad \textit{Gl. 7.7}$$

$$\boldsymbol{u}_{\boldsymbol{1i}}^{+} - \boldsymbol{u}_{\boldsymbol{2i}}^{+} = \boldsymbol{x}_{\boldsymbol{i}}^{+} - \boldsymbol{d}_{\boldsymbol{i}} \forall \boldsymbol{i} \in \boldsymbol{L}, \qquad \textit{Gl. 7.8}$$

$$\boldsymbol{u}_{\boldsymbol{1i}}^{-} - \boldsymbol{u}_{\boldsymbol{2i}}^{-} = \boldsymbol{x}_{\boldsymbol{i}}^{-} - \boldsymbol{d}_{\boldsymbol{i}} \forall \boldsymbol{i} \in \boldsymbol{L}, \qquad \textit{Gl. 7.9}$$

$$\sum_{\boldsymbol{j}\in\boldsymbol{E}_{\boldsymbol{i}}} \boldsymbol{x}_{\boldsymbol{j}}^{+} \leq \boldsymbol{k}_{\boldsymbol{i}}, \forall \boldsymbol{i} \in \boldsymbol{N}_{\boldsymbol{E}}, \qquad \textit{Gl. 7.10}$$

$$\underline{\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{i}}}^{-} \boldsymbol{y}_{\boldsymbol{i}} \leq \boldsymbol{x}_{\boldsymbol{i}}^{-} \leq \overline{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i}}^{-} \boldsymbol{y}_{\boldsymbol{i}} \forall \boldsymbol{i} \in \boldsymbol{L}, \qquad \textit{Gl. 7.11}$$

$$\underline{\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{i}}}^{+} (\mathbf{1} - \boldsymbol{y}_{\boldsymbol{i}}) \leq \boldsymbol{x}_{\boldsymbol{i}}^{+} \leq \overline{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i}}^{+} (\mathbf{1} - \boldsymbol{y}_{\boldsymbol{i}}) \forall \boldsymbol{i} \in \boldsymbol{L} \qquad \textit{Gl. 7.12}$$

Die Menge der Ein-/Ausspeiseorte wird mit L bezeichnet, die Menge der Cluster des Netzwerks für die eine Nullsumme garantiert werden soll mit N_C und die Cluster selbst mit C_i. Darüber hinaus existieren gemeinsame Einspeiseoberschranken k_i für die Summe der Einspeisungen aus Einspeiseknoten in $E_i, i \in N_E$. Dies kann insbesondere praktisch sein, wenn sich eine Quelle zu unbestimmten Anteilen auf mehrere Einspeisepunkte aufteilt.

Für jeden Ein- (+) und Ausspeise- (-) Knoten wird eine Lastflussvariable x_i^+ respektive x_i^- eingeführt, die, durch die jeweiligen Intervallschranken für die Ein- ($\underline{x_i}^+$,$\overline{x_i}^+$) und Ausspeisung ($\underline{x_i}^-$, $\overline{x_i}^-$) an diesem Knoten, beschränkt ist. Da eine gleichzeitige Ein- und Ausspeisung an dem gleichen Ein-/Ausspeiseort hier unzulässig ist, wird jeweils eine Binärvariable y_i zur Erfassung dieser Entscheidung eingeführt. Der Lastfallkandidat am Ort i wird mit d_i bezeichnet. Zur Darstellung der betragsmäßigen Abweichung zwischen einem Kandidaten und tatsächlichem Lastfall, werden darüber hinaus Hilfsvariablen u_{1i}^+, u_{1i}^-, u_{2i}^+, u_{2i}^- eingeführt.

I.5 Gesamt-/Detailansichten: Zuordnung fein aufgelöster Netzknoten zu Einlastungsknoten des reduzierten Netzwerks.

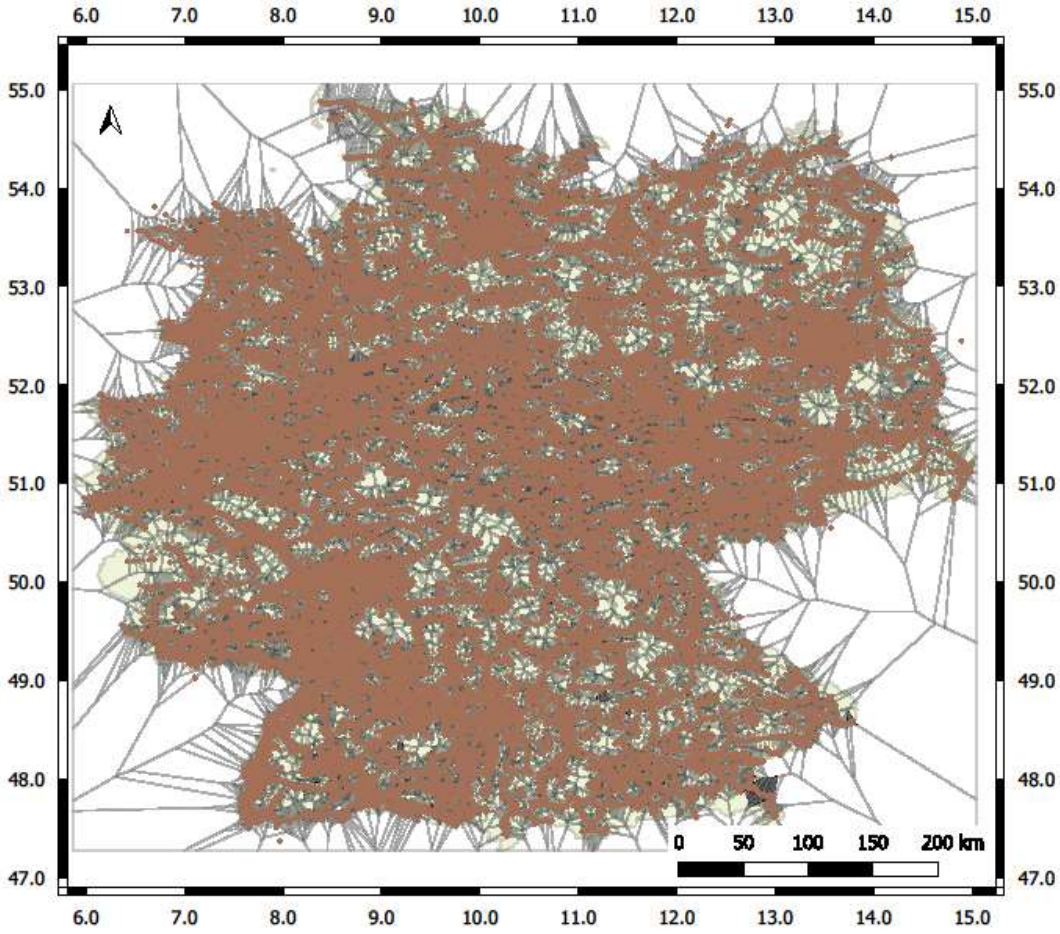


Abbildung 5.2.3.1: Voronoi-Polygone um die Knoten des fein aufgelösten Netzwerks.

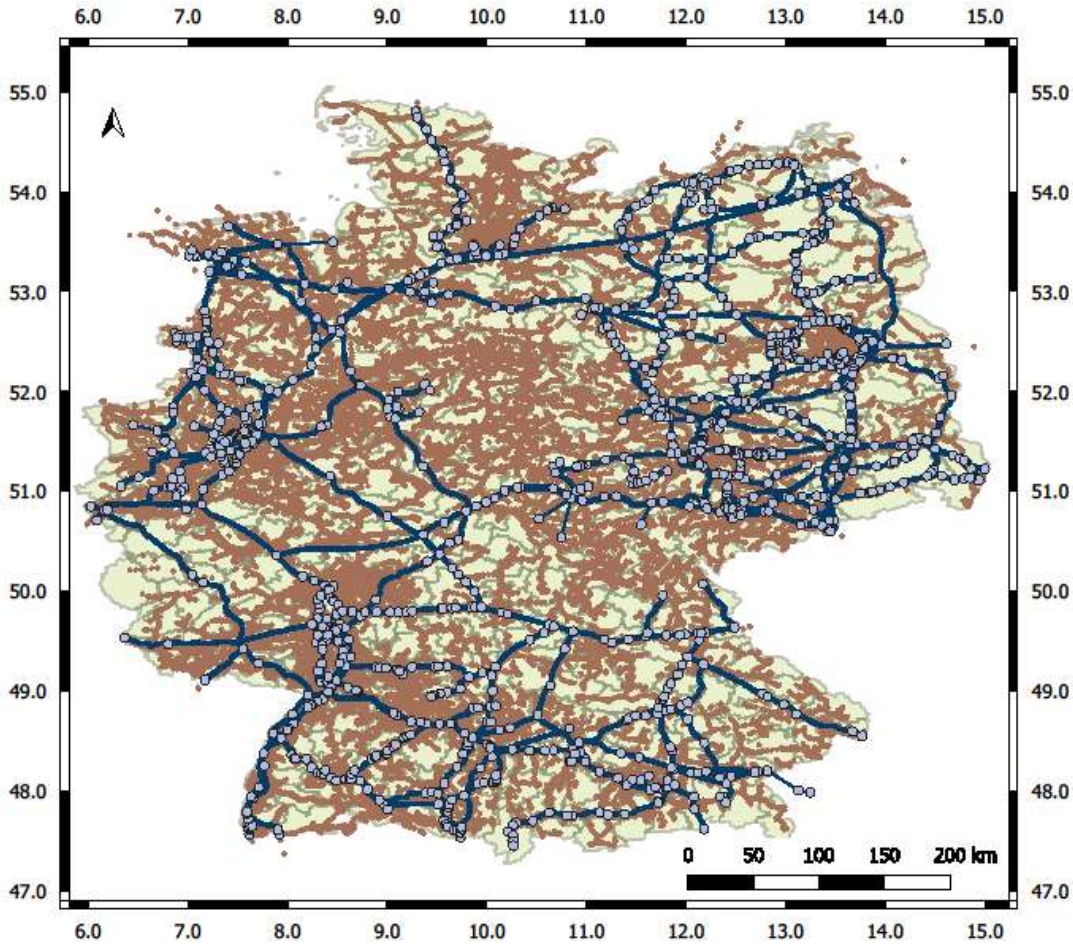


Abbildung 5.2.3.2: Knoten des reduzierten Netzwerks in Relation zu den fein aufgelösten Netzknoten im Hintergrund.

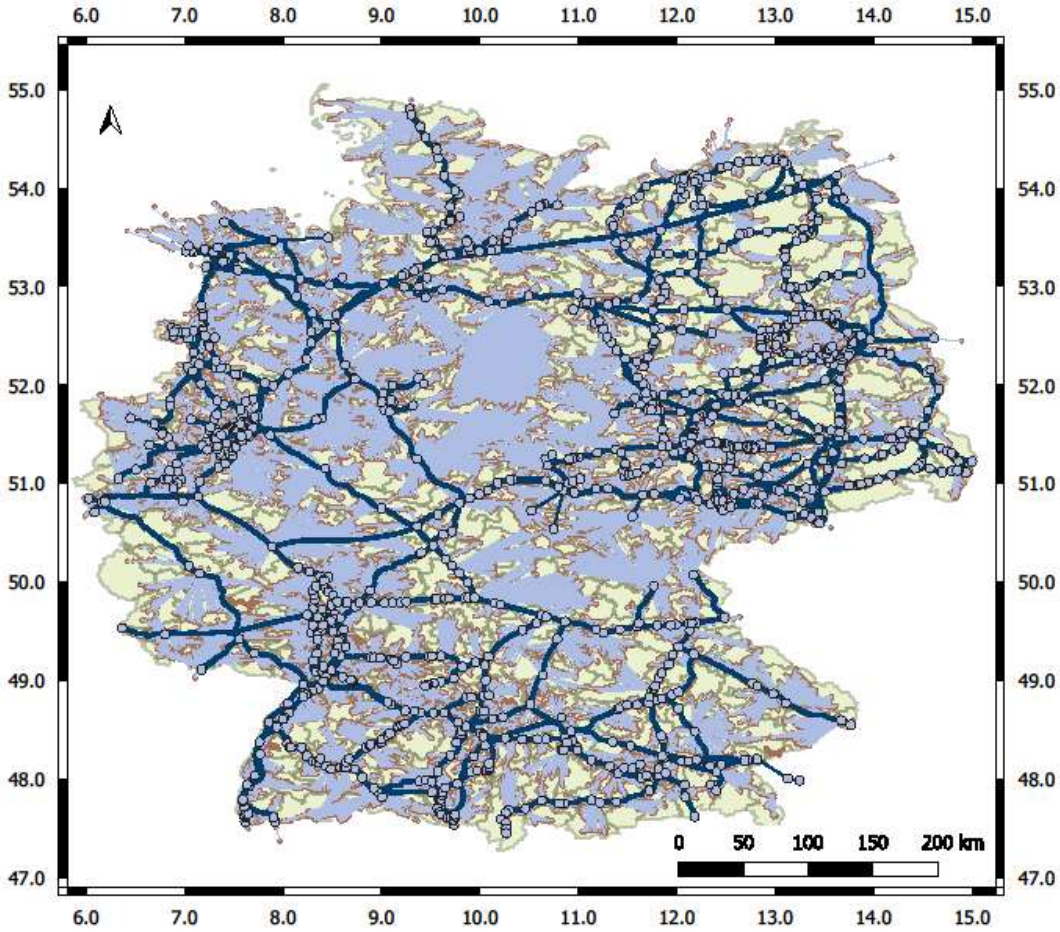


Abbildung 5.2.3.3: Zuweisung der Knoten des fein aufgelösten Netzwerks zu den Knoten des reduzierten Netzwerks.

I.6 Verwendete Sektorzeitreihen für Deutschland im Jahr 2015.

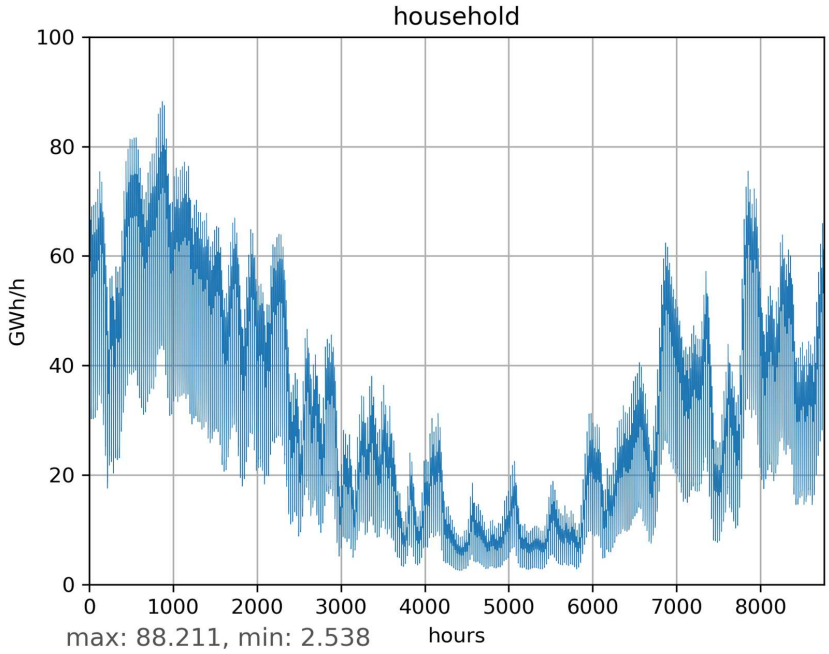


Abbildung 5.2.3.1: Sektorzeitreihe: Energienachfrage Haushalt

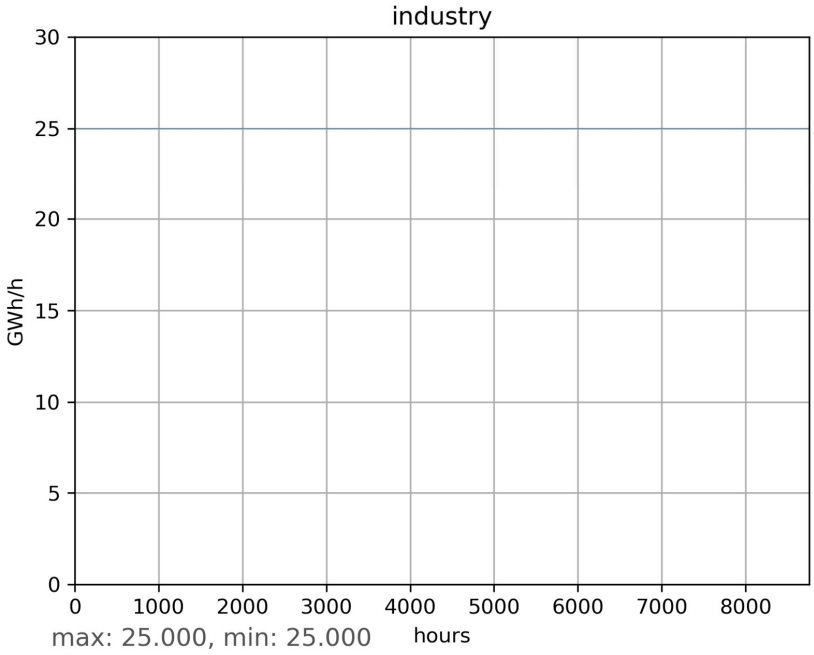


Abbildung 5.2.3.2: Sektorzeitreihe: Nachfrage Industrie (konstant bei 25 GWh/h)

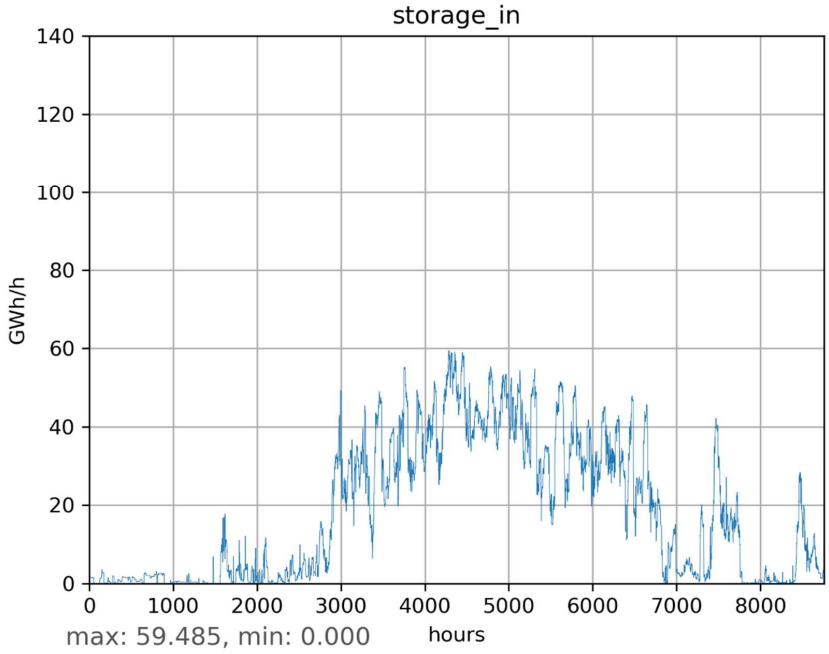


Abbildung 5.2.3.3: Sektorzeitreihe: Einspeicherung in Gasspeicher

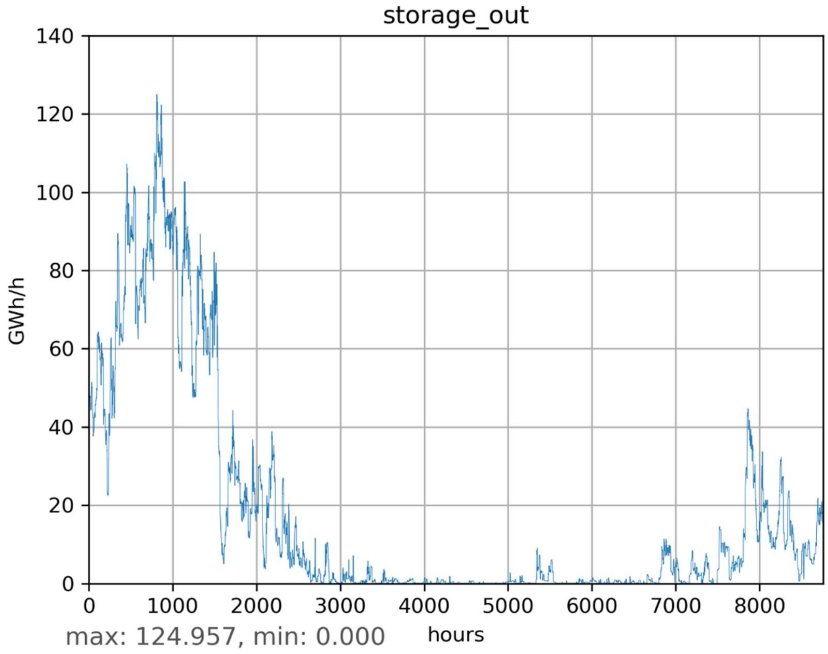


Abbildung 5.2.3.4: Sektorzeitreihe: Ausspeicherung aus Gasspeichern

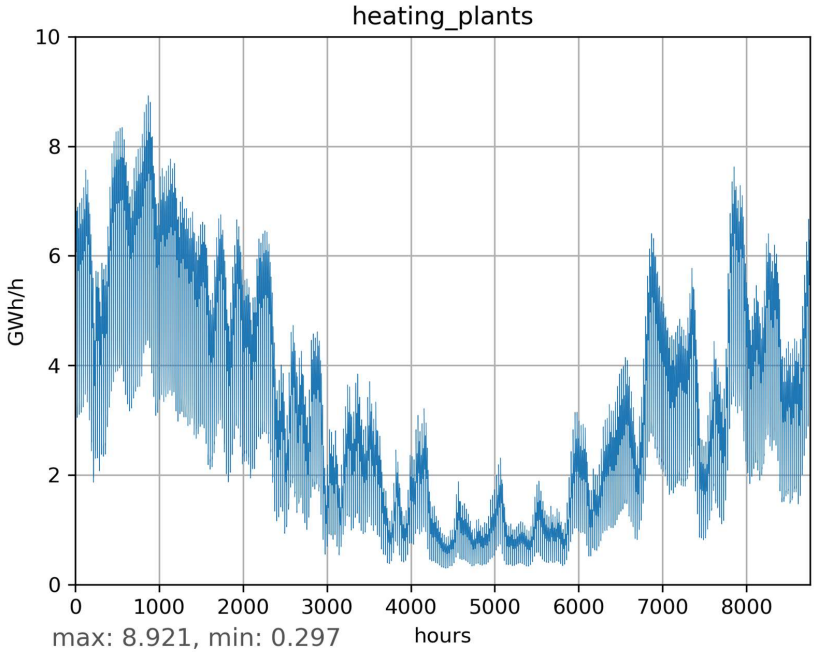


Abbildung 5.2.3.5: Sektorzeitreihe: Wärmekraftwerke

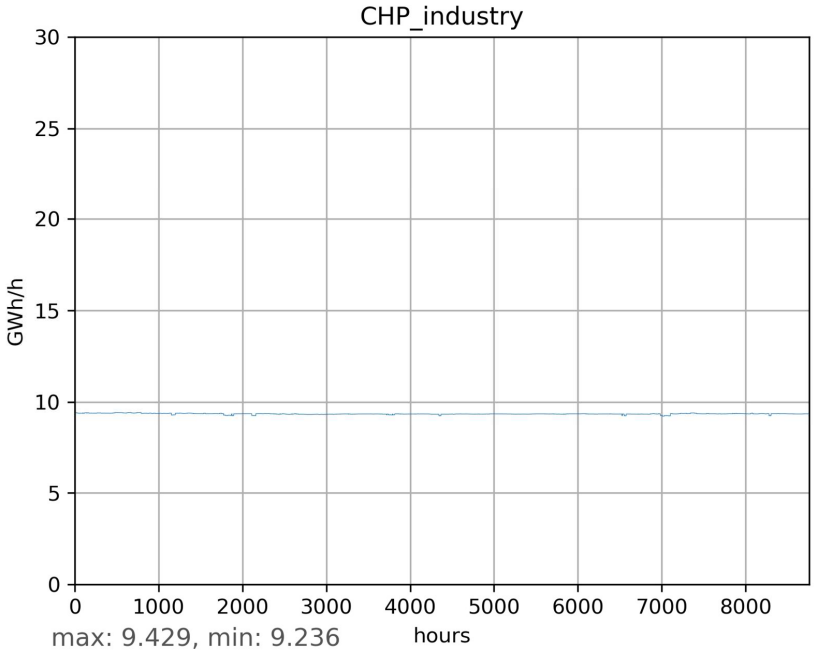


Abbildung 5.2.3.6: Sektorzeitreihe: Industrielle Kraft-Wärme-Kopplung (quasi-konstant)

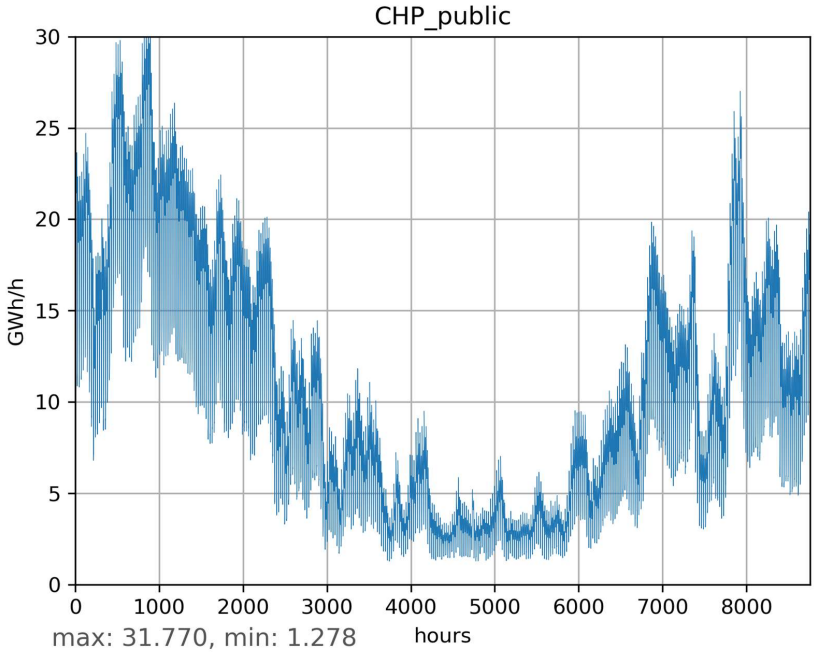


Abbildung 5.2.3.7: Sektorzeitreihe: Öffentliche Kraft-Wärme-Kopplung

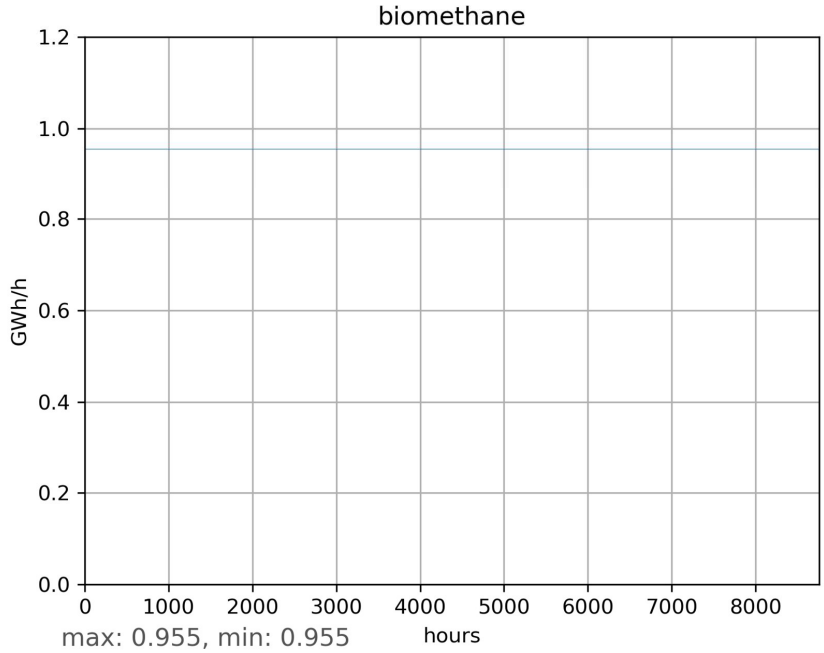


Abbildung 5.2.3.8: Sektorzeitreihe: Bio-Methan-Erzeugung

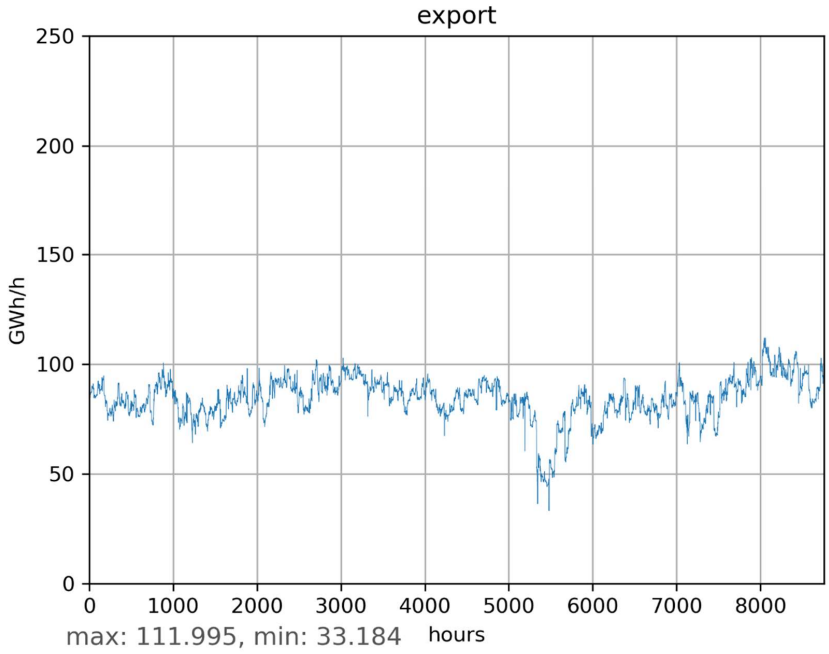


Abbildung 5.2.3.9: Sektorzeitreihe: Gas-Exporte

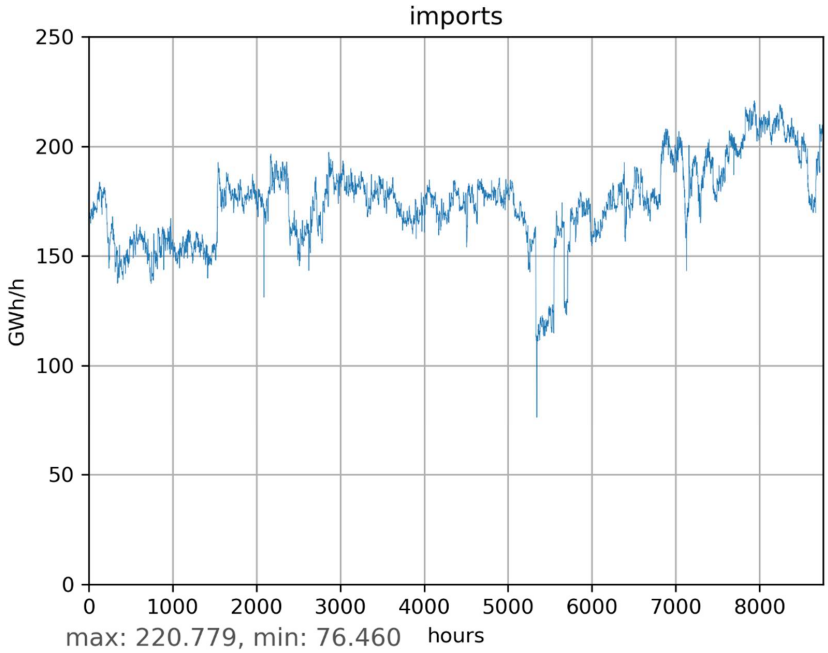


Abbildung 5.2.3.10: Sektorzeitreihe: Gas-Importe

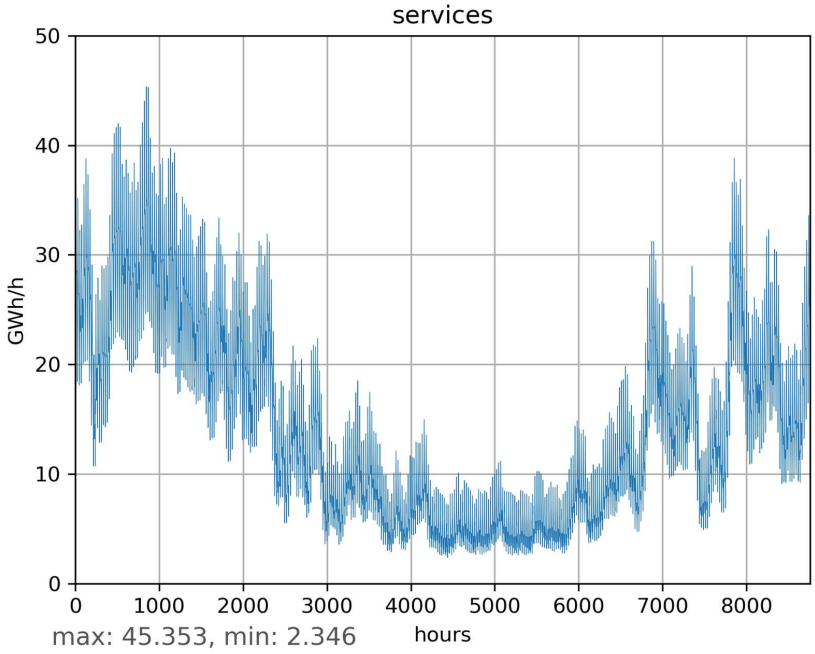


Abbildung 5.2.3.11: Sektorzeitreihe: Dienstleistungen

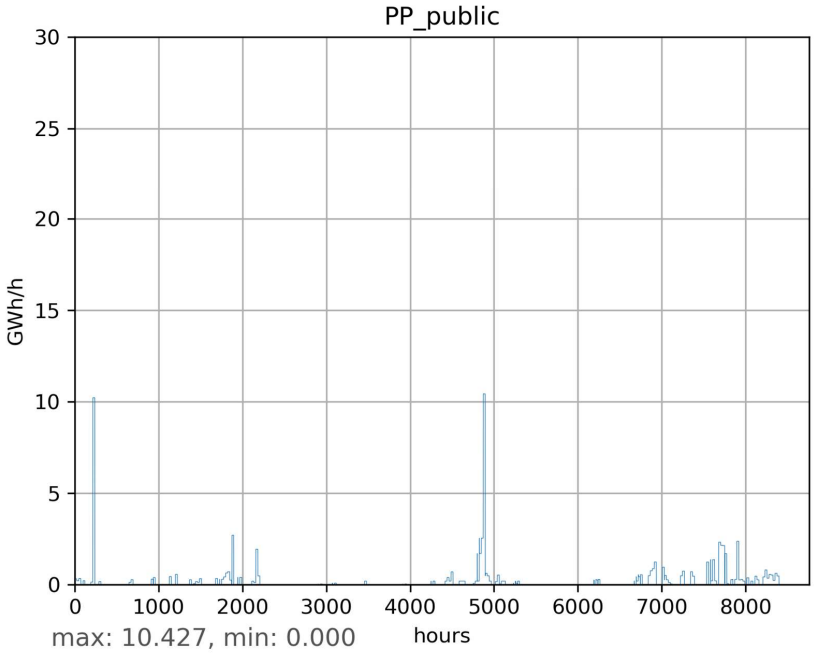


Abbildung 5.2.3.12: Sektorzeitreihe: Kraftwerke (öffentlich)

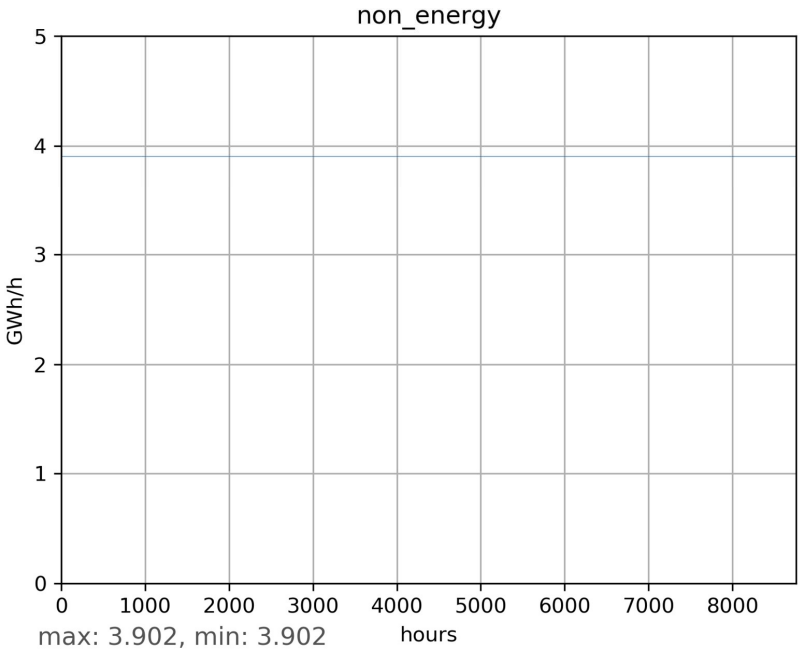


Abbildung 5.2.3.13: Sektorzeitreihe: Nicht-energetischer Verbrauch

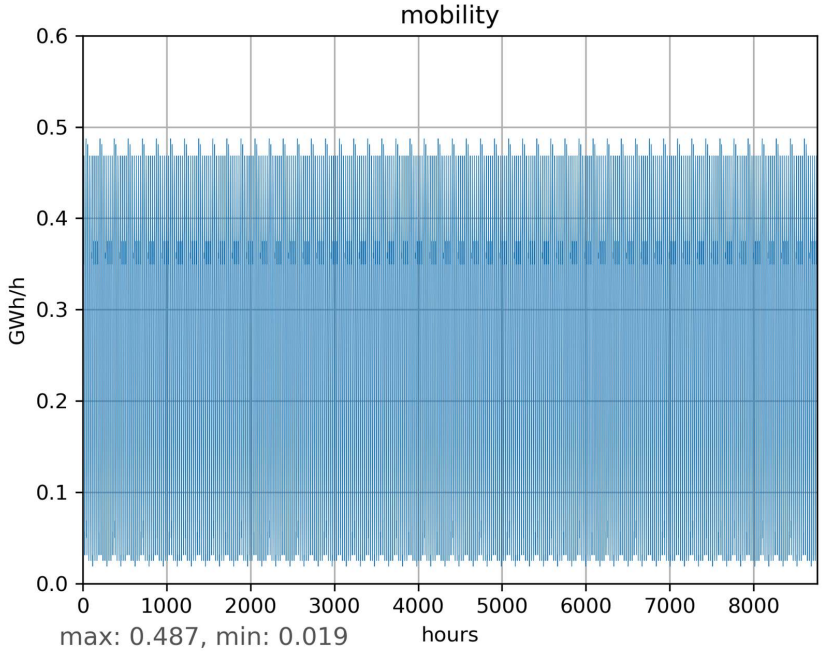


Abbildung 5.2.3.14: Sektorzeitreihe: Mobilität

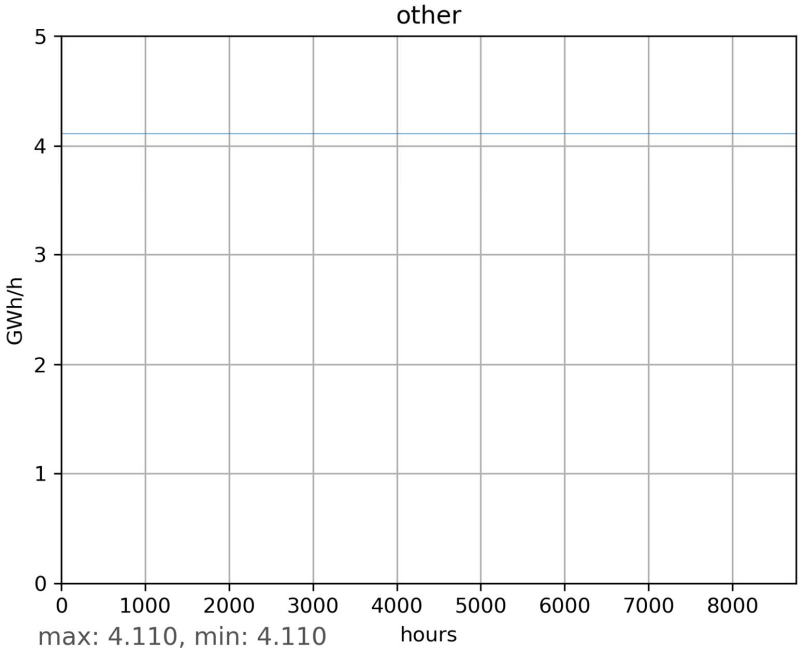


Abbildung 5.2.3.15: Sektorzeitreihe: Anderweitig nicht zugeordnete Nachfrage

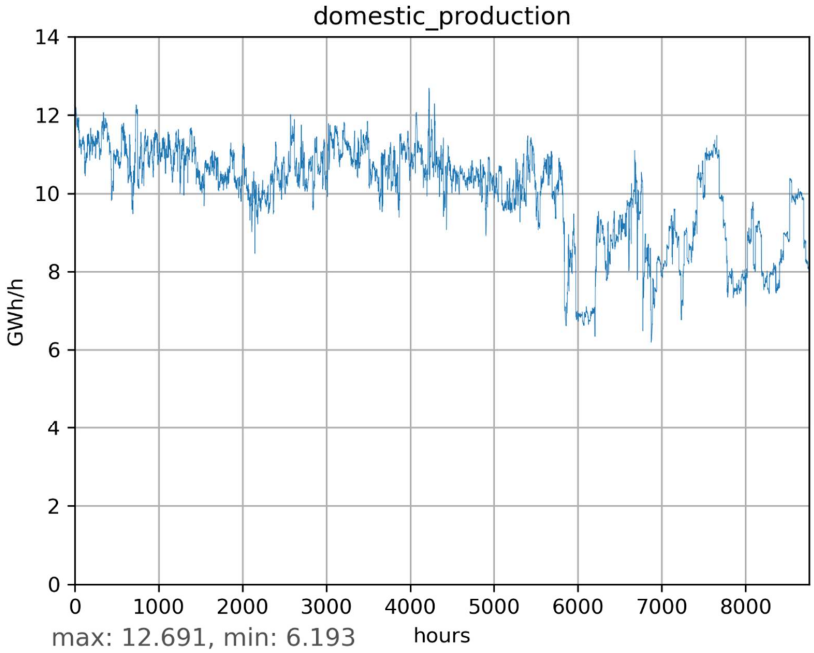


Abbildung 5.2.3.16: Sektorzeitreihe: Inländische Produktion/Förderung

I.7 Tabellen: Wasserstoffnetz 2025 und 2030

I.7.1 Recherchierte Daten zu den Knoten des modellierten Wasserstoffnetzes 2025

Tabelle I.7.1.1: 2025: Quellen und Senken im Cluster Ost.

node	sink	source	storage	import	info	production (capacity)	consumption (capacity)	entry [MW_{th}]	exit [MW_{th}]	reference
Bad Lauchstädt		✓	✓		Energiepark Bad Lauchstädt: electrolysis, cavern storage	30 MW_{el}		22.5	0	[6], [108], [104]
Leuna	✓				Leuna chemical site		all from Bad Lauchstädt	0	22.5	[6], [104]

Tabelle I.7.1.2: 2025: Quellen und Senken im Cluster Nord.

node	sink	source	storage	import	info	production (capacity)	consumption (capacity)	entry [MW_{th}]	exit [MW_{th}]	reference
Elbe Süd				✓	unclear: maybe later connection to Brunsbüttel and Denmark and/or shipping	2030: 100 MW_{el}	0	0	0	[104]
Heidenau						0	0	0	0	[104]
Achim					natural gas; compressor station	0	0	0	0	[104]
Eckel	✓	✓		✓	unclear what is connected here; Assumption: 2030: Moorburg power station; also suitable	0	0	0	0	[104], [110]

					for shipping					
Ganderkesee						0	0	0	0	[104]
Bremen	✓	✓			Stahlwerke Bremen	2025: 100 MWel	2025: 100 MWel	0	0	[104], [154]

Tabelle I.7.1.3: 2025: Cluster West.

node	sink	source	storage	import	info	production (capacity)	consumption (capacity)	entry [MW_{th}]	exit [MW_{th}]	reference
Lingen	✓	✓			bp Lingen electrolysis project with Ørsted	2025:60 MWel/~1 tonne/h (~1/5 of current local SMR production) 2025+: 150 MWel 2030+: 500+ MWel	2025: 50000 Nm^3/h 2030: 500+ MWel?	39.41	177	[155], [112]
Schepsdorf						0	0	0	0	[104]
Frenswegen						0	0	0	0	[104]
Bad Bentheim						0	0	0	0	[104]
Emsbüren						2025: wind onshore shared with Ochtrup 235 MWth 2030: no more?	0	117.5	0	[6]. [104]
Ochtrup						0	0	0	0	[104]
Legden						0	0	0	0	[104]
Dorsten						0	0	0	0	[104]
Hamborn	✓				ThyssenKrupp Steel Europe AG	STEAG will likely provide hydrogen directly locally	total demand for switch to H2: 700000 t/a 30% switch by 2030 -> 2025: 20000 t/a	0	89.92	[104], [156], [111]

							-> 2030: 210000 t/a			
Frensdorfer-Buchgraben						0	0	0	0	[104]
Ochtrup (city)		✓				2025: wind onshore shared with Emsbüren 235 MWth 2030: shared with Löningen and Rehden 305 MWth	0	54.915	0	[6], [104]
Epe			✓		E.on Gas Storage GmbH/ innogy gas storage not operational by 2025	0	0	0	0	[6], [104]
Marl	✓				Marl chemical site	SMR backup from current production available	2025: 50000 Nm^3/h	0	177	[155], [104]
Vlieghuis				✓	import capacity assumed in GNDP 2020	500 MWth	0	500	0	[6]
Scholven	✓				bp Gelsenkirchen	SMR backup from current production available	2025: 80000 Nm^3/h	0	283.2	[155]
Hanekenfähr		✓			RWE Lingen	2025: 100 MWel	supposed to have a 60 MW	77.88	0	[112], [116],

					power plant site	supposed to supply 22000 Nm³/h continuously in the beginning 2030: ?	gas turbine to produce electricity from hydrogen			[157], [155]

I.7.2 Recherchierte Daten zu den Knoten des modellierten Wasserstoffnetzes 2030

Tabelle I.7.2.1: 2030: Cluster West/Nord (1/3).

node	sink	source	storage	import	info	production (capacity)	consumption (capacity)	entry [MW$_{th}$]	exit [MW$_{th}$]	reference
Lingen	✓	✓			BP Lingen electrolysis with Ørsted	2030: 500 MWel	2030: 50000 Nm³/h, same as 2025	375	177	[155], [112]
Schepsdorf						0	0	0	0	[104]
Frensweg en						0	0	0	0	[104]
Bad Bentheim						0	0	0	0	[104]
Schlootdamm						0	0	0	0	[104]
Rehden		✓			wind onshore shared with Löningen and Ochtrup 305/3 MWth	101.67	0	101.67	101.67	[104], [6]
Vogtei						0	0	0	0	[104]
Mitte Weser						0	0	0	0	[104]

Kolshorn						0	0	0	0	[104]
Egenstedt						0	0	0	0	[104]
Emsbüren						2025: wind onshore shared with Ochtrup 235 MWth, 2030: no more?	0	0	0	[104], [6]
Löningen		✓				wind onshore shared with Rheden and Ochtrup 305/3 MWth	0	101.67	0	[6]
Ochtrup						0	0	0	0	[104]
Legden						0	0	0	0	[104]
Dorsten						0	0	0	0	[104]
Rheine						0	0	0	0	[104]
Wettringen						0	0	0	0	[104]
Elten				✓	import capacity assumed in GNDP2020	GNDP2020: 1066 MWth	0	1066	0	[104], [6]
Sonsbeck						0	0	0	0	[104]
Hamborn	✓				ThyssenKrupp Steel Europe AG	STEAG will likely provide hydrogen locally	total demand for switch to hydrogen: 700000 t/a, 30% by 2030 ➔ 2025: 20000 t/a, 2030: 210000 t/a	0	944.1	[104], [156], [111]

Tabelle I.7.2.2: 2030: Cluster West/Nord (2/3).

node	sink	source	storage	import	info	production (capacity)	consumption (capacity)	entry [MW$_{th}$]	exit [MW$_{th}$]	reference
Kalle			✓		natural gas storage facility	0	0	0	0	[104]
Frensdorfer-Buchgraben						0	0	0	0	[104]
Ochtrup (city)		✓				2030: wind onshore shared with Löningen and Rheden 305 MWth	0	101.67	0	[104], [6]
Elbe Süd				✓	unclear: later connection Brunsbüttel and Denmark and shipping?	0	0	0	0	[104]
Heidenau						0	0	0	0	[104]
Achim					natural gas compressor station	0	0	0	0	[104]
Eckel	✓	✓		✓	unclear what is connected here assumption:	2030: 100 MWel electrolysis/shipping?	0	75	0	[110], [104]

					2030: Moorburg power station, also suitable for shipping import					

Tabelle I.7.2.3: 2030: Cluster West/Nord (3/3).

node	sink	source	storage	import	info	production (capacity)	consumption (capacity)	entry [MW$_{th}$]	exit [MW$_{th}$]	reference
Vlieghuis				✓	import capacity assumed for 2025 in GNDP2020 but none for 2030	0	0	0	0	[6], [104]
Scholven	✓				Ruhr Öl Raffinerie Scholven/bp Gelsenkirchen	SMR backup from current production available	2025: 80000 Nm^3/h assumption: 2030: same	0	283.2	[155]
Hanekenfähr		✓			RWE Lingen power plant site	2030: 300 MWel assumed	supposed to have a 60 MW gas turbine to produce electricity from hydrogen	225	0	[112], [116], [157], [155]
Drohne		✓			unclear: BASF Polyurethanes close by future wind park Brockumer Fladder more likely eff. 46 MWel	46 MWel	0	34.5	0	[158], [104]

Harsefeld			✓		natural gas storage: Storengy Deutschland Betrieb GmbH	2030+: 100 MWel?	100 MWel	75	75	[159]
Albachten					unclear: municipalities Steinfurt/Münster + münsterNETZ?	0	0	0	0	[104]

I.8 Rechenergebnisse

I.8.1 Farblegende für die dargestellten Ergebnis-Screenshots

Tabelle I.8.1.1: Farblegende für die Ergebnis-Screenshots

Farblegende
Knoten
Quellenknoten
Senkenknoten
Verbindungsknoten
Kanten
Pipeline
Absperrventil
Kurzleitung
Druckregelventil
Kompressor
Nichtlinearer Widerstand
Linearer Widerstand
Sicherheitsventil
Komponente mit einem fixierten Fluss

I.8.2 Basisszenario 2025: Rohrrauigkeit: 1 mm, max. Druck: 30 bar

Tabelle I.8.2.1: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im 2025 Basisszenario bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm

Id	**p [bar]**	**q [kg/s]**
Quellen		
Bremen	30.00	0.00
Elbe Süd	30.00	0.00
Vlieghuis	30.00	3.52
Hanekenfähr	30.00	0.55
Bad Lauchstädt	30.00	0.16
Emsbüren	30.00	0.39
Ochtrup (city)	30.00	0.39
Senken		
Hamborn	16.68	0.63
Scholven	7.05	2.00

Lingen	28.67	0.97
Eckel	30.00	0.00
Leuna	30.00	0.16
Marl	12.96	1.25

Tabelle I.8.2.2: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im 2025 Basisszenario (durchschnittlich) bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an.

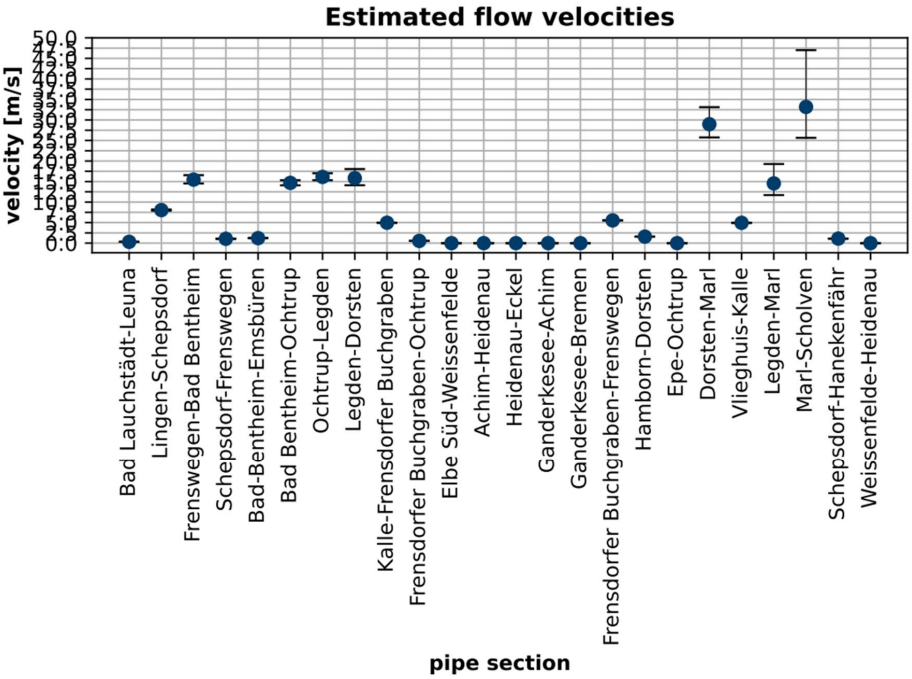




Abbildung I.8.2.1: Flüsse im 2025 Basisszenario bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

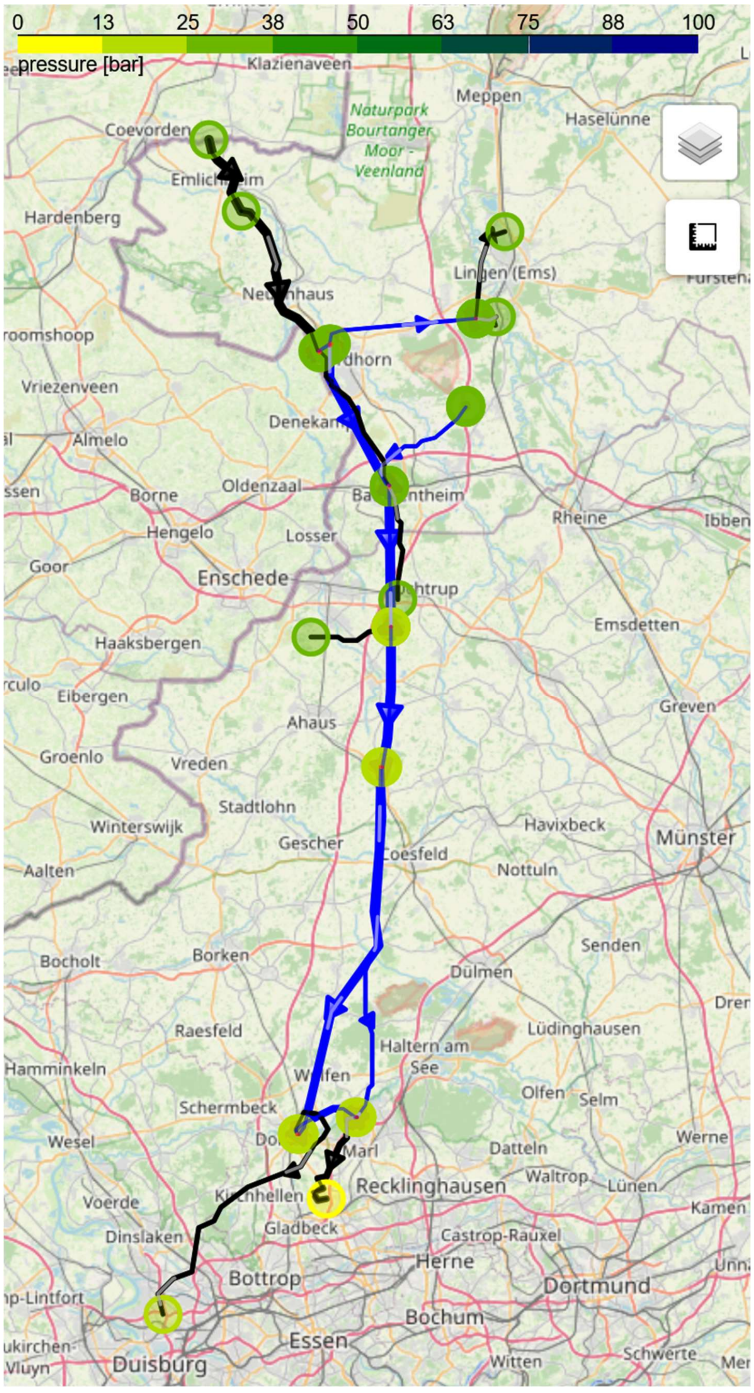


Abbildung I.8.2.2: Drücke im 2025 Basisszenario bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

Tabelle I.8.2.3: Leitungsflüsse im 2025 Basisszenario bei einem Rohrrauigkeitswert von 1 mm.

Id	l [km]	d [mm]	q [kg/s]	v_min [m/s]	v_avg [m/s]	v_max [m/s]
Bad Lauchstädt-Leuna	20.00	500.00	0.16	0.32	0.32	0.32
Lingen-Schepsdorf	11.30	250.00	-0.97	7.91	8.05	8.19
Frenswegen-Bad Bentheim	18.00	350.00	3.49	14.53	15.47	16.56
Schepsdorf-Frenswegen	18.00	450.00	-0.42	1.06	1.06	1.06
Bad-Bentheim-Emsbüren	15.00	400.00	-0.39	1.22	1.22	1.22
Bad Bentheim-Ochtrup	15.30	400.00	3.88	14.08	14.68	15.32
Ochtrup-Legden	15.70	400.00	3.88	15.32	16.13	17.02
Legden-Dorsten	38.00	400.00	3.21	14.10	15.83	18.05
Kalle-Frensdorfer Buchgraben	18.90	600.00	3.52	4.95	4.97	4.99
Frensdorfer Buchgraben-Ochtrup	29.90	600.00	-0.39	0.54	0.54	0.54
Elbe Süd-Weissenfelde	22.10	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Achim-Heidenau	54.20	450.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heidenau-Eckel	19.20	450.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganderkesee-Achim	40.80	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganderkesee-Bremen	17.10	400.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Frensdorfer Buchgraben-Frenswegen	1.40	600.00	3.91	5.54	5.54	5.54
Hamborn-Dorsten	37.00	600.00	-0.63	1.58	1.58	1.59
Epe-Ochtrup	10.00	300.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Dorsten-Marl	8.00	300.00	2.58	25.75	28.97	33.12
Vlieghuis-Kalle	6.70	600.00	3.52	4.94	4.95	4.95
Legden-Marl	40.40	200.00	0.67	11.70	14.55	19.27
Marl-Scholven	14.00	300.00	2.00	25.65	33.17	47.00
Schepsdorf-Hanekenfähr	2.30	500.00	-0.55	1.11	1.11	1.11
Weissenfelde-Heidenau	19.00	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabelle I.8.2.4: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im 2025 Basisszenario bei 30 bar, 1 mm Rohrrauigkeit.

Id	p_in [bar]	p_out [bar]	Δp [bar]
Bad Bentheim$_{3,in}$	29.99	25.99	3.99
Frensdorfer Buchgraben$_{3,in}$	30.00	29.71	0.29
Schepsdorf$_{2,in}$	30.00	29.68	0.32

I.8.3 Basisszenario 2025: Rohrrauigkeit: 0,1 mm, max. Druck: 30 bar

Tabelle I.8.3.1: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im 2025 Basisszenario bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm.

Id	p [bar]	q [kg/s]
Quellen		
Bremen	30.00	0.00
Elbe Süd	30.00	0.00
Vlieghuis	30.00	3.52
Hanekenfähr	30.00	0.55
Bad Lauchstädt	30.00	0.16
Emsbüren	30.00	0.39
Ochtrup (city)	30.00	0.39
Senken		
Hamborn	24.00	0.63
Scholven	21.72	2.00
Lingen	29.25	0.97
Eckel	30.00	0.00
Leuna	30.00	0.16
Marl	5.13	1.25

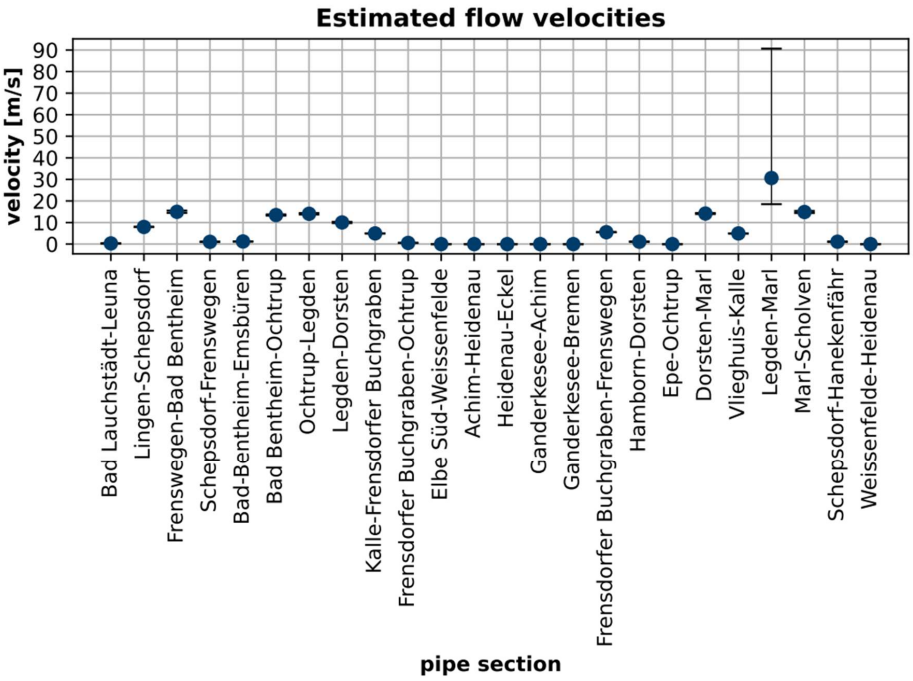


Abbildung I.8.3.1: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im 2025 Basisszenario (durchschnittlich) bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an.



Abbildung I.8.3.2: Flüsse im 2025 Basisszenario bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

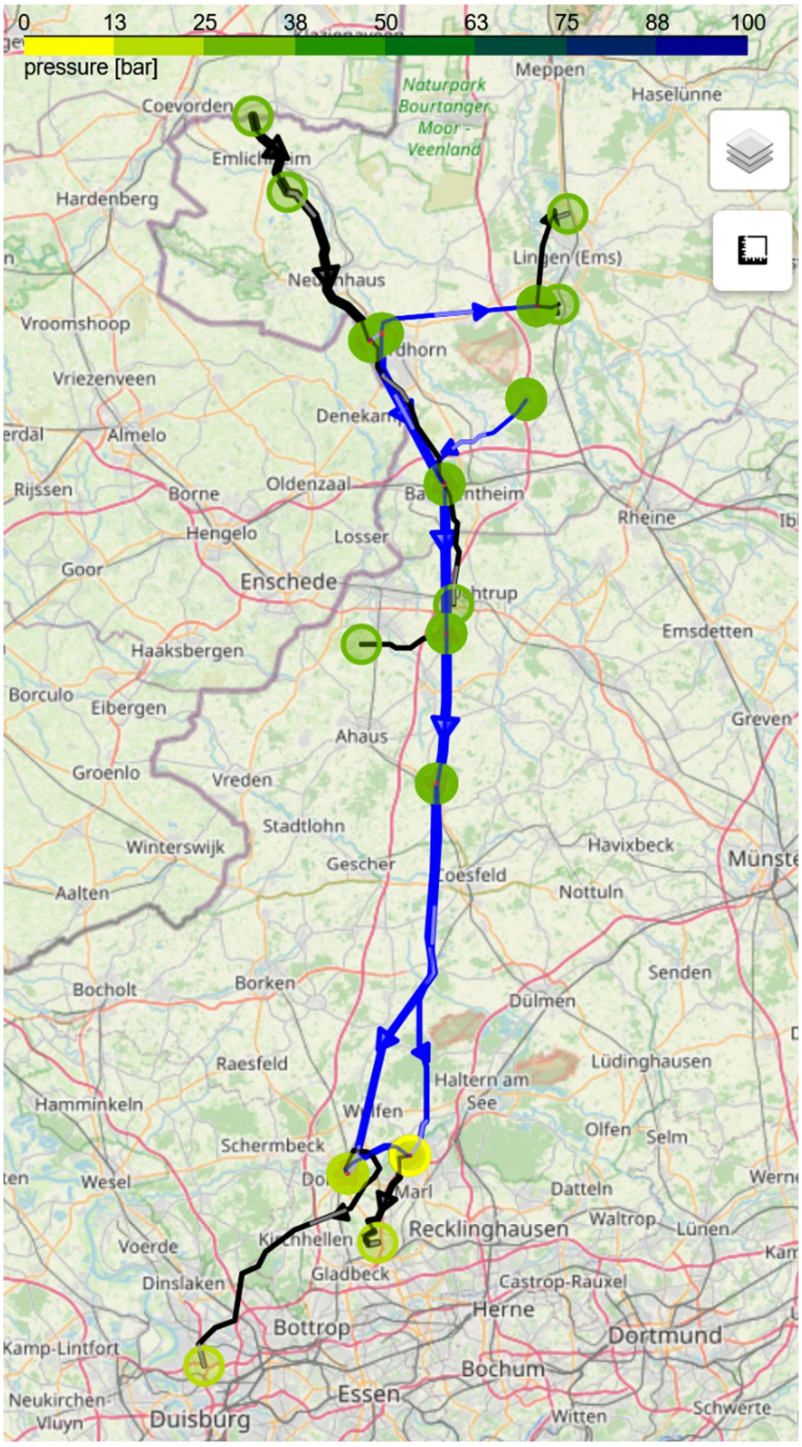


Abbildung I.8.3.3: Drücke im 2025 Basisszenario bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

Tabelle I.8.3.2: Leitungsflüsse im 2025 Basisszenario bei einem Rohrrauigkeitswert von 0,1 mm.

Id	l [km]	d [mm]	q [kg/s]	v_min [m/s]	v_avg [m/s]	v_max [m/s]
Bad Lauchstädt-Leuna	20.00	500.00	0.16	0.32	0.32	0.32
Lingen-Schepsdorf	11.30	250.00	-0.97	7.88	7.95	8.03
Frenswegen-Bad Bentheim	18.00	350.00	3.49	14.47	14.97	15.51
Schepsdorf-Frenswegen	18.00	450.00	-0.42	1.06	1.06	1.06
Bad-Bentheim-Emsbüren	15.00	400.00	-0.39	1.22	1.22	1.22
Bad Bentheim-Ochtrup	15.30	400.00	3.88	13.19	13.46	13.75
Ochtrup-Legden	15.70	400.00	3.88	13.75	14.06	14.39
Legden-Dorsten	38.00	400.00	2.63	9.76	10.04	10.33
Kalle-Frensdorfer Buchgraben	18.90	600.00	3.52	4.95	4.96	4.97
Frensdorfer Buchgraben-Ochtrup	29.90	600.00	-0.39	0.54	0.54	0.54
Elbe Süd-Weissenfelde	22.10	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Achim-Heidenau	54.20	450.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heidenau-Eckel	19.20	450.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganderkesee-Achim	40.80	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganderkesee-Bremen	17.10	400.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Frensdorfer Buchgraben-Frenswegen	1.40	600.00	3.91	5.51	5.52	5.52
Hamborn-Dorsten	37.00	600.00	-0.63	1.11	1.11	1.11
Epe-Ochtrup	10.00	300.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Dorsten-Marl	8.00	300.00	2.00	13.94	14.17	14.41
Vlieghuis-Kalle	6.70	600.00	3.52	4.94	4.94	4.95
Legden-Marl	40.40	200.00	1.25	18.52	30.63	90.62
Marl-Scholven	14.00	300.00	2.00	14.41	14.88	15.38
Schepsdorf-Hanekenfähr	2.30	500.00	-0.55	1.11	1.11	1.11
Weissenfelde-Heidenau	19.00	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabelle I.8.3.3: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im 2025 Basisszenario bei 30 bar, 0,1 mm Rohrrauigkeit.

Id	p_in [bar]	p_out [bar]	Δp [bar]
Bad Bentheim$_{3,in}$	29.99	27.77	2.22
Frensdorfer Buchgraben$_{3,in}$	30.00	29.83	0.17
Schepsdorf$_{2,in}$	30.00	29.81	0.19

I.8.4 Basisszenario 2025: Rohrrauigkeit: 1 mm, max. Druck: 60 bar

Tabelle I.8.4.1: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im 2025 Basisszenario

Id	p [bar]	q [kg/s]
Quellen		
Bremen	60.00	0.00
Elbe Süd	60.00	0.00
Vlieghuis	60.00	3.52
Hanekenfähr	60.00	0.55
Bad Lauchstädt	60.00	0.16
Emsbüren	60.00	0.39
Ochtrup (city)	60.00	0.39
Senken		
Hamborn	50.00	0.63
Scholven	48.11	2.00
Lingen	59.34	0.97
Eckel	60.00	0.00
Leuna	60.00	0.16
Marl	43.46	1.25

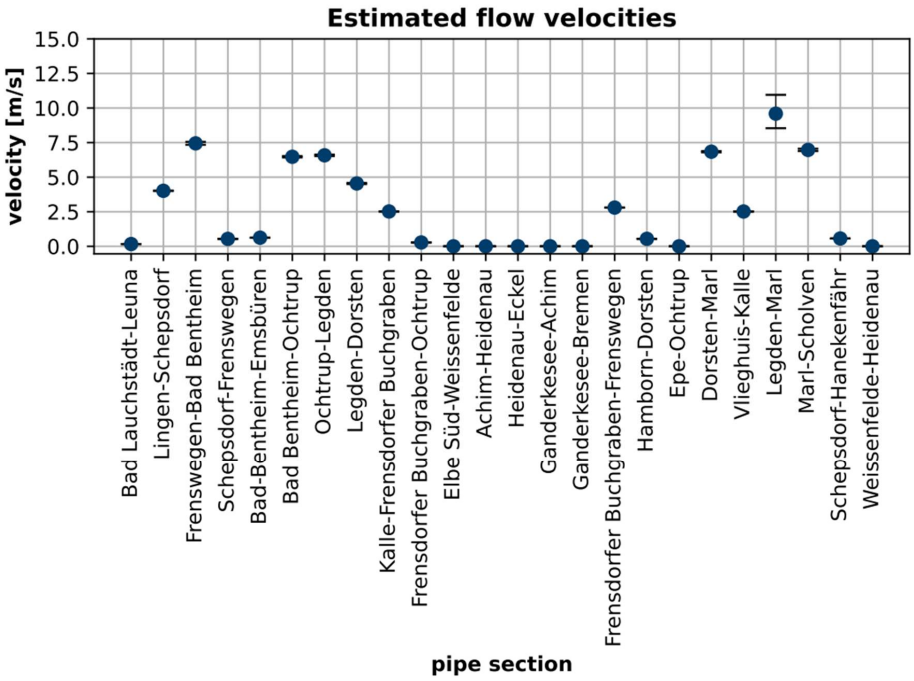


Abbildung I.8.4.1: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im 2025 Basisszenario (durchschnittlich) bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an.



Abbildung I.8.4.2: Flüsse im 2025 Basisszenario bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

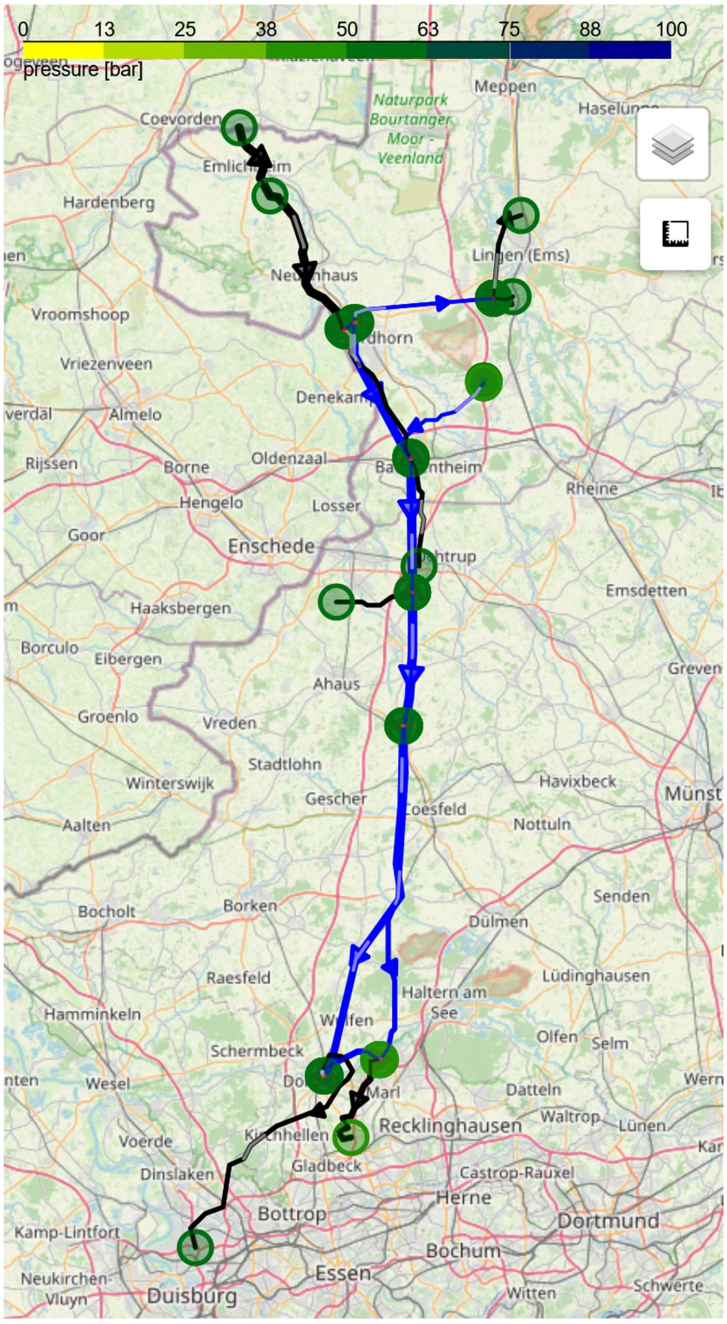


Abbildung I.8.4.3: Drücke im 2025 Basisszenario bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

Tabelle I.8.4.2: Leitungsflüsse im 2025 Basisszenario bei einem Rohrrauigkeitswert von 1 mm.

Id	l [km]	d [mm]	q [kg/s]	v_min [m/s]	v_avg [m/s]	v_max [m/s]
Bad Lauchstädt-Leuna	20.00	500.00	0.16	0.16	0.16	0.16
Lingen-Schepsdorf	11.30	250.00	-0.97	4.00	4.01	4.03
Frenswegen-Bad Bentheim	18.00	350.00	3.49	7.34	7.45	7.55
Schepsdorf-Frenswegen	18.00	450.00	-0.42	0.54	0.54	0.54
Bad-Bentheim-Emsbüren	15.00	400.00	-0.39	0.62	0.62	0.62
Bad Bentheim-Ochtrup	15.30	400.00	3.88	6.42	6.48	6.53
Ochtrup-Legden	15.70	400.00	3.88	6.53	6.58	6.64
Legden-Dorsten	38.00	400.00	2.63	4.50	4.54	4.59
Kalle-Frensdorfer Buchgraben	18.90	600.00	3.52	2.52	2.52	2.52
Frensdorfer Buchgraben-Ochtrup	29.90	600.00	-0.39	0.28	0.28	0.28
Elbe Süd-Weissenfelde	22.10	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Achim-Heidenau	54.20	450.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heidenau-Eckel	19.20	450.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganderkesee-Achim	40.80	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganderkesee-Bremen	17.10	400.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Frensdorfer Buchgraben-Frenswegen	1.40	600.00	3.91	2.80	2.80	2.80
Hamborn-Dorsten	37.00	600.00	-0.63	0.54	0.54	0.54
Epe-Ochtrup	10.00	300.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Dorsten-Marl	8.00	300.00	2.00	6.80	6.84	6.89
Vlieghuis-Kalle	6.70	600.00	3.52	2.52	2.52	2.52
Legden-Marl	40.40	200.00	1.25	8.54	9.59	10.95
Marl-Scholven	14.00	300.00	2.00	6.89	6.97	7.06
Schepsdorf-Hanekenfähr	2.30	500.00	-0.55	0.56	0.56	0.56
Weissenfelde-Heidenau	19.00	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabelle I.8.4.3: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im 2025 Basisszenario bei 60 bar, 1 mm Rohrrauigkeit.

Id	p_in [bar]	p_out [bar]	Δp [bar]
Bad Bentheim$_{3,in}$	59.99	58.08	1.91
Dorsten$_{3,in}$	55.08	50.01	5.07
Frensdorfer Buchgraben$_{3,in}$	60.00	59.85	0.15
Schepsdorf$_{2,in}$	60.00	59.84	0.16

I.8.5 Basisszenario 2025: Rohrrauigkeit: 0,1 mm, max. Druck: 60 bar

Id	p [bar]	q [kg/s]
Quellen		
Bremen	60.00	0.00
Elbe Süd	60.00	0.00
Vlieghuis	60.00	3.52
Hanekenfähr	60.00	0.55
Bad Lauchstädt	60.00	0.16
Emsbüren	60.00	0.39
Ochtrup (city)	60.00	0.39
Senken		
Hamborn	50.00	0.63
Scholven	49.02	2.00
Lingen	59.63	0.97
Eckel	60.00	0.00
Leuna	60.00	0.16
Marl	49.72	1.25

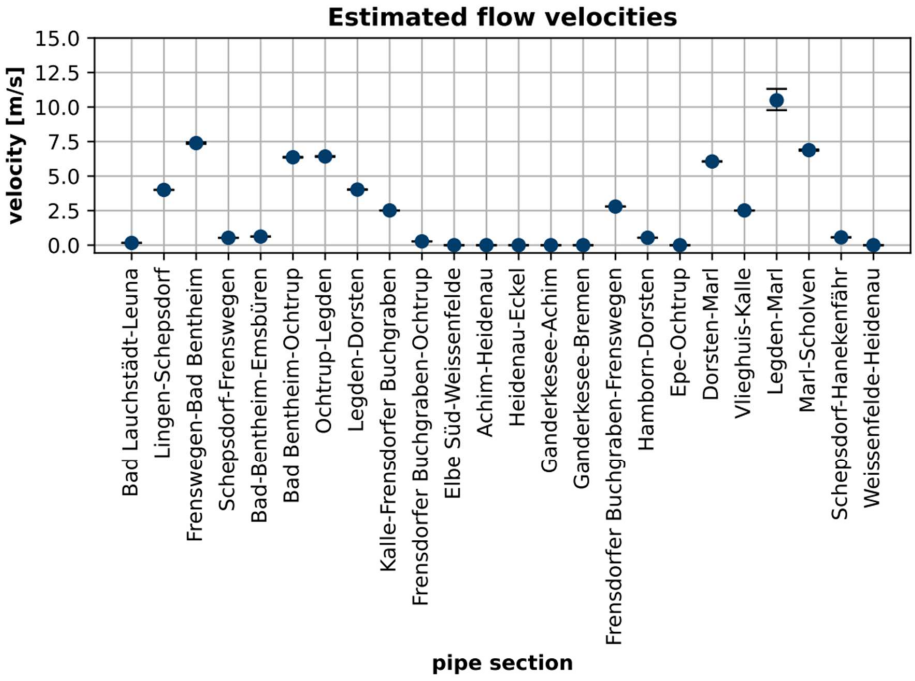


Abbildung I.8.5.1: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im 2025 Basisszenario (durchschnittlich) bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an.



Abbildung I.8.5.2: Flüsse im 2025 Basisszenario bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

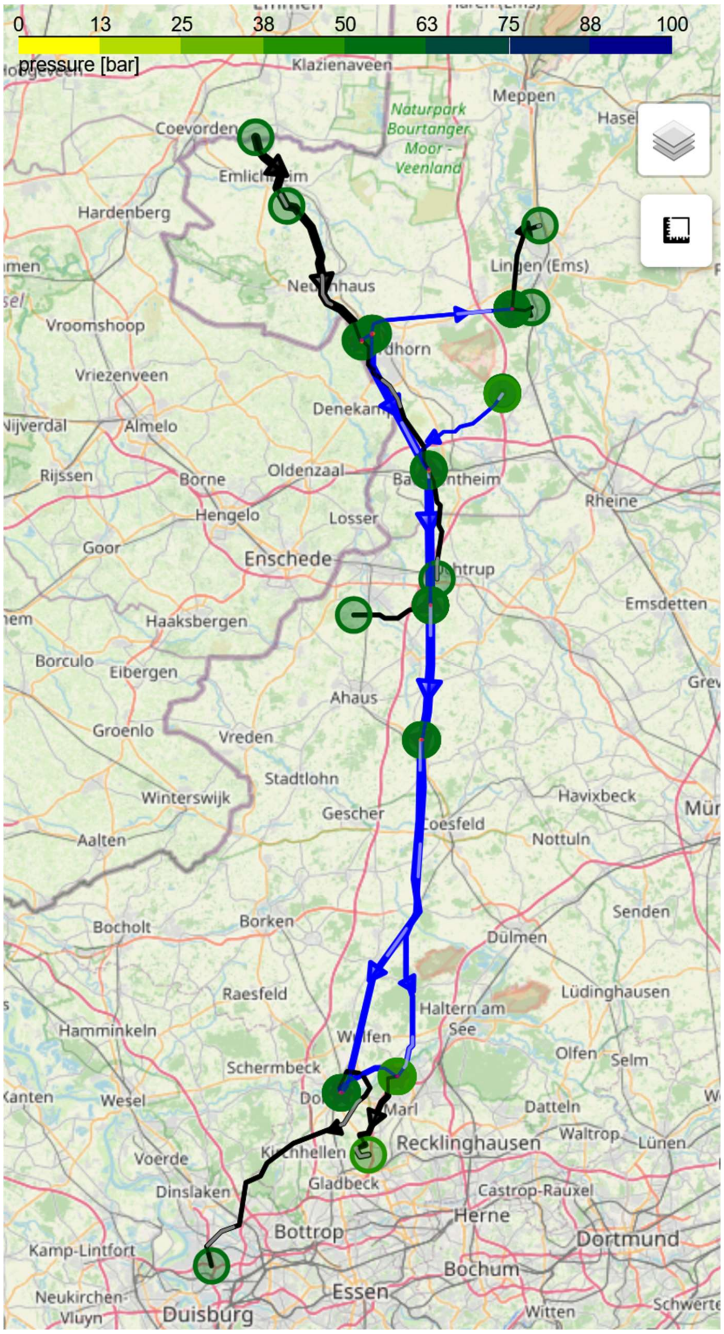


Abbildung I.8.5.3: Drücke im 2025 Basisszenario bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

Tabelle I.8.5.1: Leitungsflüsse im 2025 Basisszenario bei einem Rohrrauigkeitswert von 0,1 mm.

Id	l [km]	d [mm]	q [kg/s]	v_min [m/s]	v_avg [m/s]	v_max [m/s]
Bad Lauchstädt-Leuna	20.00	500.00	0.16	0.16	0.16	0.16
Lingen-Schepsdorf	11.30	250.00	-0.97	3.99	4.00	4.01
Frenswegen-Bad Bentheim	18.00	350.00	3.49	7.33	7.39	7.45
Schepsdorf-Frenswegen	18.00	450.00	-0.42	0.53	0.53	0.53
Bad-Bentheim-Emsbüren	15.00	400.00	-0.39	0.62	0.62	0.62
Bad Bentheim-Ochtrup	15.30	400.00	3.88	6.34	6.37	6.39
Ochtrup-Legden	15.70	400.00	3.88	6.39	6.42	6.45
Legden-Dorsten	38.00	400.00	2.41	4.01	4.02	4.04
Kalle-Frensdorfer Buchgraben	18.90	600.00	3.52	2.52	2.52	2.52
Frensdorfer Buchgraben-Ochtrup	29.90	600.00	-0.39	0.28	0.28	0.28
Elbe Süd-Weissenfelde	22.10	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Achim-Heidenau	54.20	450.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heidenau-Eckel	19.20	450.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganderkesee-Achim	40.80	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganderkesee-Bremen	17.10	400.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Frensdorfer Buchgraben-Frenswegen	1.40	600.00	3.91	2.80	2.80	2.80
Hamborn-Dorsten	37.00	600.00	-0.63	0.54	0.54	0.54
Epe-Ochtrup	10.00	300.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Dorsten-Marl	8.00	300.00	1.77	6.04	6.06	6.08
Vlieghuis-Kalle	6.70	600.00	3.52	2.52	2.52	2.52
Legden-Marl	40.40	200.00	1.47	9.78	10.49	11.32
Marl-Scholven	14.00	300.00	2.00	6.84	6.88	6.93
Schepsdorf-Hanekenfähr	2.30	500.00	-0.55	0.56	0.56	0.56
Weissenfelde-Heidenau	19.00	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabelle I.8.5.2: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im 2025 Basisszenario bei 60 bar, 0,1 mm Rohrrauigkeit.

Id	p_in [bar]	p_out [bar]	Δp [bar]
Bad Bentheim$_{3,in}$	60.00	58.91	1.09
Dorsten$_{3,in}$	57.32	50.00	7.31
Frensdorfer Buchgraben$_{3,in}$	60.00	59.91	0.09
Marl$_{3,in}$	49.72	49.70	0.01
Schepsdorf$_{2,in}$	60.00	59.91	0.09

I.8.6 Basisszenario 2030: Rohrrauigkeit: 1 mm, max. Druck: 30 bar

Keine Lösung.

I.8.7 Basisszenario 2030: Rohrrauigkeit: 0,1 mm, max. Druck: 30 bar

Tabelle I.8.7.1: Quellen-/Senkenflüsse, Drücke: 2030 Basisszenario

Id	p [bar]	q [kg/s]
Quellen		
Elten	24.51	5.58
Lingen	30.00	1.40
Löningen	30.00	0.72
Nüttermoor	30.00	0.53
Eckel	30.00	0.53
Drohne	30.00	0.24
Rehden	28.68	0.72
Hanekenfähr	30.00	1.59
Bad Lauchstädt	30.00	0.16
Ochtrup (city)	30.00	0.72
Senken		
Hamborn	22.51	6.65
Scholven	19.47	2.00
Epe	30.00	0.00
Bremen	30.00	0.00
Hallendorf	27.69	2.11
Leuna	30.00	0.16
Marl	21.12	1.25
Harsefeld	30.00	0.00

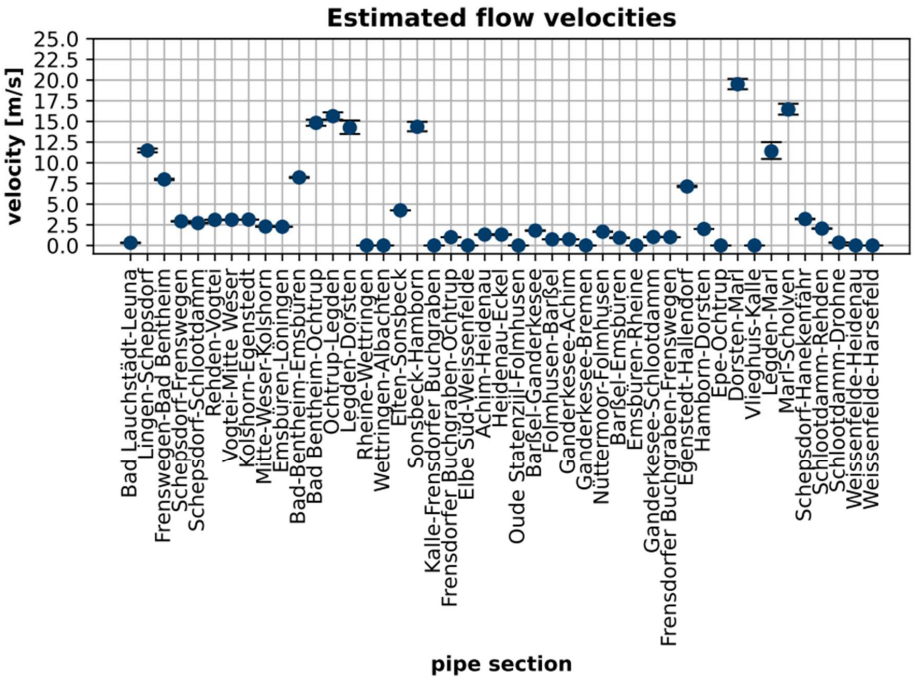


Abbildung I.8.7.1: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im 2030 Basisszenario (durchschnittlich) bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an.

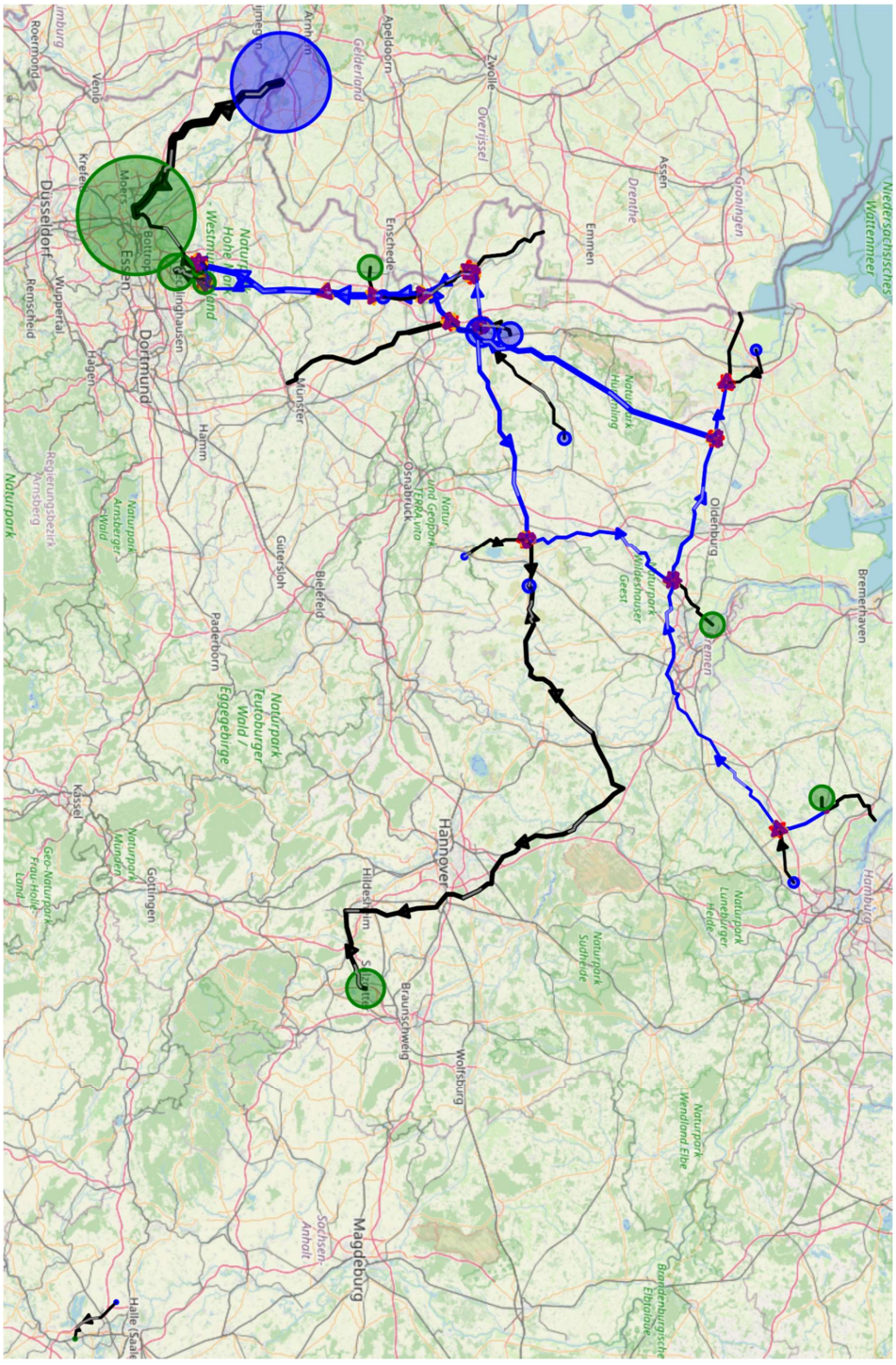


Abbildung I.8.7.2: Flüsse im 2030 Basisszenario bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

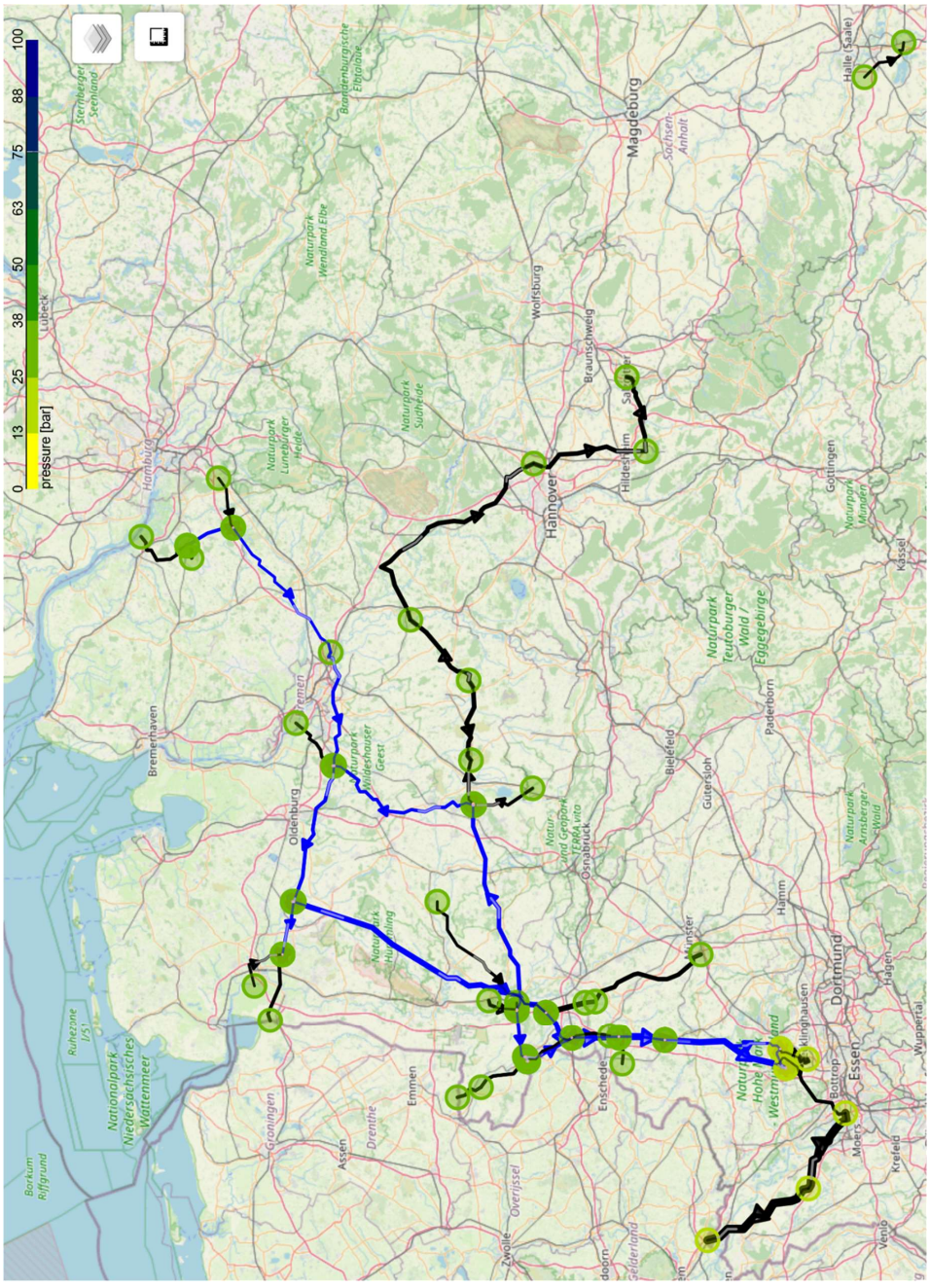


Abbildung I.8.7.3: Drücke im 2030 Basisszenario bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

Tabelle I.8.7.2: Leitungsflüsse im 2030 Basisszenario bei 30 bar Maximaldruck und einem Rohrrauigkeitswert von 0,1 mm.

Id	l [km]	d [mm]	q [kg/s]	v_min [m/s]	v_avg [m/s]	v_max [m/s]
Bad Lauchstädt-Leuna	20.00	500.00	0.16	0.32	0.32	0.32
Lingen-Schepsdorf	11.30	250.00	1.40	11.27	11.49	11.72
Frenswegen-Bad Bentheim	18.00	350.00	1.84	7.91	7.99	8.07
Schepsdorf-Frenswegen	18.00	450.00	1.13	2.92	2.92	2.92
Schepsdorf-Schlootdamm	72.90	600.00	1.85	2.70	2.71	2.72
Rehden-Vogtei	28.90	600.00	2.11	3.10	3.10	3.11
Vogtei-Mitte Weser	29.00	600.00	2.11	3.11	3.11	3.11
Kolshorn-Egenstedt	38.50	600.00	2.11	3.13	3.13	3.14
Mitte-Weser-Kolshorn	92.90	700.00	2.11	2.29	2.29	2.30
Emsbüren-Löningen	55.00	400.00	-0.72	2.26	2.26	2.27
Bad-Bentheim-Emsbüren	15.00	400.00	-2.47	8.17	8.23	8.29
Bad Bentheim-Ochtrup	15.30	400.00	4.32	14.47	14.83	15.20
Ochtrup-Legden	15.70	400.00	4.32	15.20	15.64	16.09
Legden-Dorsten	38.00	400.00	3.62	13.48	14.25	15.12
Rheine-Wettringen	3.50	800.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wettringen-Albachten	43.20	800.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Elten-Sonsbeck	42.30	900.00	5.58	4.24	4.25	4.26
Sonsbeck-Hamborn	34.00	500.00	5.58	13.80	14.35	14.95
Kalle-Frensdorfer Buchgraben	18.90	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Frensdorfer Buchgraben-Ochtrup	29.90	600.00	-0.72	1.00	1.00	1.00
Elbe Süd-Weissenfelde	22.10	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Achim-Heidenau	54.20	450.00	-0.53	1.32	1.32	1.32
Heidenau-Eckel	19.20	450.00	-0.53	1.32	1.32	1.32
Oude Statenzijl-Folmhusen	22.50	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Barßel-Ganderkesee	47.70	600.00	-1.23	1.80	1.80	1.80
Folmhusen-Barßel	19.20	600.00	0.53	0.74	0.74	0.74
Ganderkesee-Achim	40.80	600.00	-0.53	0.74	0.74	0.74
Ganderkesee-Bremen	17.10	400.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Nüttermoor-Folmhusen	18.40	400.00	0.53	1.67	1.67	1.67
Barßel-Emsbüren	94.70	1000.00	1.76	0.93	0.93	0.93
Emsbüren-Rheine	13.80	1000.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganderkesee-Schlootdamm	58.90	600.00	-0.70	1.03	1.03	1.03
Frensdorfer Buchgraben-Frenswegen	1.40	600.00	0.72	1.00	1.00	1.00

Egenstedt-Hallendorf	30.00	400.00	2.11	7.06	7.14	7.22
Hamborn-Dorsten	37.00	600.00	-1.07	1.99	2.00	2.00
Epe-Ochtrup	10.00	300.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Dorsten-Marl	8.00	300.00	2.54	18.89	19.50	20.15
Vlieghuis-Kalle	6.70	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Legden-Marl	40.40	200.00	0.70	10.46	11.39	12.50
Marl-Scholven	14.00	300.00	2.00	15.82	16.45	17.14
Schepsdorf-Hanekenfähr	2.30	500.00	-1.59	3.20	3.20	3.20
Schlootdamm-Rehden	15.70	600.00	1.40	2.05	2.05	2.05
Schlootdamm-Drohne	21.50	600.00	-0.24	0.34	0.34	0.34
Weissenfelde-Heidenau	19.00	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Weissenfelde-Harsefeld	4.50	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabelle I.8.7.3: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im 2030 Basisszenario bei 30 bar, 0,1 mm Rohrrauigkeit.

Id	**p_in [bar]**	**p_out [bar]**	**Δp [bar]**
$\text{Barssel}_{1,in}$	29.98	28.65	1.33
$\text{Emsbueren}_{2,in}$	29.87	28.64	1.24
$\text{Frenswegen}_{3,in}$	29.99	28.78	1.21
$\text{Ganderkesee}_{3,in}$	29.95	28.69	1.27
$\text{Schepsdorf}_{2,in}$	29.99	28.84	1.16
$\text{Schlootdamm}_{4,in}$	30.00	28.70	1.30

I.8.8 Basisszenario 2030: Rohrrauigkeit: 1 mm, max. Druck: 60 bar

Tabelle I.8.8.1: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im 2030 Basisszenario bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm.

Id	p [bar]	q [kg/s]
Quellen		
Elten	50.09	5.58
Lingen	60.00	1.40
Löningen	60.00	0.72
Nüttermoor	60.00	0.53
Eckel	60.00	0.53
Drohne	60.00	0.24
Rehden	58.95	0.72
Hanekenfähr	60.00	1.59
Bad Lauchstädt	60.00	0.16
Ochtrup (city)	60.00	0.72
Senken		
Hamborn	48.45	6.65
Scholven	46.50	2.00
Epe	60.00	0.00
Bremen	60.00	0.00
Hallendorf	58.12	2.11
Leuna	60.00	0.16
Marl	42.40	1.25
Harsefeld	60.00	0.00

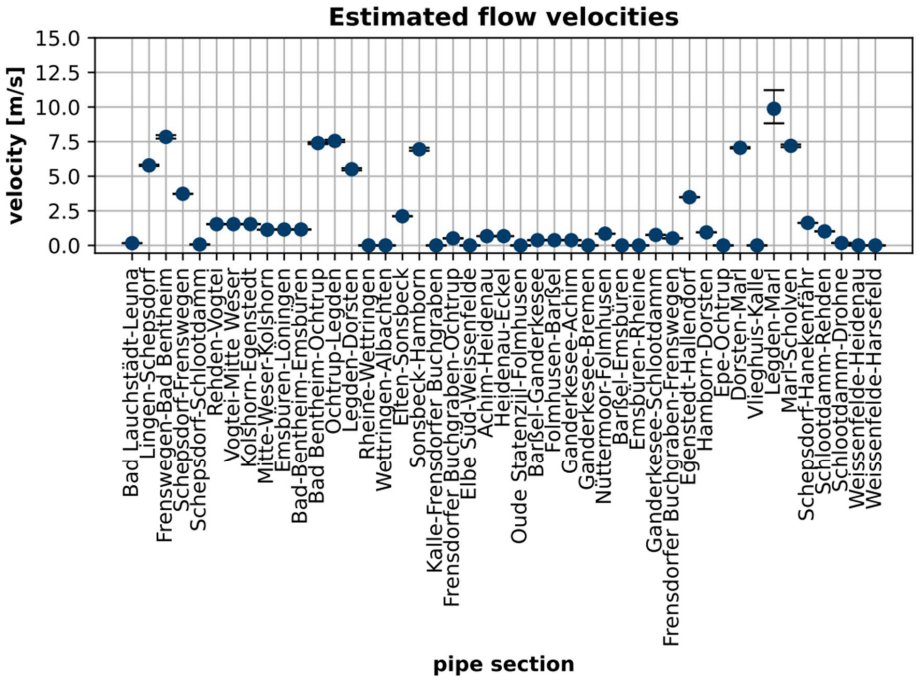


Abbildung I.8.8.1: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im 2030 Basisszenario (durchschnittlich) bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an.

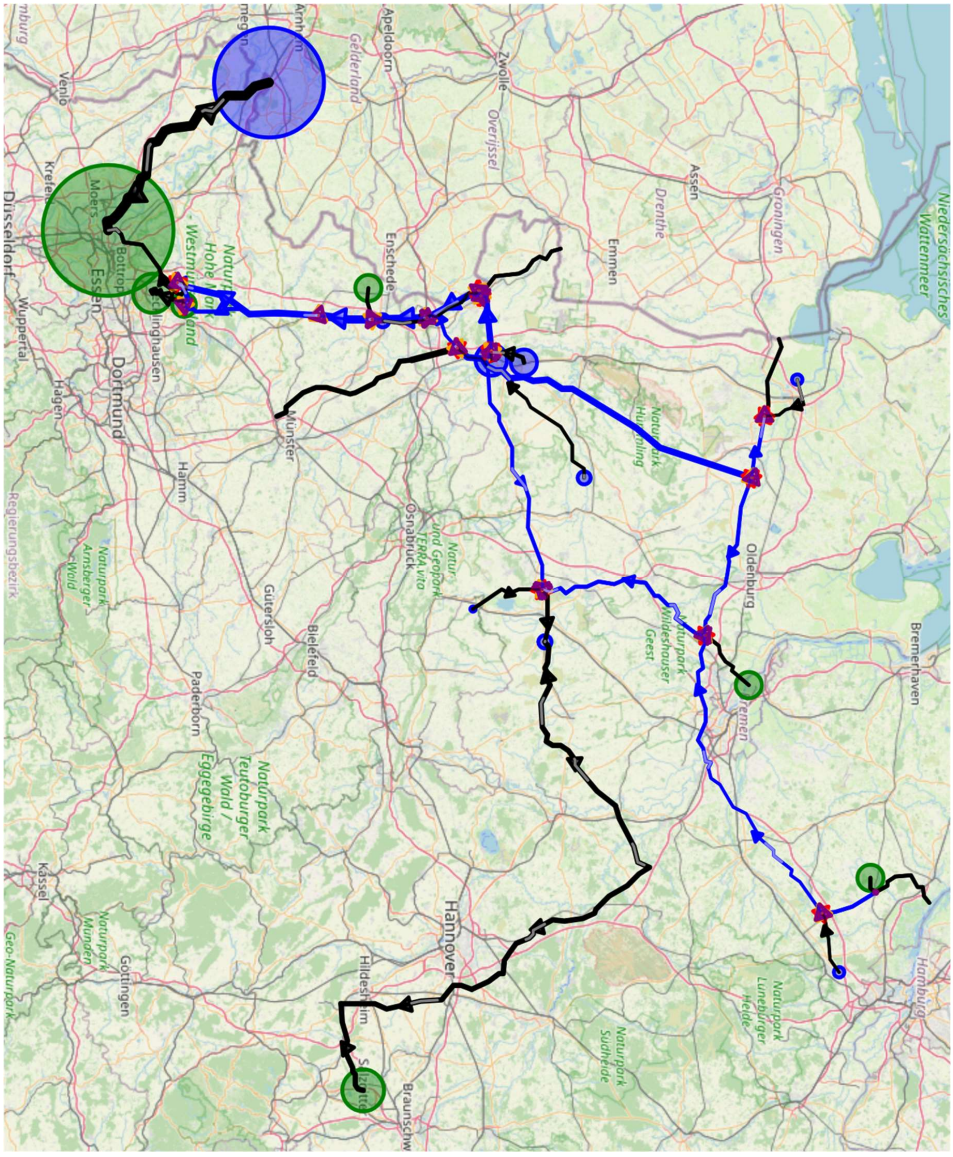


Abbildung I.8.8.2: Flüsse im 2030 Basisszenario bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

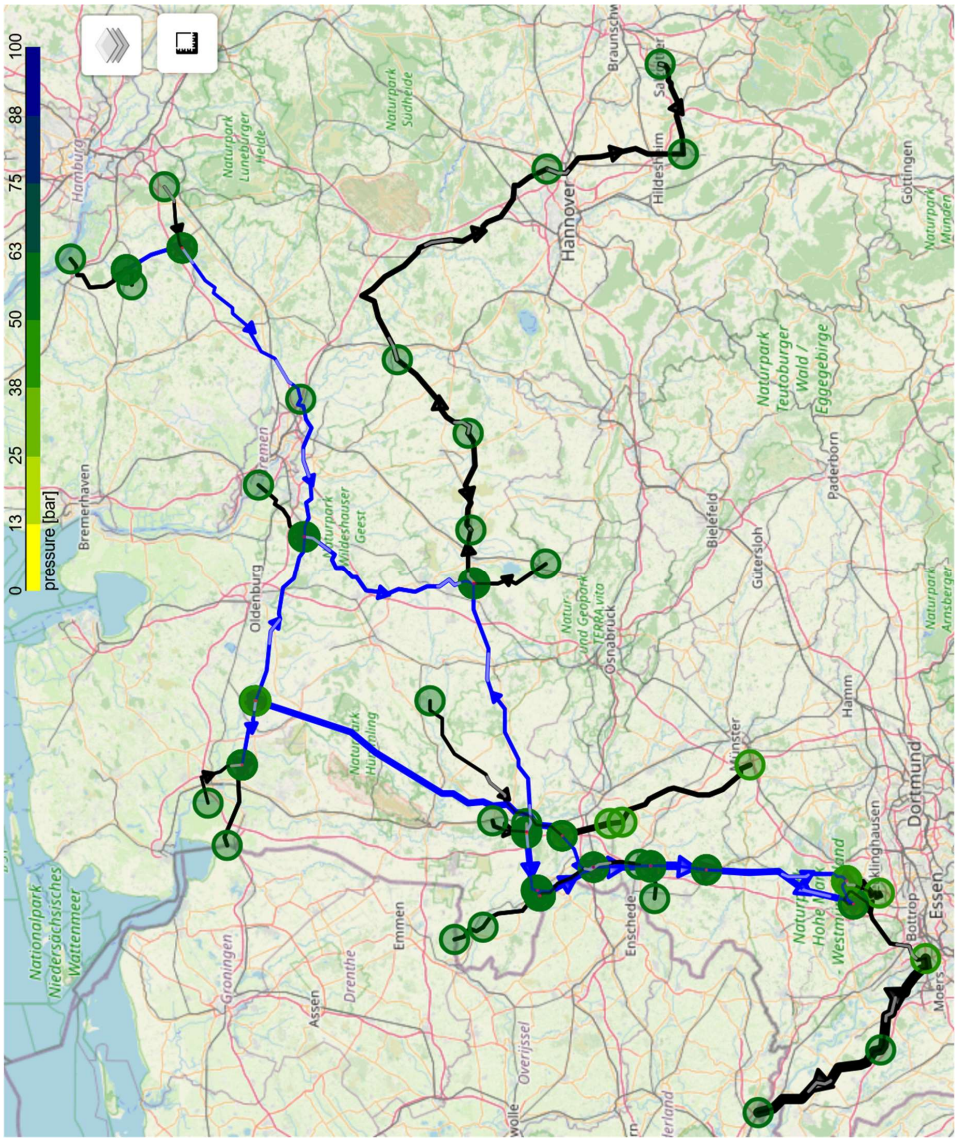


Abbildung I.8.8.3: Drücke im 2030 Basisszenario bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

Tabelle I.8.8.2: Leitungsflüsse im 2030 Basisszenario bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm.

Id	l [km]	d [mm]	q [kg/s]	v_min [m/s]	v_avg [m/s]	v_max [m/s]
Bad Lauchstädt-Leuna	20.00	500.00	0.16	0.16	0.16	0.16
Lingen-Schepsdorf	11.30	250.00	1.40	5.74	5.79	5.83
Frenswegen-Bad Bentheim	18.00	350.00	3.60	7.72	7.84	7.97
Schepsdorf-Frenswegen	18.00	450.00	2.88	3.72	3.73	3.74
Schepsdorf-Schlootdamm	72.90	600.00	0.10	0.07	0.07	0.07
Rehden-Vogtei	28.90	600.00	2.11	1.54	1.54	1.54
Vogtei-Mitte Weser	29.00	600.00	2.11	1.54	1.54	1.54
Kolshorn-Egenstedt	38.50	600.00	2.11	1.54	1.54	1.54
Mitte-Weser-Kolshorn	92.90	700.00	2.11	1.13	1.13	1.13
Emsbüren-Löningen	55.00	400.00	-0.72	1.15	1.15	1.15
Bad-Bentheim-Emsbüren	15.00	400.00	-0.72	1.15	1.15	1.15
Bad Bentheim-Ochtrup	15.30	400.00	4.32	7.32	7.39	7.47
Ochtrup-Legden	15.70	400.00	4.32	7.47	7.55	7.64
Legden-Dorsten	38.00	400.00	3.07	5.43	5.51	5.58
Rheine-Wettringen	3.50	800.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wettringen-Albachten	43.20	800.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Elten-Sonsbeck	42.30	900.00	5.58	2.11	2.11	2.11
Sonsbeck-Hamborn	34.00	500.00	5.58	6.84	6.95	7.05
Kalle-Frensdorfer Buchgraben	18.90	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Frensdorfer Buchgraben-Ochtrup	29.90	600.00	-0.72	0.51	0.51	0.51
Elbe Süd-Weissenfelde	22.10	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Achim-Heidenau	54.20	450.00	-0.53	0.67	0.67	0.67
Heidenau-Eckel	19.20	450.00	-0.53	0.67	0.67	0.67
Oude Statenzijl-Folmhusen	22.50	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Barßel-Ganderkesee	47.70	600.00	0.53	0.38	0.38	0.38
Folmhusen-Barßel	19.20	600.00	0.53	0.38	0.38	0.38
Ganderkesee-Achim	40.80	600.00	-0.53	0.38	0.38	0.38
Ganderkesee-Bremen	17.10	400.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Nüttermoor-Folmhusen	18.40	400.00	0.53	0.85	0.85	0.85
Barßel-Emsbüren	94.70	1000.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Emsbüren-Rheine	13.80	1000.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganderkesee-Schlootdamm	58.90	600.00	1.06	0.76	0.76	0.76
Frensdorfer Buchgraben-Frenswegen	1.40	600.00	0.72	0.51	0.51	0.51

Egenstedt-Hallendorf	30.00	400.00	2.11	3.47	3.49	3.50
Hamborn-Dorsten	37.00	600.00	-1.07	0.94	0.94	0.94
Epe-Ochtrup	10.00	300.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Dorsten-Marl	8.00	300.00	2.00	7.00	7.05	7.11
Vlieghuis-Kalle	6.70	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Legden-Marl	40.40	200.00	1.25	8.83	9.88	11.22
Marl-Scholven	14.00	300.00	2.00	7.11	7.20	7.29
Schepsdorf-Hanekenfähr	2.30	500.00	-1.59	1.63	1.63	1.63
Schlootdamm-Rehden	15.70	600.00	1.40	1.01	1.01	1.01
Schlootdamm-Drohne	21.50	600.00	-0.24	0.17	0.17	0.17
Weissenfelde-Heidenau	19.00	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Weissenfelde-Harsefeld	4.50	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabelle I.8.8.3: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im 2030 Basisszenario bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm.

Id	**p_in [bar]**	**p_out [bar]**	**Δp [bar]**
Bad Bentheim$_{3,in}$	59.86	56.73	3.13
Dorsten$_{3,in}$	52.73	48.47	4.25
Frenswegen$_{3,in}$	59.99	58.64	1.35
Ganderkesee$_{1,in}$	59.97	59.95	0.02
Schepsdorf$_{2,in}$	59.99	58.96	1.03
Schlootdamm$_{2,in}$	59.92	58.97	0.96
Schlootdamm$_{4,in}$	60.00	58.97	1.03

I.8.9 Basisszenario 2030: Rohrrauigkeit: 0,1 mm, max. Druck: 60 bar

Id	p [bar]	q [kg/s]
Quellen		
Elten	50.05	5.58
Lingen	60.00	1.40
Löningen	60.00	0.72
Nüttermoor	60.00	0.53
Eckel	60.00	0.53
Drohne	60.00	0.24
Rehden	59.42	0.72
Hanekenfähr	60.00	1.59
Bad Lauchstädt	60.00	0.16
Ochtrup (city)	60.00	0.72
Senken		
Hamborn	49.10	6.65
Scholven	48.10	2.00
Epe	60.00	0.00
Bremen	60.00	0.00
Hallendorf	58.94	2.11
Leuna	60.00	0.16
Marl	48.80	1.25
Harsefeld	60.00	0.00

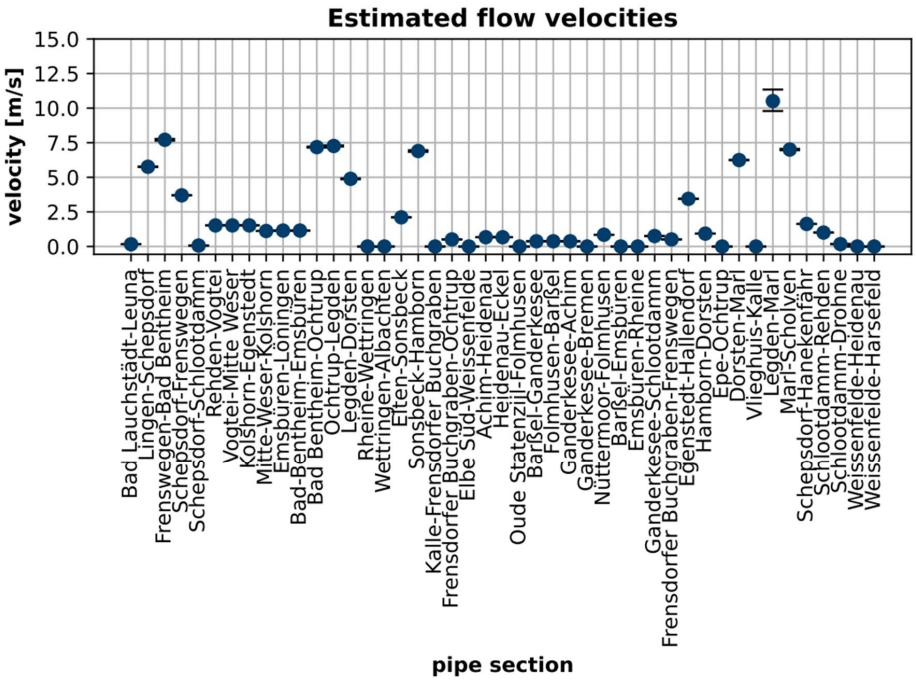


Abbildung I.8.9.1: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im 2030 Basisszenario (durchschnittlich) bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an.

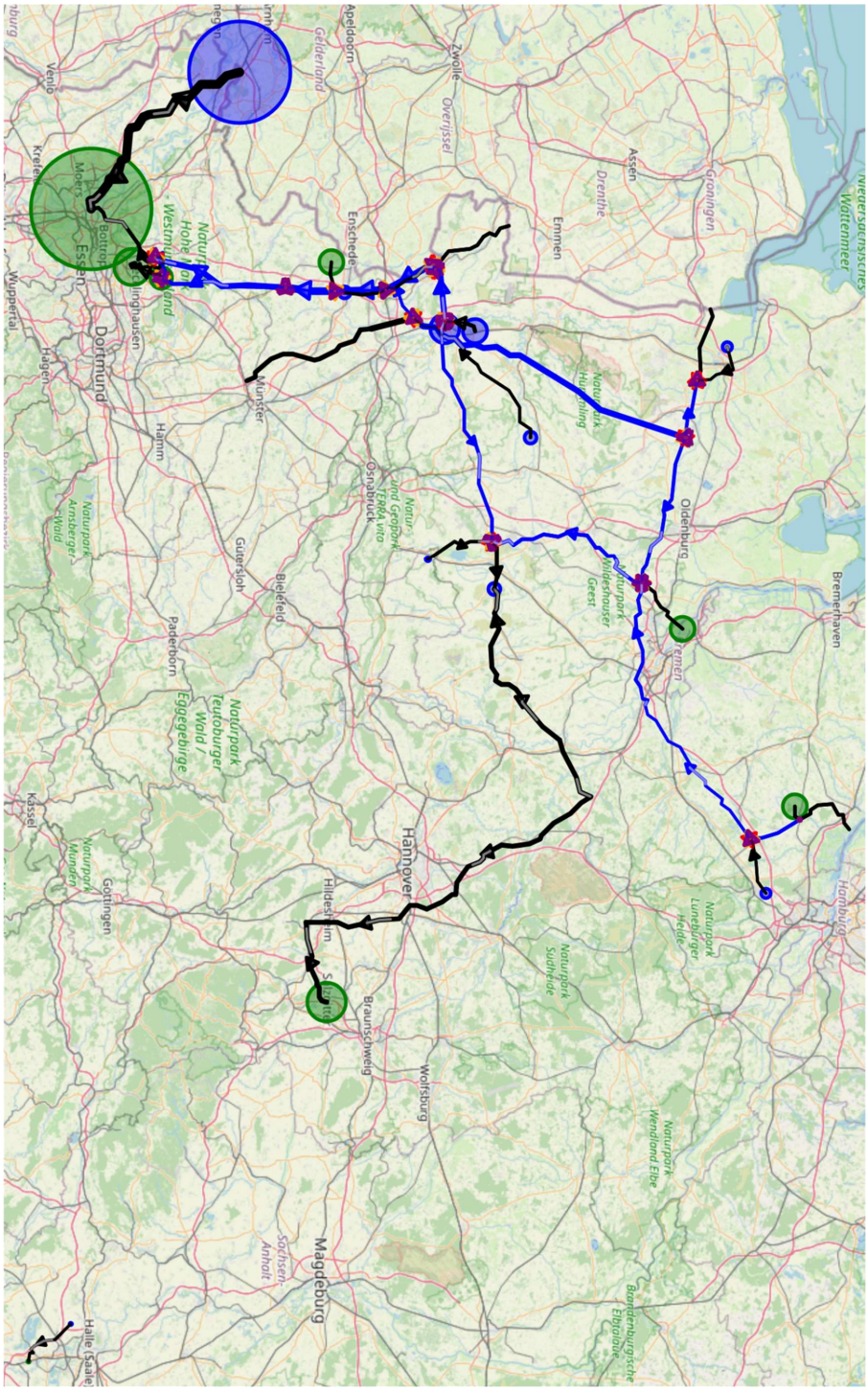


Abbildung I.8.9.2: Flüsse im 2030 Basisszenario bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

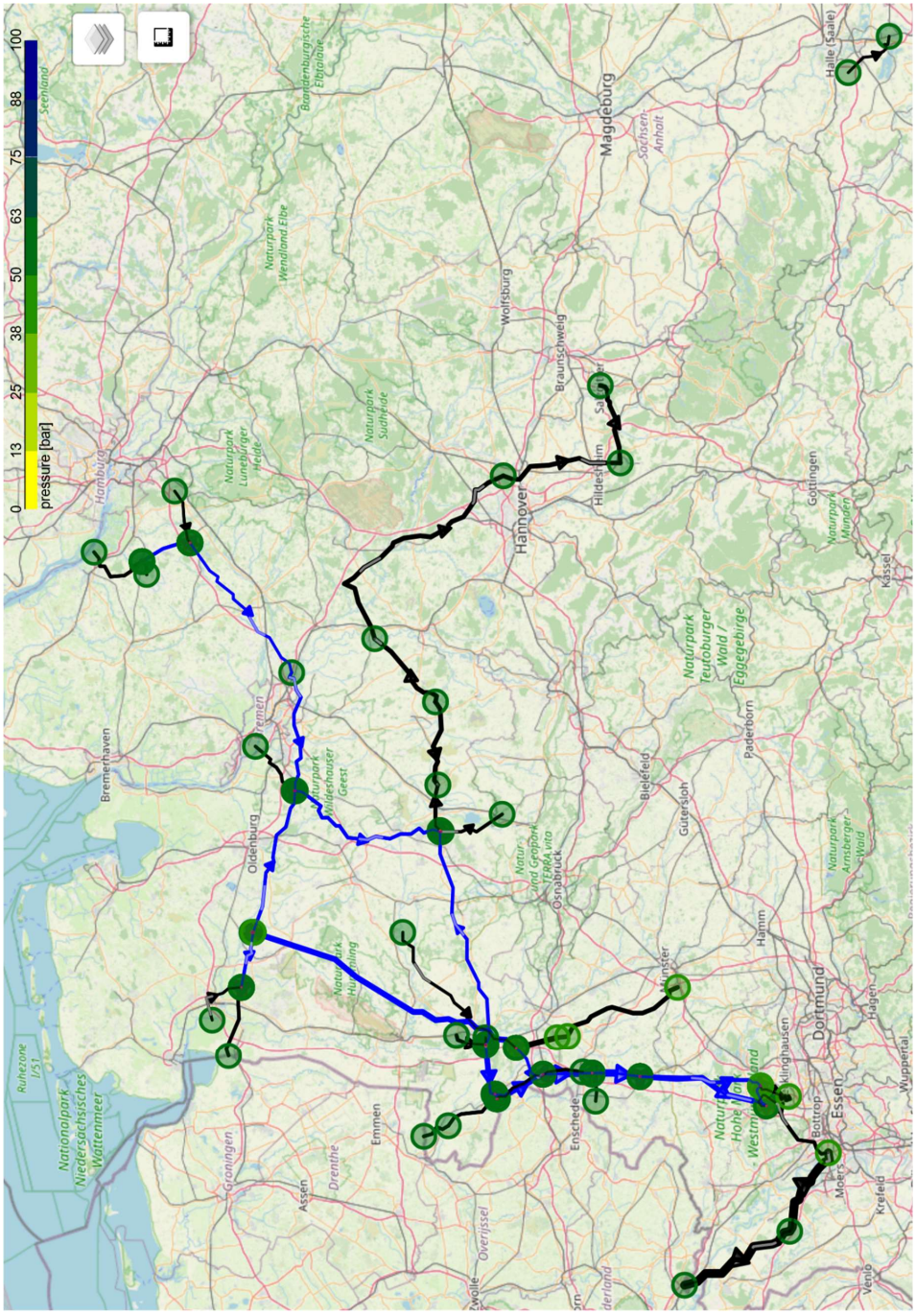


Abbildung I.8.9.3: Drücke im 2030 Basisszenario bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

Tabelle I.8.9.1: Leitungsflüsse im 2030 Basisszenario bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm.

Id	l [km]	d [mm]	q [kg/s]	v_min [m/s]	v_avg [m/s]	v_max [m/s]
Bad Lauchstädt-Leuna	20.00	500.00	0.16	0.16	0.16	0.16
Lingen-Schepsdorf	11.30	250.00	1.40	5.74	5.76	5.79
Frenswegen-Bad Bentheim	18.00	350.00	3.60	7.65	7.71	7.78
Schepsdorf-Frenswegen	18.00	450.00	2.88	3.69	3.70	3.70
Schepsdorf-Schlootdamm	72.90	600.00	0.10	0.07	0.07	0.07
Rehden-Vogtei	28.90	600.00	2.11	1.52	1.52	1.52
Vogtei-Mitte Weser	29.00	600.00	2.11	1.52	1.52	1.53
Kolshorn-Egenstedt	38.50	600.00	2.11	1.53	1.53	1.53
Mitte-Weser-Kolshorn	92.90	700.00	2.11	1.12	1.12	1.12
Emsbüren-Löningen	55.00	400.00	-0.72	1.15	1.15	1.15
Bad-Bentheim-Emsbüren	15.00	400.00	-0.72	1.15	1.15	1.15
Bad Bentheim-Ochtrup	15.30	400.00	4.32	7.14	7.18	7.22
Ochtrup-Legden	15.70	400.00	4.32	7.22	7.27	7.31
Legden-Dorsten	38.00	400.00	2.87	4.86	4.89	4.92
Rheine-Wettringen	3.50	800.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wettringen-Albachten	43.20	800.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Elten-Sonsbeck	42.30	900.00	5.58	2.11	2.11	2.11
Sonsbeck-Hamborn	34.00	500.00	5.58	6.84	6.90	6.96
Kalle-Frensdorfer Buchgraben	18.90	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Frensdorfer Buchgraben-Ochtrup	29.90	600.00	-0.72	0.51	0.51	0.51
Elbe Süd-Weissenfelde	22.10	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Achim-Heidenau	54.20	450.00	-0.53	0.67	0.67	0.67
Heidenau-Eckel	19.20	450.00	-0.53	0.67	0.67	0.67
Oude Statenzijl-Folmhusen	22.50	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Barßel-Ganderkesee	47.70	600.00	0.53	0.38	0.38	0.38
Folmhusen-Barßel	19.20	600.00	0.53	0.38	0.38	0.38
Ganderkesee-Achim	40.80	600.00	-0.53	0.38	0.38	0.38
Ganderkesee-Bremen	17.10	400.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Nüttermoor-Folmhusen	18.40	400.00	0.53	0.85	0.85	0.85
Barßel-Emsbüren	94.70	1000.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Emsbüren-Rheine	13.80	1000.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganderkesee-Schlootdamm	58.90	600.00	1.06	0.75	0.76	0.76
Frensdorfer Buchgraben-Frenswegen	1.40	600.00	0.72	0.51	0.51	0.51

Egenstedt-Hallendorf	30.00	400.00	2.11	3.44	3.45	3.45
Hamborn-Dorsten	37.00	600.00	-1.07	0.93	0.93	0.93
Epe-Ochtrup	10.00	300.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Dorsten-Marl	8.00	300.00	1.80	6.23	6.25	6.27
Vlieghuis-Kalle	6.70	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Legden-Marl	40.40	200.00	1.45	9.79	10.51	11.34
Marl-Scholven	14.00	300.00	2.00	6.96	7.01	7.06
Schepsdorf-Hanekenfähr	2.30	500.00	-1.59	1.63	1.63	1.63
Schlootdamm-Rehden	15.70	600.00	1.40	1.01	1.01	1.01
Schlootdamm-Drohne	21.50	600.00	-0.24	0.17	0.17	0.17
Weissenfelde-Heidenau	19.00	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Weissenfelde-Harsefeld	4.50	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabelle I.8.9.2: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im 2030 Basisszenario bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm.

Id	**p_in [bar]**	**p_out [bar]**	**Δp [bar]**
Bad Bentheim$_{3,in}$	59.92	58.16	1.76
Dorsten$_{3,in}$	56.05	49.11	6.94
Frenswegen$_{3,in}$	60.00	59.24	0.76
Ganderkesee$_{1,in}$	59.99	59.97	0.01
Schepsdorf$_{2,in}$	60.00	59.42	0.58
Schlootdamm$_{2,in}$	59.96	59.42	0.53
Schlootdamm$_{4,in}$	60.00	59.42	0.58

I.8.10 Variation 1 Szenario 2030: Rohrrauigkeit: 1 mm, max. Druck: 30 bar

Tabelle I.8.10.1: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im Variation 1 Szenario 2030

Id	p [bar]	q [kg/s]
Quellen		
Elten	30.00	2.11
Lingen	30.00	1.40
Löningen	30.00	0.72
Nüttermoor	30.00	0.53
Eckel	30.00	0.53
Drohne	30.00	0.24
Rehden	27.51	0.72
Hanekenfähr	30.00	1.59
Bad Lauchstädt	30.00	0.16
Ochtrup (city)	30.00	0.72
Senken		
Hamborn	29.61	0.00
Scholven	20.87	2.00
Epe	26.08	1.07
Bremen	27.11	1.59
Hallendorf	25.70	2.11
Leuna	30.00	0.16
Marl	23.53	1.25
Harsefeld	29.98	0.53

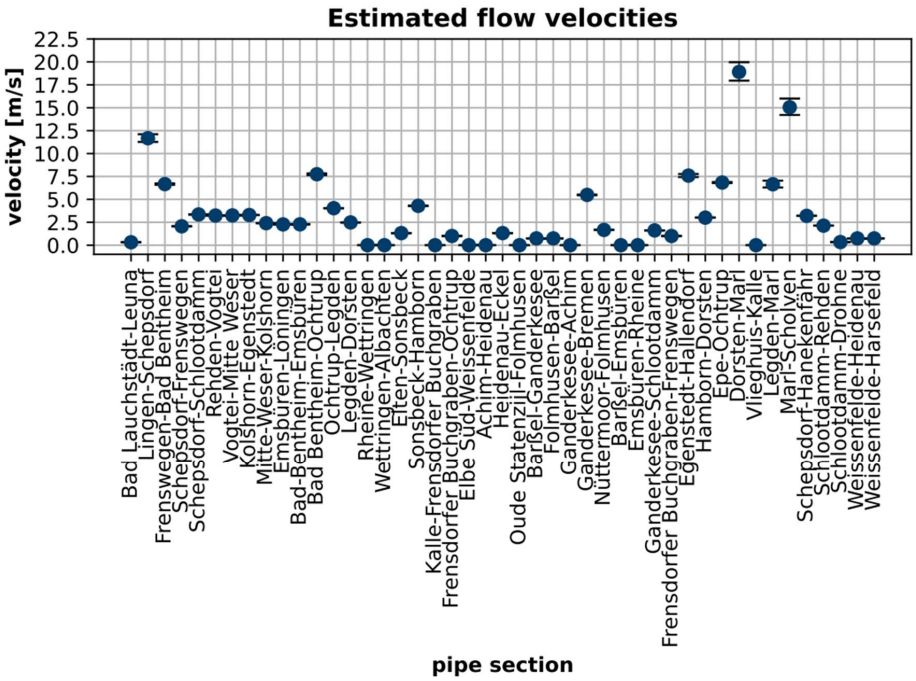


Abbildung I.8.10.1: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im Variation 1 Szenario 2030 (durchschnittlich) bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an.

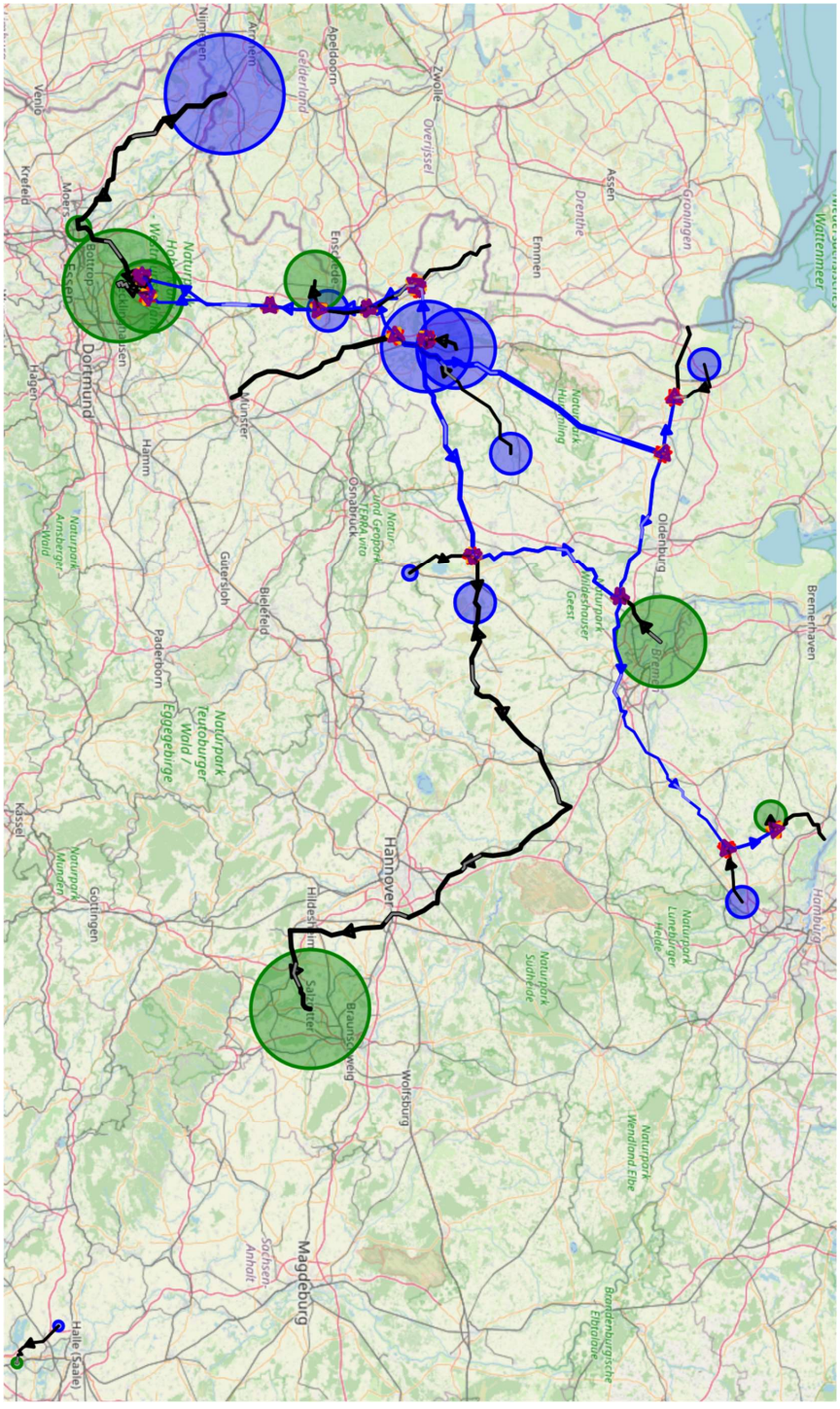


Abbildung I.8.10.2: Flüsse im Variation 1 Szenario 2030 bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

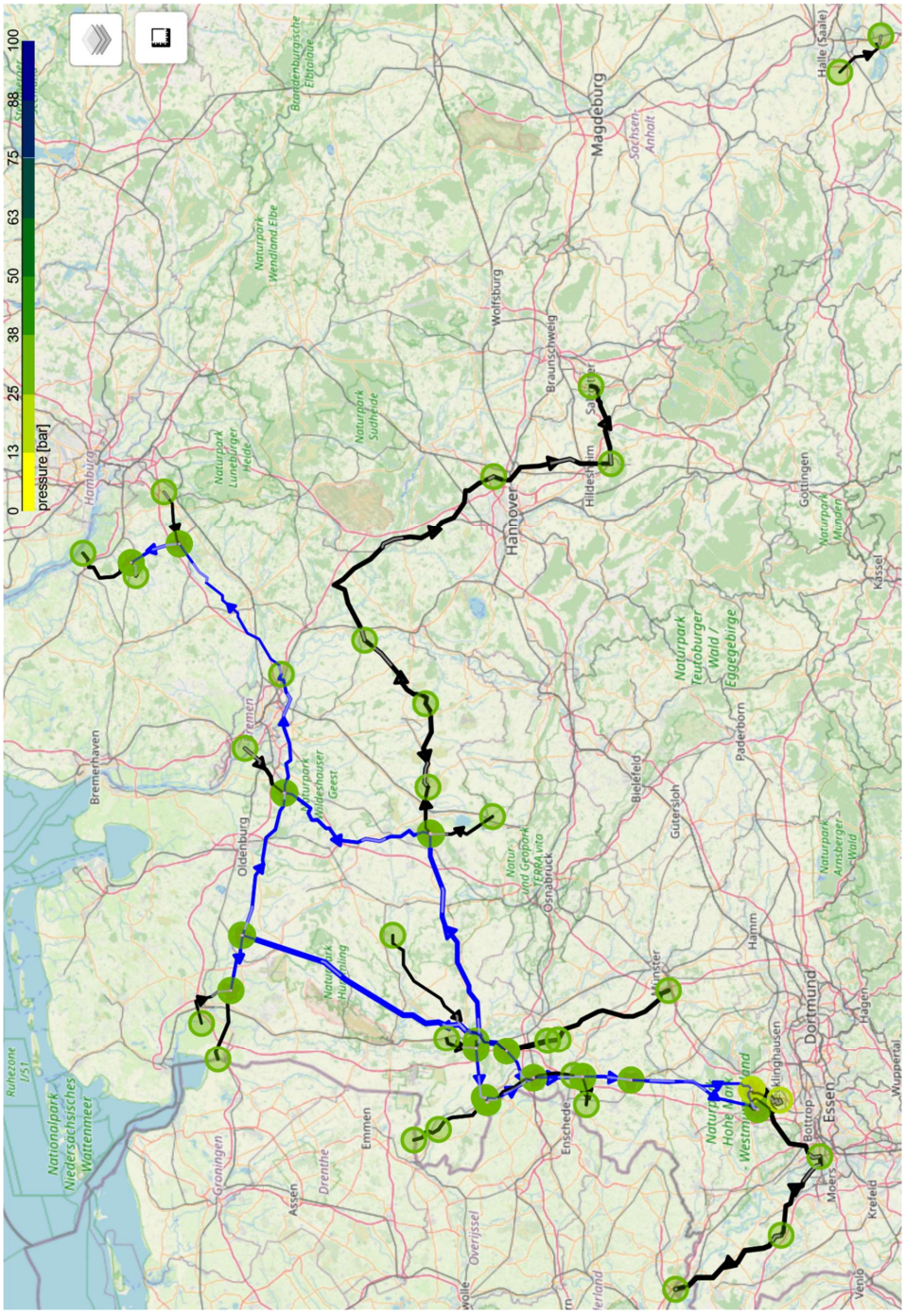


Abbildung I.8.10.3: Drücke im Variation 1 Szenario 2030 bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

Tabelle I.8.10.2: Leitungsflüsse im Variation 1 Szenario 2030 bei einem Rohrrauigkeitswert von 1 mm.

Id	l [km]	d [mm]	q [kg/s]	v_min [m/s]	v_avg [m/s]	v_max [m/s]
Bad Lauchstädt-Leuna	20.00	500.00	0.16	0.32	0.32	0.32
Lingen-Schepsdorf	11.30	250.00	1.40	11.27	11.67	12.11
Frenswegen-Bad Bentheim	18.00	350.00	1.49	6.59	6.67	6.75
Schepsdorf-Frenswegen	18.00	450.00	0.77	2.06	2.06	2.06
Schepsdorf-Schlootdamm	72.90	600.00	2.21	3.33	3.35	3.37
Rehden-Vogtei	28.90	600.00	2.11	3.23	3.24	3.24
Vogtei-Mitte Weser	29.00	600.00	2.11	3.24	3.25	3.26
Kolshorn-Egenstedt	38.50	600.00	2.11	3.28	3.29	3.30
Mitte-Weser-Kolshorn	92.90	700.00	2.11	2.39	2.40	2.41
Emsbüren-Löningen	55.00	400.00	-0.72	2.26	2.27	2.28
Bad-Bentheim-Emsbüren	15.00	400.00	-0.72	2.28	2.28	2.28
Bad Bentheim-Ochtrup	15.30	400.00	2.20	7.66	7.74	7.84
Ochtrup-Legden	15.70	400.00	1.13	4.02	4.04	4.05
Legden-Dorsten	38.00	400.00	0.69	2.48	2.48	2.49
Rheine-Wettringen	3.50	800.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wettringen-Albachten	43.20	800.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Elten-Sonsbeck	42.30	900.00	2.11	1.32	1.32	1.32
Sonsbeck-Hamborn	34.00	500.00	2.11	4.27	4.29	4.32
Kalle-Frensdorfer Buchgraben	18.90	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Frensdorfer Buchgraben-Ochtrup	29.90	600.00	-0.72	1.00	1.00	1.00
Elbe Süd-Weissenfelde	22.10	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Achim-Heidenau	54.20	450.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heidenau-Eckel	19.20	450.00	-0.53	1.32	1.32	1.32
Oude Statenzijl-Folmhusen	22.50	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Barßel-Ganderkesee	47.70	600.00	0.53	0.74	0.74	0.74
Folmhusen-Barßel	19.20	600.00	0.53	0.74	0.74	0.74
Ganderkesee-Achim	40.80	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganderkesee-Bremen	17.10	400.00	1.59	5.45	5.49	5.53
Nüttermoor-Folmhusen	18.40	400.00	0.53	1.67	1.67	1.67
Barßel-Emsbüren	94.70	1000.00	-0.00	0.00	0.00	0.00
Emsbüren-Rheine	13.80	1000.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganderkesee-Schlootdamm	58.90	600.00	-1.06	1.61	1.61	1.62
Frensdorfer Buchgraben-Frenswegen	1.40	600.00	0.72	1.00	1.00	1.00

Egenstedt-Hallendorf	30.00	400.00	2.11	7.43	7.59	7.77
Hamborn-Dorsten	37.00	600.00	2.11	3.00	3.01	3.01
Epe-Ochtrup	10.00	300.00	-1.07	6.78	6.83	6.89
Dorsten-Marl	8.00	300.00	2.80	17.96	18.91	19.97
Vlieghuis-Kalle	6.70	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Legden-Marl	40.40	200.00	0.44	6.30	6.65	7.04
Marl-Scholven	14.00	300.00	2.00	14.21	15.05	16.00
Schepsdorf-Hanekenfähr	2.30	500.00	-1.59	3.20	3.20	3.20
Schlootdamm-Rehden	15.70	600.00	1.40	2.13	2.13	2.13
Schlootdamm-Drohne	21.50	600.00	-0.24	0.34	0.34	0.34
Weissenfelde-Heidenau	19.00	600.00	-0.53	0.74	0.74	0.74
Weissenfelde-Harsefeld	4.50	600.00	0.53	0.74	0.74	0.74

Tabelle I.8.10.3: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im Variation 1 Szenario 2030 bei 30 bar, 1 mm Rohrrauigkeit.

Id	**p_in [bar]**	**p_out [bar]**	**Δp [bar]**
Bad Bentheim$_{3,in}$	29.73	27.18	2.55
Dorsten$_{2,in}$	29.46	26.21	3.25
Frenswegen$_{3,in}$	29.99	27.84	2.15
Ganderkesee$_{1,in}$	29.95	27.48	2.47
Ganderkesee$_{3,in}$	30.00	27.48	2.52
Heidenau$_{3,in}$	30.00	29.98	0.02
Schepsdorf$_{2,in}$	29.99	27.88	2.10
Schlootdamm$_{4,in}$	30.00	27.53	2.46

I.8.11 Variation 1 Szenario 2030: Rohrrauigkeit: 0,1 mm, max. Druck: 30 bar

Tabelle I.8.11.1: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im Variation 1 Szenario 2030

Id	p [bar]	q [kg/s]
Quellen		
Elten	30.00	2.11
Lingen	30.00	1.40
Löningen	30.00	0.72
Nüttermoor	30.00	0.53
Eckel	30.00	0.53
Drohne	30.00	0.24
Rehden	28.71	0.72
Hanekenfähr	30.00	1.59
Bad Lauchstädt	30.00	0.16
Ochtrup (city)	30.00	0.72
Senken		
Hamborn	29.77	0.00
Scholven	27.87	2.00
Epe	27.47	1.07
Bremen	28.52	1.59
Hallendorf	27.72	2.11
Leuna	30.00	0.16
Marl	11.95	1.25
Harsefeld	29.99	0.53

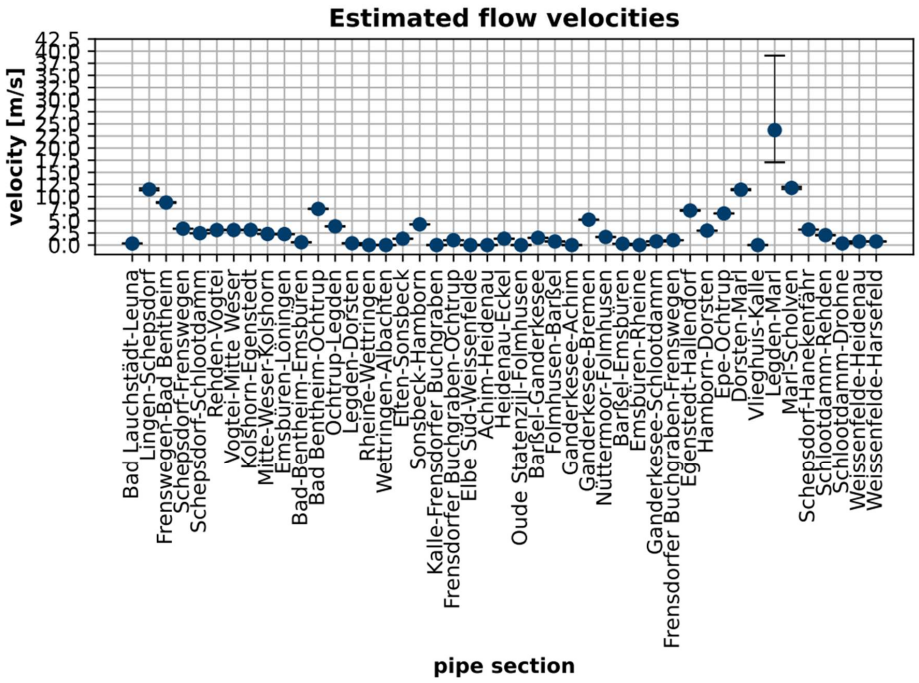


Abbildung I.8.11.1: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im Variation 1 Szenario 2030 (durchschnittlich) bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an.

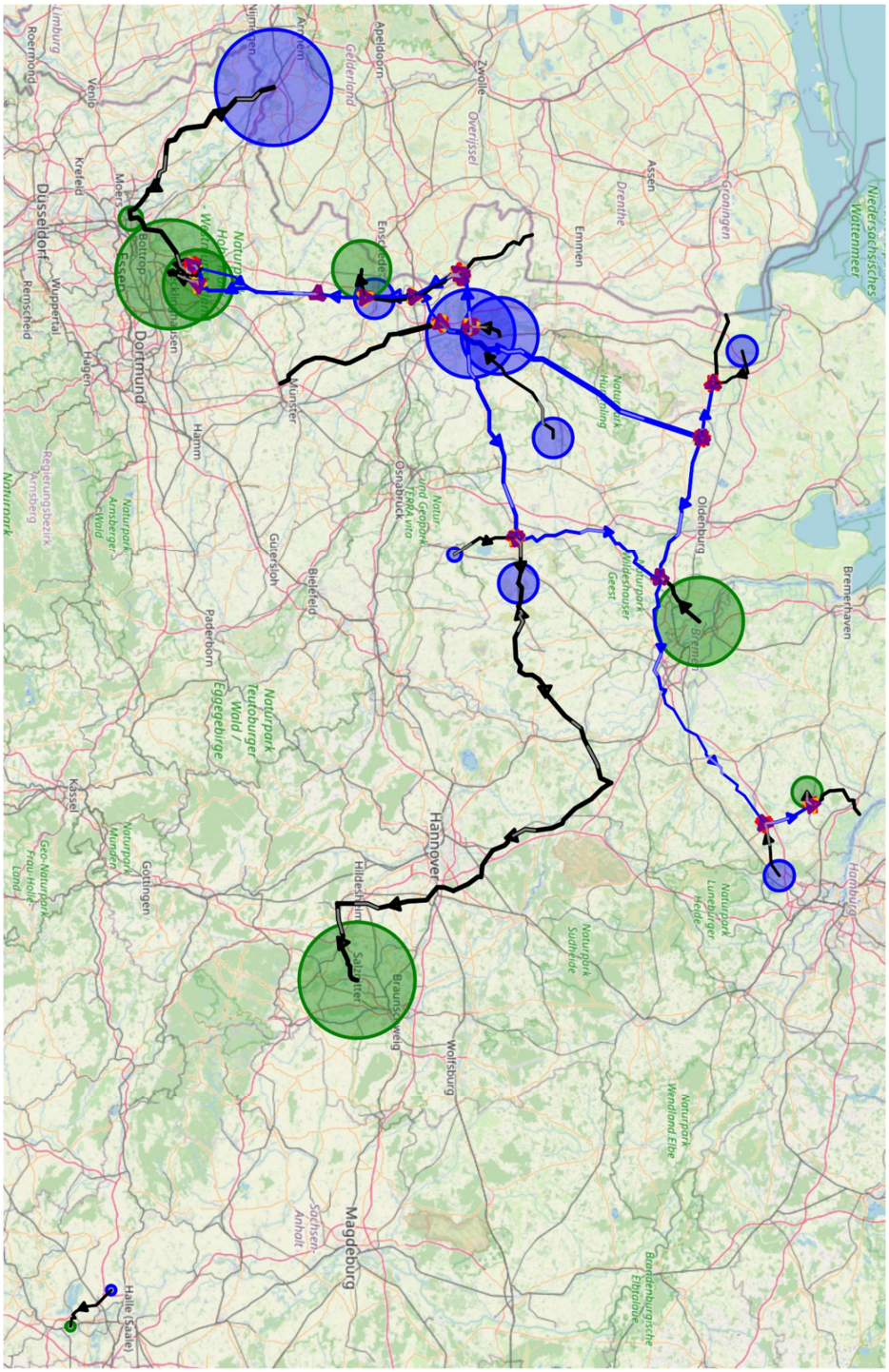


Abbildung I.8.11.2: Flüsse im Variation 1 Szenario 2030 bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

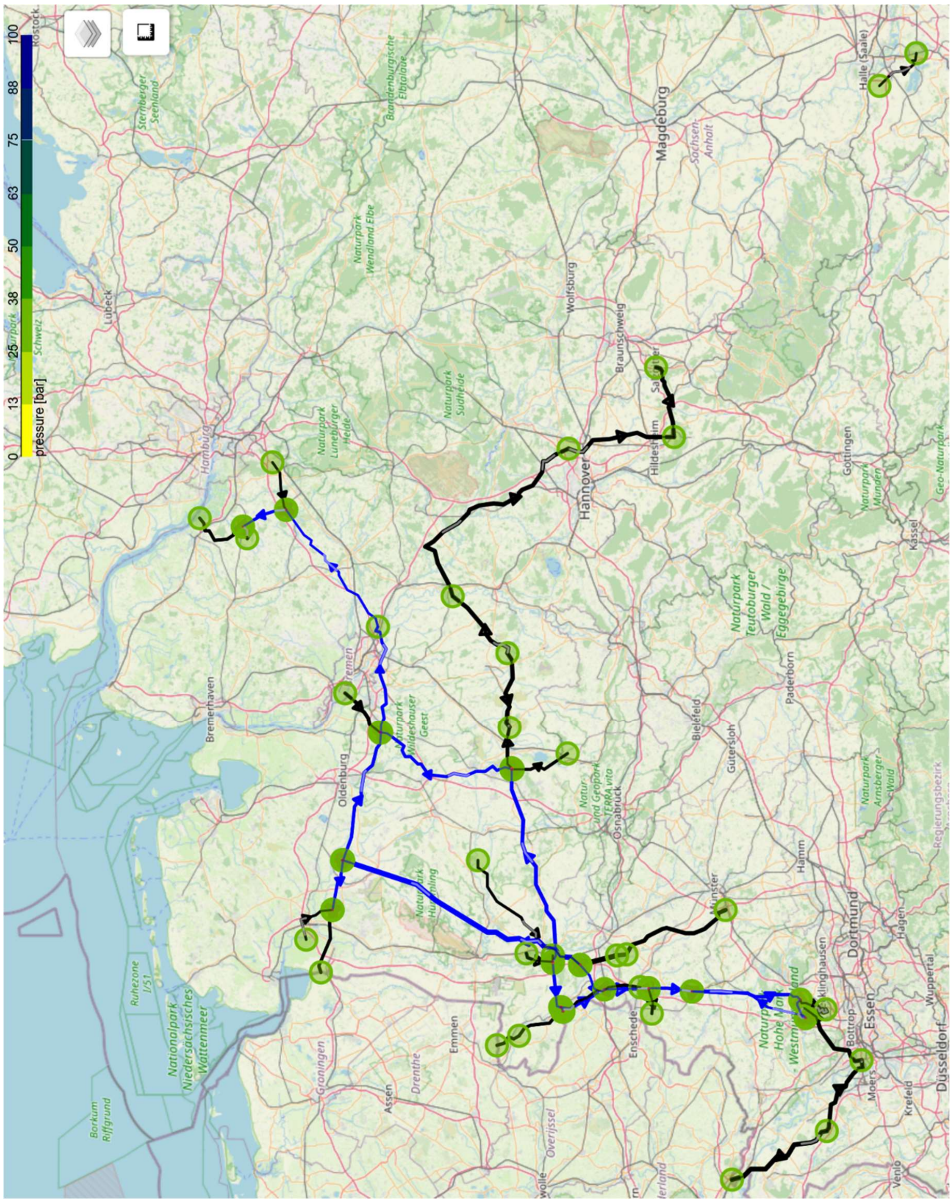


Abbildung I.8.11.3: Drücke im Variation 1 Szenario 2030 bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

Tabelle I.8.11.2: Leitungsflüsse im Variation 1 Szenario 2030 bei einem Rohrrauigkeitswert von 0,1 mm.

Id	l [km]	d [mm]	q [kg/s]	v_min [m/s]	v_avg [m/s]	v_max [m/s]
Bad Lauchstädt-Leuna	20.00	500.00	0.16	0.32	0.32	0.32
Lingen-Schepsdorf	11.30	250.00	1.40	11.27	11.49	11.72
Frenswegen-Bad Bentheim	18.00	350.00	2.02	8.68	8.78	8.89
Schepsdorf-Frenswegen	18.00	450.00	1.30	3.38	3.38	3.39
Schepsdorf-Schlootdamm	72.90	600.00	1.68	2.44	2.45	2.45
Rehden-Vogtei	28.90	600.00	2.11	3.10	3.10	3.10
Vogtei-Mitte Weser	29.00	600.00	2.11	3.10	3.11	3.11
Kolshorn-Egenstedt	38.50	600.00	2.11	3.12	3.13	3.13
Mitte-Weser-Kolshorn	92.90	700.00	2.11	2.29	2.29	2.29
Emsbüren-Löningen	55.00	400.00	-0.72	2.26	2.26	2.27
Bad-Bentheim-Emsbüren	15.00	400.00	-0.18	0.58	0.58	0.58
Bad Bentheim-Ochtrup	15.30	400.00	2.20	7.42	7.46	7.51
Ochtrup-Legden	15.70	400.00	1.13	3.86	3.86	3.87
Legden-Dorsten	38.00	400.00	-0.12	0.37	0.37	0.37
Rheine-Wettringen	3.50	800.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wettringen-Albachten	43.20	800.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Elten-Sonsbeck	42.30	900.00	2.11	1.32	1.32	1.32
Sonsbeck-Hamborn	34.00	500.00	2.11	4.27	4.28	4.30
Kalle-Frensdorfer Buchgraben	18.90	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Frensdorfer Buchgraben-Ochtrup	29.90	600.00	-0.72	1.00	1.00	1.00
Elbe Süd-Weissenfelde	22.10	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Achim-Heidenau	54.20	450.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heidenau-Eckel	19.20	450.00	-0.53	1.32	1.32	1.32
Oude Statenzijl-Folmhusen	22.50	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Barßel-Ganderkesee	47.70	600.00	1.06	1.50	1.50	1.50
Folmhusen-Barßel	19.20	600.00	0.53	0.74	0.74	0.74
Ganderkesee-Achim	40.80	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganderkesee-Bremen	17.10	400.00	1.59	5.22	5.24	5.26
Nüttermoor-Folmhusen	18.40	400.00	0.53	1.67	1.67	1.67
Barßel-Emsbüren	94.70	1000.00	-0.53	0.27	0.27	0.27
Emsbüren-Rheine	13.80	1000.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganderkesee-Schlootdamm	58.90	600.00	-0.52	0.76	0.76	0.76
Frensdorfer Buchgraben-Frenswegen	1.40	600.00	0.72	1.00	1.00	1.00

Egenstedt-Hallendorf	30.00	400.00	2.11	7.05	7.13	7.21
Hamborn-Dorsten	37.00	600.00	2.11	2.98	2.99	2.99
Epe-Ochtrup	10.00	300.00	-1.07	6.49	6.52	6.55
Dorsten-Marl	8.00	300.00	2.00	11.31	11.43	11.55
Vlieghuis-Kalle	6.70	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Legden-Marl	40.40	200.00	1.25	17.07	23.72	39.08
Marl-Scholven	14.00	300.00	2.00	11.55	11.79	12.03
Schepsdorf-Hanekenfähr	2.30	500.00	-1.59	3.20	3.20	3.20
Schlootdamm-Rehden	15.70	600.00	1.40	2.05	2.05	2.05
Schlootdamm-Drohne	21.50	600.00	-0.24	0.34	0.34	0.34
Weissenfelde-Heidenau	19.00	600.00	-0.53	0.74	0.74	0.74
Weissenfelde-Harsefeld	4.50	600.00	0.53	0.74	0.74	0.74

Tabelle I.8.11.3: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im Variation 1 Szenario 2030 bei 30 bar, 0,1 mm Rohrrauigkeit.

Id	**p_in [bar]**	**p_out [bar]**	**Δp [bar]**
Bad Bentheim$_{3,in}$	29.88	28.07	1.80
Barssel$_{1,in}$	29.98	29.87	0.10
Frenswegen$_{3,in}$	29.99	28.76	1.23
Ganderkesee$_{1,in}$	29.85	28.72	1.13
Ganderkesee$_{3,in}$	30.00	28.72	1.28
Heidenau$_{3,in}$	30.00	29.99	0.01
Legden$_{3,in}$	29.70	27.62	2.08
Schepsdorf$_{2,in}$	29.99	28.84	1.16
Schlootdamm$_{4,in}$	30.00	28.73	1.27

I.8.12 Variation 1 Szenario 2030: Rohrrauigkeit: 1 mm, max. Druck: 60 bar

Tabelle I.8.12.1: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im Variation 1 Szenario 2030

Id	p [bar]	q [kg/s]
Quellen		
Elten	50.01	2.11
Lingen	60.00	1.40
Löningen	60.00	0.72
Nüttermoor	60.00	0.53
Eckel	60.00	0.53
Drohne	60.00	0.24
Rehden	58.78	0.72
Hanekenfähr	60.00	1.59
Bad Lauchstädt	60.00	0.16
Ochtrup (city)	60.00	0.72
Senken		
Hamborn	49.78	0.00
Scholven	47.69	2.00
Epe	58.12	1.07
Bremen	58.60	1.59
Hallendorf	57.95	2.11
Leuna	60.00	0.16
Marl	48.92	1.25
Harsefeld	59.99	0.53

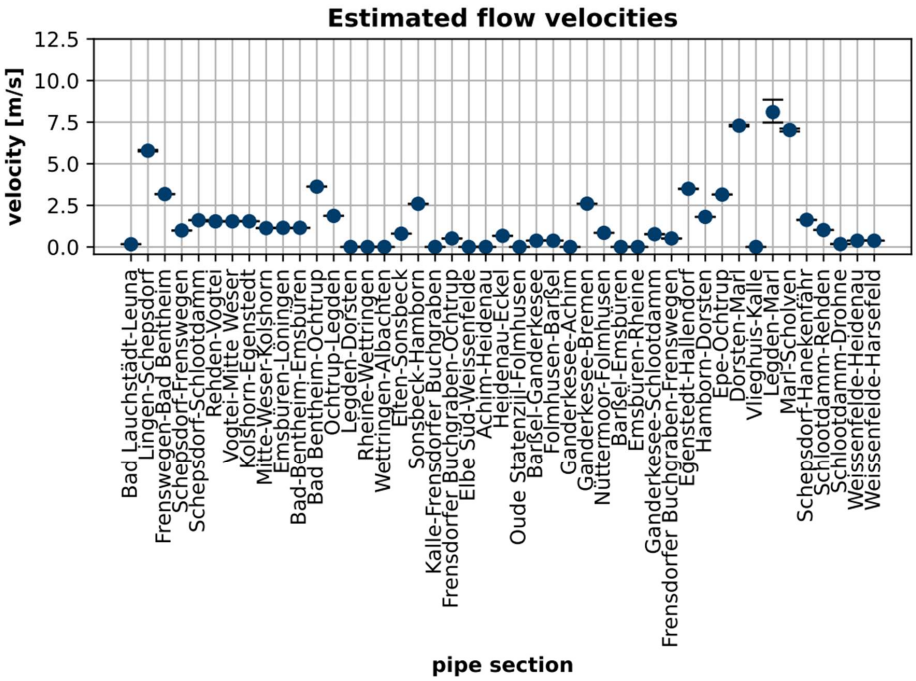


Abbildung I.8.12.1: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im Variation 1 Szenario 2030 (durchschnittlich) bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an.

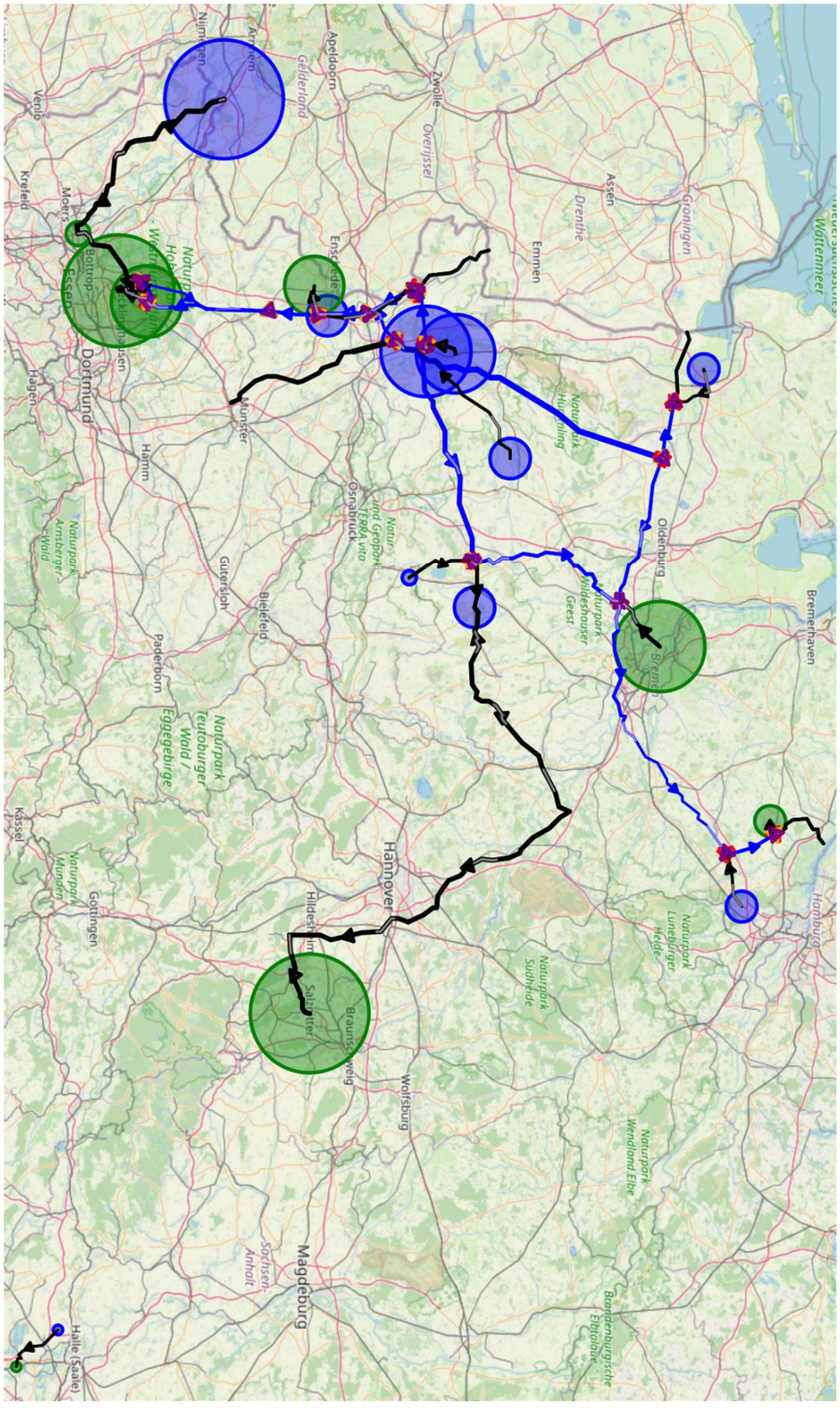


Abbildung I.8.12.2: Flüsse im Variation 1 Szenario 2030 bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

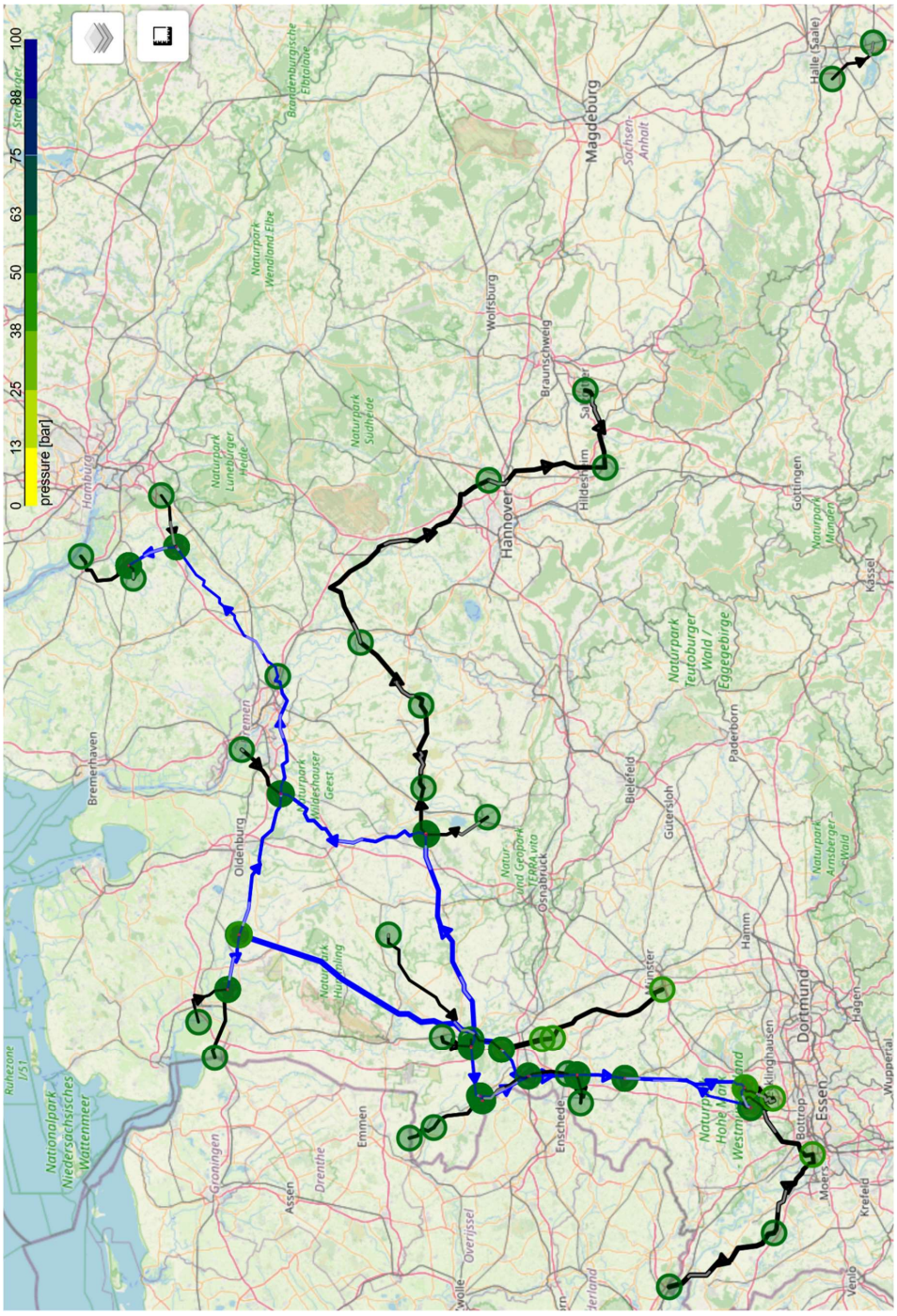


Abbildung I.8.12.3: Drücke im Variation 1 Szenario 2030 bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

Tabelle I.8.12.2: Leitungsflüsse im Variation 1 Szenario 2030 bei 60 bar Maximaldruck und einem Rohrrauigkeitswert von 1 mm.

Id	l [km]	d [mm]	q [kg/s]	v_min [m/s]	v_avg [m/s]	v_max [m/s]
Bad Lauchstädt-Leuna	20.00	500.00	0.16	0.16	0.16	0.16
Lingen-Schepsdorf	11.30	250.00	1.40	5.74	5.79	5.83
Frenswegen-Bad Bentheim	18.00	350.00	1.49	3.17	3.18	3.19
Schepsdorf-Frenswegen	18.00	450.00	0.77	0.99	0.99	0.99
Schepsdorf-Schlootdamm	72.90	600.00	2.21	1.61	1.61	1.61
Rehden-Vogtei	28.90	600.00	2.11	1.54	1.54	1.54
Vogtei-Mitte Weser	29.00	600.00	2.11	1.54	1.54	1.54
Kolshorn-Egenstedt	38.50	600.00	2.11	1.54	1.55	1.55
Mitte-Weser-Kolshorn	92.90	700.00	2.11	1.13	1.13	1.13
Emsbüren-Löningen	55.00	400.00	-0.72	1.15	1.15	1.15
Bad-Bentheim-Emsbüren	15.00	400.00	-0.72	1.15	1.15	1.15
Bad Bentheim-Ochtrup	15.30	400.00	2.20	3.62	3.63	3.64
Ochtrup-Legden	15.70	400.00	1.13	1.87	1.87	1.87
Legden-Dorsten	38.00	400.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Rheine-Wettringen	3.50	800.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wettringen-Albachten	43.20	800.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Elten-Sonsbeck	42.30	900.00	2.11	0.80	0.80	0.80
Sonsbeck-Hamborn	34.00	500.00	2.11	2.59	2.60	2.60
Kalle-Frensdorfer Buchgraben	18.90	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Frensdorfer Buchgraben-Ochtrup	29.90	600.00	-0.72	0.51	0.51	0.51
Elbe Süd-Weissenfelde	22.10	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Achim-Heidenau	54.20	450.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heidenau-Eckel	19.20	450.00	-0.53	0.67	0.67	0.67
Oude Statenzijl-Folmhusen	22.50	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Barßel-Ganderkesee	47.70	600.00	0.53	0.38	0.38	0.38
Folmhusen-Barßel	19.20	600.00	0.53	0.38	0.38	0.38
Ganderkesee-Achim	40.80	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganderkesee-Bremen	17.10	400.00	1.59	2.60	2.60	2.61
Nüttermoor-Folmhusen	18.40	400.00	0.53	0.85	0.85	0.85
Barßel-Emsbüren	94.70	1000.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Emsbüren-Rheine	13.80	1000.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganderkesee-Schlootdamm	58.90	600.00	-1.06	0.77	0.77	0.77
Frensdorfer Buchgraben-Frenswegen	1.40	600.00	0.72	0.51	0.51	0.51

Egenstedt-Hallendorf	30.00	400.00	2.11	3.48	3.50	3.51
Hamborn-Dorsten	37.00	600.00	2.11	1.81	1.81	1.81
Epe-Ochtrup	10.00	300.00	-1.07	3.14	3.15	3.15
Dorsten-Marl	8.00	300.00	2.11	7.24	7.29	7.35
Vlieghuis-Kalle	6.70	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Legden-Marl	40.40	200.00	1.13	7.48	8.11	8.85
Marl-Scholven	14.00	300.00	2.00	6.94	7.03	7.12
Schepsdorf-Hanekenfähr	2.30	500.00	-1.59	1.63	1.63	1.63
Schlootdamm-Rehden	15.70	600.00	1.40	1.02	1.02	1.02
Schlootdamm-Drohne	21.50	600.00	-0.24	0.17	0.17	0.17
Weissenfelde-Heidenau	19.00	600.00	-0.53	0.38	0.38	0.38
Weissenfelde-Harsefeld	4.50	600.00	0.53	0.38	0.38	0.38

Tabelle I.8.12.3: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im Variation 1 Szenario 2030 bei 60 bar, 1 mm Rohrrauigkeit.

Id	p_in [bar]	p_out [bar]	Δp [bar]
Bad Bentheim$_{3,in}$	59.86	58.62	1.24
Frenswegen$_{3,in}$	59.99	58.94	1.05
Ganderkesee$_{1,in}$	59.97	58.77	1.21
Ganderkesee$_{3,in}$	60.00	58.77	1.23
Heidenau$_{3,in}$	60.00	59.99	0.01
Schepsdorf$_{2,in}$	59.99	58.96	1.03
Schlootdamm$_{4,in}$	60.00	58.80	1.20

I.8.13 Variation 1 Szenario 2030: Rohrrauigkeit: 0,1 mm, max. Druck: 60 bar

Tabelle I.8.13.1: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im Variation 1 Szenario 2030 bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm.

Id	p [bar]	q [kg/s]
Quellen		
Elten	50.01	2.11
Lingen	60.00	1.40
Löningen	60.00	0.72
Nüttermoor	60.00	0.53
Eckel	60.00	0.53
Drohne	60.00	0.24
Rehden	59.32	0.72
Hanekenfähr	60.00	1.59
Bad Lauchstädt	60.00	0.16
Ochtrup (city)	60.00	0.72
Senken		
Hamborn	49.87	0.00
Scholven	48.70	2.00
Epe	58.94	1.07
Bremen	59.21	1.59
Hallendorf	58.84	2.11
Leuna	60.00	0.16
Marl	49.39	1.25
Harsefeld	59.99	0.53

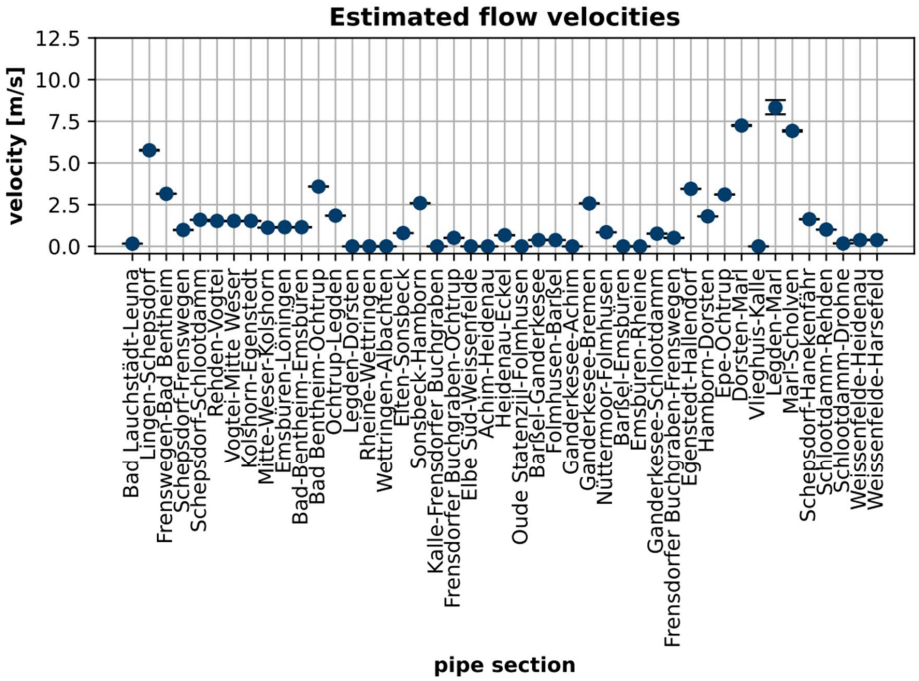


Abbildung I.8.13.1: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im Variation 1 Szenario 2030 (durchschnittlich) bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am - austritt an.

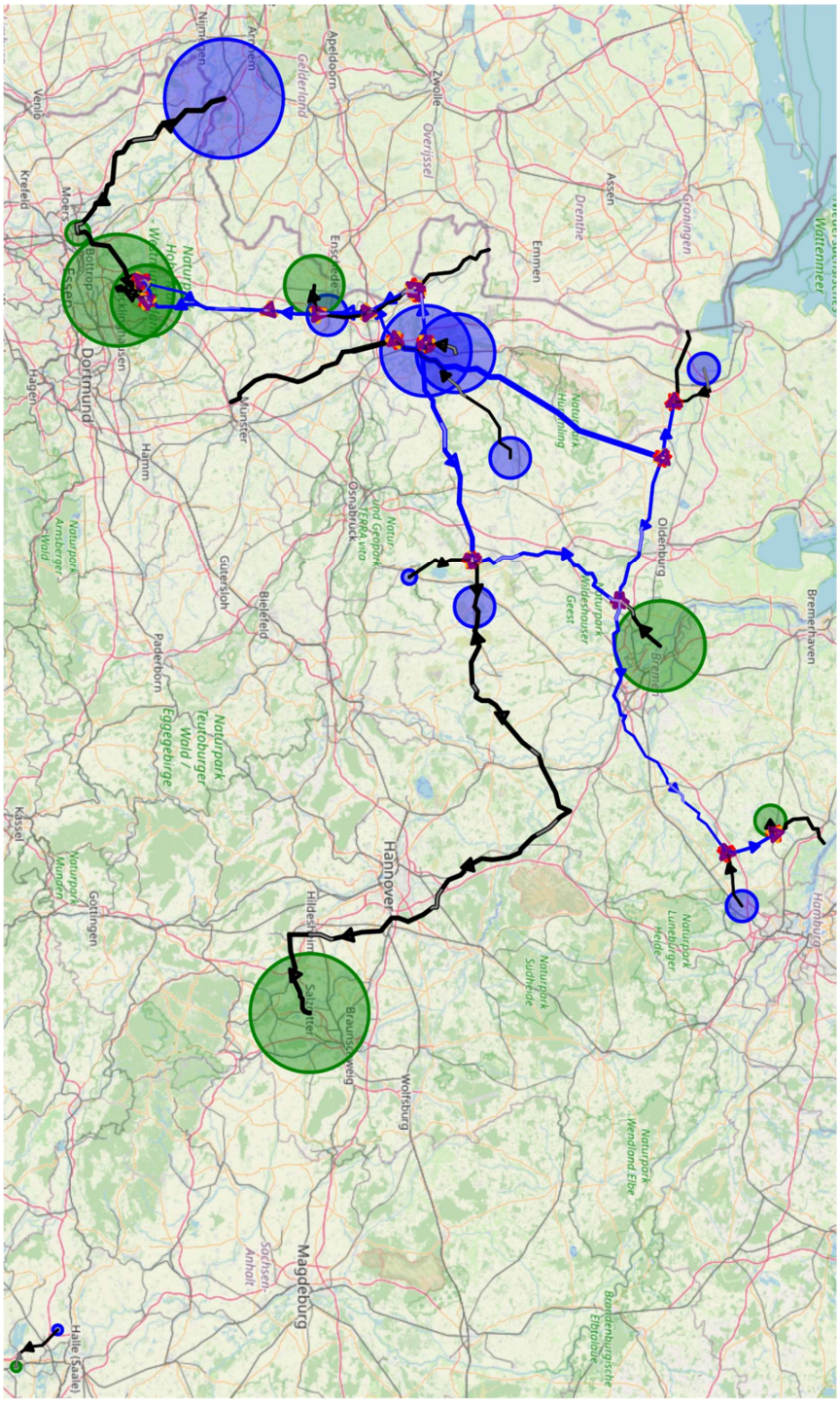


Abbildung I.8.13.2: Flüsse im Variation 1 Szenario 2030 bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

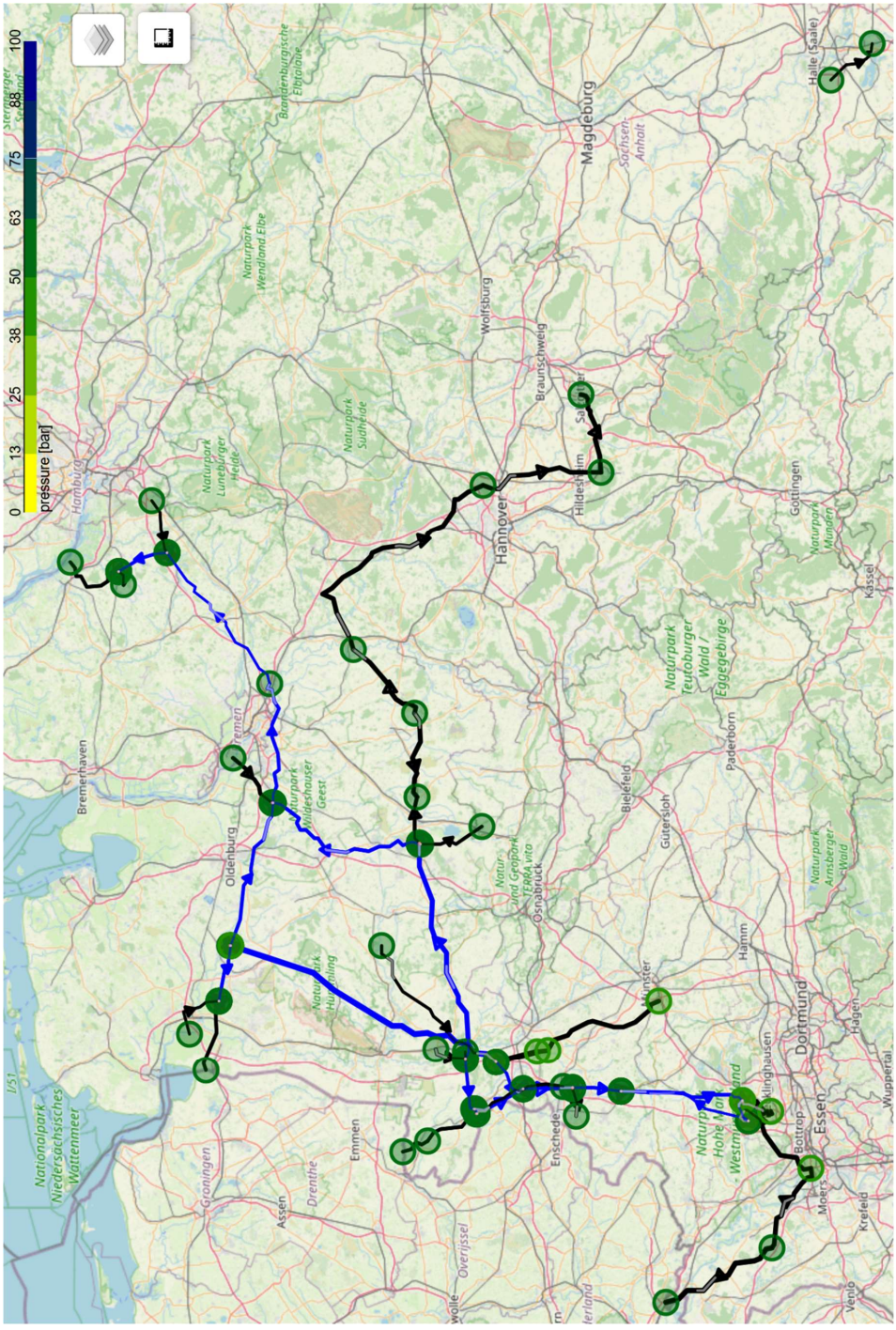


Abbildung I.8.13.3: Drücke im Variation 1 Szenario 2030 bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

Tabelle I.8.13.2: Leitungsflüsse im Variation 1 Szenario 2030 bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm.

Id	l [km]	d [mm]	q [kg/s]	v_min [m/s]	v_avg [m/s]	v_max [m/s]
Bad Lauchstädt-Leuna	20.00	500.00	0.16	0.16	0.16	0.16
Lingen-Schepsdorf	11.30	250.00	1.40	5.74	5.76	5.79
Frenswegen-Bad Bentheim	18.00	350.00	1.49	3.15	3.15	3.16
Schepsdorf-Frenswegen	18.00	450.00	0.77	0.99	0.99	0.99
Schepsdorf-Schlootdamm	72.90	600.00	2.21	1.59	1.59	1.60
Rehden-Vogtei	28.90	600.00	2.11	1.53	1.53	1.53
Vogtei-Mitte Weser	29.00	600.00	2.11	1.53	1.53	1.53
Kolshorn-Egenstedt	38.50	600.00	2.11	1.53	1.53	1.53
Mitte-Weser-Kolshorn	92.90	700.00	2.11	1.12	1.12	1.12
Emsbüren-Löningen	55.00	400.00	-0.72	1.15	1.15	1.15
Bad-Bentheim-Emsbüren	15.00	400.00	-0.72	1.15	1.15	1.15
Bad Bentheim-Ochtrup	15.30	400.00	2.20	3.58	3.59	3.59
Ochtrup-Legden	15.70	400.00	1.13	1.84	1.85	1.85
Legden-Dorsten	38.00	400.00	-0.00	0.00	0.00	0.00
Rheine-Wettringen	3.50	800.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wettringen-Albachten	43.20	800.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Elten-Sonsbeck	42.30	900.00	2.11	0.80	0.80	0.80
Sonsbeck-Hamborn	34.00	500.00	2.11	2.59	2.59	2.60
Kalle-Frensdorfer Buchgraben	18.90	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Frensdorfer Buchgraben-Ochtrup	29.90	600.00	-0.72	0.51	0.51	0.51
Elbe Süd-Weissenfelde	22.10	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Achim-Heidenau	54.20	450.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heidenau-Eckel	19.20	450.00	-0.53	0.67	0.67	0.67
Oude Statenzijl-Folmhusen	22.50	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Barßel-Ganderkesee	47.70	600.00	0.53	0.38	0.38	0.38
Folmhusen-Barßel	19.20	600.00	0.53	0.38	0.38	0.38
Ganderkesee-Achim	40.80	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganderkesee-Bremen	17.10	400.00	1.59	2.58	2.58	2.58
Nüttermoor-Folmhusen	18.40	400.00	0.53	0.85	0.85	0.85
Barßel-Emsbüren	94.70	1000.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Emsbüren-Rheine	13.80	1000.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganderkesee-Schlootdamm	58.90	600.00	-1.06	0.76	0.76	0.76
Frensdorfer Buchgraben-Frenswegen	1.40	600.00	0.72	0.51	0.51	0.51

Egenstedt-Hallendorf	30.00	400.00	2.11	3.44	3.45	3.46
Hamborn-Dorsten	37.00	600.00	2.11	1.80	1.80	1.80
Epe-Ochtrup	10.00	300.00	-1.07	3.11	3.11	3.11
Dorsten-Marl	8.00	300.00	2.11	7.22	7.25	7.28
Vlieghuis-Kalle	6.70	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Legden-Marl	40.40	200.00	1.13	7.92	8.32	8.77
Marl-Scholven	14.00	300.00	2.00	6.88	6.93	6.97
Schepsdorf-Hanekenfähr	2.30	500.00	-1.59	1.63	1.63	1.63
Schlootdamm-Rehden	15.70	600.00	1.40	1.01	1.01	1.01
Schlootdamm-Drohne	21.50	600.00	-0.24	0.17	0.17	0.17
Weissenfelde-Heidenau	19.00	600.00	-0.53	0.38	0.38	0.38
Weissenfelde-Harsefeld	4.50	600.00	0.53	0.38	0.38	0.38

Tabelle I.8.13.3: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im Variation 1 Szenario 2030 bei 60 bar, 0,1 mm Rohrrauigkeit.

Id	**p_in [bar]**	**p_out [bar]**	**Δp [bar]**
Bad Bentheim$_{3,in}$	59.92	59.23	0.69
Frenswegen$_{3,in}$	60.00	59.41	0.59
Ganderkesee$_{1,in}$	59.99	59.31	0.68
Ganderkesee$_{3,in}$	60.00	59.31	0.69
Heidenau$_{3,in}$	60.00	59.99	0.01
Legden$_{1,in}$	59.02	54.88	4.13
Schepsdorf$_{2,in}$	60.00	59.42	0.58
Schlootdamm$_{4,in}$	60.00	59.32	0.68

I.8.14 Variation 2 Szenario 2030: Rohrrauigkeit: 1 mm, max. Druck: 30 bar

Keine Lösung

I.8.15 Variation 2 Szenario 2030: Rohrrauigkeit: 0,1 mm, max. Druck: 30 bar

Tabelle I.8.15.1: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im Variation 2 Szenario 2030

Id	p [bar]	q [kg/s]
Quellen		
Elten	30.00	7.51
Lingen	30.00	1.40
Löningen	30.00	0.72
Nüttermoor	30.00	0.53
Eckel	30.00	0.53
Drohne	30.00	0.24
Rehden	18.52	0.72
Hanekenfähr	30.00	1.59
Bad Lauchstädt	30.00	0.16
Ochtrup (city)	30.00	0.72
Senken		
Hamborn	27.00	0.00
Scholven	21.66	2.00
Epe	20.39	1.07
Bremen	15.32	4.29
Hallendorf	7.21	4.82
Leuna	30.00	0.16
Marl	23.15	1.25
Harsefeld	29.99	0.53

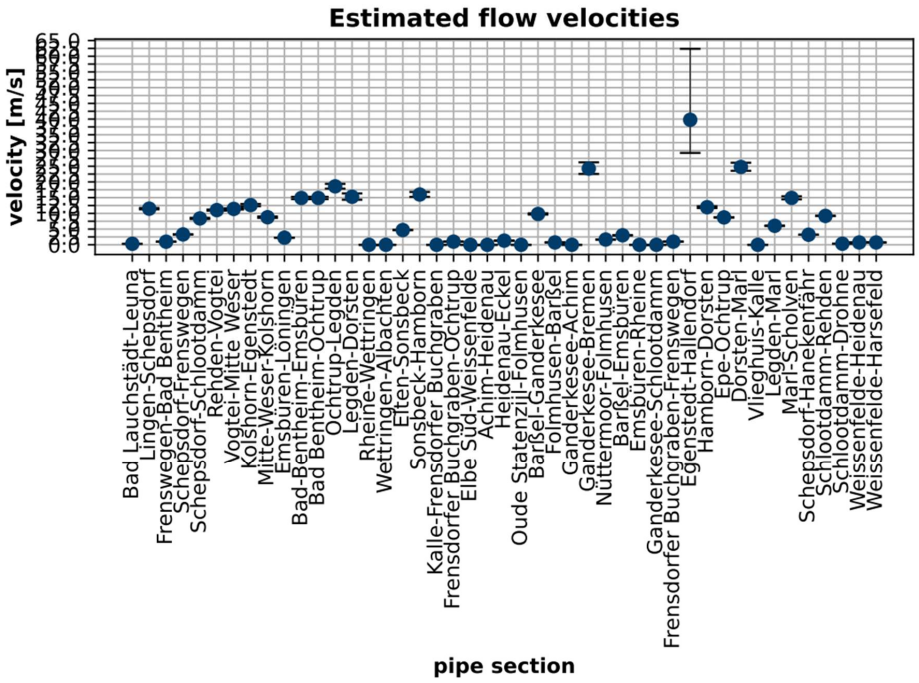


Abbildung I.8.15.1: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im Variation 2 Szenario 2030 (durchschnittlich) bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an.

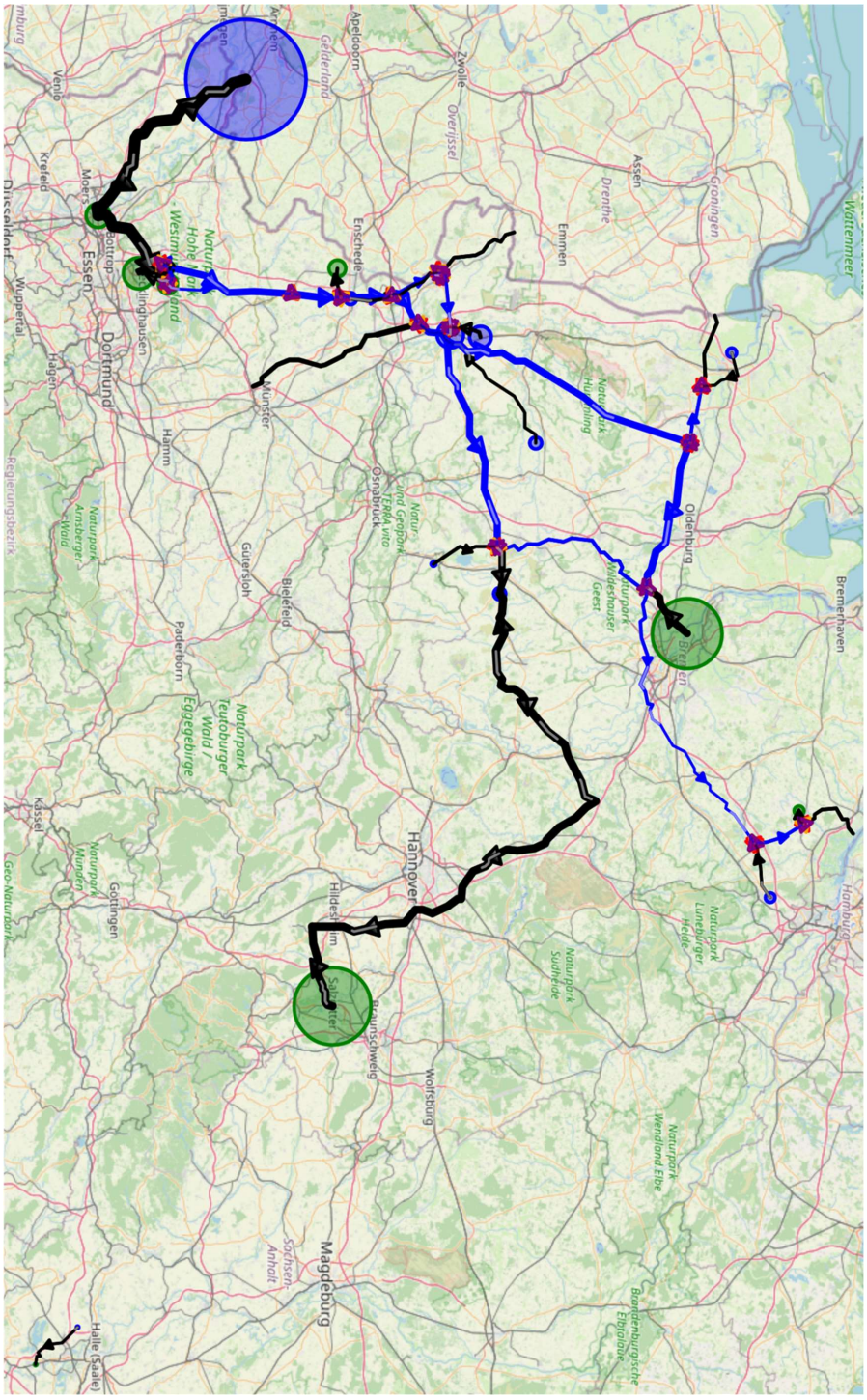


Abbildung I.8.15.2: Flüsse im Variation 2 Szenario 2030 bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

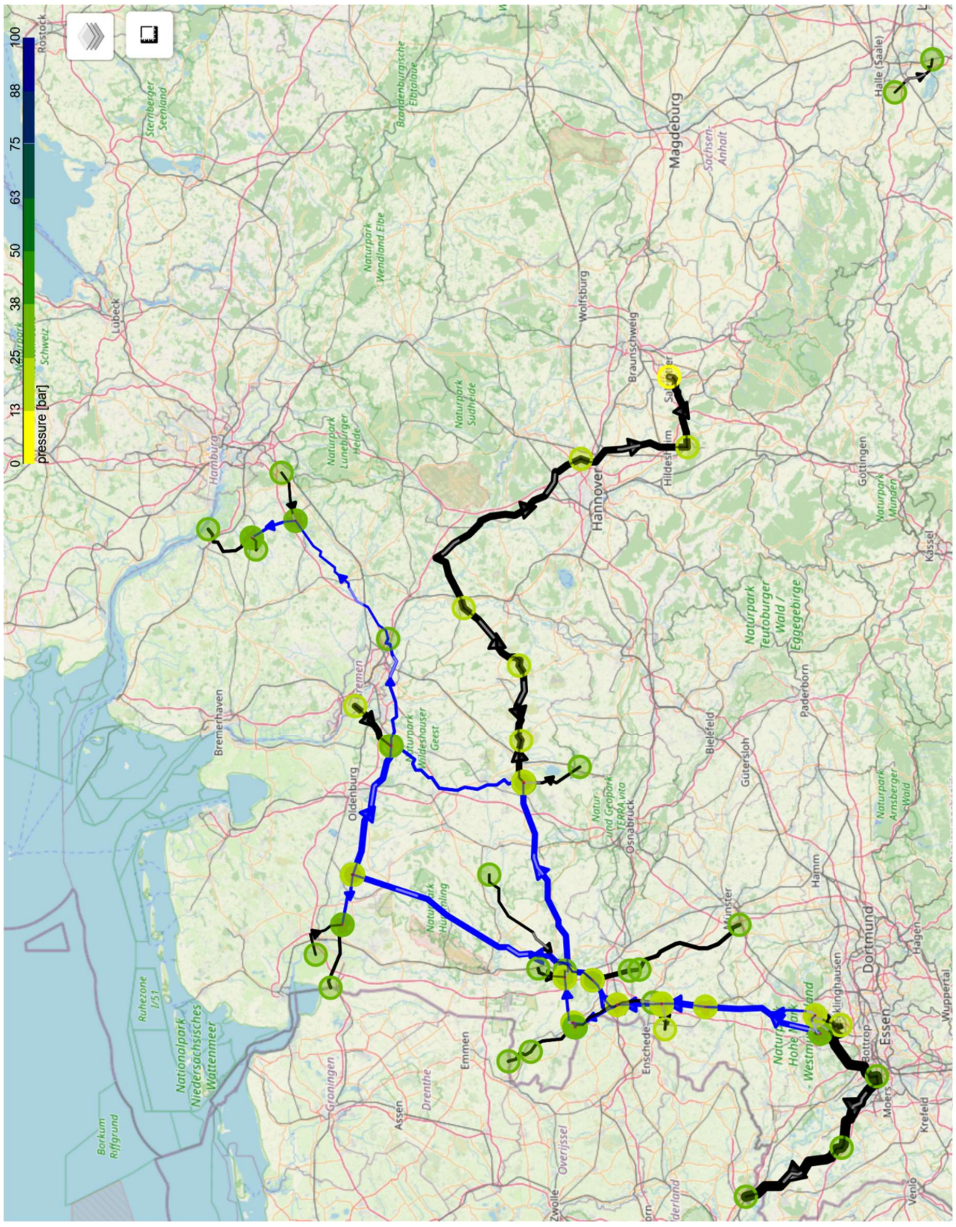


Abbildung I.8.15.3: Drücke im Variation 2 Szenario 2030 bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

Tabelle I.8.15.2: Leitungsflüsse im Variation 2 Szenario 2030 bei einem Rohrrauigkeitswert von 0,1 mm.

Id	l [km]	d [mm]	q [kg/s]	v_min [m/s]	v_avg [m/s]	v_max [m/s]
Bad Lauchstädt-Leuna	20.00	500.00	0.16	0.32	0.32	0.32
Lingen-Schepsdorf	11.30	250.00	1.40	11.27	11.49	11.72
Frenswegen-Bad Bentheim	18.00	350.00	-0.16	0.98	0.98	0.98
Schepsdorf-Frenswegen	18.00	450.00	-0.87	3.30	3.30	3.30
Schepsdorf-Schlootdamm	72.90	600.00	3.86	8.20	8.39	8.59
Rehden-Vogtei	28.90	600.00	4.82	10.86	11.04	11.22
Vogtei-Mitte Weser	29.00	600.00	4.82	11.22	11.41	11.62
Kolshorn-Egenstedt	38.50	600.00	4.82	12.27	12.62	12.99
Mitte-Weser-Kolshorn	92.90	700.00	4.82	8.54	8.77	9.02
Emsbüren-Löningen	55.00	400.00	-0.72	2.26	2.26	2.27
Bad-Bentheim-Emsbüren	15.00	400.00	3.04	14.53	14.89	15.27
Bad Bentheim-Ochtrup	15.30	400.00	-3.20	14.52	14.89	15.28
Ochtrup-Legden	15.70	400.00	-4.27	17.88	18.60	19.39
Legden-Dorsten	38.00	400.00	-3.90	14.33	15.27	16.34
Rheine-Wettringen	3.50	800.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wettringen-Albachten	43.20	800.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Elten-Sonsbeck	42.30	900.00	7.51	4.68	4.69	4.71
Sonsbeck-Hamborn	34.00	500.00	7.51	15.25	15.99	16.82
Kalle-Frensdorfer Buchgraben	18.90	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Frensdorfer Buchgraben-Ochtrup	29.90	600.00	-0.72	1.00	1.00	1.00
Elbe Süd-Weissenfelde	22.10	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Achim-Heidenau	54.20	450.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heidenau-Eckel	19.20	450.00	-0.53	1.32	1.32	1.32
Oude Statenzijl-Folmhusen	22.50	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Barßel-Ganderkesee	47.70	600.00	4.29	9.60	9.81	10.02
Folmhusen-Barßel	19.20	600.00	0.53	0.74	0.74	0.74
Ganderkesee-Achim	40.80	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganderkesee-Bremen	17.10	400.00	4.29	22.54	24.25	26.23
Nüttermoor-Folmhusen	18.40	400.00	0.53	1.67	1.67	1.67
Barßel-Emsbüren	94.70	1000.00	-3.76	3.02	3.02	3.03
Emsbüren-Rheine	13.80	1000.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganderkesee-Schlootdamm	58.90	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Frensdorfer Buchgraben-Frenswegen	1.40	600.00	0.72	1.00	1.00	1.00

Egenstedt-Hallendorf	30.00	400.00	4.82	29.23	39.77	62.35
Hamborn-Dorsten	37.00	600.00	7.51	11.68	11.96	12.26
Epe-Ochtrup	10.00	300.00	-1.07	8.65	8.72	8.79
Dorsten-Marl	8.00	300.00	3.61	23.55	24.77	26.12
Vlieghuis-Kalle	6.70	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Legden-Marl	40.40	200.00	-0.37	5.96	6.04	6.13
Marl-Scholven	14.00	300.00	2.00	14.44	14.92	15.43
Schepsdorf-Hanekenfähr	2.30	500.00	-1.59	3.20	3.20	3.20
Schlootdamm-Rehden	15.70	600.00	4.10	9.13	9.19	9.24
Schlootdamm-Drohne	21.50	600.00	-0.24	0.34	0.34	0.34
Weissenfelde-Heidenau	19.00	600.00	-0.53	0.74	0.74	0.74
Weissenfelde-Harsefeld	4.50	600.00	0.53	0.74	0.74	0.74

Tabelle I.8.15.3: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im Variation 2 Szenario 2030 bei 30 bar, 0,1 mm Rohrrauigkeit.

Id	**p_in [bar]**	**p_out [bar]**	**Δp [bar]**
$Barssel_{1,in}$	29.98	18.64	11.33
$Emsbüren_{2,in}$	29.87	18.72	11.15
$Frenswegen_{3,in}$	29.99	19.70	10.29
$Ganderkesee_{3,in}$	30.00	17.86	12.14
$Heidenau_{3,in}$	30.00	29.99	0.01
$Schepsdorf_{1,in}$	28.84	19.66	9.18
$Schepsdorf_{2,in}$	29.99	19.66	10.34
$Schlootdamm_{4,in}$	30.00	18.75	11.25

I.8.16 Variation 2 Szenario 2030: Rohrrauigkeit: 1 mm, max. Druck: 60 bar

Tabelle I.8.16.1: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im Variation 2 Szenario 2030

Id	p [bar]	q [kg/s]
Quellen		
Elten	50.16	7.51
Lingen	60.00	1.40
Löningen	60.00	0.72
Nüttermoor	60.00	0.53
Eckel	60.00	0.53
Drohne	60.00	0.24
Rehden	39.41	0.72
Hanekenfähr	60.00	1.59
Bad Lauchstädt	60.00	0.16
Ochtrup (city)	60.00	0.72
Senken		
Hamborn	47.15	0.00
Scholven	42.02	2.00
Epe	40.97	1.07
Bremen	35.26	4.29
Hallendorf	32.41	4.82
Leuna	60.00	0.16
Marl	43.42	1.25
Harsefeld	59.99	0.53

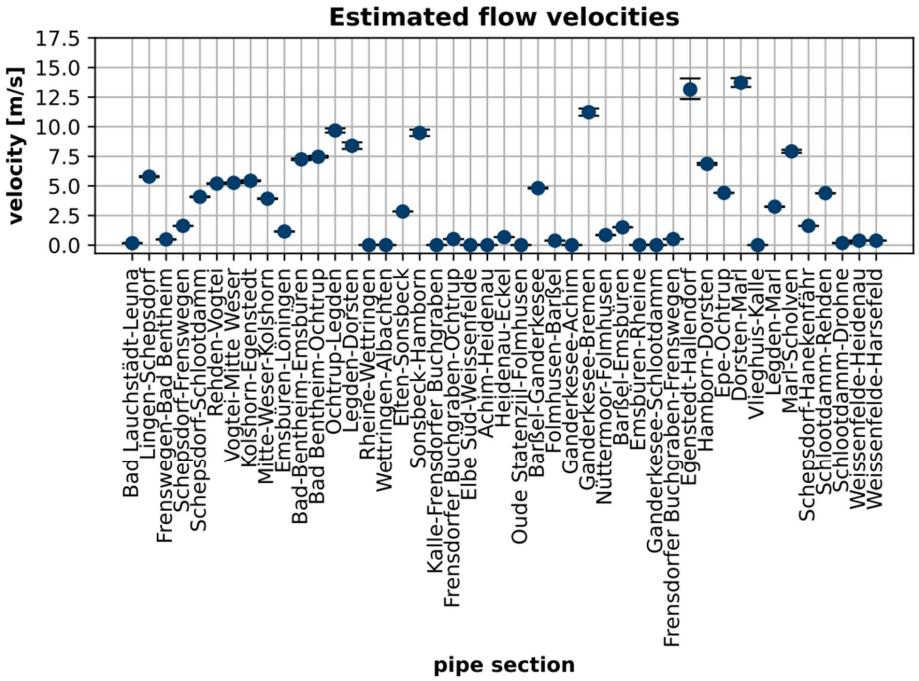


Abbildung I.8.16.1: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im Variation 2 Szenario 2030 (durchschnittlich) bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an.

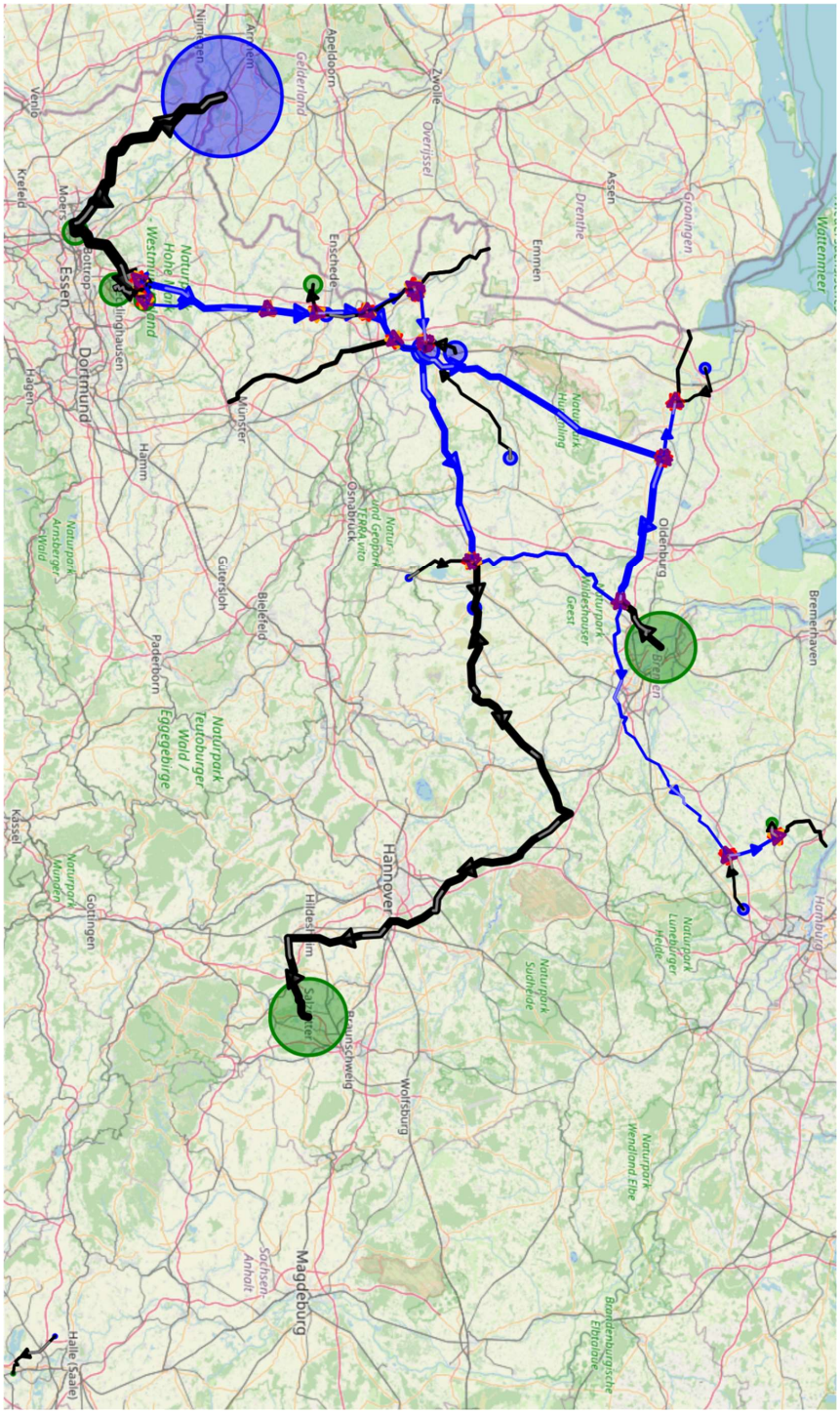


Abbildung I.8.16.2: Flüsse im Variation 2 Szenario 2030 bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

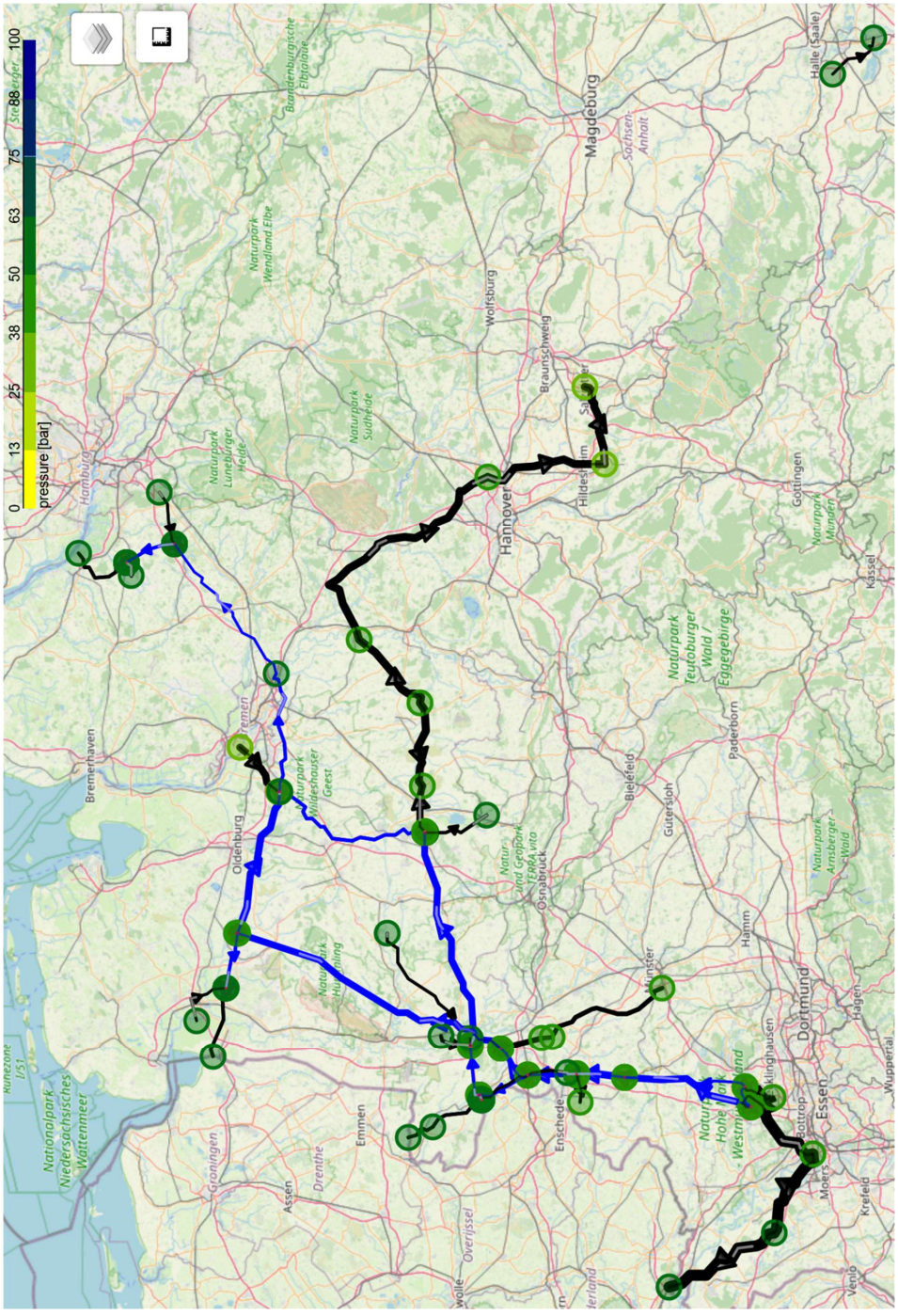


Abbildung I.8.16.3: Drücke im Variation 2 Szenario 2030 bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

Tabelle I.8.16.2: Leitungsflüsse im Variation 2 Szenario 2030 bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm.

Id	l [km]	d [mm]	q [kg/s]	v_min [m/s]	v_avg [m/s]	v_max [m/s]
Bad Lauchstädt-Leuna	20.00	500.00	0.16	0.16	0.16	0.16
Lingen-Schepsdorf	11.30	250.00	1.40	5.74	5.79	5.83
Frenswegen-Bad Bentheim	18.00	350.00	-0.16	0.48	0.48	0.48
Schepsdorf-Frenswegen	18.00	450.00	-0.87	1.63	1.63	1.63
Schepsdorf-Schlootdamm	72.90	600.00	3.86	4.04	4.08	4.12
Rehden-Vogtei	28.90	600.00	4.82	5.17	5.20	5.23
Vogtei-Mitte Weser	29.00	600.00	4.82	5.23	5.26	5.29
Kolshorn-Egenstedt	38.50	600.00	4.82	5.39	5.43	5.48
Mitte-Weser-Kolshorn	92.90	700.00	4.82	3.89	3.92	3.96
Emsbüren-Löningen	55.00	400.00	-0.72	1.15	1.15	1.15
Bad-Bentheim-Emsbüren	15.00	400.00	3.04	7.17	7.24	7.32
Bad Bentheim-Ochtrup	15.30	400.00	-3.20	7.38	7.46	7.54
Ochtrup-Legden	15.70	400.00	-4.27	9.50	9.68	9.86
Legden-Dorsten	38.00	400.00	-3.90	8.12	8.39	8.68
Rheine-Wettringen	3.50	800.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wettringen-Albachten	43.20	800.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Elten-Sonsbeck	42.30	900.00	7.51	2.83	2.84	2.84
Sonsbeck-Hamborn	34.00	500.00	7.51	9.21	9.47	9.75
Kalle-Frensdorfer Buchgraben	18.90	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Frensdorfer Buchgraben-Ochtrup	29.90	600.00	-0.72	0.51	0.51	0.51
Elbe Süd-Weissenfelde	22.10	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Achim-Heidenau	54.20	450.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heidenau-Eckel	19.20	450.00	-0.53	0.67	0.67	0.67
Oude Statenzijl-Folmhusen	22.50	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Barßel-Ganderkesee	47.70	600.00	4.29	4.77	4.81	4.86
Folmhusen-Barßel	19.20	600.00	0.53	0.38	0.38	0.38
Ganderkesee-Achim	40.80	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganderkesee-Bremen	17.10	400.00	4.29	10.92	11.22	11.54
Nüttermoor-Folmhusen	18.40	400.00	0.53	0.85	0.85	0.85
Barßel-Emsbüren	94.70	1000.00	-3.76	1.50	1.51	1.51
Emsbüren-Rheine	13.80	1000.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganderkesee-Schlootdamm	58.90	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Frensdorfer Buchgraben-Frenswegen	1.40	600.00	0.72	0.51	0.51	0.51

Egenstedt-Hallendorf	30.00	400.00	4.82	12.33	13.15	14.08
Hamborn-Dorsten	37.00	600.00	7.51	6.77	6.86	6.95
Epe-Ochtrup	10.00	300.00	-1.07	4.40	4.41	4.43
Dorsten-Marl	8.00	300.00	3.61	13.36	13.72	14.10
Vlieghuis-Kalle	6.70	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Legden-Marl	40.40	200.00	-0.37	3.23	3.25	3.27
Marl-Scholven	14.00	300.00	2.00	7.80	7.92	8.05
Schepsdorf-Hanekenfähr	2.30	500.00	-1.59	1.63	1.63	1.63
Schlootdamm-Rehden	15.70	600.00	4.10	4.38	4.39	4.40
Schlootdamm-Drohne	21.50	600.00	-0.24	0.17	0.17	0.17
Weissenfelde-Heidenau	19.00	600.00	-0.53	0.38	0.38	0.38
Weissenfelde-Harsefeld	4.50	600.00	0.53	0.38	0.38	0.38

Tabelle I.8.16.3: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im Variation 2 Szenario 2030 bei 60 bar, 1 mm Rohrrauigkeit.

Id	**p_in [bar]**	**p_out [bar]**	**Δp [bar]**
$Barssel_{1,in}$	59.98	37.93	22.04
$Emsbüren_{2,in}$	59.89	38.00	21.89
$Emsbüren_{4,in}$	39.56	38.00	1.56
$Frenswegen_{3,in}$	59.99	40.38	19.61
$Schepsdorf_{1,in}$	58.96	40.34	18.62
$Schepsdorf_{2,in}$	59.99	40.34	19.65
$Schlootdamm_{4,in}$	60.00	39.60	20.40

I.8.17 Variation 2 Szenario 2030: Rohrrauigkeit: 0,1 mm, max. Druck: 60 bar

Tabelle I.8.17.1: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im Variation 2 Szenario 2030

Id	p [bar]	q [kg/s]
Quellen		
Elten	50.10	7.51
Lingen	60.00	1.40
Löningen	60.00	0.72
Nüttermoor	60.00	0.53
Eckel	60.00	0.53
Drohne	60.00	0.24
Rehden	44.10	0.72
Hanekenfähr	60.00	1.59
Bad Lauchstädt	60.00	0.16
Ochtrup (city)	60.00	0.72
Senken		
Hamborn	48.35	0.00
Scholven	45.59	2.00
Epe	44.92	1.07
Bremen	36.43	4.29
Hallendorf	40.63	4.82
Leuna	60.00	0.16
Marl	46.33	1.25
Harsefeld	59.99	0.53

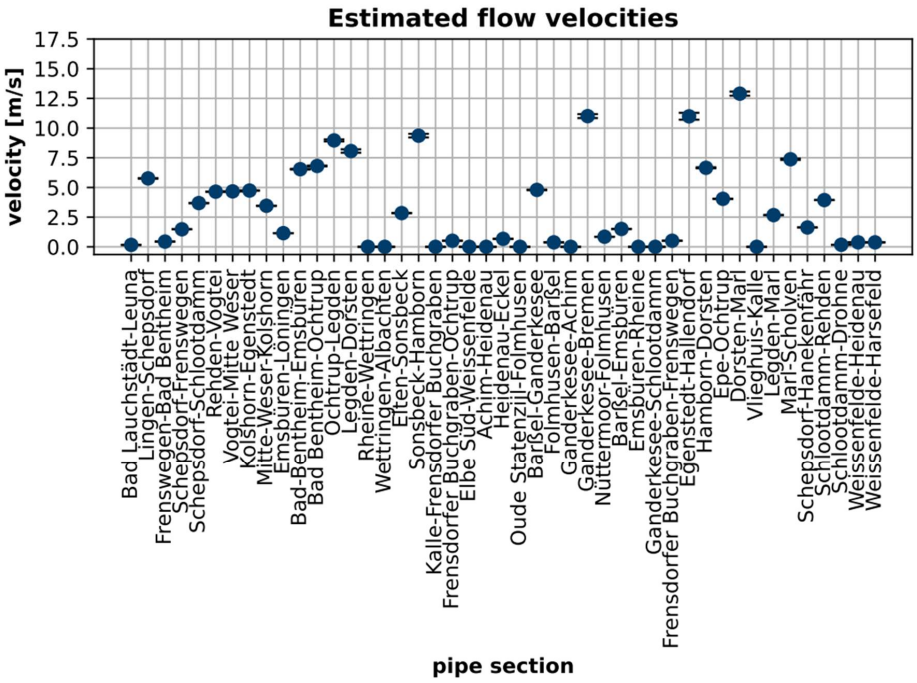


Abbildung I.8.17.1: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im Variation 2 Szenario 2030 (durchschnittlich) bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an.

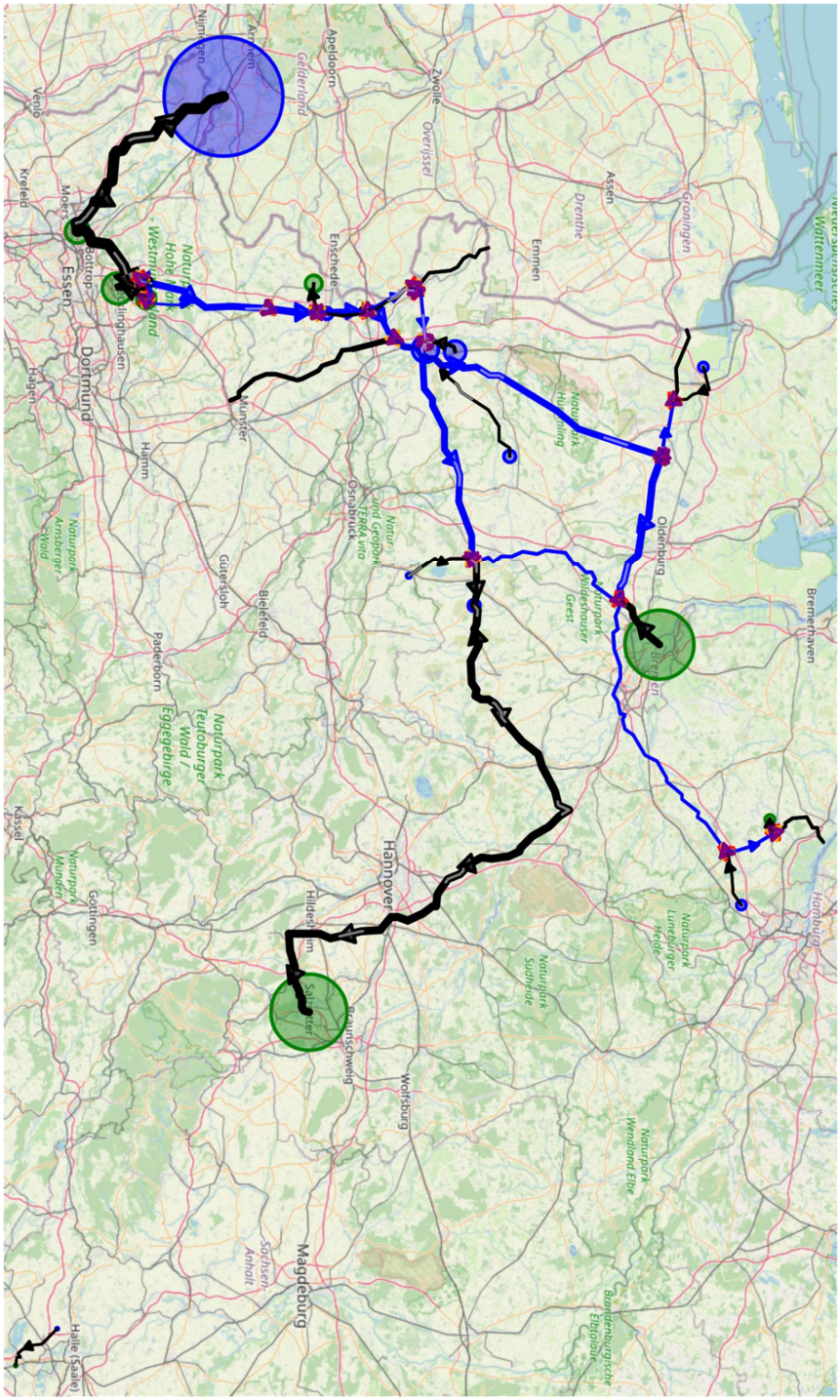


Abbildung I.8.17.2: Flüsse im Variation 2 Szenario 2030 bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

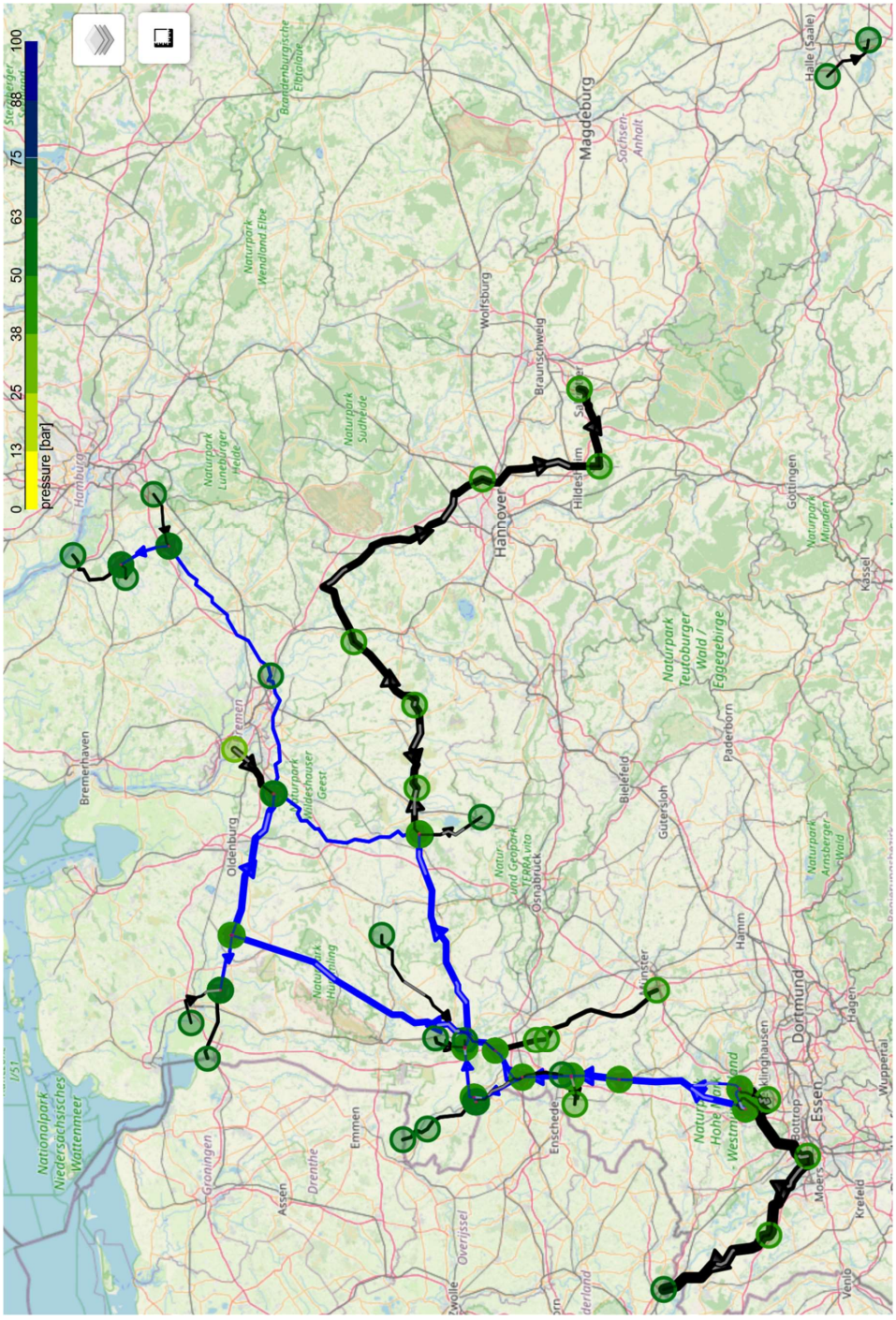


Abbildung I.8.17.3: Drücke im Variation 2 Szenario 2030 bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

Tabelle I.8.17.2: Leitungsflüsse im Variation 2 Szenario 2030 bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm.

Id	l [km]	d [mm]	q [kg/s]	v_min [m/s]	v_avg [m/s]	v_max [m/s]
Bad Lauchstädt-Leuna	20.00	500.00	0.16	0.16	0.16	0.16
Lingen-Schepsdorf	11.30	250.00	1.40	5.74	5.76	5.79
Frenswegen-Bad Bentheim	18.00	350.00	-0.16	0.44	0.44	0.44
Schepsdorf-Frenswegen	18.00	450.00	-0.87	1.48	1.48	1.48
Schepsdorf-Schlootdamm	72.90	600.00	3.86	3.67	3.68	3.70
Rehden-Vogtei	28.90	600.00	4.82	4.63	4.64	4.66
Vogtei-Mitte Weser	29.00	600.00	4.82	4.66	4.67	4.68
Kolshorn-Egenstedt	38.50	600.00	4.82	4.72	4.74	4.76
Mitte-Weser-Kolshorn	92.90	700.00	4.82	3.44	3.45	3.47
Emsbüren-Löningen	55.00	400.00	-0.72	1.15	1.15	1.15
Bad-Bentheim-Emsbüren	15.00	400.00	3.04	6.51	6.54	6.57
Bad Bentheim-Ochtrup	15.30	400.00	-3.20	6.78	6.81	6.85
Ochtrup-Legden	15.70	400.00	-4.27	8.88	8.96	9.05
Legden-Dorsten	38.00	400.00	-3.95	7.93	8.07	8.21
Rheine-Wettringen	3.50	800.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wettringen-Albachten	43.20	800.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Elten-Sonsbeck	42.30	900.00	7.51	2.84	2.84	2.84
Sonsbeck-Hamborn	34.00	500.00	7.51	9.21	9.36	9.52
Kalle-Frensdorfer Buchgraben	18.90	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Frensdorfer Buchgraben-Ochtrup	29.90	600.00	-0.72	0.51	0.51	0.51
Elbe Süd-Weissenfelde	22.10	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Achim-Heidenau	54.20	450.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heidenau-Eckel	19.20	450.00	-0.53	0.67	0.67	0.67
Oude Statenzijl-Folmhusen	22.50	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Barßel-Ganderkesee	47.70	600.00	4.29	4.77	4.80	4.82
Folmhusen-Barßel	19.20	600.00	0.53	0.38	0.38	0.38
Ganderkesee-Achim	40.80	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganderkesee-Bremen	17.10	400.00	4.29	10.84	11.01	11.18
Nüttermoor-Folmhusen	18.40	400.00	0.53	0.85	0.85	0.85
Barßel-Emsbüren	94.70	1000.00	-3.76	1.50	1.51	1.51
Emsbüren-Rheine	13.80	1000.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganderkesee-Schlootdamm	58.90	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Frensdorfer Buchgraben-Frenswegen	1.40	600.00	0.72	0.51	0.51	0.51

Egenstedt-Hallendorf	30.00	400.00	4.82	10.71	10.99	11.29
Hamborn-Dorsten	37.00	600.00	7.51	6.61	6.66	6.70
Epe-Ochtrup	10.00	300.00	-1.07	4.03	4.04	4.05
Dorsten-Marl	8.00	300.00	3.57	12.73	12.90	13.08
Vlieghuis-Kalle	6.70	600.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Legden-Marl	40.40	200.00	-0.32	2.66	2.67	2.68
Marl-Scholven	14.00	300.00	2.00	7.32	7.38	7.43
Schepsdorf-Hanekenfähr	2.30	500.00	-1.59	1.63	1.63	1.63
Schlootdamm-Rehden	15.70	600.00	4.10	3.93	3.94	3.94
Schlootdamm-Drohne	21.50	600.00	-0.24	0.17	0.17	0.17
Weissenfelde-Heidenau	19.00	600.00	-0.53	0.38	0.38	0.38
Weissenfelde-Harsefeld	4.50	600.00	0.53	0.38	0.38	0.38

Tabelle I.8.17.3: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im Variation 2 Szenario 2030 bei 60 bar, 0,1 mm Rohrrauigkeit.

Id	**p_in [bar]**	**p_out [bar]**	**Δp [bar]**
$Barssel_{1,in}$	59.99	37.96	22.03
$Emsbüren_{2,in}$	59.94	38.00	21.94
$Emsbüren_{4,in}$	44.18	38.00	6.18
$Frenswegen_{3,in}$	60.00	44.61	15.38
$Schepsdorf_{1,in}$	59.42	44.59	14.83
$Schepsdorf_{2,in}$	60.00	44.59	15.40
$Schlootdamm_{4,in}$	60.00	44.19	15.81

I.8.18 Energieäquivalente Wasserstoff Lastflüsse im deutschen H-Gasnetz (Visualisierung)

I.8.18.1 11.08.2015, 15:00 Uhr

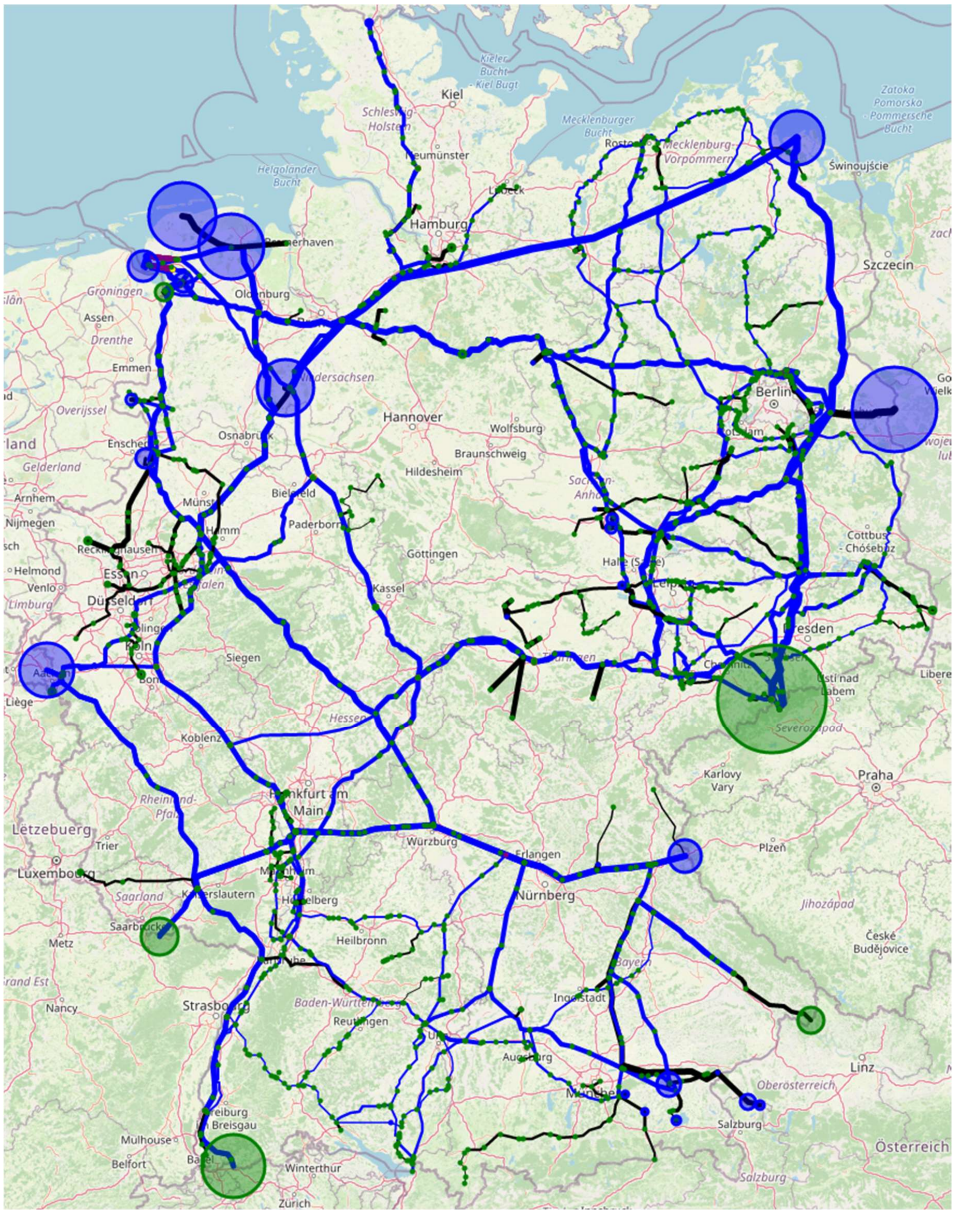


Abbildung I.8.18.1: Ein-/Ausspeisesituation der Erdgas-Nominierung des 06.02.2015 um 06:00 Uhr. Blaue Kreise repräsentieren Einspeisungen und grüne Kreise Ausspeisungen. Ihre Größe ist proportional zur Größe der Ein-/Ausspeisung. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Durchmesser der jeweiligen Pipeline. Auf schwarz gefärbten Kanten (Pipelines) wurde

der Fluss durch das Preprocessing auf einen festen Wert fixiert. Es ist darauf hinzuweisen, dass parallele Pipelinestränge aufgrund des Zoomlevels nicht erkennbar sind, aber abgebildet sind. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

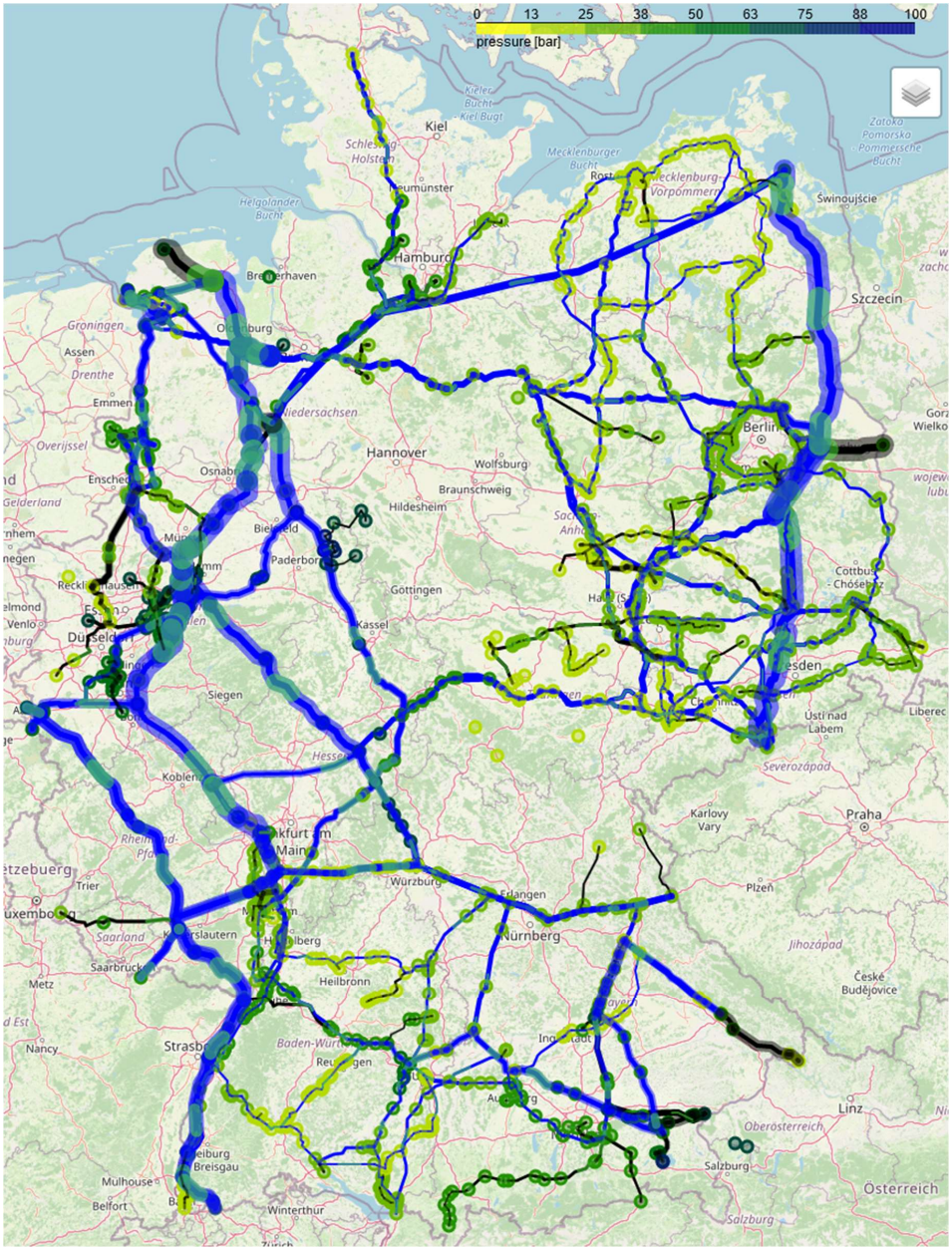


Abbildung I.8.18.2: Flüsse und Drücke in der Erdgas-Nominierung des 06.02.2015 um 06:00 Uhr. Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

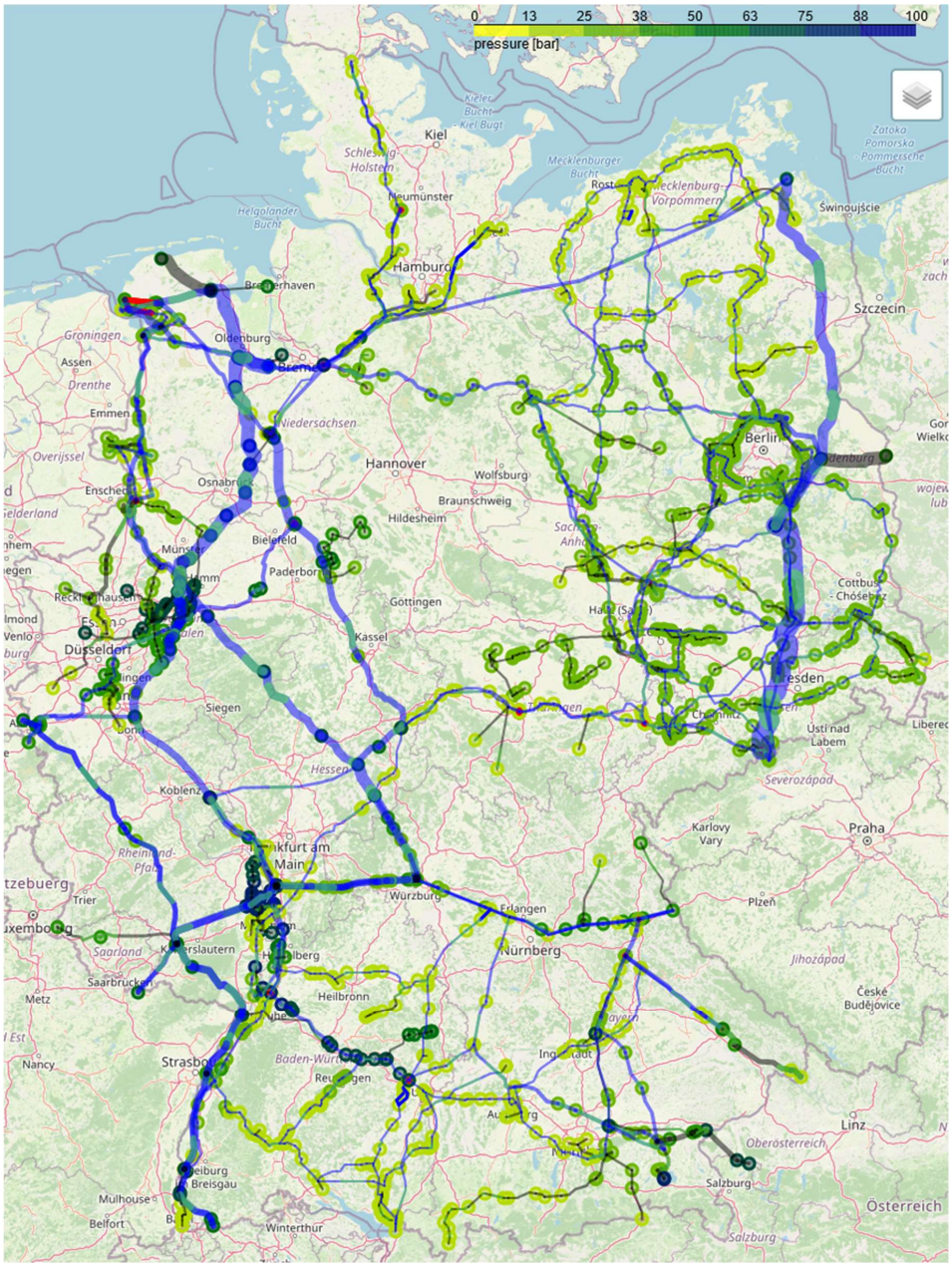


Abbildung I.8.18.3: Flüsse und Drücke in der Wasserstoff-Nominierung des 06.02.2015 um 06:00 Uhr (unlösbar, d.h. verbleibendes Node-Slack). Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

I.8.18.2 04.07.2015, 00:00 Uhr

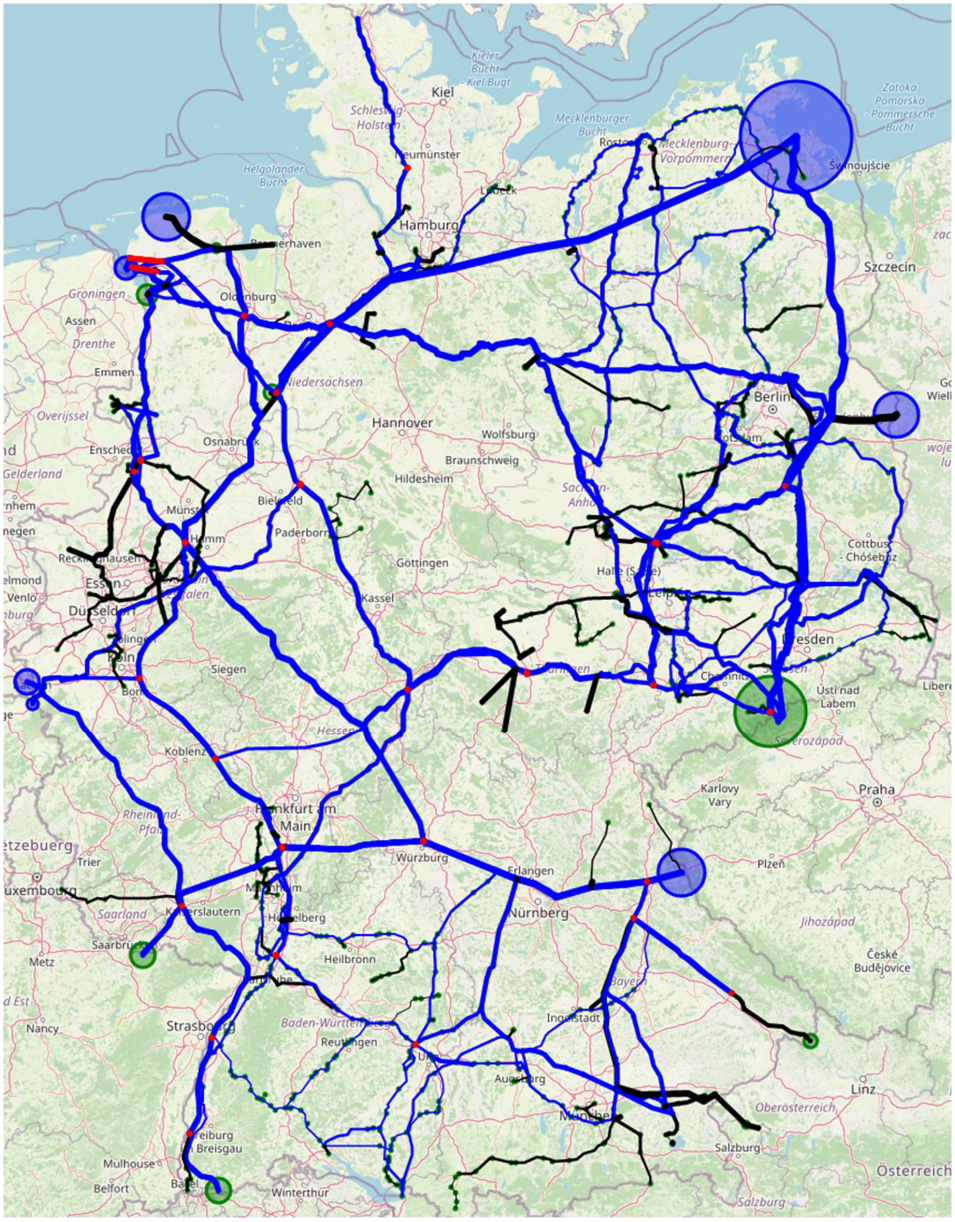


Abbildung I.8.18.4: Ein-/Ausspeisesituation der Erdgas-Nominierung des 04.07.2015 um 00:00 Uhr. Blaue Kreise repräsentieren Einspeisungen und grüne Kreise Ausspeisungen. Ihre Größe ist proportional zur Größe der Ein-/Ausspeisung. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Durchmesser der jeweiligen Pipeline. Auf schwarz gefärbten Kanten (Pipelines) wurde der Fluss durch das Preprocessing auf einen festen Wert fixiert. Es ist darauf hinzuweisen, dass parallele Pipelinestränge aufgrund des Zoomlevels nicht erkennbar sind, aber abgebildet sind. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

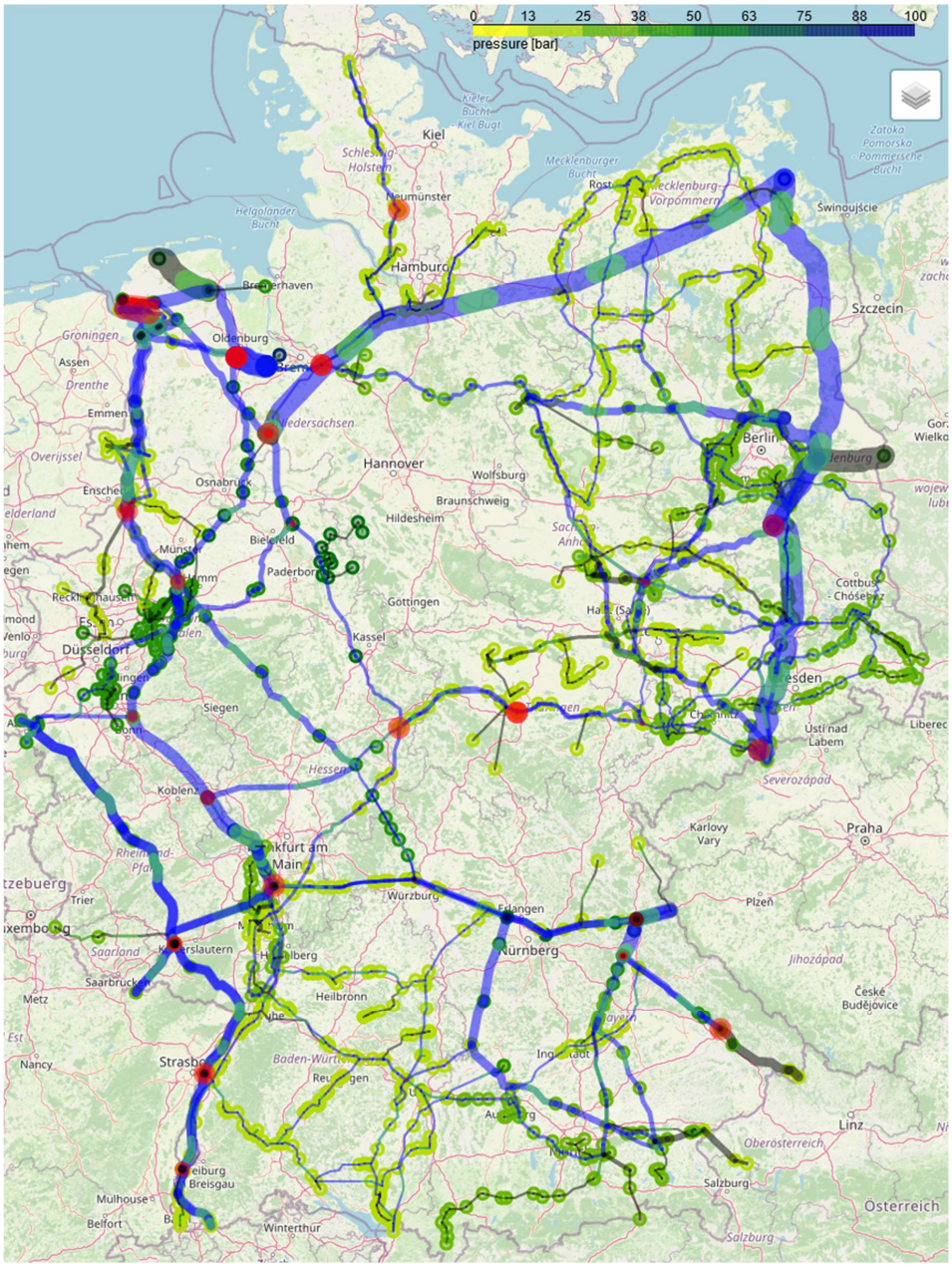


Abbildung I.8.18.5: Flüsse und Drücke in der Erdgas-Nominierung des 04.07.2015 um 00:00 Uhr. Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

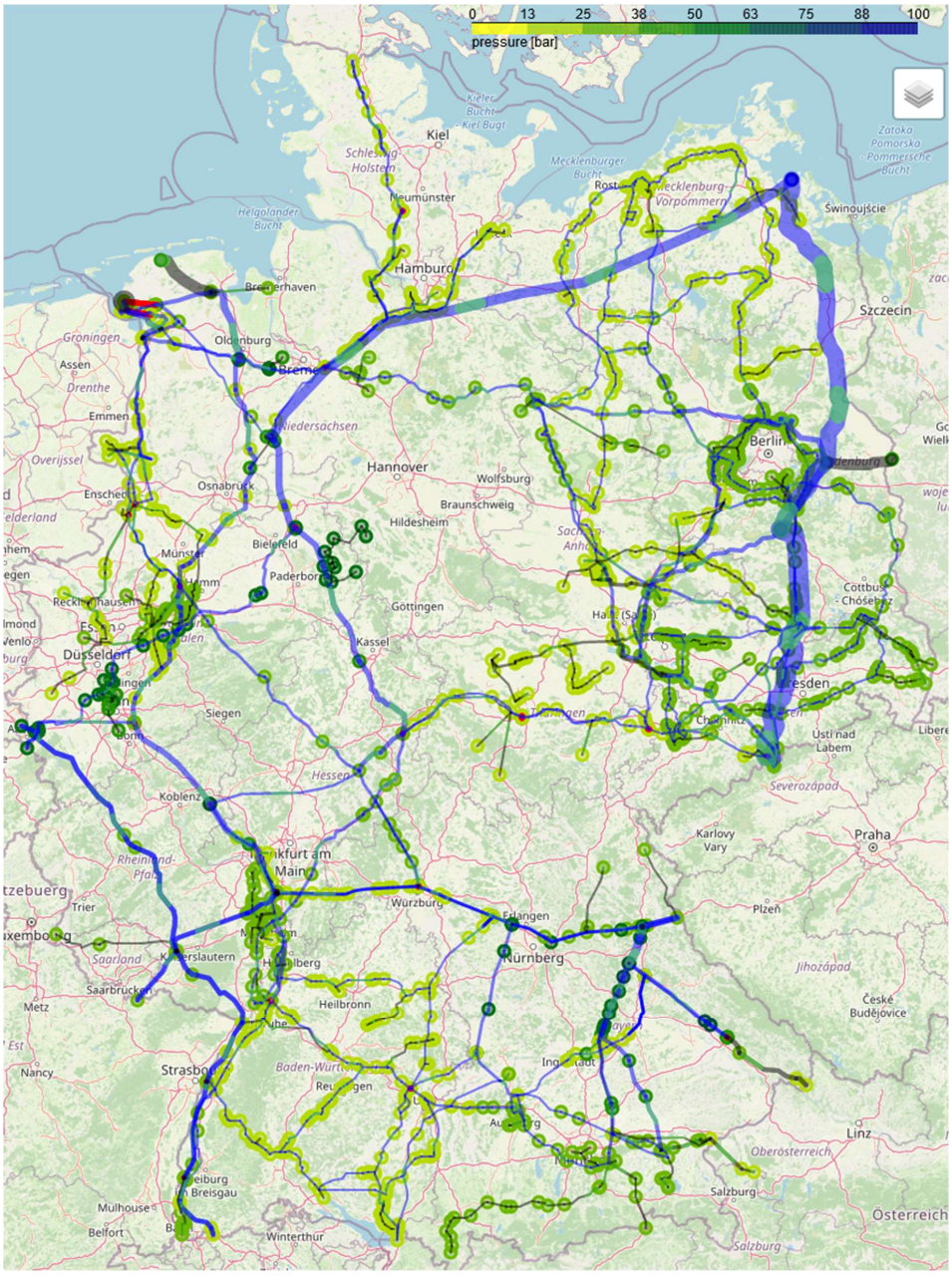


Abbildung I.8.18.6: Flüsse und Drücke in der Wasserstoff-Nominierung des 04.07.2015 um 00:00 Uhr. Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

I.8.18.3 11.08.2015, 15:00 Uhr

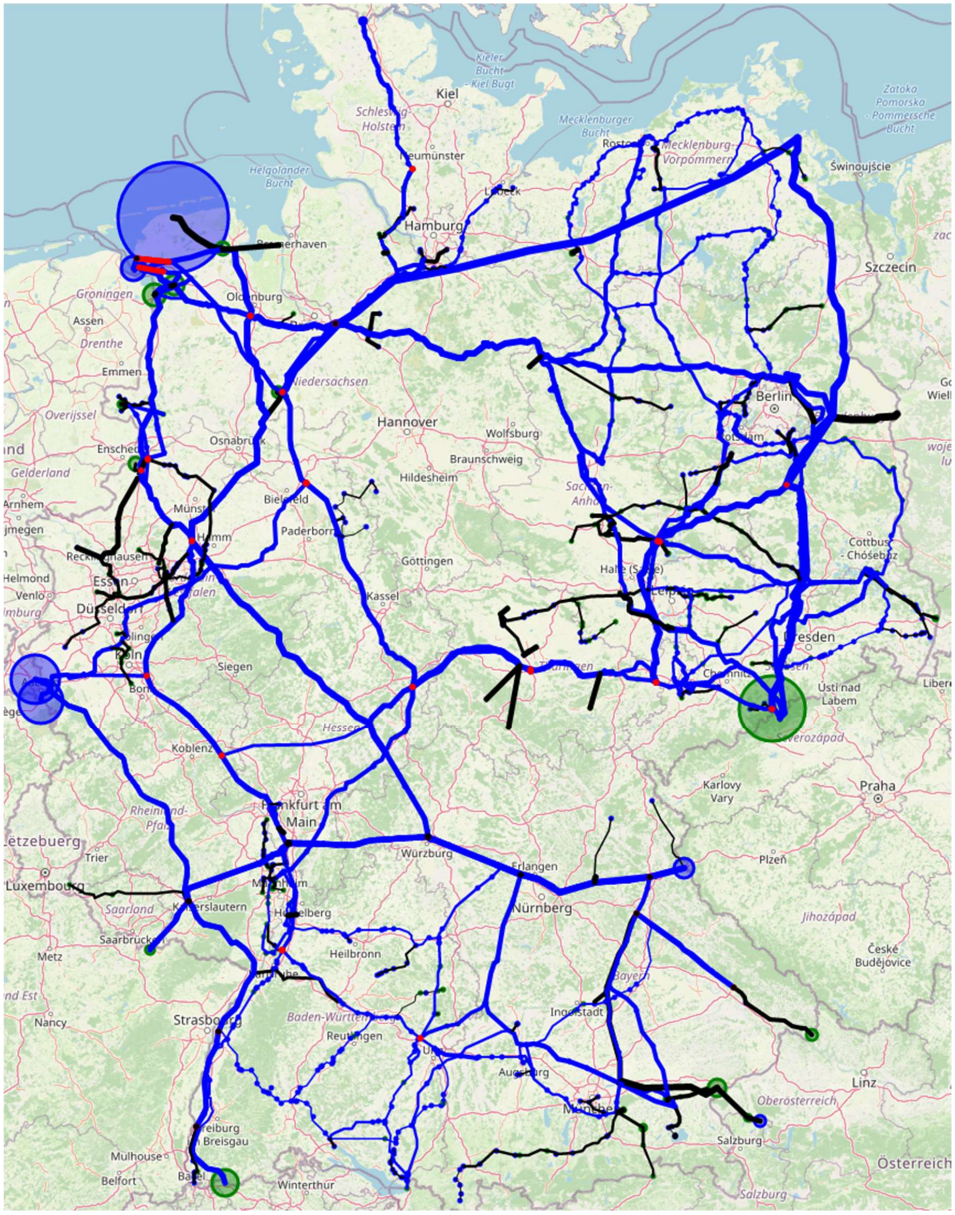


Abbildung I.8.18.7: Ein-/Ausspeisesituation der Erdgas-Nominierung des 11.08.2015 um 15:00 Uhr. Blaue Kreise repräsentieren Einspeisungen und grüne Kreise Ausspeisungen. Ihre Größe ist proportional zur Größe der Ein-/Ausspeisung. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Durchmesser der jeweiligen Pipeline. Auf schwarz gefärbten Kanten (Pipelines) wurde der Fluss durch das Preprocessing auf einen festen Wert fixiert. Es ist darauf hinzuweisen, dass parallele Pipelinestränge aufgrund des Zoomlevels nicht erkennbar sind, aber abgebildet sind. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.



Abbildung I.8.18.8: Flüsse und Drücke in der Erdgas-Nominierung des 11.08.2015 um 15:00 Uhr (unlösbar, d.h. verbleibendes Node-Slack). Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.



Abbildung I.8.18.9: Flüsse und Drücke in der Wasserstoff-Nominierung des 11.08.2015 um 15:00 Uhr (unlösbar, d.h. verbleibendes Node-Slack). Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

I.8.18.4 17.08.2015, 09:00 Uhr

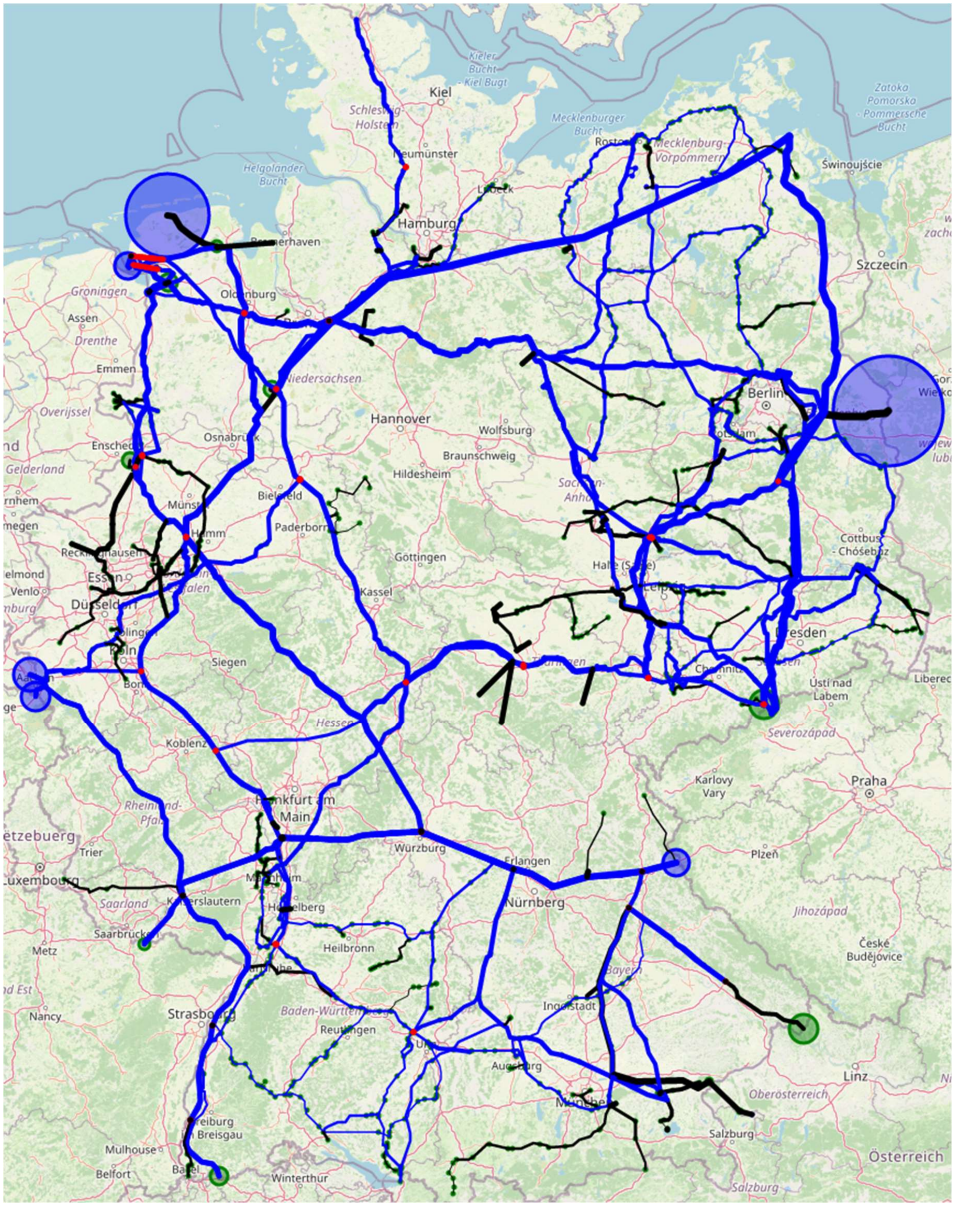


Abbildung I.8.18.10: Ein-/Ausspeisesituation der Erdgas-Nominierung des 17.08.2015 um 09:00 Uhr. Blaue Kreise repräsentieren Einspeisungen und grüne Kreise Ausspeisungen. Ihre Größe ist proportional zur Größe der Ein-/Ausspeisung. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Durchmesser der jeweiligen Pipeline. Auf schwarz gefärbten Kanten (Pipelines) wurde der Fluss durch das Preprocessing auf einen festen Wert fixiert. Es ist darauf hinzuweisen, dass parallele Pipelinestränge aufgrund des Zoomlevels nicht erkennbar sind, aber abgebildet sind. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.



Abbildung I.8.18.11: Flüsse und Drücke in der Erdgas-Nominierung des 17.08.2015 um 09:00 Uhr. Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.



Abbildung I.8.18.12: Flüsse und Drücke in der Wasserstoff-Nominierung des 17.08.2015 um 09:00 Uhr. Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

I.8.18.5 27.11.2015, 17:00 Uhr

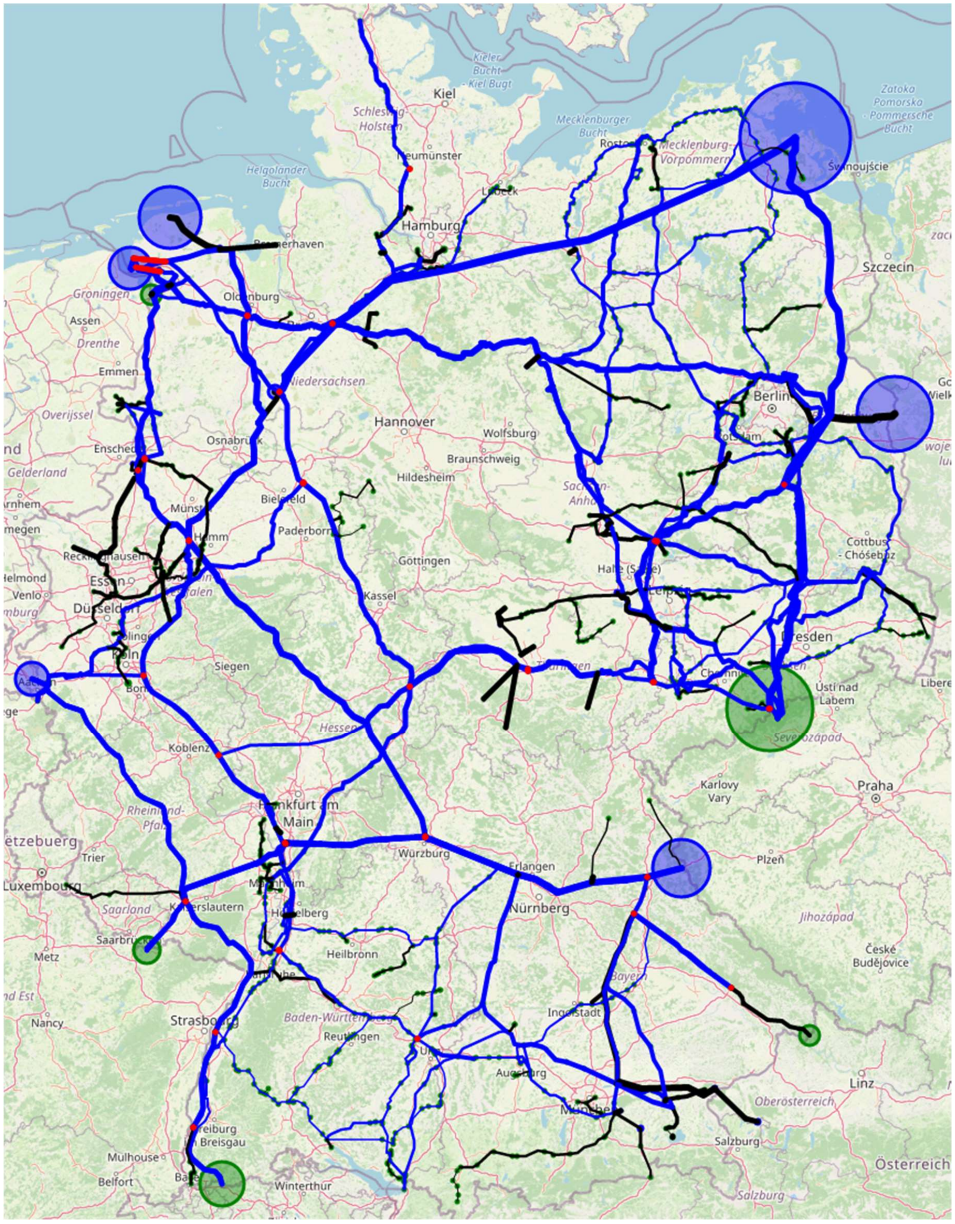


Abbildung I.8.18.13: Ein-/Ausspeisesituation der Erdgas-Nominierung des 27.11.2015 um 17:00 Uhr. Blaue Kreise repräsentieren Einspeisungen und grüne Kreise Ausspeisungen. Ihre Größe ist proportional zur Größe der Ein-/Ausspeisung. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Durchmesser der jeweiligen Pipeline. Auf schwarz gefärbten Kanten (Pipelines) wurde der Fluss durch das Preprocessing auf einen festen Wert fixiert. Es ist darauf hinzuweisen, dass parallele Pipelinestränge aufgrund des Zoomlevels nicht erkennbar sind, aber abgebildet sind. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

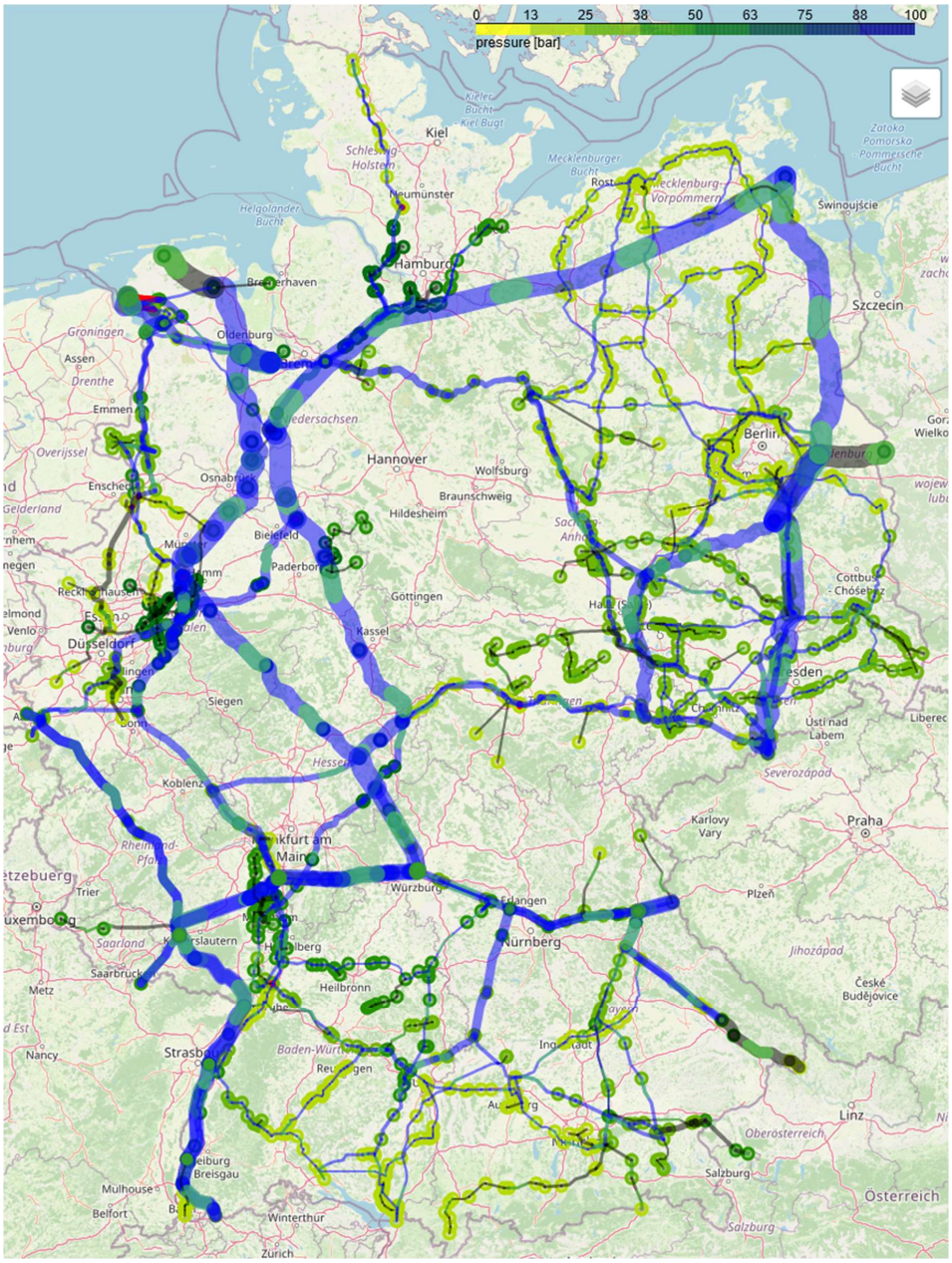


Abbildung I.8.18.14: Flüsse und Drücke in der Erdgas-Nominierung des 27.11.2015 um 17:00 Uhr. Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

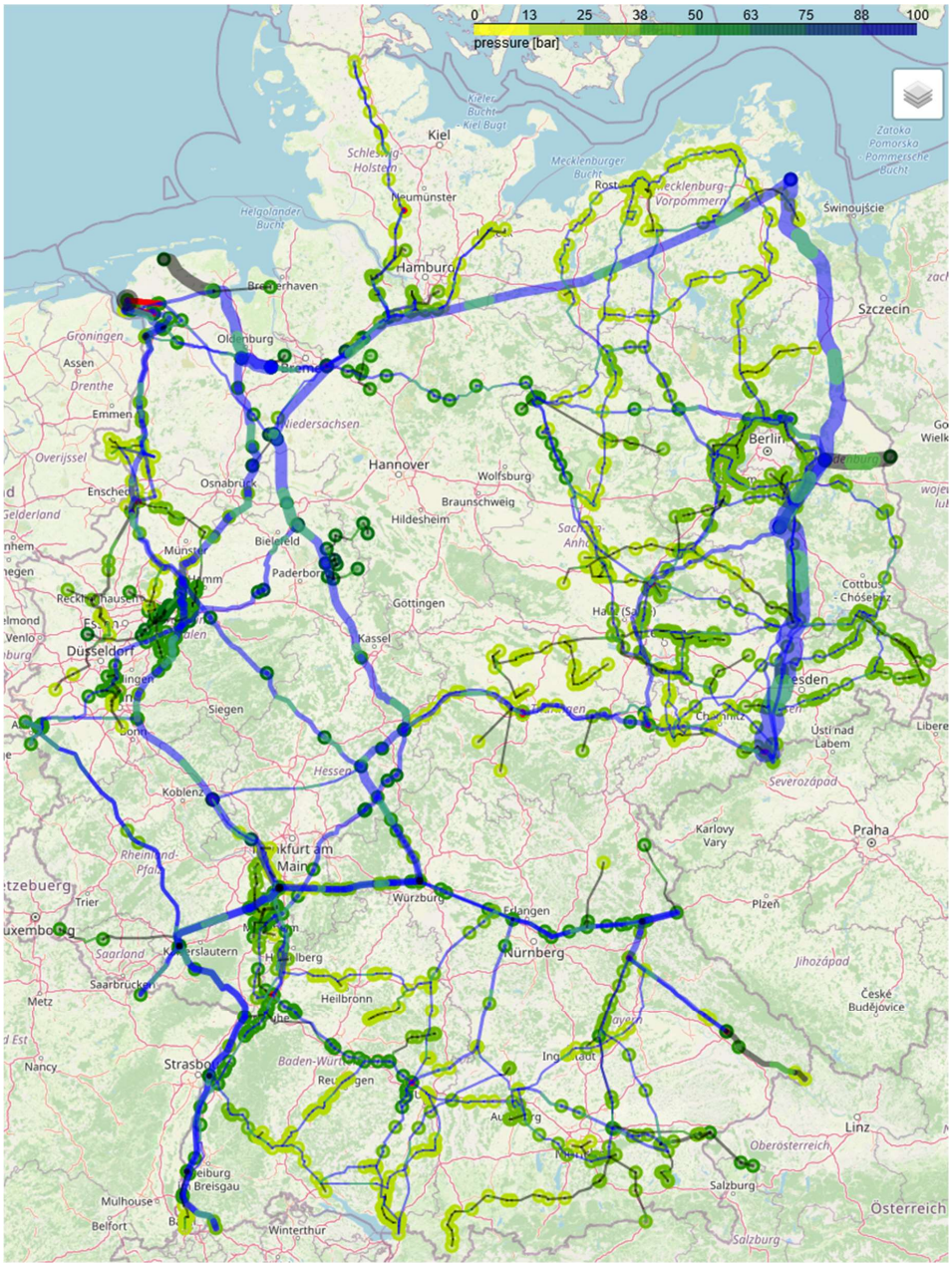


Abbildung I.8.18.15: Flüsse und Drücke in der Wasserstoff-Nominierung des 27.11.2015 um 17:00 Uhr. Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

I.8.18.6 02.12.2015, 05:00 Uhr

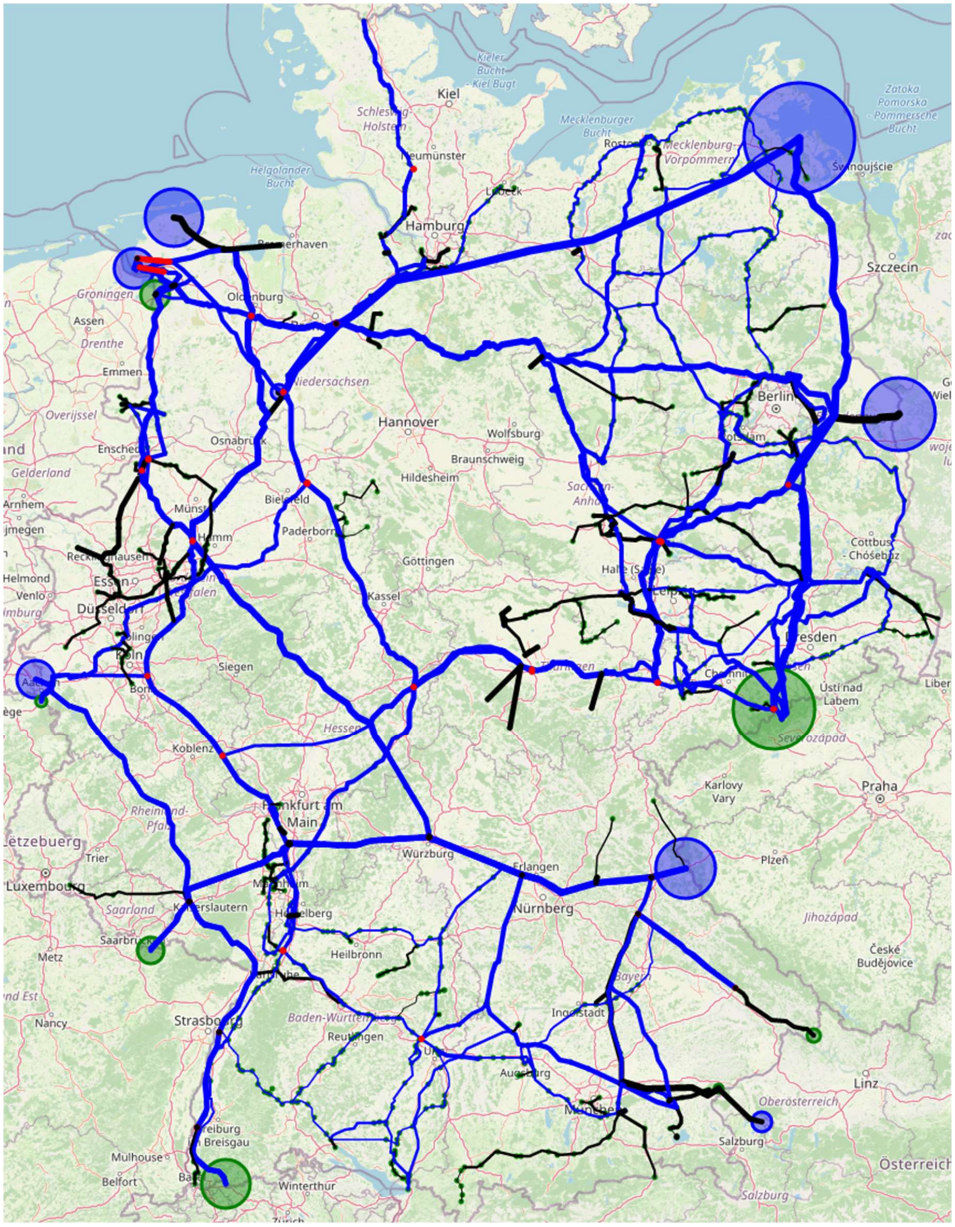


Abbildung I.8.18.16: Ein-/Ausspeisesituation der Erdgas-Nominierung des 02.12.2015 um 05:00 Uhr. Blaue Kreise repräsentieren Einspeisungen und grüne Kreise Ausspeisungen. Ihre Größe ist proportional zur Größe der Ein-/Ausspeisung. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Durchmesser der jeweiligen Pipeline. Auf schwarz gefärbten Kanten (Pipelines) wurde der Fluss durch das Preprocessing auf einen festen Wert fixiert. Es ist darauf hinzuweisen, dass parallele Pipelinestränge aufgrund des Zoomlevels nicht erkennbar sind, aber abgebildet sind. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

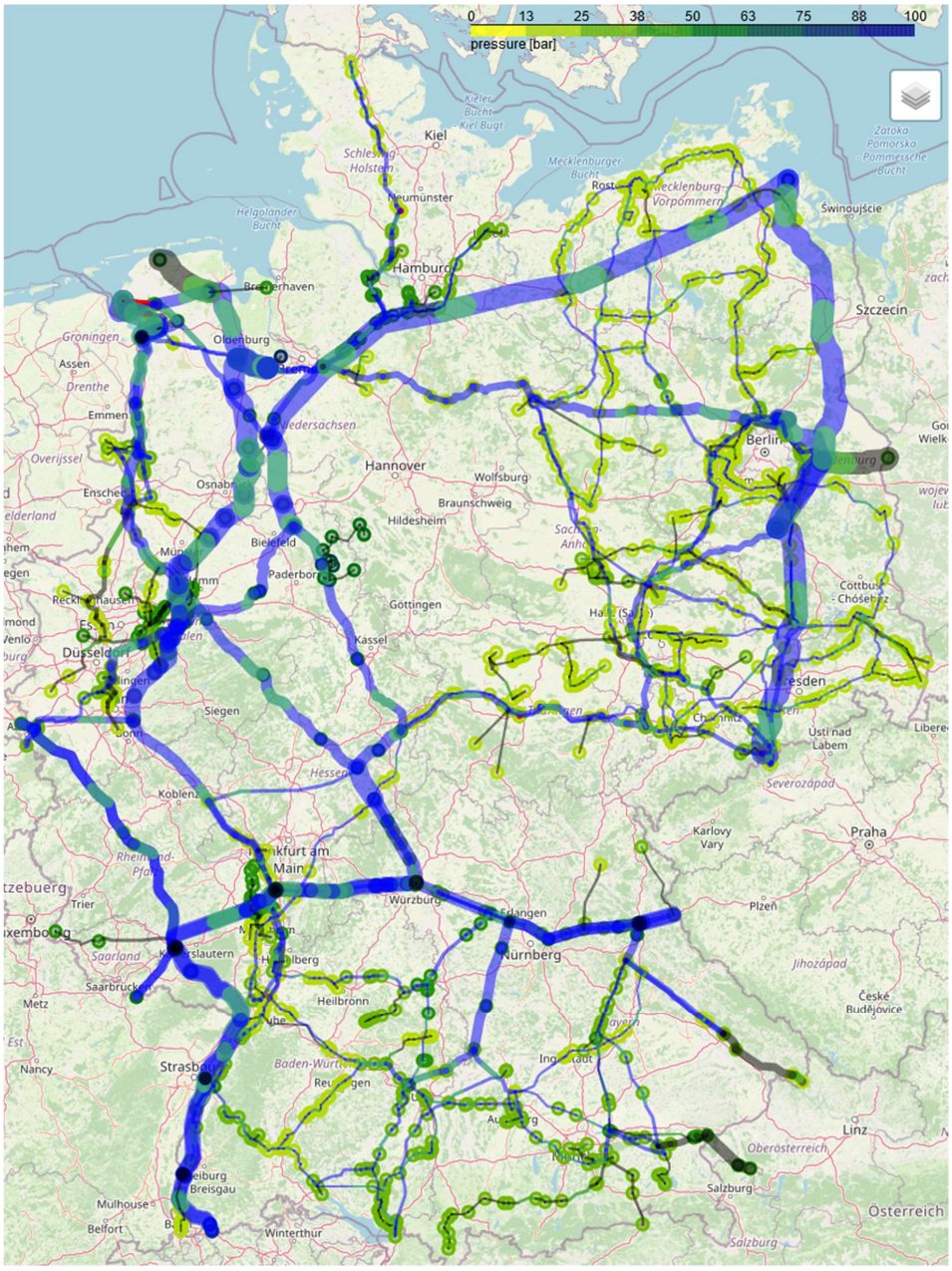


Abbildung I.8.18.17: Flüsse und Drücke in der Erdgas-Nominierung des 02.12.2015 um 05:00 Uhr. Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

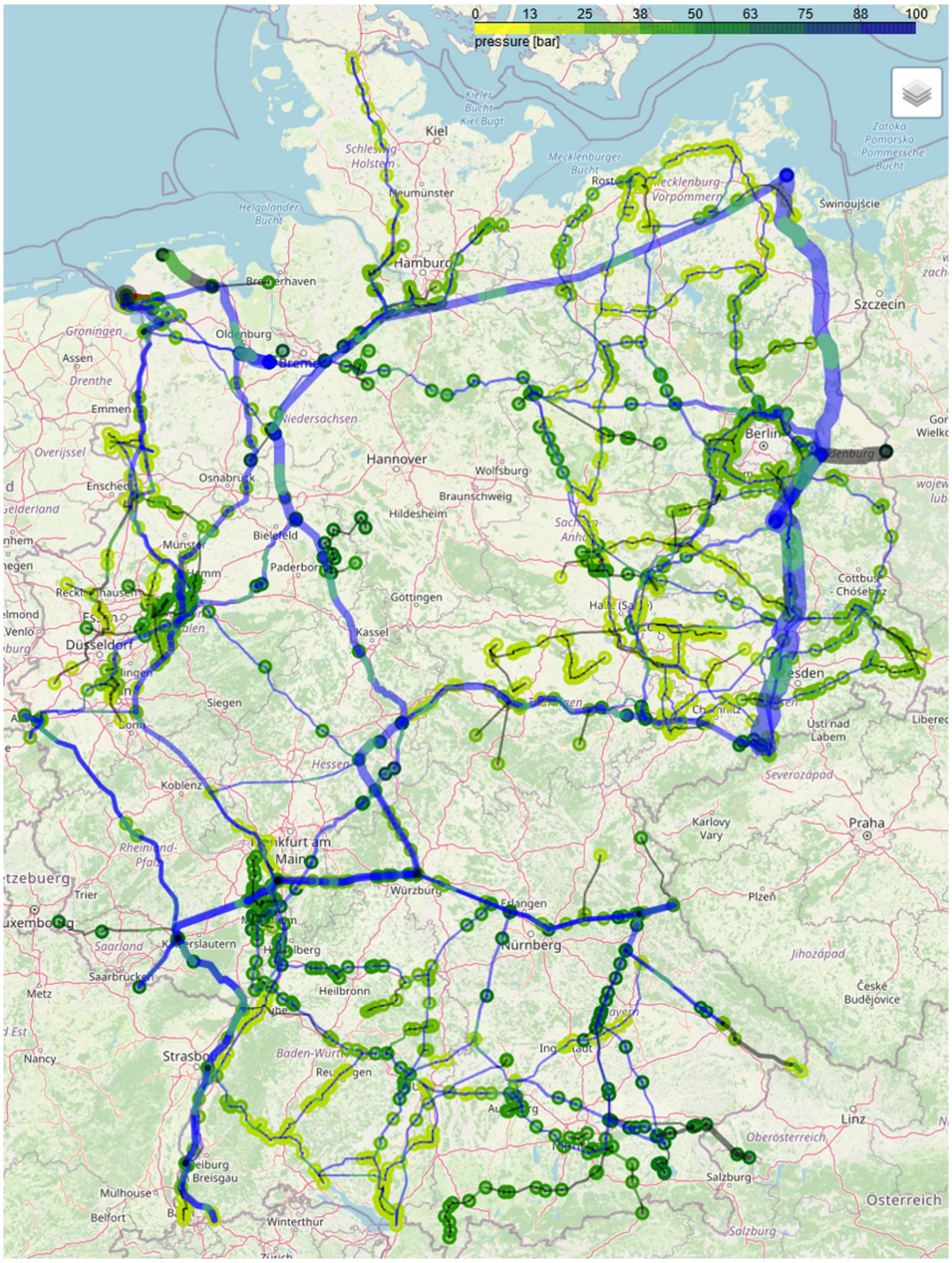


Abbildung I.8.18.18: Flüsse und Drücke in der Wasserstoff-Nominierung des 02.12.2015 um 05:00 Uhr. Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1.

J Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1.2.1: Überblick: Europäisches Gasnetz. Eigene Darstellung nach [10] 25

Abbildung 2.2.4.1: Eigene Darstellung: Übersicht zur Wasserstoffversprödung, von der Herkunft (oben) über die unterliegenden Mechanismen (Mitte) zu den zutage tretenden Schadensphänomenen (unten). 37

Abbildung 2.2.4.2: Eigene Darstellung in Anlehnung an [28]: Interaktion zwischen Wasserstoff und metallischer Oberfläche. (1): Physisorption aus der Gasphase an die oxid-freie, metallische Oberfläche. (2): Chemisorption einer Monolage. (3): Dissoziation zu atomarem Wasserstoff. (4): Diffusion des atomaren H^+ durch das Metallgitter und Trapping an energetisch günstigen Stellen (Versetzungen, Einschlüsse, Korngrenzen). (5): Rekombination von atomarem H^+ zu H_2 und Desorption. 38

Abbildung 2.2.4.3: Eigene Darstellung nach [52]: Mitriss von Staubpartikeln und Flüssigkeitstropfen. $\boldsymbol{q}$: Fluss, $\boldsymbol{p}$: Druck, $\boldsymbol{T}$: Temperatur, $\boldsymbol{vg}$: Gasgeschwindigkeit, $\boldsymbol{vg, krit}$: kritische Gasgeschwindigkeit für den Mitriss, $\boldsymbol{vMitriss}$: Partikel-/Tropfengeschwindigkeit 43

Abbildung 2.4.3.1: Bild: Cluster der Grüngasvariante im NEP-Gas 2020 [7]. Quelle: FNB Gas e.V. 71

Abbildung 2.4.3.2: Eigene Darstellung nach [7]: Vorgehen bei der Grüngasvariante im NEP-Gas 2020. 73

Abbildung 3.1.4.1: Überblick: Modellierte Wasserstoffnetzwerktopologie 2025. Blaue Kreise stehen für Quellen, und Grüne Kreise für Senken (siehe Tabelle 3.1.4.1). In dieser Darstellung dienen die Kreise lediglich der Verortung der Quellen und Senken und geben keinerlei Auskunft über Ein- oder Ausspeisemengen. 77

Abbildung 3.1.4.2: Überblick: Wasserstoffnetzwerktopologie 2025 (in Grün) gemäß Netzentwicklungsplan Gas 2020 [7]. 79

Abbildung 3.1.6.1: Überblick: Modellierte Wasserstoffnetzwerktopologie 2030. Blaue Kreise stehen für Quellen, und Grüne Kreise für Senken (siehe Tabelle 3.1.6.1). In dieser Darstellung dienen die Kreise lediglich der Verortung der Quellen und Senken und geben keinerlei Auskunft über Ein- oder Ausspeisemengen. 82

Abbildung 3.1.6.2: Überblick: Wasserstoffnetzwerktopologie 2030 (in Grün) gemäß Netzentwicklungsplan Gas 2020 [7]. Quelle: FNB Gas e.V. 83

Abbildung 3.1.7.1: Überblick über die Quellen- und Senkenverteilung im Basisszenario 2030. Die Kreisgrößen stellen die relative lokale Ein-/Ausspeisung im Verhältnis zur maximalen Ein-/Ausspeisung innerhalb des Szenarios dar, wobei die Skalierung über den Radius (nicht die Fläche) erfolgt. Zur Wahrung der Lesbarkeit sind Mindest- und Maximalradien definiert. Ein Vergleich der Kreisgrößen zwischen verschiedenen Szenarien ist daher nicht zulässig. 85

Abbildung 3.1.8.1: Beispielhafter Lastfall: Ein-/Ausspeiseintervalle mit darauf verorteten Lastflüssen. In diesem Beispiel wird eine Mindestnachfrage für jene Standorte angenommen, deren untere Intervallgrenze nicht auf der Nulllinie liegt. Hinweis zur

Darstellung: Die Linienverbindung dient lediglich der verbesserten Sichtbarkeit, falls mehrere Lastfälle gleichzeitig abgebildet sind. Jeder Quellen-/Senkenknoten ist, analog zur Problemformulierung in *Gl. 7.1 - Gl. 7.12*, einmal als Senke (linke Hälfte) und einmal als Quelle (rechte Hälfte) aufgeführt. 88

Abbildung 3.1.9.1: Überblick: Modellierte Wasserstoffnetzwerktopologie 2030 ([114]) gemäß Entwurf Szenariorahmen NEP-Gas 2022 (Stand Juni 2022). Blaue Kreise stehen für Quellen, und grüne Kreise für Senken, wobei in dieser Darstellung die Kreise lediglich der Verortung der Quellen und Senken dienen und keinerlei Auskunft über Ein- oder Ausspeisemengen geben. Die Nummerierung der Quellen und Senken entspricht der „Id"-Spalte aus Tabelle 3.1.9.1, Tabelle 3.1.9.2 und Tabelle 3.1.9.3. 91

Abbildung 3.1.9.2: Skizze des geplanten Netzes 2030 gemäß Entwurf Szenariorahmen NEP-Gas 2022 92

Abbildung 3.2.3.1: Überblick: Graph der repräsentierten Netztopologie des deutschen H-Gas-Netzes. Die Breite der dargestellten Kanten ist proportional zum jeweiligen Pipelinedurchmesser. Das blaue Rechteck im Raum Nürnberg-Erlangen ist als Vergrößerung in Abbildung 3.2.3.2 dargestellt. 96

Abbildung 3.2.3.2: Mehrsträngig-ausgeführte Pipelines wurden auch als solche modelliert (siehe die in Abbildung 3.2.3.1 markierte MEGAL-Abzweigung (Box in der südlichen Hälfte). 97

Abbildung 3.2.3.3: Verbesserte Einlastung flächenspezifischer Lasten unter Zuhilfenahme eines höher aufgelösten Datensatzes in Verbindung mit einer Breitensuche (BFS). Veranschaulichung der Knotenzuordnung auf Basis eines Zoom-Ausschnitts von Norddeutschland: 1. Schritt: Erzeugung von Voronoi-Polygonen um die Netzknoten des feinaufgelösten Datensatzes. 98

Abbildung 3.2.3.4: Verbesserte Einlastung flächenspezifischer Lasten unter Zuhilfenahme eines höher aufgelösten Datensatzes in Verbindung mit einer Breitensuche (BFS). Veranschaulichung der Knotenzuordnung auf Basis eines Zoom-Ausschnitts von Norddeutschland: 2. Schritt: Zuordnung der Knoten des reduzierten Netzwerkdatensatzes zu den nächsten Nachbarknoten des feinaufgelösten Netzwerks (Voronoi-Knoten). 98

Abbildung 3.2.3.5: Verbesserte Einlastung flächenspezifischer Lasten unter Zuhilfenahme eines höher aufgelösten Datensatzes in Verbindung mit einer Breitensuche (BFS). Veranschaulichung der Knotenzuordnung auf Basis eines Zoom-Ausschnitts von Norddeutschland: 3. Schritt: Finale Zuordnung der fein aufgelösten Netzknoten zu den Einlastungsknoten des reduzierten Netzwerks. Dies geschieht mittels der Breitensuche, die es ermöglicht für jeden Knoten des feinaufgelösten Netzwerks diesen entlang des Pipelineverlaufs zu einem Knoten des reduzierten Netzwerks zurückzuverfolgen. Die sich ergebende Zugehörigkeit dieser Voronoi-Knoten zu den Knoten des reduzierten Netzwerks wird durch die blauen Verbindungslinien symbolisiert. Daraus lässt sich erkennen welche Flächenbereiche welchen Netzknoten zuzuordnen sind. 99

Abbildung 4.1.9.1: Abbildung einer generischen Verdichterstation; A: Station; B: internes Bypass-Ventil; C: Einlass-/Auslassventil mit künstlichem Widerstand zur Abbildung interner Verrohrungsverluste; D1-D...: Verdichterkonfigurationen, flach ausgelegt, schaltbar über Ein-/Ausgangsventile; D1: Reihenschaltung von zwei Verdichtern; D2: Parallelschaltung zweier Verdichter mit zwei Stufen in Reihe; D...: weitere Konfigurationen analog zu D1 und D2. 108

Abbildung 4.1.9.2: Vereinfachte Darstellung von Verdichterstationen mit Peripherie als Verknüpfung zweier Sternschaltungen aus Druckregelventilen auf der Eingangsseite und Absperrventilen auf der Ausgangsseite. Hier beispielhaft für 3 angeschlossene Pipelines P1-P3; A: Eingangssternschaltung aus Druckregelventilen; B: Ausgangssternschaltung aus Absperrventilen. 110

Abbildung 4.1.10.1: Beispiel-Plot für das Ergebnis einer Nominierung im GasLib-582-v2 Benchmark-Netzwerk. Die Druckverteilung über die Knoten, gemäß der Farbkennung, ist klar erkennbar. Die Dicke der dargestellten Kanten ist proportional zum Fluss über die jeweilige Kante. 117

Abbildung 4.1.10.2: Beispiel einer interaktiv auswählbaren Komponententabelle im Ergebnisplot einer Nominierung im GasLib-582-v2 Benchmark-Netzwerk. 118

Abbildung 4.1.10.1: Eigene Darstellung: Moody-Diagramm: Darstellung des Druckverlustkoeffizienten (y-Achse links) in Abhängigkeit der Reynoldszahl (x-Achse) und der relativen Rauigkeit (y-Achse rechts) für verschiedene Modelle (Hagen-Poiseuille (laminar), Nikuradse (Re → ∞), Hofer (explizit), Colebrook-White (implizit). 119

Abbildung 4.1.10.2: Vergleich Druckabfall Gleichung *Gl. 4.3* gegenüber pandapipes: Fluss 300 kg/s Erdgas, Rohrrauigkeit 1 mm, Eingangsdruck 86 bar. Variiert über den Rohrdurchmesser (x-Achse, 100 mm Schritte) und über die Rohrlänge (Bildtiefe, 25 km Schritte). 122

Abbildung 4.1.10.3: Vergleich Druckabfall Gleichung *Gl. 4.3* gegenüber pandapipes: Fluss 10 kg/s Wasserstoff, Rohrrauigkeit 1 mm, Eingangsdruck 60 bar. Variiert über den Rohrdurchmesser (x-Achse, 100 mm Schritte) und über die Rohrlänge (Bildtiefe, 20 km Schritte). 123

Abbildung 4.1.10.4: Screening: Differenz des Ausgangsdrucks nach Gleichung *Gl. 4.3* gegenüber pandapipes: Für jede Kachel: Flüsse (x-Achse): [0,1 kg/s - 0,5 kg/s, 1 - 20 kg/s], Eingangsdrücke (y-Achse): 5-100 bar, Wasserstoff, Rohrrauigkeit 1 mm. 124

Abbildung 4.1.10.5: Vergleich Druckabfall Gleichung *Gl. 4.3* gegenüber pandapipes: Fluss 300 kg/s Erdgas, Rohrrauigkeit 0.84 mm, Eingangsdruck 86 bar. Variiert über den Rohrdurchmesser (x-Achse, 100 mm Schritte) und über die Rohrlänge (Bildtiefe, 25 km Schritte). 125

Abbildung 4.1.10.1: Flüsse im Cluster West des Basisszenarios für das Jahr 2025. Die Ein-/Ausspeisemengen sind als Kreise dargestellt und relativ zueinander skaliert. Quellen sind blau gefärbt und Senken grün. Die jeweilige Ein-/Ausspeisemenge ist

proportional zum Kreisdurchmesser. Die Dicke einer Kante des Graphen ist proportional zum Fluss über die Kante. Die größte Einspeisung hier liegt bei 3,52 kg/s in Vlieghuis. 128

Abbildung 4.1.10.2: Flüsse und Drücke im Cluster West des Basisszenarios für das Jahr 2025. Die Drücke an den Netzknoten sind farblich entsprechend der Farbskala kodiert. Die Dicke einer Kante des Graphen ist proportional zum Fluss über die Kante. Einige Knoten erscheinen ausgefüllt, dies ist jedoch nur auf die Überlagerung von nahe beieinander liegenden Knoten zurückzuführen. 129

Abbildung 4.1.10.3: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im 2025 Basisszenario (durchschnittlich) bei 30 bar Maximaldruck. Die „Fehlerschranken“ geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an. 131

Abbildung 4.1.10.4: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im 2025 Basisszenario (durchschnittlich) bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an. 133

Abbildung 5.2.1.1: Flüsse im 2030 Basisszenario bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Die Ein-/Ausspeisemengen sind als Kreise dargestellt und relativ zueinander skaliert. Quellen sind blau gefärbt und Senken grün. Die jeweilige Ein-/Ausspeisemenge ist proportional zum Kreisdurchmesser. Die Dicke einer Kante des Graphen ist proportional zum Fluss über die Kante. Die größte Ausspeisung hier liegt bei 6,65 kg/s in Hamborn (ThyssenKrupp). Zum Vergleich siehe auch Tabelle 5.2.1.2. 135

Abbildung 5.2.1.2: Drücke im Basisszenario 2030 bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0.1 mm. Die Drücke an den Netzknoten sind farblich entsprechend der Farbskala kodiert. Die Dicke einer Kante des Graphen ist proportional zum Fluss über die Kante. Einige Knoten erscheinen ausgefüllt, dies ist jedoch nur auf die Überlagerung von nahe beieinander liegenden Knoten zurückzuführen. 137

Abbildung 5.2.2.1: Flüsse im Variation 1 Szenario 2030 bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Die Ein-/Ausspeisemengen sind als Kreise dargestellt und relativ zueinander skaliert. Die jeweilige Ein-/Ausspeisemenge ist proportional zum Kreisdurchmesser. Quellen sind blau gefärbt und Senken grün. Die Dicke einer Kante des Graphen ist proportional zum Fluss über die Kante. Die größte Ausspeisung hier liegt bei 2,11 kg/s in Hallendorf (Salzgitter Flachstahl). Zum Vergleich siehe auch Tabelle 5.2.2.2. 138

Abbildung 5.2.2.2: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im Variation 1 Szenario 2030 (durchschnittlich) bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0.1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an. 140

Abbildung 5.2.3.1: Flüsse im Variation 2 Szenario 2030 bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Die Ein-/Ausspeisemengen sind als Kreise dargestellt und relativ

zueinander skaliert. Die jeweilige Ein-/Ausspeisemenge ist proportional zum Kreisdurchmesser. Quellen sind blau gefärbt und Senken grün. Die Dicke einer Kante des Graphen ist proportional zum Fluss über die Kante. Die größte Einspeisung liegt hier bei 7,51 kg/s in Elten. Zum Vergleich siehe auch Tabelle 5.2.3.1. 141

Abbildung 5.2.3.2: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im Variation 2 Szenario 2030 (durchschnittlich) bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an. 142

Abbildung 5.2.3.1: 200 Zufällige Lastfälle mit angesetzten Ein-/Ausspeiseintervallen. Die Linienverbindung dient lediglich der Orientierung, da mehrere Lastfälle gleichzeitig abgebildet sind. Jeder Quellen-/Senkenknoten ist, analog zur Problemformulierung in *Gl. 7.1* - *Gl. 7.12*, einmal als Senke (linke Hälfte) und einmal als Quelle (rechte Hälfte) aufgeführt. 144

Abbildung 5.2.3.2: 200 Zufällige Lastfälle: Resultierende Fließgeschwindigkeiten bei Druckmaximierung im Netz mit 10% Optimality-Gap. Unterschiedliche Farben stehen für unterschiedliche Lastfälle. Kernpunkt ist jedoch, dass man erkennt, dass nur auf wenigen Pipelines die Geschwindigkeit stärker schwankt. 145

Abbildung 5.2.3.3: 200 Zufällige Lastfälle: Kumulative Betrachtung: Resultierende Drücke bei Druckmaximierung im Netz mit 10% Optimality-Gap. Unterschiedliche Farben stehen für unterschiedliche Lastfälle. Es ist einerseits zu erkennen, dass nur an wenigen Stellen die 25-bar-Marke unterschritten wird, und anderseits ist zu erkennen, dass es bestimmte Knoten gibt, wo die Drücke über die Lastfälle hinweg stark schwanken. 146

Abbildung 5.2.3.4: 200 Zufällige Lastfälle: Druck-Geschwindigkeits-Paare im Verhältnis zur Grenzwertkurve gemäß Tabelle 2.2.4.2. Unterschiedliche Farben stehen für unterschiedliche Lastfälle. Unterschiedliche Farben stehen für unterschiedliche Lastfälle. 148

Abbildung 5.2.3.5: 200 Zufällige Lastfälle: Druck-Geschwindigkeits-Paare im Verhältnis zur Grenzwertkurve gemäß Tabelle 2.2.4.2 bei einer globalen Druck-Unterschranke von 30 bar ohne Druckregelventile an den Kreuzungspunkten. Unterschiedliche Farben stehen für unterschiedliche Lastfälle. 150

Abbildung 5.2.3.6: 200 Zufällige Lastfälle: Druck-Geschwindigkeits-Paare im Verhältnis zur Grenzwertkurve gemäß Tabelle 2.2.4.2 bei einer globalen Druck-Oberschranke von 30 bar ohne Druckregelventile an den Kreuzungspunkten und Minimierung der Drücke (10% Optimality-Gap zugelassen). Unterschiedliche Farben stehen für unterschiedliche Lastfälle. 152

Abbildung 5.2.3.7: 200 Zufällige Lastfälle mit angesetzten Ein-/Ausspeiseintervallen und einer zu deckenden Mindestnachfrage von 80% der jeweiligen maximalen Ausspeisung bei der Industrie. 154

Abbildung 5.2.3.8: 200 Zufällige Lastfälle: Druck-Geschwindigkeits-Paare im Verhältnis zur Grenzwertkurve gemäß Tabelle 2.2.4.2 bei einer zu deckenden Mindestnachfrage von 80% der jeweiligen

maximalen Ausspeisung bei der Industrie. (10% Optimality-Gap zugelassen). Unterschiedliche Farben stehen für unterschiedliche Lastfälle. 155

Abbildung 5.2.3.1: Bild: Bottlenecks auf den Pipelineabschnitten Niederkassel-Grengel and Keldenich-Niederkassel. 156

Abbildung 5.2.3.2: Bild: Bottleneck auf dem Pipelineabschnitt Landsberg-Braschwitz. 157

Abbildung 5.2.3.1: Ein-/Ausspeisesituation der Erdgas-Nominierung des 06.02.2015 um 06:00 Uhr. Blaue Kreise repräsentieren Einspeisungen und grüne Kreise Ausspeisungen. Ihre Größe ist proportional zur Größe der Ein-/Ausspeisung. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Durchmesser der jeweiligen Pipeline. Auf schwarz gefärbten Kanten (Pipelines) wurde der Fluss durch das Preprocessing auf einen festen Wert fixiert. Es ist darauf hinzuweisen, dass parallele Pipelinestränge aufgrund des Zoomlevels nicht erkennbar sind, aber abgebildet sind. 160

Abbildung 5.2.3.2: Bottleneck: Die Nominierung für den 06.02.2015 um 06:00 Uhr zeigt einen Bottleneck am Chiemsee auf. 161

Abbildung 5.2.3.3: Ein-/Ausspeisesituation der *Erdgas-Nominierung* des 02.12.2015 um 05:00 Uhr. Blaue Kreise repräsentieren Einspeisungen und grüne Kreise Ausspeisungen. Ihr Durchmesser ist proportional zur Größe der Ein-/Ausspeisung. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Durchmesser der jeweiligen Pipeline. Auf schwarz gefärbten Kanten (Pipelines) wurde der Fluss durch das Preprocessing auf einen festen Wert fixiert. Es ist darauf hinzuweisen, dass parallele Pipelinestränge aufgrund des Zoomlevels nicht erkennbar sind, aber abgebildet sind. 164

Abbildung 5.2.3.4: Flüsse und Drücke in der *Erdgas-Nominierung* des 02.12.2015 um 05:00 Uhr. Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. 165

Abbildung 5.2.3.5: Flüsse und Drücke in der *Wasserstoff-Nominierung* des 02.12.2015 um 05:00 Uhr. Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. 166

Abbildung 5.2.3.6: Durchschnittlich geschätzte Fließgeschwindigkeiten von *Erdgas* entlang der Pipelineabschnitte (x-Achse) am 06.02.2015 um 06:00 Uhr. Die Fehlerschranken kennzeichnen die Fließgeschwindigkeit am Ein- bzw. Austritt der Pipeline. Mit wenigen Ausnahmen liegen die Geschwindigkeiten unter 15 m/s bzw. unter 10 m/s. 167

Abbildung 5.2.3.7: Durchschnittlich geschätzte Fließgeschwindigkeiten von *Erdgas* entlang der Pipelineabschnitte (x-Achse) am 04.07.2015 um 00:00 Uhr. Die Fehlerschranken kennzeichnen die Fließgeschwindigkeit am Ein- bzw. Austritt der Pipeline. Mit wenigen Ausnahmen liegen die Geschwindigkeiten unter 10 m/s bzw. unter 5 m/s. Bemerkenswert ist hier ein großer Ausreißer mit bis zu 87 m/s. 168

Abbildung 5.2.3.8: Durchschnittlich geschätzte Fließgeschwindigkeiten von *Erdgas* entlang der Pipelineabschnitte (x-Achse) am 11.08.2015 um 15:00 Uhr. Die Fehlerschranken kennzeichnen die Fließgeschwindigkeit am Ein- bzw. Austritt der Pipeline. Mit wenigen Ausnahmen liegen die Geschwindigkeiten unter 10 m/s bzw. unter 5 m/s. 169

Abbildung 5.2.3.9: Durchschnittlich geschätzte Fließgeschwindigkeiten von *Erdgas* entlang der Pipelineabschnitte (x-Achse) am 17.08.2015 um 09:00 Uhr. Die Fehlerschranken kennzeichnen die Fließgeschwindigkeit am Ein- bzw. Austritt der Pipeline. Mit wenigen Ausnahmen liegen die Geschwindigkeiten unter 10 m/s. 170

Abbildung 5.2.3.10: Durchschnittlich geschätzte Fließgeschwindigkeiten von *Erdgas* entlang der Pipelineabschnitte (x-Achse) am 27.11.2015 um 17:00 Uhr. Die Fehlerschranken kennzeichnen die Fließgeschwindigkeit am Ein- bzw. Austritt der Pipeline. Mit wenigen Ausnahmen liegen die Geschwindigkeiten unter 10 m/s. 171

Abbildung 5.2.3.11: Durchschnittlich geschätzte Fließgeschwindigkeiten von *Erdgas* entlang der Pipelineabschnitte (x-Achse) am 02.12.2015 um 05:00 Uhr. Die Fehlerschranken kennzeichnen die Fließgeschwindigkeit am Ein- bzw. Austritt der Pipeline. Mit wenigen Ausnahmen liegen die Geschwindigkeiten unter 10 m/s. Bemerkenswert ist hier ein großer Ausreißer mit bis zu 90 m/s. 172

Abbildung 5.2.3.12: Durchschnittlich geschätzte Fließgeschwindigkeiten von *Wasserstoff* entlang der Pipelineabschnitte (x-Achse) am 04.07.2015 um 00:00 Uhr. Die Fehlerschranken kennzeichnen die Fließgeschwindigkeit am Ein- bzw. Austritt der Pipeline. Mit wenigen Ausnahmen liegen die Geschwindigkeiten unter 35 m/s. Die maximal erreichte Fließgeschwindigkeit liegt hier bei 168 m/s. 173

Abbildung 5.2.3.13: Durchschnittlich geschätzte Fließgeschwindigkeiten von *Wasserstoff* entlang der Pipelineabschnitte (x-Achse) am 11.08.2015 um 15:00 Uhr. Die Fehlerschranken kennzeichnen die Fließgeschwindigkeit am Ein- bzw. Austritt der Pipeline. Mit wenigen Ausnahmen liegen die Geschwindigkeiten unter 25 m/s bzw. unter 15 m/s. 174

Abbildung 5.2.3.14: Durchschnittlich geschätzte Fließgeschwindigkeiten von *Wasserstoff* entlang der Pipelineabschnitte (x-Achse) am 17.08.2015 um 09:00 Uhr. Die Fehlerschranken kennzeichnen die Fließgeschwindigkeit am Ein- bzw. Austritt der Pipeline. Mit wenigen Ausnahmen liegen die Geschwindigkeiten unter 25 m/s. Die maximal erreichte Fließgeschwindigkeit liegt hier bei 248 m/s. 175

Abbildung 5.2.3.15: Durchschnittlich geschätzte Fließgeschwindigkeiten von *Wasserstoff* entlang der Pipelineabschnitte (x-Achse) am 27.11.2015 um 17:00 Uhr. Die Fehlerschranken kennzeichnen die Fließgeschwindigkeit am Ein- bzw. Austritt der Pipeline. Mit wenigen Ausnahmen liegen die Geschwindigkeiten unter 45 m/s bzw. unter 25 m/s. Die maximal erreichte Fließgeschwindigkeit liegt hier bei 175 m/s. 176

Abbildung 5.2.3.16: Durchschnittlich geschätzte Fließgeschwindigkeiten von *Wasserstoff* entlang der Pipelineabschnitte (x-Achse) am 02.12.2015 um 05:00 Uhr. Die Fehlerschranken kennzeichnen die Fließgeschwindigkeit am Ein- bzw. Austritt der Pipeline. Mit wenigen Ausnahmen liegen die Geschwindigkeiten unter 35 m/s bzw. unter 25 m/s. Die maximal erreichte Fließgeschwindigkeit liegt hier bei 163 m/s. 177

Abbildung 5.2.3.17: Loopleitung mit hoher Fließgeschwindigkeit bei Oldenburg in der Node-Slack-Lösung. 178

Abbildung 5.2.3.18: Flüsse und Drücke in der Erdgas-Nominierung des 04.07.2015 um 00:00 Uhr. Bei Maximierung (10%-Optimality-Gap) der Drücke an den Netzknoten. Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. 179

Abbildung 5.2.3.1: Beispiel einer Ausbaumaßnahme in der FNB-Gas Datenbank, Teil 1 204

Abbildung 5.2.3.2: Beispiel einer Ausbaumaßnahme in der FNB-Gas Datenbank, Teil 2 205

Abbildung 5.2.3.3: Beispiel einer Ausbaumaßnahme in der FNB-Gas Datenbank, Teil 3 206

Abbildung 5.2.3.1: Voronoi-Polygone um die Knoten des fein aufgelösten Netzwerks. 208

Abbildung 5.2.3.2: Knoten des reduzierten Netzwerks in Relation zu den fein aufgelösten Netzknoten im Hintergrund. 209

Abbildung 5.2.3.3: Zuweisung der Knoten des fein aufgelösten Netzwerks zu den Knoten des reduzierten Netzwerks. 210

Abbildung 5.2.3.1: Sektorzeitreihe: Energienachfrage Haushalt 211

Abbildung 5.2.3.2: Sektorzeitreihe: Nachfrage Industrie (konstant bei 25 GWh/h) 212

Abbildung 5.2.3.3: Sektorzeitreihe: Einspeicherung in Gasspeicher 213

Abbildung 5.2.3.4: Sektorzeitreihe: Ausspeicherung aus Gasspeichern 214

Abbildung 5.2.3.5: Sektorzeitreihe: Wärmekraftwerke 215

Abbildung 5.2.3.6: Sektorzeitreihe: Industrielle Kraft-Wärme-Kopplung (quasi-konstant) 216

Abbildung 5.2.3.7: Sektorzeitreihe: Öffentliche Kraft-Wärme-Kopplung 217

Abbildung 5.2.3.8: Sektorzeitreihe: Bio-Methan-Erzeugung 218

Abbildung 5.2.3.9: Sektorzeitreihe: Gas-Exporte 219

Abbildung 5.2.3.10: Sektorzeitreihe: Gas-Importe 220

Abbildung 5.2.3.11: Sektorzeitreihe: Dienstleistungen 221

Abbildung 5.2.3.12: Sektorzeitreihe: Kraftwerke (öffentlich) 222

Abbildung 5.2.3.13: Sektorzeitreihe: Nicht-energetischer Verbrauch 223

Abbildung 5.2.3.14: Sektorzeitreihe: Mobilität 224

Abbildung 5.2.3.15: Sektorzeitreihe: Anderweitig nicht zugeordnete Nachfrage 225

Abbildung 5.2.3.16: Sektorzeitreihe: Inländische Produktion/Förderung 226

Abbildung I.8.2.1: Flüsse im 2025 Basisszenario bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 239

Abbildung I.8.2.2: Drücke im 2025 Basisszenario bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 240

Abbildung I.8.3.1: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im 2025 Basisszenario (durchschnittlich) bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an. 243

Abbildung I.8.3.2: Flüsse im 2025 Basisszenario bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 244

Abbildung I.8.3.3: Drücke im 2025 Basisszenario bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 245

Abbildung I.8.4.1: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im 2025 Basisszenario (durchschnittlich) bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an. 248

Abbildung I.8.4.2: Flüsse im 2025 Basisszenario bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 249

Abbildung I.8.4.3: Drücke im 2025 Basisszenario bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 250

Abbildung I.8.5.1: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im 2025 Basisszenario (durchschnittlich) bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an. 253

Abbildung I.8.5.2: Flüsse im 2025 Basisszenario bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 254

Abbildung I.8.5.3: Drücke im 2025 Basisszenario bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 255

Abbildung I.8.7.1: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im 2030 Basisszenario (durchschnittlich) bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an. 259

Abbildung I.8.7.2: Flüsse im 2030 Basisszenario bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 260

Abbildung I.8.7.3: Drücke im 2030 Basisszenario bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 261

Abbildung I.8.8.1: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im 2030 Basisszenario (durchschnittlich) bei 60 bar Maximaldruck und angenommener

Rohrrauigkeit von 1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an. 265

Abbildung I.8.8.2: Flüsse im 2030 Basisszenario bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 266

Abbildung I.8.8.3: Drücke im 2030 Basisszenario bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 267

Abbildung I.8.9.1: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im 2030 Basisszenario (durchschnittlich) bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an. 271

Abbildung I.8.9.2: Flüsse im 2030 Basisszenario bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 272

Abbildung I.8.9.3: Drücke im 2030 Basisszenario bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 273

Abbildung I.8.10.1: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im Variation 1 Szenario 2030 (durchschnittlich) bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an. 277

Abbildung I.8.10.2: Flüsse im Variation 1 Szenario 2030 bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 278

Abbildung I.8.10.3: Drücke im Variation 1 Szenario 2030 bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 279

Abbildung I.8.11.1: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im Variation 1 Szenario 2030 (durchschnittlich) bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an. 283

Abbildung I.8.11.2: Flüsse im Variation 1 Szenario 2030 bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 284

Abbildung I.8.11.3: Drücke im Variation 1 Szenario 2030 bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 285

Abbildung I.8.12.1: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im Variation 1 Szenario 2030 (durchschnittlich) bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an. 289

Abbildung I.8.12.2: Flüsse im Variation 1 Szenario 2030 bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 290

Abbildung I.8.12.3: Drücke im Variation 1 Szenario 2030 bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 291

Abbildung I.8.13.1: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im Variation 1 Szenario 2030 (durchschnittlich) bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am - austritt an. 295

Abbildung I.8.13.2: Flüsse im Variation 1 Szenario 2030 bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 296

Abbildung I.8.13.3: Drücke im Variation 1 Szenario 2030 bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 297

Abbildung I.8.15.1: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im Variation 2 Szenario 2030 (durchschnittlich) bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an. 301

Abbildung I.8.15.2: Flüsse im Variation 2 Szenario 2030 bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 302

Abbildung I.8.15.3: Drücke im Variation 2 Szenario 2030 bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 303

Abbildung I.8.16.1: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im Variation 2 Szenario 2030 (durchschnittlich) bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am - austritt an. 307

Abbildung I.8.16.2: Flüsse im Variation 2 Szenario 2030 bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 308

Abbildung I.8.16.3: Drücke im Variation 2 Szenario 2030 bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 309

Abbildung I.8.17.1: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im Variation 2 Szenario 2030 (durchschnittlich) bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an. 313

Abbildung I.8.17.2: Flüsse im Variation 2 Szenario 2030 bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 314

Abbildung I.8.17.3: Drücke im Variation 2 Szenario 2030 bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 315

Abbildung I.8.18.1: Ein-/Ausspeisesituation der Erdgas-Nominierung des 06.02.2015 um 06:00 Uhr. Blaue Kreise repräsentieren

Einspeisungen und grüne Kreise Ausspeisungen. Ihre Größe ist proportional zur Größe der Ein-/Ausspeisung. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Durchmesser der jeweiligen Pipeline. Auf schwarz gefärbten Kanten (Pipelines) wurde der Fluss durch das Preprocessing auf einen festen Wert fixiert. Es ist darauf hinzuweisen, dass parallele Pipelinestränge aufgrund des Zoomlevels nicht erkennbar sind, aber abgebildet sind. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 318

Abbildung I.8.18.2: Flüsse und Drücke in der Erdgas-Nominierung des 06.02.2015 um 06:00 Uhr. Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 319

Abbildung I.8.18.3: Flüsse und Drücke in der Wasserstoff-Nominierung des 06.02.2015 um 06:00 Uhr (unlösbar, d.h. verbleibendes Node-Slack). Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 320

Abbildung I.8.18.4: Ein-/Ausspeisesituation der Erdgas-Nominierung des 04.07.2015 um 00:00 Uhr. Blaue Kreise repräsentieren Einspeisungen und grüne Kreise Ausspeisungen. Ihre Größe ist proportional zur Größe der Ein-/Ausspeisung. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Durchmesser der jeweiligen Pipeline. Auf schwarz gefärbten Kanten (Pipelines) wurde der Fluss durch das Preprocessing auf einen festen Wert fixiert. Es ist darauf hinzuweisen, dass parallele Pipelinestränge aufgrund des Zoomlevels nicht erkennbar sind, aber abgebildet sind. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 321

Abbildung I.8.18.5: Flüsse und Drücke in der Erdgas-Nominierung des 04.07.2015 um 00:00 Uhr. Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 322

Abbildung I.8.18.6: Flüsse und Drücke in der Wasserstoff-Nominierung des 04.07.2015 um 00:00 Uhr. Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 323

Abbildung I.8.18.7: Ein-/Ausspeisesituation der Erdgas-Nominierung des 11.08.2015 um 15:00 Uhr. Blaue Kreise repräsentieren Einspeisungen und grüne Kreise Ausspeisungen. Ihre Größe ist proportional zur Größe der Ein-/Ausspeisung. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Durchmesser der jeweiligen Pipeline. Auf schwarz gefärbten Kanten (Pipelines) wurde der Fluss durch das Preprocessing auf einen festen Wert fixiert. Es ist darauf hinzuweisen, dass parallele Pipelinestränge aufgrund des Zoomlevels nicht erkennbar sind, aber abgebildet sind. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 324

Abbildung I.8.18.8: Flüsse und Drücke in der Erdgas-Nominierung des 11.08.2015 um 15:00 Uhr (unlösbar, d.h. verbleibendes Node-Slack). Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des

dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 325

Abbildung I.8.18.9: Flüsse und Drücke in der Wasserstoff-Nominierung des 11.08.2015 um 15:00 Uhr (unlösbar, d.h. verbleibendes Node-Slack). Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 326

Abbildung I.8.18.10: Ein-/Ausspeisesituation der Erdgas-Nominierung des 17.08.2015 um 09:00 Uhr. Blaue Kreise repräsentieren Einspeisungen und grüne Kreise Ausspeisungen. Ihre Größe ist proportional zur Größe der Ein-/Ausspeisung. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Durchmesser der jeweiligen Pipeline. Auf schwarz gefärbten Kanten (Pipelines) wurde der Fluss durch das Preprocessing auf einen festen Wert fixiert. Es ist darauf hinzuweisen, dass parallele Pipelinestränge aufgrund des Zoomlevels nicht erkennbar sind, aber abgebildet sind. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 327

Abbildung I.8.18.11: Flüsse und Drücke in der Erdgas-Nominierung des 17.08.2015 um 09:00 Uhr. Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 328

Abbildung I.8.18.12: Flüsse und Drücke in der Wasserstoff-Nominierung des 17.08.2015 um 09:00 Uhr. Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 329

Abbildung I.8.18.13: Ein-/Ausspeisesituation der Erdgas-Nominierung des 27.11.2015 um 17:00 Uhr. Blaue Kreise repräsentieren Einspeisungen und grüne Kreise Ausspeisungen. Ihre Größe ist proportional zur Größe der Ein-/Ausspeisung. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Durchmesser der jeweiligen Pipeline. Auf schwarz gefärbten Kanten (Pipelines) wurde der Fluss durch das Preprocessing auf einen festen Wert fixiert. Es ist darauf hinzuweisen, dass parallele Pipelinestränge aufgrund des Zoomlevels nicht erkennbar sind, aber abgebildet sind. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 330

Abbildung I.8.18.14: Flüsse und Drücke in der Erdgas-Nominierung des 27.11.2015 um 17:00 Uhr. Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 331

Abbildung I.8.18.15: Flüsse und Drücke in der Wasserstoff-Nominierung des 27.11.2015 um 17:00 Uhr. Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 332

Abbildung I.8.18.16: Ein-/Ausspeisesituation der Erdgas-Nominierung des 02.12.2015 um 05:00 Uhr. Blaue Kreise repräsentieren

Einspeisungen und grüne Kreise Ausspeisungen. Ihre Größe ist proportional zur Größe der Ein-/Ausspeisung. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Durchmesser der jeweiligen Pipeline. Auf schwarz gefärbten Kanten (Pipelines) wurde der Fluss durch das Preprocessing auf einen festen Wert fixiert. Es ist darauf hinzuweisen, dass parallele Pipelinestränge aufgrund des Zoomlevels nicht erkennbar sind, aber abgebildet sind. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 333

Abbildung I.8.18.17: Flüsse und Drücke in der Erdgas-Nominierung des 02.12.2015 um 05:00 Uhr. Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 334

Abbildung I.8.18.18: Flüsse und Drücke in der Wasserstoff-Nominierung des 02.12.2015 um 05:00 Uhr. Die Drücke an den Knoten sind entsprechend des dargestellten Farbcodes (oben rechts) eingefärbt. Die Dicke der Kanten ist proportional zum Fluss darüber. Legende, siehe Tabelle I.8.1.1. 335

K Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.2.1.1: Denkbare Netzstrukturszenarien nach [23]. 32

Tabelle 2.2.4.1: Kriterien, wann Hot-Tapping von Wasserstoffleitungen vermieden werden sollte (gemäß AIGA [51]). 42

Tabelle 2.2.4.2: Anhaltswerte: Maximale Fließgeschwindigkeiten Wasserstoff in Abhängigkeit des Betriebsdrucks. 45

Tabelle 2.2.4.3: Technische Faktoren für die Auslegung von Gas-Pipeline-Verdichtern 46

Tabelle 2.2.4.4: Auszug explosionsgefahrrelevanter Kennwerte für Wasserstoff und Methan (stellvertretend für Erdgas) gemäß [59]. UEG: untere Explosionsgrenze, OEG: obere Explosionsgrenze. 49

Tabelle 2.2.4.5: Kernfragen zur Systemeignung von Wasserstoff- und Erdgasnetz im Rahmen der Wasserstoffumstellung. 51

Tabelle 2.2.4.1: Fragen die mithilfe der Gasnetzmodellierung beantwortet werden können. 53

Tabelle 2.4.1: Ansätze zur Datenaufbereitung von Gasnetzdaten nach [95]. 62

Tabelle 2.4.2: Notwendige und optionale Daten zur Gasnetzbeschreibung nach [95]. 62

Tabelle 2.4.1.1: Vor- und Nachteile unterschiedlicher, verfügbarer Gasnetz-Datensätze. 66

Tabelle 2.4.3.1: Grüngasprojekte Marktpartnerabfrage 69

Tabelle 2.4.3.2: Prognostizierte Entwicklung der H_2-Ein- und Ausspeisekapazitäten gemäß [7]. 72

Tabelle 2.4.3.3: Eigene Darstellung nach [7]: Deckung von Zusatzbedarfen durch Onshore-Windkraft ohne EE-Förderung, Importe aus den Niederlanden und aus Speichern. 72

Tabelle 3.1.3.1: Varianten der Lastfallerzeugung. 76

Tabelle 3.1.4.1: Legende zu Abbildung 3.1.4.1: (*): Nutzung unbekannt oder jenseits 2025 77

Tabelle 3.1.5.1: Übersicht: Gerechnete Lastfallszenarien für das Jahr 2025. 81

Tabelle 3.1.6.1: Legende zu Abbildung 3.1.6.1. 82

Tabelle 3.1.7.1: Übersicht: Gerechnete Lastfallszenarien für das Jahr 2030. 84

Tabelle 3.1.7.2: Legende zu Abbildung 3.1.7.1 86

Tabelle 3.1.9.1: Zukünftige Wasserstoffverbraucher NEP-Gas 2020 nach [114] 89

Tabelle 3.1.9.2: Geplante Wasserstoffprojekte gemäß NEP-Gas 2020 nach [114] 90

Tabelle 3.1.9.3: Geplante Wasserstoffprojekte die in den IPCEI veröffentlich wurden, nach [114] 90

Tabelle 3.1.9.4: Farblegende zu Abbildung 3.1.9.1 91

Tabelle 3.2.3.1: Liste der als knotenscharf und als flächig angesetzten Sektoren. 94

Tabelle 3.2.3.2: Eckdaten: Netztopologie H-Gas. 94

Tabelle 3.2.3.3: Betrachtete stündliche Nominierungen nach Zeit und Auswahlkriterium. 100

Tabelle 4.1.2.1: Koeffizienten der Virialgleichung für Wasserstoff (*Gl. 4.9*) [144]. 103

Tabelle 4.1.10.1: Materialrauigkeitswerte, [13] Tafel 4.4 (Auszug) 120

Tabelle 4.1.10.2: Anhaltswerte integrale Rauigkeit, Tafel 4.5 [13] (nach DVGW-G 464). 120

Tabelle 4.1.10.3: Erfahrungswerte integrale Rauigkeit, [13] Tafel 4.6. 121

Tabelle 4.1.10.1: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im 2025 Basisszenario, 30 bar max., 0,1 mm. 126

Tabelle 4.1.10.2: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im 2025 Basisszenario (durchschnittlich) bei 30 bar Maximaldruck und Rohrrauigkeit von 0,1 mm. 130

Tabelle 4.1.10.3: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im 2025 Basisszenario bei 30 bar, 0,1 mm Rohrrauigkeit. 132

Tabelle 4.1.10.4: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im 2025 Basisszenario bei 60 bar, 0,1 mm Rohrrauigkeit. 133

Tabelle 5.2.1.1: Farblegende zu Abbildung 5.2.1.1. 136

Tabelle 5.2.1.2: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im Basisszenario 2030. 136

Tabelle 5.2.2.1: Farblegende zu Abbildung 5.2.1.1. 138

Tabelle 5.2.2.2: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im Variation 1 Szenario 2030. 139

Tabelle 5.2.3.1: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im Variation 2 Szenario 2030. 140

Tabelle 5.2.3.2: Farblegende zu Abbildung 5.2.3.1 142

Tabelle 5.2.3.1: Lastfallerzeugungsszenarien: Screening-Rechnungen 143

Tabelle 5.2.3.1: Stündliche Nominierungen und Ergebnisse. 162

Tabelle 5.2.3.1: Die Farben des Wasserstoffs [153]. 203

Tabelle I.7.1.1: 2025: Quellen und Senken im Cluster Ost. 227

Tabelle I.7.1.2: 2025: Quellen und Senken im Cluster Nord. 227

Tabelle I.7.1.3: 2025: Cluster West. 229

Tabelle I.7.2.1: 2030: Cluster West/Nord (1/3). 231

Tabelle I.7.2.2: 2030: Cluster West/Nord (2/3). 233

Tabelle I.7.2.3: 2030: Cluster West/Nord (3/3). 234

Tabelle I.8.1.1: Farblegende für die Ergebnis-Screenshots 237

Tabelle I.8.2.1: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im 2025 Basisszenario bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm 237

Tabelle I.8.2.2: Geschätzte Fließgeschwindigkeiten im 2025 Basisszenario (durchschnittlich) bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. Die Fehlerschranken geben die Fließgeschwindigkeit am Pipelineeintritt bzw. am -austritt an. 238

Tabelle I.8.2.3: Leitungsflüsse im 2025 Basisszenario bei einem Rohrrauigkeitswert von 1 mm. 241

Tabelle I.8.2.4: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im 2025 Basisszenario bei 30 bar, 1 mm Rohrrauigkeit. 241

Tabelle I.8.3.1: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im 2025 Basisszenario bei 30 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. 242

Tabelle I.8.3.2: Leitungsflüsse im 2025 Basisszenario bei einem Rohrrauigkeitswert von 0,1 mm. 246

Tabelle I.8.3.3: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im 2025 Basisszenario bei 30 bar, 0,1 mm Rohrrauigkeit. 246

Tabelle I.8.4.1: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im 2025 Basisszenario 247

Tabelle I.8.4.2: Leitungsflüsse im 2025 Basisszenario bei einem Rohrrauigkeitswert von 1 mm. 251

Tabelle I.8.4.3: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im 2025 Basisszenario bei 60 bar, 1 mm Rohrrauigkeit. 251

Tabelle I.8.5.1: Leitungsflüsse im 2025 Basisszenario bei einem Rohrrauigkeitswert von 0,1 mm. 256

Tabelle I.8.5.2: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im 2025 Basisszenario bei 60 bar, 0,1 mm Rohrrauigkeit. 257

Tabelle I.8.7.1: Quellen-/Senkenflüsse, Drücke: 2030 Basisszenario 258

Tabelle I.8.7.2: Leitungsflüsse im 2030 Basisszenario bei 30 bar Maximaldruck und einem Rohrrauigkeitswert von 0,1 mm. 262

Tabelle I.8.7.3: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im 2030 Basisszenario bei 30 bar, 0,1 mm Rohrrauigkeit. 263

Tabelle I.8.8.1: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im 2030 Basisszenario bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. 264

Tabelle I.8.8.2: Leitungsflüsse im 2030 Basisszenario bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. 268

Tabelle I.8.8.3: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im 2030 Basisszenario bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. 269

Tabelle I.8.9.1: Leitungsflüsse im 2030 Basisszenario bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. 274

Tabelle I.8.9.2: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im 2030 Basisszenario bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. 275

Tabelle I.8.10.1: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im Variation 1 Szenario 2030 276

Tabelle I.8.10.2: Leitungsflüsse im Variation 1 Szenario 2030 bei einem Rohrrauigkeitswert von 1 mm. 280

Tabelle I.8.10.3: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im Variation 1 Szenario 2030 bei 30 bar, 1 mm Rohrrauigkeit. 281

Tabelle I.8.11.1: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im Variation 1 Szenario 2030 282

Tabelle I.8.11.2: Leitungsflüsse im Variation 1 Szenario 2030 bei einem Rohrrauigkeitswert von 0,1 mm. 286

Tabelle I.8.11.3: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im Variation 1 Szenario 2030 bei 30 bar, 0,1 mm Rohrrauigkeit. 287

Tabelle I.8.12.1: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im Variation 1 Szenario 2030 288

Tabelle I.8.12.2: Leitungsflüsse im Variation 1 Szenario 2030 bei 60 bar Maximaldruck und einem Rohrrauigkeitswert von 1 mm. 292

Tabelle I.8.12.3: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im Variation 1 Szenario 2030 bei 60 bar, 1 mm Rohrrauigkeit. 293

Tabelle I.8.13.1: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im Variation 1 Szenario 2030 bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. 294

Tabelle I.8.13.2: Leitungsflüsse im Variation 1 Szenario 2030 bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. 298

Tabelle I.8.13.3: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im Variation 1 Szenario 2030 bei 60 bar, 0,1 mm Rohrrauigkeit. 299

Tabelle I.8.15.1: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im Variation 2 Szenario 2030 300

Tabelle I.8.15.2: Leitungsflüsse im Variation 2 Szenario 2030 bei einem Rohrrauigkeitswert von 0,1 mm. 304

Tabelle I.8.15.3: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im Variation 2 Szenario 2030 bei 30 bar, 0,1 mm Rohrrauigkeit. 305

Tabelle I.8.16.1: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im Variation 2 Szenario 2030 306

Tabelle I.8.16.2: Leitungsflüsse im Variation 2 Szenario 2030 bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 1 mm. 310

Tabelle I.8.16.3: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im Variation 2 Szenario 2030 bei 60 bar, 1 mm Rohrrauigkeit. 311

Tabelle I.8.17.1: Quellen-/Senkenflüsse und Drücke im Variation 2 Szenario 2030 312

Tabelle I.8.17.2: Leitungsflüsse im Variation 2 Szenario 2030 bei 60 bar Maximaldruck und angenommener Rohrrauigkeit von 0,1 mm. 316

Tabelle I.8.17.3: Druckabsenkungsbedarf in den Druckregelventilen der Ersatzverschaltungen der Kreuzungspunkte im Variation 2 Szenario 2030 bei 60 bar, 0,1 mm Rohrrauigkeit. 317

L Literaturverzeichnis

[1] „COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe“. 2020. Zugegriffen: 4. Januar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0301

[2] Federal Ministry for Economics Affairs and Energy, „The National Hydrogen Strategy“, *Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action*. Juni 2020. Zugegriffen: 4. Januar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.html

[3] thyssenkrupp Steel, „Klimastrategie Stahl | thyssenkrupp Steel“, *thyssenkrupp*. 2022. Zugegriffen: 4. Januar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.thyssenkrupp-steel.com/de/unternehmen/nachhaltigkeit/klimastrategie/

[4] Salzgitter AG, „SALCOS“, *SALCOS®*. 2022. Zugegriffen: 4. Januar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://salcos.salzgitter-ag.com/en/index.html

[5] M. Hölling, M. Weng, und S. Gellert, „Bewertung der Herstellung von Eisenschwamm unter Verwendung von Wasserstoff“. 2017. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://germany.arcelormittal.com/icc/arcelor/med/b8e/b8e0c15a-102c-d51d-b2a9-147d7b2f25d3,11111111-1111-1111-1111-111111111111.pdf

[6] FNB Gas e.V., „Netzentwicklungsplan Gas 2020–2030 - Szenariorahmen“. 2020. Zugegriffen: 4. Januar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://fnb-gas.de/wp-content/uploads/2021/09/2019_08_16_nep-gas-2020-2030_szenariorahmen_final-1.pdf

[7] FNB Gas e.V., „Netzentwicklungsplan Gas 2020–2030“. 2020. Zugegriffen: 4. Januar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://fnb-gas.de/netzentwicklungspl%C3%A4ne/netzentwicklungsplan-2020/

[8] ENTSOG, „TRANSMISSION CAPACITY AND SYSTEM DEVELOPMENT MAPS“, *entsog.eu*. Zugegriffen: 4. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.entsog.eu/maps#

[9] Gas Infrastructure Europe, „Gas Infrastructure Europe - Maps“, *Gas Infrastructure Europe*. Zugegriffen: 4. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gie.eu/publications/maps/

[10] S&P Global Platts, „S&P Global Platts, Map Data Pro“. S&P Global Platts. Zugegriffen: 4. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.spglobal.com/platts/en/products-services/oil/map-data-pro

[11] ENTSOG, „TYNDP | Ten Year Network Development Plan“. Zugegriffen: 19. April 2022. [Online]. Verfügbar unter: http://www.entsog.eu/tyndp#entsog-ten-year-network-development-plan-2020

[12] „DVGW Website: Leitungstechnik“. Zugegriffen: 7. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dvgw.de/themen/sicherheit/technische-sicherheit-gas/leitungstechnik

[13] G. Cerbe *u. a.*, *Grundlagen der Gastechnik*, 7. vollständig neu bearbeitete Auflage. Carl Hanser Verlag München Wien, 2008. Zugegriffen: 19. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446449657

[14] „Statistics | Eurostat“. Zugegriffen: 4. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_CB_GAS__custom_2858462/default/table?lang=en

[15] PRISMA European Capacity Platform GmbH, „PRISMA“. Zugegriffen: 7. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://app.prisma-capacity.eu/platform/#/start

[16] T. Koch, B. Hiller, M. E. Pfetsch, und L. Schewe, *Evaluating Gas Network Capacities*. in Series on Optimization. MOS-SIAM, 2015. doi: https://doi.org/10.1137/1.9781611973693.

[17] API American Petroleum Institute, „API 5L: Specification for Line Pipe“. API Publishing Services, 1220 L Street, N. W, Washington, D.C. 20005., 2004. Zugegriffen: 1. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/api.5l.2004.pdf

[18] European Standards, „EN ISO 3183“. Beuth Verlag GmbH/DIN Media. doi: https://dx.doi.org/10.31030/3121092.

[19] „SGT-700 | Industrial Gas Turbine | Gas Turbines | Manufacturer | Siemens Energy Global“, *siemens-energy.com Global Website*. Zugegriffen: 4. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/gas-turbines/sgt-700.html

[20] „Mitsubishi Power | FT8® SWIFTPAC®“, *Mitsubishi Power*. Zugegriffen: 4. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://power.mhi.com/products/aerogasturbines/lineup/ft8sp

[21] J. Göbelbecker, „Pläne für ein Wasserstoffnetz in Deutschland und Europa“, *CHEMIE TECHNIK*. Zugegriffen: 7. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.chemietechnik.de/energie-utilities/wasserstoff/plaene-fuer-ein-nationales-wasserstoff-netz-in-deutschland-341.html

[22] „DVGW Website: Startseite - DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches“. Zugegriffen: 20. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dvgw.de/

[23] Bundesnetzagentur, „Regulierung von Wasserstoffnetzen - Bestandsaufnahme“. Zugegriffen: 11. Juni 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/NetzentwicklungUndSmartGrid/Wasserstoff/Wasserstoffpapier.pdf?__blob=publicationFile&v=2

[24] BMWi-Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, Hrsg., „Gesetzentwurf der Bundesregierung: Entwurf eines Gesetzes zur Umsetzung unionsrechtlicher Vorgaben und zur Regelung reiner Wasserstoffnetze im Energiewirtschaftsrecht; 28j-q, §43l, §112b, §113a-c“. Zugegriffen: 18. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Gesetz/gesetzentwurf-enwg-novelle.pdf?__blob=publicationFile&v=4

[25] W. H. Johnson, „II. On some remarkable changes produced in iron and steel by the action of hydrogen and acids“, *Proceedings of the Royal Society of London*, Bd. 23, S. 168–179, 1874, doi: https://doi.org/10.1098/rspl.1874.0024.

[26] W. Gerberich, „Modeling hydrogen induced damage mechanisms in metals“, in *Gaseous Hydrogen Embrittlement of Materials in Energy Technologies*, Elsevier, 2012, S. 209–246. doi: 10.1533/9780857095374.2.209.

[27] I. M. Robertson *u. a.*, „Hydrogen Embrittlement Understood“, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Bd. 46, Nr. 6, S. 2323–2341, Juni 2015, doi: 10.1007/s11661-015-2836-1.

[28] E. Ohaeri, U. Eduok, und J. Szpunar, „Hydrogen related degradation in pipeline steel: A review“, *International Journal of Hydrogen Energy*, Bd. 43, Nr. 31, S. 14584–14617, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.06.064.

[29] A. Traidia, E. Chatzidouros, und M. Jouiad, „Review of hydrogen-assisted cracking models for application to service lifetime prediction and challenges in the oil and gas industry“, *Corrosion Reviews*, Bd. 36, Nr. 4, S. 323–347, Juli 2018, doi: 10.1515/corrrev-2017-0079.

[30] L. B. Pfeil, „The effect of occluded hydrogen on the tensile strength of iron“, *Royal Society Proceedings A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Bd. 112, S. 182–195, Mai 1926, doi: https://doi.org/10.1098/rspa.1926.0103.

[31] C. D. Beachem, „A new model for hydrogen-assisted cracking (hydrogen “embrittlement”)“, *Metallurgical and Materials Transactions B*, Bd. 3, Nr. 2, S. 441–455, Feb. 1972, doi: 10.1007/BF02642048.

[32] H. K. Birnbaum und P. Sofronis, „Hydrogen-enhanced localized plasticity - a mechanism for hydrogen-related fracture“, *Materials Science and Engineering*, Bd. A176, S. 191–202, 1994, doi: http://hdl.handle.net/2142/112402.

[33] S. Lynch, „Hydrogen embrittlement phenomena and mechanisms“, *Corrosion Reviews*, Bd. 30, Nr. 3–4, Jan. 2012, doi: 10.1515/corrrev-2012-0502.

[34] S. Evers, C. Senöz, und M. Rohwerder, „Hydrogen detection in metals: a review and introduction of a Kelvin probe approach“, *Science and Technology of Advanced Materials*, Bd. 14, Nr. 1, S. 014201, März 2013, doi: 10.1088/1468-6996/14/1/014201.

[35] A. W. Thompson und I. M. Bernstein, „The Role of Metallurgical Variables in Hydrogen-Assisted Environmental Fracture“, in *Advances in Corrosion Science and Technology*, M. G. Fontana und R. W. Staehle, Hrsg., in Advances in Corrosion Science and Technology. , Boston, MA: Springer US, 1980, S. 53–175. doi: 10.1007/978-1-4615-9065-1_2.

[36] J. A. Lee, „Hydrogen Embrittlement“, National Aeronautics and Space Administration (NASA). Marshall Space Flight Center, Huntsville, Alabama, NASA/TM-2016-218602, Apr. 2016. Zugegriffen: 4. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20160005654/downloads/20160005654.pdf

[37] Y. Chen *u. a.*, „Performance Evaluation of High Strength Steel Pipelines for High-Pressure Gaseous Hydrogen Transportation“, Center for Reliable Energy Systems; NIST, CRES-2009-J02-01, Apr. 2013. Zugegriffen: 23. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=914096

[38] R. L. Amaro, R. M. White, C. P. Looney, E. S. Drexler, und A. J. Slifka, „Development of a Model for Hydrogen-Assisted Fatigue Crack Growth of Pipeline Steel“, *Journal of Pressure Vessel Technology*, Bd. 140, Nr. 2, S. 021403, Apr. 2018, doi: 10.1115/1.4038824.

[39] A. J. Slifka *u. a.*, „Fatigue Measurement of Pipeline Steels for the Application of Transporting Gaseous Hydrogen1“, *Journal of Pressure Vessel Technology*, Bd. 140, Nr. 1, S. 011407, Feb. 2018, doi: 10.1115/1.4038594.

[40] R. P. Gangloff und B. P. Somerday, *Gaseous Hydrogen Embrittlement of Materials in Energy Technologies: Mechanisms, Modelling and Future Developments*, Bd. Volume 1. Woodhead Publishing Limited, 2012. Zugegriffen: 2. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/book/9780857095367/gaseous-hydrogen-embrittlement-of-materials-in-energy-technologies#book-info

[41] R. P. Gangloff, *Gaseous Hydrogen Embrittlement of Materials in Energy Technologies: The Problem, its Characterisation and Effects on Particular Alloy*

Classes, Bd. Volume 2. Woodhead Publishing Limited, 2012. Zugegriffen: 2. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/book/9781845696771/gaseous-hydrogen-embrittlement-of-materials-in-energy-technologies

[42] A. A. Pisarev, „Hydrogen adsorption on the surface of metals“, in *Gaseous Hydrogen Embrittlement of Materials in Energy Technologies*, Elsevier, 2012, S. 3–26. doi: 10.1533/9780857095374.1.3.

[43] A. Zangwill, *Physics at Surfaces*. Cambridge: Cambridge University Press, 1988. doi: 10.1017/CBO9780511622564.

[44] P. Hopkins, „PIPELINES: Past, Present, and Future.“, Sydney, März 2007. Zugegriffen: 4. Januar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.penspen.com/wp-content/uploads/2014/09/past-present-future.pdf

[45] O. J. C. Huising und A. H. M. Krom, „H2 in an Existing Natural Gas Pipeline“, in *Volume 1: Pipeline and Facilities Integrity*, Virtual, Online: American Society of Mechanical Engineers, Sep. 2020, S. V001T03A057. doi: 10.1115/IPC2020-9205.

[46] N. Gallon und R. van Elteren, „Existing Pipeline Materials and the Transition to Hydrogen“, gehalten auf der Pipeline Technology Conference 2021, Berlin, 2021. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.pipeline-conference.com/abstracts/existing-pipeline-materials-and-transition-hydrogen

[47] H. C. Rogers, „Hydrogen Embrittlement of Metals“, *Science*, Bd. 159, S. 1057–1064, 1968, doi: https://doi.org/10.1126/science.159.3819.1057.

[48] F. F. Dear und G. C. G. Skinner, „Mechanisms of hydrogen embrittlement in steels: discussion“, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Bd. 375, Nr. 2098, S. 20170032, Juli 2017, doi: 10.1098/rsta.2017.0032.

[49] EUROPEAN INDUSTRIAL GASES ASSOCIATION AISBL, „HYDROGEN PIPELINE SYSTEMS“. EUROPEAN INDUSTRIAL GASES ASSOCIATION AISBL, 2014. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: www.eiga.eu

[50] L. Duprez, E. Leunis, Ö. E. Güngör, und S. Claessens, „Hydrogen embrittlement of high strength, low alloy (HSLA) steels and their welds“, in *Gaseous Hydrogen Embrittlement of Materials in Energy Technologies*, Elsevier, 2012, S. 562–591. doi: 10.1533/9780857093899.3.562.

[51] ASIA INDUSTRIAL GASES ASSOCIATION (AIGA), „AIGA 033/14 Hydrogen pipeline systems“. Zugegriffen: 7. Januar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://asiaiga.org/uploaded_docs/AIGA%20033_14%20Hydrogen%20pipeline%20systems.pdf

[52] J. Mischner, „Zur Frage der Strömungsgeschwindigkeiten in Gasleitungen“. Mai 2021. Zugegriffen: 18. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://gwf-gas.de/wp-content/uploads/2021/05/GE_05_2021_fb_Mischner.pdf

[53] P. Hilgraf, *Pneumatische Förderung : Grundlagen, Auslegung und Betrieb von Anlagen*. Springer Vieweg Berlin, Heidelberg, 2019. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-662-58407-1.

[54] S. S. Kutateladze und Ju. L. Sorokin, „O gidrodinamičeskoj ustojčivosti nekotorych gažoschidkostnych sistem (Über die hydraulische Stabilität einiger Gas-Flüssigkeits-Systeme).“, *Izbrannyje trudy*, S. 125–133, 1989.

[55] S. S. Kutateladze und Yu. L. Sorokin, „The Hydrodynamic Stability of Vapour-Liquid-Systems.“, in *Problems of Heat Transfer and Hydraulics of Two-Phase*

Media., Oxford; London; Edinburgh; New York; Toronto; Sydney; Paris; Braunschweig: Pergamon Press, 2013.

[56] API American Petroleum Institute, „API STD 618: Reciprocating Compressors for Petroleum, Chemical, and Gas Industry Services“. API Publishing Services, 1220 L Street, N. W, Washington, D.C. 20005., 2007.

[57] W. K. U. Warzyńska, „Modelling of pressure pulsation in gas compressor station“, Mai 2018, S. 913–916. doi: 10.21495/91-8-913.

[58] G. Müller-Syring und M. Henel, „Abschlussbericht Wasserstofftoleranz der Erdgasinfrastruktur inklusive aller assoziierten Anlagen“. Februar 2014. Zugegriffen: 18. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g1_02_12.pdf

[59] IFA Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, „GESTIS-Stoffdatenbank“, *GESTIS-Stoffdatenbank*. Zugegriffen: 18. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://gestis.dguv.de/

[60] T. G. I. G. & C. KG, „GASODOR S-FREE“, *Gasodor® S-Free*. Zugegriffen: 24. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gasodor-s-free.com/de/gasodorr-s-free/sicherheit-und-zertifizierungen/

[61] M. V. Lurie, „Subject Index“, in *Modeling of Oil Product and Gas Pipeline Transportation*, John Wiley & Sons, Ltd, 2008, S. 207–214. doi: 10.1002/9783527626199.indsub.

[62] P. Domschke, B. Hiller, J. Lang, V. Mehrmann, R. Morandin, und C. Tischendorf, „Gas Network Modeling: An Overview (Extended English Version)“. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://opus4.kobv.de/opus4-trr154/files/411/ModelCatalogue2021-DHLMMT.pdf

[63] R. J. LeVeque, *Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems*. in Cambridge Texts in Applied Mathematics. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. doi: 10.1017/CBO9780511791253.

[64] D. Serre, *Systems of Conservation Laws 1: Hyperbolicity, Entropies, Shock Waves: Volume undefined: Hyperbolicity, Entropies, Shock Waves*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. doi: 10.1017/CBO9780511612374.

[65] A. Herrán-González, J. M. De La Cruz, B. De Andrés-Toro, und J. L. Risco-Martín, „Modeling and simulation of a gas distribution pipeline network“, *Applied Mathematical Modelling*, Bd. 33, Nr. 3, S. 1584–1600, März 2009, doi: 10.1016/j.apm.2008.02.012.

[66] D. Rose, M. Schmidt, M. C. Steinbach, und B. M. Willert, „Computational optimization of gas compressor stations: MINLP models versus continuous reformulations“, *Math Meth Oper Res*, Bd. 83, Nr. 3, S. 409–444, Juni 2016, doi: 10.1007/s00186-016-0533-5.

[67] A. J. Osiadacz und M. Kwestarz, „Nonlinear Steady-State Optimization of Large-Scale Gas Transmission Networks“, *Energies*, Bd. 14, Nr. 10, S. 2832, Mai 2021, doi: 10.3390/en14102832.

[68] M. E. Pfetsch *u. a.*, „Validation of nominations in gas network optimization: models, methods, and solutions“, *Optimization Methods and Software*, Bd. 30, Nr. 1, S. 15–53, Jan. 2015, doi: 10.1080/10556788.2014.888426.

[69] A. Bermúdez, J. González-Díaz, F. J. González-Diéguez, Á. M. González-Rueda, und M. P. F. de Córdoba, „Simulation and Optimization Models of Steady-state Gas Transmission Networks“, *Energy Procedia*, Bd. 64, S. 130–139, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.01.016.

[70] B. Geißler, „Towards Globally Optimal Solutions for MINLPs by Discretization Techniques with Applications in Gas Network Optimization“, Verlag Dr. Hut, München, 2011.

[71] J. Humpola, „Gas network optimization by MINLP“, *Logos Verlag Berlin*, Nov. 2014, doi: 10.14279/DEPOSITONCE-4255.

[72] B. Geißler, A. Morsi, L. Schewe, und M. Schmidt, „Solving Highly Detailed Gas Transport MINLPs: Block Separability and Penalty Alternating Direction Methods“, *INFORMS Journal on Computing*, Bd. 30, Nr. 2, S. 309–323, Mai 2018, doi: 10.1287/ijoc.2017.0780.

[73] A. Fügenschuh *u. a.*, „Gas network topology optimization for upcoming market requirements“, in *2011 8th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, Zagreb, Croatia: IEEE, Mai 2011, S. 346–351. doi: 10.1109/EEM.2011.5953035.

[74] M. Herty und Department of Mathematics, Universität Kaiserslautern, AG Technomathematik, P.O. Box 3049, D-67663 Kaiserslautern, „Modeling, simulation and optimization of gas networks with compressors“, *Networks & Heterogeneous Media*, Bd. 2, Nr. 1, S. 81–97, 2007, doi: 10.3934/nhm.2007.2.81.

[75] B. Geißler, A. Martin, A. Morsi, und L. Schewe, „Chapter 6: The MILP-relaxation approach“, in *Evaluating Gas Network Capacities*, T. Koch, B. Hiller, M. E. Pfetsch, und L. Schewe, Hrsg., Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2015, S. 103–122. Zugegriffen: 31. August 2021. [Online]. Verfügbar unter: http://epubs.siam.org/doi/10.1137/1.9781611973693.ch6

[76] A. Ekhtiari, I. Dassios, M. Liu, und E. Syron, „A Novel Approach to Model a Gas Network“, *Applied Sciences*, Bd. 9, Nr. 6, S. 1047, März 2019, doi: 10.3390/app9061047.

[77] encoord GmbH, „What is SAInt?“ Zugegriffen: 3. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.encoord.com/SAInt.html

[78] D. Lohmeier, D. Cronbach, S. R. Drauz, M. Braun, und T. M. Kneiske, „Pandapipes: An Open-Source Piping Grid Calculation Package for Multi-Energy Grid Simulations“, *Sustainability*, Bd. 12, Nr. 23, S. 9899, Nov. 2020, doi: 10.3390/su12239899.

[79] W. van Westering, H. Hellendoorn, B. Brasjen, und R. van der Linden, „Natural gas distribution network modelling and leak minimization“, in *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, Apr. 2014, S. 291–296. doi: 10.1109/ICNSC.2014.6819641.

[80] W. V. Westering, „Gas distribution network modelling and optimization - New methods for smarter observation and operation of large scale gas networks“, 2013, doi: 10.13140/RG.2.1.4138.0885.

[81] Á. M. González Rueda, J. González Díaz, und M. P. Fernández de Córdoba, „A twist on SLP algorithms for NLP and MINLP problems: an application to gas transmission networks“, *Optimization and Engineering*, Bd. 20, Nr. 2, S. 349–395, Juni 2019, doi: 10.1007/s11081-018-9407-4.

[82] Reganosa, „GANESO | Reganosa“. Zugegriffen: 3. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.reganosa.com/en/ganeso

[83] A. van der Schaft, „Port-Hamiltonian systems: an introductory survey“, in *Proceedings of the International Congress of Mathematicians Madrid, August 22–30, 2006*, M. Sanz-Solé, J. Soria, J. L. Varona, und J. Verdera, Hrsg., Zuerich, Switzerland: European Mathematical Society Publishing House, 2007, S. 1339–1365. doi: 10.4171/022-3/65.

[84] B. Geißler, A. Morsi, L. Schewe, und M. Schmidt, „Solving power-constrained gas transportation problems using an MIP-based alternating direction method“, *Computers & Chemical Engineering*, Bd. 82, S. 303–317, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.compchemeng.2015.07.005.

[85] R. Burlacu *u. a.*, „Maximizing the storage capacity of gas networks: a global MINLP approach“, *Optim Eng*, Bd. 20, Nr. 2, S. 543–573, Juni 2019, doi: 10.1007/s11081-018-9414-5.

[86] P. Domschke, A. Dua, J. J. Stolwijk, J. Lang, und V. Mehrmann, „Adaptive refinement strategies for the simulation of gas flow in networks using a model hierarchy“, *ETNA - Electronic Transactions on Numerical Analysis*, Bd. 48, S. 97–113, 2018, doi: 10.1553/etna_vol48s97.

[87] P. Mindt, J. Lang, und P. Domschke, „Entropy-Preserving Coupling of Hierarchical Gas Models“, *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, Bd. 51, Nr. 6, S. 4754–4775, Jan. 2019, doi: 10.1137/19M1240034.

[88] Y. Qiu, S. Grundel, M. Stoll, und P. Benner, „Efficient Numerical Methods for Gas Network Modeling and Simulation“, *Networks & Heterogeneous Media*, Bd. 15, Nr. 4, S. 653–679, 2020, doi: 10.3934/nhm.2020018.

[89] SIMONE Research Group s.r.o., „SIMONE Software“. SIMONE Research Group s.r.o./LIWACOM Informationstechnik GmbH. Zugegriffen: 4. Oktober 2021. [Online]. Verfügbar unter: http:// www.simone.eu/

[90] PSI Software AG, „PSI Gas Management Suite“. PSI Software AG. Zugegriffen: 4. Oktober 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.psigasandpipelines.com/en/software/gas- management/

[91] Emerson Electric Co., „PipelineStudio“. Emerson Electric Co. Zugegriffen: 4. Oktober 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.emerson.com/en-us/catalog/emerson-pipelinestudio

[92] DNV, „Synergi Gas“. DNV. Zugegriffen: 4. Oktober 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dnv.com/services/hydraulic-modelling-and-simulation-software-synergi-gas-3894

[93] T. Clees *u. a.*, „MYNTS: Multi-phYsics NeTwork Simulator“:, in *Proceedings of the 6th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*, Lisbon, Portugal: SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2016, S. 179–186. doi: 10.5220/0005961001790186.

[94] Los Alamos National Laboratory/ANSI, „A Julia/JuMP Package for Gas Network Optimization“. Los Alamos National Laboratory/ANSI. Zugegriffen: 18. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://github.com/lanl-ansi/GasModels.jl

[95] I. Yueksel-Erguen, „Lessons learned from gas network data preprocessing“, *ZIB-Report*, S. 25, Sep. 2020, doi: urn:nbn:de:0297-zib-78262.

[96] M. Schmidt *u. a.*, „GasLib—A Library of Gas Network Instances“, *Data*, Bd. 2, Nr. 4, S. 40, Dez. 2017, doi: 10.3390/data2040040.

[97] F. Kunz *u. a.*, „Electricity, Heat, and Gas Sector Data for Modeling the German System“, *Data Documentation 92*, Bd. 92, S. 116, 2017, doi: https://dx.doi.org/10.18723/diw_ddc:2017-92.

[98] F. Kunz *u. a.*, „Reference Data Set: Electricity, Heat, and Gas Sector Data for Modeling the German System“. Zenodo, Dezember 2017. doi: 10.5281/zenodo.1044463.

[99] „Plan4res“. Zugegriffen: 21. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.plan4res.eu/

[100] VGE/ITS Gruppe, „Gasversorgungsnetze in Deutschland“. VGE/ITS Gruppe. Zugegriffen: 18. Mai 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://its-service.de/produkte/doku/wgi-gasnetmanager

[101] DLR-Institut für Vernetzte Energiesysteme e.V., „SciGRID_gas General information“. Zugegriffen: 4. Januar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gas.scigrid.de/

[102] ENTSOG, „Transparency Platform“. Zugegriffen: 14. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://transparency.entsog.eu/#/map

[103] Gas Infrastructure Europe, „Aggregated Gas Storage Inventory (AGSI+)“. Zugegriffen: 21. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://agsi.gie.eu/

[104] Open Grid Europe GmbH, „NEP-Gas-Datenbank“. FNB Gas e.V. Zugegriffen: 27. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.nep-gas-datenbank.de:8080/app/#!/

[105] B. Gillessen, „Auswirkungen der Energiewende auf das deutsche Gastransportsystem“, in *Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment*, Bd. 502, Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek, Verlag, 2020. [Online]. Verfügbar unter: http://hdl.handle.net/2128/25481

[106] „2020 European Hydrogen Backbone“, *Gas for Climate 2050*. Zugegriffen: 19. April 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://gasforclimate2050.eu/sdm_downloads/european-hydrogen-backbone/

[107] QGIS Development Team, „QGIS Software“. Open Source Geospatial Foundation, 2009. Zugegriffen: 4. Oktober 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.qgis.org/en/site/

[108] VNG AG, „Energiepark Bad Lauchstädt“. Zugegriffen: 4. Januar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://energiepark-bad-lauchstaedt.de/

[109] Siemens Energy Global GmbH & Co. KG, „Siemens Gamesa und Siemens Energy wollen Produktion grünen Wasser ...“ Zugegriffen: 18. April 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://press.siemens-energy.com/global/de/pressemitteilung/siemens-gamesa-und-siemens-energy-wollen-produktion-gruenen-wasserstoffs-mit

[110] Vattenfall GmbH, „Wasserstoffprojekt am Standort Hamburg-Moorburg“, *Vattenfall*. Zugegriffen: 4. Januar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://group.vattenfall.com/de/newsroom/pressemitteilungen/2021/wasserstoffprojekt-am-standort-hamburg-moorburg

[111] STEAG GmbH, „Grüner Wasserstoff für grünen Stahl aus Duisburg“, *STEAG GmbH*. Zugegriffen: 4. Januar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.steag.com/de/pressemitteilung/03-12-2020-gruener-wasserstoff-fuer-gruenen-stahl-aus-duisburg

[112] „Lingen Green Hydrogen – decarbonising the industry with sustainable fuel“, *Lingen Green Hydrogen*. Zugegriffen: 4. Januar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://lingen-green-hydrogen.com/en/

[113] C. Wentzler, „Konzeptionierung und Implementierung eines Wasserstoff-Netzwerk-Modell-Frameworks (Masterarbeit)“. Forschungszentrum Jülich Institut für Energie- und Klimaforschung: Techno-ökonomische Systemanalyse (IEK- 3)/RWTH Aachen University, Fakultät für Maschinenwesen, 2022.

[114] J. Beranek, „Modeling and simulation of the future German hydrogen network 2030“. Forschungszentrum Jülich Institut für Energie- und Klimaforschung: Techno-

ökonomische Systemanalyse (IEK- 3)/Aalto University School of Electrical Engineering, 27. Juli 2022.

[115] Forschungsstelle für Energiewirtschaft, „Load Curves of the Industry Sector – eXtremOS solidEU Scenario (Europe NUTS-3)“. 21. April 2021. Zugegriffen: 24. März 2022. [Online]. Verfügbar unter: http://opendata.ffe.de/dataset/load-curves-of-the-industry-sector-extremos-solideu-scenario-europe-nuts-3/

[116] N. Mattsson, V. Verendel, F. Hedenus, und L. Reichenberg, „An autopilot for energy models – Automatic generation of renewable supply curves, hourly capacity factors and hourly synthetic electricity demand for arbitrary world regions“, *Energy Strategy Reviews*, Bd. 33, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100606.

[117] SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH, „Umwelterklärung der Standorte Piesteritz und Cunnersdorf“. Zugegriffen: 15. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.skwp.de/fileadmin/content/05_mediacenter/broschueren/umwelterklaerung/20210531_SKWP_UWE-2021-final.pdf

[118] GET H2 Nukleus, „Kickoff for the H2 Economy in Germany“. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.get-h2.de/wp-content/uploads/geth2-nukleus_praesentation_en_200909.pdf

[119] hallelife, „In Leuna entsteht die größte PEM-Elektrolyse-Anlage der Welt“. Juni 2021. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.hallelife.de/nachrichten/arbeitswelt/arbeitswelt-sonstiges/details-arbeitswelt-sonstiges/in-leuna-entsteht-die-groesste-pem-elektrolyseanlage-der-welt/

[120] Sasol Germany GmbH, „Umwelterklärung 2021“. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sasolgermany.de/fileadmin/doc/env/Sasol-Umwelterklaerung_062021.pdf

[121] Bayernoil, „Umwelterklärung 2021 der BAYERNOIL Raffineriegesellschaft mbH“. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bayernoil.de/wp-content/uploads/Umwelterklaerung_2021_Ansicht.pdf

[122] SHS - Stahl-Holding-Saar, „Nachhaltigkeitsbericht Faktenblatt 2020“. November 2021. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.stahl-holding-saar.de/imperia/md/content/shs/nachhaltigkeit/shs-21-013-002_faktenblatt_sag_2020_de_web.pdf

[123] Statista, „Größte Rohstahlproduzenten in Deutschland nach Produktionsmenge im Jahr 2020“. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/153022/umfrage/die-groessten-stahlproduzenten-nach-produktionsmenge-in-deutschland/

[124] Statkraft, „Zukunft made in Ostfriesland“. 17. Dezember 2020. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.statkraft.de/presse/news/Archiv/2020/zukunft-made-in-ostfriesland/

[125] ELEMENTEINS, „ELEMENT EINS Energiewende mit Sektorkopplung“. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.element-eins.eu/

[126] EE.SH Netzwerkagentur Erneuerbare Energien, „Großindustrielles Power-to-Gas-Projekt“. 4. Juni 2019. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://ee-sh.de/de/aktuelles/archiv/20190604HySyngas.php

[127] Audi Technology Portal, „Audi e-gas“. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.audi-technology-portal.de/de/mobilitaet-der-zukunft/audi-future-lab-mobility/audi-future-energies/audi-e-gas

[128] Agrowea, „BW Bürgerwindpark Fehndorf / Lindloh GmbH Co. KG schließt Vertrag zur Wasserstoffeinspeisung mit der OGE“. 29. Mai 2020. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://agrowea.de/artikel/bw-buergerwindpark-fehndorf-lindloh-gmbh-co-kg-schliesst-vertrag-zur-wasserstoffeinspeisung-mit-der-oge/

[129] hybridge, „Sektorenkopplung auf Systemebene“. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.hybridge.net/

[130] steag, „Green hydrogen for green steel made in Duisburg“. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.steag.com/en/press-release/03-12-2020-green-hydrogen-for-green-steel-made-in-duisburg

[131] Energiepark Mainz, „Technical data about the Energiepark“. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.energiepark-mainz.de/en/technology/technical-data/

[132] Gasnetz Hamburg, „Neu gegründeter Wasserstoffverbund plant, Hamburg grüner zu machen“. 26. April 2021. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gasnetz-hamburg.de/ueber-gasnetz-hamburg/presse/pressemitteilungen/wasserstoffverbund-hamburg

[133] swb, „Clean Hydrogen Coastline“. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.swb.de/ueber-swb/unternehmen/nachhaltigkeit/wasserstoff/clean-hydrogen-coastline

[134] GETH2, „Start und Ausbau der Infrastruktur für grünen Wasserstoff“. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.get-h2.de/umsetzung/

[135] Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, „Europas Wasserstoffwirtschaft nimmt Fahrt auf“. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wirtschaft.nrw/pressemitteilung/europas-wasserstoffwirtschaft-nimmt-fahrt-auf-nordrheinwestfalen-beteiligt-sich

[136] doinghydrogen A. E. T. GmbH, „APEX Energy Teterow GmbH“. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.doinghydrogen.com/partner/apex-energyteterow-gmbh/

[137] doinghydrogen ENERTRAG, „ENERTRAG AG“. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.doinghydrogen.com/partner/enertrag-ag/

[138] L. Engineering, „Hydrogen in Leuna: The success story continues“. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.linde-engineering.com/en/about-linde-engineering/success-stories/hydrogen-in-leuna-the-success-story-continues.html

[139] steag, „HydroHub – mit Wasserstoff die Energiewende gestalten“. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.steag.com/de/steag-news-ausgabe-4-2019/hydrohub-fenne-mit-wasserstoff-die-energiewende-gestalten

[140] hydrogenious, „IPCEI Green Hydrogen @ Blue Danube“. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.hydrogenious.net/index.php/de/references-2/blue_danube/#iLightbox[0aa3aba8d27203752e3]/0

[141] RWE, „HyTech Hafen Rostock“. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.rwe.com/forschung-und-entwicklung/wasserstoff-projekte/hytech-hafen-rostock

[142] B. Gillessen, H. Heinrichs, J.-F. Hake, und H.-J. Allelein, „Natural gas as a bridge to sustainability: Infrastructure expansion regarding energy security and system transition“, *Applied Energy*, Bd. 251, S. 113377, Okt. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113377.

[143] „Background - NUTS - Nomenclature of territorial units for statistics - Eurostat“. Zugegriffen: 18. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/eurostat/web/nuts/background

[144] E. W. Lemmon, M. L. Huber, und J. W. Leachman, „Revised Standardized Equation for Hydrogen Gas Densities for Fuel Consumption Applications“, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, Bd. 113, Nr. 6, S. 341–350, 2008, doi: 10.6028/jres.113.028.

[145] J. Nikuradse, „Strömungsgesetze in Rauhen Rohren“, *VDI-Forschungsheft 361*, Bd. 4, Nr. B, Aug. 1933.

[146] W. E. Hart, J.-P. Watson, und D. L. Woodruff, „Pyomo: modeling and solving mathematical programs in Python.“, *Mathematical Programming Computation*, Bd. 3, Nr. 3, S. 219–260, 2011, doi: https://doi.org/10.1007/s12532-011-0026-8.

[147] W. E. Hart *u. a.*, *Pyomo – Optimization Modeling in Python*. in Springer Optimization and Its Applications. Springer, 2017. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-68928-5.

[148] Gurobi Optimization, LLC, „Gurobi Optimizer Reference Manual“. Gurobi Optimization, LLC. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gurobi.com/wp-content/plugins/hd_documentations/documentation/9.0/refman.pdf

[149] H. M. Günther *u. a.*, „The Astropy Project: Building an inclusive, open-science project and status of the v2.0 core package“, *The Astronomical Journal*, Bd. 156, Nr. 3, 2018, doi: 10.3847/1538-3881/aabc4f.

[150] The Astropy Collaboration *u. a.*, „Astropy: A community Python package for astronomy“, *Astronomy & Astrophysics*, Bd. 558, S. A33, Okt. 2013, doi: 10.1051/0004-6361/201322068.

[151] I. Fischer-Uhrig, „STANET - Website“, *STANET*. Zugegriffen: 6. Januar 2022. [Online]. Verfügbar unter: http://stafu.de/de/home.html

[152] P. Fritzson, „OpenModelica“. Zugegriffen: 9. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://openmodelica.org/

[153] NRW.Energy4Climate, „Die H_2-Farbpalette: Grüner Wasserstoff als Schlüssel für eine erfolgreiche Energiewende“, *NRW.Energy4Climate*. Zugegriffen: 3. März 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.energy4climate.nrw/aktuelles/newsroom/die-h2-farbpalette-gruener-wasserstoff-als-schluessel-fuer-eine-erfolgreiche-energiewende

[154] swb AG, „Elektrolyseur am Stahlwerk | Wasserstoff | swb“. Zugegriffen: 4. Januar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.swb.de/ueber-swb/unternehmen/nachhaltigkeit/wasserstoff/elektrolyseur

[155] „Implementation – GET H2 – Mit Wasserstoff bringen wir gemeinsam die Energiewende voran.“ Zugegriffen: 4. Januar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.get-h2.de/en/implementation/

[156] thyssenkrupp AG, „Hydrogen: an energy carrier for the future“. Zugegriffen: 4. Januar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://hydrogen.thyssenkrupp.com/en/

[157] „IndustriePark Lingen - Aktuelles“. Zugegriffen: 4. Januar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.industriepark-lingen.de/aktuelles/aktuelles.html

[158] Melanie Russ, Kreiszeitung Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, „Westwind Energy erklärt Hintergründe für geplanten Windpark im Brockumer Fladder“, *https://www.kreiszeitung.de*. Dezember 2020. Zugegriffen: 4. Januar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.kreiszeitung.de/lokales/diepholz/lemfoerde-

ort48657/westwind-windpark-windenergieanlagen-windkraft-brockum-duemmer-90122432.html

[159] „Die Entstehung einer grünen Wasserstoffwirtschaft“, *Storengy*. Zugegriffen: 4. Januar 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.storengy.de/de/medien/nachrichten/die-entstehung-einer-gruenen-wasserstoffwirtschaft

Band / Volume 719
Development and Characterization of the Airborne Chemical Ionization Mass Spectrometer FunMass-C for Atmospheric Trace Gas Measurements
S. Alber (2026), xli, 265 pp
ISBN: 978-3-95806-948-0 (Print)
ISBN: 978-3-95806-949-7 (E-Book)

Band / Volume 720
Material design and stability of All-Solid-State Lithium batteries
F. H. Al-Jaljouli (2026), xv, 174 pp
ISBN: 978-3-95806-950-3 (Print)
ISBN: 978-3-95806-951-0 (E-Book)

Band / Volume 721
Towards improved representation of the hydrological cycle by assimilating multi-source remotely sensed soil moisture data in terrestrial system models
H. Zhao (2026), XVI, 139 pp
ISBN: 978-3-95806-952-7 (Print)
ISBN: 978-3-95806-953-4 (E-Book)

Band / Volume 722
Combining Lattice Boltzmann Simulation and Synchrotron Imaging to Study Bubble Dynamics in Electrodes of Vanadium Redox Flow Batteries
K. Duan (2026), xxiii, 116 pp
ISBN: 978-3-95806-954-1 (Print)
ISBN: 978-3-95806-955-8 (E-Book)

Band / Volume 723
Geophysical characterization of landscapes along a climate and vegetation gradient in the Chilean coastal cordillera
I. Dal Bo (2026), 138 pp
ISBN: 978-3-95806-956-5 (Print)
ISBN: 978-3-95806-957-2 (E-Book)

Band / Volume 724
Model informed assessment of observation impact for emission rate optimization using four-dimensional variational data assimilation
A. Hermanns (2026), xvi, 109 Seiten
ISBN: 978-3-95806-958-9 (Print)
ISBN: 978-3-95806-959-6 (E-Book)

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 725
Synthese und Bewertung hochaktiver Katalysatoren zur Herstellung höherer Alkohole aus Methanol als Kraftstoff
J. Häusler (2026), xiii, 265 Seiten
ISBN: 978-3-95806-962-6 (Print)
ISBN: 978-3-95806-963-3 (E-Book)

Band / Volume 726
Development and Characterization of Ni_3Fe Layered Double Hydroxide-Based Oxygen-Evolution Electrodes for Anion Exchange Membrane Water Electrolysis
I.Galkina (2026), vii, 173, xxxiii Seiten
ISBN: 978-3-95806-966-4 (Print)
ISBN: 978-3-95806-967-1 (E-Book)

Band / Volume 727
Surface Regeneration of Plasma-Facing Components by Wire-Based Laser Metal Deposition
J. Tweer (2026), XX, 186 pp
ISBN: 978-3-95806-970-1 (Print)
ISBN: 978-3-95806-971-8 (E-Book)

Band / Volume 728
Reducing the noble metal and titanium content of anode PTLs in PEM water electrolysis – performance and degradation
S. Zerressen (2026), XIII, 235 pp
ISBN: 978-3-95806-972-5 (Print)
ISBN: 978-3-95806-973-2 (E-Book)

Band / Volume 729
Gasfernleitungsnetze und deren Umstellung auf Wasserstoff
T. A. Triesch (2026), 364 pp
ISBN: 978-3-95806-978-7 (Print)
ISBN: 978-3-95806-979-4 (E-Book)

Weitere ***Schriften des Verlags im Forschungszentrum Jülich*** unter
http://wwwzb1.fz-juelich.de/verlagextern1/index.asp

Energie & Umwelt / Energy & Environment
Band / Volume 729
ISBN 978-3-95806-979-4

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

JÜLICH
Forschungszentrum