



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterthesis

Mario René Müller

Simulationsmodell für vermaschte Rohrnetze

Mario René Müller
Simulationsmodell für vermaschte Rohrnetze

Masterthesis eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang Erneuerbare Energien
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg /
Akademie für erneuerbare Energien Lüchow-Dannenberg GmbH

Erstprüfer : Prof. Dr.-Ing. Franz Vinnemeier
Zweitprüfer : Prof. Dr.-Ing. Hans Schäfers

Abgabedatum: 12. März 2017

Zusammenfassung

Mario René Müller

Thema der Masterthesis

Simulationsmodell für vermaschte Rohrnetze

Stichworte

Simulationsmodell, vermascht, Rohrnetz, Netzstruktur, nichtlinear, Gleichungssystem, Knotenregel, Maschenregel, Knoten, Masche, Widerstandskoeffizient, Rohrreibung, Reynolds-Zahl, Widerstandsbeiwerte, T-Stück, Bogen, Konfusor, Diffusor, Kugelhahn, Wärmeübergabestation, Druckverlust, Energieverbund

Kurzzusammenfassung

Es wird ein Simulationsmodell zur Berechnung der Massenströme und Druckdifferenzen in vermaschten Rohrnetzen entwickelt. Die Widerstandskoeffizienten für einige Komponenten eines Wärmenetzes werden berechnet und die nichtlinearen Gleichungssysteme unterschiedlicher Rohrnetze mit iterativen Lösungsverfahren gelöst. Die Plausibilität der Lösungen wird gezeigt und der Druckverlauf entlang gewählter Teilstreckenpfade berechnet.

Mario René Müller

Title of the paper

Simulation of Meshed Pipeline Networks

Keywords

simulation model, meshed, pipeline network, network structure, nonlinear, equation system, Kirchhoff law for nodes, Kirchhoff law for meshes, nodes, loop, resistance coefficient, pipe friction, Reynolds number, pressure loss coefficient, T-fitting, bend, diffusor, converging nozzle, cylindrical valve, heat substation, pressure loss, energy compound

Abstract

The development of a computer based simulation model for the calculation of mass flows and pressure differences in meshed pipeline networks is the central part of this thesis. The resistance coefficients of certain components of a district heating system are computed and the nonlinear equation systems for a couple of pipeline networks are being solved. This work shows the plausibility of the solutions and provides a tool to calculate the pressure along pipeline paths.

Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Franz Vinnemeier und Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans Schäfers (beide HAW Hamburg) sowie Herrn M.Eng. Peter Lorenzen (Hamburg Energie GmbH/HAW Hamburg) für ihre Bereitschaft diese Masterthesis zu betreuen und die zahlreichen Arbeitsgespräche, die stets sehr konstruktiv und lösungsorientiert waren.

Weiterer Dank gebührt der Hamburg Energie GmbH für die Bereitstellung der Rohrnetzdaten, sowie allen Mitarbeitern, die mir den Zugang zu Messdaten ermöglicht und die technische Dokumentation des Energieverbundes durchsucht haben.

Auch den Kollegen des Center for Demand Side Integration (C4DSI) möchte ich hiermit herzlichst danken für ihre stete Hilfsbereitschaft und kompetente Unterstützung.

Peter, dir wünsche ich für das Projekt Smart Heat Grid Hamburg ebenso wie allen in dieses Projekt involvierten Kollegen bestes Gelingen und viel Erfolg. Strengt euch an, denn unsere und die künftigen Generationen brauchen dringend intelligente und nachhaltige Lösungen, um einerseits den weltweiten Energiebedarf zu stillen und andererseits trotzdem die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre und den Weltmeeren zu beschränken. Es braucht Menschen, die den Weg zu diesem Ziel gehen wollen.



Am Ende aber nicht zuletzt geht mein Dank an Isabel und Anna, weil ihr ohne es zu wissen eine Inspiration und Antrieb für mich seid und so vielen Dingen einen Sinn gebt!

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	7
Abbildungsverzeichnis	8
1. Einleitung	14
2. Grundlagen	15
2.1. Mathematischer Ansatz	16
2.2. Grundgleichungen	29
2.3. Einflussgrößen des Widerstandskoeffizienten R	32
3. Modellbestandteile	65
3.1. Übersicht	66
3.2. Vorbereitung des Modells	69
3.3. Verifizierung der Komponenten	73
3.4. Gesamtsystem und Subsysteme	98
4. Modellierung und Parametrierung des Rohrnetzes 'Energieverbund'	102
4.1. Modellannahmen	102
4.2. Systemskizze und Netzstrukturmatrix	103
4.3. Umsetzung der Parametrierung	106
4.4. Planungsvariante 'Vermaschter Energieverbund'	123
4.5. Modellierung anderer Rohrnetze	125
5. Ergebnisse der Simulationsmodelle	126
5.1. Beispielaufgaben	128
5.2. Rohrnetz 'Einfaches Maschennetz'	135
5.3. Rohrnetz 'Energieverbund'	147
5.4. Planungsvariante 'Vermaschter Energieverbund'	165
5.5. Tabellarische Ergebniszusammenfassung	172
6. Auswertung	175
6.1. Beispielaufgaben	175

6.2. Rohrnetz 'Einfaches Maschennetz'	176
6.3. Rohrnetz 'Energieverbund'	179
6.4. Planungsvariante 'Vermaschter Energieverbund'	185
6.5. Empfehlungen an den Betreiber	186
7. Derzeitiger Entwicklungsstand	188
7.1. Datenbanksystem	188
7.2. Empirische Funktionen für Wärmeübergabestationen	190
7.3. Systeme und Subsysteme	190
7.4. Stoffdaten	191
7.5. Implementierte Komponenten	192
7.6. Unterstützende Funktionen	194
7.7. Empfehlungen für künftige Verbesserungen	194
8. Zusammenfassung	197
Literatur	198
I. Anhang	201
A. Zeichenverzeichnis	202
B. Stoffeigenschaften von Wasser	204
B.1. Spezifische Wärmekapazität von Wasser	205
B.2. Wärmeleitfähigkeit von Wasser	206
C. T-Stücke	207
D. HeatGridTable für das 'Einfache Maschennetz'	215
E. Rohrnetz 'Energieverbund'	227
E.1. Auswertungen 'Energieverbund'	231
E.2. Fitkurven für die Wärmeübergabestationen im 'Energieverbund'	234
E.3. Herstellerbescheinigung einer Wärmeübergabestation	241
E.4. Abschätzung des Radienverhältnisses bei Kugelhähnen im 'Energieverbund' .	242
F. Begriffliche Unterschiede zu LORENZEN	244
G. Struktur der Dateiablage	247

Tabellenverzeichnis

3.1. Bei der Berechnung der Widerstandskoeffizienten R berücksichtigte Einflussgrößen	73
3.2. Verifizierung der Funktion <i>calc_rhoH2O</i>	77
3.3. Verifizierung der Funktion <i>calc_etaH2O</i>	78
3.4. Verifizierung der Funktion <i>calc_mdot</i>	79
3.5. Verifizierung der Funktion <i>calc_Reynolds</i>	80
3.6. Ein- und Ausgabeparameter der Funktion <i>zetaTYStueck</i>	85
3.7. Ein- und Ausgabeparameter der Funktion <i>idenTEEYfy.m</i>	87
4.1. Rohrleitungsdaten der Firma LOGSTOR	113
4.2. Anschlussdurchmesser der Wärmeübergabestationen im 'Energieverbund'	115
4.3. Parameterfestlegungen / Potentielle Schwachstellen des Modells	117
4.4. Obligatorische Daten der Struktur-Variablen NETZ	122
5.1. Startwerte und Ergebnisse der 5. und 6. Iteration gemäß AIGNER	129
5.2. Ergebnis der 2. Iteration gemäß GROMBACH	132
5.3. Massenströme und Druckdifferenzen der Wärmeübergabestationen	148
5.4. Ergebniszusammenfassung für das Beispiel von AIGNER	172
5.5. Ergebniszusammenfassung für das Beispiel von GROMBACH	172
5.6. Ergebniszusammenfassung für das 'Einfache Maschennetz'	173
5.7. Ergebniszusammenfassung für den 'Energieverbund'	174
5.8. Ergebniszusammenfassung für den 'Vermaschten Energieverbund'	174
7.1. Stand des Datenbanksystems	189
7.2. Stand der Wärmeübergabestationen	190
7.3. Stand der Systeme und Subsysteme	191
7.4. Stand der Stoffdaten	191
7.5. Stand der implementierten Komponenten	192
7.6. Stand der T-Stücke	193
7.7. Stand der Hilfsfunktionen	194
7.8. Empfehlungen für künftige Verbesserungen	195
A.1. Zeichenverzeichnis	202

Abbildungsverzeichnis

2.1. Topologie zweier Rohrleitungsnetze	15
2.2. Systemskizze für ein 'Einfaches Maschennetz' mit zwei Kundenleitungen . . .	18
2.3. Schematische Darstellung zum Aufbau des nichtlinearen Gleichungssystems.	23
2.4. Schematische Darstellung zur Bestimmung der Widerstandsbeiwerte.	24
2.5. Strömung längs einer Stromröhre ohne Dissipationsverluste	31
2.6. Strömung längs einer Stromröhre mit Dissipationsverlusten	31
2.7. Beispiele für die Ausprägungen von Wandrauigkeiten	33
2.8. Künstliche Sandrauigkeit k_s und natürliche Rauigkeit k	34
2.9. Rauigkeitswerte k	35
2.10. Rohrreibungsbeiwert λ rauher Rohre in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl Re	37
2.11. T-Stück bei Vereinigung der Massenströme	38
2.12. T-Stück bei Trennung der Massenströme	38
2.13. Widerstandsbeiwerte für ein T-Stück bei Stromtrennung	40
2.14. Widerstandsbeiwerte für ein T-Stück bei Stromvereinigung	40
2.15. Widerstandsbeiwerte für ein Hosenstück (180°) bei Stromtrennung	40
2.16. Widerstandsbeiwerte für ein Hosenstück (180°) bei Stromvereinigung	40
2.17. Die 27 Strömungsvarianten bei T-Stücken	42
2.18. Allgemeiner Berechnungsansatz von AIGNER für die Stromvereinigung	43
2.19. Verlustbeiwerte bei der Stromvereinigung in Hosenstücken	44
2.20. Widerstandsbeiwert $\zeta_{C,S}$ eines symmetrischen Hosenstücks mit 90° -Abzweig bei Stromtrennung	45
2.21. Widerstandsbeiwerte eines Kugelhahns	46
2.22. Kugelhahn in geöffneter und geschlossener Stellung	47
2.23. Strömung durch einen Krümmer	48
2.24. Druckverlust in Krümmern	49
2.25. Zusammensetzung des ζ -Wertes von Krümmern	50
2.26. Widerstandsbeiwert ζ_k von 90° - Krümmern mit $R/d = 4$	51
2.27. Formstückfaktoren	52
2.28. Einflußgrößen für die Berechnung des Widerstandsbeiwertes von Bögen . . .	52
2.29. Faktor $f_{krü} = \xi_{KV}$ von Rohrbögen in Abhängigkeit vom Umlenkwinkel und dem Krümmungsradius	52

2.30. Widerstandsbeiwerte ζ_u von glatten 90°-Rohrbögen in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl Re	54
2.31. Plötzlich verengte Rohrleitung	54
2.32. Plötzlich erweiterte Rohrleitung	54
2.33. Stetig verengte Rohrleitung	55
2.34. Stetig erweiterte Rohrleitung	55
2.35. Einflußgrößen für die Berechnung des Widerstandsbeiwertes für Konfusoren	56
2.36. Einflußgrößen für die Berechnung des Widerstandsbeiwertes für Diffusoren .	56
2.37. ζ' einer konischen Erweiterung	57
2.38. Reibungsverlust ζ_{Erw} der Rohrerweiterung	57
2.39. Volumenstrom des Regelventils Samson 46-6 in Abhängigkeit vom Druckverlust	59
2.40. Wärmetauscherplatte mit Winkel-Wellen-Prägung	60
2.41. Einfluss des Prägungswinkels φ auf den Druckverlust in Plattenwärmetauschern	62
2.42. Druckverlustbeiwert ξ von Plattenwärmetauschern als Funktion der REYNOLDS-Zahl Re	63
3.1. Übersicht über die Vorbereitung des MATLAB-Simulationsmodells	67
3.2. Übersicht über die Struktur des MATLAB-Simulationsmodells.	68
3.3. Darstellung der Messdaten für die Wärmeübergabestationen 5 bis 8	71
3.4. Netzstruktur des Beispielnetzes von GROMBACH	72
3.5. Manuell zu erfassende netzspezifische Rohrdaten	75
3.6. Dichte von Wasser (berechnet mit XSTEAM)	75
3.7. Dynamische Viskosität von Wasser (berechnet mit XSTEAM)	75
3.8. Dichte von Wasser (berechnet mit <i>calc_rhoH2O</i>)	76
3.9. Dynamische Viskosität von Wasser (berechnet mit <i>calc_etaH2O</i>)	77
3.10. Rohrreibungsbeiwert $\lambda = f(Re)$ (berechnet mit <i>calc_lambdaRohr_Redk</i>) . .	81
3.11. Verifizierung der Funktion <i>calc_lambdaRohr_Redk</i>	81
3.12. ξ_{kv} für Bögen nach BRANDT mit $C=1780$	82
3.13. ξ_{kv} für Bögen nach BRANDT mit $C=178$	82
3.14. ξ_{kv} für Bögen als Funktion des Umlenk winkels nach HERNING	83
3.15. ζ' einer konischen Erweiterung in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel	84
3.16. Reibungsverlust ζ_{Erw} der Rohrerweiterung in Abhängigkeit vom Querschnittsverhältnis	84
3.17. Verifizierung der Funktion <i>zetaTYStueck.m</i> für ein T-Stück mit 90°-Abzweig und Querschnittsverhältnis $A = 1,00$	89
3.18. Verifizierung der Funktion <i>zetaTYStueck.m</i> für ein T-Stück mit 90°-Abzweig bei Strömungsvariante (-1,1,-1): Hosenstück mit Stromtrennung nach IDELCIK	90
3.19. Verifizierung der Funktion <i>zetaTYStueck.m</i> für ein T-Stück mit 90°-Abzweig bei Strömungsvariante (1,-1,1): Hosenstück mit Stromvereinigung nach AIGNER	90

3.20. Vergleich zweier Näherungsgleichungen für Kugelhähne mit den Werten in IDELCIK	91
3.21. Vergleich der Näherungsgleichungen für Kugelhähne in semilogarithmischer Darstellung nach BRANDT [6]	91
3.22. Flächenverhältnis x bei Kugelhähnen als Funktion des Winkels φ	92
3.23. Abhängigkeit des Winkels φ_{grenz} bei Kugelhähnen vom Radienverhältnis R/r	92
3.24. Verifizierung der Funktion <i>calcDpRVS46</i>	93
3.25. Widerstandsbeiwert ζ als Funktion des Prägungswinkels φ für $Re = 2000, 0$	94
3.26. Widerstandsbeiwert ζ als Funktion des Prägungswinkels φ für $Re = 1999, 9$	94
3.27. Widerstandsbeiwert ζ als Funktion der REYNOLDS-Zahl Re	94
3.28. Empirisch ermittelte Widerstandskoeffizienten der Wärmeübergabestationen	95
3.29. Beispiele für die Visualisierung der Ergebnisse mit Plotfunktionen	98
4.1. Systemskizze des Netzes 'Energieverbund' in Hamburg-Wilhelmsburg	105
4.2. Auszug aus der Netzstruktur des 'Energieverbundes'	106
4.3. Ausschnitt der Datenbankstruktur	107
4.4. Aufbau des TSA 6 in TS 30	108
4.5. Aufbau des TSA 7 in TS 30	109
4.6. Aufbau des TSA 58 in TS 30	109
4.7. Aufbau des TSA 57 in TS 30	109
4.8. Beispiel für eine Aktualisierungsabfrage zur Änderung der Rauigkeit	110
4.9. Eingabe der benötigten Parameter für T-Stücke	111
4.10. k_{vs} -Werte des Regelventils Samson 46-6 in Abhängigkeit vom DN (aus [25])	115
4.11. Empirisch ermittelte Parameter a und b der Wärmeübergabestationen	116
4.12. Parameter der Übergabetabelle HeatGridTable (Teil 1)	118
4.13. Parameter der Übergabetabelle HeatGridTable (Teil 2)	119
4.14. Parameter der Übergabetabelle HeatGridTable (Teil 3)	119
4.15. Auszug aus der Übergabetabelle HEATGRIDTABLE	120
4.16. Modell des Netzes 'Energieverbund' in Hamburg-Wilhelmsburg	121
4.17. Globale Variable CONST	122
4.18. 3D-Plot der Planungsvariante 'Vermaschter Energieverbund'	124
5.1. Auswahlmenü von <i>StarteMasterthesisMM</i>	127
5.2. Struktur des Rohrnetzes nach AIGNER	128
5.3. Ergebnis gemäß AIGNER nach der 6. Iteration	129
5.4. Ergebnis der eigenen Berechnung mit dem CROSS-Verfahren	130
5.5. Ergebnis der eigenen Berechnung mit dem Knoten-Strang-Verfahren	130
5.6. Prinzipielle Struktur des Rohrnetzes nach GROMBACH	131
5.7. Ergebnis (in l/s) nach der 2.ten Iteration nach GROMBACH	131
5.8. Ergebnisse der Nachrechnung mit dem CROSS-Verfahren als Gesamtschrittverfahren	132

5.9. Ergebnis der eigenen Berechnung (in l/s) mit dem CROSS-Verfahren	133
5.10. Ergebnis (in l/s) nach der 17. Iteration mit dem CROSS-Verfahren	133
5.11. Ergebnisse der Nachrechnung mit dem Knoten-Strang-Verfahren	134
5.12. Struktur des 'Einfachen Maschennetzes' mit Nummerierung der Teilstrecken .	135
5.13. Diagramme zur Darstellung der Startwerte und der Funktionswerte der Maschengleichungen	136
5.14. Berechnungsergebnisse für das 'Einfache Maschennetz' (CROSS-Verfahren, $\dot{m}_{ges} = 10 \frac{kg}{s}$)	137
5.15. Berechnungsergebnisse für das 'Einfache Maschennetz' (Knoten-Strang-Verfahren mit interner R-Berechnung, $\dot{m}_{ges} = 10 \frac{kg}{s}$)	139
5.16. Berechnungsergebnisse für das 'Einfache Maschennetz' (Knoten-Strang-Verfahren mit externer R-Berechnung, $\dot{m}_{ges} = 10 \frac{kg}{s}$)	141
5.17. Änderung der Startwerte im 'Einfachen Maschennetz' ($\dot{m}_{ges} = 10 \frac{kg}{s}$)'	142
5.18. Ermittlung der Massenströme im 'Einfachen Maschennetz' mit veränderten Startwerten (CROSS-Verfahren mit interner R-Berechnung, $\dot{m}_{ges} = 10 \frac{kg}{s}$) . .	142
5.19. Berechnungsergebnisse für das 'Einfache Maschennetz' mit veränderten Startwerten (Knoten-Strang-Verfahren mit interner R-Berechnung, $\dot{m}_{ges} = 10 \frac{kg}{s}$)	143
5.20. Startwerte für die Massenströme im 'Einfachen Maschennetz' ($\dot{m}_{ges} = 1 \frac{kg}{s}$) .	144
5.21. Berechnungsergebnisse für das 'Einfache Maschennetz' (CROSS & Knoten-Strang-Verfahren, $\dot{m}_{ges} = 1 \frac{kg}{s}$)	144
5.22. Verlauf des Schleifenparameters ϵ bei Festlegung der Kunden-Massenströme in TS 5 und 6	145
5.23. Berechnungsergebnisse für das 'Einfache Maschennetz' bei Festlegung des Kunden-Massenstroms in TS 5 (Knoten-Strang-Verfahren, $\dot{m}_{ges} = 10 \frac{kg}{s}$) . .	146
5.24. Struktur des 'Energieverbundes' mit Nummerierung der Teilstrecken	147
5.25. Auszug aus dem Berechnungsprotokoll während der R-Berechnung	150
5.26. Berechnung der Druckdifferenzen in den Maschen und Teilstrecken des 'Energieverbundes' mit den Startwerten (Messwerte)	151
5.27. Druckverluste (bar) in den Teilstrecken des 'Energieverbundes'	152
5.28. Berechnungsergebnisse für den 'Energieverbund' (CROSS-Verfahren, $k = 10^{-5} m$)	153
5.29. Weitere Berechnungsergebnisse für den 'Energieverbund' (CROSS-Verfahren, $k = 10^{-5} m$)	154
5.30. Berechnungsergebnisse für den 'Energieverbund' (Knoten-Strang-Verfahren, $k = 10^{-5} m$)	155
5.31. Weitere Berechnungsergebnisse für den 'Energieverbund' (Knoten-Strang-Verfahren, $k = 10^{-5} m$)	156
5.32. Darstellung eines Teilstreckenpfads im 'Energieverbund'	157
5.33. Druckverlauf entlang eines Teilstreckenpfads im 'Energieverbund'	159

5.34. Dissipative Temperaturerhöhung (in Kelvin) im 'Energieverbund'	160
5.35. Funktionswerte im 'Energieverbund' bei Berücksichtigung der Druckmesswerte	161
5.36. Berechnungsergebnisse für den 'Energieverbund' (Knoten-Strang-Verfahren, $k = 10^{-3}m$)	162
5.37. Weitere Berechnungsergebnisse für den 'Energieverbund' (Knoten-Strang- Verfahren, $k = 10^{-3}m$)	163
5.38. Struktur der Planungsvariante 'Vermaschter Energieverbund' mit Nummerie- rung der Teilstrecken	165
5.39. Startwerte und Berechnungsergebnisse für den 'Vermaschten Energiever- bund' (CROSS-Verfahren)	167
5.40. Weitere Berechnungsergebnisse für den 'Vermaschten Energieverbund' (CROSS-Verfahren)	168
5.41. Massenströme im 'Vermaschten Energieverbund' (Knoten-Strang-Verfahren) .	169
5.42. Weitere Berechnungsergebnisse für den 'Vermaschten Energieverbund' (Knoten-Strang-Verfahren)	170
6.1. Auszug aus der Variablen NLGSNETZ	182
6.2. Druckverlauf (in Pa) in Masche 9 des 'Energieverbundes' (CROSS-Verfahren)	183
7.1. Hauseinführungen für <i>Hybrid House Mitte</i> , <i>Triplex II</i> und <i>Triplex IV</i>	188
7.2. Hauseinführung <i>Siedeln im Grundbau</i>	189
B.1. Spezif. Wärmekapazität von Wasser über Druck und Temperatur (berechnet mit XSTEAM)	204
B.2. Wärmeleitfähigkeit von Wasser über Druck und Temperatur (berechnet mit XSTEAM)	204
B.3. Spezifische isobare Wärmekapazität ($\frac{J}{g \cdot K}$) von Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur (berechnet <i>calc_cpH2O.m</i> nach [26])	205
B.4. Wärmeleitfähigkeit von Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur (berech- net mit <i>calc_lambdaH2O.m</i> nach [26])	206
C.1. Verifizierung der Funktion <i>zetaTYStueck</i> für ein T-Stück mit 90°-Abzweig und Querschnittsverhältnis $A = 2,96$	209
C.2. Verifizierung der Funktion <i>zetaTYStueck</i> für ein T-Stück mit 90°-Abzweig und Querschnittsverhältnis $A = 8,22$	210
C.3. Verifizierung der Funktion <i>zetaTYStueck</i> für ein T-Stück mit 45°-Abzweig und Querschnittsverhältnis $A = 1,00$	211
C.4. Verifizierung der Funktion <i>zetaTYStueck</i> für ein T-Stück mit 45°-Abzweig und Querschnittsverhältnis $A = 2,96$	212
C.5. Verifizierung der Funktion <i>zetaTYStueck</i> für ein T-Stück mit 45°-Abzweig und Querschnittsverhältnis $A = 8,22$	213

C.6. Verifizierung der Funktion $\zeta_{TYStueck}$ für ein T-Stück mit 60°-Abzweig und Querschnittsverhältnis $A = 8,22$	214
E.1. Übersichtsschema Energieverbund / Wärmeübergabestationen	228
E.2. Ausschnitt aus dem Lageplan des Wärmenetz 'Energieverbund'	229
E.3. Ausschnitt aus dem Koordinatenverzeichnis für den 'Energieverbund'	230
E.4. Häufigkeitsverteilung der VL-/RL-Temperaturen des 'Energieverbundes'	231
E.5. Widerstandskoeffizient R über Massenstrom	234
E.6. Fitkurven der Wärmeübergabestationen, Blatt 2	235
E.7. Fitkurven der Wärmeübergabestationen, Blatt 3	236
E.8. Fitkurven der Wärmeübergabestationen, Blatt 4	237
E.9. Fitkurven der Wärmeübergabestationen, Blatt 5	238
E.10. Fitkurven der Wärmeübergabestationen, Blatt 6	239
E.11. Herstellerbescheinigung für eine Hausstation (Wärmeübergabestation)	241
E.12. Werkstoffnachweis für Kugelhähne im 'Energieverbund'	242
E.13. Abschätzung des Verhältnisses R/r für die im 'Energieverbund' eingesetzten Kugelhähne	243
G.1. Struktur der Dateiablage	247

1. Einleitung

Zur Zielsetzung der vorliegenden Masterthesis gehören die folgenden Punkte:

- Aufstellen des nichtlinearen Gleichungssystems für ein Rohrnetz;
- Berechnung der Widerstandskoeffizienten R der Teilstrecken¹ unter Berücksichtigung der folgenden Einflussgrößen:
 - Rohrreibungsbeiwert λ ,
 - Einzelwiderstände für T-Stücke, Kugelhähne, Bögen, Konfusoren, Diffusoren,
 - Wärmeübergabestationen;
- Lösen des nichtlinearen Gleichungssystems mittels eines geeigneten Lösungsverfahrens und geeigneter Startwertwahl und somit Berechnung der unbekanntenen Massenströme in den Teilstrecken des Rohrnetzes;
- Prüfen der Plausibilität der Lösung und dadurch zeigen, dass das Berechnungsmodell grundsätzlich geeignet ist die Massenströme in vermaschten Rohrnetzen zu berechnen;
- Berechnung der Druckdifferenzen zwischen zwei Punkten des modellierten Rohrnetzes.

¹Unter einer Teilstrecke wird eine Rohrleitung oder eine Aneinanderreihung von Rohrleitungen, durchaus mit unterschiedlichen Rohrdurchmessern, zwischen Verzweigungen verstanden.

2. Grundlagen

Diese Arbeit schließt an die Masterthesis von LORENZEN [21] an, in der Wärmenetze als Speicher in einem Smart Grid mit einem thermischen Simulationsmodell untersucht werden. LORENZEN berechnet die für die Wärmestromgleichung $\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta\vartheta$ benötigten Massenströme in den Rohrleitungen bei Verzweigungen unter Vernachlässigung der Reibungswiderstände aus dem Verhältnis der Rohrquerschnitte. Dieser Berechnungsansatz ist jedoch nicht für alle Rohrnetze anwendbar.

LORENZEN schreibt dazu in seiner Arbeit [21, S. 24, 25]:

Abbildung 2.1 zeigt zwei Varianten eines Netzes. Der Unterschied besteht darin, dass im rechten Bild eine Kante mehr (gestrichelt dargestellt) als im linken Bild vorkommt. Auch wenn der Unterschied trivial erscheint, so ist das linke System (Variante 1) ein verzweigtes und das rechte (Variante 2) ein vermaschtes System. Der Aufwand der Berechnung für das System mit drei Kanten ist deutlich geringer als der Aufwand zur Berechnung des Systems mit vier Kanten, da sich in Variante 1 die Massenströme eindeutig verteilen.[...] Variante 2 bewirkt somit sowohl bei der Modellierung und Parametrierung einen erhöhten Aufwand als auch eine deutlich längere Simulationsdauer.

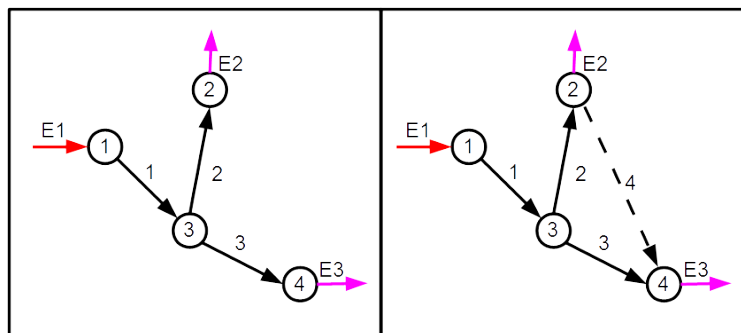


Abbildung 2.1.: Topologie zweier Rohrleitungsnetze (aus [21])

An dieser Stelle knüpft die vorliegende Arbeit an, denn mit der Berechnung vermaschter Rohrnetze ist das von LORENZEN erstellte thermische Modell sehr viel universeller einsetzbar.

In diesem Kapitel wird auf die für die vorliegende Arbeit wesentlichen Grundlagen eingegangen, die in der Fachliteratur zu den Themen hydraulische Widerstände [19], Stoffströme in Rohrleitungen [16], Rohrhydraulik [24, 30], Strömung durch Rohre und Ventile [31], Strömung und Druckverlust [28], Rohrleitungstechnik [27], Technische Strömungslehre [4] und Wärmeaustauscher [29] ausführlich nachgelesen werden können.

Die komplexe Rohr- und Kanalnetzberechnung speziell für konventionelle und TICHELMANNsche Parallelschaltungen wird in [10] beschrieben. Einen allgemeineren Überblick über die hydraulische Berechnung vermaschter Rohrnetze mittels maschenorientierter bzw. knotenorientierter Verfahren findet man in [17], [2] und [23].

Eine umfangreiche Übersicht über nahezu alle zuvor genannten Themen und ausführliche Zusammenstellung der Stoffgrößen gibt der VDI-Wärmeatlas [26]. Die benötigten mathematischen Grundlagen können im Taschenbuch der Mathematik [8] nachgeschlagen werden.

2.1. Mathematischer Ansatz

Die Grundlage für die Berechnung vermaschter Rohrleitungsnetze sind das *1. und 2. KIRCHHOFFsche Gesetz*, auch bekannt als Knotenpunktsatz und Maschensatz.

Für die Knoten im Rohrleitungsnetz gilt entsprechend des *1. KIRCHHOFFschen Gesetzes*, dass sich die n Teilmassenströme in einem Knoten zu Null addieren.

$$\sum_{i=1}^n \dot{m}_i = 0 \quad (2.1)$$

Für die Maschen im Rohrnetz gilt entsprechend des *2. KIRCHHOFFschen Gesetzes*, dass sich die Druckverluste Δp_i über die n Teilstrecken der Masche zu Null addieren.

$$\sum_{i=1}^n \Delta p_i = 0 \quad (2.2)$$

Das Gleichungssystem eines Maschennetzes setzt sich also aus Gleichungen für die Knoten und Gleichungen für die Maschen zusammen.

So wie der Spannungsabfall in einem elektrischen Leiter durch das *Ohm'sche Gesetz* $U = R \cdot I$ mit dem Widerstand R gegen die Fortbewegung des elektrischen Stroms I beschrieben wird, lässt sich auch der Druckabfall Δp_i aufgrund der Rohrreibung mit dem Widerstandskoeffizienten R gegen die Fortbewegung des Fluids \dot{m} bzw. \dot{V} ausdrücken (vgl. [27, 28, 10]). Anders als in der Elektrotechnik ist dieser Zusammenhang jedoch nicht linear,

sondern quadratisch:

$$\Delta p_i = R_{\dot{m},i} \dot{m}_i^2 = R_{\dot{V},i} \dot{V}_i^2 \quad (2.3)$$

Die Indizes \dot{m} bzw. \dot{V} sind in der obigen Gleichung zur Unterscheidung des auf den Massenstrom bezogenen Widerstandskoeffizienten $R_{\dot{m},i}$ und dem auf den Massenstrom bezogenen Widerstandskoeffizienten $R_{\dot{V},i}$. Dabei gilt $R_{\dot{m},i} = \rho(\vartheta_i) R_{\dot{V},i}$, mit $\rho(\vartheta_i)$ als Fluiddichte bei der mittleren Fluidtemperatur ϑ_i in der Rohrleitung.

Wenn im Folgenden auf diese Indizierung des Widerstandskoeffizienten verzichtet wird, dann liegt es daran, dass mit R_i ausschließlich der massenstrombezogene Widerstandskoeffizient $R_{\dot{m},i}$ gemeint ist.

2.1.1. Systemskizze und Gleichungssystem für ein 'Einfaches Maschennetz'

Die Abbildung 2.2 zeigt eine vollständige Skizze des bereits in Abbildung 2.1 dargestellten vermaschten Rohrleitungsnetzes, das nachfolgend als 'Einfaches Maschennetz' bezeichnet werden soll.

Dieses Maschennetz besteht aus insgesamt acht Knoten (K1 bis K8) sowie zehn Teilstrecken¹, mit den Widerstandskoeffizienten R_i und den Massenströmen \dot{m}_i (mit $i = 1 \dots 10$), und enthält drei Maschen (M1 bis M3). Bei Knoten K1 tritt der Gesamtmassenstrom von außerhalb der Systemgrenze in das System ein und bei Knoten K8 verlässt der Gesamtmassenstrom das System². Die Richtung der Teilstrecken und die Umlaufrichtung der Maschen kann willkürlich festgelegt werden, hat aber Bedeutung für die Aufstellung des Gleichungssystems.

Die Knoten entsprechen T-Stücken, die jeweils drei mit den Buchstaben A, B und C gekennzeichnete Teilstrecken verbinden. Für die spätere Berechnung der Widerstandsbeiwerte, die zur aktuellen Strömungssituation am T-Stück gehören, ist die Strömungsvariante beim Simulationsstart gemäß der Abbildungen 2.13, 2.14, 2.15 und 2.16 festzulegen. Diese Festlegung ist in der Systemskizze mit den grünen Teilstreckenbezeichnungen A, B und C erfolgt.

Bei Knoten 3 sind demnach die Widerstandsbeiwerte für ein T-Stück bei Stromtrennung (vgl. Abbildung 2.13) zu berechnen, mit Teilstrecke 3 als Abzweig C und Teilstrecke 2 als Durchgang B. Bei Knoten 4 sind dagegen die Widerstandsbeiwerte für ein Hosenstück (180°) bei Stromvereinigung (vgl. Abbildung 2.16) zu berechnen, während bei Knoten 5 die Widerstandsbeiwerte für ein Hosenstück (180°) bei Stromtrennung (vgl. Abbildung 2.15) zu berechnen sind.

¹Im Folgenden wird anstatt *Kante* der Begriff *Teilstrecke* (TS) verwendet.

²Wärmeverluste über die Rohrleitungen bzw. die Abgabe von Wärme in den Kundenleitungen sind in der Skizze des Systems nicht berücksichtigt.

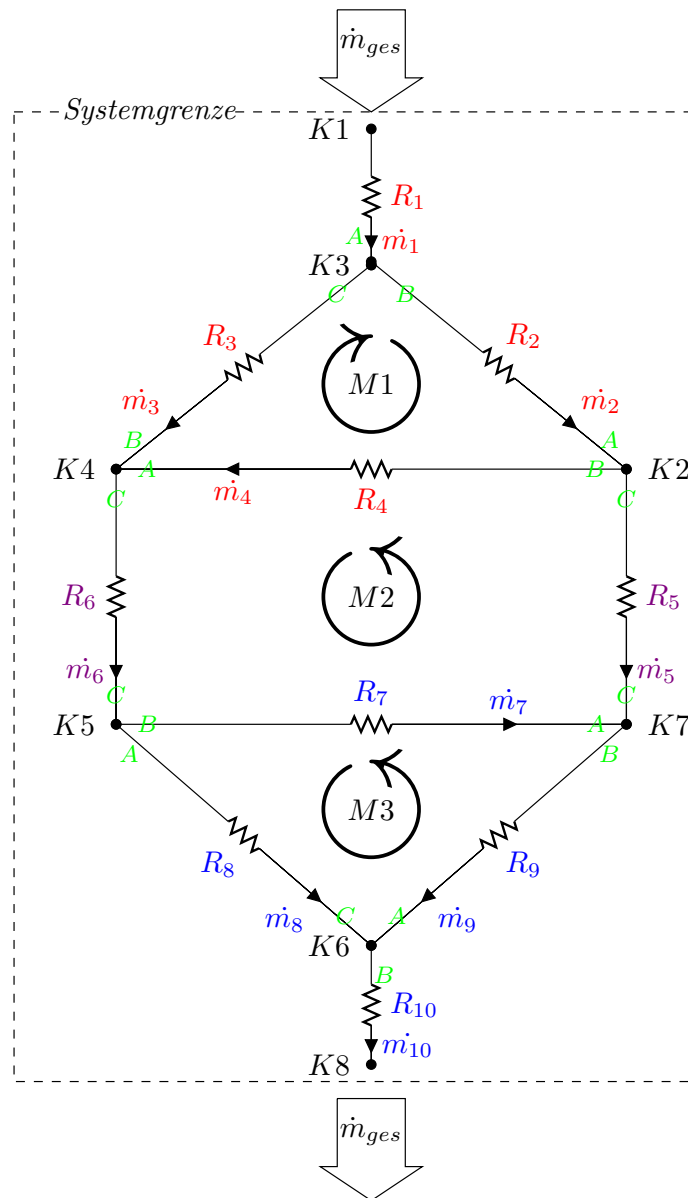


Abbildung 2.2.: Systemskizze für ein 'Einfaches Maschennetz' mit zwei Kundenleitungen (violett)

Anhand dieser Systemskizze lässt sich das nachstehende Gleichungssystem notieren. Unter Anwendung des Knotenpunktsatzes ergeben sich acht Zeilen (K1 bis K8) für die Knotenpunkte (Knotengleichungen) und zusätzlich unter Anwendung des Maschensatzes drei weitere Zeilen (M1 bis M3) für die Maschen (Maschengleichungen).

$$\begin{array}{rcl}
 \text{K1:} & -\dot{m}_1 & +\dot{m}_{ges} = 0 \\
 \text{K2:} & +\dot{m}_2 & -\dot{m}_4 \quad -\dot{m}_5 = 0 \\
 \text{K3:} & +\dot{m}_1 - \dot{m}_2 & -\dot{m}_3 = 0 \\
 \text{K4:} & & +\dot{m}_3 + \dot{m}_4 \quad -\dot{m}_6 = 0 \\
 \text{K5:} & & +\dot{m}_6 \quad -\dot{m}_7 - \dot{m}_8 = 0 \\
 \text{K6:} & & +\dot{m}_8 \quad +\dot{m}_9 - \dot{m}_{10} = 0 \\
 \text{K7:} & & +\dot{m}_5 \quad +\dot{m}_7 \quad -\dot{m}_9 = 0 \\
 \text{K8:} & & +\dot{m}_{10} - \dot{m}_{ges} = 0 \\
 \text{M1:} & +R_2\dot{m}_2^2 - R_3\dot{m}_3^2 + R_4\dot{m}_4^2 & = 0 \\
 \text{M2:} & +R_4\dot{m}_4^2 - R_5\dot{m}_5^2 + R_6\dot{m}_6^2 + R_7\dot{m}_7^2 & = 0 \\
 \text{M3:} & -R_7\dot{m}_7^2 + R_8\dot{m}_8^2 - R_9\dot{m}_9^2 & = 0
 \end{array}$$

Die Summanden sind nach den Indizes der betreffenden Teilstrecken sortiert. Somit stehen in einer Spalte stets nur die relevanten Parameter einer Teilstrecken (Teilstreckenspalten) und der Wechsel zur Matrixschreibweise in Gleichung 2.4 kann besser nachvollzogen werden. Im Folgenden wird der Aufbau des Gleichungssystems entsprechend der Skizze beispielhaft anhand einiger Knoten und Maschen erläutert.

Knotenzeile Weist der Pfeil der Teilstrecke in der Systemskizze (vgl. Abbildung 2.2) auf den Knoten, so erhält der entsprechende Massenstrom ein positives Vorzeichen. Weist der Pfeil der Teilstrecke in der Systemskizze vom Knoten weg, so erhält der entsprechende Massenstrom ein negatives Vorzeichen (Knotenpunktsatz).

In welcher Richtung der Pfeil in der Systemskizze gezeichnet wird ist für die mathematisch korrekte Lösung grundsätzlich nicht von Belang, jedoch erleichtert eine physikalisch begründete Richtungswahl in der Regel die Nachvollziehbarkeit des Ergebnisses.

Beispiel Zeile K1 In den Knoten K1 gehen der externe Gesamtmassenstrom m_{ges} hinein (positives Vorzeichen) und der Massenstrom m_1 der Teilstrecke 1 heraus (negatives Vorzeichen). Die Summe dieser Massenströme ist gleich Null.

Beispiel Zeile K2 In den Knoten K2 gehen der Massenstrom m_2 der Teilstrecke 2 hinein (positives Vorzeichen) und die Massenströme m_4 und m_5 der Teilstrecken 4 und 5 heraus (negatives Vorzeichen). Die Summe dieser Massenströme ist gleich Null.

Beispiel Zeile K3 In den Knoten K3 gehen der Massenstrom m_1 der Teilstrecke 1 hinein (positives Vorzeichen) und die Massenströme m_2 und m_3 der Teilstrecken

2 und 3 heraus (negatives Vorzeichen). Die Summe dieser Massenströme ist gleich Null.

übrige Knotenzeilen Die übrigen Knotenzeilen des Gleichungssystems werden in analoger Weise aufgestellt.

Maschenzeile Verläuft der Pfeil der Teilstrecke in Richtung der eingezeichneten Umlaufrichtung der Masche, so erhält die entsprechende Druckdifferenz der Teilstrecke ein positives Vorzeichen. Verläuft der Pfeil der Teilstrecke entgegengesetzt zur eingezeichneten Umlaufrichtung der Masche, so erhält die entsprechende Druckdifferenz ein negatives Vorzeichen.

In welcher Richtung die Umlaufrichtung der Masche in der Skizze gezeichnet wird ist für die mathematisch korrekte Lösung grundsätzlich nicht von Belang, jedoch ist die damit gewählte Festlegung der Vorzeichen für die Druckdifferenzen konsequent anzuwenden³.

Beispiel Zeile M1 Die Teilstrecken 2 und 4 laufen entlang der gewählten Umlaufrichtung der Masche 1, daher erhalten die Druckdifferenzen Δp_2 und Δp_4 ein positives Vorzeichen. Die Teilstrecke 3 verläuft entgegen der Umlaufrichtung der Masche 1, daher erhält die Druckdifferenz der Teilstrecke 3 ein negatives Vorzeichen. Die Summe dieser Druckdifferenzen ist gleich Null.

übrige Maschenzeilen Die übrigen Maschenzeilen werden in analoger Weise aufgestellt.

In Matrixschreibweise sieht das vorgestellte Gleichungssystem für das 'Einfache Maschennetz' folgendermaßen aus:

$$\underline{F}(\dot{m}) = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & R_2 \dot{m}_2 & -R_3 \dot{m}_3 & R_4 \dot{m}_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_4 \dot{m}_4 & -R_5 \dot{m}_5 & R_6 \dot{m}_6 & R_7 \dot{m}_7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R_7 \dot{m}_7 & R_8 \dot{m}_8 & -R_9 \dot{m}_9 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{m}_1 \\ \dot{m}_2 \\ \dot{m}_3 \\ \dot{m}_4 \\ \dot{m}_5 \\ \dot{m}_6 \\ \dot{m}_7 \\ \dot{m}_8 \\ \dot{m}_9 \\ \dot{m}_{10} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -\dot{m}_{ges} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dot{m}_{ges} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Und in allgemeiner Form:

$$\underline{F}(\dot{m}) = \underline{M} \cdot \dot{m} - \underline{f} = \underline{0} \quad (2.5)$$

Die Matrix \underline{M} wird auch als *Netzstrukturmatrix* bezeichnet, da sie die Struktur des Netzes beschreibt.

³Fehler bei den Vorzeichen können die Ursache dafür sein, dass das später beschriebene Berechnungsverfahren nicht konvergiert.

Zur konkreten Lösung dieser Matrixgleichung ist die Berechnung der Widerstandskoeffizienten R für jede der Teilstrecken (Spalten in der Netzstrukturmatrix \underline{M}) erforderlich.

Widerstandskoeffizient R

Der Widerstandskoeffizient R für eine Rohrleitung mit rundem Querschnitt und e Einzelwiderständen berechnet sich entsprechend [10]

$$R = \frac{8}{\pi^2 d^4 \rho} \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum_{z=1}^e \zeta_z \right) \quad (2.6)$$

mit:

λ Rohrreibungsbeiwert

l Rohrlänge

d Rohrinne Durchmesser

$\rho(\vartheta)$ Fluidichte bei der mittleren Fluidtemperatur ϑ

ζ Einzelwiderstandsbeiwert

Der Widerstandskoeffizient R_{TS} einer aus n Rohrleitungen zusammengesetzten Teilstrecke ist damit

$$R_{TS} = \sum_{c=1}^n R_{TS,c} = \sum_{c=1}^n \frac{8}{\pi^2 d_{TS,c}^4 \rho_{TS,c}} \left(\lambda_{TS,c} \frac{l_{TS,c}}{d_{TS,c}} + \sum_{z=1}^{e_c} \zeta_{TS,c,z} \right) \quad (2.7)$$

Für alle Rohrleitungen mit ihren Komponenten müssen also die Fluidtemperaturen und die relevanten Eingangsparameter zur Berechnung der einzelnen Widerstandskoeffizienten R zur Verfügung stehen bzw. müssen plausibel abgeschätzt werden können.

hintereinander geschaltete Widerstände Ist der Massenstrom \dot{m}_i in einer Rohrleitung konstant, dann ergibt sich der Widerstand R_i dieser Rohrleitung durch Addition der Teilwiderstände [27]:

$$R_i = \sum_{c=1}^n R_{i,c} = R_{i,1} + R_{i,2} + R_{i,3} + \dots + R_{i,n} \quad (2.8)$$

parallele Widerstände Der Gesamtwiderstandskoeffizient parallel geschalteter Einzelwiderstände ergibt sich zu [27]

$$\frac{1}{\sqrt{R}} = \sum_{c=1}^n \frac{1}{\sqrt{R_c}} = \frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2}} + \frac{1}{\sqrt{R_3}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{R_n}} \quad (2.9)$$

und umgeformt:

$$R = \frac{1}{\left(\sum_{c=1}^n \frac{1}{\sqrt{R_c}}\right)^2} \quad (2.10)$$

Um Gleichung 2.5 für ein beliebiges Rohrnetz aufzustellen sind die mathematischen Abhängigkeiten in den Abbildungen 2.3 und 2.4 zu berücksichtigen. Blau hinterlegt sind darin die benötigten Berechnungsfunktionen und Skripte, während die benötigten Eingangsparameter gelb hinterlegt sind. Zusätzlich grün gekennzeichnet sind die als Startwerte benötigten Massenströme. Bei Kopplung mit einem thermischen Modell werden auch Startwerte für die Temperaturen benötigt, im hydraulischen Modell werden sie dagegen als konstante Werte angenommen.

Es wird deutlich, dass für eine Rohrnetzberechnung viele Eingangsparameter benötigt werden, z.B. Daten für die Netzgeometrie, die Netztopologie, Rauigkeit, Verlustbeiwerte und physikalische Stoffdaten. Die berechneten Strömungsverhältnisse werden nicht mit der Realität übereinstimmen, solange diese Daten nur rein theoretisch ermittelt oder festgelegt werden. Für eine sinnvolle Rohrnetzberechnung sollten die Eingangsparameter anhand einer Rohrnetzanalyse zur Ermittlung des tatsächlichen Netzzustandes geprüft werden [23].

Das Gleichungssystem $\mathbf{F}(\dot{m})$ in Gleichung 2.5 ist für Netze, die Maschen enthalten, nicht linear. Da das Gleichungssystem zudem von mehreren Variablen \dot{m}_i abhängig ist, wird ein numerisches Verfahren zur Lösung mehrdimensionaler nichtlinearer Gleichungssysteme benötigt.

2.1.2. Berechnungsverfahren

Für die stationäre Simulation der Hydraulik in Wasserverteilnetzen wurden verschiedene mathematische Berechnungsverfahren entwickelt [15]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden das HARDY-CROSS-Verfahren und das Knoten-Strang-Verfahren eingesetzt⁴.

Bei beiden Verfahren wird ausgehend von Anfangsschätzwerten für die Massenströme unter Einhaltung der Kontinuitätsbedingung (Knotenregel) die Aufhebung der Druckverluste in den Maschen angestrebt.

CROSS-Verfahren

Beim maschenorientierten Verfahren nach CROSS [9] wird für die anfänglichen Durchflusswerte in den Teilstrecken unter Beachtung der Knotenregel (im Gleichungssystem auf Seite

⁴Ein detaillierter Überblick über das CROSS-Verfahren, das Knoten-Strang-Verfahren und weitere Verfahren sowie ihre Vor- und Nachteile findet sich in der Dissertation von HÄHNLEIN [15].

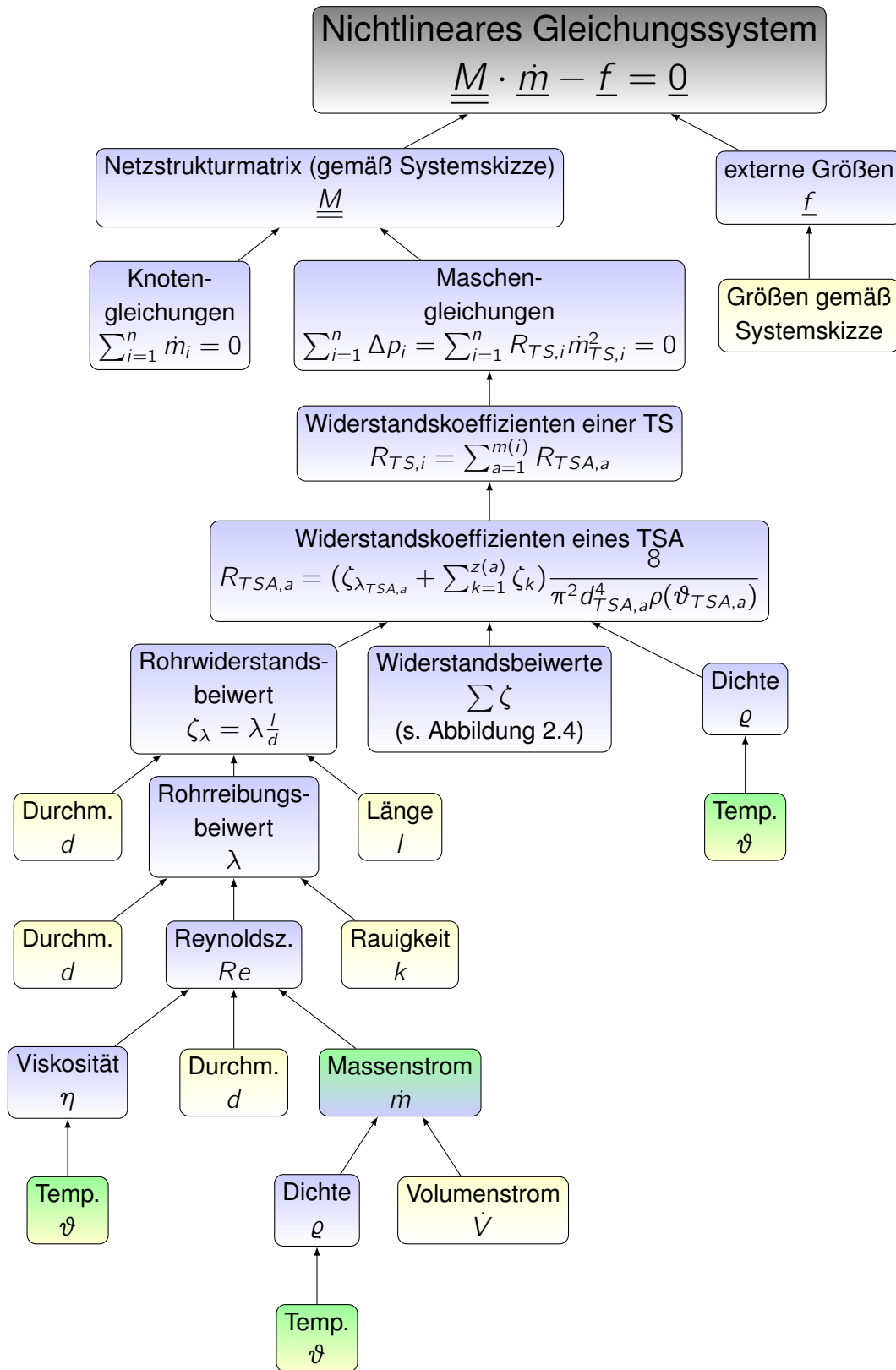


Abbildung 2.3.: Schematische Darstellung zum Aufbau des nichtlinearen Gleichungssystems.

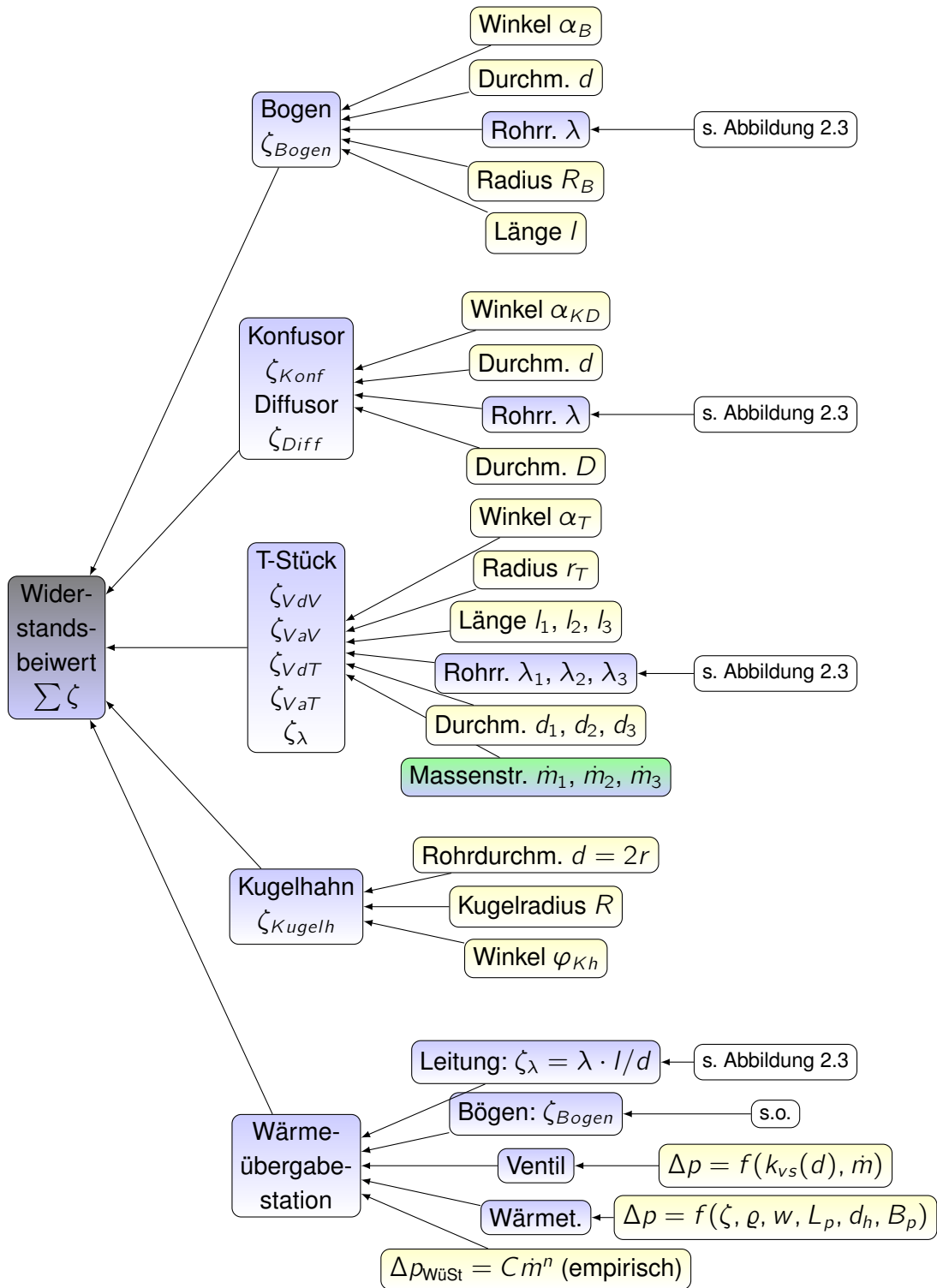


Abbildung 2.4.: Schematische Darstellung zur Bestimmung der Widerstandsbeiwerte.

19 die Zeilen K1-K8) die Maschenregel (im Beispiel die Zeilen M1-M3) überprüft. Mit der ermittelten Differenz wird mittels Maschenabgleich eine maschenweise Durchflusskorrektur durchgeführt. Der Maschenabgleich z_{Masche} der $(n + 1)$.ten Iteration berechnet sich nach CROSS mithilfe der Werte aus der (n) .ten Iteration zu

$$z_{\text{Masche}}^{(n+1)} = - \frac{\sum_{\text{Masche}} (R_{TS,i}^{(n)} \cdot m_i^{(n)} \cdot |m_i^{(n)}|)}{2 \sum_{\text{Masche}} (R_{TS,i}^{(n)} \cdot |m_i^{(n)}|)} \quad (2.11)$$

Mit diesem iterativen Verfahren lassen sich vermaschte Netze manuell berechnen. Der Maschenabgleich lässt sich mit Hilfe des NEWTON-RAPHSON-Verfahrens berechnen, denn

$$z_{\text{Masche}}^{(n+1)} = - \frac{\sum_{\text{Masche}} (R_{TS,i}^{(n)} \cdot m_i^{(n)} \cdot |m_i^{(n)}|)}{2 \sum_{\text{Masche}} (R_{TS,i}^{(n)} \cdot |m_i^{(n)}|)} = - \frac{F_{\text{Masche}}(\dot{m}^{(n)})}{F'_{\text{Masche}}(\dot{m}^{(n)})} \quad (2.12)$$

Unter Beachtung der definierten Umlaufrichtung der Masche werden die Durchflüsse der Teilstrecken der Masche mit diesem Maschenabgleich solange korrigiert bis die ermittelte Differenz in den Maschen vernachlässigbar ist ([17], [2]).

Beispiel: Für die Maschengleichung M1 in Gleichung 2.5 ergebe die Berechnung

$$F_{M1} = R_2 \cdot |\dot{m}_2| \cdot \dot{m}_2 - R_3 \cdot |\dot{m}_3| \cdot \dot{m}_3 + R_4 \cdot |\dot{m}_4| \cdot \dot{m}_4 = 1000 \text{Pa} \quad (2.13)$$

Der Wert der Ableitung betrage

$$F'_{M1} = 2R_2 \cdot |\dot{m}_2| - 2R_3 \cdot |\dot{m}_3| + 2R_4 \cdot |\dot{m}_4| = 2000 \frac{\text{Pa}}{\text{kg/s}} \quad (2.14)$$

Dann sind die Massenströme $m_2^{(n)}$, $m_3^{(n)}$ und $m_4^{(n)}$ der (n) .ten Iteration für die $(n + 1)$.te Iteration gemäß der Beziehung $\dot{m}_{2,3,4}^{(n+1)} = \dot{m}_{2,3,4}^{(n)} + z_{\text{Masche}}^{(n+1)}$ mit dem Maschenabgleich

$$z_{\text{Masche}}^{(n+1)} = - \frac{1000 \text{Pa}}{2000 \frac{\text{Pa}}{\text{kg/s}}} = -0,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \text{ zu korrigieren.}$$

Die Korrektur wird beim *Einzelschrittverfahren* sofort bei den Knoten der betreffenden Masche angebracht, während beim *Gesamtschrittverfahren* die Korrekturen für alle Maschen und Knoten pro Iterationsschritt gesammelt und insgesamt berücksichtigt werden [15].

Als Vor- und Nachteile des CROSS-Verfahrens nennt HÄHNLEIN [15] unter anderem:

- Ein einfaches Verfahren, dass für kleine Netze manuell gerechnet werden kann.
- Die Konvergenzrate ist beim CROSS-Verfahren in großem Maße von der Netzstruktur abhängig.

- Das Berechnungsverfahren ist nicht immer mathematisch stabil.

Knoten-Strang-Verfahren

Während z.B. bei Knoten-Verfahren die Maschen eines Netzes bedeutungslos sind, werden beim Knoten-Strang-Verfahren alle hydraulischen Gleichungen, wie z.B. in Gleichung 2.4 aufgeführt, ohne weitere Umformung dem NEWTON-RAPHSON-Verfahren unterworfen. Als Vor- und Nachteile des Knoten-Strang-Verfahrens nennt HÄHNLEIN [15] unter anderem:

- Die Stabilität dieses Verfahrens ist praktisch unabhängig von Größe und Geometrie des Netzes.
- Es können alle wesentlichen Netzelemente problemlos modelliert werden.
- In Abhängigkeit vom Startvektor neigt das Konvergenzverhalten unter Umständen zu Schwingungen.

DIANKOV setzt in seiner Dissertation das Knoten-Strang-Verfahren ein und gibt Empfehlungen für die initialen Startwerte bei konventionellen Parallelschaltungen und der TICHEL-MANNschen Parallelschaltung. Er hebt hervor, dass aufgrund der Mehrdimensionalität eine Überprüfung der Konvergenzbedingungen praktisch nicht durchführbar ist. Es werden jedoch gute Konvergenzbedingungen bei großen Differenzen zwischen den Teilstreckenkoeffizienten der parallelen Strecken (Kundenleitungen) und den Teilstreckenkoeffizienten der Verteiler- und Sammelleitungen beobachtet. Dabei konvergiert das Verfahren umso sicherer, je größer der Rohrdurchmesser und je kürzer die Verteiler- und Sammelleitungsteilstrecken sind. Bei besonderen Fällen ist eine Vorausberechnung der Druckverluste mit konventionellen Methoden unumgänglich, um die Startwerte abschätzen zu können [10].

NEWTON-RAPHSON-Verfahren

Das NEWTON-RAPHSON-Verfahren ist ein Verfahren zur Lösung nichtlinearer Gleichungssysteme. Auch im Rahmen dieser Arbeit wird es sowohl für das CROSS- als auch für das Knoten-Strang-Verfahren genutzt, daher soll es im Folgenden kurz erläutert werden.

Gesucht ist eine Lösung $\underline{\dot{m}}^*$ der Gleichung 2.5. Vorausgesetzt \underline{F} ist stetig differenzierbar und die Ableitung \underline{F}' stetig invertierbar dann wird die gesuchte Lösung $\underline{\dot{m}}^*$, ausgehend von $\underline{\dot{m}}^{(0)}$ durch die NEWTONsche Näherungsformel

$$\underline{\dot{m}}^{(n+1)} = \underline{\dot{m}}^{(n)} - \frac{\underline{F}(\underline{\dot{m}}^{(n)})}{\underline{F}'(\underline{\dot{m}}^{(n)})} \quad (n=0,1,\dots) \quad (2.15)$$

approximiert [8]. $\underline{\underline{F'}}$ ist dabei die JACOBI-Matrix

$$\underline{\underline{F'}}(\underline{\dot{m}}^{(n)}) = J_f(\underline{\dot{m}}^{(n)}) = \frac{\partial(F_1, F_2, \dots, F_m)}{\partial(\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dots, \dot{m}_n)}(\underline{\dot{m}}^{(n)}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1(\underline{\dot{m}}^{(n)})}{\partial \dot{m}_1} & \frac{\partial F_1(\underline{\dot{m}}^{(n)})}{\partial \dot{m}_2} & \dots & \frac{\partial F_1(\underline{\dot{m}}^{(n)})}{\partial \dot{m}_n} \\ \frac{\partial F_2(\underline{\dot{m}}^{(n)})}{\partial \dot{m}_1} & \frac{\partial F_2(\underline{\dot{m}}^{(n)})}{\partial \dot{m}_2} & \dots & \frac{\partial F_2(\underline{\dot{m}}^{(n)})}{\partial \dot{m}_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_m(\underline{\dot{m}}^{(n)})}{\partial \dot{m}_1} & \frac{\partial F_m(\underline{\dot{m}}^{(n)})}{\partial \dot{m}_2} & \dots & \frac{\partial F_m(\underline{\dot{m}}^{(n)})}{\partial \dot{m}_n} \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

Mit

$$\underline{z}^{(n+1)} = \underline{\dot{m}}^{(n+1)} - \underline{\dot{m}}^{(n)} \quad (2.17)$$

lässt sich somit das lineare Gleichungssystem

$$\underline{\underline{F'}}(\underline{\dot{m}}^{(n)}) \cdot \underline{z}^{(n+1)} = -\underline{F}(\underline{\dot{m}}^{(n)}) \quad (2.18)$$

aufstellen und dieses iterativ lösen.

Die neue Näherung $\underline{\dot{m}}^{(n+1)}$ errechnet sich nach Gleichung 2.17 und der Rechenprozess zur Lösung von Gleichung 2.18 wiederholt sich bis der Schleifenparameter ϵ kleiner einer geforderten Genauigkeit ist oder eine maximale Anzahl von Iterationsschritten erreicht ist.

Soll das Ergebnis auf Erfüllung der Maschenregel überprüft werden, empfiehlt es sich mit dem Schleifenparameter ϵ die Funktionswerte in den Maschengleichungen zu berechnen und abzurechnen, wenn $\epsilon = \|F_{Masche}\| < \text{Genauigkeit} (\gtrsim 0)$.

Varianten bei der Berechnung der Widerstandskoeffizienten

Da die Widerstandskoeffizienten R_{TS} einer Teilstrecke als Koeffizienten in den Maschengleichungen auftreten und ihrerseits selbst vom Massenstrom abhängig sind, können sie in der Regel nicht als konstant angenommen werden und müssen wiederholt neu berechnet werden. Für diese Neuberechnung sind die folgenden zwei Varianten vorstellbar.

Interne R-Berechnung: Berechnung von R_{TS} innerhalb des iterativen Berechnungsverfahrens Bei dieser Variante werden die Widerstandskoeffizienten R_{TS} einmalig zu Beginn für die Startwerte und dann bei jeder Iteration innerhalb des iterativen Berechnungsverfahrens mit der Lösung des vorhergehenden Iterationsschrittes berechnet. Das führt dazu, dass sich bei jeder neuen Iteration die Widerstandskoeffizienten R_{TS} im Gleichungssystem etwas anders als die der vorhergehenden Iteration sind.

Das Verfahren bricht ab, sobald der Schleifenparameter ϵ kleiner einer geforderten Genauigkeit oder eine maximale Anzahl von Iterationen erreicht ist.

Anmerkung Möglicherweise beeinflusst das Festlegen unveränderlicher Massenströme \dot{m}_{fix} jedoch das Konvergenzverhalten des Lösungsalgorithmus, z.B. weil die festgelegten Massenströme und die dazu ermittelten Widerstandskoeffizienten nicht mit der Lösung des Gleichungssystems in Gleichung 2.5 übereinstimmen.

2.2. Grundgleichungen

Im folgenden Abschnitt werden einige wichtige Grundgleichungen kurz vorgestellt.

Gleichung von BERNOULLI Für ein beliebig geformtes Rohrstück mit veränderlichem Querschnitt und stationärer Strömung lassen sich für zwei senkrecht zur Achse der Leitung stehende Querschnitte A_1 und A_2 die folgenden aus dem Energieerhaltungssatz abgeleiteten allgemeinen Gleichungen aufstellen, die mit und ohne Reibung gelten [24].

$$Q_{12} - A_{t_{12}} = (U_2 - U_1) + (P_2 V_2 - P_1 V_1) + E_{p_{21}} - E_{k_{21}} \quad (2.21)$$

Oder mit der Enthalpie $l = U + PV$:

$$Q_{12} - A_{t_{12}} = (l_2 - l_1) + E_{p_{21}} - E_{k_{21}} \quad (2.22)$$

Bei Rohrströmungen ist die technische Arbeit $A_{t_{12}} = 0$. Mit $E_{p_{21}} = mg(h_2 - h_1)$ und $E_{k_{21}} = \frac{m}{2}(w_2^2 - w_1^2)$ folgt dann

$$Q_{12} = l_2 - l_1 + mg(h_2 - h_1) + \frac{m}{2}(w_2^2 - w_1^2) \quad (2.23)$$

Für eine quasistatische Zustandsänderung eines geschlossenen Systems gilt außerdem:

$$l_1 - l_2 + Q_{12} = \int_2^1 V dP - |A_{R_{12}}| \quad (2.24)$$

Das Integral stellt die Änderung der inneren potentiellen Energie dar. Die rechte Seite der Gleichung gibt an welcher Teil dieser inneren potentiellen Energie in mechanische Energie umgesetzt werden kann. Dieser Anteil ist umso kleiner, je größer die Reibungsarbeit $|A_{R_{12}}|$ ist.

Mit den Gleichungen 2.23 und 2.24 erhält man:

$$mg(h_1 - h_2) + \int_2^1 V dP = \frac{m}{2}(w_2^2 - w_1^2) + |A_{R_{12}}| \quad (2.25)$$

Gleichung 2.25 drückt mathematisch aus: Wenn ein Fluid durch eine Rohrleitung strömt, wird (äußere und innere) potentielle Energie in kinetische Energie umgesetzt und Reibungsarbeit verrichtet. Bei der Rohrströmung ist die Abnahme an potentieller Energie (linke Seite) gleich der Zunahme an kinetischer Energie und der verrichteten Reibungsarbeit (rechte Seite) [24].

In spezifischer Form sieht diese Gleichung folgendermaßen aus:

$$g(h_1 - h_2) + \int_2^1 \frac{1}{\varrho} dP = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + |a_{R12}| \quad (2.26)$$

Die Dissipationsverluste durch die Reibungsarbeit $|a_{R12}|$ führen zu Druckverlusten Δp_R

$$|a_{R12}| = \left| \frac{\Delta p_R}{\varrho} \right| \quad (2.27)$$

Durch Umstellen von Gleichung 2.26 erhält man dann folgende Gleichung in der Dimension *spezifische Energie* [4, S. 149]

$$gh_1 + \frac{p_1}{\varrho} + \frac{w_1^2}{2} = gh_2 + \frac{p_2}{\varrho} + \frac{w_2^2}{2} + \left| \frac{\Delta p_R}{\varrho} \right| \quad (2.28)$$

Das bedeutet, dass der reale Druck p_2 am Ende der Stromröhre um einen Druckabfall Δp_v kleiner ist, als der theoretische Druck p_2 bei idealer, reibungsfreier Strömung. Die Temperaturerhöhung des Fluids infolge der Dissipationsverluste kann einen Einfluß auf die temperaturabhängigen Stoffgrößen haben. Dieser wird in der vorliegenden Arbeit jedoch als vernachlässigbar angenommen, da Wärmeverluste an die Umgebung diese voraussichtlich mindestens kompensieren.

In der Dimension *Länge* bzw. *Höhe* sieht die erweiterte BERNOULLI-Gleichung in Abbildung 2.6 grafisch dargestellt (wobei $h_v = h_R$) folgendermaßen aus:

$$h_1 + \frac{p_1}{\varrho g} + \frac{w_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\varrho g} + \frac{w_2^2}{2g} + |h_R| \quad (2.29)$$

Können Dissipationverluste vernachlässigt werden, also $|a_{R12}| = 0$, so erhält man die klassische Form der BERNOULLI-Gleichung, die in Abbildung 2.5 anschaulich dargestellt ist.

$$h + \frac{p}{\varrho g} + \frac{w^2}{2g} = const \quad (2.30)$$

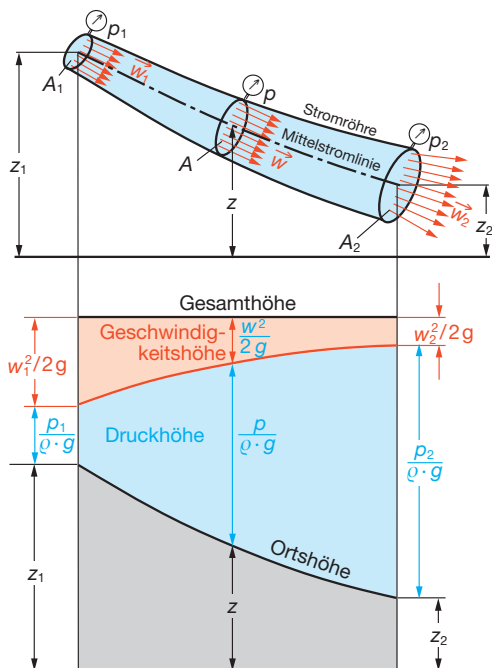


Abbildung 2.5.: Strömung längs einer Stromröhre ohne Dissipationsverluste (Gleichung von BERNOULLI) [4, S. 91]

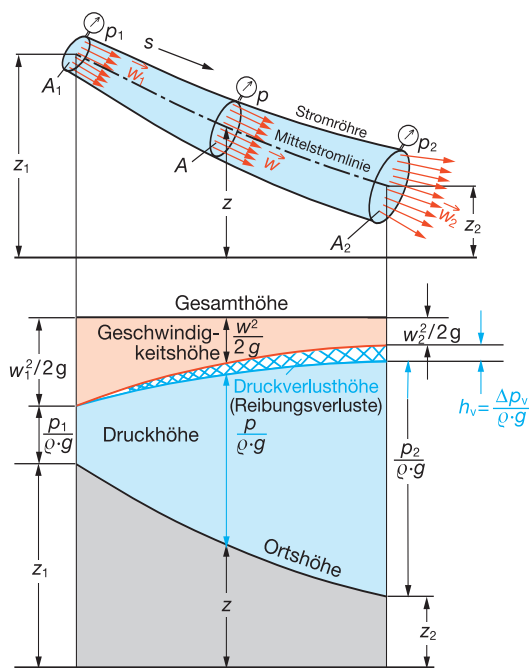


Abbildung 2.6.: Strömung längs einer Stromröhre mit Dissipationsverlusten (erweiterte Gleichung von BERNOULLI) [4, S. 149]

Wegen Gleichung 2.28 und Gleichung 2.27 erhält man für die Reibungsarbeit

$$|a_{R12}| = \left| \frac{\Delta p_R}{\rho} \right| = \left| g(h_1 - h_2) + \frac{p_1 - p_2}{\rho} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2} \right| \quad (2.31)$$

Andererseits gilt für den Druckverlust durch Rohrreibung und Einzelwiderstände der Zusammenhang (vgl. [13, S. 176])

$$\Delta p_R = \frac{\rho w^2}{2} \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \quad (2.32)$$

Für die Strömungsgeschwindigkeit w kann man wegen

$$\rho = \frac{\dot{m}}{V} = \frac{\dot{m}}{Aw} \quad (2.33)$$

auch schreiben

$$w^2 = \frac{\dot{m}^2}{A^2 \rho^2} \quad (2.34)$$

Für Rohre mit kreisförmigen Querschnittsflächen $A = \pi \frac{d^2}{4}$ erhält man dann

$$\Delta p_R = \frac{8\dot{m}^2}{\pi^2 d^4 \varrho^2} \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \quad (2.35)$$

Unter Einführung des Widerstandskoeffizienten R , wie bereits in Gleichung 2.6 dargestellt, lässt sich viel übersichtlicher schreiben

$$\Delta p_R = R \dot{m}^2 \quad (2.36)$$

Berechnung der Reibungswärme Da die Reibungsarbeit $|a_{R_{12}}|$ in Reibungswärme

$$q_{R_{12}} = c_p (\Delta T)_R \quad (2.37)$$

umgesetzt wird, lässt sich unter Nutzung von Gleichung 2.31 und Gleichung 2.36 die Reibungswärme

$$q_{R_{12}} = \frac{R \dot{m}^2}{\varrho} \quad (2.38)$$

berechnen. Findet kein Wärmeaustausch mit der Umgebung statt, d.h. wenn das System adiabatisch ist, so führt die Reibungswärme zu einer Temperaturerhöhung $(\Delta T)_R$ des Fluids.

$$(\Delta T)_R = \frac{R \dot{m}^2}{c_p \varrho} \quad (2.39)$$

2.3. Einflussgrößen des Widerstandskoeffizienten R

Für die quantitative Beschreibung des Gleichungssystems nach Gleichung 2.5 ist die Bestimmung des Widerstandskoeffizienten R elementar wichtig. Auf dessen Einflussgrößen wird im Folgenden eingegangen (s.a. Abbildung 2.3).

Reynolds-Zahl Re

OSBORNE REYNOLDS beschrieb bereits Ende des 19. Jahrhunderts den Zusammenhang zwischen Strömungsgeschwindigkeit, kinematischer Viskosität und Rohrdurchmesser, der sowohl für den Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung als auch für die Berechnung des Druckverlustes maßgebend ist [4]. Das REYNOLDSsche Ähnlichkeitsgesetz besagt, dass sich zwei Strömungen dann mechanisch ähnlich sind, wenn ihnen die gleichen Reynolds-Zahlen zugeordnet sind, die Trägheits- und Scherreibungskräfte also im selben Verhältnis

zueinander stehen [24, Teil 1 Kap. 5]. In der vorliegenden Arbeit wird die Reynolds-Zahl in der Regel in Abhängigkeit vom Massenstrom \dot{m} oder vom Volumenstrom \dot{V} berechnet [13]:

$$Re = \frac{\rho w d}{\eta} = \frac{4\dot{m}}{\eta \pi d} = \frac{4\dot{V}\rho}{\eta \pi d} \quad (2.40)$$

Die Reynolds-Zahl ist eine dimensionslose Kennzahl. Als kritische Reynolds-Zahl wird $Re_c = 2320$ gesetzt, d.h. bei Werten $Re < Re_c$ wird der Rohrreibungsbeiwert λ für laminare Strömungen nach Gleichung 2.46 berechnet, während ab $Re \geq Re_c$ der Übergang zur turbulenten Strömung beginnt und der Rohrreibungsbeiwert λ gemäß Gleichung 2.47 berechnet wird.

Rauigkeit k

MILLER weist in [22, S. 152] darauf hin, dass Bedenken bzgl. der Zuverlässigkeit von Druckabfallberechnungen meistens bezüglich der Reibungsverluste in geraden Rohrleitungen entstehen. Denn hier bestehen stets Unsicherheiten aufgrund des unüberwindbaren Problems die Form und die Verteilung der Rauigkeit und deren zeitliche Veränderungen aufgrund von Abnutzung, Erosion, Ablagerung und Bewuchs zu beschreiben.

Bei der Rauigkeit wird die technische Rauigkeit und die Sandrauigkeit unterschieden. Während die Theorie der Rohrreibungszahl weitgehend auf Grundlage der künstlichen Sandrauigkeit aufgebaut wurde, zeigen natürliche Oberflächen eher eine natürliche, wellige Rauigkeit. Bei Versuchen wurde festgestellt, dass bei identischem Druckverlust die höchsten Spitzen bei der natürlichen Rauigkeit etwa 3 bis 5mal so groß waren, wie bei der entsprechenden Sandrauigkeit. Trotz gleicher Werte können Art und Einfluß der Wandrauigkeit recht verschieden sein, wie Abbildung 2.7 für gleichförmige und ungleichförmige Rauigkeiten zeigt. Es besteht somit die Herausforderung bei technischen Oberflächen der technischen Rauigkeit die entsprechende äquivalente Sandrauigkeit zuzuordnen [28, 24].

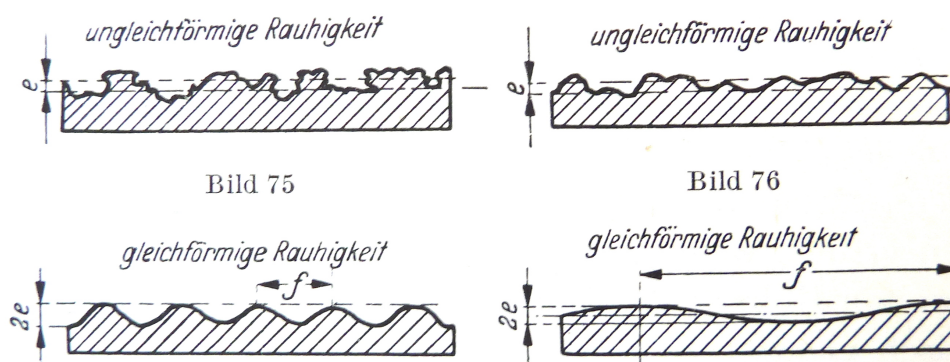


Abbildung 2.7.: Beispiele für die Ausprägungen von Wandrauigkeiten [24]

Um die *äquivalente Sandrauigkeit* einer natürlichen Rauigkeit zu ermitteln (s. Abbildung 2.8), wird bei vollständig rauer Strömung, d.h. wenn kein Einfluss der Reynolds-Zahl mehr vorliegt, der jetzt nur noch von der Rauigkeit abhängige Rohrreibungsbeiwert λ bestimmt. Dazu kann die folgende Gleichung genutzt werden, wenn nach λ aufgelöst und alle anderen Größen gemessen werden [24]:

$$g(h_1 - h_2) + \frac{1}{\rho}(P_1 - P_2) = \lambda \frac{l}{d} \frac{w^2}{2} \quad (2.41)$$

Bei vollständig rauer Strömung gilt die von NIKURADSE für künstlich sandraue Rohre ermittelte Beziehung

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \frac{d}{k} + 1,14 \quad (2.42)$$

Daraus lässt sich nach Ermittlung von λ direkt die *äquivalente Sandrauigkeit* berechnen [16]

$$\lg k = \lg d + 0,57 - \frac{1}{2\sqrt{\lambda}} \quad (2.43)$$

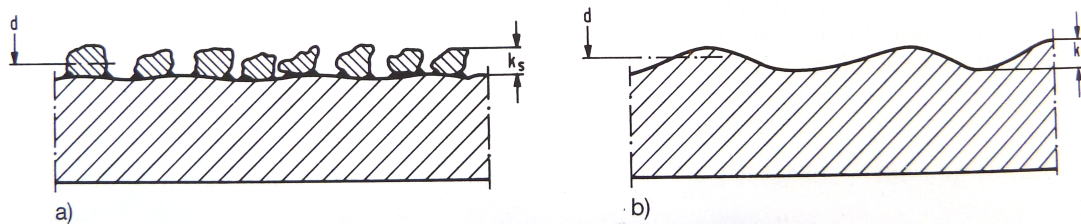


Abbildung 2.8.: Künstliche Sandrauigkeit k_s und natürliche Rauigkeit k [28, S. 78]

MILLER [22, S. 160] schlägt die Rauigkeitswerte der Abbildung 2.9 vor. Wenn die Rohrleitungen regelmäßig gereinigt werden, können die Rauigkeitswerte neuer Rohrleitungen nahezu erhalten werden.

Von anderen Autoren werden jedoch auch andere Werte empfohlen. In [3] wird beispielsweise festgestellt, dass in den untersuchten Wärmenetzen die ermittelten Rohrrauigkeiten signifikant unter den Literaturwerten lagen. Für die Druckverlustberechnung in geraden Stahlrohrleitungen wird als Ergebnis dieser Untersuchung ein Wert von 0,01 mm angegeben.

Die richtige Ermittlung der scheinbaren k -Werte in einem Rohrnetz, die einen wesentlichen Einfluss auf die Druckverlustberechnung haben, ist eine schwierige Aufgabe. Bei gebrauchten Leitungen in großen Ortsnetzen kann der k -Wert sehr unterschiedlich und zum Teil auch sehr hoch (1 mm und größer) sein. Im DVGW-Arbeitsblatt GW 303 wird die Durchführung von Druckmessungen beschrieben, mit denen das Netzmodell geeicht werden kann [23].

1. Smooth*	mm
Drawn metal, glass, plastic, fibre glass	0.0025
2. Steel	
New smooth pipes	0.025
Centrifugal applied enamels	0.025
Mortar lined good finish	0.05
Mortar lined average finish	0.1
Light rust	0.25
Heavy brush ashphalts, enamels and tars	0.5
Heavy rust	1.0
General tuberculations	1.2
3. Concrete	
New, unusually smooth concrete with smooth joints	0.025
Steel forms, first class workmanship with smooth joints	0.025
New, or fairly new, smooth concrete and joints	0.12
Steel forms, average workmanship, smooth joints	0.1
Wood floated or brushed surface in good conditions with good joints	0.25
Eroded by sharp materials in transit, marks visible from wooden forms	0.5
Pre-cast pipes, good surface finish, average joints	0.25
Segmentally lined conduits in ground conditions permitting the use of expanded wedge block linings	1.0
Segmentally lined conduits in other conditions	2.0

*Extruded, cast and pipes formed on mandrels can have imperfections that increase roughness values by a factor of 10.

Abbildung 2.9.: Rauigkeitswerte k (aus [22, S. 160])

2.3.1. Druckverlust in geraden Rohrleitungen

Der Druckverlust in geraden Rohrleitungsabschnitten berechnet sich nach

$$\Delta p_v = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho \bar{w}^2}{2} \quad (2.44)$$

Als Widerstandsbeiwert für gerade Rohrleitungen bezeichnet man ζ_λ [28]:

$$\zeta_\lambda = \lambda \frac{l}{d} \quad (2.45)$$

Rohrreibungsbeiwert λ

Der Rohrreibungsbeiwert ist abhängig von der Strömung (s. Abbildung 2.10) und wird für die unterschiedlichen Bereiche wie folgt berechnet.

laminare Strömung ($Re < Re_c$)

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (2.46)$$

turbulente Strömung ($Re \geq Re_c$) Bei turbulenten Strömungen werden der hydraulisch glatte Bereich, der Übergangsbereich und der raue Bereich unterschieden. Die Rohrreibungszahl λ kann über alle Bereiche nach *Nikuradse*, *Prandtl*, *v.Kármán*, *Moody*, *Colebrook* u.a. folgendermaßen berechnet werden [26, Abschnitt L1.2]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k/d}{3,71} \right] \quad (2.47)$$

Darin ist k die technische Rauigkeit.

Innerhalb eines kritischen Gebiets beginnt der Übergang von der laminaren zur turbulenten Strömung, in dem sich der Rohrreibungsbeiwert quantitativ verändert. Als kritische Reynolds-Zahl wird in dieser Arbeit $Re_c = 2320$ verwendet.

Der Einfluss der Reynolds-Zahl und der relativen Rauigkeit auf den Rohrreibungsbeiwert ist in Abbildung 2.10 grafisch dargestellt. Während im hydraulisch glatten Bereich der Einfluss der Rauigkeit vernachlässigbar aber die REYNOLDS-Zahl maßgeblich ist, ist im hydraulisch rauen Bereich der Einfluss der REYNOLDS-Zahl vernachlässigbar aber die Rauigkeit maßgeblich. Sowohl im laminaren als auch im turbulenten Strömungsbereich ist das Minimum des Rohrreibungsbeiwerts bei größeren REYNOLDS-Zahlen zu finden.

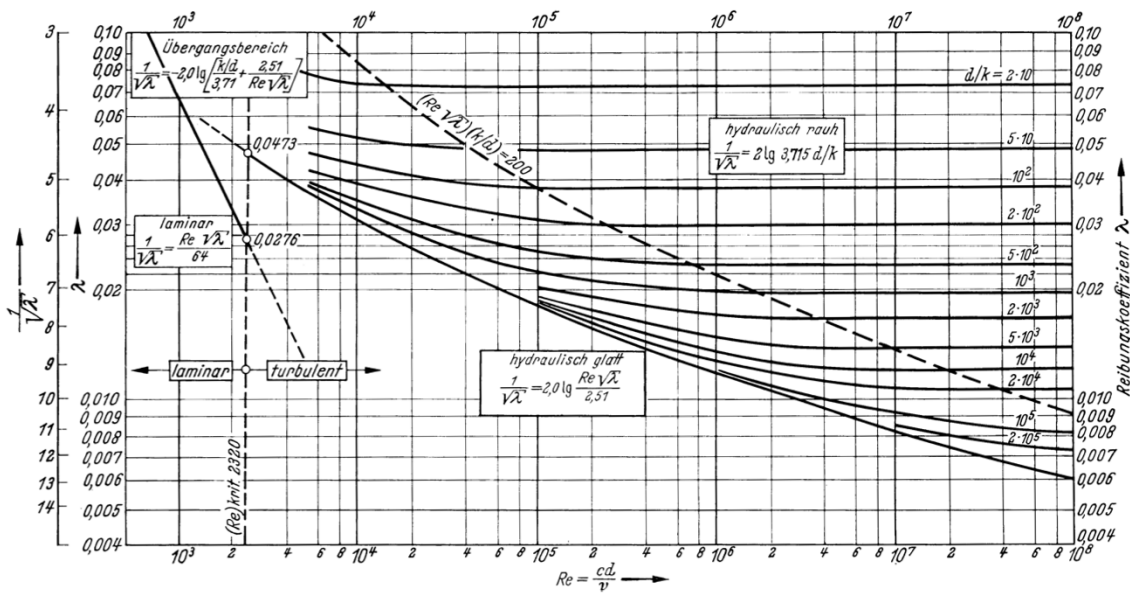


Abbildung 2.10.: Rohrreibungsbeiwert λ rauer Rohre in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl Re bei variierenden Rauigkeitsmaßen $\epsilon = 1/(d/k)$ (aus [11])

2.3.2. Widerstandsbeiwerte ζ ausgewählter Komponenten

Bei anderen als geraden Rohrsegmenten ist es üblich anstatt mit dem Rohrreibungsbeiwert mit dem Widerstandsbeiwert ζ (auch als Einzelwiderstandsbeiwert bezeichnet) zu rechnen. In diesen Rohrleitungskomponenten treten z.T. erhebliche zusätzliche Reibungs-, Umlenk- und Ablöseverluste auf. Diese Druckverluste werden meistens mit experimentell gewonnenen Beiwerten abgeschätzt [24].

Der Druckabfall zwischen Ein- und Austritt der Rohrleitungskomponente berechnet sich aus dem der Bauteillänge proportionalen Rohrreibungsanteil ζ_λ und der Summe der zusätzlichen Druckverluste ζ

$$\Delta p_v = (\zeta_\lambda + \zeta) \frac{\rho}{2} \bar{w}^2 \tag{2.48}$$

$$\Delta p_v = \zeta_{ges} \frac{\rho}{2} \bar{w}^2 \tag{2.49}$$

Für ζ_{ges} ergibt sich also

$$\zeta_{ges} = \frac{2\Delta p_v}{\rho \bar{w}^2} \tag{2.50}$$

Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit \bar{w} ist entweder auf den Eintritt oder den Austritt, in speziellen Fällen auch auf andere Stellen, bezogen. Deshalb muss bei Angabe des Wi-

derstandsbeiwertes ζ auch immer die zugehörige Bezugsgeschwindigkeit mit angegeben werden [4], ansonsten sind erhebliche Berechnungsfehler nicht auszuschließen [12].

Einen sehr ausführlichen Überblick über Widerstandsbeiwerte für Rohrleitungskomponenten vielfältiger Art gibt das Standardwerk von IDELCIK [19]. Weitere Berechnungsgleichungen mit Gültigkeitsbereichen sind u.a. auch in [4], [28] und [6] enthalten.

Bei der Auswahl der Berechnungsgleichungen hat der Autor Wert darauf gelegt, dass der Gültigkeitsbereich der Gleichungen möglichst groß ist.

Es sei darauf hingewiesen, dass in einigen Publikationen in Zusammenhang mit dem Widerstandsbeiwert statt des griechischen Buchstaben Zeta ζ auch der optisch ähnliche Buchstabe Xi ξ verwendet wird.

Aus der Vielzahl der unterschiedlichen Rohrleitungskomponenten sind hier nur die aufgeführt, die für das Rohrnetz 'Energieverbund' überwiegend von Interesse sind.

T-Stück

Die Näherungsfunktionen für die Widerstandsbeiwerte $\zeta_V = f(x, a, \alpha, y)$ werden aus dem Impulserhaltungssatz und geometrischen Überlegungen abgeleitet, wobei α der Winkel des Abzweigs und y das Verhältnis der Kantenrundung zum Durchmesser des Abzweigs r/D_a ist (vgl. Abbildung 2.11 und Abbildung 2.12).

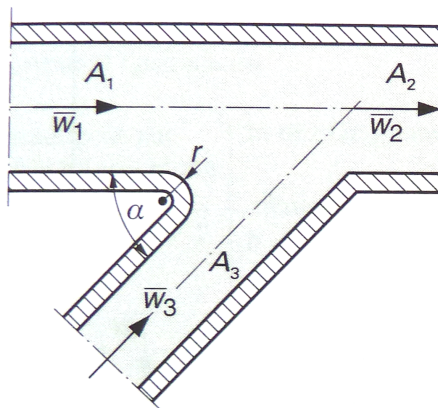


Abbildung 2.11.: T-Stück bei Vereinigung der Massenströme (aus [28])

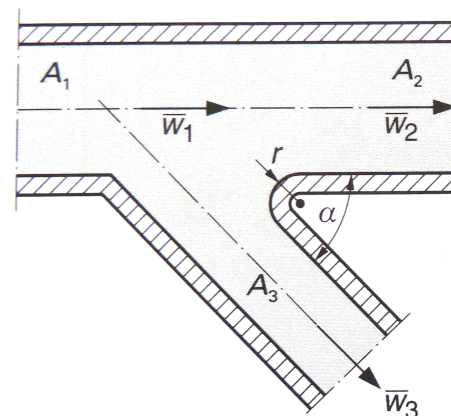


Abbildung 2.12.: T-Stück bei Trennung der Massenströme (aus [28])

Zur Bestimmung der freien Konstanten werden die von VOGEL, PETERMANN und KINNE Ende der 1920er und Anfang der 1930er Jahre experimentell bestimmten Daten ausgewertet. Diese experimentellen Daten beziehen sich ausschließlich auf T-Stücke mit Rohrdurchmesser $D_1 = D_2$!

Die Näherungsfunktionen⁵ lauten gemäß [6, S. 203-208]

$$\text{für: } x = \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_2} \quad a = \frac{A_2}{A_3} \quad y = \frac{r}{d_3}$$

im Durchgang

$$\zeta_{VdV} = 2[1 - 0,98(1-x)^2 - ax(x(C \cos \alpha - 0,11) + E)] - (1 - (1-x)^2) \quad (2.51)$$

$$\text{mit: } C = 1,05 - 0,475 \exp(-2,26(a-1)) \\ E = 0,468a^{-2,17}$$

und im Abzweig

$$\zeta_{VaV} = 2[1 - 0,97(1-x)^2 - ax(x(C - 0,1 \exp(-40y) + 0,4 \cos \alpha) + E)] - (1 - (ax)^2) \quad (2.52)$$

$$\text{mit: } C = 0,25(a - 0,04)^{0,26} \\ E = 1,29a^{-0,17} - 0,94$$

sowie bei der Trennung⁶ der Massenströme

$$\text{für: } x = \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} \quad a = \frac{A_2}{A_3} \quad y = \frac{r}{d_3}$$

im Durchgang

$$\zeta_{VdT} = 2[1,02(1-x)^2 - 1 + 0,8x(1 - 0,0139x + C \cos \alpha)] - ((1-x)^2 - 1) \quad (2.53)$$

$$\text{mit: } C = 0,04(1 - 1,25 \exp(-0,68a))$$

und im Abzweig

$$\zeta_{VaT} = 2[0,98(1-x)^2 - 1 + ax(x(C + D \exp(-40y)) + E - 0,6 \cos \alpha)] - ((ax)^2 - 1) \quad (2.54)$$

⁵Bei den Gleichungen für die Vereinigung hat sich in [28, S. 185] ein kleiner Fehler (**1-2,26**) eingeschlichen. Richtig muss es heißen $C = 1,05 - 0,475 \exp(-\mathbf{2,26}(a-1))$

⁶Auch hier hat sich in [28, S. 185] ein kleiner Fehler ($y = r/A_3$) eingeschlichen. Richtig muss es heißen $y = r/d_3$

$$\text{mit: } C = 0,87(a - 0,82)$$

$$D = 0,0685(1,36 + a)$$

$$E = 0,1 + 1,32 \exp(-0,4(a - 1))$$

VOGEL stellte bereits fest, dass der Widerstandsbeiwert nicht vom Massenstrom, sondern vom Verhältnis der Massenströme abhängig ist und deshalb auch unabhängig von der Reynoldszahl ist.

Für ein T-Stück, das die drei Teilstrecken A, B und C verbindet, gibt es unter Berücksichtigung von Strömungsgeschwindigkeiten größer, kleiner und gleich Null theoretisch $3^3 = 27$ unterschiedliche Strömungsvarianten. Daher ist für jedes T-Stück anhand der Systemskizze zu bestimmen, in welcher der folgenden vier Strömungsvarianten (s. Abbildungen 2.13 bis 2.16) es sich beim Simulationsstart befindet. Die Widerstandsbeiwerte ζ stehen neben den Teilstrecken in denen die entsprechenden Druckverluste zu berücksichtigen sind.

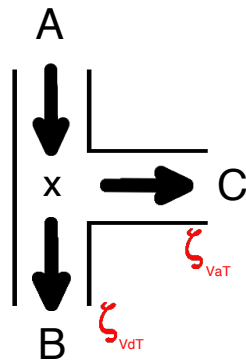


Abbildung 2.13.: Widerstandsbeiwerte für ein T-Stück bei Stromtrennung

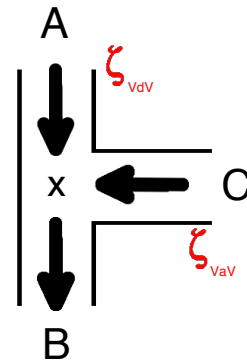


Abbildung 2.14.: Widerstandsbeiwerte für ein T-Stück bei Stromvereinigung

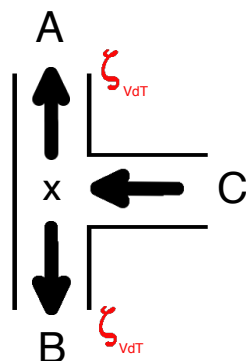


Abbildung 2.15.: Widerstandsbeiwerte für ein Hosensstück (180°) bei Stromtrennung

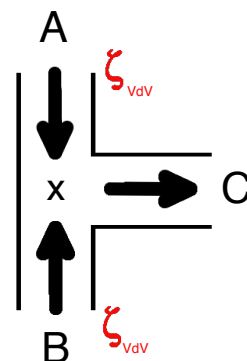


Abbildung 2.16.: Widerstandsbeiwerte für ein Hosensstück (180°) bei Stromvereinigung

Verändern sich bei einem T-Stück die Strömungsrichtungen in den Teilstrecken A, B und C

gegenüber dessen ursprünglicher Startvariante nicht, so soll das Ergebnis der Vorzeichenüberprüfung für die Massenströme per Definition $\text{sign}(\dot{m}_A, \dot{m}_B, \dot{m}_C) = (1, 1, 1)$ sein.

In Abbildung 2.17 sind ausgehend von einem T-Stück mit Strömungstrennung den 27 möglichen Tupelkombinationen die korrespondierenden Strömungsvarianten zugeordnet. Diese Zuordnung lässt sich unter Ausnutzung von Symmetrieeigenschaften auch für die anderen Startvarianten verwenden, wenn die Vorzeichen in der in Abbildung 2.17 angegebenen Weise berechnet werden.

$$\left. \begin{array}{l} \text{sign}_{T,\text{Trenn}}(\dot{m}_A, \dot{m}_B, \dot{m}_C) \\ \text{sign}_{T,\text{Ver}}(\dot{m}_A, \dot{m}_B, -\dot{m}_C) \\ \text{sign}_{H,\text{Ver}}(\dot{m}_A, -\dot{m}_B, \dot{m}_C) \\ \text{sign}_{H,\text{Trenn}}(-\dot{m}_A, \dot{m}_B, -\dot{m}_C) \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} 1 : \mathbf{T, Stromtrennung} \\ -1 : \mathbf{T, Stromvereinigung} \\ 0 : \mathbf{T, nur Durchgang} \\ 1 : \mathbf{H, Stromvereinigung} \\ -1 : \mathbf{n.d., kein Ablauf!} \\ 0 : \mathbf{n.d., kein Ablauf!} \\ 1 : \mathbf{T, Stromtrennung, nur Abzweig} \\ -1 : \mathbf{n.d., kein Ablauf!} \\ 0 : \mathbf{n.d., kein Ablauf!} \\ 1 : \mathbf{n.d., kein Zulauf!} \\ -1 : \mathbf{H, Stromtrennung} \\ 0 : \mathbf{n.d., kein Zulauf!} \\ 1 : \mathbf{T, umgek. Stromtrennung} \\ -1 : \mathbf{T, umgek. Stromvereinigung} \\ 0 : \mathbf{T, umgek. nur Durchgang} \\ 1 : \mathbf{n.d., kein Zulauf!} \\ -1 : \mathbf{T, umgek. Stromver., nur Abzweig} \\ 0 : \mathbf{n.d., kein Zulauf!} \\ 1 : \mathbf{n.d., kein Ablauf!} \\ -1 : \mathbf{T, Stromvereinigung, nur Abzweig} \\ 0 : \mathbf{n.d. kein Zulauf!} \\ 1 : \mathbf{T, umgek. Stromtr., nur Abzweig} \\ -1 : \mathbf{n.d., kein Ablauf!} \\ 0 : \mathbf{n.d., kein Ablauf!} \\ 1 : \mathbf{n.d., kein Zulauf!} \\ -1 : \mathbf{n.d., kein Ablauf!} \\ 0 : \mathbf{T/H-Stück nicht durchströmt!} \end{array} \right.$$

Abbildung 2.17.: Die 27 Strömungsvarianten bei T-Stücken (sign: Vorzeichenfunktion; T: T-Stück; H: Hosensstück; n.d.: nicht definiert; Trenn: Stromtrennung; Ver: Stromvereinigung; 1: Strömung in Pfeilrichtung; -1: Strömung gegen Pfeilrichtung; 0: keine Strömung).

Abhängig vom Ergebnis der Vorzeichenüberprüfung ist die der jeweiligen Strömungsvariante entsprechende Gleichung zu verwenden. Insgesamt gibt es entsprechend Abbildung 2.17 zwölf physikalisch sinnvolle Strömungsvarianten (davon vier Startvarianten in **fetter Schrift**), die im Simulationsmodell berechnet werden sollen. Auf ein Auftreten der übrigen 15 Varianten (in *kursiver Schrift*) soll durch entsprechende Meldungen aufmerksam gemacht werden.

Hosenstück

AIGNER beschreibt in [1] einen allgemeinen Berechnungsansatz für die Stromvereinigung gemäß Abbildung 2.18.

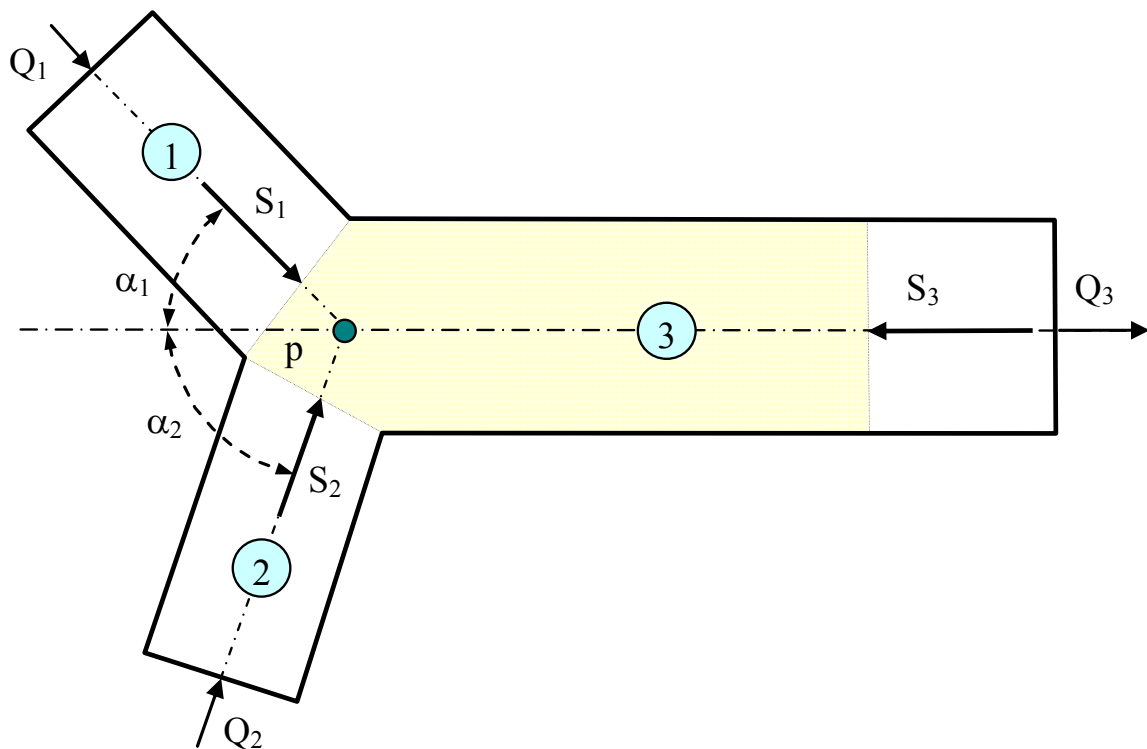


Abbildung 2.18.: Berechnungsansatz von AIGNER für die Stromvereinigung (aus [1])

Mit Q werden die Volumenströme, mit S die Impulskräfte, mit α die Winkel und mit p der mittlere Druck am Vereinigungspunkt bezeichnet. Die unter Berücksichtigung von [22] abgeleitete allgemeine Berechnungsgleichung für die Stromvereinigung, die sowohl für T-Stücke

als auch für Hosenstücke verwendbar ist, lautet:

$$\zeta_{i3} = 0,71 - \left(1,7 \cos(\alpha_i - \alpha_0) - \frac{e_i}{a_i}\right) \frac{q_i^2}{a_i} - \left(1,7 \cos(\alpha_j - \alpha_0) - \frac{k_j}{a_j}\right) \frac{q_j^2}{a_j} \quad (2.55)$$

mit $i = \{1; 2\}$ und $j = \{1; 2\}$. Für Hosenrohre werden die Parameter $\alpha_0 = 0$, $e_1 = e_2 = 0,95$ und $k_1 = k_2 = 0,05$ angegeben.

Werden in dieser Gleichung die relativen Durchflüsse und die relativen Querschnittsflächen ersetzt ergibt sich für Hosenstücke:

$$\zeta_{i3} = 0,71 - \left(1,7 \cos(\alpha_i) - \frac{0,95}{(d_1/d_3)^2}\right) \frac{\dot{m}_1^2}{\rho_1^2 (d_1/d_3)^2} - \left(1,7 \cos(\alpha_j) - \frac{0,05}{(d_2/d_3)^2}\right) \frac{\dot{m}_2^2}{\rho_2^2 (d_2/d_3)^2} \quad (2.56)$$

Die damit berechneten Verlustbeiwerte sind in Abbildung 2.19 dargestellt.

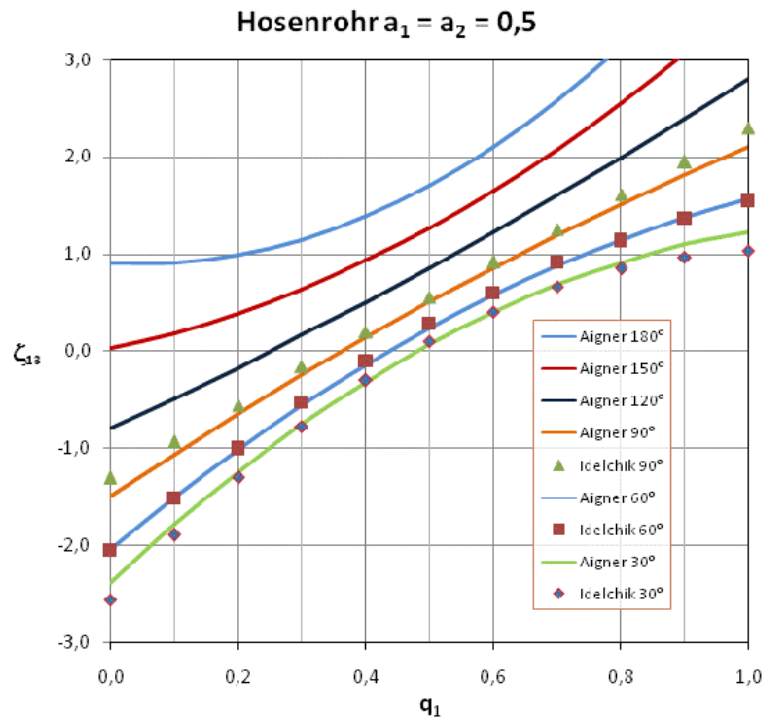


Abbildung 2.19.: Verlustbeiwerte bei der Stromvereinigung in Hosenstücken (aus [1])

Der Widerstandsbeiwert für die Stromtrennung in einem symmetrischen Hosenstück mit 90°-Abzweig entsprechend Abbildung 2.20

kann gemäß [19] entsprechend folgender Gleichung berechnet werden (Indizierung wie in

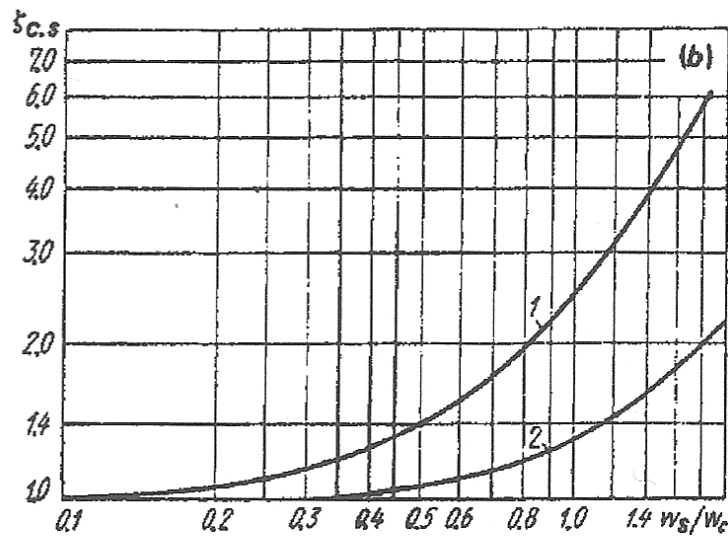


Abbildung 2.20.: Widerstandsbeiwert $\zeta_{c,s}$ eines symmetrischen Hosenstücks mit 90° -Abzweig bei Stromtrennung (aus [19])

Abbildung 2.15):

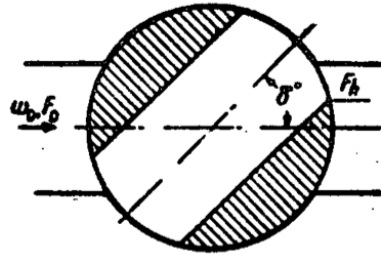
$$\zeta_{C,B} = \zeta_{C,A} = 1 + k \left(\frac{w_B}{w_C} \right)^2 \quad (2.57)$$

Für geschweißte Hosenstücke entsprechend Kurve 2 in Abbildung 2.20 ist dabei $k = 0,3$ zu verwenden. Werden in diese Gleichung die Massenströme und die Rohrdurchmesser der Teilstrecken eingeführt, so erhält man:

$$\zeta_{C,B} = 1 + 0,3 \left(\frac{\rho_C d_C^2 \dot{m}_B}{\rho_B d_B^2 \dot{m}_C} \right)^2 \quad (2.58)$$

Kugelhahn

In [19] werden für verschiedene Öffnungswinkel δ die in Abbildung 2.21 aufgeführten ζ -Werte für Kugelhähne angegeben.



1. Cylindrical pipe

α°	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	67
$\frac{F_h}{F_0}$	0.93	0.85	0.77	0.69	0.60	0.52	0.44	0.35	0.27	0.19	0.11	0
ζ	0.05	0.31	0.88	1.84	3.45	6.15	11.2	20.7	41.0	95.3	275	∞

Abbildung 2.21.: Widerstandsbeiwerte eines Kugelhahns (aus [19])

Sei x das Verhältnis zwischen dem freien Strömungsquerschnitt des Kugelhahns und der Querschnittsfläche der Rohrleitung, das aus geometrischen Überlegungen abgeleitet werden kann. Dann sollen sich nach [6] die in [19] angegebenen Zahlenwerte mit der folgenden Gleichung berechnen lassen:

$$\zeta = 0,022 + 3,77\left(\frac{1}{x} - 1\right)^2 \quad (2.59)$$

mit: (2.60)

$$x = \frac{1}{\pi} \left(\alpha - \sqrt{2\frac{b}{r} - \left(\frac{b}{r}\right)^2} \left(1 - \frac{b}{r}\right) \right) (1 + \cos \varphi) \quad (2.61)$$

$$\frac{b}{r} = 1 - \tan\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sqrt{\left(\frac{R}{r}\right)^2 - 1} \quad (2.62)$$

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{b}{r}\right) \quad (2.63)$$

Der Winkel φ_{grenz} , ab dem der Kugelhahn geschlossen ist, lässt sich recht anschaulich in Abbildung 2.22 erkennen. Damit der Kugelhahn geschlossen ist, muss er mindestens um den Winkel $\varphi_{\text{grenz}} = \alpha$ gedreht werden. Wegen $\sin(\alpha/2) = GK/H = r/R$ ist

$$\varphi_{\text{grenz}} = 2 \arcsin \frac{r}{R} \quad (2.64)$$

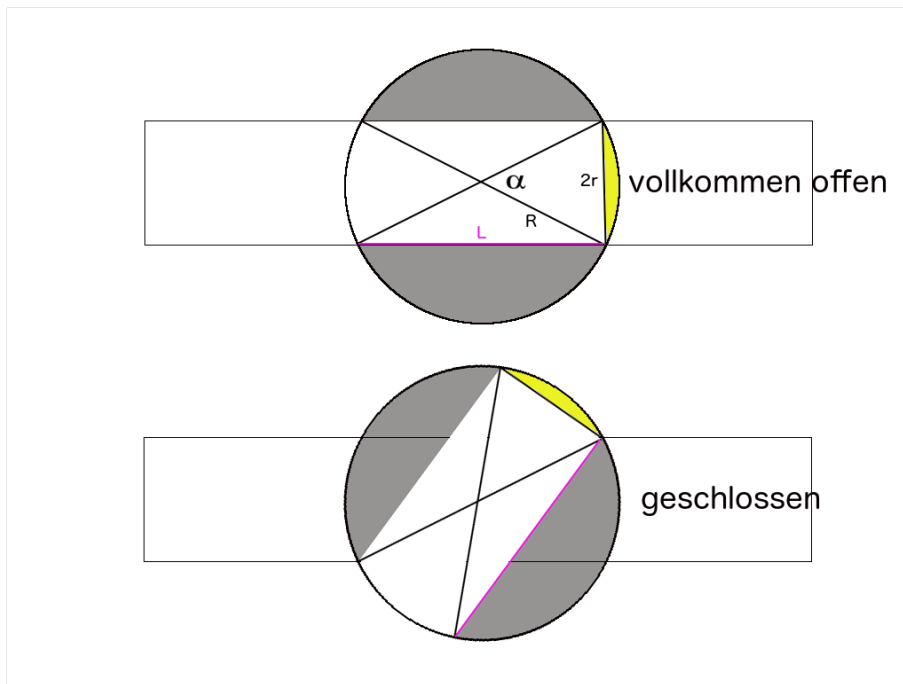


Abbildung 2.22.: Kugelhahn in geöffneter und geschlossener Stellung

Damit der Kugelhahn die Leitung überhaupt verschließen kann muss in Abbildung 2.22 die Strecke L mindestens $L = 2r$ sein. Mit Phytagoras $(2R)^2 = (2r)^2 + (2r)^2$ beträgt der Kugeldurchmesser eines Kugelhahns somit mindestens:

$$R_{min} = \sqrt{2}r \quad (2.65)$$

Bögen (Krümmer)

Die Strömung in Bögen ist in Abbildung 2.23 dargestellt.

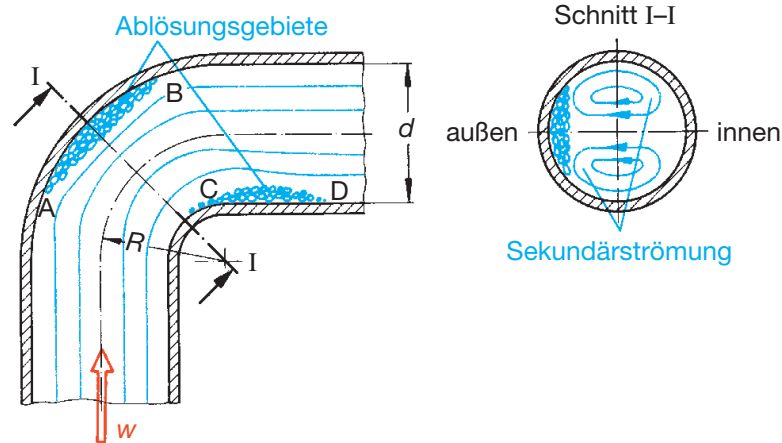


Abbildung 2.23.: Strömung durch einen Krümmer (aus [4])

Durch die Richtungsänderung der Strömung kommt es in den Ablösegebieten zu Verwirbelungsverlusten und infolge der Fliehkräfte zu einer Sekundärströmung, die sich mit der Längsströmung zu einer schraubenförmig verlaufenden Strömung zusammensetzt.

Da die Strömungsverhältnisse im Austrittsquerschnitt aus dem Bogen auch die nachfolgende Auslaufstrecke l_a beeinflussen (s. Abbildung 2.24), entsteht in der Auslaufstrecke ein zusätzlicher Druckverlust, der zum Verlust des Bogens zu addieren ist. Die Auslauflänge l_a kann dabei Werte von $l_a \approx (50 \dots 70)d$ erreichen.

Der Widerstandsbeiwert

$$\zeta_{\text{Bogen}} = \zeta_R + \zeta_U = \zeta_R + \zeta_{\text{Abl}} + \zeta_{\text{Qu}}$$

setzt sich zusammen aus einem Anteil aufgrund der Reibung $\zeta_R = \lambda \frac{l}{d}$ und einem Anteil für die Umlenkung ζ_U . Der Umlenkwiderstand ist seinerseits zusammengesetzt aus dem Ablösungswiderstand ζ_{Abl} und dem Querströmungswiderstand ζ_{Qu} aufgrund der Sekundärströmung. Der Reibungsanteil wird mit zunehmenden Krümmungsverhältnissen R/d aufgrund der steigenden Bogenlänge gegenüber dem Umlenkwiderstand immer dominierender (s. Abbildung 2.25).

Beispielhaft ist in Abbildung 2.26 der Widerstandsbeiwert von 90° -Bögen mit $R/d = 4$ in Abhängigkeit von der REYNOLDS-Zahl und der relativen Rauigkeit dargestellt. In [26], [28] und [4] wird darauf hingewiesen, dass aufgrund der Druckverluste in der Nachlaufstrecke

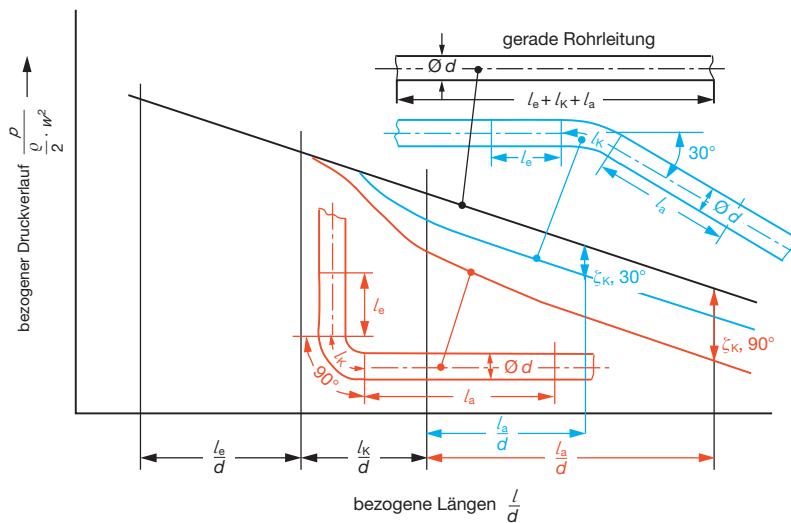


Abbildung 2.24.: Druckverlust in Krümmern (aus [4])

sich die Einzelwiderstände der Rohrbögen in voller Höhe nur bei ausreichendem Abstand addieren. Ist der Abstand $l_a \approx (50 \dots 70)d$ kann dieser Einfluß mittels Formstückfaktoren berücksichtigt werden. Diese Faktoren sind entsprechend Abbildung 2.27 einerseits abhängig von der spezifischen Form der Rohrbogenkombination und andererseits vom Verhältnis L/d des Abstandes L zum Innenrohrdurchmesser d .

Für die Widerstandsbeiwerte von Bögen werden in der Literatur unterschiedliche Näherungsgleichungen mit jeweils spezifischen Definitionsbereichen angegeben. Auf die vom Autor betrachteten Gleichungen wird im folgenden näher eingegangen.

In [19] werden für Bögen Berechnungsgleichungen der Form

$$\zeta_u = K_1 K_2 K_3 \quad (2.66)$$

angegeben, deren Beiwerte vom Krümmungsverhältnis R/D , vom Winkel α und von der Reynolds-Zahl abhängen. Die dort angegebenen Zusammenhänge weisen jedoch einige Lücken des Definitionsbereichs auf. So ist beispielsweise für Winkel $70^\circ < \alpha < 90^\circ$ und $90^\circ < \alpha < 100^\circ$ der entsprechende Faktor C_1 nicht eindeutig definiert. Für Bögen mit $R/D > 1,5$ wird der Definitionsbereich zudem durch das Verhältnis $50 < \text{Re} \sqrt{D/(2R)} < 5000$ eingeschränkt. Für Krümmungsverhältnisse $\frac{R}{D} \approx 2 \dots 3$ liegt der Definitionsbereich deshalb nur im Bereich von $\text{Re} \approx 1e2 \dots 1,2e4$.

In [28, S. 175ff.] sind die wichtigsten Gleichungen zur Berechnung des Druckverlustes zusammengestellt. Unter anderem wird für Rohrbögen eine Näherungsgleichung aus [6] zitiert.

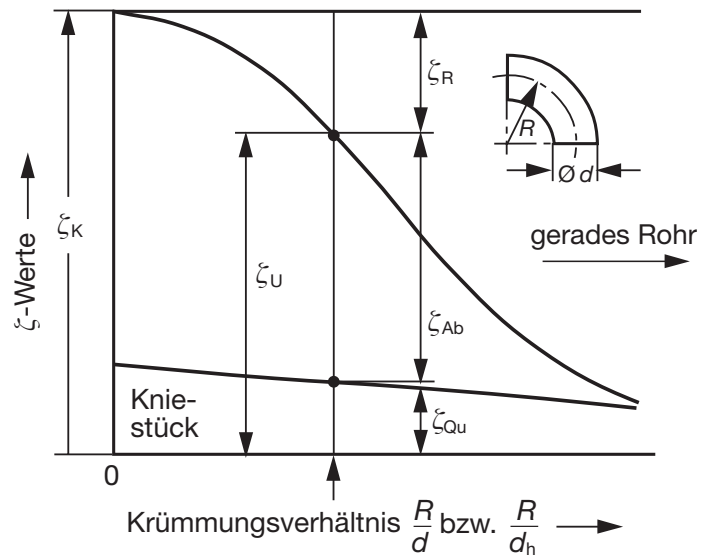


Abbildung 2.25.: Zusammensetzung des ζ -Wertes von Krümmern (aus [4])

Diese wird folgendermaßen angegeben⁷:

$$\zeta_{Bogen} = \lambda_D \left(f_{krü} + \frac{l}{d} \right) \quad (2.67)$$

gültig für:

$$1 \leq \frac{R}{D} \leq \infty$$

$$15^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$$

$$Re \geq 10^4$$

⁷Es scheinen sich leider Schreibfehler in diese Gleichung eingeschlichen zu haben. Insbesondere der Faktor 1780 in Konstante C erscheint fragwürdig.

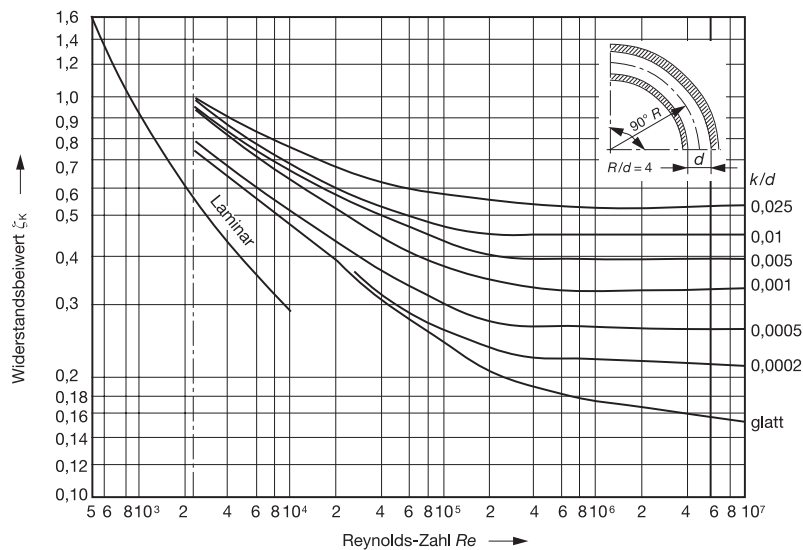


Abbildung 2.26.: Widerstandsbeiwert ζ_k von 90° -Krümmern mit $R/d = 4$ (aus [4])

mit :

$$l = \pi R \left(\frac{\alpha}{180^\circ} \right)$$

$$f_{krü} = A \tanh \left(\frac{S}{A} (\alpha + B) \right) + C \left(\frac{\alpha}{100} \right)^4 \exp \left(-E \left(\frac{\alpha}{100} \right) \right)$$

$$A = 9,3 \exp(-0,06x)$$

$$B = 10,5$$

$$S = 0,0788 \tanh(0,8x) + 0,00124x$$

$$C = 15000 \exp(-2,7x) + 1780 \exp(-0,0234(x - 8)^2)$$

$$E = 4,95 + 4,042 \exp(-0,01(\alpha - 7,5)^3)$$

$$x = \frac{R}{D}$$

λ_D = Rohrreibungszahl des geraden Rohres

Die den Bogen charakterisierenden Größen sind in Abbildung 2.28 eingezeichnet. Die Gleichung gilt für REYNOLDS-Zahlen größer/gleich 10^4 .

Bild 94 Formstückfaktor f_F für den Widerstandsbeiwert von mit Zwischenrohr verbundenen Rohrbögen $\zeta_{u,F} = 2 \cdot f_F \cdot \zeta_{u,90^\circ}$

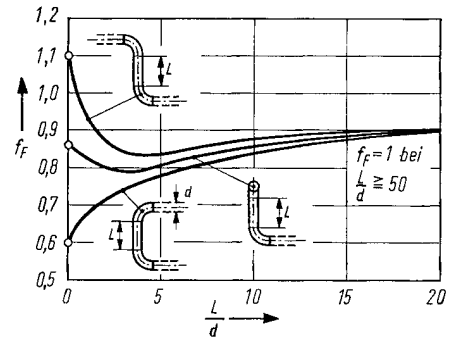


Bild 95 Widerstandsbeiwert $\zeta_{u,F}$ von unmittelbar zusammengesetzten Rohrbögen (Grenzwerte aus Bild 94 mit $L/d = 0$)

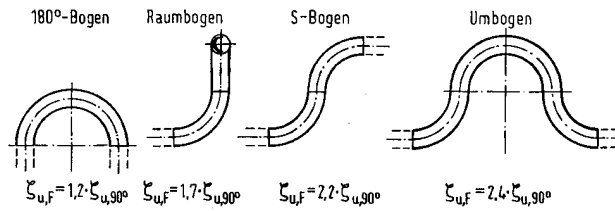


Abbildung 2.27.: Formstückfaktoren (aus [28])

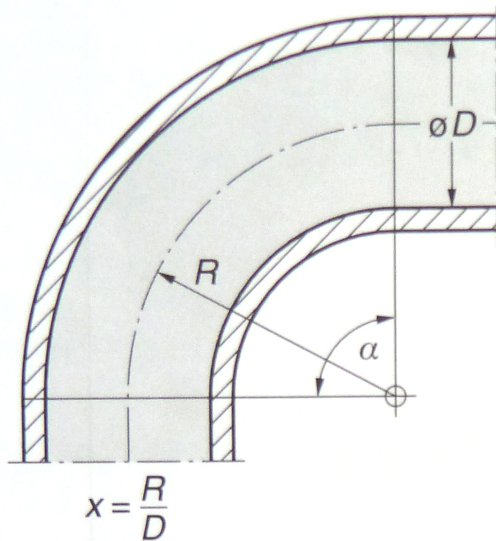


Abbildung 2.28.: Einflussgrößen für die Berechnung des Widerstandsbeiwertes von Bögen (aus [28])

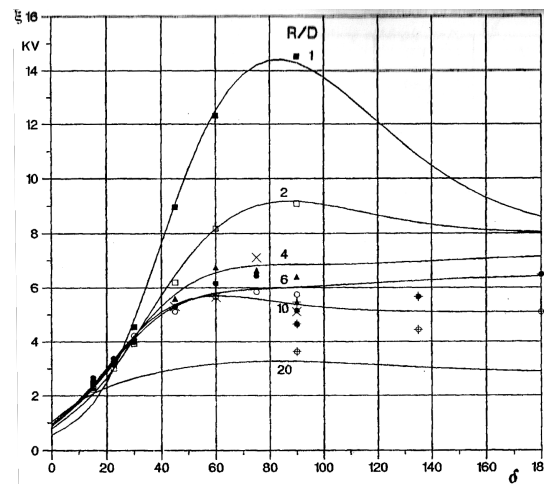


Abbildung 2.29.: Faktor $f_{krü} = \xi_{KV}$ von Rohrbögen in Abhängigkeit vom Umlenkwinkel und dem Krümmungsradius gemäß Gleichung 2.67(aus [6])

Der Verlauf des Faktors $f_{krü}$ in Abhängigkeit vom Umlenkwinkel und dem Krümmungsradius ist in Abbildung 2.29 dargestellt (bezeichnet als ξ_{KV}).

Ebenfalls werden in [28, S. 98ff.] Näherungsgleichungen von HERNING [16] erwähnt. Danach

berechnet sich der Umlenkverlust von 90° -Bögen in Rohrleitungen folgendermaßen:

$$\zeta_{u,90^\circ} = \begin{cases} \lambda \frac{12,8}{\sqrt{R/d}} \sqrt[4]{\frac{2}{R/d}} & \text{für } 1 \leq \frac{R}{d} < 2 \\ \lambda \frac{12,8}{\sqrt{R/d}} & \text{für } 2 \leq \frac{R}{d} < 8 \\ 1,6\lambda \sqrt{\frac{R}{d}} & \text{für } \frac{R}{d} \geq 8 \end{cases} \quad (2.68)$$

$$\zeta_{u,\alpha} = \zeta_{u,90^\circ} \sqrt{\frac{\alpha}{90^\circ}} \quad (2.69)$$

Der Definitionsbereich wird dabei von der REYNOLDS-Zahl nicht eingeschränkt.

In grafischer Form werden in [26, S. 1233] die Widerstandsbeiwerte für 90° -Rohrbögen für verschiedene Krümmungsverhältnisse im Bereich $2e1 \leq Re \leq 2e5$ dargestellt (s. Abbildung 2.30). Daraus lassen sich auch für kleine REYNOLDS-Zahlen Berechnungsgleichungen $\zeta_u = f(Re)$ ableiten.

Da ζ_u der Umlenkungswiderstand ist, berechnet sich ζ_{Bogen} analog Gleichung 2.67 folgendermaßen

$$\zeta_{Bogen} = \lambda_D \frac{l}{d} + \zeta_u \quad (2.70)$$

gültig für:

$$\frac{R}{D} \in [2, 26; 3, 04; 6, 53; 11, 71]$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$20 < Re < 10^4$$

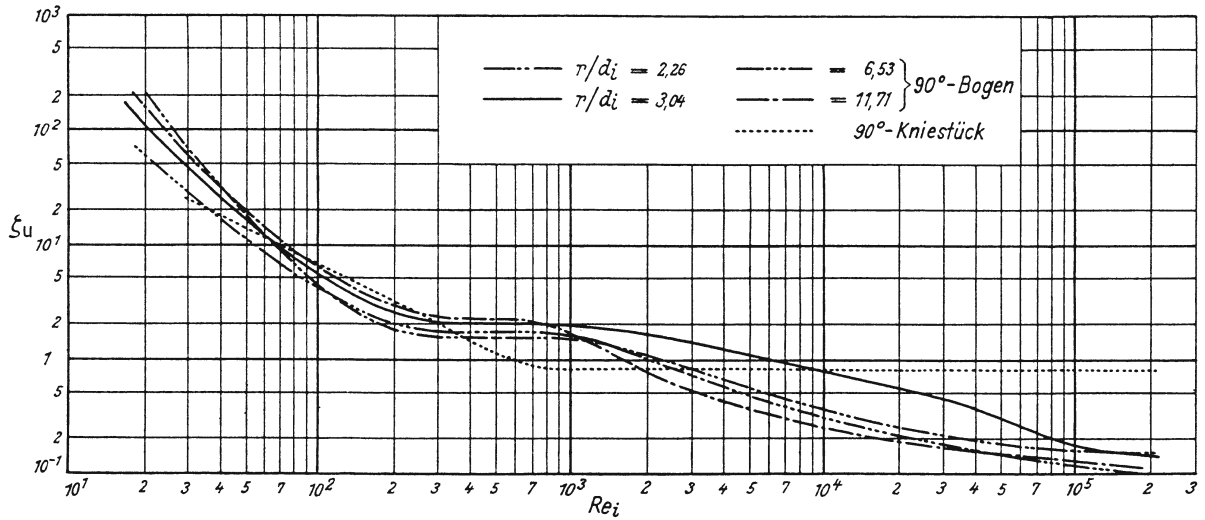


Abbildung 2.30.: Widerstandsbeiwerte ζ_u von glatten 90°-Rohrbögen in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl Re [26, S. 1233]

Konfusor / Diffusor

Bei plötzlicher Querschnittsverengung bzw. -erweiterung entsteht der Druckverlust durch die Strömungsablösung mit Verwirbelung. Die Wirbel sind nach einer Distanz von 8 bis 10 d_2 abgeklungen (s. Abb. 2.31 und 2.32).

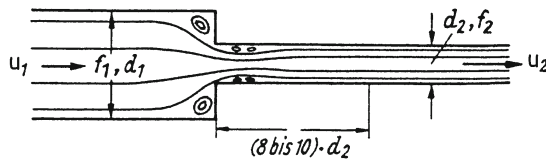


Abbildung 2.31.: Plötzlich verengte Rohrleitung (aus [26])

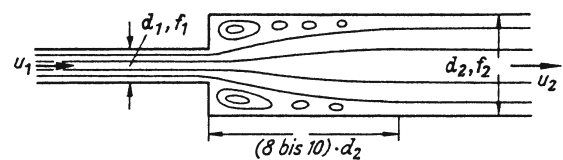


Abbildung 2.32.: Plötzlich erweiterte Rohrleitung (aus [26])

Bis sich nach Verengungen wieder das endgültige Strömungsprofil ausgebildet hat ist eine entsprechende Anlaufstrecke l_a nötig [26]. Diese ist bei laminarer Strömung

$$l_a \approx 0,13 Re_2 d_2 \tag{2.71}$$

und bei turbulenter Strömung

$$l_a \approx 0,0575 Re_2 d_2 \tag{2.72}$$

Bei stetiger Querschnittsverengung (s. Abbildung 2.33) treten bei Winkeln $\alpha < 40^\circ$ keine Strahlablösungen mehr auf und der Widerstandsbeiwert beträgt je nach Rauigkeit etwa 0,4.

Bei stetiger Querschnittserweiterung (s. Abbildung 2.34) ist der optimale Winkel α zur Reduzierung von Ablösungen und Verwirbelungen abhängig von der Reynolds-Zahl [26].

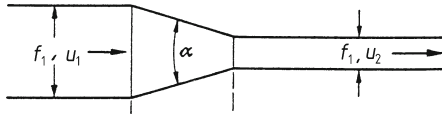


Abbildung 2.33.: Stetig verengte Rohrleitung (aus [26])

Re	0,5	1,0	1,5	2,0	10^5
α	10	8,4	7,6	7,1	Grad

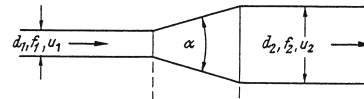


Abbildung 2.34.: Stetig erweiterte Rohrleitung (aus [26])

Die Gleichungen zur Berechnung der Widerstandsbeiwerte für Diffusoren und Konfusoren wurden [6] und [28] entnommen (vgl. Abb. 2.35, 2.36).

$$\text{Konfusor: } \zeta_d = \frac{\lambda L}{4d} \left(\frac{1 - m^2}{\frac{1}{\beta} - 1} \right) \quad (2.73)$$

$$\begin{aligned} \text{mit: } \beta &= \frac{d}{D} \\ m &= \beta^2 \\ L &= \frac{D - d}{2 \tan(\alpha)} \end{aligned}$$

$$\text{Diffusor: } \zeta_d = \zeta'(1 - m)^2 + \zeta_\lambda \quad (2.74)$$

gültig für: $Re_d > 4000$

$$\text{mit: } \zeta_\lambda = \frac{\lambda L}{4d} \left(\frac{1-m^2}{\frac{1}{\beta} - 1} \right)$$

$$\zeta_{Erw} = \frac{1}{4} \left(\frac{1-m^2}{\frac{1}{\beta} - 1} \right)$$

$$\zeta' = \tanh\left(\frac{1,41\alpha}{100}\right) + 522\left(\frac{\alpha}{100}\right)^{4,365} \exp\left(\frac{-8\alpha}{100}\right)$$

$$\beta = \frac{d}{D}$$

$$m = \beta^2$$

$$L = \frac{D-d}{2 \tan(\alpha)}$$

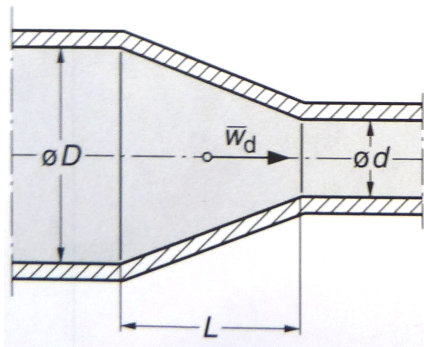


Abbildung 2.35.: Einflußgrößen für die Berechnung des Widerstandsbeiwertes für Konfusoren (Düsen) (aus [28])

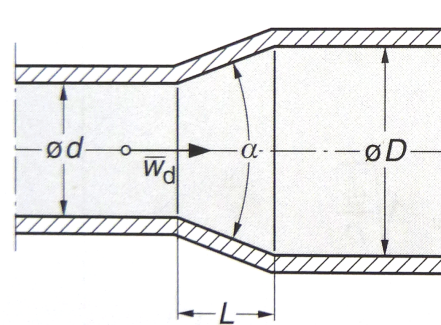


Abbildung 2.36.: Einflußgrößen für die Berechnung des Widerstandsbeiwertes für Diffusoren (aus [28])

Die Abhängigkeit von ζ' vom Öffnungswinkel ist in Abbildung 2.37 veranschaulicht.

Der Faktor ζ_{Erw} , der die Reibungsverluste aufgrund der Rohrerweiterung bezogen auf den Staudruck im kleineren Rohrdurchmesser darstellt, wird in Abbildung 2.38 (als ζ_{Erw1} bezeichnet) in Abhängigkeit vom Querschnittsverhältnis β^2 wiedergegeben.

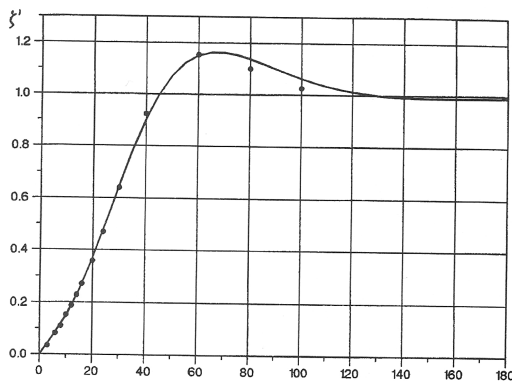


Abbildung 2.37.: ζ' einer konischen Erweiterung (Diffusor) in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel (aus [6])

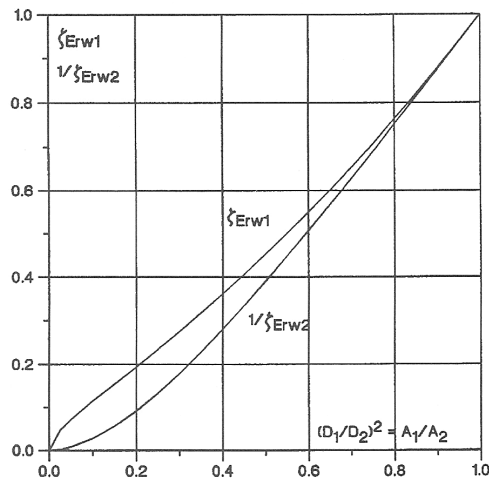


Abbildung 2.38.: Reibungsverlust ζ_{Erw} der Rohrerweiterung (Diffusor) in Abhängigkeit vom Querschnittsverhältnis (aus [6])

Wärmeübergabestationen

Die Modellierung der Wärmeübergabestationen sollte nicht Bestandteil der Zielsetzung dieser Arbeit sein. Dennoch hat sich im Laufe der Bearbeitung herausgestellt, dass ein Ansatz zur Berechnung des Druckverlustes über die Wärmeübergabestationen nicht nur im Rahmen dieser Arbeit, sondern auch für künftige Arbeiten zweckmäßig ist.

Einfach ausgedrückt setzt sich eine Wärmeübergabestation aus dem einem Wärmetauscher, einem Regelventil (RV) und einigen Metern Rohrleitung (RL) vor und nach dem Wärmetauscher (WT) zusammen. Entsprechend setzt sich der Druckverlust der Wärmeübergabestation aus diesen Komponenten zusammen

$$\Delta p_{WueSt} = \Delta p_{WT} + \Delta p_{RV} + \Delta p_{RL} \quad (2.75)$$

Dieser Ansatz erfordert auf der rechten Seite der Gleichung diverse Informationen über den Wärmetauscher, das Regelventil und auch den Aufbau der Rohrleitung.

Eine andere Möglichkeit den Druckverlust von Apparaten zu bestimmen, wenn man deren genauen inneren Aufbau nicht kennt, stellt die folgende empirische Gleichung dar [26]:

$$\Delta p_v = C \cdot \dot{m}^n = C_1 \cdot \dot{V}^n \quad (2.76)$$

Die unbekanntenen Konstanten C und n bzw. C_1 und n lassen sich berechnen, wenn für zwei unterschiedliche Massen- bzw. Volumenströme der Druckverlust Δp_v messtechnisch

bestimmt wurde. Dabei liegen die n -Werte bei turbulenten Strömungsverhältnissen erwartungsgemäß knapp unter 2. Zur Umrechnung der Konstanten C , C_1 und n von einem Fluid der Dichte ρ_a auf ein Fluid der Dichte ρ_b wird in [5] empfohlen:

$$C_b \approx C_a \frac{\rho_b}{\rho_a} \quad C_{1,b} \approx C_{1,a} \frac{\rho_b}{\rho_a} \quad n_b \approx n_a$$

Die Berechnung des Druckverlustes gemäß Gleichung 2.76 hat den Vorteil, dass relativ schnell eine mathematische Beziehung für die jeweilige Wärmeübergabestation ermittelt werden kann, ohne den Aufbau der einzelnen Komponenten im Detail zu kennen.

Wird Gleichung 2.76 mit Gleichung 2.3 kombiniert und durch \dot{m}^2 dividiert erhält man die folgende empirische Gleichung für den Widerstandskoeffizienten R :

$$R = \frac{\Delta p_v}{\dot{m}^2} = C \cdot \dot{m}^{n-2} = a \cdot \dot{m}^b \quad (2.77)$$

Liegen jedoch keine entsprechenden Messwerte vor, scheidet dieser Ansatz natürlich aus.

Dagegen erfordert die Berechnung des Druckverlustes nach Gleichung 2.75 einen deutlich höheren Maß an Informationen über den Aufbau der Wärmeübergabestation, bestehend aus Rohrleitung, Regelventil und einem Wärmetauscher. In den folgenden zwei Abschnitten werden daher Berechnungsgleichungen für ein Regelventil und für Plattenwärmetauscher vorgestellt.

Regelventil Samson S46-6

In Abbildung 2.39 ist dargestellt wie groß der Volumenstrom durch ein Ventil mit gegebenen k_{vs} -Wert in Abhängigkeit vom Druckverlust ist. Damit ist also eine barometrische Volumenstrombestimmung möglich. Wie anhand der Abbildung leicht zu erkennen ist, ist der Zusammenhang $\dot{V} = f(\Delta p)$ eineindeutig (bijektiv) und daher existiert auch die Umkehrfunktion $\Delta p = f(\dot{V})$.

Dafür wird gemäß Abbildung 2.39 die Geradengleichung bestimmt.

$$\log \dot{V} = \log k_{vs} + B \log(\Delta p) \quad (2.78)$$

Darin ist k_{vs} der maximale Volumenstrom, der bei 100%iger Öffnung des Ventils (Nennhub), einer Wassertemperatur zwischen 5-30°C und einer Druckdifferenz von 1 bar vorliegt. Mit B wird die Steigung der Geraden bezeichnet. Da diese für alle Ventiltypen gleich ist (die

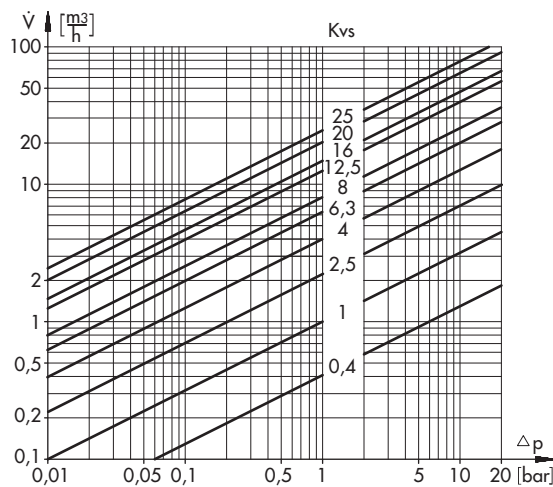


Abbildung 2.39.: Volumenstrom des Regelventils Samson 46-6 in Abhängigkeit vom Druckverlust (aus[25])

Geraden sind parallel) wird diese anhand der Geraden mit $k_{vS} = 1$ leicht zu

$$B = \frac{\log 1 - \log 0,1}{\log 1 - \log 0,01} = \frac{0 - (-1)}{0 - (-2)} = \frac{1}{2}$$

bestimmt.

Durch Umformen der Gleichung 2.3.2 gilt unter Anwendung der Potenzregeln demnach für den Druckverlust

$$\Delta p = \left(\frac{\dot{V}}{k_{vS}} \right)^2 \quad \text{und mit der Dichte } \rho \quad (2.79)$$

$$\Delta p = \left(\frac{\dot{m}}{k_{vS}(d) \cdot \rho(\vartheta)} \right)^2 \quad (2.80)$$

Wärmetauscher

Es gibt eine große Anzahl unterschiedlicher Wärmetauscher (z.B. Rohrbündel-, Doppelrohr-, Rippenrohr-, Spiralband- und Plattenwärmetauscher) mit und ohne Einbauten, deren Druckverlust von deren spezifischen Konstruktionsmerkmalen abhängt [29]. Für eine erste Näherung des Druckverlustes durch die Wärmetauscher in den Wärmeübergabestationen wird im Folgenden davon ausgegangen, dass in den Wärmeübergabestationen die häufig eingesetzten Plattenwärmetauscher mit Winkel-Wellen-Prägung, wie in Abbildung 2.40 dargestellt, zum Einsatz kommen (vgl. [26, S. 1687ff.]). Das Verhältnis von Λ/\hat{a} sei 4. Dann gelten die im Folgenden angegebenen Zusammenhänge.

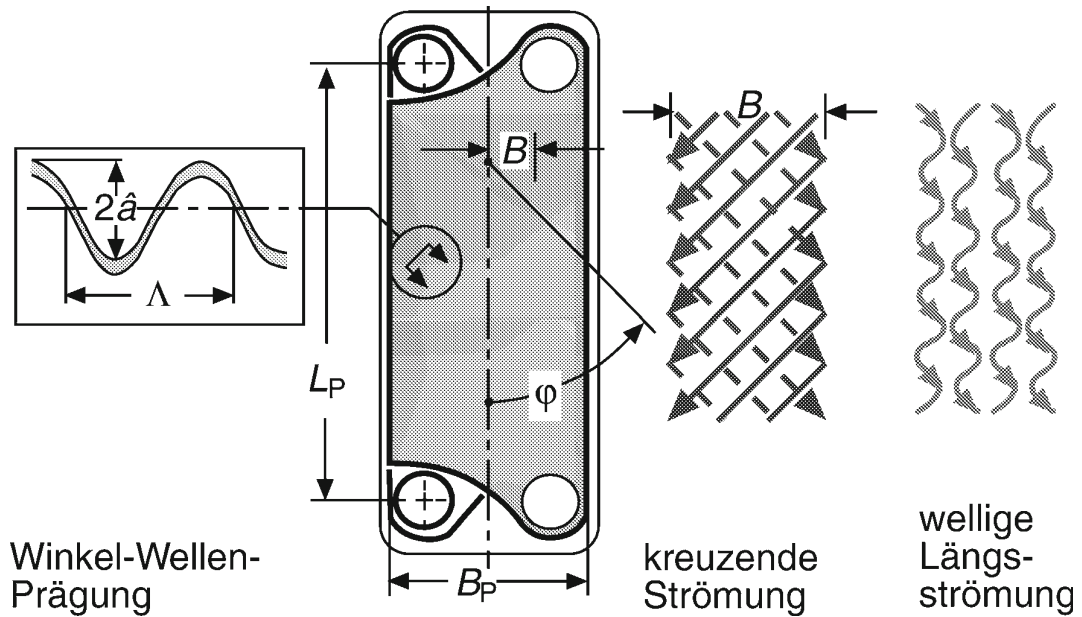


Abbildung 2.40.: Wärmetauscherplatte mit Winkel-Wellen-Prägung (aus [26])

Ausgehend von der Gleichung für den Widerstandsbeiwert

$$\zeta = \frac{2\Delta p d_h}{\rho w^2 L_p} \quad (2.81)$$

ist der Druckverlust

$$\Delta p = \frac{\zeta \rho w^2 L_p}{2d_h} \quad (2.82)$$

Darin ist der hydraulische Durchmesser

$$d_h = \frac{4\hat{a}}{\phi} \quad (2.83)$$

mit \hat{a} als Amplitude des sinusförmigen Wellenmusters und

$$\Phi(X) \approx \frac{1}{6} \left(1 + \sqrt{1 + X^2} + 4\sqrt{1 + \frac{X^2}{2}} \right) \quad (2.84)$$

dem Flächenvergrößerungsfaktor, der seinerseits vom Verhältnis

$$X = \frac{2\pi\hat{a}}{\Lambda} \quad (2.85)$$

der Amplitude \hat{a} zur Wellenlänge Λ abgänglich ist. Ein Wert von $\Phi(X = 1) = 1,22$, also eine Oberflächenvergrößerung von 22% ist ein typischer Wert für technische Platten.

Die Strömungsgeschwindigkeit im Spalt zwischen den Platten ist

$$w = \frac{\dot{V}_{Spalt}}{2\hat{a}B_p} \quad (2.86)$$

mit B_p als der Plattenbreite, die meist ein ganzzahliges Vielfaches der Musterbreite B (s. Abbildung 2.40) ist, und \dot{V}_{Spalt} dem Volumenstrom durch den Spalt zwischen den Platten. Der Wärmetauscher habe n_{Spalt} Spalten. Dann ist der Volumenstrom pro Spalt, da diese parallel durchflossen werden

$$\dot{V}_{Spalt} = \frac{\dot{V}_{TS,i}}{n_{Spalt}} \quad (2.87)$$

nur ein Teil des gesamten Volumenstroms durch die Teilstrecke i .

Für den Widerstandsbeiwert ζ wird die folgende Berechnungsgleichung angegeben:

$$\frac{1}{\zeta} = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{b \tan \varphi + c \sin \varphi + \frac{\zeta_0}{\cos \varphi}}} + \frac{1 - \cos \varphi}{\sqrt{\zeta_1}} \quad (2.88)$$

Darin ist

$$\zeta_0 = \begin{cases} \frac{64}{Re} & \text{für } Re < 2000 \text{ (laminar)} \\ (1,8 \log(Re) - 1,5)^{-2} & \text{für } Re \geq 2000 \text{ (turbulent)} \end{cases} \quad (2.89)$$

$$\zeta_1 = \begin{cases} \frac{B_1}{(Re)} + C_1 & \text{für } Re < 2000 \text{ (laminar)} \\ \frac{K_1}{Re^n} & \text{für } Re \geq 2000 \text{ (turbulent)} \end{cases} \quad (2.90)$$

Die in den Gleichungen 2.88, 2.89 und 2.90 vorhandenen Konstanten betragen unter den eingangs genannten Randbedingungen $a = 3,8$, $b = 0,18$, $c = 0,36$, $B_1 = 597$, $C_1 = 3,85$, $K_1 = 39$ und $n = 0,289$. Die Breite der Platten betrage wie in der Abbildung 2.40 $B_p = 4B$.

Mit diesen Werten können laut [26, S. 1687ff.] die Druckverluste in typischen Plattenwärmetauschern gemäß Gleichung 2.82 abgeschätzt werden, wenn für die Länge L_p die Werte bekannt sind.

In Abbildung 2.41 ist für die o.g. Werte a , b und c der Druckverlustbeiwert ζ ($= \xi$) in Abhängigkeit vom Prägungswinkel φ dargestellt. In dieser Abbildung lässt sich bei $\varphi = 0^\circ$ der Wert ζ_0 ablesen und bei $\varphi = 90^\circ$ der Wert ζ_1 , wie sich mit $\sin(0) = 0$, $\cos(0) = 1$ und $\tan(0) = 0$ sowie $\sin(90) = 1$, $\cos(90) = 0$ und $\tan(90) = \infty$ in Gleichung 2.88 nachvollziehen lässt.

In Abbildung 2.42 wird der Druckverlustbeiwert als Funktion der REYNOLDS-Zahl für verschiedene Prägungswinkel φ dargestellt. Die dazugehörigen Werte a , b und c sind angegeben. In [26, S. 1690] sind jedoch keine Angaben enthalten, welche Werte für B_1 , C_1 , K_1 und n anzusetzen sind, denn die zuvor genannten Werte gelten nur für $\Lambda/\hat{a} = 4$.

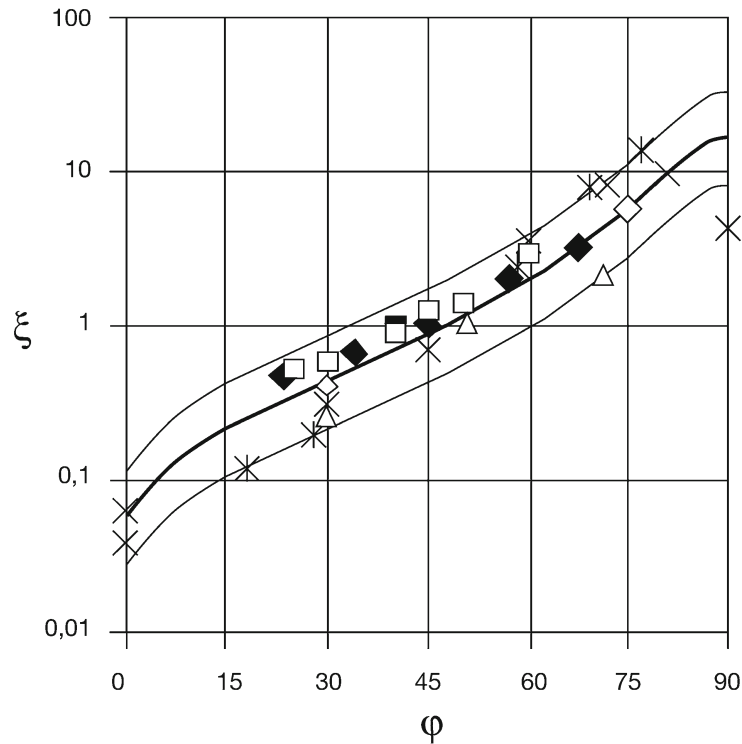


Abbildung 2.41.: Einfluss des Prägungswinkels φ auf den Druckverlust in Plattenwärmetauschern. Druckverlustbeiwert ξ ($Re=2000$, φ) als Funktion des Prägungswinkels φ . mittlere Kurve: Modellgleichung Gleichung 2.88 mit $a=3,8$, $b=0,18$ und $c=0,36$ (aus [26, S. 1690])

Kritische Überprüfung Für $Re = 2000$ ergibt sich nach Gleichung 2.89 $\zeta_0 \approx 0,0067$, während sich für $Re = 1999,9$ und $B_0 = 64$ der Wert $\zeta_0 \approx 0,032$ ergibt. Wie diese Rechnung zeigt, ist die aus [26, S. 1690] stammende Abbildung 2.41 nicht ganz stimmig mit den in [26, S. 1689] zuvor angegebenen Gleichungen ist, denn in der Abbildung ist $\zeta(0^\circ) = \zeta_0 > 0,032 > 0,0067$. Die Ursachen dafür können vielfältig sein.

Eine mögliche Ursache könnte sein, dass die Fallunterscheidung bei den Gleichungen Gleichung 2.89 einerseits $Re \leq 2000$ und $Re > 2000$ heißen müsste und in der Abbildung das zugrundeliegende B_0 offensichtlich größer 64 ist. Der Autor hat sich entschieden diesen Fall anzunehmen, da dann mit den Gleichungen 2.88, 2.89 und 2.90 wie angegeben gerechnet werden kann.

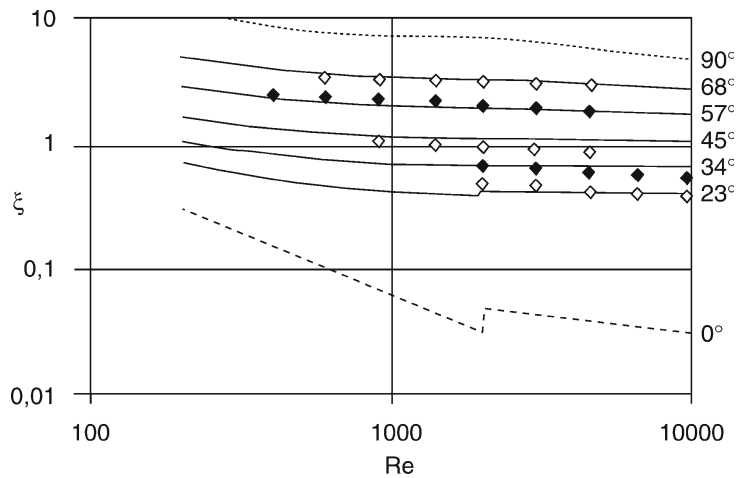


Abbildung 2.42.: Druckverlustbeiwert ξ von Plattenwärmetauschern als Funktion der REYNOLDS-Zahl Re mit dem Prägungswinkel φ als Parameter. Kurven: Modellgleichung Gleichung 2.88 mit $a=1,6$, $b=0,40$ und $c=0,36$ (aus [26, S. 1690])

2.3.3. Einfluß der Strömungsrichtung

Sei die Strömungsrichtung $\text{sign}(\dot{m})$ in einer Teilstrecke

- 1: für eine Strömung entlang der in Einbaulage (gemäß Systemskizze) vorgesehenen Richtung
- 0: bei Stagnation ($\dot{m} = 0$)
- -1: für eine Strömung entgegen der in Einbaulage (gemäß Systemskizze) vorgesehenen Richtung

Da nicht ausgeschlossen ist, dass sich in vermaschten Netzen bei bestimmten Betriebsbedingungen die Strömungsrichtung in Rohrleitungen umkehrt, ist es nötig die Auswirkungen zu betrachten.

Sollte sich in einer Teilstrecke die von Knoten A nach Knoten B verläuft und alle vorgenannten Komponenten enthält, die Strömungsrichtung umkehren, also das Wasser von B nach A fließen, so hätte dies folgende Auswirkungen:

- Der absolute Druckverlust
 - in geraden Rohrleitungen bleibt unverändert.
 - in Kugelhähnen bleibt unverändert.
 - im Bögen bleibt unverändert.
 - in Regelventilen und Wärmetauschern ändert sich nicht.

- in vormals Konfusoren muss nun als Druckverlust in Diffusoren berechnet werden.
 - in vormals Diffusoren muss nun als Druckverlust in Konfusoren berechnet werden.
 - in T-Stücken muss abhängig von der vorliegenden Strömungsvariante am T-Stück neu berechnet werden. Insgesamt sind dabei aufgrund der drei Rohrstücke eines T-Stücks mit jeweils drei möglichen Strömungsrichtungen insgesamt $3^3 = 27$ Strömungsvarianten möglich. Darunter sind auch Strömungsvarianten, wie sie in Hosenstücken auftreten. Welcher der Widerstandsbeiwerte für die betrachtete Teilstrecke relevant ist, hängt davon ab, ob es sich bei der konkreten Strömungsvariante um den Zufluss, den Durchgang oder den Abzweig handelt.
- Auf dem Weg von A nach B nimmt der absolute Druck nicht ab, sondern zu, da der Druckverlust durch die Strömungsumkehr nun ein negatives Vorzeichen hat.

3. Modellbestandteile

Das in der vorliegenden Masterthesis mit MATLAB erstellte strömungstechnische Simulationsmodell besteht aus einer Reihe Funktionen und Skripte, die ineinandergreifen und voneinander abhängen. Die Abbildung 3.1 gibt einen Überblick über die Skripte, mit denen die Grundlagen für die Initialisierung des Simulationsmodells, die Netzstruktur und die Festlegung der Startwerte vorbereitet wird. In Abbildung 3.2 ist die Struktur des Simulationsmodells, in Anlehnung an Abbildung 2.3 und Abbildung 2.4, wiedergegeben¹ mit Angabe des Dateinamens der zuständigen Funktion bzw. Skriptes.

Es werden in dieser Arbeit für die wichtigsten Komponenten, die im Rohrnetz 'Energieverbund' vorhanden sind, Funktionen entwickelt und in der Simulation eingesetzt². Dabei werden, wenn nötig, die Parameter so gewählt, dass sie für das spezielle Rohrnetz 'Energieverbund' zweckmäßig sind³. Dieser Hinweis sollte berücksichtigt werden, wenn dieses Simulationsmodell für andere Rohrnetze eingesetzt werden soll, denn dann sind sehr wahrscheinlich Modifikationen der bestehenden Funktionen erforderlich.

Alle in den Abbildungen 3.1 und 3.2 aufgeführten Funktionen und Skripte werden in diesem Kapitel vorgestellt. Außerdem sollen die Funktionen im Block **Komponenten** der Abbildung 3.2 verifiziert werden, um damit eine verlässliche Basis für die Bewertung der Ergebnisse eines Simulationsmodells zu schaffen⁴.

Es folgt in Abschnitt 3.1 eine allgemeine Übersicht über die Vorbereitung und die Struktur des MATLAB-Simulationsmodells, bevor danach auf die Modellbestandteile im Einzelnen eingegangen wird.

¹Die Struktur der Dateiablage ist analog aufgebaut (siehe Abbildung G.1)

²Mit Ausnahme der Funktionen *calcDpRVS46.m* und *calcDpWT.m*. Zwar ließe sich mit diesen Bausteinen eine Wärmeübergabestation simulieren, jedoch lagen die dafür notwendigen Daten vom Netzbetreiber nicht vor. Stattdessen werden die Wärmeübergabestationen mit der Funktion *calcRWuestFit* berechnet.

³Z.B. bei der Funktion *zetaBogenHerning.m*

⁴Die Verifizierung eines kompletten Simulationsmodells wird erst in einem späteren Kapitel angestrebt, denn sie erfordert nicht nur verifizierte Funktionen und Skripte, sondern auch geeignete Eingangsparameter für das zu simulierende Rohrnetz.

3.1. Übersicht

Der erste Start des Simulationsmodells ist entsprechend Abbildung 3.1 vorzubereiten. Damit bei der Initialisierung der Simulationsumgebung die relevanten Daten zur Netzgeometrie sowie zur Berechnung der Widerstandskoeffizienten der Wärmeübergabestationen zur Verfügung stehen, werden im ersten Schritt mit der eigens erstellten ACCESS-Datenbank *Heat-Grids* die Teilstreckenabschnitte und Teilstrecken zusammengesetzt und vom Anwender die Messwerte der Wärmeübergabestationen vom Server des Betreibers heruntergeladen. Die damit in Zusammenhang stehenden Matlab-Skripte sind im Block **Initialisierung** angegeben.

Die Netzstruktur ist bei einfachen Modellen direkt in der Netzstrukturmatrix \underline{M} im Skript *SolveNLGS*.m* implementiert⁵. Für komplexere Netze kann die Struktur jedoch zunächst in einer Excel-Datei *NLGS*.xls* angelegt werden, aus der die Netzstruktur mittels der Skripte im Block **Netzstruktur** in die Netzstrukturmatrix \underline{M} übertragen wird.

Die Startwerte für die Massenströme⁶ und die Berechnung des Gesamtmassenstroms wird mit dem Skript im Block **Startwerte** durchgeführt.

Sind alle Vorbereitungen getroffen, sind die in Abbildung 3.2 im Block **Gesamtsystem** genannten Skripte so anzupassen, dass diese die richtigen Leitungsaufbau-, Netzstruktur- und Startwert-Skripte aufrufen. Die Farbmarkierung (grün, violett und orange) zeigt an, an welchen Stellen des Gesamtmodells die vorbereiteten Daten zur Anwendung kommen. Die mit der Initialisierung (grün) vorbereiteten Netzdaten werden als globale Variable *Netz* geladen und können somit im gesamten Modell genutzt werden, während die Netzstruktur- und die Startwertdaten nur lokal begrenzt im Gesamtmodell abgerufen werden.

Werden die Widerstandskoeffizienten in den Maschengleichungen bei Modellen als nicht konstant angenommen, können die Widerstandskoeffizienten der Teilstrecken R_{TS} und Teilstreckenabschnitte R_{TSA} mit den im Block **Subsysteme** aufgeführten Skripten berechnet werden, die ihrerseits die Funktionen im Block **Komponenten** aufrufen. Zusätzlich werden auch einige netzunabhängige (*deg2rad.m*, *PerH2ProS.m*) und netzabhängige (*DN2*.m*) Hilfsfunktionen verwendet, mit denen notwendige Umrechnungen durchgeführt werden.

Zur grafischen Darstellung der Berechnungsergebnisse stehen zudem auch diverse Plotfunktionen (**Plot*.m*) zur Verfügung, die in der Abbildung jedoch keine Erwähnung finden.

⁵Das * bei Funktions- und Skriptnamen ist als Platzhalter für eine beliebige Zeichenkette zu verstehen.

⁶Als Randbedingung werden die mittleren Temperaturen in den Teilstrecken im Skript *SolveNLGS*.m* im Vorlauf auf 75°, im Rücklauf auf 35° gesetzt.

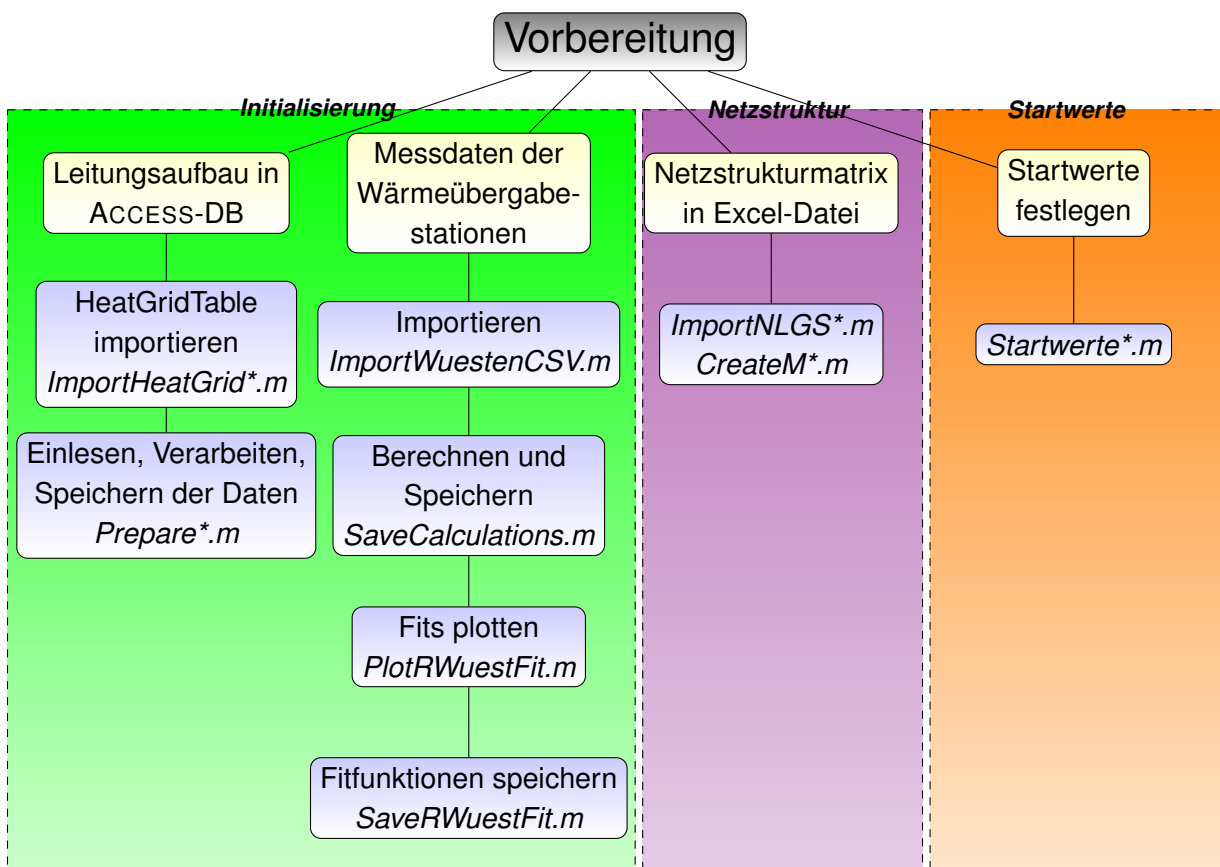


Abbildung 3.1.: Übersicht über die Vorbereitung des MATLAB-Simulationsmodells

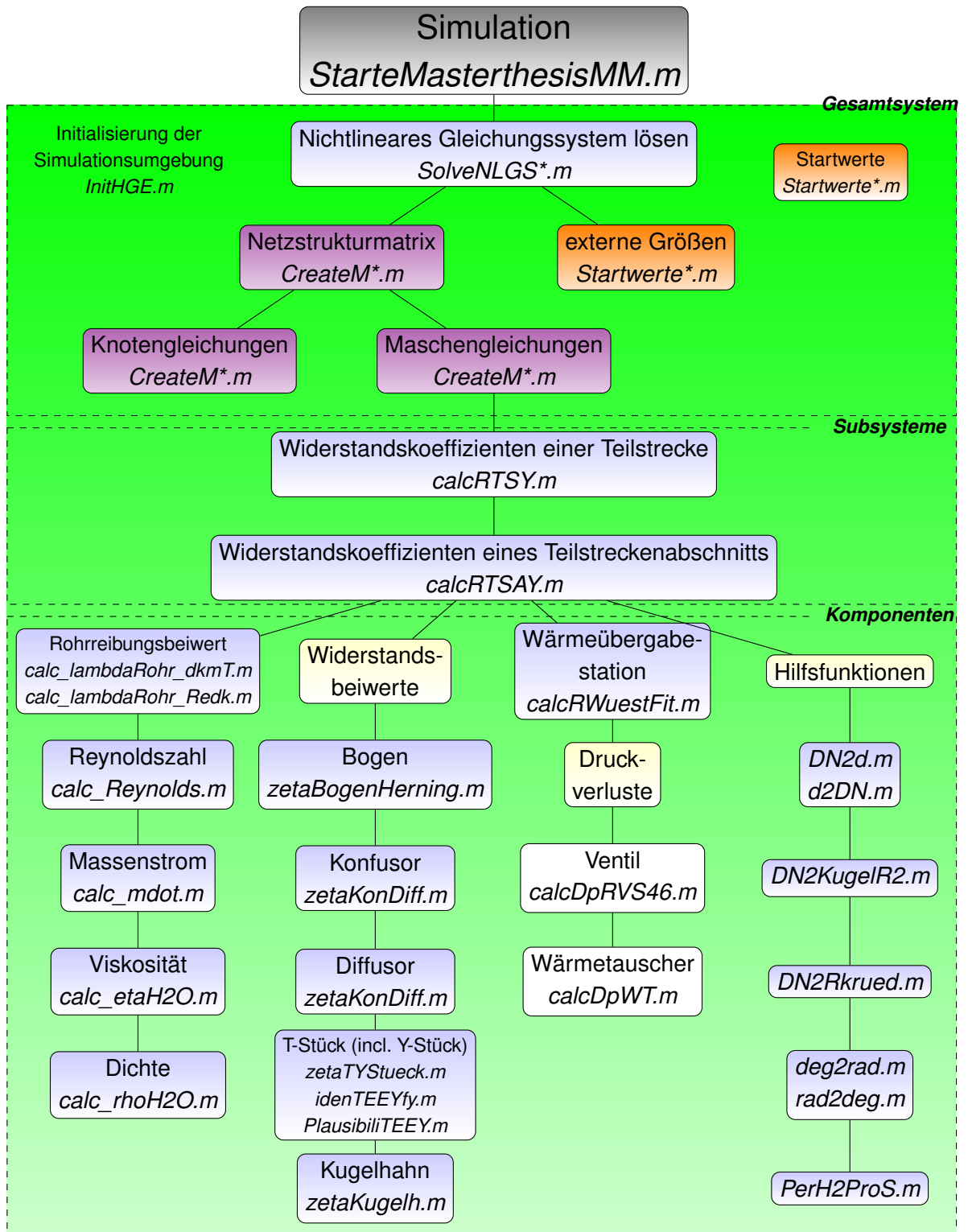


Abbildung 3.2.: Übersicht über die Struktur des MATLAB-Simulationsmodells.

3.2. Vorbereitung des Modells

In diesem Abschnitt werden die in Abbildung 3.1 aufgeführten MATLAB-Skripte und MATLAB-Funktionen kurz vorgestellt.

3.2.1. Leitungsaufbau in der ACCESS-DB HeatGrids

Die separat erstellte ACCESS-Datenbank *HeatGrids* hängt zwar eng mit dem Simulationsmodell zusammen, ist aber kein direkter Bestandteil davon. Deswegen wird sie erst im nächsten Kapitel ausführlicher vorgestellt. Bei einfachen Modellen, die keine detaillierte Berechnung der Widerstandskoeffizienten erfordern, kann zudem leicht auf die ACCESS-Datenbank verzichtet werden.

ImportHeatGridTable*.m Mit der ACCESS-Datenbank *HeatGrids* wird letztlich die Übergabetabelle *HeatGridTable*.csv* erzeugt. Diese Datei enthält die für das Simulationsmodell erforderlichen Leitungsaufbau und deren Daten werden durch Ausführen des automatisch erzeugten Skripts *ImportHeatGridTable*.m* in die Variable *HeatGridTable* importiert.

Wenn sich der Aufbau der Übergabetabelle durch Anpassungen in der ACCESS-DB ändert, muss auch das Skript *ImportHeatGridTable*.m* aktualisiert werden.

Prepare*.m Das Skript *Prepare*.m* bereitet die Daten der Variable *HeatGridTable* für die Verwendung im Simulationsmodell auf.

Zunächst werden die sortierten Daten in *HeatGridTable* in der globalen Variablen *Netz.(Nxxx).HeatGridTable* abgelegt und diese gespeichert. Anschließend wird *HeatGridTable* nach den einzelnen Ebenen, Teilstrecken und Teilstreckenabschnitten gefiltert und die Filterergebnisse in der globalen Variablen *Netz.(Nxxx).HeatGridPrepared* für die Verwendung im Simulationsmodell abgelegt und gespeichert. Dadurch wird während der Laufzeit des Simulationsmodells der Aufwand für die Filterung und Verarbeitung der Daten in *HeatGridTable* reduziert.

3.2.2. Messdaten der Wärmeübergabestationen

Um aus den Messdaten der Wärmeübergabestationen die erforderlichen Berechnungsparameter zu gewinnen, wird das Skript *WuestenStepByStep* verwendet. Dieses arbeitet Schritt für Schritt die folgenden Skripte ab.

Step01_ImportWuestenCSV.m Der Anwender lädt zunächst vom Server des Netzbetreibers die Messdaten für Druck_Rücklauf in bar, Druck_Vorlauf in bar, Rücklauftemperatur in C, Vorlauftemperatur in C, Wärmemengenzähler_Durchfluss in m^3/h herunter und speichert diese in csv-Dateien (z.B. Wuest01_1Q16_2m.csv, Wuest02_1Q16_2m.csv,...) für jede Wärmeübergabestation ab.

Anschließend werden mit dem Skript in der csv-Datei problematische Zeichen ersetzt und die Namen der Spalten automatisiert geändert. Zuletzt werden die Daten in die globale Variable *Netz.(Nxxx).Wuesten* abgelegt und gespeichert.

Step02_SaveCalculations.m Mit diesem Skript werden für alle in *Netz.(Nxxx).Wuesten* gespeicherten Datensätze zusätzlich die Druckdifferenz *deltap_Pa*, der Massenstrom *mdot_kgs*, die Dichte *rho_kgm3*, die dynamische Viskosität *eta_Pas*, die spezifische Wärmekapazität *cp_JgK*, die Wärmeleitfähigkeit *lambda_WmK* und der Widerstandskoeffizient *R_Pakg2s2* berechnet und in der globalen Variablen *Netz.(Nxxx).Wuesten* abgelegt und gespeichert.

Vor Berechnung der Widerstandskoeffizienten werden die Daten zunächst etwas aufbereitet, denn physikalisch unsinnige Werte fallen in den Messreihen durchaus auf. Natürlich hat die Qualität der Aufbereitung der Messdaten auch einen Einfluss auf das Ergebnis der Berechnung.

Step03_PlotRWuestFit.m Mit diesem Skript werden mit den Daten in *Netz.(Nxxx).Wuesten* für alle Wärmeübergabestationen Diagramme erstellt und die Fit-Funktionen hinzugefügt. Als Beispiel sind für die Wärmeübergabestationen 5 bis 8 in Abbildung 3.3 für die Messdaten die grünen Fit-Funktionen wiedergegeben. Die Parameter *a* und *b* für die Fit-Funktionen der Form $R_{\text{fit}} = a * \dot{m}^b$ werden neben anderen Werten automatisch berechnet.

Step04_SaveRWuestFit.m Die mit dem Skript *PlotRWuestFit.m* für jede Wärmeübergabestation ermittelten Parameter *a* und *b* werden in der globalen Variablen *Netz.(Nxxx).Wuesten.WuestenRFFitParam* gespeichert.

3.2.3. Netzstruktur in Excel-Datei

Während es bei kleinen Rohrnetzen noch praktikabel ist die Netzstrukturmatrix $\underline{\underline{M}}$ direkt im entsprechenden MATLAB-Skript *SolveNLGS** einzugeben, geht bei komplexeren Netzen dabei schnell die Übersichtlichkeit verloren.

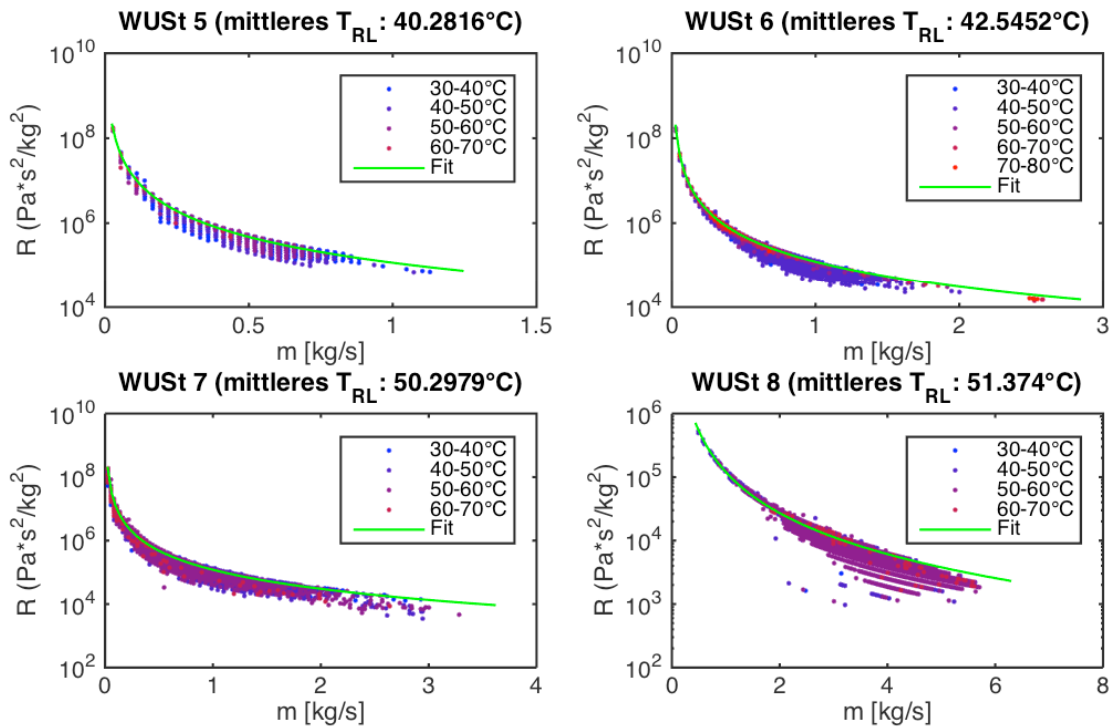


Abbildung 3.3.: Punkt-Diagramme für die Messdaten der Wärmeübergabestationen 5-8 im Energieverbund (N001) mit der Fit-Funktion (grün)

Daher wird die Möglichkeit bereit gestellt, die Netzstruktur in eine Excel-Datei, wie sie in Abbildung 3.4 gezeigt wird, einzugeben. Knotenzeilen dabei mit einem 'K' und Maschenzeilen mit einem 'M' zu kennzeichnen und mit natürlichen Zahlen durchnummerieren. In den Zeilen brauchen anschließend lediglich die in der Systemskizze festgelegten Nummern der Teilstrecken mit ihrem jeweiligen Vorzeichen eingetragen zu werden. Die Spalte 'externe Größen' ist ebenfalls auszufüllen. Ob deren Werte bei der Simulation jedoch tatsächlich verwendet werden, hängt davon ab, wie die Festlegung der Startwerte im Skript *Startwerte** definiert wird.

Das entsprechende Excel-Datenblatt ist abschließend als csv-Datei zu speichern.

Mit den beiden folgenden Skripten wird die in EXCEL erstellte Netzstruktur in das MATLAB-Modell integriert.

ImportNLGS*.m Mit diesem automatisch erzeugten Skript werden die Daten der jeweiligen csv-Datei nach MATLAB importiert⁷. Da die Anzahl der Spalten bei jedem Netz anders sein kann, wird für jedes Netz eine eigene *ImportNLGS**-Datei erstellt.

⁷Ein direkter Import von EXCEL nach MATLAB, ohne den Umweg einer csv-Datei, ist künftig eleganter.

		Teilstrecke	Teilstrecke	Teilstrecke	Teilstrecke	Teilstrecke	externe Größen -f
K	1	-1					-180
K	2	1	-2	4			38
K	3	5	2	-3			45
K	4	-5	6				20
K	5	-4	3	-7	9		34
K	6	-6	7	-8			15
K	7	-9	8				28
M	1	2	3	4			0
M	2	3	7	6	5		0
M	3	7	8	9			0

Abbildung 3.4.: Netzstruktur des Beispielnetzes von GROMBACH in einer Excel-Datei

CreateM*.m Dieses Skript ruft zunächst *ImportNLGS** auf. Anschließend speichert dieses Skript anhand der eingelesenen Daten die Netzstrukturmatrix *M* als MATLAB-Code in der Text-Variablen *M_string*. An geeigneter Stelle im später vorgestellten Skript *SolveNLGS** wird dieser MATLAB-Code mit *eval()* ausgewertet und so die Netzstrukturmatrix *M* eingelesen.

```

% verwende die zuvor geladenen Matrix-Daten
M=eval(M_string);

```

Desweiteren erzeugt dieses Skript die Matrix *NLGSNetz*, die die Knoten- und Maschenzeilen enthält, und bestimmt die für die Simulation relevanten Teilstrecken *relevanteTS*. Denn es können Teilstreckenindizes auftreten, die zwar theoretisch in der Systemskizze, aber nicht in der Netzstrukturmatrix auftauchen (z.B. beim Energieverbund, die Teilstrecken 2, 3, 6, 7, 8. Diese sind Ersatzwiderstände für die Unterebenen.). Diese Indizes tauchen im Gleichungssystem zwar nicht auf und stören dort bei der Berechnung auch nicht, aber bei der graphischen Darstellung können nur *relevanteTS* dargestellt werden.

3.2.4. Startwerte festlegen

Auch hier gilt: Während es bei kleinen Rohrnetzen noch praktikabel ist die Startwerte direkt im entsprechenden MATLAB-Skript *SolveNLGS** einzugeben, geht bei komplexeren Netzen dabei schnell die Übersichtlichkeit verloren. Für das Rohrnetz 'Energieverbund' werden daher die folgenden Skripte genutzt.

Startwerte*.m Die Startwerte der Massenströme für das Rohrnetz 'Energieverbund' ergeben sich aus den Messwerten für die Wärmeübergabestationen bzw. aufgrund definierter

Wärmelastprofile. Daher werden die Startwerte aus den Messwerten der Wärmeübergabestationen bei dem vorab definierten Zeitpunkt *Zeitzeile* gewählt. Im Rahmen einer Plausibilitätsüberprüfung mit *PlausibilITEEY* könnten ausgewählte Massenströme nachträglich auf Null gesetzt werden. Um diese Änderungen leicht durchführen zu können, werden die Startwerte der Massenströme in der globalen Variablen *globalMDOT* abgelegt.

In allen relevanten Teilstrecken *relevanteTS* soll ein Massenstrom größer Null vorliegen, da ansonsten die Netzstrukturmatrix *M* entsprechend modifiziert werden müsste⁸. Die geeigneten Zeitpunkte werden vorab ermittelt.

FindeZeitpunkte.m Mit diesem Skript werden die Zeitpunkte ermittelt, bei denen alle Wärmeübergabestationen Massenströme größer Null vorliegen. Die relevanten Daten zu diesen Zeitpunkten werden in *Netz.(Nxxx).Wuesten.Goodt0Wuest1_m_grt_0* abgespeichert.

3.3. Verifizierung der Komponenten

In den folgenden Abschnitten werden die im Block **Komponenten** der Abbildung 3.2 aufgeführten Funktionen einzeln angesprochen und verifiziert. Für einen schnellen Überblick sind die für das Modell implementierten Funktionen zur Berechnung der Widerstandskoeffizienten *R* in Tabelle 3.1 bereits kompakt zusammengefasst.

Tabelle 3.1.: Bei der Berechnung der Widerstandskoeffizienten *R* berücksichtigte Einflussgrößen

Berücksichtigte Einflussgröße	Verweis	Umsetzung
temperaturabhängige Dichte von Wasser (<i>calc_rhoH2O</i>)	Unterabschnitt 3.3.3	implementiert und verifiziert
temperaturabhängige dynamische Viskosität von Wasser (<i>calc_etaH2O</i>)	Unterabschnitt 3.3.4	implementiert und verifiziert
Rohrreibungsbeiwert (<i>calc_lambdaRohr_Redk</i>), abhängig von REYNOLDS-Zahl, Rohrdurchmesser <i>d</i> und Rauigkeit <i>k</i>	Abschnitt 2.3.1 und Unterabschnitt 3.3.7	implementiert und verifiziert
Widerstandsbeiwert für Rohrbögen mit der Gleichung von HERNING (<i>zetaBogenHerning</i>)	Abschnitt 2.3.2 und Unterabschnitt 3.3.8	implementiert und verifiziert
mit der Gleichung von BRANDT (<i>zetaBogenBrandt</i>)	Abschnitt 2.3.2 und Unterabschnitt 3.3.8	implementiert, nicht verifiziert
Widerstandsbeiwerte für konische Konfusoren und Diffusoren (<i>zetaKonDiff</i>)	Abschnitt 2.3.2 und Unterabschnitt 3.3.9	implementiert und verifiziert
Widerstandsbeiwerte für T-Stücke (<i>zetaTYStueck</i>) bei Stromtrennung und Stromvereinigung unter Berücksichtigung der Strömungsrichtungen, wenn der Abzweig des T-Stücks nur einen Teilstrom führt	Abschnitt 2.3.2 und Unterabschnitt 3.3.10	implementiert und verifiziert

⁸Eine andere Möglichkeit, bei der die Netzstrukturmatrix unverändert bleiben könnte, wäre es einen Mindestdurchfluss zu definieren, der auch bei vollständig geschlossenen Ventilen der Wärmeübergabestationen erhalten bleibt.

Berücksichtigte Einflussgröße	Verweis	Umsetzung
Widerstandsbeiwerte für Hosenstücke (<i>zetaTYStueck</i>) bei Stromtrennung und Stromvereinigung, wenn der Abzweig des T-Stück den Hauptstrom führt	Abschnitt 2.3.2 und Unterabschnitt 3.3.10	implementiert und verifiziert
Widerstandsbeiwerte für Kugelhähne (<i>zetaKugelhahn</i>)	Abschnitt 2.3.2 und Unterabschnitt 3.3.11	implementiert und verifiziert
Druckverlust der Wärmeübergabestationen mit dem empirischen Ansatz (<i>calcRWuestFit</i>)	Abschnitt 2.3.2 und Unterabschnitt 3.3.12	implementiert und plausibel
mit dem theoretischen Ansatz (<i>calcDpRVS46</i> , <i>calcDpWT</i>)	Abschnitt 2.3.2 und Unterabschnitt 3.3.12	programmiert, aber nicht verwendet ⁹
Unterstützende Hilfsfunktionen	Unterabschnitt 3.3.13	implementiert und korrekt

Damit diesen Funktionen die grundlegenden Eingangsparameter zur Verfügung stehen, muss als erstes die Initialisierung der Simulationsumgebung mit *InitHGE.m* erfolgen.

3.3.1. Initialisierung der Simulationsumgebung

Mit den im Block **Initialisierung** der Abbildung 3.1 genannten Skripten wurden bereits einige Daten automatisiert in der globalen Variablen *Netz* gespeichert. Manuell sind der globalen Variablen *Netz* allerdings noch die netzspezifischen Rohrdaten, gemäß Abbildung 3.5, hinzuzufügen: die zu den Normdurchmessern d_{nom} gehörenden tatsächlichen Innendurchmesser d_i der Rohre, das Krümmungsverhältnis der Bögen *BogenRzuDi* und die Radienverhältnis der Kugeln in den Kugelhähnen *KugelRr*.

Außerdem werden die für das im Simulationsmodell verwendete Fluid erforderlichen Stoffwerte aus dem VDI-Wärmeatlas manuell erfasst und in der Variablen *CONST* abgespeichert.

InitHGE.m Mit dem Skript *InitHGE.m* werden die Variablen *Netz* und *CONST* und deren Dateipfade in den Arbeitsspeicher geladen. Diese beiden Strukturvariablen enthalten alle für die Berechnung relevanten Daten über die unterschiedlichen Netze und ihre Komponenten sowie die Stoffkonstanten. Deklariert als globale Variablen stehen diese Daten nun überall im Simulationsmodell zur Verfügung.

Wird die Initialisierung zum Beginn vergessen, so fehlen einer Reihe von Funktionen notwendige Daten (z.B. *calc_rhoH2O.m*, *calc_etaH2O.m*, *DN2d.m*, *DN2KugelR2.m*, *calcRWuestFit.m*, *calcRTS.m*, *SolveNLGS*.m*, *plotNetzNxxx.m*, u.a.) und die Berechnung bricht mit einer Fehlermeldung ab.

⁹Der theoretische Ansatz gemäß Abschnitt 2.3.2 wurde programmiert, wird aber in der Simulation nicht verwendet, da die meisten notwendigen Eingangsparameter für den 'Energieverbund' nicht ermittelt werden konnten.

Netz.N001.Rohrdaten

1	2	3	4	5	6	7	8
d_nom	d_ae	d_w	d_i	RzuDae	BogenR	BogenRzudi	KugelRr
20	26.9000	2.6000	21.7000	2.5000	67.2500	3.0991	1.4200
25	33.7000	2.6000	28.5000	2.5000	84.2500	2.9561	1.4200
32	42.4000	2.6000	37.2000	2.5000	106	2.8495	1.4200
40	48.3000	2.6000	43.1000	2.5000	120.7500	2.8016	1.5100
50	60.3000	2.9000	54.5000	2.5000	150.7500	2.7661	1.5100
65	76.1000	2.9000	70.3000	2.5000	190.2500	2.7063	1.5100
80	88.9000	3.2000	82.5000	2.5000	222.2500	2.6939	1.5300
100	114.3000	3.6000	107.1000	2.5000	285.7500	2.6681	1.5300
125	139.7000	3.6000	132.5000	2.5000	349.2500	2.6358	1.5300
150	168.3000	4	160.3000	2.5000	420.7500	2.6248	1.5300
200	219.1000	4.5000	210.1000	2.5000	547.7500	2.6071	1.5300
250	273	5	263	2.5000	682.5000	2.5951	1.5300
300	323.9000	5.6000	312.7000	2.5000	809.7500	2.5895	1.5300

Abbildung 3.5.: Manuell zu erfassende netzspezifische Rohrdaten

3.3.2. Vernachlässigbarkeit der Druckabhängigkeit

Da die Druckabhängigkeit der Dichte (s. Abbildung 3.6) und der dynamischen Viskosität (s. Abbildung 3.7) von Wasser im Bereich zwischen 1 bis 10 bar und 0 bis 150 °C (s. Seite 102) nur sehr gering ist, wird für deren Berechnung mit den Gleichungen in [26, S. 357] gearbeitet. Muss die Druckabhängigkeit in späteren Arbeiten berücksichtigt werden, wird das kostenlose Berechnungstool XSTEAM empfohlen. Dann werden aber zusätzliche Anpassungen erforderlich, wenn nicht nur mit skalaren Eingangsgrößen gerechnet werden soll.

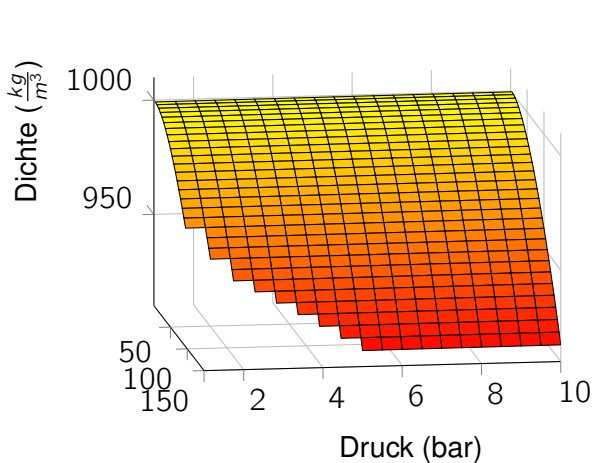


Abbildung 3.6.: Dichte von Wasser über Druck und Temperatur (berechnet mit XSTEAM)

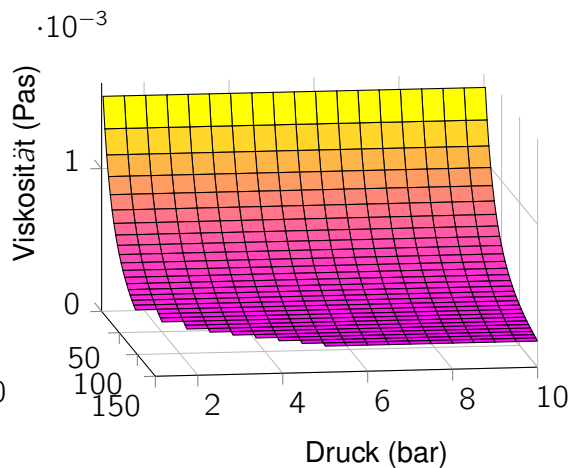


Abbildung 3.7.: Dynamische Viskosität von Wasser über Druck und Temperatur (berechnet mit XSTEAM)

3.3.3. Dichte

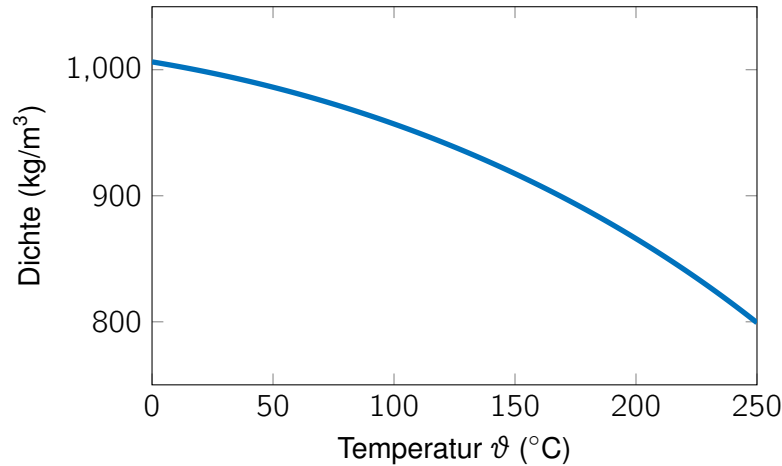


Abbildung 3.8.: Dichte von Wasser über der Temperatur (berechnet mit *calc_rhoH2O*)

Die temperaturabhängige Dichte von Wasser in Abbildung 3.8 wird entsprechend [26, S. 357] mit folgender Gleichung berechnet:

$$\varrho^{H_2O} = \varrho_c + A \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{0,35} + B \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{\frac{2}{3}} + C \left(1 - \frac{T}{T_c}\right) + D \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{\frac{4}{3}} \quad (3.1)$$

Definitionsbereich $D_{\varrho^{H_2O}} = \{\vartheta \in \mathbb{R}_0^+ \mid 0 \leq \vartheta \leq 250\}$

mit: $T = (\vartheta(^{\circ}\text{C}) + 273.15)\text{K}$

$A = 1094,0233$

$B = -1813,2295$

$C = 3863,9557$

$D = -2479,8130$

$\varrho_c = 322 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ kritische Dichte

$T_c = 647,10\text{K}$ kritische Temperatur

Die dafür programmierte Matlab-Funktion heißt *calc_rhoH2O*. Der Definitionsbereich ist oben angegeben. Diese Funktion nimmt Temperaturen als skalare Werte, Zeilen- oder Spaltenvektor an.

```
function rhoH20 = calc_rhoH20 (T_in_Grad) % Dichte in [kg/m^3]
```

Die Funktion wird gemäß Tabelle 3.2 verifiziert durch den Vergleich mit den für Wasser in [26, S. 365] angegebenen Werten. Der relative Fehler der Funktion $\left| \frac{\Delta \varrho}{\varrho} \right|$ ist im gesamten Gültigkeitsbereich sehr klein und liegt im unteren einstelligen Promillebereich.

ϑ [°C]	0	20	50	100	150	200	250
ϱ [$\frac{kg}{m^3}$] ([26, S. 365])	1000,0	998,0	988,0	958,0	917,0	865,0	799,0
$calc_rhoH2O$ [$\frac{kg}{m^3}$]	1006,2	999,2	986,1	957,0	917,5	866,0	799,3
$\frac{\Delta \varrho}{\varrho}$	0,0062	0,0012	0,0019	0,0011	0,0006	0,0012	0,0004

Tabelle 3.2.: Verifizierung der Funktion $calc_rhoH2O$

Damit wird die Funktion $calc_rhoH2O$ als verifiziert angesehen.

3.3.4. Dynamische Viskosität

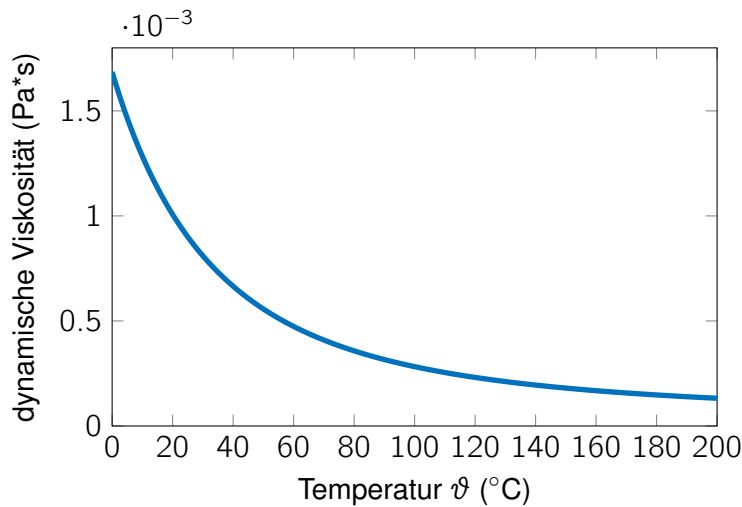


Abbildung 3.9.: Dynamische Viskosität von Wasser über der Temperatur (berechnet mit $calc_etaH2O$)

Die temperaturabhängige dynamische Viskosität von Wasser in Abbildung 3.9 wird, bei Vernachlässigung des Druckeinflusses, entsprechend [26, S. 357] mit folgender Gleichung berechnet:

$$\eta^{H_2O} = E \cdot \exp \left[A \left(\frac{C-T}{T-D} \right)^{\frac{1}{3}} + B \left(\frac{C-T}{T-D} \right)^{\frac{4}{3}} \right] \quad (3.2)$$

Definitionsbereich $D_{\eta^{H_2O}} = \{\vartheta \in \mathbb{R}_0^+ \mid 0 \leq \vartheta \leq 200\}$

mit: $T = (\vartheta(^{\circ}\text{C}) + 273.15)\text{K}$

$A = 0,45047$

$B = 1,39753$

$C = 613,181$

$D = 63,697$

$E = 0,00006896$

T : Temperatur in Kelvin

Die dafür programmierte Matlab-Funktion heißt *calc_etaH2O*. Der Definitionsbereich ist oben angegeben. Diese Funktion nimmt Temperaturen als skalare Werte, Zeilen- oder Spaltenvektor an.

```
function etaH2O = calc_etaH2O (T_in_Grad) % in Viskositaet in [Pa*s]
```

Die Funktion wird gemäß Tabelle 3.3 verifiziert durch den Vergleich mit den für Wasser in [26, S. 415] angegebenen Werten.

ϑ [$^{\circ}\text{C}$]	20	50	100	150	200
η [mPas] ([26, S. 415])	1,01	0,56	0,28	0,18	0,13
<i>calc_etaH2O</i> [Pas]	0,00101	0,00056	0,00028	0,00018	0,00013

Tabelle 3.3.: Verifizierung der Funktion *calc_etaH2O*

Damit wird die Funktion *calc_etaH2O* als verifiziert angesehen.

3.3.5. Massenstrom

Der Massenstrom wird entsprechend der bekannten Gleichung

$$\dot{m} = \dot{V} \rho(\vartheta) \quad (3.3)$$

berechnet. Die dafür programmierte Matlab-Funktion heißt *calc_mdot*. Der Definitionsbereich

$$D_{\dot{m}} = \{(\dot{V}, \vartheta) \in \mathbb{R}^2 \mid 0 \leq \vartheta \leq 250\}$$

wird nur durch die Funktion *calc_rhoH2O* eingeschränkt. Diese Funktion nimmt die Eingangsparameter als skalare Werte, Zeilen- oder Spaltenvektor an.

```
function m_dot = calc_mdots (Vdot_in_m3perh, T_in_Grad) % Massenstrom in
    [kg/s]
```

Nachdem die Funktion *calc_rhoH2O* bereits verifiziert ist, ist die Verifizierung von *calc_mdots* aufgrund ihrer Einfachheit trivial. Deswegen ist Tabelle 3.4 auf wenige von Hand nachrechenbare Werte beschränkt.

ϑ [°C]	20	50	100	150	200
\dot{V} [$\frac{m^3}{s}$]	0,001	0,1	1	10	100
<i>calc_rhoH2O</i> [$\frac{kg}{m^3}$]	999,2	986,1	957,0	917,5	866,0
<i>calc_mdots</i> [$\frac{kg}{s}$]	0,999	98,614	956,988	9175,409	86599,625

Tabelle 3.4.: Verifizierung der Funktion *calc_mdots*

Damit wird die Funktion *calc_mdots* als verifiziert angesehen.

3.3.6. Reynolds-Zahl

Die REYNOLDS-Zahl wird gemäß Gleichung 2.40 berechnet. Die dafür programmierte Matlab-Funktion heißt *calc_Reynolds*. Der Definitionsbereich ist:

$$D_{Re} = \{(\dot{m}, d, \vartheta) \in \mathbb{R}^3 \mid d > 0, 0 \leq \vartheta \leq 200\} = \{(\dot{V}, d, \vartheta) \in \mathbb{R}^3 \mid d > 0, 0 \leq \vartheta \leq 200\}$$

Diese Funktion nimmt die Eingangsparameter als skalare Werte, Zeilen- oder Spaltenvektoren an.

```
function Reynolds = calc_Reynolds (d_m, T_GradC, m_dot_kgs, V_dot_m3s)
    % dimensionslos []
```

Die Funktion wird durch Vergleich mit der manuellen Berechnung gemäß Tabelle 3.5 verifiziert. Die Ergebnisse sind gerundet angegeben. Der Autor hat die Funktion auch hinsichtlich der Eingabe der Volumenströme $\dot{V} = \dot{m}/\text{calc_rhoH2O}(\vartheta)$ überprüft. Die Ergebnisse sind erwartungsgemäß wie in Tabelle 3.5 bereits dargestellt.

Damit wird die Funktion *calc_Reynolds* als verifiziert angesehen.

ϑ [$^{\circ}\text{C}$]	20	50	100	20	50	100	20	50	100
d (m)	0,1	0,1	0,1	0,01	0,01	0,01	0,001	0,001	0,001
\dot{m} ($\frac{\text{kg}}{\text{s}}$)	0,01	0,01	0,01	0,1	0,1	0,1	5	5	5
$\text{Re} = \frac{4\dot{m}}{\eta\pi d}$	126,447	228,630	450,822	12645	22863	45082	6322327	11431495	22541076
<i>calc_Reynolds</i>	126,447	228,630	450,822	12645	22863	45082	6322327	11431495	22541076

Tabelle 3.5.: Verifizierung der Funktion *calc_Reynolds* (Ergebnisse gerundet)

3.3.7. Rohrreibungsbeiwert

Der Rohrreibungsbeiwert wird gemäß Gleichung 2.46 und Gleichung 2.47 berechnet. Die dafür programmierte Matlab-Funktion heißt *calc_lambdaRohr_Redk*. Der Definitionsbereich ist:

$$D_{\lambda} = \{(\text{Re}, d, k) \in \mathbb{R}^3 \mid \text{Re} \geq 0, d > 0, k \geq 0\}$$

Diese Funktion nimmt die Eingangsparameter als skalare Werte, Zeilen- oder Spaltenvektoren an.

```
function lambdaRohr = calc_lambdaRohr_Redk(Re, d_in_m, k_in_m)
```

Die Funktion *calc_lambdaRohr_Redk* wird in Abbildung 3.11 grafisch verifiziert, indem die mit der Funktion erstellte Abbildung 3.10 mit Abbildung 2.10 überlagert wird. Die beim zweiten Blick erkennbaren kleinen Verschiebungen beruhen auf leichten Verzerrungen und Drehungen des gescannten Originalbildes, die bei der Überlagerung nicht vollständig ausgeglichen werden konnten.

Damit wird die Funktion *calc_lambdaRohr_Redk* als verifiziert angesehen.

3.3.8. Bögen

Zur Berechnung der Widerstandsbeiwerte von Bögen wurden drei verschiedene Ansätze verfolgt.

Ansatz nach ICELCIK Die Gleichung 2.66 nach [18] wurde als Funktion *zetaBogenIdelcik* programmiert, aber aufgrund der bereits auf Seite 49 genannten Lücken und Beschränkungen des Definitionsbereichs nicht verwendet.

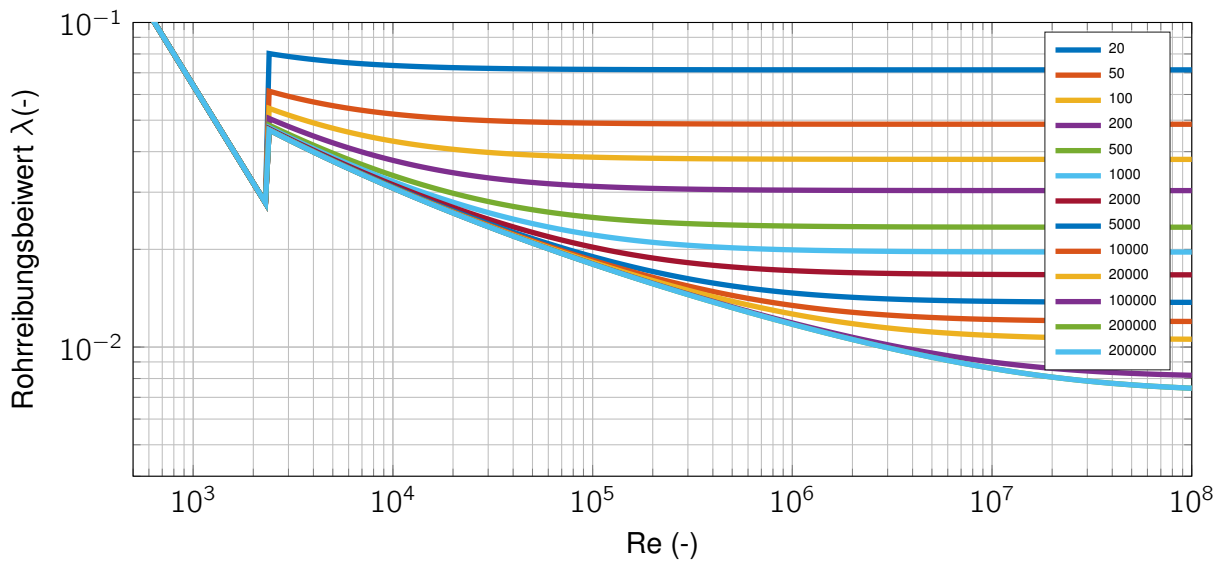


Abbildung 3.10.: Rohrreibungsbeiwert $\lambda = f(Re)$ für unterschiedliche Rauigkeitsmaße $\epsilon = \frac{1}{d/k}$ (berechnet mit `calc_lambdaRohr_Redk`)

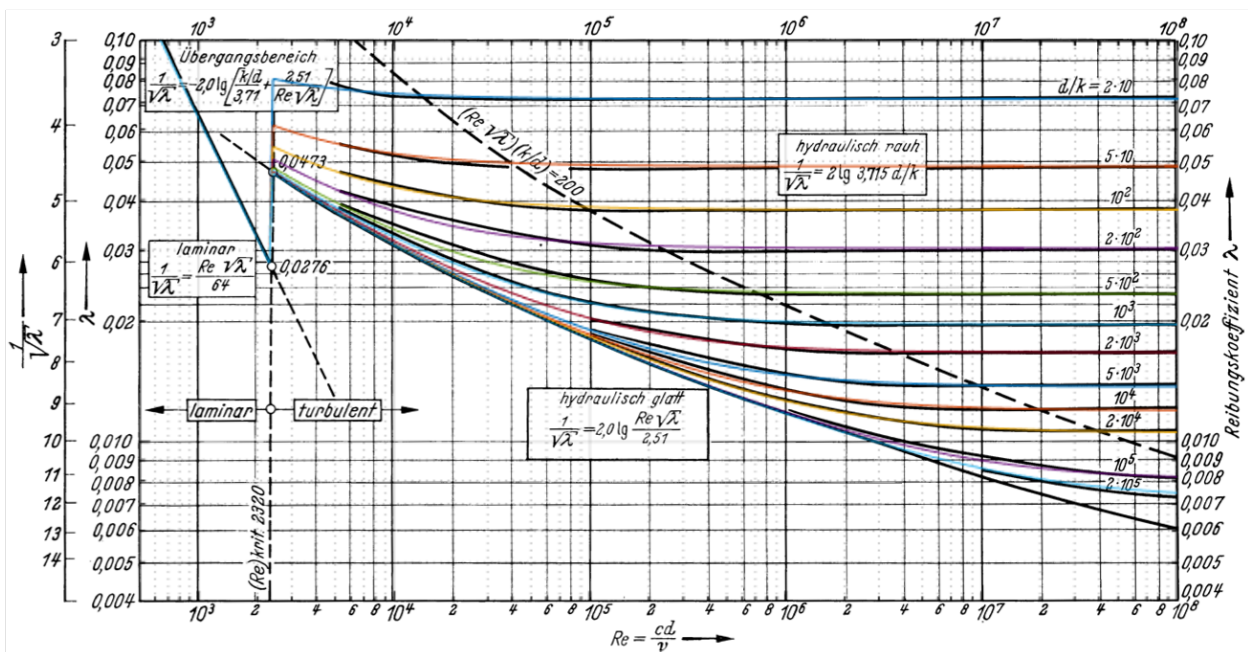


Abbildung 3.11.: Verifizierung der Funktion `calc_lambdaRohr_Redk`

Ansatz nach BRANDT Vom Autor wurde ursprünglich eine Kombination aus Gleichung 2.67 für $Re \geq 1e4$ und den aus Abbildung 2.30 abgeleiteten Gleichungen für $Re < 1e4$ präferiert, um einen möglichst großen REYNOLDS-Zahlenbereich abdecken zu können. Leider kann die Funktion *zetaBogenBrandt* in der vorliegenden Arbeit nicht verifiziert werden.

Nach mehrfacher Kontrolle der Parameter der programmierten Funktion *zetaBogenBrandt* mit den Angaben in [6] bzw. [28] lässt sich durch die Überlagerung in Abbildung 3.12 zeigen, dass die in den genannten Literaturquellen angegebene Funktion nicht mit der dazugehörigen Abbildung 2.29 übereinstimmt.

Da in den Literaturquellen [6] bzw. [28] nur ein einfacher Kommafehler vermutet wird, werden die angegebenen Faktoren diesbezüglich überprüft. Wird statt 1780 der Wert 178 für die Konstante C in Gleichung 2.67 eingesetzt, ergibt sich tatsächlich eine qualitativ bessere Übereinstimmung, siehe Abbildung 3.13. Allerdings sind immer noch deutliche quantitative Abweichungen erkennbar. Eine zeitintensive Parameterbestimmung wird nicht durchgeführt.

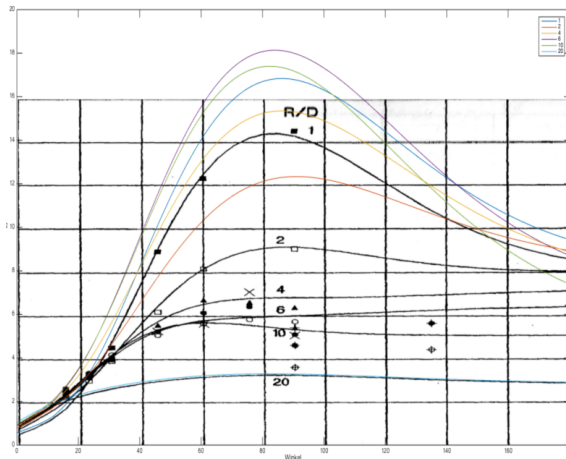


Abbildung 3.12.: ξ_{kv} für Bögen als Funktion des Umlenkwinkels nach BRANDT mit $C=1780$

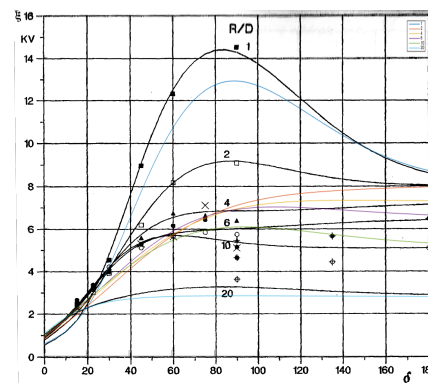


Abbildung 3.13.: ξ_{kv} für Bögen als Funktion des Umlenkwinkels nach BRANDT mit $C=178$

Ansatz nach HERNING Als dritter Ansatz wird die Gleichung 2.68 mit der Funktion *zetaBogenHerning* umgesetzt.

```
function [zBogen, xi_kv] = zetaBogenHerning (Reynolds, k_in_m, Rkrue_d,
    d_in_m, alpha_in_grad)
```

Die Bedeutung der Eingabeparameter ist dem Kapitel Grundlagen zu entnehmen. Mit $\xi_{KV} = f = \frac{\zeta_{U,90}}{\lambda}$ lässt sich in Abbildung 3.14 eine der Abbildung 3.13 analoge Abbildung erzeugen. Für die 90°-Winkel, die ganz überwiegend im betrachteten Rohrnetz Energieverbund verbaut sind, liegen die ξ_{KV} -Werte in Abbildung 3.14 bei den im Energieverbund relevanten

Krümmungsverhältnissen von $R/d \approx 2 \dots 4$ (mit den Farben orange und gelb gekennzeichnet) näher an den Vergleichswerten als die Werte der Funktion *zetaBogenBrandt* in Abbildung 3.12 und Abbildung 3.13.

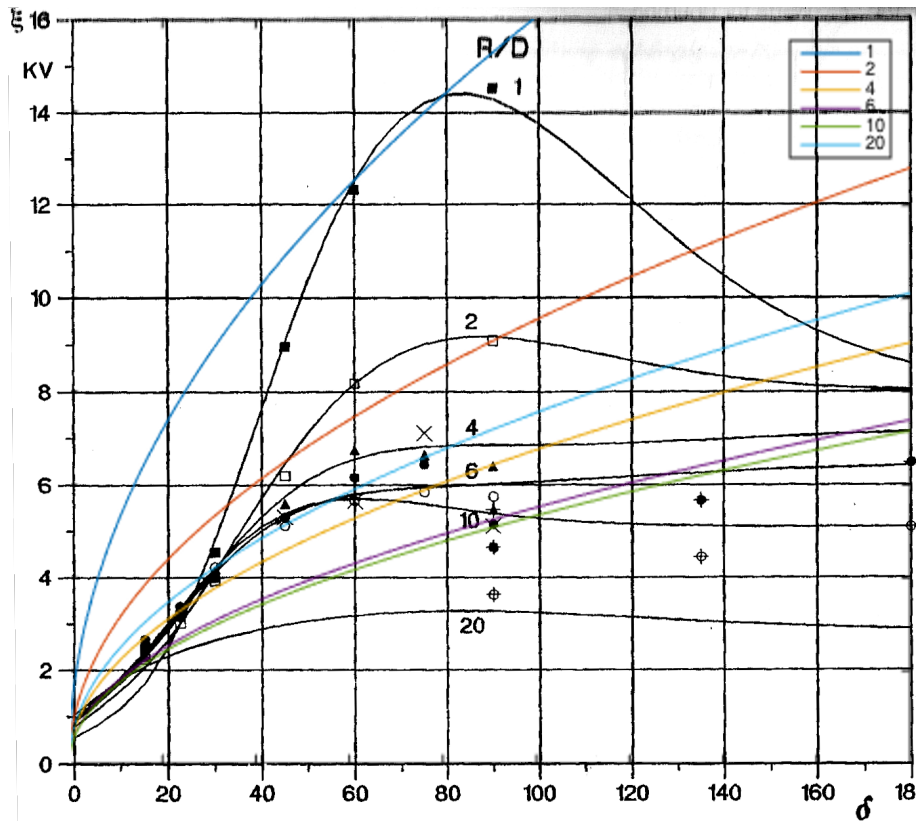


Abbildung 3.14.: ξ_{kv} für Bögen als Funktion des Umlenkwinkels nach HERNING im Vergleich mit Abbildung 2.29

Damit wird die Funktion *zetaBogenHerning*, die zudem keine Einschränkung bzgl. der REYNOLDS-Zahl hat, speziell für die Berechnung von 90° -Bögen mit Krümmungsverhältnissen zwischen $R/d \approx 2 \dots 4$, als geeignet und zuverlässig hinsichtlich des Einsatzes im Simulationsmodell für den Energieverbund eingeschätzt.

3.3.9. Konfusor/Diffusor

Zur Berechnung der Widerstandsbeiwerte von Konfusoren und Diffusoren wird die Funktion *zetaKonDiff* verwendet.

```
function [zKonDiff, zKonStrich, zErw1] = zetaKonDiff (Re, D_in_m,
    d_in_m, lambdaRohr_d, alpha_in_grad, KonDiff, Richtung)
```

Zusätzlich zu den bereits im Kapitel 2 beschriebenen Eingangsparametern werden auch die Eingangsparameter *KonDiff* und *Richtung* verwendet. Mit *KonDiff* wird festgelegt, ob es sich gemäß Systemskizze um einen Konfusor (*KonDiff*=1) oder einen Diffusor (*KonDiff*=-1) handelt. Der Parameter *Richtung* enthält die Strömungsrichtung der jeweiligen Teilstrecke und kann die Werte '1' (Strömungsrichtung wie in Systemskizze), '0' (Stagnation) und '-1' (Strömungsrichtung entgegen der Systemskizze) annehmen. Somit werden in Teilstrecken mit *Richtung*=-1 Konfusoren als Diffusoren und Diffusoren als Konfusoren berechnet.

Die Funktion *zetaKonDiff* wird für Diffusoren verifiziert durch die Abbildungen 3.15 und 3.16. In Abbildung 3.15 sind neben dem Widerstandsbeiwert *zetaKonDiff* (blau) auch die Faktoren *ZKonStrich* (grün, oben) und *zErw1* (grün, unten) dargestellt.

Für Konfusoren ergibt sich aufgrund der Gleichung 2.3.2 für den Verlauf des Faktors *ZKonStrich* ebenfalls Abbildung 3.16.

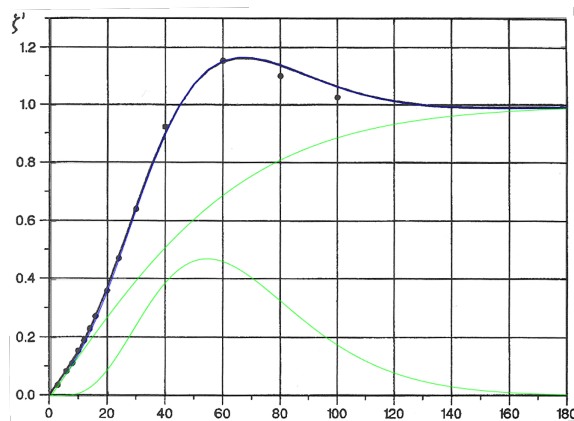


Abbildung 3.15.: ζ' einer konischen Erweiterung (Diffusor) in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel nach [6]

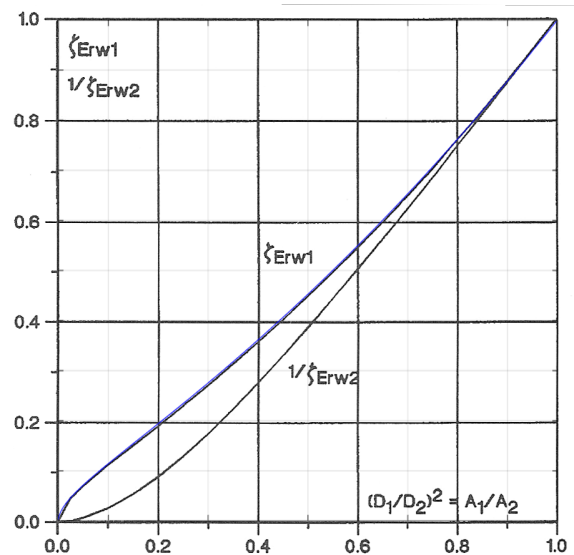


Abbildung 3.16.: Reibungsverlust ζ_{Erw} der Rohrerweiterung in Abhängigkeit vom Querschnittsverhältnis nach [6] (identisch für Diffusor und Konfusor)

Damit wird die Funktion *zetaKonDiff* als verifiziert angesehen.

3.3.10. T-Stücke

Die Bedeutung der Ein- und Ausgabeparameter der Funktion *zetaTYStueck.m* ist der Tabelle 3.6 zu entnehmen.

```
function [zTStueck, zTDurch, zTAbzw, aktTrennVer, proposezero] = zetaTYStueck
(r, dA, dB, dC, mA, mB, mC, thetaA, thetaB, thetaC, alpha_in_grad,
TrennVerStart, Knotencheck, setzero)
```

Eingabe	Bedeutung	Ausgabe	Bedeutung
r	Kantenrundung	zTStueck	enthält zTDurch und zTAbzw
dA	Durchmesser Anschluss A	zTDurch	Widerstandsbeiwert im Durchgang
dB	Durchmesser Anschluss B	zTAbzw	Widerstandsbeiwert im Abzweig
dC	Durchmesser Anschluss C	aktTrennVer	Strömungsvariante (aktuell) 1: Stromtrennung (T-Stück) -1: Stromvereinigung (T-Stück) 2: Stromtrennung (Y-Stück) -2: Stromvereinigung (Y-Stück)
mA	Massenstrom Anschluss A	proposezero	1: mA wird 'vorgeschlagen' 2: mB wird 'vorgeschlagen' 4: mC wird 'vorgeschlagen'
mB	Massenstrom Anschluss B		
mC	Massenstrom Anschluss C		
thetaA	mittl. Temp. Anschluss A		
thetaB	mittl. Temp. Anschluss B		
thetaC	mittl. Temp. Anschluss C		
alpha_in_grad	Winkel des Abzweigs		
TrennVerStart	Strömungsvariante (Start) 1: T-Stück, Stromtrennung -1: T-Stück, Stromvereinigung 2: Y-Stück, Stromtrennung -2: Y-Stück, Stromvereinigung		
KnotenCheck	wenn 'on', dann wird die Knotenregel überprüft		
setzero	wenn 'on', dann wird proposezero übermittelt		

Tabelle 3.6.: Ein- und Ausgabeparameter der Funktion *zetaTYStueck*

Die Funktion *zetaTYStueck.m* überprüft mittels einer Vorzeichenüberprüfung der Massenströme und Vergleich mit der Startvariante, welche Strömungsvariante gemäß Abbildung 2.17 aktuell für das T-Stück vorliegt und wählt dafür die entsprechende Berechnungsgleichung aus. Insgesamt sind $3^3 = 27$ verschiedene Strömungsvarianten vorstellbar. Auf physikalisch problematische Strömungsvarianten wird im Berechnungsprotokoll (vgl. Abbildung 5.25) durch Textausgabe hingewiesen.

Die Ausgabeparameter *zTStueck*, *zTDurch* und *zTAbzw* ergeben sich letztlich aus der Vektoraddition aller sinnvollen Strömungsvarianten-Ergebnisse (vgl. Listing 3.1). Die Ziffern am

Ende der Variablennamen stehen dabei für die Strömungsrichtungen in den Anschlüssen A, B und C.

Listing 3.1: Ausgabeparameter der Funktion *zetaTYStueck.m*

```
% Berechne die Loesungsvektoren mittels Vektoraddition
zTDurch = zDurch111 + zDurch11_1 + zDurch110 + zDurch1_11 + zDurch101 +
    zDurch_11_1 + zDurch_1_11 + zDurch_1_1_1 + zDurch_1_10 + zDurch_10_1 +
    zDurch01_1 + zDurch0_11;
zTAbzw = zTAbzw111 + zTAbzw11_1 + zTAbzw110 + zTAbzw1_11 + zTAbzw101 +
    zTAbzw_11_1 + zTAbzw_1_11 + zTAbzw_1_1_1 + zTAbzw_1_10 + zTAbzw_10_1 +
    zTAbzw01_1 + zTAbzw0_11;
zTStueck = [zTDurch zTAbzw];
```

Für ein abbruchfreies Simulationsmodell vermaschter Rohrnetze ist es notwendig, in T-Stücken auch Strömungsvarianten zu erlauben, die den Strömungen in Y-Stücken (Hosenstücken) entsprechen.

Dabei ist hier jedoch folgendes kritisch anzumerken: Während in T-Stücken der Abzweig (C) in der Regel einen Durchmesser $d_C \leq d_A = d_B$ hat, gilt die hier verwendete Gleichung von AIGNER für Y-Stücke nach seinen Angaben nur für Durchmesser $d_C \geq d_A, d_B$. Insofern stellt der Einsatz dieser Gleichung einen Kompromiss dar: Es ist nicht sicher, ob der für T-Stücke bei den Strömungsvarianten (-1,1,-1) und (1,-1,1) für Stromtrennung/-vereinigung berechnete Widerstandsbeiwert realistisch ist, aber das Simulationsmodell ignoriert diesen Widerstand nicht und bricht auch die Berechnung nicht ab.

Die Funktion *zetaTYStueck.m* erkennt, ob Massenströme in Teilstrecken gleich Null sind. Sollten zwei der drei Teilstrecken einen Massenstrom gleich Null besitzen, so muss unter Anwendung der Knotenregel auch der dritte Massenstrom Null sein. Die Information in welchen Teilstrecken dann der Massenstrom deshalb zur Einhaltung der Knotenregel ebenfalls auf Null gesetzt werden sollte, kann *zetaTYStueck.m* in ihrem Ausgabewert *proposezero* übergeben, wenn *setzero=on* gesetzt ist. Diese Option wird vor dem Lösungsalgorithmus eingesetzt, innerhalb des Lösungsalgorithmus wird dagegen *setzero=off* gesetzt.

Im Simulationsmodell wird *zetaTYStueck.m* innerhalb der Funktion *idenTEEFy.m* aufgerufen.

```
function [zetaTDurchAnfang, zetaTAbzwAnfang, zetaTDurchEnde, zetaTAbzwEnde,
    TSNoA, TSNoB, TSNoC] = idenTEEFy (Nxxx, TSA, Knotencheck, setzero)
```

Die Bedeutung der Parameter ist der Tabelle 3.7 zu entnehmen.

Als erstes identifiziert die Funktion *idenTEEFy.m* die Widerstandsbeiwerte der Funktion *zetaTYStueck.m*, die für den jeweils betrachteten Teilstreckenabschnitt TSA unter Berücksichtigung der aktuell vorliegenden Strömungsvariante, gemäß Abbildung 2.17, relevant sind und

Eingabe	Bedeutung	Ausgabe	Bedeutung
Nxxx	Variablenname des Netzes	zetaTDurchAnfang	Widerstandsbeiwert, wenn T-Stück am Anfang des Durchgangs liegt
TSA	Nummer des Teilstreckenabschnitts	zetaTAbzwAnfang	Widerstandsbeiwert, wenn T-Stück am Anfang des Abzweigs liegt
KnotenCheck	wenn 'on', dann wird die Knotenregel überprüft	zetaTDurchEnde	Widerstandsbeiwert, wenn T-Stück am Ende des Durchgangs liegt
setzero	wenn 'on', dann werden mit <i>proposezero</i> 'vorgeschlagene' Massenströme auf Null gesetzt	zetaTAbzwEnde	Widerstandsbeiwert, wenn T-Stück am Ende des Abzweigs liegt
		TSNoA	Nummer der auf Null gesetzten Teilstrecke A
		TSNoB	Nummer der auf Null gesetzten Teilstrecke B
		TSNoC	Nummer der auf Null gesetzten Teilstrecke C

Tabelle 3.7.: Ein- und Ausgabeparameter der Funktion *idenTEEYfy.m*

übernimmt nur diese.

Ist die aktuelle Teilstrecke beispielsweise der Abzweig eines T-Stücks, so wird nur der Widerstandsbeiwert des Abzweigs berücksichtigt.

Als zweites setzt die Funktion *idenTEEYfy.m* die mit *proposezero* vorgeschlagenen Massenströme auf Null, falls ihr Funktionsparameter *setzero = on* ist. Diese Eigenschaft kann sinnvoll sein, um vor Lösung des nichtlinearen Gleichungssystem alle Teilstrecken zu bestimmen, in denen der Massenstrom gleich Null ist.

Denn einerseits können diese Teilstrecken von der Berechnung in *SolveNLGS*.m* ausgeschlossen werden. Andererseits müssen dann im Gleichungssystem Maschengleichungen wegfallen bzw. zusammengefasst werden, wenn Teilstrecken keinen Massenstrom haben. Wäre die Teilstrecke beispielsweise Bestandteil nur einer Masche, so fiel die Maschengleichung weg, da die Masche dadurch aufgelöst würde. Wäre die Teilstrecke jedoch Bestandteil von zwei Maschen, so müssten diese zwei Maschen beim Wegfall der Teilstrecke zusammengefasst werden¹⁰.

Mit der Funktion *PlausibiliTEEY.m* wird bei den T-Stücken ein Plausibilitätstest durchgeführt.

```
function TSproposedZero = PlausibiliTEEY (Nxxx)
```

¹⁰Eine Funktion, die diese Aufgabe automatisiert durchführt, wurde bisher nicht erstellt. Daher muss derzeit das Gleichungssystem noch manuell angepasst werden.

Als Eingabeparameter benötigt diese Funktion nur die Bezeichnung N_{xxx} des Netzes und gibt dann mit *TSproposedZero* die Nummern der Teilstrecken zurück, deren Massenströme auf Null gesetzt werden. Dazu ruft die Funktion die beiden zuvor beschriebenen Funktionen *idenTEEFy.m* und *zetaTYStueck.m* mit den Funktionsparametern *setzero = on* und *Knotencheck = on* auf. Diese Funktion wird innerhalb des Skripts *SolveNLGS*.m* vor Lösung des Gleichungssystems eingesetzt, um aufgrund von Plausibilitätsüberlegungen Teilstrecken ohne Massenstrom zu identifizieren und sie aus dem Gleichungssystem zu eliminieren. Wurde keine Ersetzung durchgeführt, bricht der Plausibilitätscheck ab und die Bestimmung der Widerstandskoeffizienten für die verbliebenen Teilstrecken beginnt, ansonsten wird der Plausibilitätscheck erneut durchgeführt.

Verifizierung *zetaTSYtueck.m* In Abbildung 3.17 wird die Funktion *zetaTYStueck.m* beispielhaft durch grafische Überlagerung mit der in [6, S. 217] enthaltenen Abbildungen für T-Stücke mit 90° -Abzweigen verifiziert.

Darin steht

- ζ_{vdT} für den Widerstandsbeiwert im Durchgang bei Stromtrennung,
- ζ_{vaT} für den Widerstandsbeiwert im Abzweig bei Stromtrennung,
- ζ_{vdV} für den Widerstandsbeiwert im Durchgang bei Stromvereinigung und
- ζ_{vaV} für den Widerstandsbeiwert im Abzweig bei Stromvereinigung.

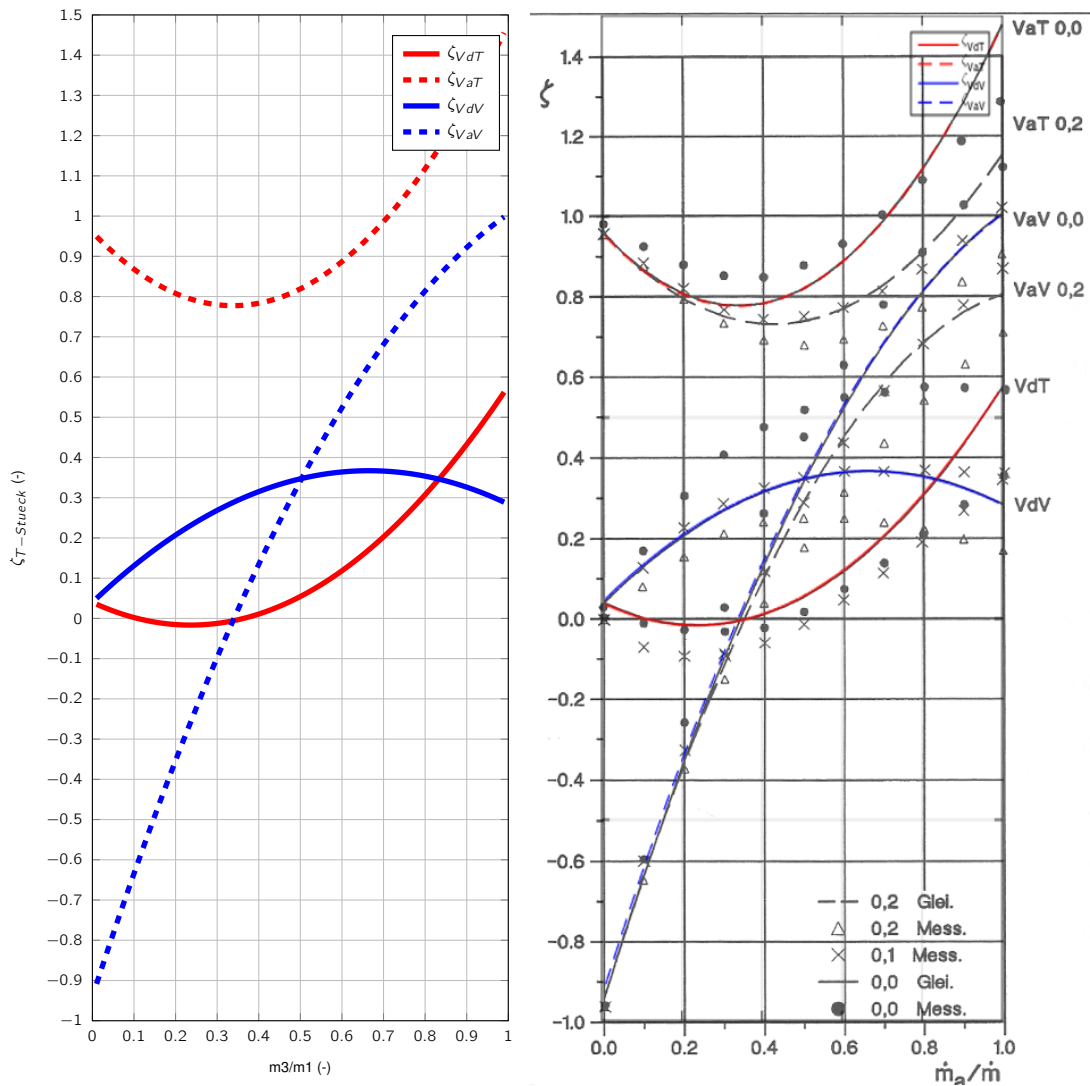


Abbildung 3.17.: Verifizierung der Funktion $\zeta_{TYStueck.m}$ für ein T-Stück mit 90° -Abzweig und Querschnittsverhältnis $A = 1,00$

Im Anhang C sind darüber hinaus weitere Abbildungen enthalten, die belegen, dass die Funktion auch für andere Abzweige und Querschnittsverhältnisse zuverlässig funktioniert. Sollte die Strömungsvariante $(-1,1,-1)$ vorliegen, also quasi ein Hosenstück mit Stromtrennung, wird mit der Gleichung aus [18] für die Stromtrennung mit $k=0.3$ gerechnet. Die Übereinstimmung des Ergebnisses mit den Erwartungen ist Abbildung 3.18 zu entnehmen.

Sollte andererseits die Strömungsvariante $(1,-1,1)$ vorliegen, also quasi ein Hosenstück mit Stromvereinigung, wird mit der Gleichung aus [1] gerechnet. Die Übereinstimmung des Ergebnisses mit Abbildung 2.19 ist Abbildung 3.19 zu entnehmen.

Die Abweichungen bei $q_1 = 0$ und $q_1 = 1$ hängen damit zusammen, dass dann die Strömungsvarianten (0,-1,1) bzw. (1,0,1) vorliegen, bei denen die Funktion *zetaTYStueck.m* mit den Gleichungen nach BRANDT rechnet.

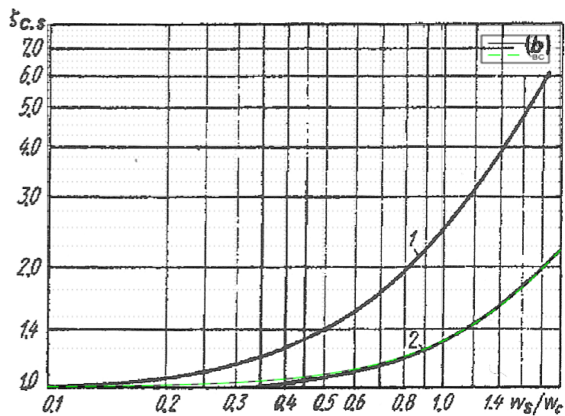
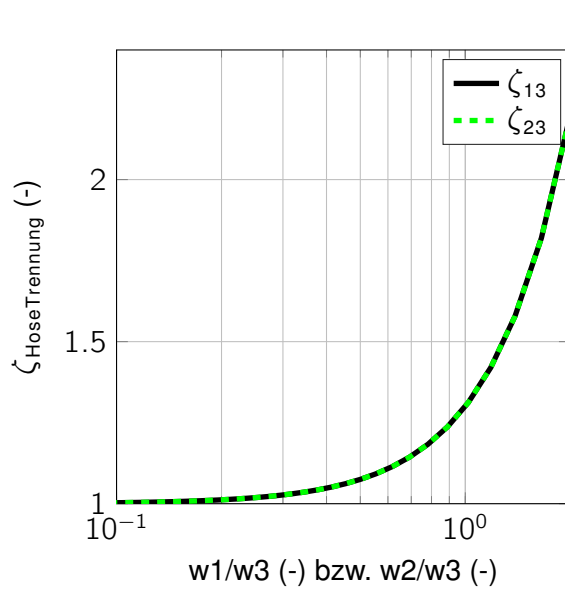


Abbildung 3.18.: Verifizierung der Funktion *zetaTYStueck.m* für ein T-Stück mit 90°-Abzweig bei Strömungsvariante (-1,1,-1): Hosenstück mit Stromtrennung nach IDELCIK

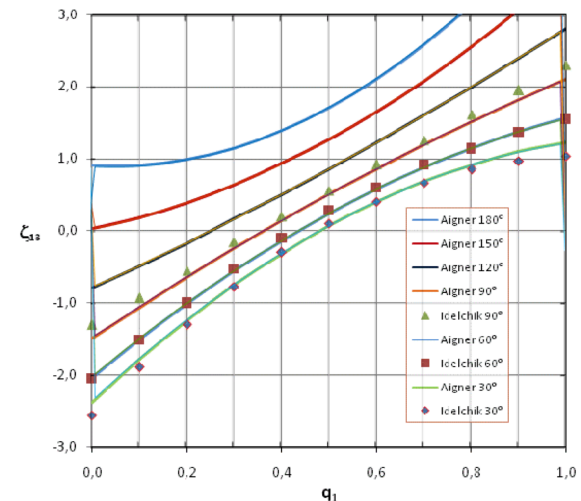
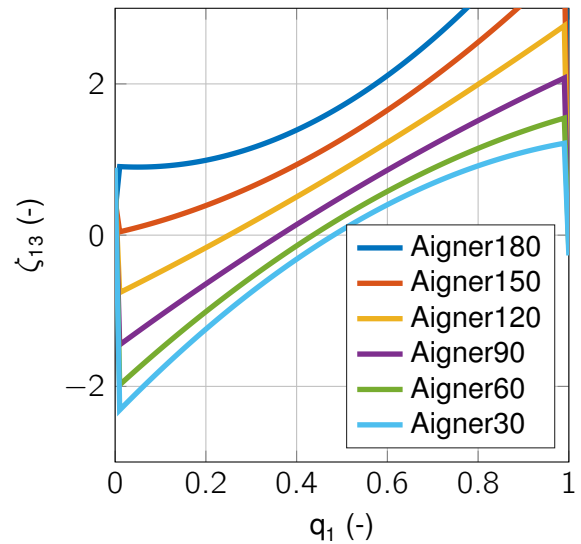


Abbildung 3.19.: Verifizierung der Funktion *zetaTYStueck.m* für ein T-Stück mit 90°-Abzweig bei Strömungsvariante (1,-1,1): Hosenstück mit Stromvereinigung nach AIGNER

Damit wird die Funktion *zetaTYStueck.m* als verifiziert angesehen.

3.3.11. Kugelhahn

Die Widerstandsbeiwerte der Kugelhähne werden mit der Funktion *zetaKugelh* berechnet.

```
function [zKugelh, grenzphi, Querschnittsverhaeltnis] = zetaKugelh (R2, d,
    phi_in_grad)
```

Beim Vergleich der ζ -Werte mittels Gleichung 2.59 mit den Werten in [18] sind Abweichungen zu erkennen (s. schwarze Kurve in Abbildung 3.20). Mit der grünen Näherungskurve scheinen diese Abweichungen verringert zu werden.

In der semilogarithmischen Abbildung 3.21 zeigt sich jedoch warum die Näherungsgleichung nach BRANDT trotz der Abweichungen physikalisch sinnvoller ist. Sie erfüllt nicht nur die Bedingung $\lim_{x \rightarrow 0} \zeta(x) = \infty$, sondern insbesondere die Bedingung $\lim_{x \rightarrow 1} \zeta(x) \approx 0$ deutlich besser als die grüne Näherungsgleichung (was im Übrigen durch den Klammersausdruck $\frac{1}{x} - 1$ erreicht wird).

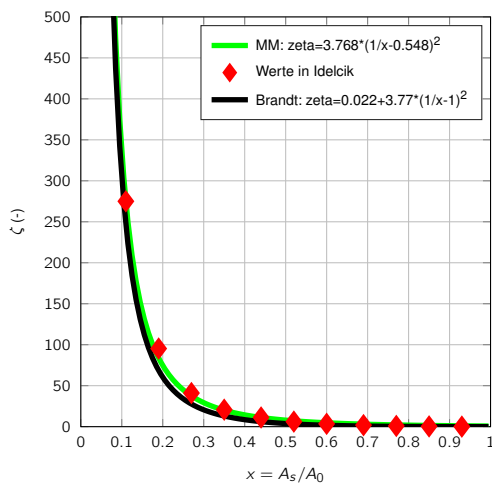


Abbildung 3.20.: Vergleich zweier Näherungsgleichungen für Kugelhähne mit den Werten in IDELCIK

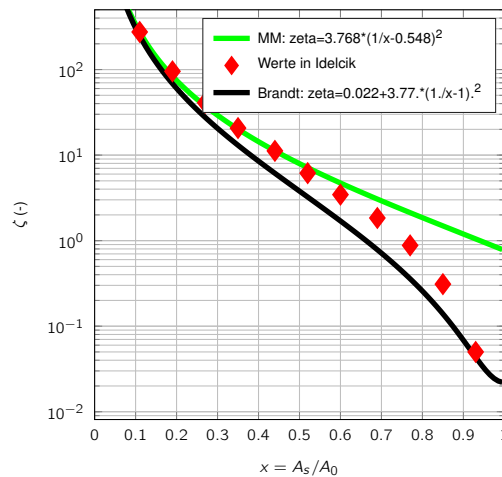


Abbildung 3.21.: Vergleich der Näherungsgleichungen für Kugelhähne in semilogarithmischer Darstellung nach BRANDT [6]

Für das Flächenverhältnis x wird die in [6] hergeleitete Gleichung 2.61 in die Gleichungen eingesetzt. Allerdings war die Gleichung nicht auf Anhieb nachvollziehbar, da BRANDT sowohl für die ganze Sehnenlänge und in seiner schriftlichen Herleitung auch für die halbe Sehnenlänge den Buchstaben s verwendet.

Der Schreibfehler bei Gleichung (3.3/148)¹¹ in [6, S. 228] taucht in Gleichung 2.61 nicht mehr auf.

Die Abhängigkeit des Flächenverhältnisses x vom Winkel φ und vom Radienverhältnis R/r ist in Abbildung 3.22 wiedergegeben. Mit rotem Kreis wird der jeweilige Grenzwinkel markiert, ab dem der Kugelhahn geschlossen ist.

¹¹Der Faktor $(1 - \frac{b}{r})$ darf nicht unter der Wurzel stehen.

Wie nach den Erläuterungen in Abschnitt 2.3.2 zu erwarten ist, schließen Kugelhähne mit großem R/r bei kleineren Winkeln als Kugelhähne mit kleinerem R/r (vgl. Abbildung 3.23).

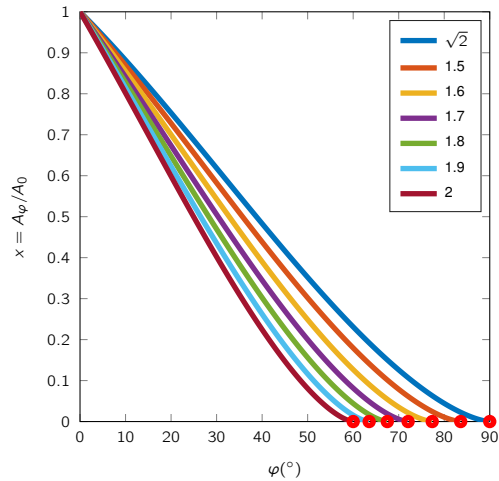


Abbildung 3.22.: Flächenverhältnis x bei Kugelhähnen als Funktion des Winkels φ für verschiedene Radienverhältnisse R/r

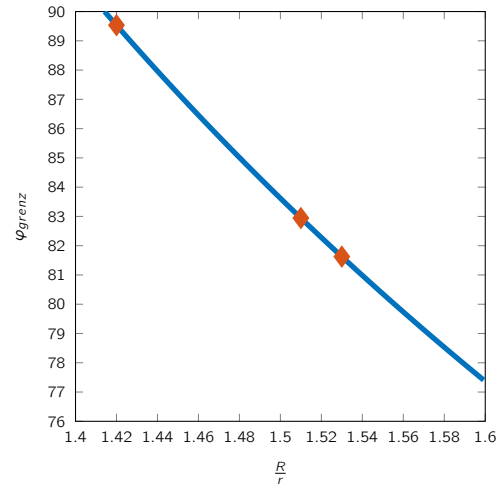


Abbildung 3.23.: Abhängigkeit des Winkels φ_{grenz} bei Kugelhähnen vom Radienverhältnis R/r (rot: Schätzwerte im Energieverbund)

Auf Grundlage der Abbildung 3.21 wird im Rahmen dieser Arbeit die schwarze Näherungsfunktion *zetaKugelh* von BRANDT verwendet.

Damit wird die Funktion *zetaKugelh* als verifiziert angesehen.

3.3.12. Druckverlust einer Wärmeübergabestation

Der allgemeine Aufbau einer Wärmeübergabestation legt es nahe, deren Druckverlust entsprechend Gleichung 2.75 zu berechnen. Liegen für die Wärmeübergabestation jedoch bereits Messwerte entsprechend Gleichung 2.76 vor, so können diese zur Ermittlung des Druckverlustes herangezogen werden.

Die Umsetzung beider Ansätze wird im Folgenden vorgestellt.

Theoretischer Ansatz nach Gleichung 2.75 Der Druckverlust berechnet sich gemäß $\Delta p_{\text{WueSt}} = \Delta p_{\text{WT}} + \Delta p_{\text{RV}} + \Delta p_{\text{RL}}$.

Für die Druckverluste Δp_{RL} der Rohrleitungen können die zuvor beschriebenen Zusammenhänge für gerade Rohrleitungen, Bögen und die übrigen Komponenten genutzt werden, deren Funktionen bereits verifiziert sind.

In Abbildung 3.24 ist das mit der Funktion *calcDpRVS46* berechnete Diagramm mit Abbildung 2.39 überlagert.

```
function [DpRVS46] = calcDpRVS46 (kvs,Vdot)
```

Bei den K_{VS} -Werten 2,5 und 16 ist im Typenblatt [25] die Gerade offenbar etwas zu weit nach unten gerutscht, denn bei 1 bar sollte definitionsgemäß der Volumenstrom identisch mit dem angegebenen K_{VS} -Wert sein.

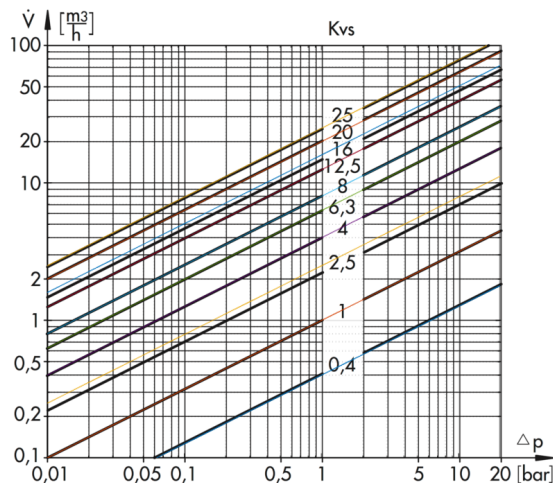


Abbildung 3.24.: Verifizierung der Funktion *calcDpRVS46* (Überlagerung mit Abbildung 2.39)

Die Funktion *calcDpRVS46* wird damit als verifiziert angesehen.

Für die Berechnung des Druckverlustes Δp_{WT} über die Wärmetauscher wird die Funktion *calcDpWT* erstellt, die die Gleichungen 2.82 bis 2.90 umsetzt.

```
function [WTdp, zetaWT, Re] = calcDpWT (mdot,theta, nspalt, Lp, phigrad, Bp,
    aroof, a, b, c)
```

Deren Parameter sind im Kapitel 2 beschrieben.

Die mit dieser Funktion erstellten Diagramme sind in den Abbildungen 3.25 und 3.26 wiedergegeben. Die bessere Übereinstimmung für $Re = 1999,9$ in Abbildung 3.26 gegenüber $Re = 2000,0$ in Abbildung 3.25 legt die Vermutung nahe, dass es für Gleichung 2.90 in [26, S. 1689] eigentlich $Re \leq 2000$ und $Re > 2000$ heißen müsste.

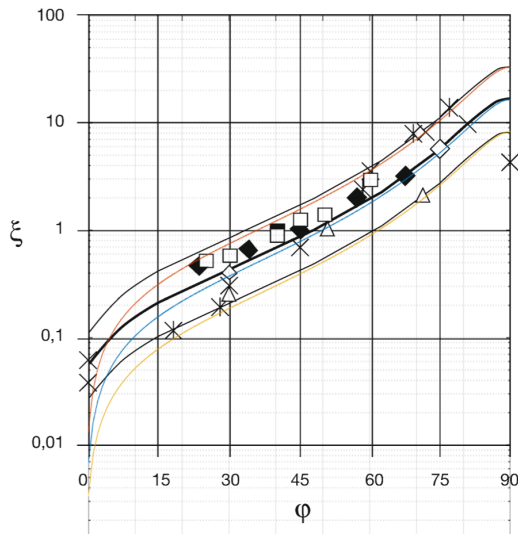


Abbildung 3.25.: Widerstandsbeiwert ζ als Funktion des Prägungswinkels φ für $Re = 2000,0$ (Überlagerung mit Abbildung 2.41)

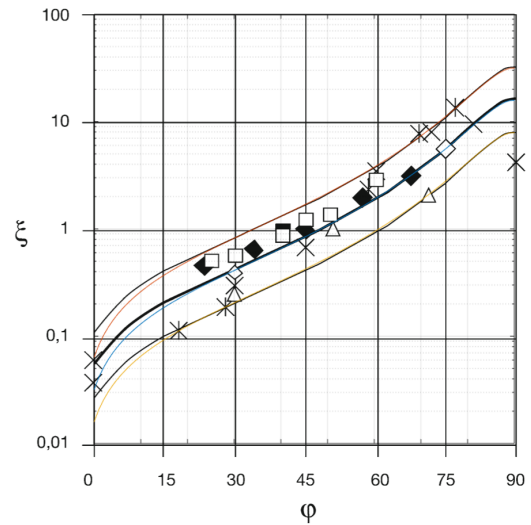


Abbildung 3.26.: Widerstandsbeiwert ζ als Funktion des Prägungswinkels φ für $Re = 1999,9$ (Überlagerung mit Abbildung 2.41)

Auch in Abbildung 3.27 fallen Abweichungen beim Vergleich mit den Literaturangaben auf. Eine Veränderung des Faktors von 1,8 auf 0,8 erhöht zwar die Übereinstimmung bei $\varphi = 0^\circ$ deutlich, aber die Abweichungen bei den anderen Prägungswinkeln werden dadurch nicht geringer.

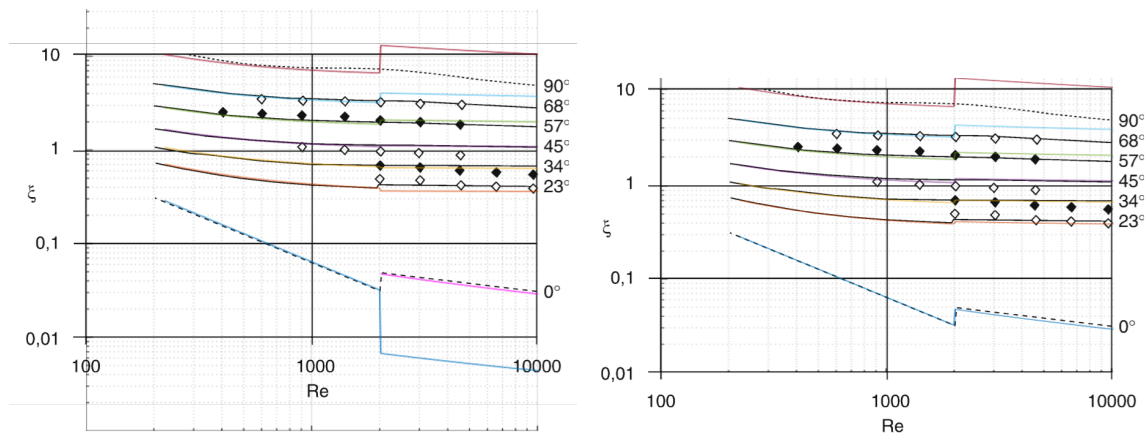


Abbildung 3.27.: Widerstandsbeiwert ζ als Funktion der REYNOLDS-Zahl Re (links) und Überprüfung mit Faktor 0,8 in Gleichung 2.89 (rechts)

Damit kann die Funktion $calcDpWT$ nicht uneingeschränkt als verifiziert angesehen werden.

Dieser theoretische Berechnungsansatz wird in dieser Arbeit jedoch vor allem deswegen nicht eingesetzt, weil so gut wie keine der benötigten Eingangsparameter zu den Wärmetau-

schern vorliegen. Auch welchen K_{v5} -Wert die Regelventile der Wärmeübergabestationen genau haben, lässt sich bei Erstellung dieser Arbeit nicht zweifelsfrei nachvollziehen. Aufgrund der Vielzahl fehlender Informationen wird dieser Ansatz in der vorliegenden Arbeit daher nicht weiter verfolgt.

Empirischer Ansatz nach Gleichung 2.76 Für den Energieverbund liegen zeitlich aufgelöste Volumenströme, Temperaturen und Druckdifferenzen für die Wärmeübergabestationen vor. Mit diesen Daten wird für die Wärmeübergabestationen im Energieverbund der Druckverlust entsprechend der empirischen Gleichung 2.77 bestimmt. Die so ermittelten Widerstandskoeffizienten zeigt Abbildung 3.28.

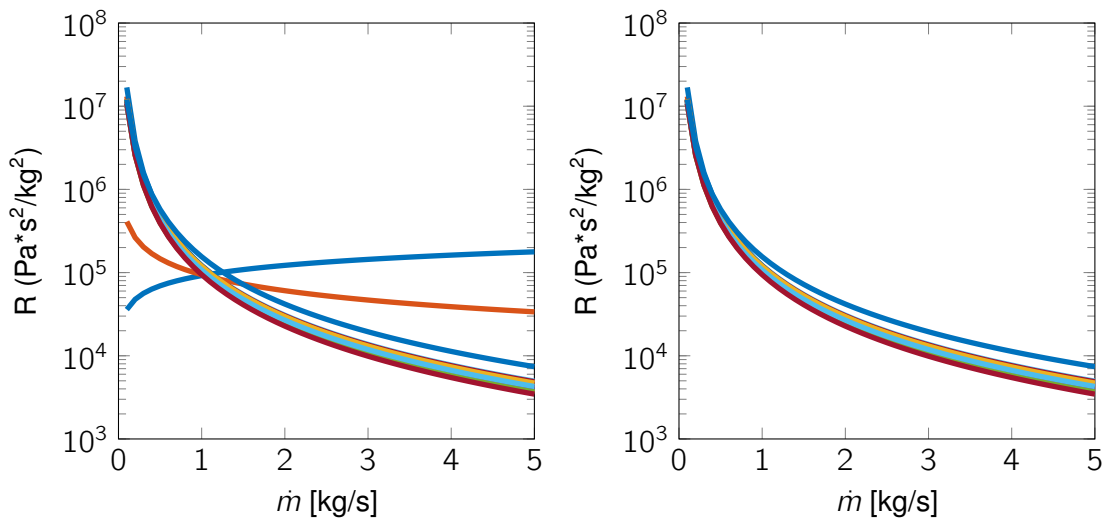


Abbildung 3.28.: Empirisch ermittelte Widerstandskoeffizienten der Wärmeübergabestationen vor (links) und nach (rechts) Ersetzung der Parameter bei WüSt-Nr. 15 und 16

Es ist zu erkennen, dass mit Ausnahme der Wärmeübergabestationen Nr. 15 und 16 alle übrigen Widerstandskoeffizienten relativ nah beieinander verlaufen. Die Messdaten der Wärmeübergabestationen 15 und 16 zeigen im Beobachtungszeitraum viele Unregelmäßigkeiten und fallen daher aus der Reihe (links). Ihre Parameter werden deswegen durch Mittelwerte (rechts) ersetzt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Widerstandskoeffizienten R der Wärmeübergabestationen mittels dieser empirisch ermittelten Parameter mit der Funktion `calcRWuestFit` berechnet.

```
function [WuestR, a, b] = calcRWuestFit (Nxxx, WuestNr, mdot)
```

Als Eingabeparameter werden die Bezeichnung des Netzes, die Nummer der Wärmeübergabestation und der jeweilige Massenstrom benötigt.

Kritische Anmerkung Wie ein kritischer Blick auf Abbildung 3.3 zeigt, gibt die empirisch ermittelte Funktion jedoch nicht notwendiger Weise die realen Messergebnisse wieder, die eine erhebliche Streuung aufweisen.

3.3.13. Hilfsfunktionen

Die Funktionsweise der folgenden Hilfsfunktionen wurde im Rahmen der Arbeit überprüft und ist korrekt. Damit werden die folgenden Funktionen als verifiziert angesehen.

DN2d.m, d2DN.m Häufig sind die nominalen Durchmesser DN der Rohrleitungen bekannt. Der DN entspricht jedoch in der Regel nicht dem tatsächlichen Rohrinne Durchmesser d , der als Eingangsparameter für viele Funktionen benötigt wird (vgl. Abb. 2.3 und 2.4). Kennt man nur den DN, wird zusätzlich auch die Fertigungsnorm benötigt, um auf die tatsächlichen Rohrinne Durchmesser zu schließen. Für das Rohrnetz 'Energieverbund' können die benötigten Informationen dem Produktkatalog [20] entnommen werden.

Mit diesen in der globalen Variable *Netz.(Nxxx).Rohrdaten* hinterlegten Daten werden mithilfe der Funktion *DN2d.m* im Simulationsmodell die zum DN gehörenden tatsächlichen Rohrinne Durchmesser d (in m) für das gewählte Netz Nxxx ermittelt.

```
function dinnen = DN2d(Nxxx, DN_in_mm)
```

Die Umkehrfunktion ist *d2DN.m*.

```
function DN = d2DN(Nxxx, d_in_m)
```

DN2KugelR2.m Bei Kugelhähnen wird zur Berechnung des Widerstandsbeiwertes der Radius der Kugel benötigt. Dieser Radius ist abhängig vom DN der Rohrleitung und dem im jeweiligen Netz verbauten Typ der Kugelhähne. Die Abhängigkeit der Kugelradien vom DN sind in der globalen Variablen *Netz.(Nxxx).Rohrdaten* hinterlegt. Mit der Funktion *DN2KugelR2.m* wird im Rahmen der Kugelhahn-Berechnung der Kugelradius in Abhängigkeit vom DN für das gewählte Netz Nxxx bestimmt.

```
function [R2, Rr, di] = DN2KugelR2(Nxxx, DN_in_mm)
```


DN2Rkrued.m Bei Bögen ist zur Berechnung des Widerstandsbeiwertes das Verhältnis des Krümmungsradius zum Rohrlinnendurchmesser R_{krue}/d bedeutsam, welches für die Rohrleitungen im 'Energieverbund' dem Produktkatalog des Herstellers [20] entnommen wird. Die Daten sind in der globalen Variablen *Netz.(Nxxx).Rohrdaten* hinterlegt. Mit der Funktion *DN2Rkrued.m* wird im Rahmen der Bogen-Berechnung das Krümmungsverhältnis in Abhängigkeit vom DN für das gewählte Netz Nxxx bestimmt.

```
function Rkrued = DN2Rkrued(Nxxx, DN_in_mm)
```

deg2rad.m, rad2deg.m Da einige Funktionen Winkelangaben in rad benötigen, die Winkel aber alle in grad vorgegeben werden, ist eine Umrechnung von rad zu grad mit der Funktion *deg2rad.m* erforderlich.

```
function rad = deg2rad(deg)
```

Die Umkehrfunktion ist *rad2deg.m*.

```
function deg = rad2deg(rad)
```

PerH2ProS.m Die Volumenströme bei den Wärmeübergabestationen werden vom Betreiber in m^3/h angegeben. Im Rahmen der Berechnung der korrespondierenden Massenströme in kg/s werden mit der Funktion *PerH2ProS.m* Stundenwerte in Sekundenwerte umgerechnet.

```
function PerH2PerS = PerH2ProS (X)
```

Diverse Plotfunktionen *Plot*.m Die Plotfunktionen sind hilfreich bei der Visualisierung des Rohrnetzes und die Darstellung der Rechenergebnisse. Einige der erstellten Plotfunktionen sind im Skript *FinalPlot.m* zusammengefasst, um die Bedingungen beim Start des Iterationsverfahrens und dessen Endergebnis in gebündelter Form anzeigen zu lassen und Hinweise auf Fehler bei der Modellierung zu bekommen. So ist der 3D-Plot des Netzes beispielsweise hilfreich um zu überprüfen, ob sich beim Aufbau der Teilstreckenabschnitte und Teilstrecken in der ACCESS-DB Fehler eingeschlichen haben.

In Abbildung 3.29 sind zwei Beispiele wiedergegeben.

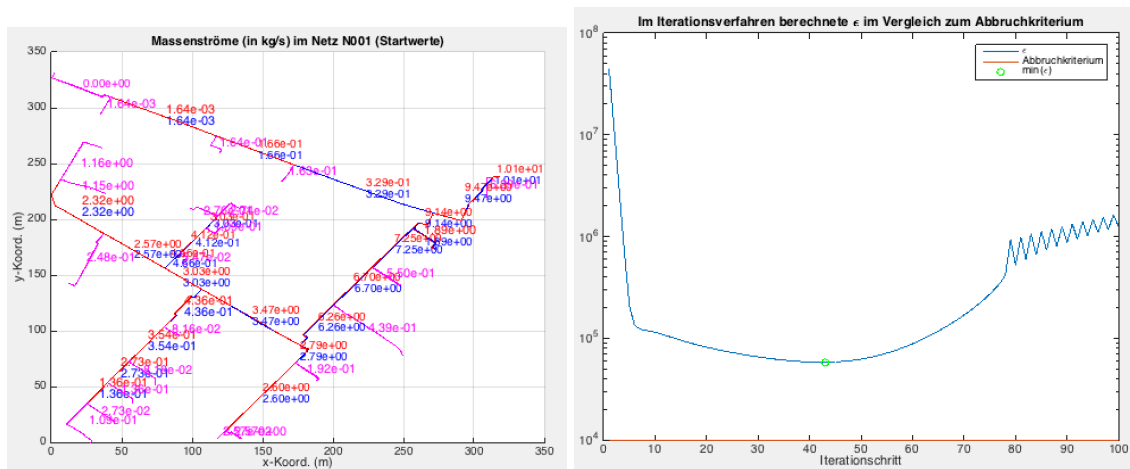


Abbildung 3.29.: Beispiele für die Visualisierung der Ergebnisse mit Plotfunktionen

3.4. Gesamtsystem und Subsysteme

Nachdem nun alle Komponenten vorgestellt sind, behandelt dieser Abschnitt die Funktionen und Skripte in den Blöcken **Subsysteme** und **Gesamtsystem** in Abbildung 3.2.

3.4.1. Subsysteme

Unter dem Begriff Subsysteme werden hier die Berechnung der Widerstandskoeffizienten für die Teilstreckenabschnitte und Teilstrecken verstanden.

calcRTSAY.m Mit der Funktion *calcRTSAY.m* wird der Widerstandskoeffizient eines Teilstreckenabschnitts $R_{TSA,a}$ gemäß Gleichung 2.6 innerhalb einer *for*-Schleife¹² berechnet.

```
function [RTSA, faktor, Reynolds, lambdaTSA, lTSA, dTSA, zetaAlleLambdaTSA,...
    zetaAlleBogenTSA, zetaAlleKDTSA, zetaAlleKugelhaehne, RWuestTSA,...
    zetaTDurchAnfang, zetaTAbzwAnfang, zetaTDurchEnde, zetaTAbzwEnde,...
    LaufTSA, mdotTSA, error] = calcRTSAY (Nxxx, TsaiD, output)
.
.
% Der Widerstandskoeffizient ist unabhaengig von der
% Stroemungsrichtung stets positiv! Die Stroemungsrichtung wird im
% Ausdruck M*m=RTS*abs(m_sym)*m_sym beruecksichtigt (s. SolveNLGS*.m)
RTSA=(zetaTDurchAnfang + zetaTAbzwAnfang + zetaAlleLambdaTSA +
    zetaAlleBogenTSA + zetaAlleKDTSA + zetaAlleKugelhaehne + zetaTDurchEnde +
    zetaTAbzwEnde).*faktor + RWuestTSA;
```

¹²Durch Vermeidung der *for*-Schleife in MATLAB ist ein Erhöhung der Berechnungsgeschwindigkeit möglich.

Aus welchen Komponenten sich der jeweilige TSA zusammensetzt und wie deren Parameter sind, ist in der globalen Variable *Netz.Nxxx.HeatGridPrepared.TSA#* hinterlegt. Dabei steht # für die Nummer des Teilstreckenabschnitts. Die Funktion benötigt als Eingabeparameter lediglich die Bezeichnung des Netzes *Nxxx*, die Nummer des Teilstreckenabschnittes *TsaID* und gibt dann das detaillierte Ergebnis im Berechnungsprotokoll (vgl. Abbildung 5.25) aus, wenn der Parameter *output=on* ist.

calcRTSY.m Nachdem für alle Teilstreckenabschnitte einer Teilstrecke die Widerstandskoeffizienten $R_{TSA,a}$ berechnet wurden, wird mit der Funktion *calcRTSY.m* der Widerstandskoeffizient dieser Teilstrecke $R_{TS,i}$ gemäß Gleichung 2.8 innerhalb einer *for*-Schleife¹³ berechnet.

```
function [RTS, faktor, Reynolds, LTS, RAlleLambdaTS,...
    RAlleBogenTS, RAlleKDTS, RAlleKugelhaehne, RAlleWuestTS,...
    RTDurchAnfangTS, RTAbzwAnfangTS, RTDurchEndeTS, RTAbzwEndeTS,...
    LaufTSA, error] = calcRTSY (Nxxx, TSNumber, output)
```

Aus welchen TSA sich dabei eine TS zusammensetzt, ist in der globalen Variablen *Netz.Nxxx.HeatGridPrepared.TSAinTS#* hinterlegt. Dabei steht # für die Nummer der Teilstrecke. Die Funktion benötigt als Eingabeparameter lediglich die Bezeichnung des Netzes *Nxxx*, die Nummer der Teilstrecke *TSNumber* und gibt dann das detaillierte Ergebnis im Berechnungsprotokoll (vgl. Abbildung 5.25) aus, wenn der Parameter *output=on* ist.

3.4.2. Gesamtsystem

Mit den Skripten gemäß Abbildung 3.1 und den Funktionen in den Blöcken **Komponenten** und **Subsysteme** in Abbildung 3.2 kann nun das nichtlineare Gleichungssystem im Block **Gesamtsystem** aufgestellt und mit dem Skript *SolveNLGS*.m* iterativ gelöst werden. Der prinzipielle Aufbau dieses Skriptes ist nachfolgend beschrieben.

SolveNLGS*.m Das nichtlineare Gleichungssystem wird im Skript *SolveNLGS*.m* zusammengesetzt und iterativ mit dem NEWTON-RAPHSON-Verfahren entweder unter Verwendung des CROSS- oder des Knoten-Strang-Verfahrens gelöst. Das CROSS-Verfahren ist dabei als Gesamtschrittverfahren programmiert, bei dem die Korrekturen für alle Maschen und Knoten pro Iterationsschritt gesammelt und insgesamt berücksichtigt werden.

Der für das CROSS-Verfahren spezifische Teil des Skriptes ist dem Listing 3.2 zu entnehmen.

¹³Durch Vermeidung der *for*-Schleife in MATLAB ist eine Erhöhung der Berechnungsgeschwindigkeit möglich.

Listing 3.2: Auszug aus *SolveNLGS** mit Berechnung der Durchflusskorrekturwerte mit dem Cross-Verfahren

```

%% VORBEREITUNGEN fuer die (iterative) NEWTON-Schleife
%% NEWTON-Schleife
while epsilon>=Genauigkeit && n<=n_Newton_max
    %% Uebernehme die Startwerte m_Start aus globalMDOT und merke sie dir in
    %% globalMDOTSpeicher
    %% Entferne die unveraenderlichen Massenstroeme 'ExtrahiereKante' aus dem
    %% Startwertvektor m_start
    %% calcRTSY(): Berechne die RTS
    %% ERZUEGE DIE NETZSTRUKTURMATRIX M=eval(M_string)
    %% BESTIMME DIE ABLEITUNG dF_sym_sub = jacobian(F_sym_sub,m_sym_red), die auf die
    %% veraenderlichen Massenstroeme reduziert ist
    %% SUBSTITUIERE DIE SYMBOLISCHEN VARIABLEN m_sym_red durch die Zahlen in m_start
    %% und rechne F und dF NUMERISCH aus
    F = sym2poly(subs(F_sym_sub, m_sym_red, m_start)); % ANZEIGEN?
    F_Speicher{n+1,1}=F; % Lege das Ergebnis von F(=0?) im F_Speicher ab
    dF = sym2poly(subs(dF_sym_sub, m_sym_red, m_start)); % ANZEIGEN?
    dF_Speicher{n+1,1}=dF; % Lege das Ergebnis von dF(=0?) im F_Speicher ab
    %% BERECHNE DIE DURCHFLUSSKORREKTURWERTE zk1=-FMasche./SumDFMasche und merke sie
    %% dir in zk1Speicher
    % maschenweise Loesung
    FMasche=F(IndizesMaschengleichung); % Funktionswerte der Maschengleichungen
    SumDF=sum(abs(dF),2); % Summe der partiellen Ableitungen in Knoten- und
    Maschenzeilen
    SumDFMasche=SumDF(IndizesMaschengleichung); % Reduzierung des Vektors auf die
    Maschen
    zk1=-FMasche./SumDFMasche; % mit den Durchflusskorrekturwerten zk1 sind die an
    den Maschen beteiligten Teilstrecken-Massenstroeme zu korrigieren
    zk1Speicher{n+1,1}=zk1; % legt das berechnete zk1 jeder Iteration ab
    %% BERECHNE DEN SCHLEIFENPARAMETER EPSILON und merke ihn dir in epsilonSpeicher
    % es sind andere Abbruchkriterien moeglich
    epsilon = norm(FMasche); % Epsilon am Ende einer Iteration
    epsilonSpeicher(n+1, 1) = epsilon; % legt das berechnete Epsilon jeder Iteration
    ab
    %% FUEHRE DEN MASCHENAUSGLEICH NACH CROSS BEI globalMDOT DURCH, FALLS
    %% ABBRUCHKRITERIUM NICHT ERFUELLT
    if epsilon>=Genauigkeit % falls Abbruchkriterium NICHT erfuehlt
        %% Fuehre den Maschenausgleich in allen Zeilen der MaschenMatrix durch
        for Ausgleichsmasche=1:size(MaschenMatrix,1)
            % Addiere/subtrahiere das zk1 = -F_Masche/SumDFMasche zu den beteiligten
            Massenstroemen
            Maschenkante_n=MaschenMatrix(Ausgleichsmasche,:);
            Maschenkanten=Maschenkante_n(~isnan(Maschenkante_n));
            globalMDOT(abs(Maschenkanten))=globalMDOT(abs(Maschenkanten))+ sign(
                Maschenkanten).*zk1(Ausgleichsmasche); % schreibt die neuen
                Startwerte in die Variable globalMDOT und dann: Auf in die naechste
                Runde!
        end
    end
end

```

```

        end
        n = n+1; % zaehlt die absolvierten Schleifendurchlaeufer der NEWTON-Schleife
    end
end
%% BILDSCHIRMAUSGABE NACH ENDE DER NEWTON-SCHLEIFE

```

Da im Rohrnetz 'Energieverbund' die Massenströme bei den Wärmeübergabestationen gemessen werden bzw. sich aus den Wärmelastprofilen ergeben, ist in diesem Skript unter der Zeile '%% BESTIMME DIE ABLEITUNG dF_sym_sub...' die Möglichkeit vorgesehen, zuvor als unveränderlich definierte Massenströme aus der iterativen Berechnung auszuschließen und somit den symbolischen Massenstromvektor zu reduzieren. Dieser reduzierte (symbolische) Massenstromvektor wird mit m_sym_red bezeichnet.

Im (symbolischen) Gleichungssystem F_sym_sub werden diese unveränderlichen Massenströme entsprechend durch ihre Zahlenwerte substituiert.

Alle verbleibenden, noch zu berechnenden, Massenströme werden ab der Zeile 'SUBSTITUIERE DIE SYMBOLISCHEN VARIABLEN m_sym_red...' mit den bereits reduzierten zahlenmäßigen Startwerten in m_start substituiert und dann F und dF numerisch berechnet.

Für die anschließende Ergebnisanzeige werden die Werte von $globalMDOT$, F , $epsilon$, dF und $zk1$ bei jeder Iteration in $globalMDOTSpeicher$, $F_Speicher$, $epsilonSpeicher$, $dF_Speicher$ und $zk1Speicher$ zwischengespeichert.

Wird das Knoten-Strang-Verfahren eingesetzt, so ändert sich der dafür spezifische Teil des Skriptes entsprechend Listing 3.3.

Listing 3.3: Auszug aus *SolveNLGS** mit Berechnung der Durchflusskorrekturwerte mit dem Knoten-Kanten-Verfahren

```

%% BERECHNE DIE DURCHFLUSSKORREKTURWERTE zk1 und merke sie dir in zk1Speicher
zk1 = linsolve(dF,-F); % mit zk1 = m(k+1)-m(k)!
zk1Speicher{n+1,1}=zk1; % legt das berechnete zk1 jeder Iteration ab

%% BERECHNE DEN SCHLEIFENPARAMETER EPSILON und merke ihn dir in epsilonSpeicher
% es sind andere Abbruchkriterien moeglich
FMasche=F(IndizesMaschengleichung); % Funktionswerte der Maschengleichungen
epsilon = norm(FMasche); % Epsilon am Ende einer Iteration
epsilonSpeicher(n+1, 1) = epsilon; % legt das berechnete Epsilon jeder Iteration ab

%% BERECHNE DIE NEUEN STARTWERTE, FALLS DAS ABRUCHKRITERIUM NICHT ERFUELLT IST
if epsilon>=Genauigkeit % falls Abbruchkriterium NICHT erfuehlt
    m_start1 = m_start + zk1; % berechnet aus den alten Startwerten und zk1 die
        neuen Startwerte m_start1
    globalMDOT(TSno_m_start)=m_start1; % schreibt die neuen Startwerte in die
        Variable globalMDOT und dann: Auf in die naechste Runde!
    n = n+1; % zaehlt die absolvierten Schleifendurchlaeufer der NEWTON-Schleife
end

```

4. Modellierung und Parametrierung des Rohrnetzes 'Energieverbund'

Zunächst werden wichtige Voraussetzungen und Annahmen für die Modellierung des Rohrnetzes 'Energieverbundes' genannt, bevor die Systemskizze erstellt und damit die Netzstrukturmatrix aufgebaut wird. Zur Berechnung der Koeffizienten der Netzstrukturmatrix wird anschließend auf die Umsetzung der Parametrierung eingegangen.

Am Ende dieses Kapitels werden Hinweise zur Modellierung der Planungsvariante 'Vermaschter Energieverbund' und anderer Rohrnetze gegeben.

4.1. Modellannahmen

Das in dieser Arbeit erstellte Simulationsmodell orientiert sich an dem in [21] untersuchten Rohrnetz 'Energieverbund' eines Hamburger Energieversorgungsunternehmens. Für das Rohrnetz 'Energieverbund' gelten die folgenden Voraussetzungen und Annahmen, die dem Aufbau des Simulationsmodells zugrunde liegen:

System Es handelt sich um ein geschlossenes System ohne Leckagen, dessen Rohrleitungen vollständig mit Wasser gefüllt sind.

Druck- und Temperaturbereich Der Druck in den Rohrleitungen liegt zwischen 1 und 10 bar. Die Temperatur im Rohrnetz ist größer 0° und kleiner 95° .

Einfluß des Druckes Der Einfluß des Druckes auf die Stoffgrößen des Wassers kann vernachlässigt werden.

Einfluß der Temperatur Der Einfluß der Temperatur auf die Stoffgrößen wird berücksichtigt.

Gesamtnetz Das Gesamtnetz enthält Maschen. Alle Rohrleitungen haben einen kreisförmigen Querschnitt. Der Gesamtmassenstrom \dot{m}_{ges} im Gesamtnetz ist die Summe der

Massenströme über die k Kunden und der Massenströme über die s Kurzschlüsse:

$$\dot{m}_{ges} = \sum_{i=1}^k \dot{m}_{Kunde,i} + \sum_{i=1}^s \dot{m}_{shortcut,i} \quad (4.1)$$

Kundenleitungen Der Betrag und die Richtung der Massenströme $\dot{m}_{Kunde,i}$ in den k Kundenleitungen können als vorgegeben (z.B. durch Wärmelastprofile oder Messwerte) bzw. bekannt (Messwerte) angenommen werden. In den Kundenleitungen befinden sich bei den Wärmeübergabestationen auf Betreiberseite Temperaturmessungen im Vor- und Rücklauf sowie eine Volumenstrommessung im Rücklauf.

Kurzschlussleitungen Der über die Kurzschlussleitungen fließende Massenstrom soll das Zufrieren verhindern. Die Massenströme $\dot{m}_{shortcut,i}$ über die Kurzschlussleitungen sind ebenso wie die Öffnungswinkel der Kugelhähne nicht bekannt.

Vorlaufnetz Das Vorlaufnetz ist über die Kundenleitungen bzw. Kurzschlussleitungen mit dem Rücklaufnetz verbunden. Das Vorlaufnetz kann Maschen enthalten.

Rücklaufnetz Das Rücklaufnetz ist über die Kundenleitungen bzw. Kurzschlussleitungen mit dem Vorlaufnetz verbunden. Das Rücklaufnetz kann Maschen enthalten.

Komponenten Im Rohrnetz sind neben geraden Rohrleitungen als Komponenten vor allem Bögen, Konfusoren und Diffusoren, Kugelhähne, T-Stücke und Wärmeübergabestationen eingebaut.

Schweißnähte Die vorhandenen Schweißnähte werden im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Reibungswärme Die Temperaturerhöhung des Fluids infolge der Reibungsverluste ist klein gegenüber den Wärmeverlusten an die Umgebung und kann vernachlässigt werden. Der Einfluß der Reibungswärme auf die temperaturabhängigen Stoffgrößen wird daher ebenfalls vernachlässigt.

Strömung In allen relevanten Teilstrecken *relevante TS* soll ein Massenstrom größer Null vorliegen, da ansonsten die Netzstrukturmatrix \underline{M} entsprechend modifiziert werden müsste.

4.2. Systemskizze und Netzstrukturmatrix

Der Betreiber hat dem Autoren einen Lageplan (Abbildung E.2), ein Koordinatenverzeichnis (Abbildung E.3) und einige andere Unterlagen der technischen Dokumentation zur Verfügung gestellt. Um die Übersichtlichkeit zu erhöhen, bietet es sich an auf Grundlage des

Lageplans eine Systemskizze, wie sie Abbildung 4.1 zeigt, anzufertigen. Darin werden die T-Stücke und Systemeingangs- und Systemausgangsknoten mit einem 'K' (für Knoten) markiert und durchnummeriert. Ebenso werden die Teilstrecken mit einem 'R' (für Resistor/-Widerstand) markiert, durchnummeriert und mit einem Richtungspfeil versehen. Außerdem werden die Maschen mit einem 'M' markiert, durchnummeriert und mit einer Umlaufrichtung versehen.

Zuletzt ist es empfehlenswert an den T-Stücken (wie bereits auf Seite 17 erläutert) die Abzweige mit C, die Zuläufe mit A und die Durchgänge mit B zu kennzeichnen, um die spätere Eingabe der Parameter für die T-Stücke in die Datenbank zu erleichtern. Sollte die Strömungsvariante eines Hosenstücks vorliegen, wird der Abzweig mit C und die beiden anderen Teilstrecken frei mit A und B gekennzeichnet.

Auf Grundlage dieser so vorbereiteten Systemskizze wird die Netzstrukturmatrix $\underline{\underline{M}}$ erstellt, die als Auszug in Abbildung 4.2 dargestellt ist. Für dieses komplexere Rohrnetz werden die an den Knoten- und Maschenzeilen beteiligten Teilstreckennummern mit ihrem jeweiligen Vorzeichen in eine Excel-Datei eingegeben. Diese Daten werden dann mit dem bereits vorgestellten Skript *CreateM*.m* zur Netzstrukturmatrix $\underline{\underline{M}}$ zusammengesetzt.

Die in die T-Stücke Nr. 40 bis 46 hineingehenden bzw. herausführenden Teilstrecken können dabei den Zeilen K40 bis K46 entnommen. Das Vorzeichen gibt an, ob die Teilstrecke in den Knoten hinein (+) oder heraus (-) geht. Analog werden die Maschenzeilen M1 bis M22 aufgebaut. Die Vorzeichen der Teilstrecken in den Maschenzeilen geben an, ob die Teilstrecke in dieselbe Richtung wie die Umlaufrichtung der Masche zeigt (+) oder gegen die Umlaufrichtung der Masche zeigt (-).

In Kurzform wird zur Bestimmung Netzstrukturmatrix $\underline{\underline{M}}$ folgender Ablauf empfohlen:

1. Erstellen einer Systemskizze des abstrakten, gerichteten (d.h. mit Pfeilrichtungen versehenen) Knoten-Kanten-Diagramms des Rohrnetzes mit Nummerierung der Kanten (z.B. Abbildung 4.1), dabei
 - Einzeichnen der Systemgrenzen
 - Einzeichnen der systemexternen Größen
 - Einzeichnen der Maschen mit Pfeilrichtung
 - Einzeichnen der T-Stück-Anschlüsse A (Durchgang), B (Durchgang) und C (Abzweig)
2. optional: Aufstellen der Knoten- und Maschengleichungen
3. Aufstellen der Netzstrukturmatrix $\underline{\underline{M}}$ und der externen Größen \underline{f} (z.B. Gleichung 2.4, Abbildung 4.2) anhand der Systemskizze

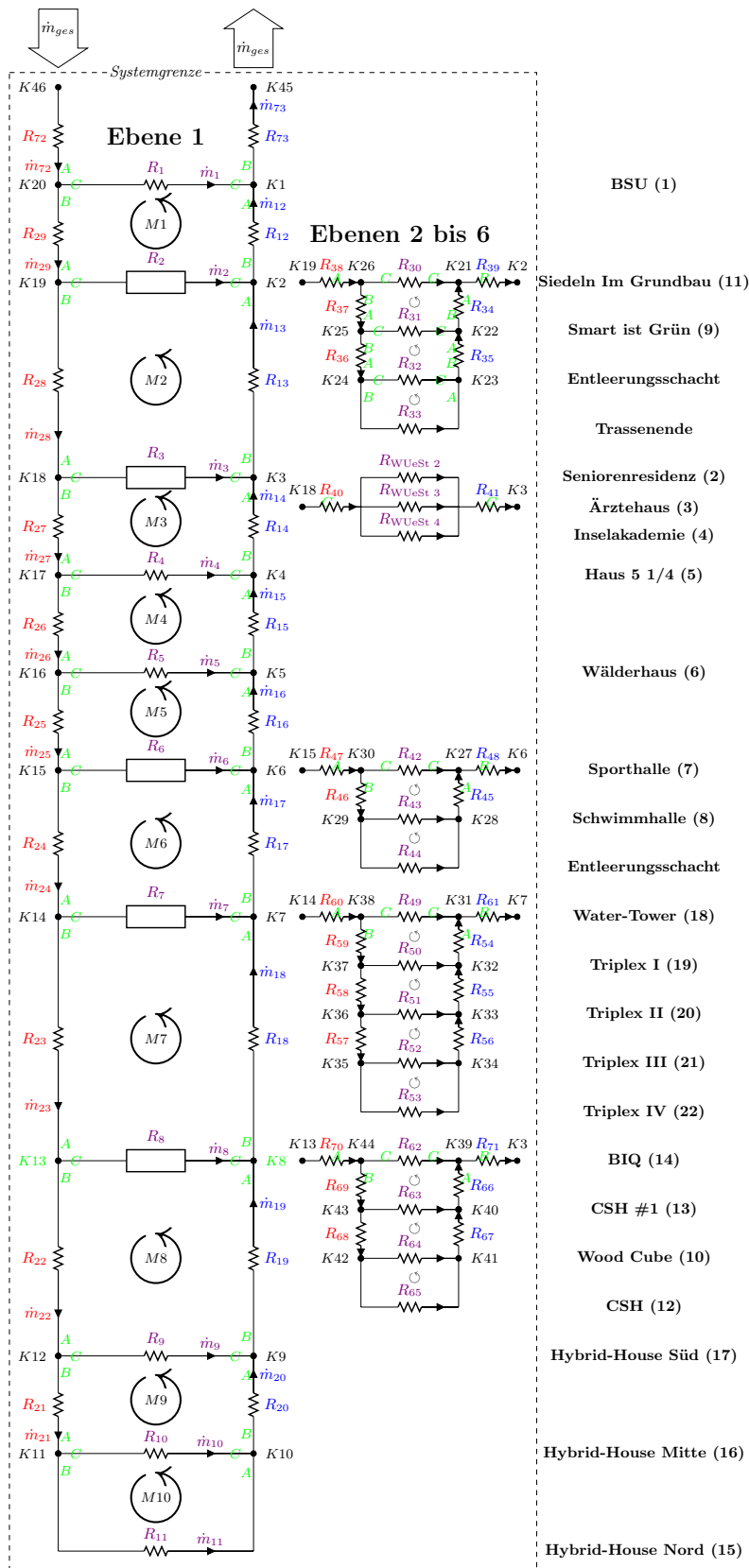


Abbildung 4.1.: Systemskizze des Netzes 'Energieverbund' in Hamburg-Wilhelmsburg. Die Widerstände R_2 , R_3 , R_6 , R_7 und R_8 der Ebene 1 sind als Ersatzwiderstand der rechts angegebenen Unternetze zu verstehen. Ist in der Teilstrecke eine Wärmeübergabestation vorhanden, so steht deren Nummer (vgl. Abbildung E.1) in der Klammer.

4. wiederholtes kritisches Überprüfen der Netzstrukturmatrix und der externen Größen anhand der Systemskizze. Insbesondere bei den Vorzeichen schleichen sich leicht Fehler ein, die dazu führen können, dass das Gleichungssystem unlösbar wird, weil sich die Gleichungen widersprechen. Die Sicherheit, dass das Gleichungssystem richtig ist schließt dieses als Fehlerursache aus.

Beachte: Fehler in der Netzstrukturmatrix führen i.d.R. zu Problemen bei der Lösung des Gleichungssystems!

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
			Teilstrecke	Teilstrecke	Teilstrecke	Teilstrecke	Teilstrecke	Teilstrecke	Teilstrecke	Teilstrecke		externe Größen -f
K 40			67	-66	63							0
K 41			65	-67	64							0
K 42			68	-65	-64							0
K 43			69	-68	-63							0
K 44			70	-69	-62							0
K 45			73									-15
K 46			72									15
M 1			29	38	30	39	12	-1				0
M 2			28	40	41	13		-39	-30	-38		0
M 3			27	4	14			-40	-41			0
M 4			26	5	15			-4				0
M 5			25	47	42	48	16	-5				0
M 6			24	60	49	61	17	-48	-42	-47		0
M 7			23	70	62	71	18	-60	-49	-61		0
M 8			22	9	19			-70	-62	-71		0
M 9			21	10	20			-9				0
M 10			11					-10				0
M 11			37	31	34			-30				0
M 14			46	43	45			-42				0
M 16			59	50	54			-49				0
M 17			58	51	55			-50				0
M 18			57	52	56			-51				0
M 19			53					-52				0
M 20			69	63	66			-62				0
M 21			68	64	67			-63				0
M 22			65					-64				0

Abbildung 4.2.: Auszug aus der Netzstruktur des 'Energieverbundes'

4.3. Umsetzung der Parametrierung

Zur Parametrierung der Komponenten wird eine Access-Datenbank erstellt, mit der die im Lageplan Abbildung E.2 und im Koordinatenverzeichnis Abbildung E.3 enthaltenen Informationen für den späteren Export in das Simulationsmodell vorbereitet werden.

Die wichtigsten Tabellen der Datenbankstruktur zeigt der Ausschnitt in Abbildung 4.3¹. Die Verknüpfungszeichen 1 – ∞ bedeuten dabei, dass zu einem Element in der Tabelle auf der '1-Seite' beliebig viele Elemente in der Tabelle auf der '∞-Seite' gehören können (sogenannte 1:n-Beziehung).

¹Der Gesamtentwurf der Datenbankstruktur sieht vor, dass ein Projekt mehrere Rohrnetze behandeln kann, welche ihrerseits aus mehreren Ebenen bestehen. Im einfachsten Fall werden alle Teilstrecken eines Netzes einer einzigen Ebene zugeordnet. Eine Unterteilung, wie bei der Eingabe des 'Energieverbundes' geschehen, kann die Übersichtlichkeit jedoch erhöhen.

Beim Füllen dieser Datenbankstruktur mit Daten empfiehlt es sich immer zuerst die Tabellen auf der '1-Seite' zu füllen und erst danach die mit ihr verknüpften Tabellen auf der '∞-Seite'. Daher werden zunächst die Daten aus dem Koordinatenverzeichnis in der Tabelle TBL30_PUNKTE erfasst sowie die aus dem Lageplan entnehmbaren Rohrtypen und die daraus ableitbaren Teilstrecken in die Tabellen TBL60_ROHRTYPEN und TBL60_TEILSTRECKEN aufgenommen.

Da eine Teilstrecke aus mehreren Teilstreckenabschnitten (Rohre unterschiedlicher Eigenschaften) zusammengesetzt sein kann, besteht zwischen TBL60_TEILSTRECKEN und TBL50_TEILSTRECKENABSCHNITTE eine 1:n-Beziehung. Da mehrere Teilstreckenabschnitte vom gleichen Rohrtyp sein können, besteht auch zwischen TBL60_ROHRTYPEN und TBL50_TEILSTRECKENABSCHNITTE eine 1:n-Beziehung.

In der Tabelle TBL60_ROHRTYPEN und weiteren Tabellen können Informationen zu den Materialeigenschaften der Rohrleitungen erfasst werden, die für z.B. für Wärmeverlustberechnung benötigt werden. Daher stellt diese Tabelle die Schnittstelle zu Daten für thermische Berechnungen dar, die in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht unmittelbar benötigt wird.

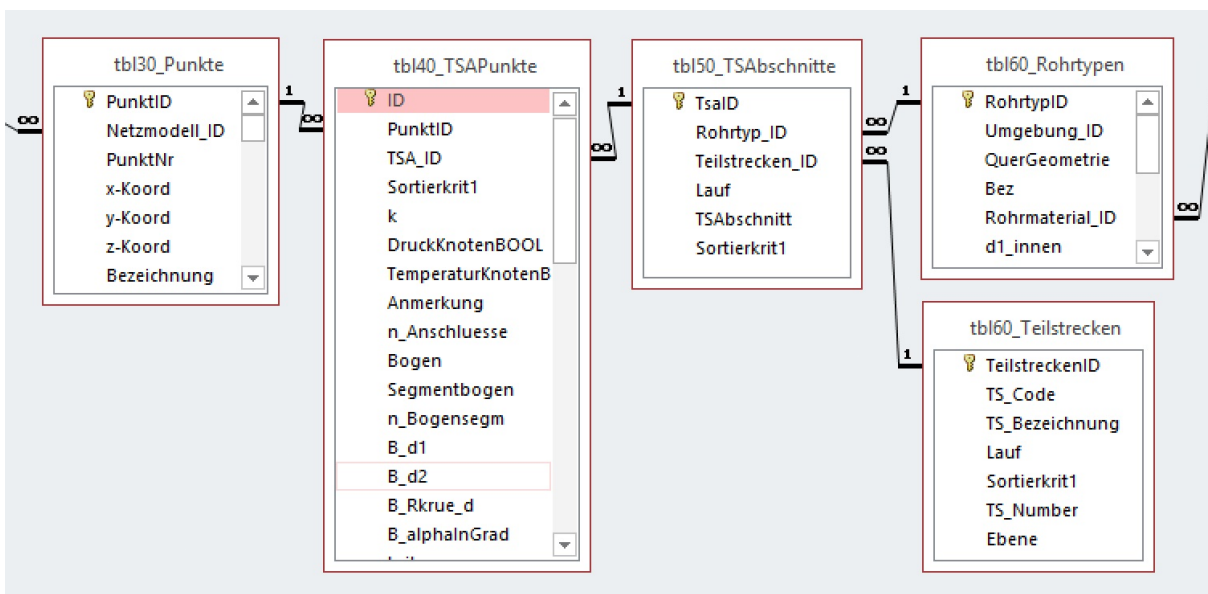


Abbildung 4.3.: Ausschnitt der Datenbankstruktur

Anschließend wird (mit beträchtlichem manuellem Aufwand) die Tabelle TBL40_TSAPUNKTE aus den n:m-verknüpften Tabellen TBL30_PUNKTE und TBL50_TEILSTRECKENABSCHNITTE aufgebaut. Denn einerseits kann ein Punkt aus dem Koordinatenverzeichnis in m Teilstreckenabschnitten (nämlich im Vorlauf und im Rücklauf) enthalten sein, andererseits ist aber auch ein Teilstreckenabschnitt aus n Punkten zusammengesetzt.

Da jedes Element in dieser Tabelle einer Komponente entspricht, werden hier auch die meisten komponentenspezifischen Eingabeparameter erfasst. So ist Abbildung 4.3 zu entnehmen, dass jeder Komponente, falls erforderlich, ein individueller Rauigkeitswert zugeordnet werden kann. Diese Eingabe muss jedoch nicht sofort händisch im Moment der Verknüpfung erfolgen, sondern kann auch später mit weniger Aufwand halbautomatisiert mit Aktualisierungsabfragen erfolgen oder mit MATLAB-Skripten erfolgen.

In Abbildung 4.4 wird gezeigt, wie der Teilstreckenabschnitt 6 der Teilstrecke 30 im Vorlauf der Wärmeübergabestation 11 *Siedeln Im Grundbau* durch Nachschlagen der Punkte aus TBL30_PUNKTE aufgebaut wird. Dem Kopf des Formulars ist in diesem Beispiel zu ent-

TSA-ID	Bezeichnung "TSAbschnitt"	Lauf	Sort.Krit.			
6	2,1.1 SiedelnImGrundbau	v	1.11			
RL-Bez.	DN 65 ST / 140 PE	Teilstrecken_ID	k/2,1/SiedelnImGrundbau			
Punkt	tbi40_TSAPunkte.TSAPunktSort	UnterEbene	NrEbene	k	mKnotei	w
P30 / St-T-Stueck	1	<input type="checkbox"/>		.00001	<input checked="" type="checkbox"/>	
P31 / St-Bogen_90°	2	<input type="checkbox"/>		.00001	<input type="checkbox"/>	
P32 / Einmalhahn	3	<input type="checkbox"/>		.00001	<input type="checkbox"/>	
P1269 / St-Reduktion	4	<input type="checkbox"/>		.00001	<input type="checkbox"/>	
* P1269 / St-Reduktion						
P1272 / St-Leitung						
Da P1273 / St-Bogen_45°						

Abbildung 4.4.: Aufbau des TSA 6 in TS 30

nehmen, dass der Teilstreckenabschnitt die Bezeichnung *2,1.1 SiedelnImGrundbau* hat und sich im Vorlauf befindet. Dieser Teilstreckenabschnitt entspricht einer Rohrleitung mit der Bezeichnung *DN 65 ST / 140 PE*. Das Sortierkriterium ist willkürlich auf 1.11 gesetzt.

In Abbildung 4.4 wird gerade an Position 4 mit dem Nachschlagefeld der Punkt 1269 / St-Reduktion ausgewählt. Die Rauigkeit ist auf $k = 0,00001m$ gesetzt. Die weiteren Parameter sind nicht dargestellt. Die komponentenspezifischen Parameter können sofort in den entsprechenden Feldern eingetragen oder später nachgetragen werden.

In analoger Weise werden auch alle weiteren Vorlauf-Teilstreckenabschnitte zusammengesetzt. Für den Aufbau der Rücklaufstrecken kann anschließend, unter Ausnutzung des Tabellen-Exports und -Imports über EXCEL, eine Kopie der Vorlaufstrecken mit umgekehrter Reihenfolge der Komponenten in die Datenbank eingefügt werden. Dadurch ist es möglich etwa die Hälfte des Dateneingabeaufwandes einzusparen. Nur dort, wo das Rücklaufnetz vom Aufbau des Vorlaufnetzes abweicht, sind noch andere oder zusätzliche Punkte einzufügen.

Teilstreckenabschnitte (Dateneingabe)							
TSA-ID	Bezeichnung "TSAbschnitt"	Lauf	Sort.Krit.				
7	2,1.2 SiedelnImGrundbau	v	1.12				
RL-Bez.	DN 32 ST / 110 PE	Teilstrecken_ID	k/2.1/SiedelnImGrundbau				
Punkt	tbi40_TSAPunkte.TSAPunktSort	UnterEbene	NrEbene	k	mKnoten	w	
P1269 / St-Reduktion	1	<input type="checkbox"/>		.00001	<input type="checkbox"/>		
P1274 / St-Leitung	2	<input type="checkbox"/>		.00001	<input type="checkbox"/>		
P1272 / St-Leitung	3	<input type="checkbox"/>		.00001	<input type="checkbox"/>		
P1268 / St-Bogen_90°	4	<input type="checkbox"/>		.00001	<input type="checkbox"/>		
P1273 / St-Bogen_45°	5	<input type="checkbox"/>		.00001	<input type="checkbox"/>		
P2028 / WUESt_11_Siedl.6		<input type="checkbox"/>		.00001	<input type="checkbox"/>		

Abbildung 4.5.: Aufbau des TSA 7 in TS 30

Teilstreckenabschnitte (Dateneingabe)							
TSA-ID	Bezeichnung "TSAbschnitt"	Lauf	Sort.Krit.				
58	2,1.2 SiedelnImGrundbau	r	1.17				
RL-Bez.	DN 32 ST / 110 PE	Teilstrecken_ID	k/2.1/SiedelnImGrundbau				
Punkt	tbi40_TSAPunkte.TSAPunktSort	UnterEbene	NrEbene	k	mKnoten	w	
P1273 / St-Bogen_45°	1	<input type="checkbox"/>		.00001	<input type="checkbox"/>		
P1268 / St-Bogen_90°	2	<input type="checkbox"/>		.00001	<input type="checkbox"/>		
P1272 / St-Leitung	3	<input type="checkbox"/>		.00001	<input type="checkbox"/>		
P1274 / St-Leitung	4	<input type="checkbox"/>		.00001	<input type="checkbox"/>		
P1269 / St-Reduktion	5	<input type="checkbox"/>		.00001	<input type="checkbox"/>		
*		<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>		

Abbildung 4.6.: Aufbau des TSA 58 in TS 30

Teilstreckenabschnitte (Dateneingabe)							
TSA-ID	Bezeichnung "TSAbschnitt"	Lauf	Sort.Krit.				
57	2,1.1 SiedelnImGrundbau	r	1.179				
RL-Bez.	DN 65 ST / 140 PE	Teilstrecken_ID	k/2.1/SiedelnImGrundbau				
Punkt	tbi40_TSAPunkte.TSAPunktSort	UnterEbene	NrEbene	k	mKnoten	w	
P1269 / St-Reduktion	1	<input type="checkbox"/>		.00001	<input type="checkbox"/>		
P32 / Einmalhahn	2	<input type="checkbox"/>		.00001	<input type="checkbox"/>		
P31 / St-Bogen_90°	3	<input type="checkbox"/>		.00001	<input type="checkbox"/>		
P30 / St-T-Stueck	4	<input type="checkbox"/>		.00001	<input checked="" type="checkbox"/>		
*		<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>		

Abbildung 4.7.: Aufbau des TSA 57 in TS 30

Die vier Abbildungen 4.4, 4.5, 4.6 und 4.7 zeigen zusammengenommen den komponentenweisen Aufbau der Teilstrecke 30 (zur Wärmeübergabestation 11, Siedeln im Grundbau), die

aus den vier Teilstreckenabschnitten 6, 7, 58 und 57 besteht. Die Wärmeübergabestation 11 ist dabei die letzte Komponente des Teilstreckenabschnitts 7 (s. Abbildung 4.5).

Nachdem alle Komponenten bereits in der Tabelle TBL40_TSAPUNKTE den Teilstreckenabschnitten zugeordnet sind, fehlen ggf. noch die komponentenspezifischen Parameter. In vielen Fällen bietet es sich an geeignete Aktualisierungsabfragen zu erstellen, die alle Datensätze mit den gewählten Eigenschaften gleichzeitig aktualisieren. Aufgrund der Vielzahl an Parametern ist aber auch dieser Aufwand nicht ganz unerheblich.

Als Beispiel zeigt Abbildung 4.8 die Aktualisierungsabfrage zur Änderung der Rauigkeit in allen Datensätzen der Tabelle TBL40_TSAPUNKTE auf $k = 0,00001m$.

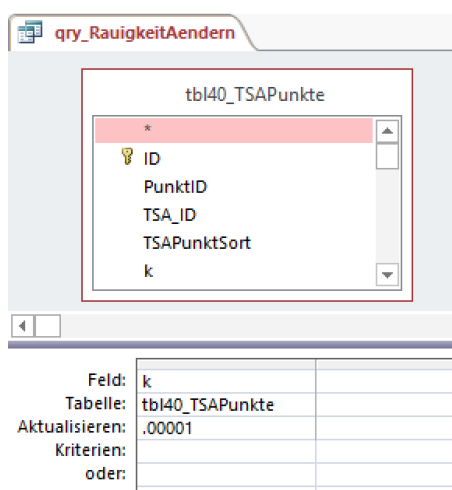


Abbildung 4.8.: Beispiel für eine Aktualisierungsabfrage zur Änderung der Rauigkeit

Es wäre aber auch möglich einzelnen Teilstrecken, einzelnen Teilstreckenabschnitten oder auch einzelnen Komponenten individuelle Rauigkeiten zuzuordnen.

Auch bei T-Stücken kann man sich die Eingabe einiger Parameter mit Aktualisierungsabfragen erleichtern. Jedoch gibt es bei T-Stücken auch Parameter, deren Eingabe sich nicht so leicht automatisieren lässt. Die Eingabe dieser Daten wird daher nachstehend exemplarisch beschrieben.

4.3.1. Eingabe der Parameter für T-Stücke

Um für den Anwender die Übersicht bei der Eingabe, im Vergleich zu Abbildung 4.4, etwas zu verbessern, kann für die T-Stücke das Formular T-STUECKE PARAMETER EINGEBEN, siehe Abbildung 4.9, zur Eingabe der Parameter genutzt werden, welches ausschließlich die

T-Stücke und ihre Parameter anzeigt. Die nicht blau hinterlegten Felder auf der linken Seite der Abbildung sollten bereits vorhanden sein, die auf der rechten Seite sind mit Aktualisierungsabfragen leicht zu auszufüllen.

PunktNr	PunktBez	TSNumber	TSAPunktSort	TX_Trennv	TXd1_TSNo	TXd2_TSNo	TXd3_TSNo	TX_d1	TX_d2	TX_d3	TStueck	TX_r	TX_alphaGra
18	St-T-Stueck	28	1	1	29	28	38	150	150	150	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
18	St-T-Stueck	29	18	1	29	28	38	150	150	150	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
18	St-T-Stueck	38	1	1	29	28	38	150	150	150	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
18	St-T-Stueck	12	1	-1	13	12	39	150	150	150	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
18	St-T-Stueck	13	10	-1	13	12	39	150	150	150	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
18	St-T-Stueck	39	9	-1	13	12	39	150	150	150	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
30	St-T-Stueck	30	1	1	38	37	30	150	150	65	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
30	St-T-Stueck	30	4	-1	34	39	30	150	150	65	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
30	St-T-Stueck	34	5	-1	34	39	30	150	150	65	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
30	St-T-Stueck	37	1	1	38	37	30	150	150	65	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
30	St-T-Stueck	38	10	1	38	37	30	150	150	65	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
30	St-T-Stueck	39	1	-1	34	39	30	150	150	65	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
33	St-T-Stueck	31	1	1	37	36	31	150	150	65	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
33	St-T-Stueck	31	5	-1	35	34	31	150	150	65	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
33	St-T-Stueck	34	1	-1	35	34	31	150	150	65	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
33	St-T-Stueck	35	6	-1	35	34	31	150	150	65	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
33	St-T-Stueck	36	1	1	37	36	31	150	150	65	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
33	St-T-Stueck	37	5	1	37	36	31	150	150	65	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
37	St-T-Stueck+Boge	32	1	1	36	33	32	150	150	65	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
37	St-T-Stueck+Boge	32	4	-1	33	35	32	150	150	65	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
37	St-T-Stueck+Boge	33	1	1	36	33	32	150	150	65	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
37	St-T-Stueck+Boge	33	9	-1	33	35	32	150	150	65	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
37	St-T-Stueck+Boge	35	1	-1	33	35	32	150	150	65	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
37	St-T-Stueck+Boge	36	6	1	36	33	32	150	150	65	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
73	St-T-Stueck	23	1	1	24	23	60	100	100	40	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
73	St-T-Stueck	24	4	1	24	23	60	100	100	40	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
73	St-T-Stueck	60	1	-1	24	23	60	100	100	40	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
73	St-T-Stueck	17	1	1	18	17	61	100	100	40	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
73	St-T-Stueck	18	3	-1	18	17	61	100	100	40	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
73	St-T-Stueck	61	14	-1	18	17	61	100	100	40	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90
83	St-T-Stueck	22	1	1	23	22	70	100	100	80	<input checked="" type="checkbox"/>	0	90

Abbildung 4.9.: Eingabe der benötigten Parameter für T-Stücke

Zur Eingabe der blau hinterlegten Felder hat der Autor es vorgezogen die Datensätze erstens nach *TXd3_TSNo* und zweitens nach *PunktNr* zu sortieren, dadurch stehen die Einträge des gleichen T-Stücks immer nah beieinander. Es sind aber auch andere Sortierungen möglich.

Bei der Eingabe empfiehlt es sich die angegebene Nummer der Teilstrecke *TSNumber* in der Systemskizze Abbildung 4.1 herauszusuchen. Da der Autor für das erste Element stets eine '1' eingegeben hat, identifiziert eine '1' bei *TSAPUNKTSORT* in diesem Fall immer das T-Stück am Beginn der Teilstrecke². Ist dagegen *TSAPunkt*>1, so steht das T-Stück am Ende der Teilstrecke.

In Abbildung 4.9 entspricht das T-Stück in den obersten drei Zeilen dem Knoten K19, da dieser z.B. in der obersten Zeile mit *TSNumber*=28 und *TSAPunktSort*=1 übereinstimmt. Deswegen sind die Werte der blau hinterlegten Parameter in diesen drei Zeilen identisch.

Mit der Systemskizze als Grundlage werden diese blau hinterlegten Parameter folgendermaßen belegt

²Grundsätzlich ist es auch erlaubt Kommazahlen einzugeben, z.B. um nachträglich weitere Komponenten einzufügen ohne die komplette Nummerierung zu ändern. Wäre die kleinste Sortierungszahl beispielsweise 0,01, so wäre dies die erste Komponente.

- die Kennzahl der Strömungsvariante (vgl. Tabelle 3.6) bei $TX_TrennVer$,
- die Nummer der Teilstrecke A bei $TXd1_TSNo$,
- die Nummer der Teilstrecke B bei $TXd2_TSNo$,
- die Nummer der Teilstrecke C bei $TXd3_TSNo$,
- der DN der an A angeschlossenen Rohrleitung bei TX_d1 ,
- der DN der an B angeschlossenen Rohrleitung bei TX_d2 und
- der DN der an C angeschlossenen Rohrleitung bei TX_d3 .

So lassen sich Zeile für Zeile die entsprechenden T-Stücke in der Systemskizze identifizieren und deren Parameter eintragen³.

4.3.2. Verwendete Werte

Zur Lage und den Komponenten des Rohrnetzes 'Energieverbund' stehen die folgenden Informationen zur Verfügung.

Vom Betreiber Hamburg Energie liegen unter anderem der Lageplan (s. Ausschnitt in Abbildung E.2) und das dazu gehörende Koordinatenverzeichnis (s. Ausschnitt in Abbildung E.3), mit Daten zur Position⁴ und Informationen zum Typ der Komponenten vor.

Rohrleitungen Als Rohrleitungen sind Stahlrohre der Fa. LOGSTOR verbaut. Deren Dimensionen und Toleranzen entsprechen der EN 253 und sind im Produktkatalog von LOGSTOR [20] angegeben. Mit diesen Angaben lassen sich der für die Modellierung wichtige Innendurchmesser $d_i = d_a - 2 * d_w$ und das für die Bögen benötigte Verhältnis von Krümmungsradius zu Rohrrinnendurchmesser R/d_i berechnen.

Die Rohrleitungsdaten aus dem Produktkatalog und die daraus abgeleiteten Größen sind in Tabelle 4.1 zusammengefaßt.

³Eine künftige Automatisierung dieser Zuordnung ist allerdings empfehlenswert, da diese manuelle Eingabe durch den Anwender leicht Fehler provozieren kann.

⁴Koordinaten nach UTM-System (*Universal Transverse Mercator*). Auf eine Korrektur der Streckenlängen unter Berücksichtigung des Maßstabsfaktors $M = \frac{1}{\cos(y/6380km)} \cdot 0,9996$ (y - östlicher/westlicher Abstand zum Mittelmeridian) wird wegen des geringen Einflusses im Gebiet Hamburg verzichtet (max. 40cm/km). Für nähere Information siehe [7].

Angaben LOGSTOR				abgeleitete Größen	
d_{nom} [mm]	$d_{\bar{a}}$ [mm]	d_w [mm]	$R/d_{\bar{a}}$	d_i [mm]	R/d_i
20	26,9	2,6	2,5	21,7	3,10
25	33,7	2,6	2,5	28,5	2,96
32	42,4	2,6	2,5	37,2	2,85
40	48,3	2,6	2,5	43,1	2,80
50	60,3	2,9	2,5	54,5	2,77
65	76,1	2,9	2,5	70,3	2,71
80	88,9	3,2	2,5	82,5	2,69
100	114,3	3,6	2,5	107,1	2,67
125	139,7	3,6	2,5	132,5	2,64
150	168,3	4,0	2,5	160,3	2,62
200	219,1	4,5	2,5	210,1	2,61
250	273	5,0	2,5	263	2,60
300	323,9	5,6	2,5	312,7	2,59

Tabelle 4.1.: Rohrleitungsdaten der Firma LOGSTOR (aus [20]) und daraus abgeleitete Größen

Diese Daten werden in der globalen Variablen NETZ in NETZ.N001.ROHRDATEN gespeichert⁵.

Die in der Ausgabedatei HEATGRIDTABLE angegebenen nominalen Rohrdurchmesser d_{nom} (entspricht DN) sind vor Verwendung in den Funktionen entsprechend der Tabelle 4.1 in die tatsächlichen Rohrdurchmesser d_i umzurechnen. Dies geschieht mit der bereits erwähnten Funktion $DN2d$.

Den meisten der folgenden Parameter liegen im Rahmen dieser Arbeit nicht verifizierte Annahmen bzw. Schätzungen zu Grunde, die deswegen als potentielle Schwachstellen dieses Modells anzusehen sind.

Rauigkeit Wie den Herstellerbescheinigungen im Anhang zu entnehmen ist, wurde das Rohrleitungsnetz erst ab Dezember 2012 in Betrieb genommen. Von einem relevanten Einfluss von Korrosionserscheinungen in den Rohrleitungen wird deswegen derzeit noch nicht ausgegangen. Für die technische Rauigkeit k wird daher in Anlehnung an [3] ein Wert von 0,00001 m geschätzt⁶.

⁵Die Rohrdaten anderer Rohrnetze werden in analoger Weise gespeichert.

⁶Andere Autoren empfehlen andere Werte. Mehr Sicherheit bei der Festlegung der Rauigkeit kann durch eine Rohrnetzanalyse nach DVGW-Arbeitsblatt GW 303 erreicht werden.

Bögen Es wird prinzipiell angenommen, dass es sich um Rohrbögen und nicht um Segmentbögen handelt.

Konfusor / Diffusor Es wird prinzipiell angenommen, dass die unterschiedlichen Durchmesser der Konfusoren und Diffusoren sich nicht plötzlich ändern, sondern über eine allmähliche Verengung/Erweiterung mit einem Winkel α verlaufen. Dieser Winkel wird mangels detaillierter Informationen auf 16° geschätzt, da als ausreichend weit von der strömungstechnisch ungünstigen plötzlichen Änderung entfernt eingeschätzt wird.

T- Stück Die Kantenrundung wird aufgrund fehlender Detailinformationen konservativ mit $0m$ geschätzt. Der Widerstandsbeiwert der T-Stücke wird kleiner, wenn die Kantenrundung tatsächlich größer sein sollte.

Kugelhahn Der Kugeldurchmesser $R2$ der im 'Energieverbund' verbauten Kugelhähnen wird vom Autor auf der Grundlage eines Datenblattes in der Technischen Dokumentation (s. Abbildung E.12) und der damit recherchierten Abmessungen der Kugelhähne (s. Abbildung E.13) abgeschätzt. Dabei wurde das Radienverhältnis R/r in Abhängigkeit vom DN wie folgt festgelegt:

$$\frac{R}{r} = \begin{cases} 1,42 & \text{für } DN \leq 32 \\ 1,51 & \text{für } 32 < DN < 80 \\ 1,53 & \text{für } DN \geq 80 \end{cases}$$

Mit diesen in der globalen Variable *Netz* hinterlegten Faktoren werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit die zum DN gehörenden Durchmesser $R2$ der Kugeln (in m) mithilfe der Funktion $DN2KugelR2$ berechnet.

Bei keinem der vorhandenen Kugelhähne ist jedoch der eingestellte Winkel φ bekannt. Es wird daher prinzipiell angenommen, dass die Kugelhähne vollständig geöffnet sind, d.h. $\varphi = 0^\circ$.

Nur in den Kurzschluss-Teilstrecken 32 und 44 wird der Winkel mit $\varphi = 82.8^\circ$ sehr nahe am Schließwinkel φ_{grenz} gewählt, um einen sehr kleinen Durchfluss durch die diese Leitung zu simulieren. Denn laut Aussage des Betreibers soll lediglich ein Einfrieren der Leitung verhindert werden. Wie der Kugelhahn tatsächlich eingestellt ist, ist nicht bekannt.

Wärmeübergabestation In der Technischen Dokumentation des Betreibers des 'Energieverbundes' befinden sich Herstellerbescheinigungen für die einzelnen Wärmeübergabestationen mit Angabe von Nennweiten, die in Tabelle 4.2 zusammengefasst sind.

DN	25	32	40	50	65
WüSt-Nr	4, 9-14, 16, 18-22	2, 3, 17	5	6	1, 8

Tabelle 4.2.: Anschlussdurchmesser der Wärmeübergabestationen im 'Energieverbund' gemäß Herstellerbescheinigungen

Für die Wärmeübergabestationen 7 und 15 liegen dem Autor keine Herstellerbescheinigungen vor.

Laut Aussage des Betreibers kommt in den Wärmeübergabestationen überwiegend das Regelventil *Samson 46-6* zum Einsatz. Dem Datenblatt zu diesem Ventiltyp lassen sich die in Abbildung 4.10 angegebenen Daten entnehmen.

Volumenstrom-Sollwerte für Wasser in m³/h

ΔP_{Soll}	ΔP_{Anlage}	ΔP_{Wirk}	DN	15				20	25	32 ¹⁾	40 ¹⁾	50 ¹⁾
			K_{VS}	0,4	1	2,5	4	6,3	8	12,5	16/20 ¹⁾	20/25 ¹⁾
			\dot{V} min	0,01	0,12	0,2	0,5	0,8	0,8	2	3	4
0,2 bar	0,1 bar	0,1 bar	\dot{V} max	0,14	0,45	0,85	1,8	2,6	3,0	7,1	8,9	10,7
0,5 bar	0,3 bar	0,2 bar	\dot{V} max	0,2	0,65	1,2	2,5	3,6	4,2	10	12,5	15
				–	–	–	1,3 ²⁾	2,3 ²⁾	3,5 ²⁾	5,8 ²⁾	9,1 ²⁾	14,1 ²⁾

¹⁾ zusätzliche Ausführung: Ventil mit Flanschgehäuse aus Sphäroguss (EN-JS1049). ²⁾ bei Überschreiten der angegebenen Volumenstromsollwerte ist auch bei kavitationsfreier Strömung mit steigendem Geräuschpegel zu rechnen (siehe AGFW-Merkblatt FW 514 "Bestimmung des Schallpegels von Regelarmaturen").

Abbildung 4.10.: k_{VS} -Werte des Regelventils Samson 46-6 in Abhängigkeit vom DN (aus [25])

Zur Berechnung des Druckverlustes nach Gleichung 2.3.2 ist der k_{VS} -Wert wichtig. Eine eindeutige Zuordnung eines k_{VS} -Wertes zu einem bestimmten Rohrdurchmesser DN ist für DN 15, DN 40, DN 50 sowie DN>50 anhand Abbildung 4.10 jedoch nicht möglich.

Da zu den im 'Energieverbund' eingebauten Wärmetauschern kaum Informationen vorliegen, werden die Berechnungsparameter a und b der Wärmeübergabestationen in dieser Arbeit mit den bereits angesprochenen MATLAB-Skripten aus den Messdaten des 1. Quartals 2016 empirisch ermittelt⁷. In Abbildung 4.11 sind diese Parameter im Einzelnen angegeben, wobei für die Wärmeübergabestation 15 und 16 die Mittelwerte der anderen Wärmeübergabestationen eingesetzt werden (s. Abschnitt 3.3.12).

⁷Die Genauigkeit der gespeicherten Druckmesswerte liegt in diesem Zeitintervall bei 0,1 bar. Mittlerweile speichert der Betreiber die Messwerte mit größerer Genauigkeit

Nr	a	b
1	1.1744e+05	-1.992
2	1.1068e+05	-2.0737
3	1.1573e+05	-1.9779
4	1.0309e+05	-2.0642
5	1.1646e+05	-2.0192
6	1.2212e+05	-1.9909
7	1.2019e+05	-1.9921
8	1.2006e+05	-2.147
9	1.1766e+05	-2.0171
10	97463	-2.0447
11	1.0906e+05	-2.0363
12	1.0714e+05	-2.0309
13	1.0451e+05	-2.0258
14	1.1313e+05	-2.0043
15	1.1256e+05	-2.0214
16	1.1256e+05	-2.0214
17	1.1884e+05	-2.007
18	1.0341e+05	-2.0212
19	97183	-2.0341
20	1.0737e+05	-2.003
21	94504	-2.0552
22	1.5509e+05	-1.8903

Abbildung 4.11.: Empirisch ermittelte Parameter a und b der Wärmeübergabestationen (nach Ersetzungen bei Nr. 15 und 16)

In der ACCESS-Datenbank wird die Nummer der in einem Teilstreckenabschnitt vorhandenen Wärmeübergabestation eingetragen. Die Berechnungsparameter a und b werden dagegen in der globalen Variablen NETZ.(NXXX).WUESTEN.WUESTENRFITPARAM abgelegt.

Spezialfall Wärmeübergabestationen Nr. 2, 3 und 4 Der Lageplan (s. Abbildung E.2) liefert keine detaillierte Auskunft darüber, wie der Rohrleitungsverlauf von Teilstrecke 40 (s. Abbildung 4.1) zu diesen drei Wärmeübergabestationen exakt ist. Der über die Teilstrecke 40 fließende Massenstrom entspricht jedoch der Summe dieser drei Wärmeübergabestationen. Jeder dieser drei Wärmeübergabestationen wird im Zuge der Modellierung stets je ein Drittel des Massenstroms aus Teilstrecke 40 zugewiesen.

Der Gesamtwiderstand berechnet sich dann für parallele Widerstände gemäß Gleichung 2.9.

Startwertfestlegung Als Startwerte werden neben den Massenströmen auch die mittleren Temperaturen des Fluids in den Teilstreckenabschnitten benötigt. Im Rahmen dieser Arbeit

wird nach Empfehlung des Betreibers für Teilstreckenabschnitte im Vorlauf eine mittlere Temperatur von 75° und im Rücklauf von 35° angenommen⁸.

Die Startwerte für die Massenströme werden unter Anwendung der Knotenregel für die Knoten (i.d.R. die T-Stücke) im Rohrnetz festgelegt. Dabei wird der Gesamtmassenstrom als Summe der Massenströme, die über die Wärmeübergabestationen und die Kurzschlüsse fließt, berechnet.

Da ein Einfrieren der Rohrleitungen verhindert werden soll, wird der Startwert für die Kurzschluss-Teilstrecken 32 und 44 auf 1% des Durchflusses der vorhergehenden Wärmeübergabestation geschätzt.

Zusammenfassung der geschätzten Parameter In Tabelle 4.3 sind die Parameter zusammengefasst, die geschätzt werden.

Tabelle 4.3.: Parameterfestlegungen / Potentielle Schwachstellen des Modells

Komponente	Parameter	Festlegung	Begründung
Rohr	Rauigkeit k	0,00001 m	[3]
Konfusor	KD_alphaInGrad	16 °	gemäß Literatur moderater Druckverlust
Diffusor	KD_alphaInGrad	16 °	gemäß Literatur moderater Druckverlust
T-Stück	TX_r	0 m	konservative Annahme
Kugelhahn	KH_R2	s. Abschnitt 4.3.2	s. Abschnitt 4.3.2
Kugelhahn	KH_phiInGrad	in Kurzschlüssen: fast zu (82.8°) alle anderen TS: offen (0°)	nur Frostschutz min. Druckverlust
Kurzschluss-TS	Startwert <i>m</i>	1% der vorhergehenden Wärmeübergabestation	nur Frostschutz
Wärmeübergabe- station	Fitparameter	s. Abbildung 3.28	s. Abschnitt 3.3.12
	Temperatur in TSA	im VL: 75° im RL: 35°	Vorgaben des Betreibers Vorgaben des Betreibers

Kritische Anmerkung

Jeder der geschätzten Parameter stellt potentiell eine zusätzliche Fehlerquelle dar.

⁸Realistischere Werte für die Temperaturen lassen mit einem thermischen Modell ermitteln. Die Kopplung mit einem thermischen Modell ist nicht im Umfang dieser Arbeit enthalten.

4.3.3. Übergabetabelle HEATGRIDTABLE für das Simulationsmodell

Nachdem alle Daten erfasst sind, wird mit der Tabellenerstellungsabfrage QRY_HEATGRIDCREATION die Übergabetabelle HEATGRIDTABLE erstellt (s. Ausschnitt in Abbildung 4.15), in der eine Vielzahl der für das Simulationsmodell erforderlichen komponentenspezifischen Daten enthalten sind (vgl. Abbildungen 4.12, 4.13 und 4.14).

Feldname	Felddatentyp	Be
ProjBez	Kurzer Text	Bezeichnung des Projektes
Netzbezeichnung	Kurzer Text	Bezeichnung des Netzes
EbenenNr	Zahl	Nummer der Ebene
EbenenBeschr	Kurzer Text	Beschreibung der Ebene
TSNumber	Zahl	Nummer der Teilstrecke
TSBezeichnung	Kurzer Text	Bezeichnung der Teilstrecke
TSlauf	Kurzer Text	Teilstrecke im V(orlauf), R(ücklauf) oder K(undenleitung)
TsaID	AutoWert	Nummer des Teilstreckenabschnittes
RohrBez	Kurzer Text	Bezeichnung der Rohrleitung
d1_innen	Zahl	Rohrinnendurchmesser DN
PunktNr	Zahl	Nummer des Punktes (im Koordinatenverzeichnis)
PunktBez	Kurzer Text	Bezeichnung des Punktes (im Koordinatenverzeichnis)
x-Koord	Zahl	x-Koordinate des Punktes in m
y-Koord	Zahl	y-Koordinate des Punktes in m
z-Koord	Zahl	z-Koordinate des Punktes in m
dx	Zahl	x-Abstand zum Vorgängerpunkt
dy	Zahl	y-Abstand zum Vorgängerpunkt
dz	Zahl	z-Abstand zum Vorgängerpunkt
dI	Zahl	Gesamtanstand zum Vorgängerpunkt
k	Zahl	Rauigkeit der Komponente mit Bezeichnung PunktBez
Bogen	Ja/Nein	Komponente ist ein Bogen, wenn "Ja"
B_d1	Zahl	DN des Bogens bei d1
B_d2	Zahl	DN des Bogens bei d2
B_Rkrue_d	Zahl	Krümmungsverhältnis des Bogens

Abbildung 4.12.: Parameter der Übergabetabelle HeatGridTable (Teil 1)

Zur Parametrierung des Simulationsmodells wird die Tabelle HEATGRIDTABLE als csv-Datei mit dem gespeicherten Export HEATGRIDTABLEEXPORT gespeichert und diese letztlich mittels MATLAB-Skript *Prepare*.m* importiert.

Kontrolle der erfassten Daten Zur Kontrolle der erfassten Daten steht in der Datenbank unter anderem der Bericht REP_ENERGIEVERBUND zur Verfügung. Durch die nach Ebenen, Teilstrecken und Teilstreckenabschnitten sortierte Darstellung, die auch ausgedruckt werden kann, kann damit u.a. der korrekte Aufbau der Teilstreckenabschnitte manuell überprüft werden.

Mit der Plotfunktion *FuncPlotNetz* in MATLAB lassen sich nach Import der Übergabetabelle HEATGRIDTABLE alle oder auch nur ausgewählte Teilstrecken eines Netzes als 3D-Plot darstellen (s. Abbildung 4.16). Durch Vergleich mit dem Lageplan, lassen sich so Fehler beim Aufbau des Rohrnetzes in der Datenbank optisch besser erkennen.

Feldname	Felddatentyp	Beschreibung (optional)
B_alphaInGrad	Zahl	Winkel des Bogens in Grad
Leitung	Ja/Nein	Komponente ist eine Rohrleitung, wenn "Ja"
KD	Ja/Nein	Komponente ist ein Konfusor/Diffusor, wenn "Ja"
KD_d1	Zahl	DN des Konfusor/Diffusor bei d1
KD_d2	Zahl	DN des Konfusor/Diffusor bei d2
KD_alphaInGrad	Zahl	Winkel der Verengung/Erweiterung in Grad
KD_KonDiff	Zahl	Konfusor, wenn "1"; Diffusor, wenn "-1"
KD_Richtung	Zahl	Strömungsrichtung durch Konfusor (1, -1)
TStueck	Ja/Nein	Komponente ist ein T-Stück, wenn "Ja"
TX_r	Zahl	Kantenrundung des T-Stücks in m
TX_alphaInGrad	Zahl	Winkel des Abzweigs des T-Stücks in Grad
TX_TrennVer	Zahl	T-Stück: 1 Trennung, -1 Vereinigung; Hosenstück: 2 Trennung, -2 Vereinigung
TX_Richtung	Zahl	Strömungsrichtung durch das T-Stück (1, -1)
TX_d1	Zahl	Innendurchmesser des Anschlusses d1
TXd1_TSNo	Zahl	Teilstreckennummer des Anschlusses d1
TX_d2	Zahl	Innendurchmesser des Anschlusses d2
TXd2_TSNo	Zahl	Teilstreckennummer des Anschlusses d2
TX_d3	Zahl	Innendurchmesser des Anschlusses d3
TXd3_TSNo	Zahl	Teilstreckennummer des Anschlusses d3
Kugelhahn	Ja/Nein	Komponente ist ein Kugelhahn, wenn "Ja"
Kh_R2	Zahl	Durchmesser der Kugel im Kugelhahn
Kh_phiInGrad	Zahl	Öffnungswinkel des Kugelhahns
Kh_d1	Zahl	Innendurchmesser bei d1
Kh_d2	Zahl	Innendurchmesser bei d2

Abbildung 4.13.: Parameter der Übergabetabelle HeatGridTable (Teil 2)

Feldname	Felddatentyp	Beschreibung
Wuest	Ja/Nein	Komponente ist eine Wärmeübergabestation, wenn "Ja"
WuestNr	Zahl	Nummer der Wärmeübergabestation
W_Bez	Kurzer Text	Bezeichnung der Wärmeübergabestation
W_d1	Zahl	Innendurchmesser bei d1
W_d2	Zahl	Innendurchmesser bei d2
UntereEbene	Ja/Nein	Komponente ist eine Unterebene, wenn "Ja"
NrEbene	Zahl	Nummer der Ebene
TSSort	Zahl	Sortierkriterium für Teilstrecken
TSASort	Zahl	Sortierkriterium für Teilstreckenabschnitte
TSAPunktSort	Zahl	Sortierkriterium für die Komponentender Teilstreckenabschnitte
TSCode	Kurzer Text	
TSALauf	Kurzer Text	Teilstrecke im V(orlauf) oder R(ücklauf)
TSAbschnitt	Kurzer Text	Bezeichnung des Teilstreckenabschnitts
thetaquer	Zahl	Mittlere Temperatur des Teilstreckenabschnitts

Abbildung 4.14.: Parameter der Übergabetabelle HeatGridTable (Teil 3)

ProjBez	NetzBezeich	Eben	EbenenBesch	TSNU	TSBezeichn	TS	Ts	RohrBez	d1	Pun	PunktBez	x-Koord	y-Koord	z-Ko	dx	dy	dz	dl	k	Bof	B_d1
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	72	EVB_ges_ein	v	109	DN 150 ST / 250	150	2013	Pumpendruckr	3566660.685	5930466.871	3.8				0	.00001	0	
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	72	EVB_ges_ein	v	109	DN 150 ST / 250	150	2012	St-Bogen_90°	3566656.685	5930466.871	3.8	-4	0	0	4	.00001	-1	150
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	72	EVB_ges_ein	v	109	DN 150 ST / 250	150	2000	St-T-Stueck	3566656.685	5930466.871	4.3	0	0	.5	.5	.00001	0	
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	1	BSU	k	110	DN 150 ST / 250	150	2000	St-T-Stueck	3566656.685	5930466.871	4.3				0	.00001	0	
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	1	BSU	k	110	DN 150 ST / 250	150	2001	St-Bogen_90°	3566656.685	5930467.271	4.3	0	.4	0	.4	.00001	-1	150
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	1	BSU	k	110	DN 150 ST / 250	150	2002	St-Bogen_90°	3566656.685	5930467.271	4.8	0	0	.5	.5	.00001	-1	150
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	1	BSU	k	110	DN 150 ST / 250	150	2003	St-Bogen_90°	3566656.685	5930467.271	4.8	-2	0	0	.2	.00001	-1	150
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	1	BSU	k	110	DN 150 ST / 250	150	2004	St-Bogen_90°	3566656.685	5930466.271	4.8	0	-1	0	1	.00001	-1	150
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	1	BSU	k	110	DN 150 ST / 250	150	2005	St-Bogen_90°	3566655.985	5930466.271	4.8	-5	0	0	.5	.00001	-1	150
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	1	BSU	k	110	DN 150 ST / 250	150	2006	St-Bogen_90°	3566655.985	5930465.771	4.8	0	-.5	0	.5	.00001	-1	150
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	1	BSU	k	110	DN 150 ST / 250	150	2007	St-Bogen_90°	3566651.485	5930467.771	4.8	-4.5	0	0	4.5	.00001	-1	150
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	1	BSU	k	110	DN 150 ST / 250	150	2008	St-Bogen_90°	3566651.485	5930447.771	4.8	0	-18	0	18	.00001	-1	150
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	1	BSU	k	110	DN 150 ST / 250	150	2009	St-Bogen_90°	3566651.485	5930447.771	3.3	0	0	-1.5	1.5	.00001	-1	150
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	1	BSU	k	110	DN 150 ST / 250	150	2010	Druckmessstel	3566650.485	5930447.771	3.3	-1	0	0	1	.00001	0	
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	1	BSU	k	110	DN 150 ST / 250	150	2018	WUJEST_1_BSU	3566650.485	5930447.771	2.7	0	0	0	-6	.00001	0	
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	1	BSU	k	111	DN 150 ST / 250	150	2016	Druckmessstel	3566650.485	5930447.771	2.7				0	.00001	0	
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	1	BSU	k	111	DN 150 ST / 250	150	2017	St-Bogen_90°	3566651.485	5930447.771	2.7	1	0	0	1	.00001	-1	150
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	1	BSU	k	111	DN 150 ST / 250	150	2008	St-Bogen_90°	3566651.485	5930447.771	4.8	0	0	2.1	2.1	.00001	-1	150
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	1	BSU	k	111	DN 150 ST / 250	150	2007	St-Bogen_90°	3566651.485	5930465.771	4.8	0	18	0	18	.00001	-1	150
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	1	BSU	k	111	DN 150 ST / 250	150	2006	St-Bogen_90°	3566655.985	5930465.771	4.8	4.5	0	0	4.5	.00001	-1	150
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	1	BSU	k	111	DN 150 ST / 250	150	2005	St-Bogen_90°	3566655.985	5930466.271	4.8	0	.5	0	.5	.00001	-1	150
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	1	BSU	k	111	DN 150 ST / 250	150	2004	St-Bogen_90°	3566656.685	5930466.271	4.8	.5	0	0	.5	.00001	-1	150
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	1	BSU	k	111	DN 150 ST / 250	150	2003	St-Bogen_90°	3566656.685	5930467.271	4.8	0	1	0	1	.00001	-1	150
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	1	BSU	k	111	DN 150 ST / 250	150	2002	St-Bogen_90°	3566656.685	5930467.271	4.8	-2	0	0	.2	.00001	-1	150
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	1	BSU	k	111	DN 150 ST / 250	150	2001	St-Bogen_90°	3566656.685	5930467.271	4.3	0	0	-5	.5	.00001	-1	150
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	1	BSU	k	111	DN 150 ST / 250	150	2000	St-T-Stueck	3566656.685	5930466.871	4.3	0	-4	0	.4	.00001	0	
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	73	EVB_ges_aus	r	112	DN 150 ST / 250	150	2000	St-T-Stueck	3566656.685	5930466.871	4.3				0	.00001	0	
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	73	EVB_ges_aus	r	112	DN 150 ST / 250	150	2014	St-Bogen_90°	3566656.685	5930466.871	2.3	0	0	-2	2	.00001	-1	150
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	73	EVB_ges_aus	r	112	DN 150 ST / 250	150	2015	Pumpendruckr	3566660.685	5930466.871	2.3	4	0	0	4	.00001	0	
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	29		v	1	DN 150 ST / 250	150	2000	St-T-Stueck	3566656.685	5930466.871	4.3				0	.00001	0	
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	29		v	1	DN 150 ST / 250	150	2011	St-Bogen_90°	3566656.685	5930466.871	6.3	0	0	2	2	.00001	-1	150
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	29		v	1	DN 150 ST / 250	150	974	BHKW_St-Leitu	3566656.685	5930466.871	6.3	0	0	0	0	.00001	0	
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	29		v	1	DN 150 ST / 250	150	971	St-Leitung	3566654.81	5930463.774	6.32	####	####	####	.02	####	.00001	0
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	29		v	1	DN 150 ST / 250	150	969	St-Bogen_90°	3566647.297	5930454.828	6.38	####	####	####	.06	####	.00001	-1
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	29		v	1	DN 150 ST / 250	150	968	St-Bogen_90°	3566648.196	5930453.868	6.53	.899	-.96	.15	####	.00001	-1	150
	Masterthesis: Energieverbun	1	Strang mit den	29		v	1	DN 150 ST / 250	150	966	St-Leitung	3566643.3	5930447.198	6.57	####	####	-6.67	.04	####	.00001	0

Abbildung 4.15.: Auszug aus der Übergabetabelle HEATGRIDTABLE zur Parametrierung des MATLAB-Modells

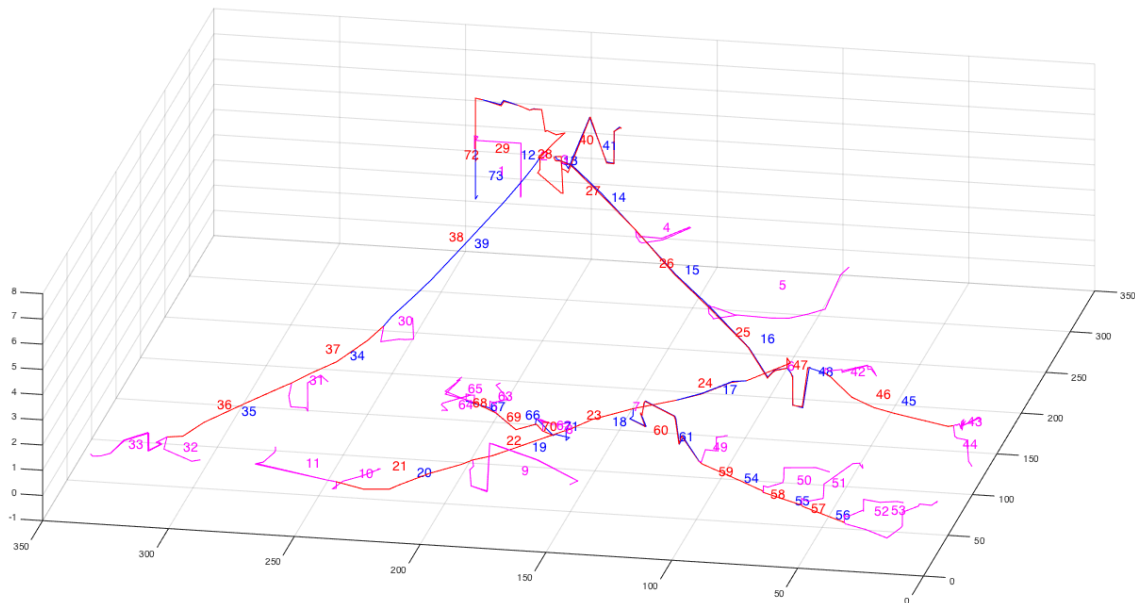


Abbildung 4.16.: Modell des Netzes 'Energieverbund' in Hamburg-Wilhelmsburg (erstellt mit *FuncPlot-Netz('N001',1,10)*)

4.3.4. Parametrierung des Rohrnetzes in Matlab

Ein Großteil der für die Parametrierung erforderlichen Daten wird in der ACCESS-Datenbank erfasst und in Matlab importiert. Einige der Daten werden aber direkt in Matlab erfasst. Diese werden nachfolgend nochmals kurz angesprochen.

Globale Variable NETZ In der Datei NETZ.MAT ist die Struktur-Variablen NETZ gespeichert, die auch die für den 'Energieverbund' (N001) relevanten Informationen enthält. Die Daten weiterer Rohrnetze sind in analoger Weise abgelegt.

Hinweis

Sofern die Funktion *calcRTSY* benötigt wird, müssen in der globalen Variablen NETZ stets die in Tabelle 4.4 aufgeführten Daten enthalten sein. Denn in der aktuellen Version der Programmierung werden infolge der Funktion *calcRTSAY* z.B. auch dann Parameter für Kugelhahnradien angefordert, wenn kein Kugelhahn vorhanden sein sollte. Gleiches gilt für die Wärmeübergabestationen usw.

Die Daten, die in der Struktur-Variablen NETZ grundsätzlich vorhanden sein müssen sind in Tabelle 4.4 aufgeführt.

Tabelle 4.4.: Obligatorische Daten der Struktur-Variablen NETZ

Name	muss vorhanden sein!
NETZ.(NXXX).HEATGRIDTABLE	+
NETZ.(NXXX).HEATGRIDPREPARED	+
NETZ.(NXXX).WUESTEN	+
NETZ.(NXXX).ROHRDATEN	+

Die Daten in *HeatGridTable* und *HeatGridPrepared* werden durch Ausführen des Skripts *Prepare*.m* zur Variablen NETZ hinzugefügt. Die Daten in NETZ.(NXXX).WUESTEN werden durch Ausführen der Skripte *ImportWuesten.m* ff. ergänzt. Lediglich die Daten in *Rohrdaten* sind für das Netz von Hand nachzutragen bzw. aus vorhanden Netzen hineinzukopieren und dann zu speichern.

Globale Variable CONST In der Datei CONST.MAT ist die Struktur-Variable CONST gespeichert, die die für das Modell relevanten Konstanten (aus [26]) zur Berechnung der Fluideigenschaften enthält. Für das Fluid Wasser sind diese in CONST.H2O abgelegt. Die Daten weiterer Fluide können in analoger Weise in CONST.(FLUID) usw. abgelegt werden.

CONST.H2O	
Field ▲	Value
ETA_A	0.4505
ETA_B	1.3975
ETA_C	613.1810
ETA_D	63.6970
ETA_E	6.8960e-05
RHO_A	1.0940e+03
RHO_B	-1.8132e+03
RHO_C	3.8640e+03
RHO_D	-2.4798e+03
CP_A	0.2399
CP_B	12.8647
CP_C	-33.6392
CP_D	104.7686
CP_E	-155.4709
CP_F	92.3726
lambda_A	-2.4149
lambda_B	0.0245
lambda_C	7.2121e-05

Abbildung 4.17.: Globale Variable CONST

4.4. Planungsvariante 'Vermaschter Energieverbund'

Bei dieser Planungsvariante wird die Modellierung und Parametrierung des zuvor beschriebenen 'Energieverbundes' als Grundlage genommen.

Zusätzlich sind im 'Vermaschten Energieverbund' nun Maschen im Vorlauf- und Rücklaufnetz vorhanden. Es sind zwei weitere T-Stücke verbaut und die zwei Kugelhähne in der zuvor mit Nummer 32 bezeichneten Teilstrecke *Entleerungschacht*, jetzt Teilstrecke 32 (VL) und Teilstrecke 74 (RL), sind voll geöffnet ($\alpha = 0^\circ$). Durch die zwei neuen Rohrleitungen werden insgesamt vier neue Maschen gebildet.

Es ist sinnvoll und sehr hilfreich auch bei solch vermeintlich kleinen Veränderungen eine Systemkizze anzufertigen, anhand der man die Anpassungen in der Datenbank nacheinander umsetzen und abhaken kann.

Bei der Ergänzung und Umnummerierung der Teilstrecken ist darauf zu achten, dass in der Datenbank auch bei allen T-Stücken, die an diese Teilstrecken anschließen, die neuen Teilstreckennummern eingetragen sind. Dabei sollte nicht vergessen werden, dass jedes T-Stück zu drei Teilstrecken gehört und somit die Daten für jedes betroffene T-Stück auch dreimal aktualisiert werden müssen.

Der Autor empfiehlt die Teilstrecken nacheinander strukturiert anzupassen:

- Bestimmen der Nummern i der neuen/angepassten Teilstrecken (hier: 11, 32, 72, 73, 74, 75, 76)
- Für $i = 11, 32, 72, 73, 74, 75, 76$
 - Falls nötig die Teilstreckennummer i in der Datenbank neu anlegen
 - Zur Teilstrecke i die Teilstreckenabschnitte mit deren Komponenten hinzufügen (dabei kann copy& paste genutzt werden). Die richtige Reihenfolge der Komponenten wird durch TSASort erreicht! Die Merkmale jeder einzelnen Komponente aktualisieren.
 - Bei Kugelhähnen sind ggf. die Öffnungswinkel anzupassen.
 - Bei T-Stücken sind die mit den Anschlüssen verbundenen TS-Nummern sowie ggf. die Strömungsvariante zu aktualisieren. (Beispiel: Aus Teilstrecke 72 wird Teilstrecke 75. Die entsprechende Teilstrecke wird also umgenannt. Nun muss beim T-Stück der TS 75 auch die TS-Nummer von 72 in 75 umgenannt werden. Außerdem ist dieses T-Stück auch mit den Teilstrecken 1 und 29 verbunden. Also muss auch in den Teilstrecken 1 und 29 bei diesem T-Stück die Nummer 72 in 75 umgenannt werden!)

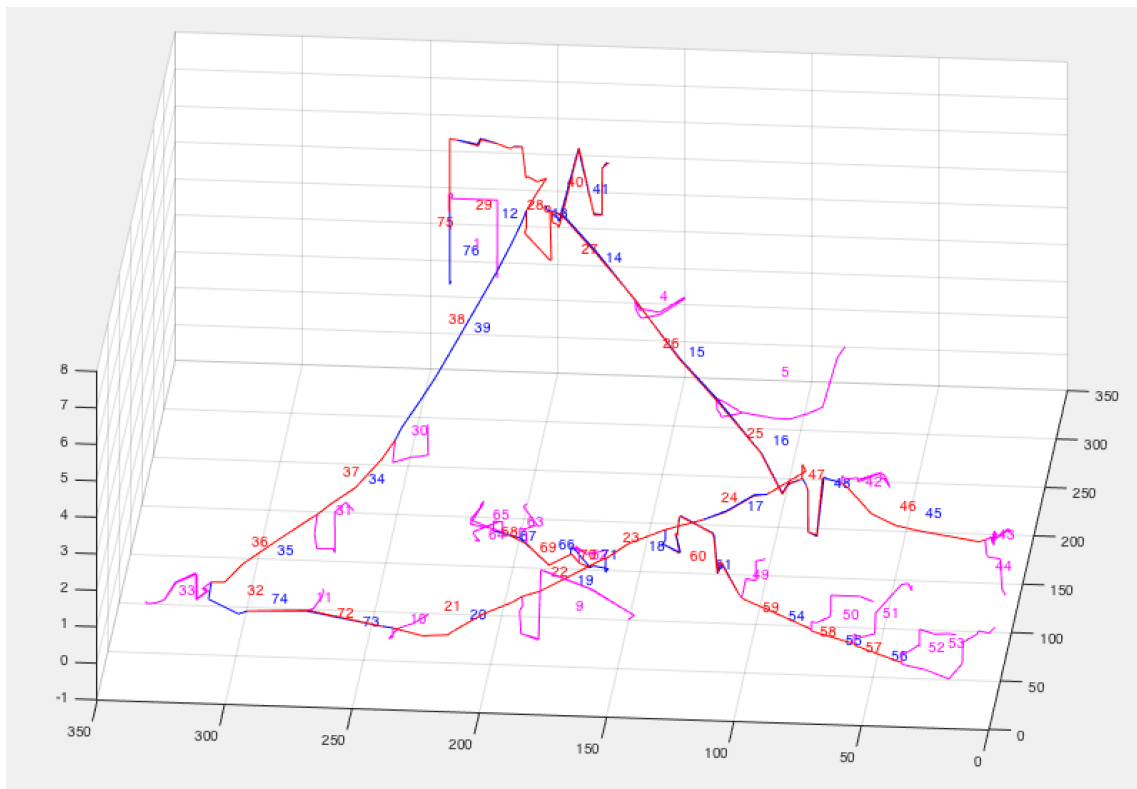


Abbildung 4.18.: 3D-Plot der Planungsvariante 'Vermaschter Energieverbund' (erstellt mit *FuncPlot-Netz('N004',1,10)*)

Das Ergebnis dieser Anpassung zeigt für die Planungsvariante 'Vermaschter Energieverbund' zusammenfassend der 3D-Plot in Abbildung 4.18.

Der korrekte Aufbau der geänderten Teilstrecken kann zudem mit dem Bericht REP_ENERGIEVERBUND überprüft werden.

Anschließend können die Skripte *SolveNLGS*.m*, *ImportNLGS*.m*, *CreateMstringNLGS*.m* und *Startwerte*.m* manuell aus den für den 'Energieverbund' vorhandenen Skripten erstellt und die obligatorischen Daten in der globalen Variable NETZ für das Netz N004 ergänzt werden.

Die Startwerte sind unter Einhaltung der Knotenregel zu wählen. Eine grafische Eingabe würde die Übersichtlichkeit erhöhen, ist jedoch noch nicht implementiert.

4.5. Modellierung anderer Rohrnetze

Neben dem Rohrnetz 'Energieverbund' (N001) und der Planungsvariante 'Vermaschter Energieverbund' (N004) werden in vergleichbarer Weise auch das Rohrnetz 'Einfache Maschenetz' (N002) und ein 'Berechnungsbeispiel' (N003) aus [14] in einer ACCESS-Datenbank und in der globalen Variablen NETZ angelegt.

Deren Modellierung verläuft in der zuvor bereits beschriebenen Weise, wenn auch mit deutlich geringerem Gesamtaufwand.

Für Modelle, die konstante Widerstandskoeffizienten R der Teilstrecken annehmen (Beispiel von AIGNER), wird die ACCESS-Datenbank zur Berechnung der Widerstandskoeffizienten mit *calcRTSY* gar nicht benötigt!

Die Ergebnisse der erstellten Simulationsmodelle werden im nächsten Kapitel vorgestellt.

5. Ergebnisse der Simulationsmodelle

Jedes auch noch so detailliert aufgenommene Rechnernetzmodell eines bestehenden Rohrnetzes muss hydraulisch überprüft werden. Denn nur anhand eines geprüften Rohrnetzmodells lassen sich konkrete Aussagen über neue Betriebszustände oder Planungsüberlegungen treffen. Hierzu ist es erforderlich, dass der Zufluss, die Entnahmen und an ausreichend vielen Stellen die Drücke eines Rohrnetzes gleichzeitig gemessen werden. In der sich anschließenden Messvergleichsrechnung werden die Ergebnisse der Rohrnetzmessung mit den entsprechenden Berechnungsergebnissen verglichen. Hierzu muss in der Regel das Netzmodell bzw. die Belastungsverteilung so lange korrigiert werden, bis sich eine weitgehende Übereinstimmung erzielen lässt. [23]

Zum Start der Simulationen wird *StarteMasterthesisMM* in MATLAB eingegeben. Es stehen dann die in Abbildung 5.1 aufgeführten Simulationsmodelle zur Auswahl.

Die Ergebnisse der nicht in Klammern gesetzten Simulationsmodelle werden nachfolgend vorgestellt.

```

Command Window
WELCHES SIMULATIONSMODELL SOLL BERECHNET WERDEN??

~~~~~
NACHRECHNEN VON BEISPIELAUFGABEN
1.1: Beispiel aus Aigner(2015), S. 396... CROSS-Verfahren, konstante RTS
1.2: Beispiel aus Aigner(2015), S. 396... Knoten-Strang-Verfahren mit interner R-Berechnung, konstante RTS
1.3: N003 Beispiel aus Grombach(2000), S. 1021... CROSS-Verfahren mit interner RTS-Berechnung, nur Rohrreibung
1.4: N003 Beispiel aus Grombach(2000), S. 1021... Knoten-Strang-Verfahren mit interner RTS-Berechnung, nur Rohrreibung

~~~~~
"EINFACHES MASCHENNETZ"
2.1: N002 "Einfaches Maschennetz"... CROSS-Verfahren mit interner RTS-Berechnung
2.2: N002 "Einfaches Maschennetz"... Knoten-Strang-Verfahren mit interner RTS-Berechnung (fixes m_ges)
2.3: N002 "Einfaches Maschennetz"... Knoten-Strang-Verfahren mit externer RTS-Berechnung (fixes m_ges)
(2.4): N002 "Einfaches Maschennetz"... Knoten-Strang-Verfahren mit externer RTS-Berechnung (konstante R)

~~~~~
REALES ROHRNETZ "ENERGIEVERBUND"
3.1: N001 "Energieverbund"... CROSS-Verfahren mit interner RTS-Berechnung (k=0.00001m, m-Startwerte 0,1bar-Wuesten)
3.11: N001 "Energieverbund"... CROSS-Verfahren mit interner RTS-Berechnung (k=0.00001m, m-Startwerte 0,1bar-Wuesten, Messwerte deltaPWuest direkt eingesetzt)
3.2: N001 "Energieverbund"... Knoten-Strang-Verfahren mit interner RTS-Berechnung (k=0.00001m, m-Startwerte 0,1bar-Wuesten)
3.25: N001k001m "Energieverbund"... Knoten-Strang-Verfahren mit interner RTS-Berechnung (k=0.001m, m-Startwerte 0,1bar-Wuesten)
(3.11): N001 "Energieverbund"... CROSS-Verfahren mit interner RTS-Berechnung (wie 3.11, aber ohne Entleerungsschächte (TS(32),TS(44)))
(3.12): N001 "Energieverbund"... CROSS-Verfahren mit interner RTS-Berechnung (wie 3.1, aber ohne Entleerungsschächte (TS(32),TS(44)))
(3.3): N001 "Energieverbund"... Knoten-Strang-Verfahren mit interner RTS-Berechnung (fixe Massenströme)

~~~~~
PLANUNGSVARIANTE "VERMASCHTER ENERGIEVERBUND"
4.1: N004 "Vermaschter Energieverbund"... CROSS-Verfahren mit mit interner RTS-Berechnung (m-Startwerte 0,1bar-Wuesten)
4.2: N004 "Vermaschter Energieverbund"... Knoten-Strang-Verfahren mit interner RTS-Berechnung (m-Startwerte 0,1bar-Wuesten)

(5): konventionelle Parallelschaltung mit n parallelen Teilstrecken nach DIANKOV, Knoten-Strang-Verfahren
~~~~~
Wähle bitte die entsprechende Zahl aus: |

```

Abbildung 5.1.: Auswahlmeneü von *StarteMasterthesisMM*

5.1. Beispielaufgaben

Zunächst werden zwei Beispielaufgaben aus der Literatur nachgerechnet und deren Ergebnis mit den Literaturangaben verglichen. Die Beispielaufgaben stammen aus [14, S. 1021 ff.] und [17, S. 396 ff.]

5.1.1. Beispiel von AIGNER

In [17, S. 396 ff.] wird als Beispielaufgabe ein Rohrnetz mit zwei Maschen, einem Hochbehälter und drei Entnahmestellen, siehe Abbildung 5.2, mit dem Cross-Verfahren als Gesamtschrittverfahren berechnet.

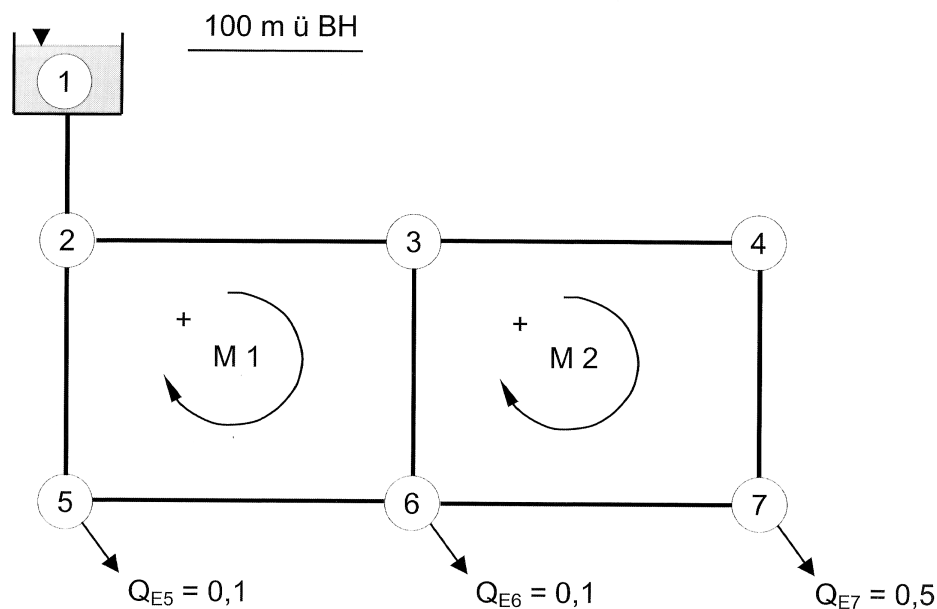


Abbildung 5.2.: Struktur des Rohrnetzes nach AIGNER (aus [17])

Die in dem Beispiel mit χ_{ij} bezeichneten Widerstandskoeffizienten der Rohrleitungen werden als konstant vorgegeben. Bei der Berechnung der neuen Startwerte wird ein Maschenausgleich nach CROSS durchgeführt. Da sich in [17, S. 397, Tafel 6.3] ein Druckfehler eingeschlichen hat, wurde von Herrn Prof. Aigner freundlicherweise die Berechnungsdatei zur Verfügung gestellt. Das damit berechnete, korrekte Ergebnis für die sechste Iteration ist in Abbildung 5.3 der rot hinterlegten Spalte Q_{Neu} zu entnehmen. Das Ergebnis der vorhergehenden fünften Iteration steht in der grün hinterlegten Spalte Q .

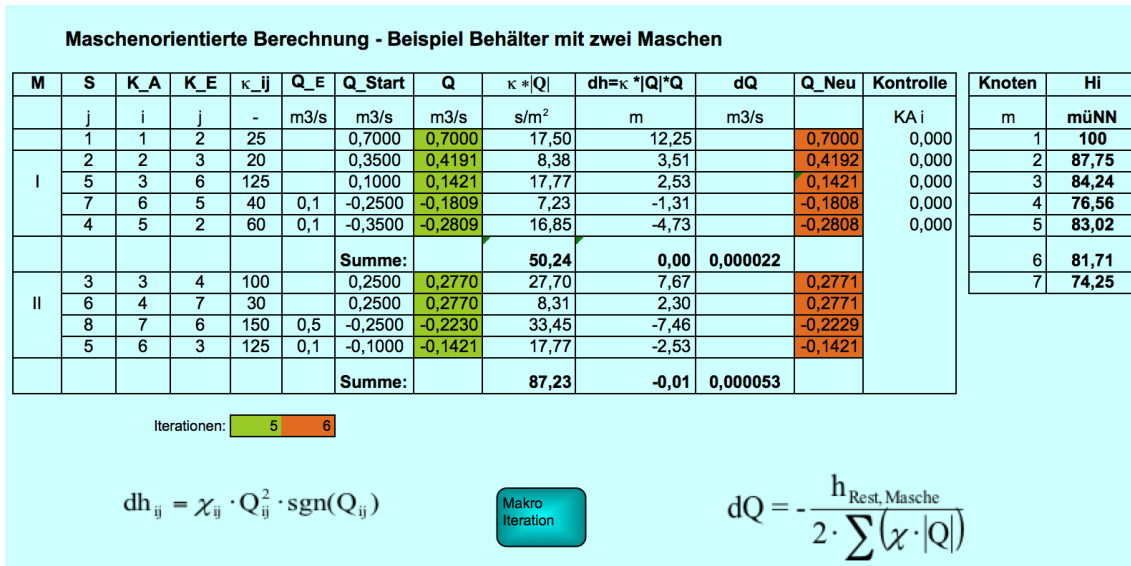


Abbildung 5.3.: Ergebnis von AIGNER nach der 6. Iteration ([17])

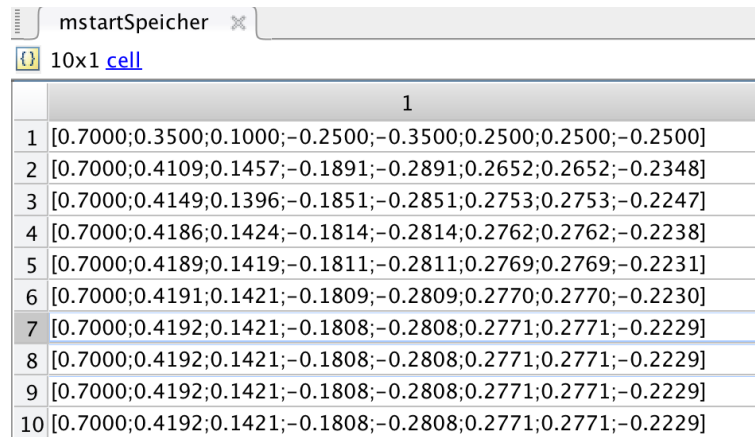
Die Startwerte (Spalte *Q_Start*) sowie das Ergebnis des fünften (Spalte *Q*) und sechsten Iterationsschrittes (Spalte *Q_Neu*) von AIGNER werden für einen übersichtlicheren Vergleich mit den eigenen Ergebnissen nochmal in Tabelle 5.1 angegeben.

Iteration	Teilstrecke							
	'1-2'	'2-3'	'3-6'	'6-5'	'5-2'	'3-4'	'4-7'	'7-6'
0	0,7000	0,3500	0,1000	-0,2500	-0,3500	0,2500	0,2500	-0,2500
5	0,7000	0,4191	0,1421	-0,1809	-0,2809	0,2770	0,2770	-0,2230
6	0,7000	0,4192	0,1421	-0,1808	-0,2808	0,2771	0,2771	-0,2229

Tabelle 5.1.: Startwerte und Ergebnisse der 5. und 6. Iteration gemäß AIGNER

Ergebnis der eigenen Berechnung mit HARDY-CROSS-Verfahren (Gesamtschrittverfahren) Die Abbildung 5.4 zeigt das eigene Berechnungsergebnis unter Verwendung des HARDY-CROSS-Verfahrens als Gesamtschrittverfahren. Dabei stehen in jeder Zeile die Ergebnisse in der gleichen Reihenfolge wie in Tabelle 5.1¹. Die Zeile 1 enthält die Startwerte, wie sie AIGNER in der Spalte *Q_Start* vorgibt. Die Werte der Zeilen 6 und 7 in Abbildung 5.4 entsprechen dem Ergebnis nach der fünften und sechsten Iteration des HARDY-CROSS-Verfahrens und stimmen mindestens bis auf die vierte Nachkommastelle mit den Ergebnissen von AIGNER in Tabelle 5.1 überein.

¹Hinweis: Während in Abbildung 5.3 die in beiden Maschen gemeinsam vorhandene Strecke '3 → 6' bzw. '6 → 3' für beide Maschen mit jeweils unterschiedlichem Vorzeichen angegeben wird, wird sie in Abbildung 5.4 lediglich einmal (an dritter Stelle) als Strecke '3 → 6' angegeben.

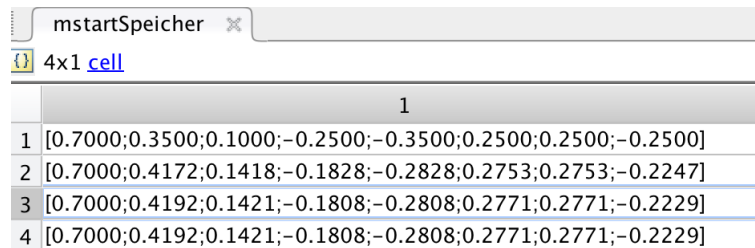


	1
1	[0.7000;0.3500;0.1000;-0.2500;-0.3500;0.2500;0.2500;-0.2500]
2	[0.7000;0.4109;0.1457;-0.1891;-0.2891;0.2652;0.2652;-0.2348]
3	[0.7000;0.4149;0.1396;-0.1851;-0.2851;0.2753;0.2753;-0.2247]
4	[0.7000;0.4186;0.1424;-0.1814;-0.2814;0.2762;0.2762;-0.2238]
5	[0.7000;0.4189;0.1419;-0.1811;-0.2811;0.2769;0.2769;-0.2231]
6	[0.7000;0.4191;0.1421;-0.1809;-0.2809;0.2770;0.2770;-0.2230]
7	[0.7000;0.4192;0.1421;-0.1808;-0.2808;0.2771;0.2771;-0.2229]
8	[0.7000;0.4192;0.1421;-0.1808;-0.2808;0.2771;0.2771;-0.2229]
9	[0.7000;0.4192;0.1421;-0.1808;-0.2808;0.2771;0.2771;-0.2229]
10	[0.7000;0.4192;0.1421;-0.1808;-0.2808;0.2771;0.2771;-0.2229]

Abbildung 5.4.: Ergebnis der eigenen Berechnung mit dem CROSS-Verfahren

Die Werte der Zeile 10 (9. Iteration) in Abbildung 5.4 entsprechen dem Endergebnis, für welches das Abbruchkriterium $\epsilon = \|F_{\text{Maschen}}\| < 10^{-4}\text{Pa}$ erfüllt ist.

Ergebnis der eigenen Berechnung mit Knoten-Strang-Verfahren Die Abbildung 5.5 zeigt das Rechenergebnis unter Verwendung des Knoten-Strang-Verfahrens. Die Zeile 1 enthält die anfänglichen Startwerte, wie sie AIGNER in der Spalte Q_{Start} vorgibt. Die Werte der Zeile 3 (2. Iteration) in Abbildung 5.5 stimmen mindestens bis auf die vierte Nachkommastelle mit den Werten der sechsten Iteration in Tabelle 5.1 überein.



	1
1	[0.7000;0.3500;0.1000;-0.2500;-0.3500;0.2500;0.2500;-0.2500]
2	[0.7000;0.4172;0.1418;-0.1828;-0.2828;0.2753;0.2753;-0.2247]
3	[0.7000;0.4192;0.1421;-0.1808;-0.2808;0.2771;0.2771;-0.2229]
4	[0.7000;0.4192;0.1421;-0.1808;-0.2808;0.2771;0.2771;-0.2229]

Abbildung 5.5.: Ergebnis der eigenen Berechnung mit dem Knoten-Strang-Verfahren

Die Zeile 4 (3. Iteration) zeigt das Endergebnis, für welches das Abbruchkriterium $\epsilon = \|F_{\text{Maschen}}\| < 10^{-4}\text{Pa}$ erfüllt ist.

5.1.2. Beispiel von GROMBACH

In [14, S. 1021 ff.] wird als Beispielaufgabe ein Rohrnetz mit drei Maschen, einem Hochbehälter und sechs Entnahmestellen entsprechend Abbildung 5.6 mit dem CROSS-Verfahren

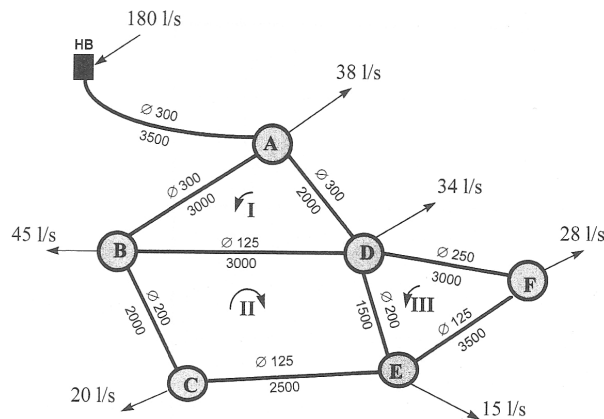


Abbildung 5.6.: Prinzipielle Struktur des Rohrnetzes nach GROMBACH (aus [14, S. 1021 ff.]

als Einzelschrittverfahren berechnet. Dabei wird für die Widerstandskoeffizienten der Teilstrecken die Rohrreibung, anhand der Angaben für Rohrrauigkeit, Durchmesser und Länge der Teilstrecken, gemäß Abbildung 5.7 berücksichtigt.

Tabelle 7.3.4.11: Beispiel Rohrnetzrechnung (Handrechnung) nach Cross (Rohrrauigkeit $k = 0,1 \text{ mm}$ gemäß Tabelle 7.3.1.07)

Rohrnetzdaten				Annahme			Korrektur				Korrektur		Ergebnis			
Nr.	Ring	Strang	∅ mm	Länge m	Q_0 l/s	l m/km	h_f m	h_f/Q_0		Q_0 l/s	l m/km	h_f m	h_f/Q_0			
1		HB - A	500	3500	180	1,390	4,87									
2	I	A - B	300	3000	65	2,570	7,71	0,119	-1,52	+63,48	2,457	7,37	0,116	0,54		+ 62,9
3		B - D	125	3000	0				-1,52 + 3,08	+1,56	0,203	0,61	0,391	0,54	0,23	+ 0,8
4		D - A	300	2000	-77	3,535	7,07	0,092	-1,52	-78,52	3,664	-7,33	0,093	0,54		- 79,1
							+ 0,64	0,211				+ 0,65	0,600			
					$\Delta Q = \frac{-0,64}{2 \cdot 0,211} = -1,52$						$\Delta Q = \frac{-0,65}{2 \cdot 0,600} = -0,54$					
5	II	C - B	200	3000	-20	2,105	-6,32	0,316	+3,08	-16,92	1,568	-4,70	0,278	-0,23		- 17,1
6		E - C	125	2500	0				+3,08	3,08	0,686	1,71	0,557	-0,23		2,9
7		D - E	200	1500	15	1,223	1,85	0,123	+3,08 + 2,28	20,36	2,192	3,29	0,161	-0,23 - 0,65		19,5
8	B - D	125	3000	-1,52	0,193	-0,58	0,382	+3,08 - 0,54	1,02	0,096	0,29	0,282	-0,23		0,8	
							- 5,05	0,821				+ 0,59	1,278			
					$\Delta Q = \frac{-5,05}{2 \cdot 0,821} = +3,08$						$\Delta Q = \frac{-0,59}{2 \cdot 1,278} = -0,23$					
9	III	D - C	200	1500	18,08	1,770	2,65	0,147	+2,28 - 0,23	20,13	2,136	3,20	0,159	-0,65		19,5
10		E - F	125	3500	0				+2,28	2,28	0,408	1,43	0,626	-0,65		1,6
11		F - D	250	3000	-28	1,325	-3,98	0,412	+2,28	-25,72	1,146	-3,44	0,134	-0,65		- 26,4
							- 1,32	- 0,289				+ 1,19	0,919			
					$\Delta Q = \frac{-1,32}{2 \cdot 0,289} = +2,28$						$\Delta Q = \frac{-1,19}{2 \cdot 0,919} = -0,65$					

Ausgleichsformel für Druckhöhenausgleich:

$$\Delta Q = - \frac{\sum h_f}{2 \sum |h_f / Q|}$$

Kontrolle:

- Knoten A: $180 = 38 + 62,9 + 79,1$
- Knoten B: $62,9 = 45 + 17,1 + 0,8$
- Knoten C: $17,1 = 20 - 2,9$
- Knoten D: $79,1 + 0,8 = 34 + 26,4 + 19,5$
- Knoten E: $19,5 = 15 + 2,9 + 1,6$
- Knoten F: $26,4 + 1,6 = 28$

Abbildung 5.7.: Ergebnis nach der 2.ten Iteration nach GROMBACH (aus [14])

Das Ergebnis für die gelb umrandeten Stränge² nach der zweiten Iteration ist für einen über-

²Es ist zu anzumerken, dass die Startwerte Q_0 der Stränge B-D und D-E (im Ring III fälschlich mit D-C

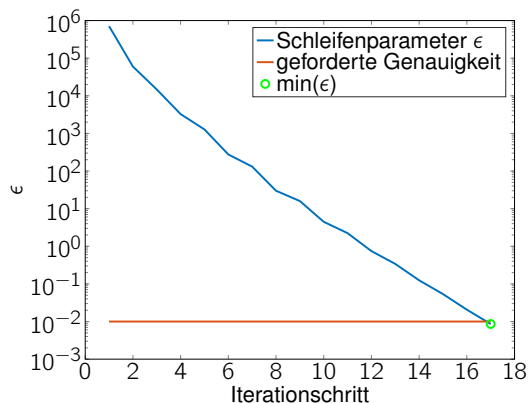
sichtlicheren Vergleich mit den eigenen Ergebnissen nochmals in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Strecke	HB-A	A-B	B-D	D-A	C-B	E-C	D-E	E-F	F-D
l/s	180	62,9	0,8	-79,1	-17,1	2,9	19,5	1,6	-26,4

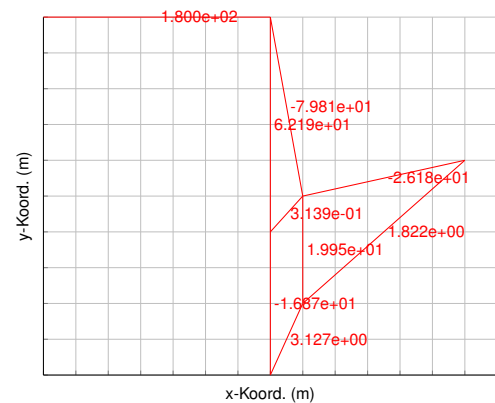
Tabelle 5.2.: Ergebnis der 2. Iteration gemäß GROMBACH

Ergebnis der eigenen Berechnung (in l/s) mit HARDY-CROSS-Verfahren (Gesamtschrittverfahren) Im Gegensatz zu GROMBACH wird bei der eigenen Berechnung das CROSS-Verfahren nicht als Einzelschrittverfahren, sondern als Gesamtschrittverfahren angewendet, wodurch sich etwas andere Zwischenergebnisse ergeben.

Wie Abbildung 5.8a zeigt, wird als Abbruchkriterium $\epsilon = \|F_{\text{Maschen}}\| < 10^{-2} l/s$ gewählt und diese Bedingung nach 17 Iterationen erfüllt.



(a) Schleifenparameter



(b) Ergebnis nach 2.ter Iteration

Abbildung 5.8.: Ergebnisse der Nachrechnung mit dem CROSS-Verfahren als Gesamtschrittverfahren

(a) Verlauf des Schleifenparameters ϵ (in l/s)

(b) Ergebnis (in l/s) nach der 2. Iteration

Das Ergebnis nach der zweiten Iteration zeigt Abbildung 5.8b und ist Zeile 3 der Abbildung 5.9 für den Vergleich mit Tabelle 5.2 angegeben.

bezeichnet), die jeweils zu zwei Maschen gehören, während desselben Iterationsschrittes in den einzelnen Maschen unterschiedlich sind.

globalMDOTSpeicher	
18x1	cell
	1
1	[180;65;0;-77;-20;0;15;0;-28]
2	[180;63.6898;3.8437;-78.3102;-14.8461;5.1539;24.1460;3.9921;-24.0079]
3	[180;62.1869;0.3139;-79.8131;-16.8730;3.1270;19.9489;1.8219;-26.1781]

Abbildung 5.9.: Ergebnis der eigenen Berechnung (in l/s) mit dem CROSS-Verfahren

Das Ergebnis nach der zweiten Iteration liegt, trotz etwas abweichender Berechnungsweise, sehr nahe am Ergebnis von GROMBACH.

Das Endergebnis nach der 17. Iteration, für welches das Abbruchkriterium $\epsilon = \|F_{\text{Maschen}}\| < 10^{-2} \text{ l/s}$ erfüllt ist, zeigt die Abbildung 5.10.

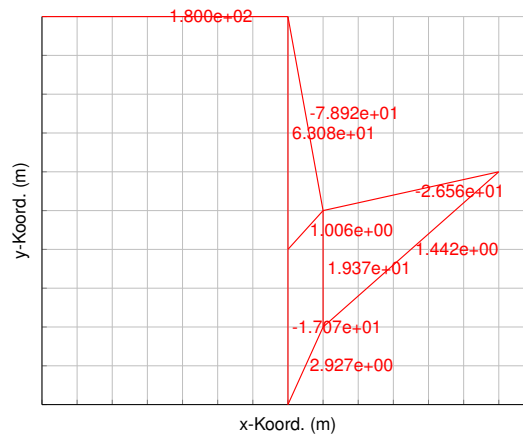


Abbildung 5.10.: Ergebnis (in l/s) nach der 17. Iteration mit dem CROSS-Verfahren

Ergebnis der eigenen Berechnung (Knoten-Strang-Verfahren) Mit dem Knoten-Strang-Verfahren wird das Abbruchkriterium $\epsilon = \|F_{\text{Maschen}}\| < 10^{-2} \text{ l/s}$ bereits nach 9 Iterationen erfüllt, wie der Verlauf in Abbildung 5.11a zeigt. Das Ergebnis nach der 9. Iteration in Abbildung 5.11b ist im Rahmen der angegebenen Genauigkeit der Werte identisch mit den Ergebnissen in Abbildung 5.10.

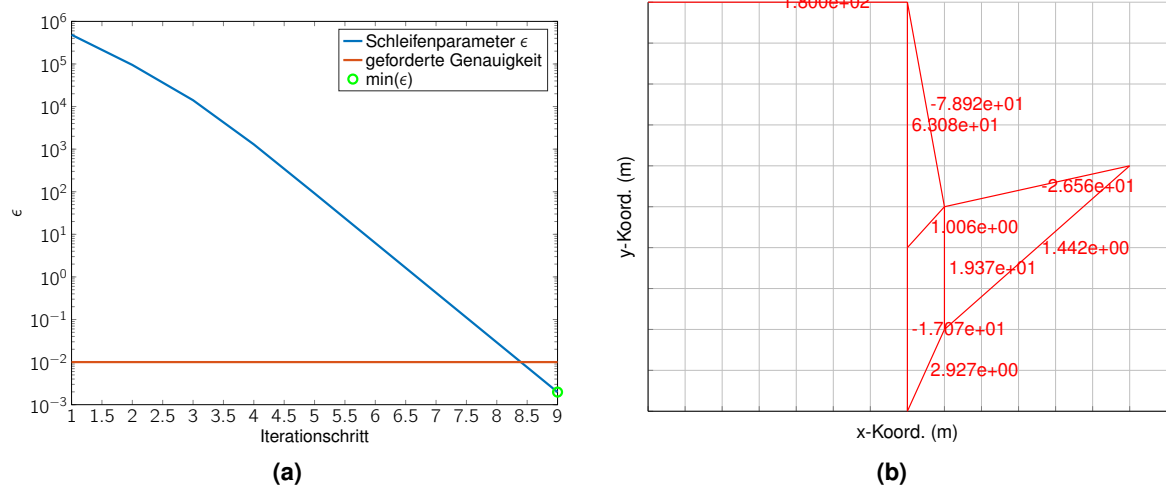


Abbildung 5.11.: Ergebnisse der Nachrechnung mit dem Knoten-Strang-Verfahren

(a) Verlauf des Schleifenparameters ϵ (in l/s)

(b) Durchfluss (in l/s) nachdem Abbruchkriterium erfüllt

5.2. Rohrnetz 'Einfaches Maschennetz'

In Abbildung 5.12 ist die Struktur des Netzes und die verwendete Nummerierung der Teilstrecken angegeben³. Mit Ausnahme der Teilstrecken 2, 3, 8 und 9, die vom Autor als gerade Rohrleitungsstücke eingefügt wurden, kommen die übrigen Teilstrecken auch im Rohrnetz 'Energieverbund' vor (dort die Teilstrecken 72, 73, 30, 31, 34 und 37) und enthalten somit alle zuvor vorgestellten Komponenten, wie Kugelhähne, Konfusoren, Diffusoren, Bögen, Wärmeübergabestationen und T-Stücke.

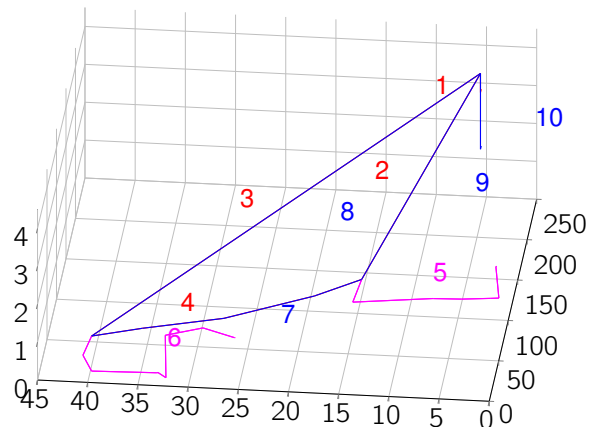


Abbildung 5.12.: Struktur des 'Einfachen Maschennetzes' mit Nummerierung der Teilstrecken

Damit nimmt der Komplexitätsgrad der Modellierung gegenüber den zuvor berechneten Beispielen zu.

Der Gesamtmassenstrom strömt im Vorlauf (rot) in Teilstrecke 1 und im Rücklauf (blau) aus Teilstrecke 10 wieder heraus.

Randbedingungen Im Rahmen des Modells⁴ wird im Vorlauf bis zu den Wärmeübergabestationen eine Temperatur von 75°C unterstellt und im Rücklauf hinter den Wärmeübergabestationen eine Temperatur von 35°C . Die Rauigkeit wird in allen Teilstrecken mit $k = 10^{-5}\text{m}$ angenommen.

Keiner der Massenströme wird als unveränderlich festgelegt, außer es wird explizit darauf hingewiesen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Modellvarianten vorgestellt.

³Die Vor- und Rücklaufleitungen liegen so nah beieinander, dass sie nur die rote und blaue Beschriftung zu unterscheiden sind.

⁴Nach Einbindung eines thermischen Modells, das nicht Bestandteil dieser Arbeit ist, lassen sich auch realistischere Temperaturverläufe in den Rohrleitungen berücksichtigen.

5.2.1. Cross-Verfahren

Als Gesamtmassenstrom wird $\dot{m}_{ges} = 10 \frac{kg}{s}$ festgelegt. Die Startwerte in den einzelnen Teilstrecken werden unter Einhaltung der Knotenregel wie in Abbildung 5.13a angegeben gewählt.

Mit diesen Startwerten ergeben sich in den drei Maschengleichungen die Funktionswerte der Abbildung 5.13b. Die größte Druckdifferenz von über 5 bar weist anfänglich die Masche 2 auf, die die beiden Kundenleitungen beinhaltet.

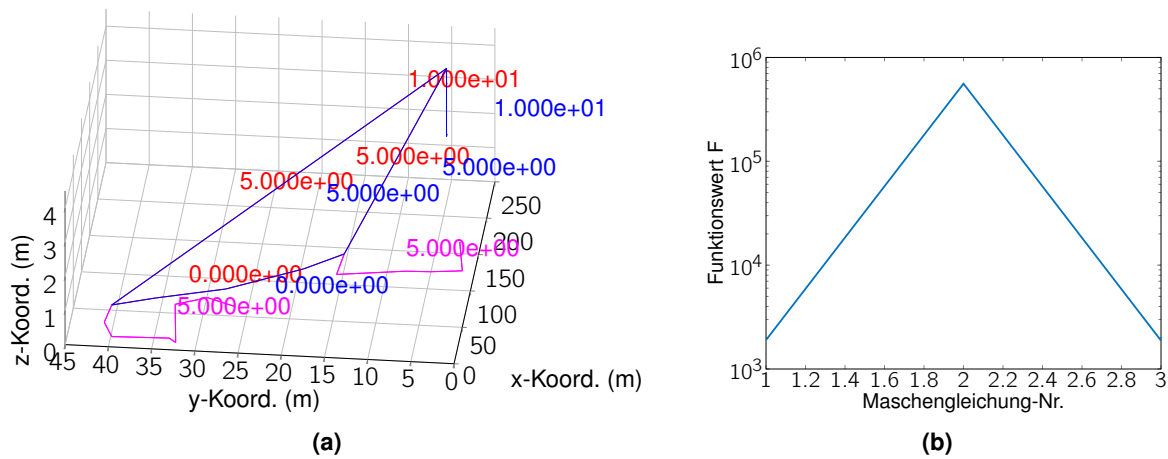


Abbildung 5.13.: Diagramme zur Darstellung der Startwerte und der Funktionswerte der Maschengleichungen

(a) Startwerte für die Massenströme \dot{m} (in $\frac{kg}{s}$)

(b) Funktionswerte der Maschengleichungen in Pa (nur ganzzahlige Gleichungsnummern sinnvoll)

Mit diesen Startwerten wird gemäß Abbildung 5.14a nach sechs Iterationen das Abbruchkriterium $\epsilon < 1Pa$ erfüllt. Ein Blick auf die Funktionswerte der Knotengleichungen in Abbildung 5.14c zeigt, dass die Knotenregel nach wie vor erfüllt ist, da diese mit kleiner $10^{-15} kg/s$ alle quasi Null sind. Mit den Funktionswerten der einzelnen Maschengleichungen in Abbildung 5.14e lässt sich nachvollziehen welchen Anteil die einzelnen Maschengleichungen bei der Berechnung des ϵ haben. In Masche 2 ist mit etwa 0,6 Pa die größte Druckdifferenz zu beobachten.

Die berechneten Massenströme in den einzelnen Teilstrecken zeigt Abbildung 5.14b. Der Gesamtmassenstrom der Teilstrecke 1 im Vorlauf (rot) verteilt sich nicht ganz gleichmäßig auf die Teilstrecken 2 und 3, sondern es fließen etwa $5,557 \frac{kg}{s}$ über Teilstrecke 2 und nur $4,443 \frac{kg}{s}$ über Teilstrecke 3.

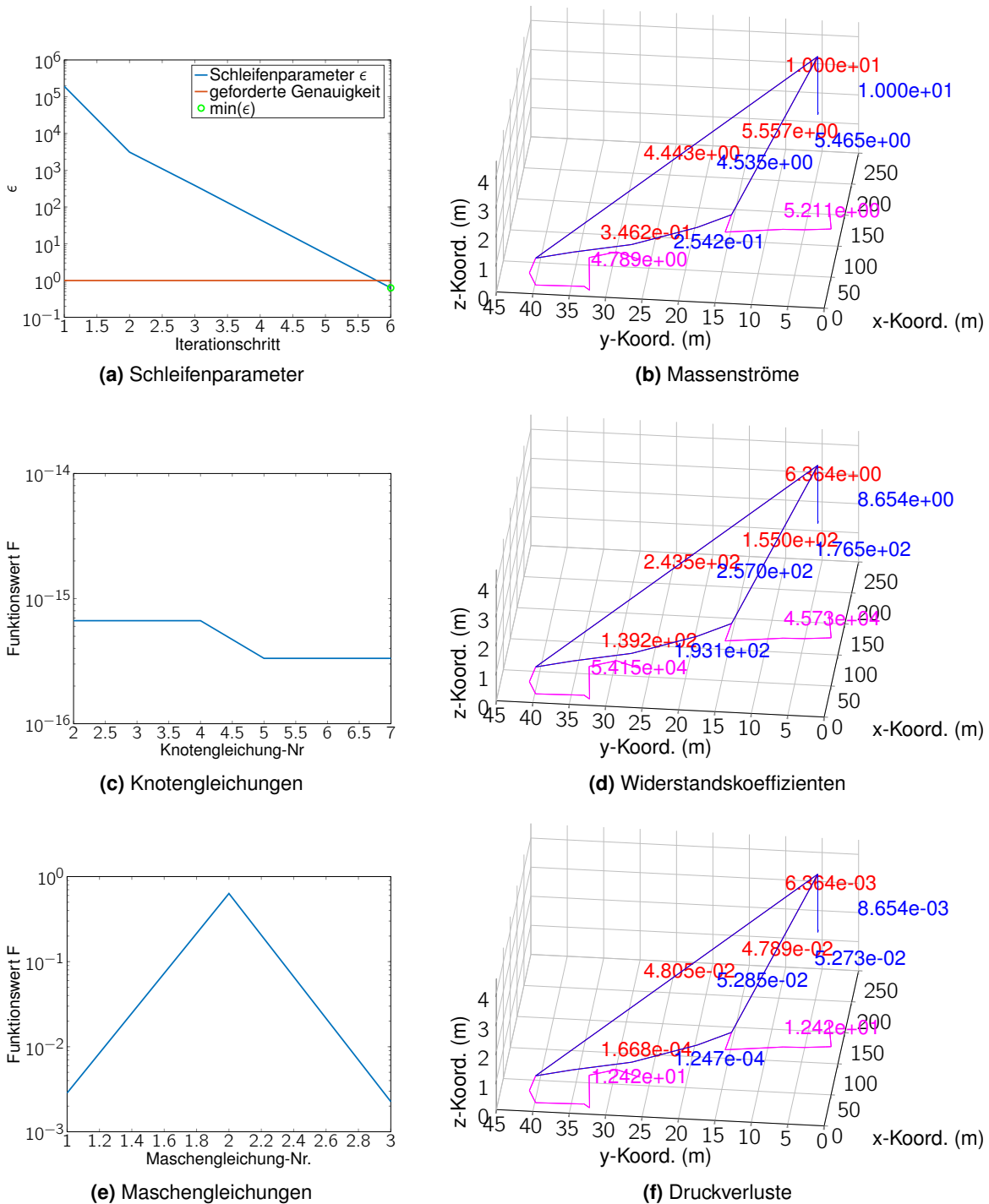


Abbildung 5.14.: Berechnungsergebnisse für das 'Einfache Maschennetz' (CROSS-Verfahren, $\dot{m}_{ges} = 10 \frac{kg}{s}$)
 (a) Verlauf des Schleifenparameters $\epsilon = \|F_{Maschen}\|$ (in Pa) über der Zahl der Iterationen (nur ganzzahlige Iterationsschritte sinnvoll)
 (b) Berechnete Massenströme \dot{m} (in $\frac{kg}{s}$)
 (c) Funktionswerte der Knotengleichungen in $\frac{kg}{s}$ (nur ganzzahlige Gleichungsnummern sinnvoll)
 (d) Berechnete Widerstandskoeffizienten ($\frac{Pa}{(\frac{kg}{s})^2}$)
 (e) Funktionswerte (absolut) der Maschengleichungen in Pa (nur ganzzahlige Gleichungsnummern sinnvoll)
 (f) Berechnete Druckverluste (in bar) in den Teilstrecken

Betrachtet man die berechneten Widerstandskoeffizienten in Abbildung 5.14d so weist Teilstrecke 2 einen Widerstandskoeffizienten von $155,0 \frac{\text{Pa}}{(\text{kg/s})^2}$ auf, während bei Teilstrecke 3 dieser $243,5 \frac{\text{Pa}}{(\text{kg/s})^2}$ beträgt.

Über Teilstrecke 4 fließt ein recht kleiner Massenstrom von etwa $0,346 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ zur Teilstrecke 6. Während der Massenstrom über Teilstrecke 6 im Verhältnis zu dem Massenstrom über Teilstrecke 5 kleiner ist, ist das Verhältnis der Widerstandskoeffizienten gerade andersrum. Im Rücklauf fließen über Teilstrecke 7 ca. $0,254 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ zur Teilstrecke 9, deren Massenstrom damit $5,465 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ beträgt. Teilstrecke 8 leitet, mit einem größeren Widerstandskoeffizienten als Teilstrecke 9, den verbleibenden, kleineren Massenstrom von $4,535 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ zur Teilstrecke 10.

Aus den Massenströmen und Widerstandskoeffizienten lassen sich die Druckverluste in den Teilstrecken berechnen. Das Ergebnis dieser Berechnung (in bar) ist in Abbildung 5.14f dargestellt. Die Druckverluste in den Teilstrecken 2 und 3, 5 und 6 sowie 4 und 7 sind jeweils nahezu identisch und heben sich in den Maschen gegenseitig nahezu auf. Die geringe Druckdifferenz von weniger als 1 Pa, die in den Maschen verbleibt, ist in Abbildung 5.14e zusammengefasst dargestellt.

5.2.2. Knoten-Strang-Verfahren

Die Randbedingungen entsprechen denen in Abschnitt 5.2 gemachten Angaben. Der Gesamtmassenstrom beträgt $\dot{m}_{ges} = 10 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ und die Startwerte in den einzelnen Teilstrecken werden weiterhin unter Einhaltung der Knotenregel wie in Abbildung 5.13a angegeben gewählt. Es wird mit dem Knoten-Strang-Verfahren lediglich ein anderes Lösungsverfahren gewählt.

Das Knoten-Strang-Verfahren wird bezüglich der Berechnung der Widerstandskoeffizienten in zwei verschiedenen Varianten angewendet. Zuerst werden die Widerstandskoeffizienten innerhalb (interne R-Berechnung) und anschließend außerhalb (externe R-Berechnung) des NEWTON-RAPHSON-Verfahrens berechnet.

Interne R-Berechnung Die Ergebnisse dieser Berechnungsvariante für die Massenströme, die Widerstandskoeffizienten und die Druckverluste in den Teilstrecken in den Abbildungen 5.15b, 5.15d und 5.15f sind im Rahmen der angegebenen Genauigkeit identisch mit den entsprechenden Ergebnissen für das CROSS-Verfahren in den Abbildungen 5.14b, 5.14d und 5.14f.

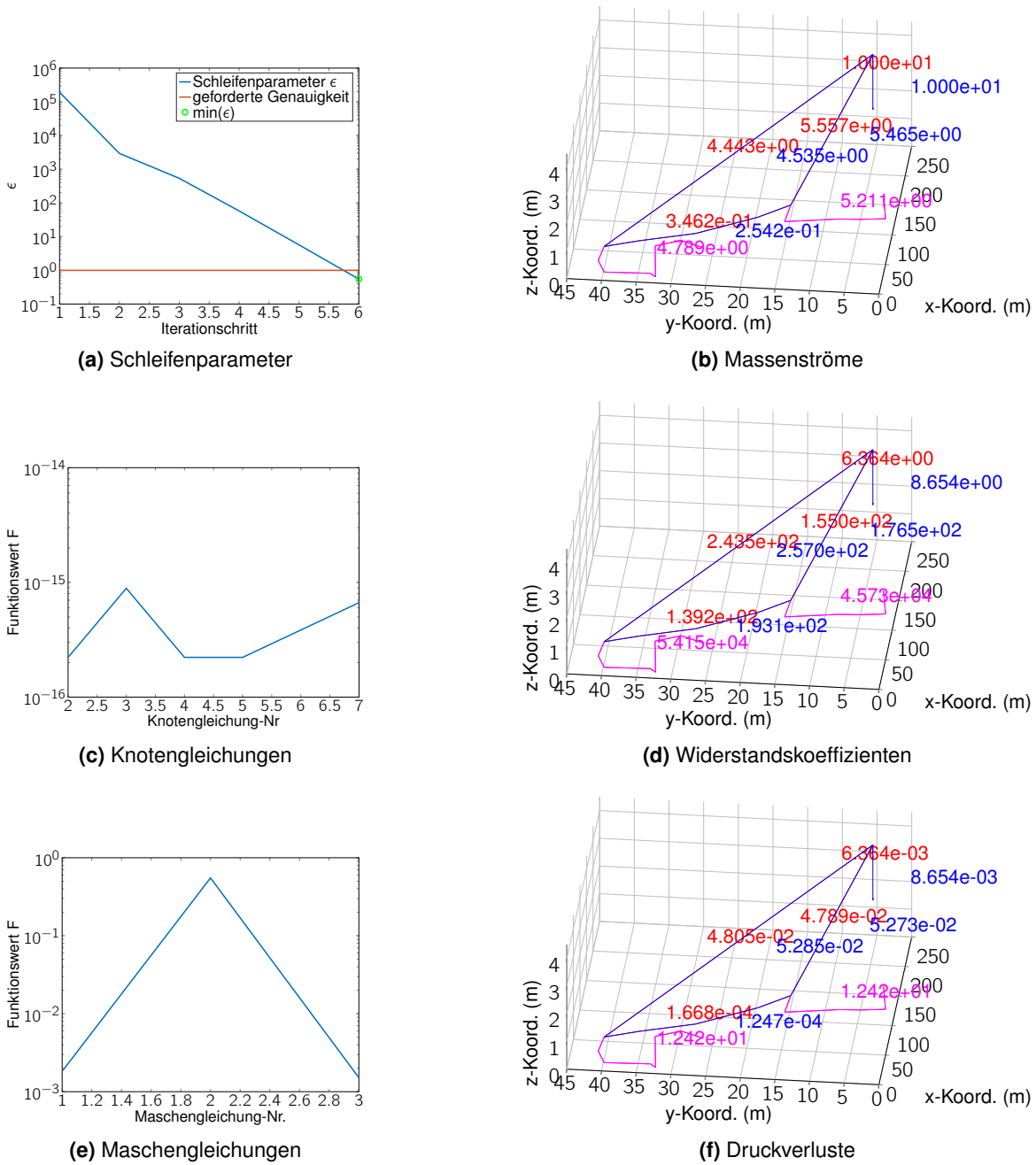


Abbildung 5.15.: Berechnungsergebnisse für das 'Einfache Maschennetz' (Knoten-Strang-Verfahren mit interner R-Berechnung, $\dot{m}_{ges} = 10 \frac{kg}{s}$)
 (a) Verlauf des Schleifenparameters $\epsilon = \|F_{Maschen}\|$ (in Pa) über der Zahl der Iterationen (nur ganzzahlige Iterationsschritte sinnvoll)
 (b) Berechnete Massenströme \dot{m} (in $\frac{kg}{s}$)
 (c) Funktionswerte der Knotengleichungen in $\frac{kg}{s}$ (nur ganzzahlige Gleichungsnummern sinnvoll)
 (d) Berechnete Widerstandskoeffizienten ($\frac{Pa}{(\frac{kg}{s})^2}$)
 (e) Funktionswerte der Maschengleichungen in Pa (nur ganzzahlige Gleichungsnummern sinnvoll)
 (f) Berechneter Druckabfall (in bar) in den Teilstrecken

Lediglich beim Verlauf des Schleifenparameters ϵ sowie den Funktionswerten der Knoten- und Maschengleichungen in den Abbildungen 5.15a, 5.15c und 5.15e sind leichte quantitative Unterschiede gegenüber den entsprechenden Abbildungen 5.14a, 5.14c und 5.14e beim CROSS-Verfahren erkennbar.

Externe R-Berechnung Bei dieser Berechnungsvariante wird der zusätzliche Parameter $RTS_{\text{epsilon}} = \left| 1 - \frac{\|RTS^{(n)}\|}{\|RTS^{(n-1)}\|} \right|$ verwendet, um die Neuberechnung der Widerstandskoeffizienten abzubrechen, sobald $RTS_{\text{epsilon}} < RTS_{\text{Genauigkeit}}$ ist.

Wird für $RTS_{\text{Genauigkeit}} = 10^{-4}$ gewählt, so erhält man nach Abschluss der 12.ten Iteration für die Massenströme, die Widerstandskoeffizienten und die Druckverluste in den Teilstrecken in den Abbildungen 5.16b, 5.16d und 5.16f im Rahmen der angegebenen Genauigkeit die gleichen Ergebnisse wie bei der internen R-Berechnung in den Abbildungen 5.15b, 5.15d und 5.15f.

Lediglich beim Verlauf des Schleifenparameters ϵ sowie den Funktionswerten der Knoten- und Maschengleichungen in den Abbildungen 5.16a, 5.16c und 5.16e sind quantitative Unterschiede gegenüber den entsprechenden Abbildungen 5.15a, 5.15c und 5.15e der internen R-Berechnung erkennbar.

Die Spitzen in Abbildung 5.16a entstehen durch die externe Neuberechnung der Widerstandskoeffizienten, nachdem zuvor das Kriterium $\epsilon < 1\text{Pa}$ erfüllt wurde. Das Abbruchkriterium $\epsilon < 1\text{Pa}$ wird zum ersten mal nach drei Iterationen des NEWTON-RAPHSON-Verfahrens erfüllt und damit früher als beim CROSS-Verfahren in Abbildung 5.14a und bei der internen R-Berechnung in Abbildung 5.15a.

Insgesamt werden die Widerstandskoeffizienten fünfmal berechnet, bevor zusätzlich zur Abbruchkriterium $\epsilon < 1\text{Pa}$ auch die Abbruchbedingung $RTS_{\text{epsilon}} < 10^{-4}$ erfüllt ist.

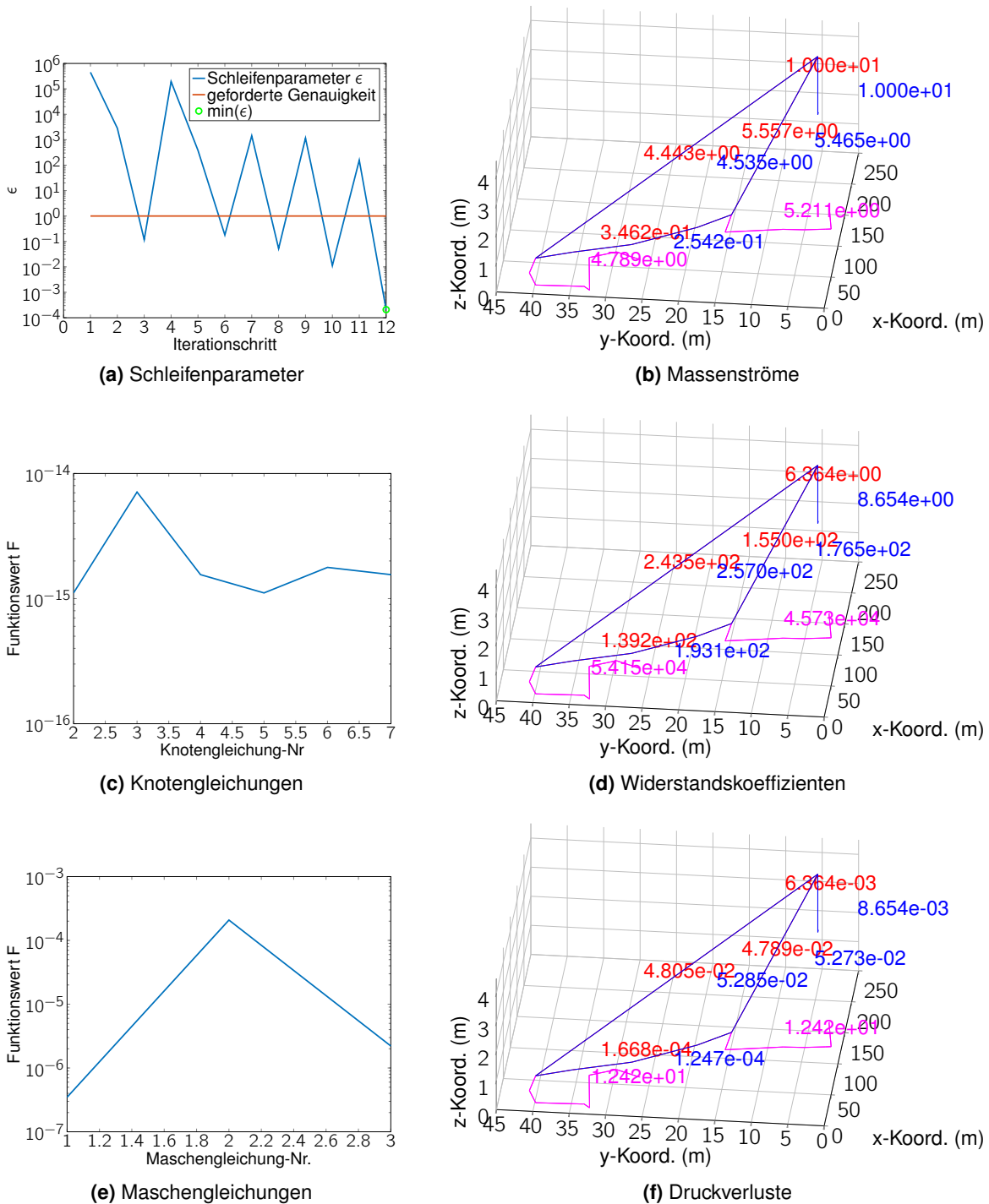


Abbildung 5.16.: Berechnungsergebnisse für das 'Einfache Maschennetz' (Knoten-Strang-Verfahren mit externer R-Berechnung, $\dot{m}_{ges} = 10 \frac{kg}{s}$)
 (a) Verlauf des Schleifenparameters $\epsilon = \|F_{Maschen}\|$ (in Pa) über der Zahl der Iterationen (der Verlauf des zweiten Parameters RTSepilon ist nicht dargestellt)
 (b) Berechnete Massenströme \dot{m} (in $\frac{kg}{s}$)
 (c) Funktionswerte (absolut) der Knotengleichungen in $\frac{kg}{s}$ (nur ganzzahlige Gleichungsnummern sinnvoll)
 (d) Berechnete Widerstandskoeffizienten ($\frac{Pa}{(\frac{kg}{s})^2}$)
 (e) Funktionswerte (absolut) der Maschengleichungen in Pa (nur ganzzahlige Gleichungsnummern sinnvoll)
 (f) Berechneter Druckabfall (in bar) in den Teilstrecken

5.2.3. Änderung der Startwerte bei Beibehaltung des Gesamtmassenstroms

Für die Randbedingungen gelten weiterhin die Angaben in Abschnitt 5.2. Der Gesamtmassestrom beträgt weiterhin $\dot{m}_{ges} = 10 \frac{kg}{s}$. Es werden in den Teilstrecken unter Einhaltung der Knotenregel jedoch andere Startwerte angesetzt. Die Abbildung 5.17 zeigt in den Teilstrecken 2 bis 9 deutliche Veränderungen der Startwerte gegenüber den bisher verwendeten Startwerten in Abbildung 5.13a.

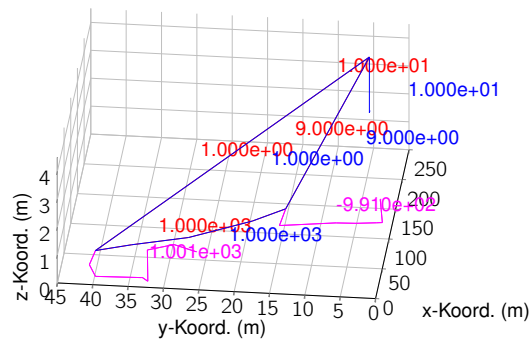
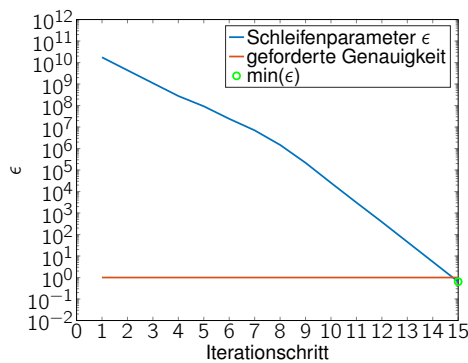
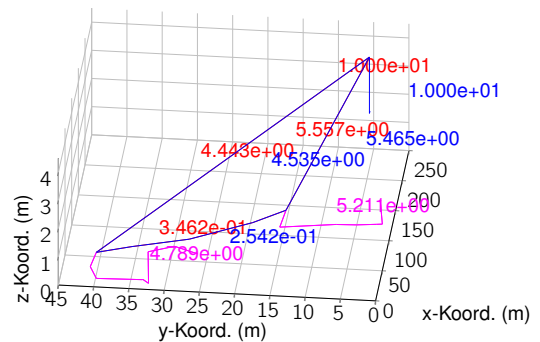


Abbildung 5.17.: Änderung der Startwerte im 'Einfachen Maschennetz' ($\dot{m}_{ges} = 10 \frac{kg}{s}$)

CROSS-Verfahren Unter Anwendung des CROSS-Verfahrens ist das Ergebnis für den Verlauf des Schleifenparameters ϵ und die Massenströme in den Teilstrecken den Abbildungen 5.18a und 5.18b zu entnehmen.



(a) Schleifenparameter (Cross)



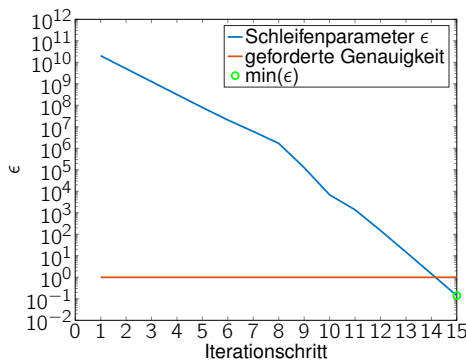
(b) Lösung Massenströme (Cross)

Abbildung 5.18.: Veränderung der Startwerte (interne R-Berechnung): Ergebnisse für $\dot{m}_{ges} = 10 \frac{kg}{s}$
 (a) Cross-Verfahren: Verlauf des Schleifenparameters $\epsilon = \|F_{Maschen}\|$ (in Pa) über der Zahl der Iterationen
 (b) Cross-Verfahren: Berechnete Massenströme \dot{m} (in $\frac{kg}{s}$)

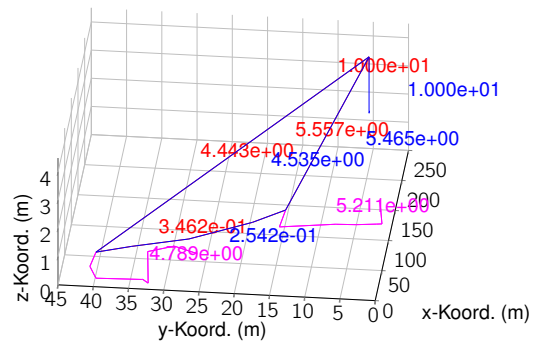
Das Ergebnis für die Massenströme in Abbildung 5.18b (und für die hier nicht dargestellten Widerstandskoeffizienten und Druckverluste) ist im Rahmen der angegebenen Genauigkeit identisch mit dem bereits in Abbildung 5.14b vorgestellten Ergebnis.

Zur Erfüllung des Abbruchkriteriums $\epsilon < 1\text{Pa}$ werden gemäß Abbildung 5.18a 15 Iterationen benötigt, während gemäß Abbildung 5.14a mit anderen Startwerten sechs Iterationen benötigt werden.

Knoten-Strang-Verfahren Für das Knoten-Strang-Verfahren ist das Ergebnis für den Verlauf des Schleifenparameters ϵ und die Massenströme in den Teilstrecken den Abbildungen 5.19a und 5.19b zu entnehmen.



(a) Schleifenparameter (Knoten-Strang-Verfahren)



(b) Lösung Massenströme (Knoten-Strang-Verfahren)

Abbildung 5.19.: Berechnungsergebnisse für das 'Einfache Maschennetz' mit veränderten Startwerten (Knoten-Strang-Verfahren mit interner R-Berechnung, $\dot{m}_{ges} = 10 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$)

(a) Knoten-Strang-Verfahren: Verlauf des Schleifenparameters $\epsilon = \|F_{\text{Maschen}}\|$ (in Pa) über der Zahl der Iterationen

(b) Knoten-Strang-Verfahren: Berechnete Massenströme \dot{m} (in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$)

Das Ergebnis für die Massenströme in Abbildung 5.19b (und für die hier nicht dargestellten Widerstandskoeffizienten und Druckverluste) ist im Rahmen der angegebenen Genauigkeit identisch mit dem bereits in Abbildung 5.15b vorgestellten Ergebnis.

Zur Erfüllung des Abbruchkriteriums $\epsilon < 1\text{Pa}$ werden gemäß Abbildung 5.19a 15 Iterationen benötigt, während gemäß Abbildung 5.15a mit anderen Startwerten sechs Iterationen benötigt werden.

5.2.4. Änderung des Gesamtmassenstroms

Für die Randbedingungen gelten weiterhin die Angaben in Abschnitt 5.2. Jedoch wird für die Berechnung ein Gesamtmassenstrom von $\dot{m}_{ges} = 1 \frac{kg}{s}$ gewählt mit Startwerten gemäß Abbildung 5.20.

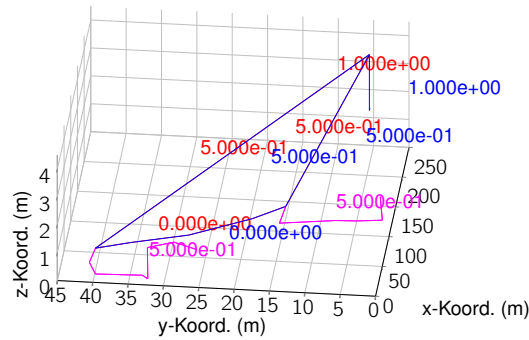
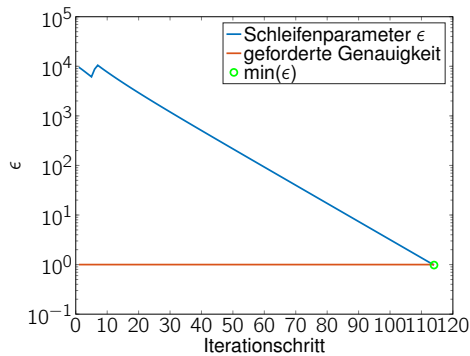
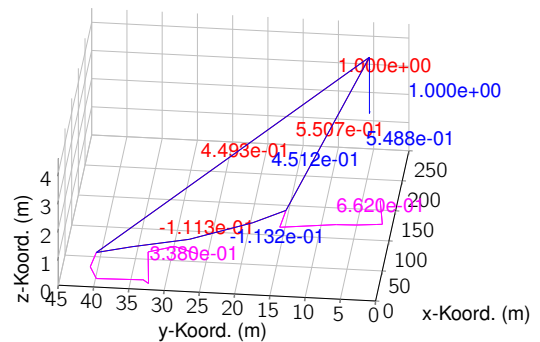


Abbildung 5.20.: Startwerte für die Massenströme im 'Einfachen Maschennetz' ($\dot{m}_{ges} = 1 \frac{kg}{s}$)

Das Abbruchkriterium $\epsilon < 1Pa$ wird entsprechend Abbildung 5.21a sowohl mit dem CROSS- als auch mit dem Knoten-Strang-Verfahren (ohne Abbildung) nach 114 Iterationen erfüllt.



(a)



(b)

Abbildung 5.21.: Berechnungsergebnisse für das 'Einfache Maschennetz' (CROSS & Knoten-Strang-Verfahren, $\dot{m}_{ges} = 1 \frac{kg}{s}$)

(a) Cross-Verfahren: Verlauf des Schleifenparameters ϵ

(b) Cross- und Knoten-Strang-Verfahren: Berechnete Massenströme \dot{m} (in $\frac{kg}{s}$)

Die dabei mit beiden Verfahren berechneten, im Rahmen der angegebenen Genauigkeit, identischen Massenströme zeigt Abbildung 5.21b. In den Teilstrecken 4 und 7 weist das Ergebnis gegenüber den Ergebnissen in den Abbildungen 5.14b und 5.15b eine Strömungsumkehr auf, durch die der Massenstrom über Teilstrecke 5 auf fast das Doppelte des Massenstroms der Teilstrecke 6 anwächst.

Eine Zehntelung des Gesamtmassenstrom führt in Abbildung 5.21b nicht zu einer Zehntelung der Massenströme gegenüber den Ergebnissen in den Abbildungen 5.14b und 5.15b.

5.2.5. Festlegen unveränderlicher Massenströme

Für die Randbedingungen gelten weiterhin die Angaben in Abschnitt 5.2. Der Gesamtmassenstrom beträgt $\dot{m}_{ges} = 10 \frac{kg}{s}$ und die Startwerte in den einzelnen Teilstrecken werden unter Einhaltung der Knotenregel wie in Abbildung 5.13a angegeben gewählt. Es wird das Knoten-Strang-Verfahren (interne R-Berechnung) verwendet.

Werden die Massenströme in den Teilstrecken 5 und 6 sowie 1 und 10 als unveränderlich festgelegt, so wird gemäß Abbildung 5.22 das Abbruchkriterium $\epsilon < 1$ Pa nicht mehr erreicht.

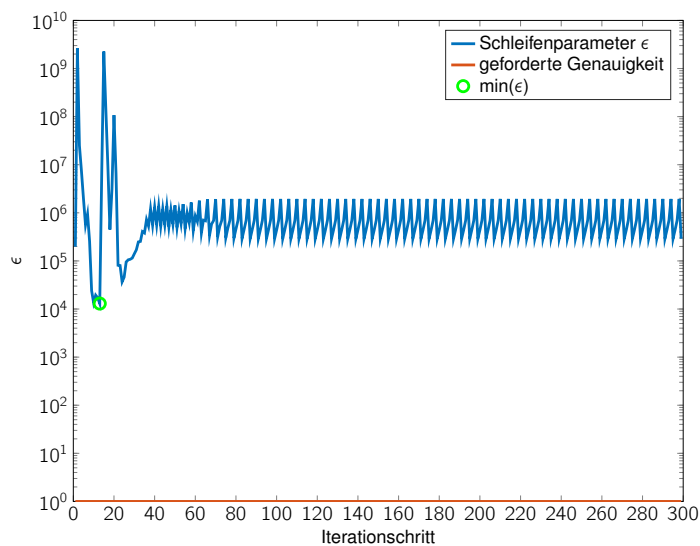
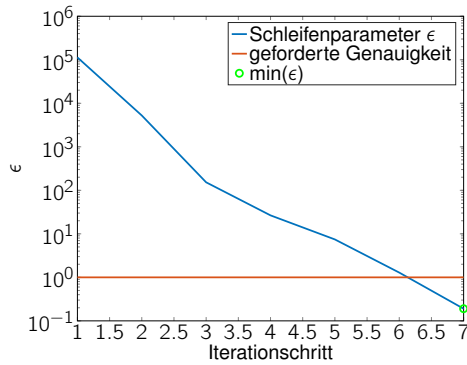


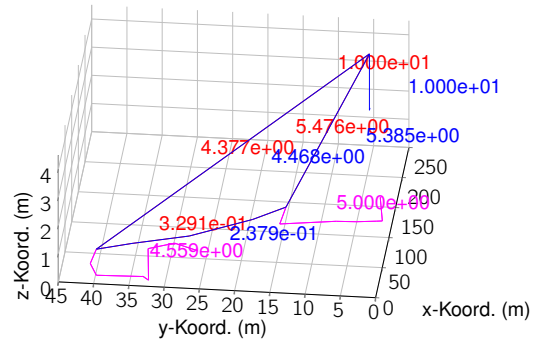
Abbildung 5.22.: Verlauf des Schleifenparameters ϵ bei Festlegung der Kunden-Massenströme in TS 5 und 6

Alternativ werden bei einem weiteren Simulationslauf die Massenströme in den Teilstrecken 5 sowie 1 und 10 als unveränderlich festgelegt.

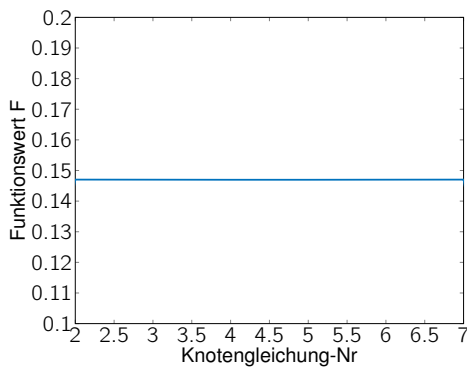
Das Lösungsverfahren erfüllt jetzt zwar in Abbildung 5.23a das Abbruchkriterium nach sieben Iterationen. Die Funktionswerte der Maschengleichungen in Abbildung 5.23d liegen alle unterhalb 1 Pa. Jedoch wird aus Abbildung 5.23c deutlich, dass das Ergebnis für die Massenströme in Abbildung 5.23b gegen die Knotenregel verstößt, denn die Summe der Massenströme in den Knoten 2 bis 7 weicht mit Werten größer $0,14 \frac{kg}{s}$ deutlich von Null ab.



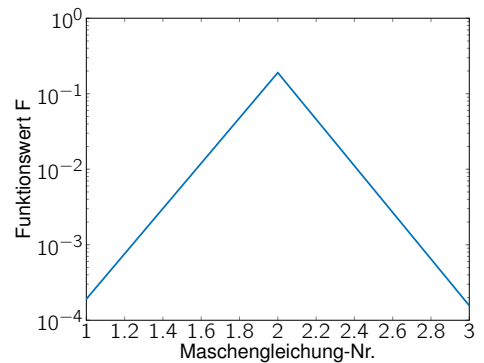
(a) Schleifenparameter



(b) Massenströme



(c) Knotengleichungen



(d) Maschengleichungen

Abbildung 5.23.: Berechnungsergebnisse für das 'Einfache Maschennetz' bei Festlegung des Kunden-Massenstroms in TS 5 (Knoten-Strang-Verfahren, $\dot{m}_{ges} = 10 \frac{kg}{s}$)

(a) Verlauf des Schleifenparameters $\epsilon = \|F_{Maschen}\|$ (in Pa) über der Zahl der Iterationen

(b) Berechnete Massenströme \dot{m} (in $\frac{kg}{s}$)

(c) Funktionswerte (absolut) der Knotengleichungen in $\frac{kg}{s}$ (nur ganzzahlige Gleichungsnummern sinnvoll)

(d) Funktionswerte (absolut) der Maschengleichungen in Pa (nur ganzzahlige Gleichungsnummern sinnvoll)

5.3. Rohrnetz 'Energieverbund'

In Abbildung 5.24 ist Struktur des Energieverbundes und die verwendete Nummerierung der Teilstrecken angegeben.

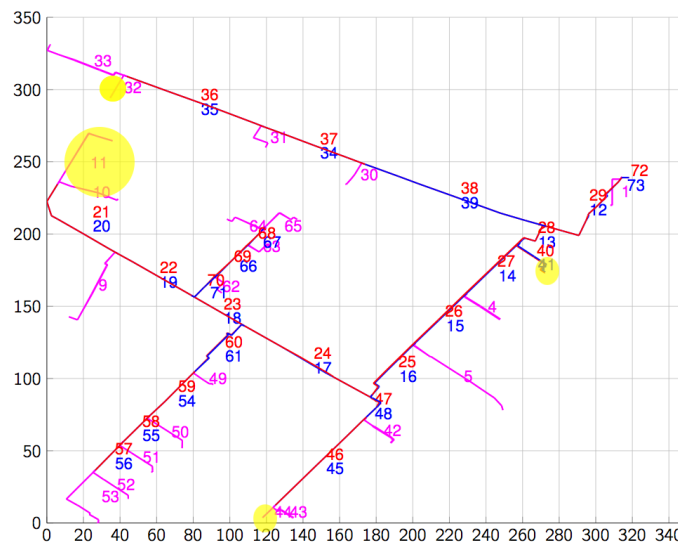


Abbildung 5.24.: Struktur des 'Energieverbundes' mit Nummerierung der Teilstrecken

Gelb hinterlegt sind darin

- die Teilstrecken 32 und 44, da die Stellungen der in den Teilstrecken vorhandenen Kugelhähne nicht bekannt sind,
- die Teilstrecken 40 und 41, da an diese drei Wärmeübergabestationen angeschlossen sind,
- die Teilstrecken 10 und 11, da die für die Wärmeübergabestationen Nr. 15 und 16 im ersten Quartal 2016 verfügbaren Messwerte sehr viele Messstellenausfälle und fehlerhafte Werte aufweisen.

Der Komplexitätsgrad dieses Simulationsmodells ist gegenüber dem des 'Einfachen Maschennetzes' deutlich höher.

Als Startwerte werden in den Teilstrecken mit Wärmeübergabestationen die gemäß der Messwerte vom 31.01.2016 um 11:26:00 Uhr berechneten Massenströme verwendet. Zu diesem Zeitpunkt wurden bei allen Wärmeübergabestationen Massenströme ungleich Null gemessen.

Die zu diesem Zeitpunkt an den Wärmeübergabestationen anhand der Messwerte anstehenden Massenströme und Druckdifferenzen sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

Tabelle 5.3.: Massenströme (gerundet auf vier Nachkommastellen) und Druckdifferenzen der Wärmeübergabestationen (WUeSt) gemäß der Messwerte vom 31.01.2016 um 11:26:00 Uhr

Wuest-Nr (TS-Nr)	\dot{m} (in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$) Δp_{WUeSt} (bar)	Wuest-Nr (TS-Nr)	\dot{m} (in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$) Δp_{WUeSt} (bar)	Wuest-Nr (TS-Nr)	\dot{m} (in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$) Δp_{WUeSt} (bar)
1 (1)	0,6286 1,3	9 (31)	0,1640 1,3	17 (9)	0,2479 1,2
2 (40/41)	1,2061 1,1	10 (64)	0,2756 1,3	18 (49)	0,0816 1,1
3 (40/41)	0,5491 1,2	11 (30)	0,1632 1,3	19 (50)	0,0818 1,0
4 (40/41)	0,1374 1,3	12 (65)	0,0274 1,3	20 (51)	0,1363 1,0
5 (4)	0,5497 1,2	13 (63)	0,1086 1,2	21 (52)	0,0273 1,0
6 (5)	0,4394 1,2	14 (62)	0,0547 1,2	22 (53)	0,1090 1,0
7 (42)	0,1916 1,2	15 (11)	1,1630 1,3		
8 (43)	2,5733 1,1	16 (10)	1,1549 1,2		

Die Startwerte in den Kurzschlussleitungen 32 bzw. 44 werden auf 1% des Massenstroms der Wärmeübergabestation in den Teilstrecken 31 bzw. 43 geschätzt.

Der Gesamtmassenstrom, der die Vorlauf- und Rücklauf-Teilstrecken 72 und 73 durchströmt, ist die Summe der Massenströme über die Wärmeübergabestationen und die Kurzschlüsse.

Die Startwerte für die Massenströme in den Verteil- und Sammelleitungen werden mit den eben gemachten Angaben unter Einhaltung der Knotenregel berechnet.

Es werden keine Massenströme als unveränderbar festgelegt.

Da der Massenstrom in Teilstrecke 33 auf $0 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ gesetzt wird, wird die betreffende Maschengleichung in der Modellierung nicht berücksichtigt.

Die Rauigkeit in den Teilstrecken des gesamten Netzes wird, wenn nicht anders erwähnt, mit $k = 10^{-5} m$ angenommen.

Im Rahmen dieser Modellierung⁵ wird im Vorlauf bis zu den Wärmeübergabestationen eine Temperatur von 75°C unterstellt und im Rücklauf hinter den Wärmeübergabestationen eine Temperatur von 35°C .

⁵Nach Einbindung eines thermischen Modells, das nicht Bestandteil dieser Arbeit ist, lassen sich auch realistischere Temperaturverläufe in den Rohrleitungen berücksichtigen.

Der Anwender kann während der Simulation ein detailliertes Berechnungsprotokoll ausgeben lassen und am Ende des iterativen Lösungsverfahrens den Druckverlauf in ausgewählten Teilstrecken grafisch darstellen lassen.

Protokoll der R-Berechnung Der Anwender kann vor dem Start der Berechnung eine detaillierte Bildschirmausgabe der R-Berechnung auswählen, diese auf Wunsch aufzeichnen und im Ordner *04Diaries* automatisch speichern lassen. Die Widerstandskoeffizienten R_{TS} der Teilstrecken werden in aufsteigender Reihenfolge ihrer Nummerierung, also für den Energieverbund von 1 bis 73, berechnet.

Ein Auszug dieser detaillierten Bildschirmausgabe ist in Abbildung 5.25 für die Teilstrecke 31 wiedergegeben. Eine Teilstrecke setzt sich stets aus mindestens einer oder mehreren Teilstreckenabschnitten zusammen. In diesem Beispiel setzt sich die Teilstrecke 31 nacheinander aus den Teilstreckenabschnitten 8, 9, 60 und 59 zusammen, deren Widerstandskoeffizienten in dieser Reihenfolge berechnet werden.

Zunächst wird die Strömungsvariante der im Teilstreckenabschnitt möglicherweise vorhandenen T-Stücke bestimmt. Im Teilstreckenabschnitt 8 befindet sich demnach nur ein T-Stück in Strömungsvariante (1,1,1)⁶, also Stromtrennung. Der Teilstreckenabschnitt 8 stellt bei diesem T-Stück in dieser Strömungsvariante den Abzweig dar, deshalb ist der Strömungswiderstand *zetaAbzweig* bei der Berechnung dieses Teilstreckenabschnitts zu berücksichtigen.

In den folgenden beiden Teilstreckenabschnitten 9 und 60 fehlen diese Angaben, da kein T-Stück in diesen enthalten ist. Erst im letzten Teilstreckenabschnitt 59 befindet sich das zweite T-Stück in Strömungsvariante (1,1-1), also Stromvereinigung. Auch hier ist der Strömungswiderstand *zetaAbzweig* bei der Berechnung dieses Teilstreckenabschnitts zu berücksichtigen.

Nach den Angaben zum Status der vorhandenen T-Stücke steht am Ende der Berechnung der Teilstreckenabschnitte eine Zusammenfassung für den jeweiligen Teilstreckenabschnitt mit der Nummer *TsaID* und der Länge *ITSA*. Das Ergebnis für den Widerstandskoeffizienten des Teilstreckenabschnitts wird unter R_{TSA} angegeben und auch die Berechnungsergebnisse für die einzelnen Faktoren und Summanden der Berechnungsgleichung wird einzeln ausgegeben.

Das Ergebnis für den Teilstreckenabschnitt 31 (*TSNumber*) mit der Länge 4,9224 m (*ITS*) steht ganz am Ende unter R_{TS} . In diesem Beispiel beträgt $R_{TS} = 3,26 \cdot 10^6 \frac{Pa}{kg/s^2}$. Der Beitrag der Einzelwiderstände zum Gesamtwiderstand der Teilstrecke wird ebenfalls angezeigt.

⁶Die Bedeutung dieser Strömungsvarianten wurde bereits im Kapitel Grundlagen vorgestellt.

```

Ich berechne Teilstrecke TS31
Variante (1,1,-1): Zeta s für Stromtrennung
identTEEFy: Status setzero=off
im TS/TSA ist nur ein T-Stück
T-Stück (am Anfang des TSA): zetaAbzweig in Leitung C relevant
TsaID      lTSA(m):      R_TSA = [ zetaLambda +zetaAlleBogen +zetaAlleKugelh +zetaDurchAnf +zetaAbzwAnf
+zetaDurchEnde +zetaAbzwEnde] *faktor +RWuestTSA | theta(°) V/R-Lauf mdot(kg/s) dTSA(m)
8 1.050800e+01 6.721649e+03 4.740986e+00 6.235466e-01 75 0 2.200000e-02 0 1.971190e+01
0 0 2.678115e+02 0 0 1.956033e-01 7.030000e-02

identTEEFy: Status setzero=off
TsaID      lTSA(m):      R_TSA = [ zetaLambda +zetaAlleBogen +zetaAlleKugelh +zetaDurchAnf +zetaAbzwAnf
+zetaDurchEnde +zetaAbzwEnde] *faktor +RWuestTSA | theta(°) V/R-Lauf mdot(kg/s) dTSA(m)
9 1.410400e+01 3.201141e+06 1.034362e+01 9.869496e-01 75 0 2.236248e-02 0 0
0 0 3.415692e+03 3.162363e+06 75 0 1.956033e-01 3.720000e-02

identTEEFy: Status setzero=off
TsaID      lTSA(m):      R_TSA = [ zetaLambda +zetaAlleBogen +zetaAlleKugelh +zetaDurchAnf +zetaAbzwAnf
+zetaDurchEnde +zetaAbzwEnde] *faktor +RWuestTSA | theta(°) V/R-Lauf mdot(kg/s) dTSA(m)
60 1.410400e+01 4.505232e+04 1.214038e+01 1.158390e+00 35 0 1.665086e-01 0 0
0 0 3.345814e+03 0 0 1.956033e-01 3.720000e-02

Variante (1,1,-1): Zeta s für Stromvereinigung
identTEEFy: Status setzero=off
im TS/TSA ist nur ein T-Stück
T-Stück (am Ende des TSA): zetaAbzweig in Leitung C relevant
TsaID      lTSA(m):      R_TSA = [ zetaLambda +zetaAlleBogen +zetaAlleKugelh +zetaDurchAnf +zetaAbzwAnf
+zetaDurchEnde +zetaAbzwEnde] *faktor +RWuestTSA | theta(°) V/R-Lauf mdot(kg/s) dTSA(m)
59 1.050800e+01 8.126723e+03 5.664709e+00 7.450370e-01 35 0 2.200000e-02 0 0
0 2.454695e+01 2.623326e+02 0 0 1.956033e-01 7.030000e-02

-----
TSNumber  lTS[m]:      R_TS = [ RLambda +RAlleBogen +RAlleKugelh +RTDurchAnf +RTAbzwAnfang
+RTDurchEnde +RTAbzwEnde] +RAlleWuestTS]
31 4.922400e+01 3.261042e+06 7.870580e+04 7.609315e+03 6.334902e+02 1.166317e+01 0 5.279074e+03
0 6.439466e+03 3.162363e+06
*****

```

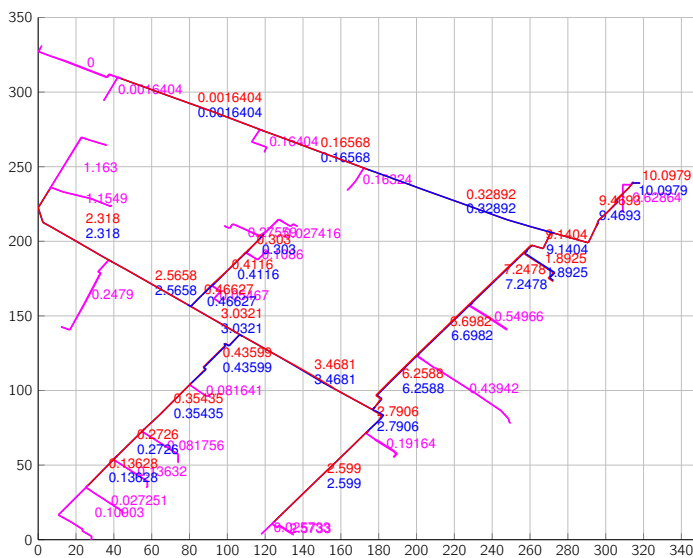
Abbildung 5.25.: Auszug aus dem Berechnungsprotokoll während der R-Berechnung: Berechnung des Widerstandskoeffizienten R_{TS} der Teilstrecke 31, der sich seinerseits aus den Widerstandskoeffizienten R_{TSA} der vier Teilstreckenabschnitte 8, 9, 60 und 59 zusammensetzt. Die Widerstandskoeffizienten R_{TSA} ergeben sich aus den Widerständen der einzelnen Komponenten des Teilstreckenabschnitts, also Rohrreibung, Bögen, Konfusoren/Diffusoren, Kugelhähne usw.

Den Hauptbeitrag liefert demnach in diesem Beispiel die Wärmeübergabestation mit $3,1623 \cdot 10^6 \frac{Pa}{kg/s^2}$, danach folgen in Reihenfolge abnehmender Größe die Rohrreibung, die Bögen, die Widerstände der T-Stücke, anschließend die Konfusoren und Diffusoren und zuletzt die Kugelhähne.

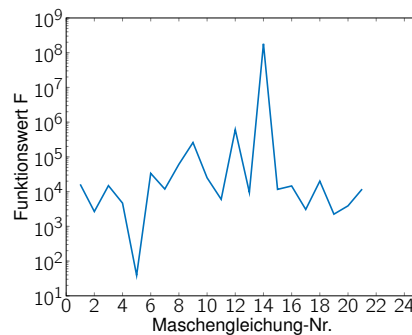
5.3.1. Cross-Verfahren

Startwerte Die Abbildung 5.26a zeigt die Massenströme in den einzelnen Teilstrecken, die sich aufgrund der Messwerte der Wärmeübergabestationen vom 31.01.2016 um 11:26:00 Uhr ergeben.

Die Abbildung 5.26b zeigt die für diese Massenströme in den einzelnen Maschen berechneten Druckdifferenzen. Die Druckdifferenz liegt in vielen Maschen oberhalb von 10^4 Pa und erreicht in Maschengleichung 14 mit nahezu $2 \cdot 10^8$ Pa den höchsten Wert.



(a) Startwerte Massenströme



(b) Maschengleichungen

Abbildung 5.26.: Berechnung der Druckdifferenzen in den Maschen und Teilstrecken des 'Energieverbundes' mit den Startwerten (Messwerte):

- (a) Startwerte Massenströme \dot{m} (in $\frac{kg}{s}$)
- (b) Funktionswerte der Maschengleichungen in Pa (nur ganzzahlige Gleichungsnummern sinnvoll)

Die mit diesen Massenströmen in den einzelnen Teilstrecken berechneten Druckverluste sind in Abbildung 5.27 dargestellt. Die Druckverluste bei den Wärmeübergabestationen liegen mit Werten um 1,2 bar im Bereich der Messwerte nach Tabelle 5.3. In den Sammel- und

Verteilungen sind die berechneten Druckverluste um mindestens zwei Größenordnungen kleiner als bei den Wärmeübergabestationen.

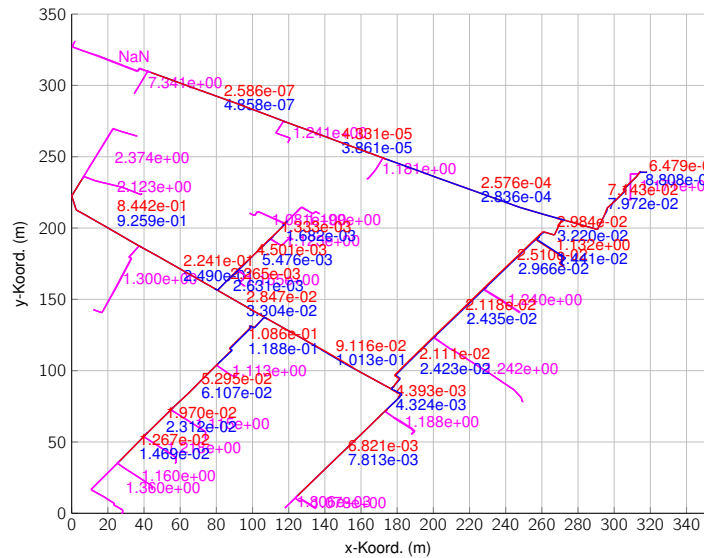


Abbildung 5.27.: Druckverluste (bar) in den Teilstrecken des 'Energieverbundes'

Berechnung Ausgehend von den zuvor genannten Startwerten wird mit dem Cross-Verfahren in Abbildung 5.28a in der 43. Iteration bei ca. 60000 Pa ein Minimum für den Schleifenparameter ϵ erreicht, das Abbruchkriterium wird jedoch nicht erfüllt⁷. Ab etwa der 80.ten Iteration beginnt das Lösungsverfahren zu schwingen.

Die für das Minimum berechneten Massenströme, Widerstandskoeffizienten und Druckverluste zeigen die Abbildungen 5.28b, 5.29b und 5.29d.

Die Massenströme der Lösung in Abbildung 5.28b liegen überwiegend in der gleichen Größenordnung wie die Startwerte nach Abbildung 5.26a.

⁷Die geforderte Genauigkeit von 10^4 Pa wurde entsprechend der Genauigkeit der verfügbaren Messwerte gewählt, welche im betrachteten Zeitraum ebenfalls bei 10^4 Pa lag.

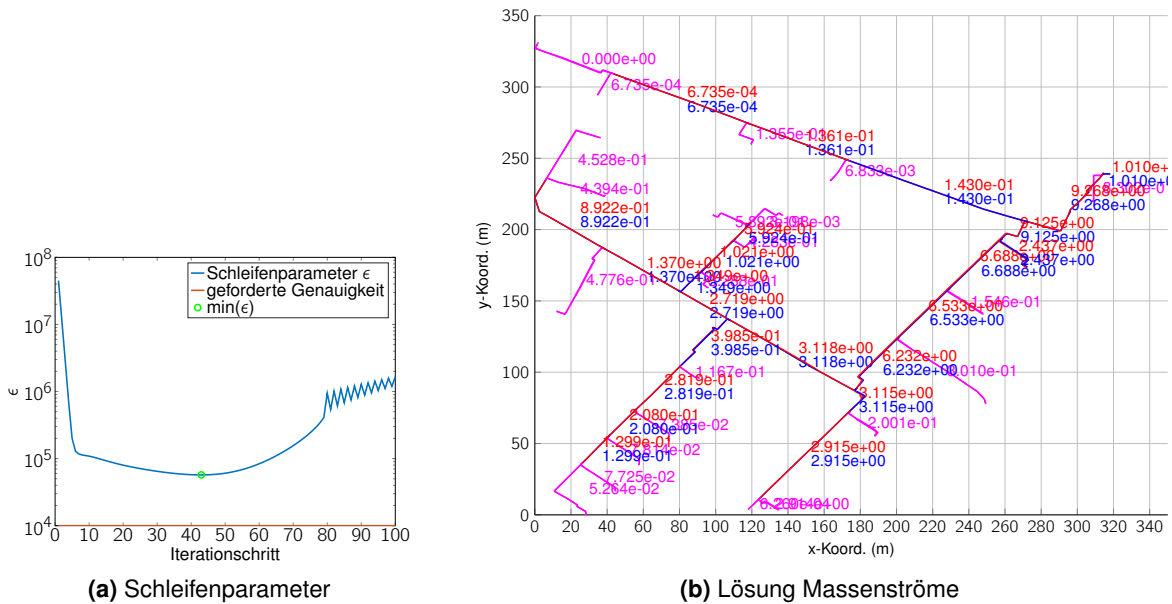


Abbildung 5.28.: Berechnungsergebnisse für den 'Energieverbund' (CROSS-Verfahren, $k = 10^{-5} m$)

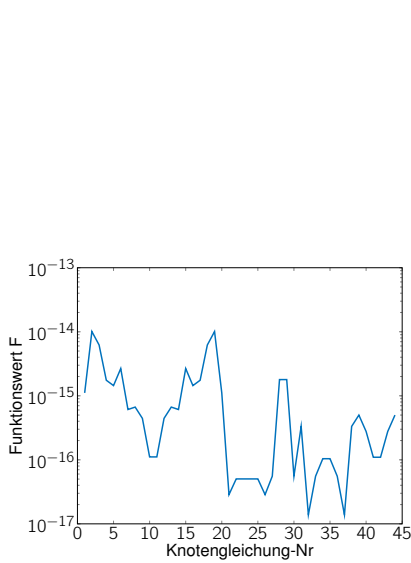
(a) Verlauf des Schleifenparameters $\epsilon = \|F_{\text{Maschen}}\|$ (in Pa) über der Zahl der Iterationen

(b) Berechnete Massenströme \dot{m} (in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$)

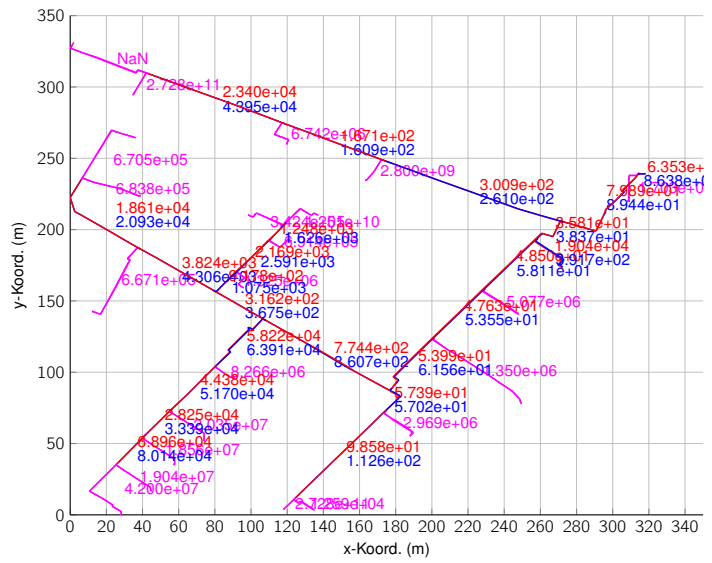
Die Druckverluste in den Leitungen mit Wärmeübergabestationen liegen gemäß Abbildung 5.29d in der Größenordnung der mit den Startwerten berechneten Druckverluste nach Abbildung 5.27. Die Druckverluste in den Verteil- und Sammelleitungen (rot und blau) sind größtenteils mindestens zwei Größenordnungen niedriger als die mit Wärmeübergabestationen. Ausnahmen davon stellen die Verteil- und Sammelleitungen bei den Teilstrecken 10/11 dar (vgl. Abbildung 5.24). Hier sind die Druckverluste im Vergleich zu denen in anderen Verteil- und Sammelleitungen höher.

Die Widerstandskoeffizienten (s. Abb. 5.29b) und Druckverluste (s. Abb. 5.29d) in den Sammelleitungen (blau) sind im Vergleich zu denen in den entsprechenden Verteilleitungen (rot) bei identischen Massenströmen i.d.R. etwas höher.

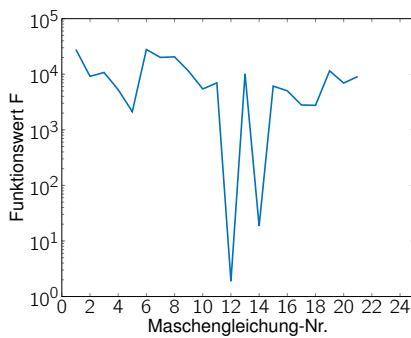
Die Funktionswerte in den Knotengleichungen sind gemäß Abbildung 5.29a kleiner als $10^{-14} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ und damit quasi Null. Die Funktionswerte der Maschengleichungen in Abbildung 5.29c liegen zwischen 20 und $3 \cdot 10^4$ Pa.



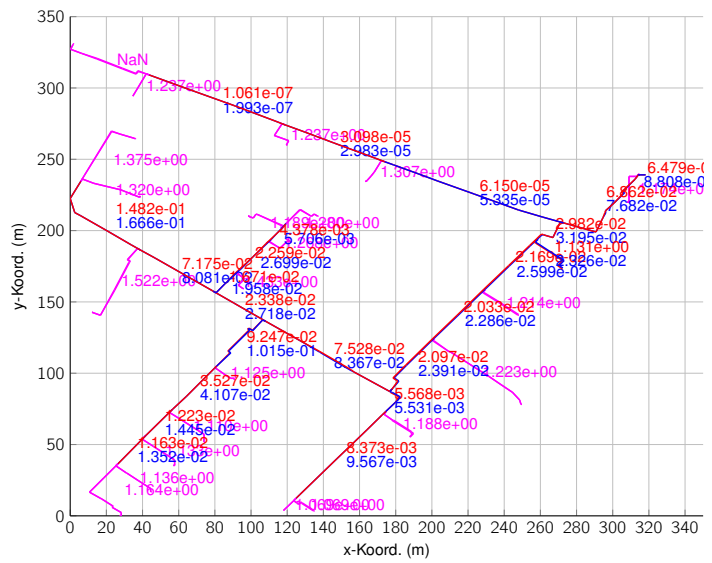
(a) Knotengleichungen



(b) Widerstandskoeffizienten



(c) Maschengleichungen



(d) Druckverluste

Abbildung 5.29.: Weitere Berechnungsergebnisse für den 'Energieverbund' (CROSS-Verfahren, $k = 10^{-5}m$)

- (a) Funktionswerte der Knotengleichungen in $\frac{kg}{s}$ (nur ganzzahlige Gleichungsnummern sinnvoll)
- (b) Berechnete Widerstandskoeffizienten ($\frac{Pa}{(kg/s)^2}$)
- (c) Funktionswerte der Maschengleichungen in Pa (nur ganzzahlige Gleichungsnummern sinnvoll)
- (d) Berechneter Druckabfall (in bar) in den Teilstrecken

5.3.2. Knoten-Strang-Verfahren

Startwerte Es werden dieselben Startwerte wie zuvor im Unterabschnitt 5.3.1 verwendet.

Berechnung Mit diesem Lösungsverfahren wird in Abbildung 5.30a nach der achten Iteration bei ca. 30000 Pa ein Minimum für den Schleifenparameter ϵ erreicht, das Abbruchkriterium wird jedoch nicht erfüllt. Ein Schwingen dieses Lösungsverfahrens wird während der durchgeführten Iterationsschritte nicht beobachtet.

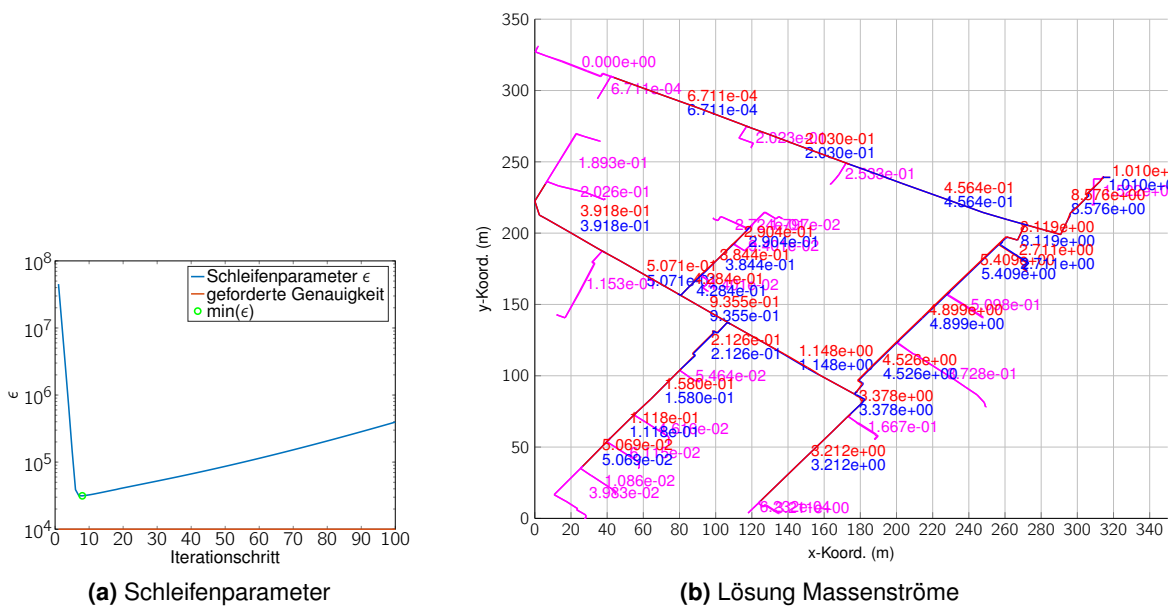


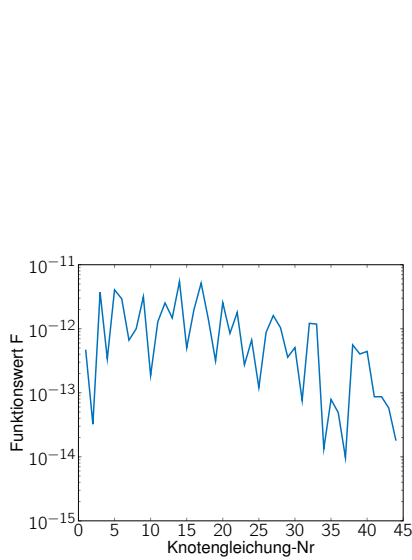
Abbildung 5.30.: Berechnungsergebnisse für den 'Energieverbund' (Knoten-Strang-Verfahren, $k = 10^{-5} m$)

(a) Verlauf des Schleifenparameters $\epsilon = \|F_{\text{Maschen}}\|$ (in Pa) über der Zahl der Iterationen

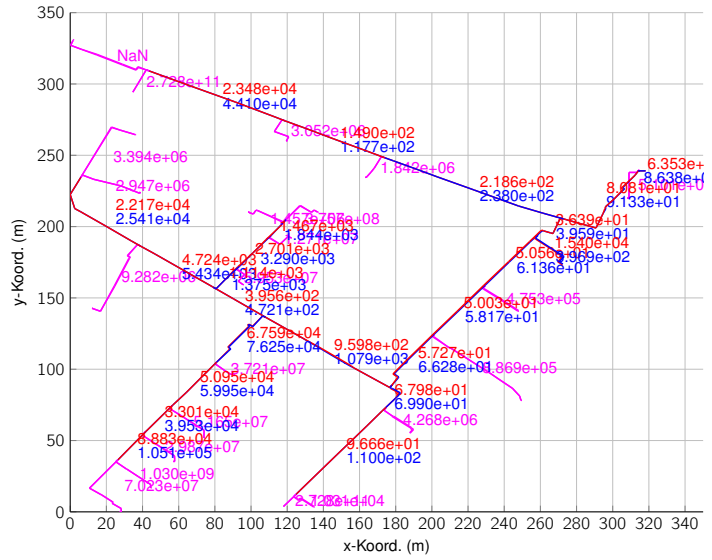
(b) Berechnete Massenströme \dot{m} (in $\frac{kg}{s}$)

Die für das Minimum berechneten Massenströme, Widerstandskoeffizienten und Druckverluste in den Teilstrecken sind in den Abbildungen 5.30b, 5.31b und 5.31d wiedergegeben.

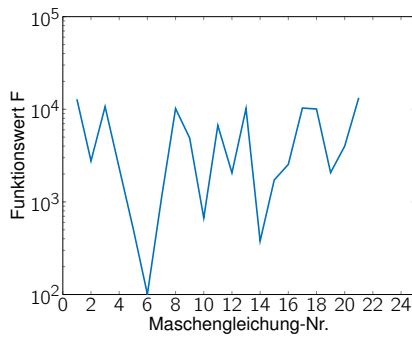
Die Massenströme in Abbildung 5.30b liegen überwiegend in der gleichen Größenordnung wie die Startwerte nach Abbildung 5.26a, weichen aber quantitativ von den Ergebnissen des CROSS-Verfahrens in Abbildung 5.28b ab. Die Druckverluste in den Leitungen mit Wärmeübergabestationen liegen gemäß Abbildung 5.31d in der Größenordnung der mit den Startwerten berechneten Druckverluste nach Abbildung 5.27.



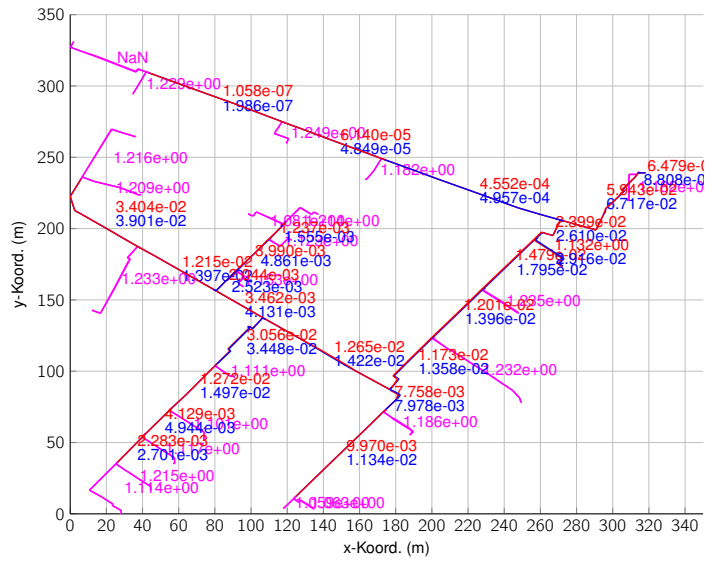
(a) Knotengleichungen



(b) Widerstandskoeffizienten



(c) Maschengleichungen



(d) Druckverluste

Abbildung 5.31.: Weitere Berechnungsergebnisse für den 'Energieverbund' (Knoten-Strang-Verfahren, $k = 10^{-5} m$)

- (a) Funktionswerte (absolut) der Knotengleichungen in $\frac{kg}{s}$ (nur ganzzahlige Gleichungsnummern sinnvoll)
- (b) Berechnete Widerstandskoeffizienten ($\frac{Pa}{(kg/s)^2}$)
- (c) Funktionswerte (absolut) der Maschengleichungen in Pa (nur ganzzahlige Gleichungsnummern sinnvoll)
- (d) Berechneter Druckabfall (in bar) in den Teilstrecken

Die Druckverluste in den Verteil- und Sammelleitungen (rot und blau) sind größtenteils mindestens zwei Größenordnungen niedriger als die mit Wärmeübergabestationen. Die Druckverluste in den Verteil- und Sammelleitungen bei den Teilstrecken 10/11 (vgl. Abbildung 5.24) sind im Vergleich zu denen in anderen Verteil- und Sammelleitungen auffallend hoch.

Die Widerstandskoeffizienten (s. Abb. 5.31b) und Druckverluste (a. Abb. 5.31d) in den Sammelleitungen (blau) sind im Vergleich zu denen in den entsprechenden Verteilleitungen (rot) bei identischen Massenströmen i.d.R. etwas höher.

Die Funktionswerte in den Knotengleichungen sind gemäß Abbildung 5.31a kleiner als $6 \cdot 10^{-12} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ und damit quasi Null. Die Funktionswerte der Maschengleichungen in Abbildung 5.31c liegen zwischen 100 und $1,3 \cdot 10^4$ Pa.

Darstellung des Druckverlaufs Entlang des in Abbildung 5.32 dargestellten Teilstreckenpfades soll ausgehend vom Druck p_1 der Druck p_2 berechnet werden. Dafür wird *DeltaPTS* gestartet und der gewünschte Teilstreckenpfad eingegeben.

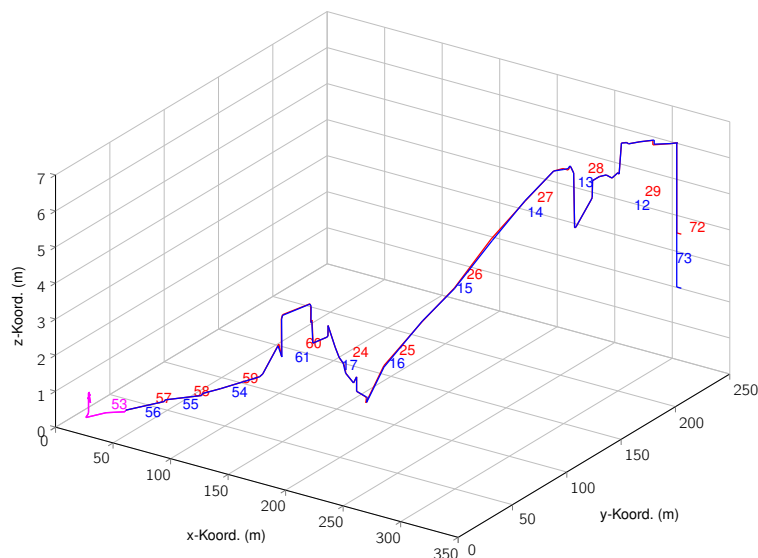


Abbildung 5.32.: Darstellung des Teilstreckenpfades im 'Energieverbund' von TS 72 im Vorlauf bis zur TS 53 und im Rücklauf zurück zur TS 73

Mit Abbildung 5.33 lässt sich die Druckdifferenz $p_2 - p_1$ zwischen zwei Punkten entlang des gewählten Teilstreckenpfades bestimmen. Die Zahlen von links nach rechts geben dabei die Nummern der zum gewählten Pfad gehörenden Teilstrecken an.

Der Druck p_2 ergibt sich aus den Werten für p_1 , den Druckdifferenzen aufgrund des dynamischen Drucks Δp_{dyn} und hydrostatischen Drucks Δp_{hyd} abzüglich des Druckverlustes $\Delta p_{\text{v,ges}}$

aufgrund der Reibungseinflüsse. Desweiteren ist der Anteil der Rohrreibung $\Delta p_{v,Rohr}$ und der Verluste in den Rohrbögen $\Delta p_{v,Bogen}$ am gesamten Druckverlust dargestellt.

Der hydrostatische Druck p_{hyd} an einer Stelle ist proportional zur Höhe der darüber stehenden Wassersäule. Nimmt die Höhe z einer Rohrleitung beispielsweise um 1m ab, so steigt der Druck p_2 deshalb um 10000 Pa (0,1m entsprechen 1000 Pa). Der Anstieg der Rohrleitung entlang der Teilstrecke 72 führt deshalb in Abbildung 5.33 zu einer entsprechenden Abnahme des Drucks p_2 und dessen Zunahme entlang der Teilstrecken 27, 26 und 25.

Der dynamische Druck p_{dyn} verhält sich dagegen proportional zu $(\frac{\dot{m}}{A \cdot \rho})^2$. Verringert sich beispielsweise der dynamische Druck, so erhöht sich der Druck p_2 entsprechend. Quantitativ betrachtet spielt der dynamische Druck (Staudruck) in Abbildung 5.33 eine geringe Rolle.

Die Druckverluste nehmen mit zunehmender Länge des Rohrleitungsweges zu. Die Druckverluste in den Rohrbögen sind gegenüber denen aufgrund der Rohrreibung klein. Am stärksten macht sich der Druckverlust der Wärmeübergabestation in Teilstrecke 53 bemerkbar.

Die entlang des Teilstreckenpfades berechnete Druckdifferenz zwischen dem Anfang bei Teilstrecke 72 und dem Ende bei Teilstrecke 73 beträgt etwa $(4,2 - 2,8)\text{bar} = 1,4\text{bar}$.

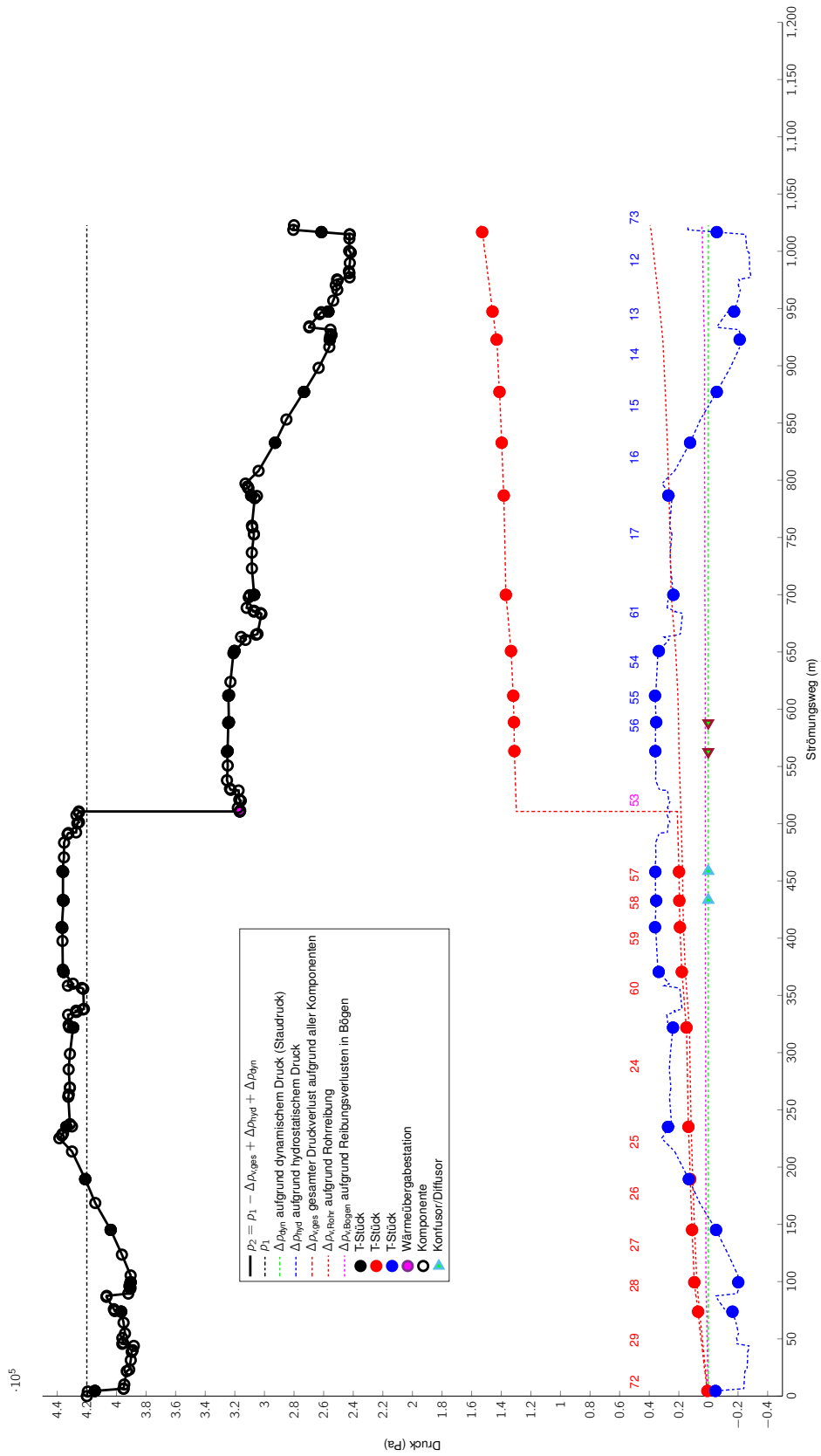


Abbildung 5.33.: Druckverlauf entlang eines Teilstreckenpfads im 'Energieverbund' von TS 72 im Vorlauf bis zur TS 53 und im Rücklauf zurück zur TS 73

AbSchätzung der Temperaturerhöhung durch Reibung Mit Gleichung 2.39 wird in Abbildung 5.34 die Temperaturerhöhung des Fluids aufgrund der Reibung berechnet.

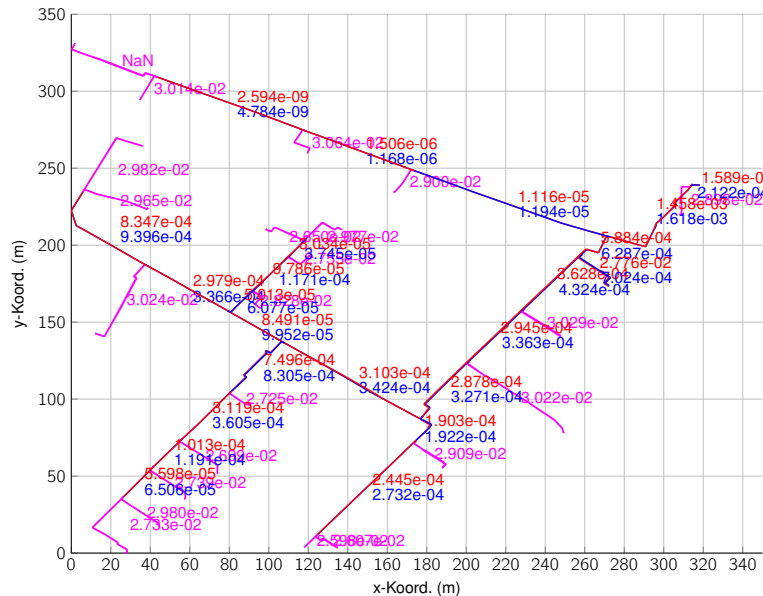


Abbildung 5.34.: Dissipative Temperaturerhöhung im 'Energieverbund'

Die Temperaturerhöhung aufgrund der Reibung beträgt höchstens einige hundertstel Grad Celcius. Im Rücklauf ist sie stets etwas höher als im Vorlauf.

5.3.3. Berücksichtigung der Druckmesswerte

Neben den Startwerten für die Massenströme gemäß Abbildung 5.26a sollen an dieser Stelle auch nun die Druck-Messwerte der Wärmeübergabestationen vom 31.01.2016 um 11:26:00 Uhr verwendet werden, anstatt den Druckverlust in den Wärmeübergabestationen zu berechnen.

Die Funktionswerte in den Knotengleichungen sind gemäß Abbildung 5.35a kleiner als $7 \cdot 10^{-16} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ und damit quasi Null. Die Funktionswerte der Maschengleichungen in Abbildung 5.35b liegen zwischen 700 und $3 \cdot 10^5$ Pa und damit insgesamt betrachtet etwas niedriger als in Abbildung 5.26b.

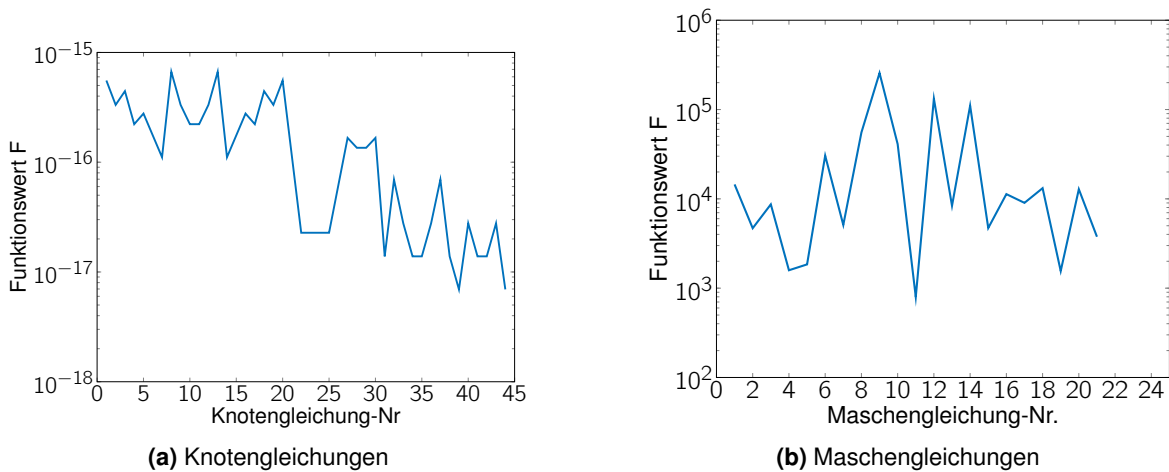


Abbildung 5.35.: Ergebnis bei direktem Einsetzen der Messwerte für Massenströme und Drücke der Wärmeübergabestationen (keine Iteration)

- (a) Funktionswerte der Knotengleichungen in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ (nur ganzzahlige Gleichungsnummern sinnvoll)
 (b) Funktionswerte der Maschengleichungen in Pa (nur ganzzahlige Gleichungsnummern sinnvoll)

Die geforderte Genauigkeit von 10^4 Pa wird gemäß Abbildung 5.35b in den Maschengleichungen 6, 8, 9, 10, 12 und 14 überschritten.

5.3.4. Änderung der Rauigkeit

Randbedingungen und Startwerte Statt mit einer Rauigkeit von $k=0,00001\text{m}$ wird nun für die Rauigkeit aller Teilstrecken $k=1\text{mm}=0,001\text{m}$ verwendet. Dieses Modell wird mit den identischen Startwerten und dem selben Lösungsverfahren wie in Unterabschnitt 5.3.2 berechnet.

Berechnung Mit diesem Lösungsverfahren wird gemäß Abbildung 5.36a nach der sechsten Iteration bei ca. 55000 Pa ein Minimum für den Schleifenparameter ϵ erreicht, das Abbruchkriterium wird jedoch nicht erfüllt. Ein Schwingen dieses Lösungsverfahrens wird während der durchgeführten Iterationsschritte nicht beobachtet.

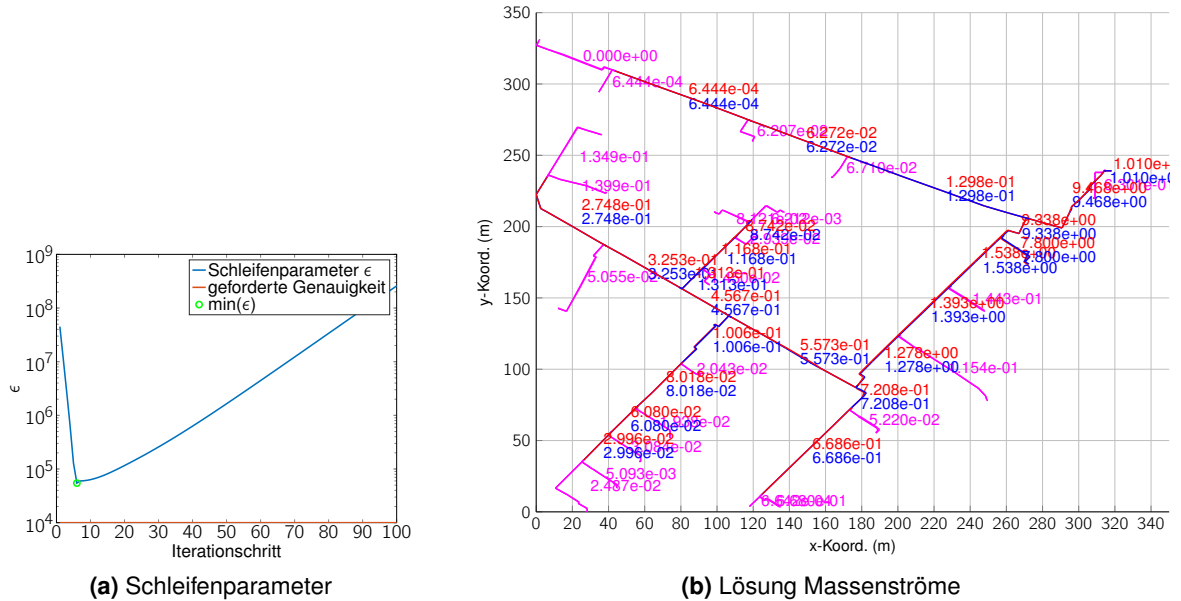


Abbildung 5.36.: Berechnungsergebnisse für den 'Energieverbund' (Knoten-Strang-Verfahren, $k = 10^{-3} m$)

(a) Verlauf des Schleifenparameters $\epsilon = \|F_{\text{Maschen}}\|$ (in Pa) über der Zahl der Iterationen

(b) Berechnete Massenströme \dot{m} (in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$)

Die für das Minimum berechneten Massenströme, Widerstandskoeffizienten und Druckverluste in den Teilstrecken sind in den Abbildungen 5.36b, 5.37b und 5.37d wiedergegeben.

Abbildung 5.36b zeigt, dass nur entlang des kürzesten Pfades von den Teilstrecken 72/73 zu den Teilstrecken 40/41 die Massenströme größer als jene in Abbildung 5.30b (Rauigkeit $k = 0,00001 m$) sind. Der Massenstrom in den Teilstrecken 40/41 ist dabei mit $7,80 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ fast 2,5 mal größer als der in Abb. 5.30b. Alle übrigen Massenströme der Abbildung 5.36b sind niedriger als die in Abbildung 5.30b.

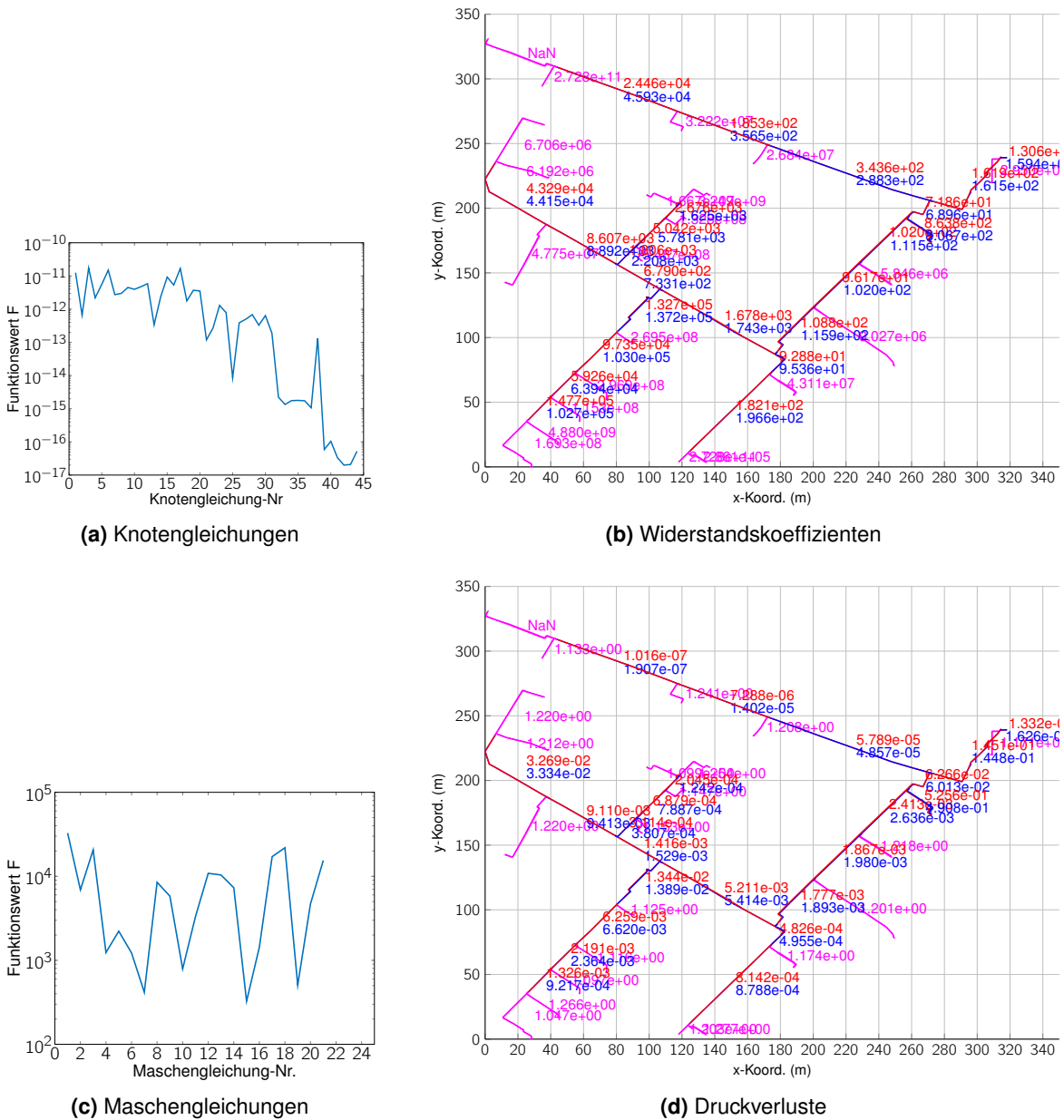


Abbildung 5.37.: Weitere Berechnungsergebnisse für den 'Energieverbund' (Knoten-Strang-Verfahren, $k = 10^{-3} m$)

- (a) Funktionswerte der Knotengleichungen in $\frac{kg}{s}$ (nur ganzzahlige Gleichungsnummern sinnvoll)
- (b) Berechnete Widerstandskoeffizienten ($\frac{Pa}{(\frac{kg}{s})^2}$)
- (c) Funktionswerte der Maschengleichungen in Pa (nur ganzzahlige Gleichungsnummern sinnvoll)
- (d) Berechneter Druckabfall (in bar) in den Teilstrecken

Die Druckverluste in den Verteil- und Sammelleitungen (rot und blau) fallen mindestens zwei

Größenordnungen niedriger als jene in Leitungen mit Wärmeübergabestationen. Die Druckverluste in den Verteil- und Sammelleitungen bei den Teilstrecken 10/11 (vgl. Abbildung 5.24) sind im Vergleich zu denen in anderen Verteil- und Sammelleitungen auffallend hoch.

Die Widerstandskoeffizienten (s. Abb. 5.37b) und Druckverluste (a. Abb. 5.37d) in den Sammelleitungen (blau) sind im Vergleich zu denen in den entsprechenden Verteilleitungen (rot) bei identischen Massenströmen i.d.R. etwas höher.

Die Funktionswerte in den Knotengleichungen sind gemäß Abbildung 5.31a kleiner als $2 \cdot 10^{-11} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ und damit quasi Null. Die Funktionswerte der Maschengleichungen in Abbildung 5.31c liegen zwischen 300 und $3 \cdot 10^4$ Pa.

5.4. Planungsvariante 'Vermaschter Energieverbund'

In Abbildung 5.38 ist die Struktur der Planungsvariante 'Vermaschter Energieverbund' und die verwendete Nummerierung der Teilstrecken dargestellt.

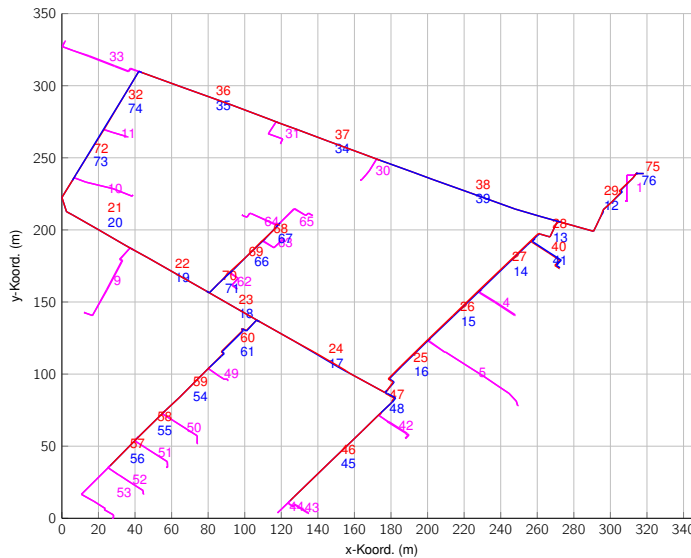


Abbildung 5.38.: Struktur der Planungsvariante 'Vermaschter Energieverbund' mit Nummerierung der Teilstrecken

Die gewählten Randbedingungen und Startwerte entsprechen den zu Beginn von Abschnitt 5.3 gemachten Angaben, mit folgenden Ergänzungen:

- Es werden drei weitere Teilstreckennummern 74, 75 und 76 eingeführt.
- Die Teilstreckennummern 72 und 73 werden in diesem Modell für die Vor- und Rücklaufleitung zur Teilstrecke 11 verwendet.
- Der Rücklauf der Teilstrecke 32 erhält die Teilstreckennummer 74 und die Vorlauf- und Rücklauf-Teilstrecken, in die der Gesamtmassenstrom hinein- bzw. herausströmt erhalten die Nummern 75 und 76.
- Die Teilstrecke 11 erhält 50% des Massenstroms von Teilstrecke 32 und 50% von Teilstrecke 72.

Die übrigen Massenströme der Verteil- und Sammelleitungen, werden wie zuvor unter Einhaltung der Knotenregel festgelegt.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Modellvarianten vorgestellt.

5.4.1. CROSS-Verfahren

Startwerte Die Abbildung 5.39b zeigt die Massenströme in den einzelnen Teilstrecken, die sich aufgrund der Messwerte der Wärmeübergabestationen vom 31.01.2016 um 11:26:00 Uhr ergeben.

Die Abbildung 5.39a zeigt die für diese Massenströme in den einzelnen Maschen berechneten Druckdifferenzen. Die Druckdifferenz liegt in vielen Maschen oberhalb 10^4 Pa und erreicht in Maschengleichung 14 mit $2 \cdot 10^8$ Pa den höchsten Wert.

Berechnung Ausgehend von den zuvor genannten Startwerten wird mit dem CROSS-Verfahren in Abbildung 5.39c in der 7. Iteration bei ca. 200000 Pa ein Minimum für den Schleifenparameter ϵ erreicht, das Abbruchkriterium wird jedoch nicht erfüllt⁸. Ab etwa der 20.ten Iteration beginnt das Lösungsverfahren zu schwingen.

Die für das Minimum berechneten Massenströme, Widerstandskoeffizienten und Druckverluste zeigen die Abbildungen 5.39d, 5.40b und 5.40d.

Während beim Energieverbund die Massenströme in allen nebeneinander liegenden Verteil- und Sammelleitungen stets von gleicher Höhe sind, weichen beim 'Vermaschten Energieverbund' die Massenströme der nebeneinander liegenden Verteil- und Sammelleitungen in der neu entstandenen großen Ringleitung in Abbildung 5.39d voneinander ab.

Die berechneten Massenströme der Teilstrecken liegen in den meisten Teilstrecken in der Größenordnung der Startwerte gemäß Abbildung 5.39b.

Die Druckverluste in den Leitungen mit Wärmeübergabestationen liegen gemäß Abbildung 5.40d in der Größenordnung von 1 bis 1,5 bar, während die Druckverluste in den Verteil- und Sammelleitungen (rot und blau) um mindestens eine Größenordnungen niedriger ausfallen.

Die Widerstandskoeffizienten (s. Abb. 5.40b) und Druckverluste (s. Abb. 5.40d) in den Sammelleitungen (blau) sind im Vergleich zu denen in den entsprechenden Verteilleitungen (rot) bei identischen Massenströmen i.d.R. etwas höher.

Die Funktionswerte in den Knotengleichungen sind gemäß Abbildung 5.40d kleiner als $10^{-14} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ und damit quasi Null. Die Funktionswerte der Maschengleichungen in Abbildung 5.40c liegen zwischen 800 und $2 \cdot 10^5$ Pa.

⁸Die geforderte Genauigkeit von 10^4 Pa wurde entsprechend der Genauigkeit der verfügbaren Messwerte gewählt, welche im betrachteten Zeitraum ebenfalls bei 10^4 Pa lag.

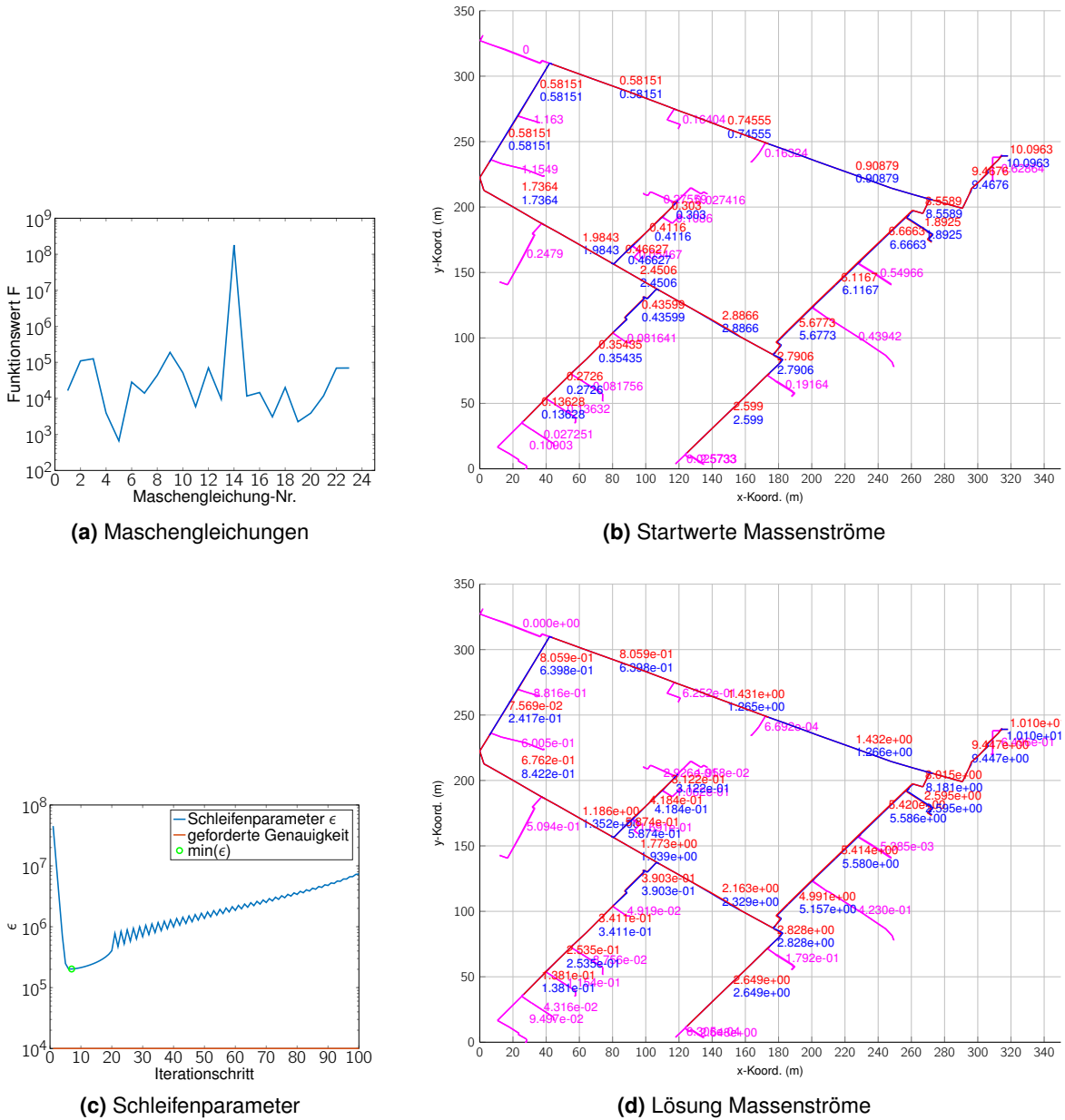


Abbildung 5.39.: Startwerte und Berechnungsergebnisse für den 'Vermaschten Energieverbund' (CROSS-Verfahren)

- (a) Funktions(start)werte der Maschengleichungen in Pa (nur ganzzahlige Gleichungsnummern sinnvoll)
- (b) Massenstrom-Startwerte aus Messwerten vom 31.01.2016 um 11:26:00 Uhr
- (c) Verlauf des Schleifenparameters $\epsilon = \|F_{\text{Maschen}}\|$ (in Pa) über der Zahl der Iterationen
- (d) Berechnete Massenströme \dot{m} (in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$)

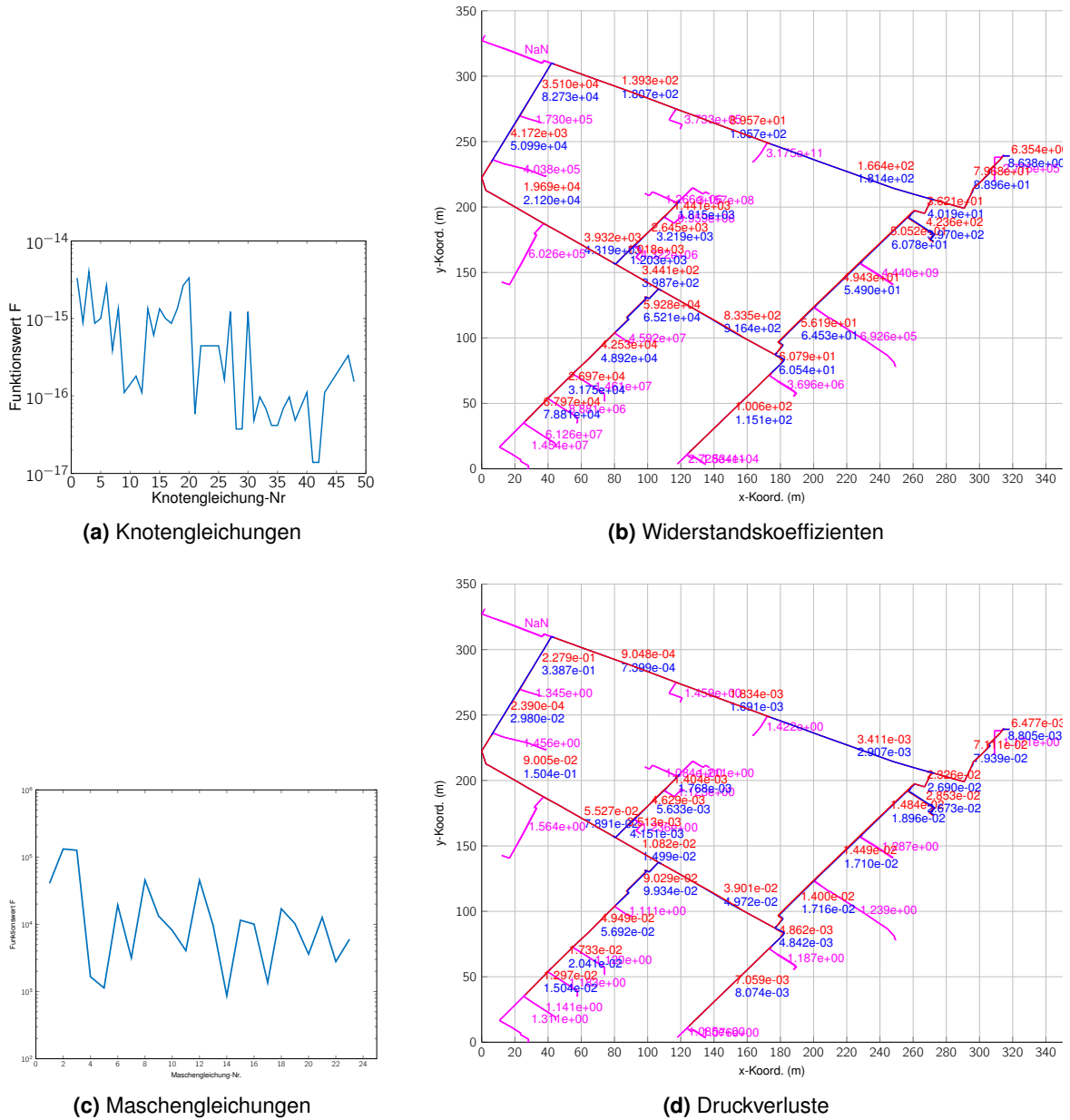


Abbildung 5.40.: Weitere Berechnungsergebnisse für den 'Vermaschten Energieverbund' (CROSS-Verfahren)

- (a) Funktionswerte der Knotengleichungen in $\frac{kg}{s}$ (nur ganzzahlige Gleichungsnummern sinnvoll)
- (b) Berechnete Widerstandskoeffizienten ($\frac{Pa}{(kg/s)^2}$)
- (c) Funktionswerte der Maschengleichungen in Pa (nur ganzzahlige Gleichungsnummern sinnvoll)
- (d) Berechneter Druckabfall (in bar) in den Teilstrecken

5.4.2. Knoten-Strang-Verfahren

Startwerte Es werden dieselben Startwerte wie zuvor im Unterabschnitt 5.4.1 verwendet.

Berechnung Mit diesem Lösungsverfahren wird in Abbildung 5.41a nach der sechsten Iteration bei ca. 90000 Pa ein Minimum für den Schleifenparameter ϵ erreicht, das Abbruchkriterium wird jedoch nicht erfüllt. Ein Schwingen dieses Lösungsverfahrens wird während der durchgeführten Iterationsschritte nicht beobachtet.

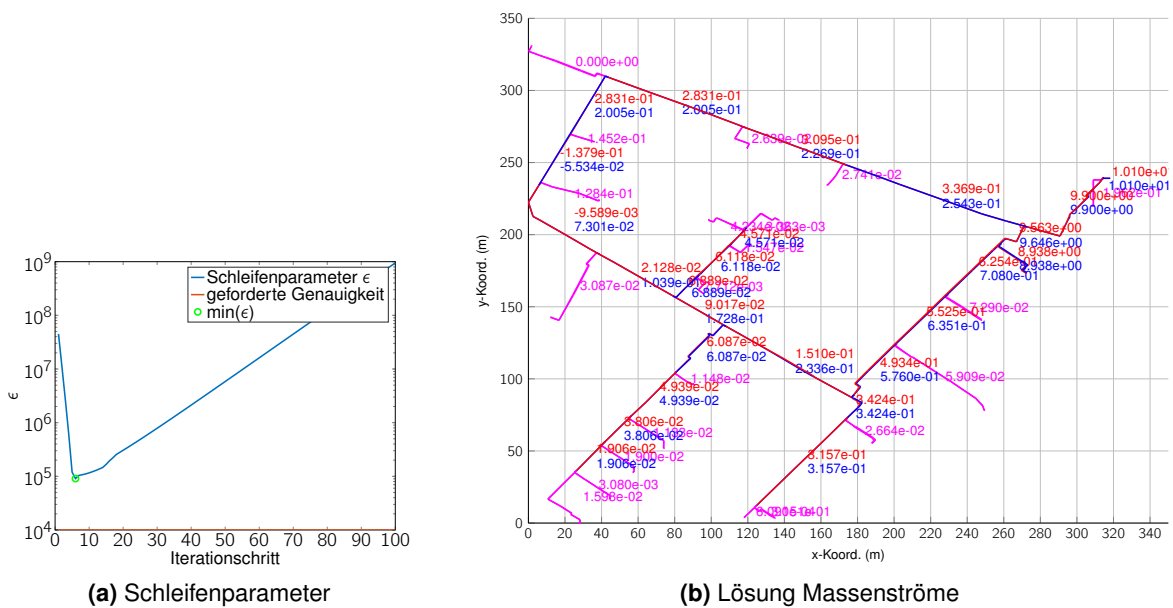


Abbildung 5.41.: Massenströme im 'Vermaschten Energieverbund' (Knoten-Strang-Verfahren)

(a) Verlauf des Schleifenparameters $\epsilon = \|F_{\text{Maschen}}\|$ (in Pa) über der Zahl der Iterationen

(b) Berechnete Massenströme \dot{m} (in $\frac{kg}{s}$)

Die für das Minimum berechneten Massenströme, Widerstandskoeffizienten und Druckverluste in den Teilstrecken sind in den Abbildungen 5.41b, 5.42b und 5.42d wiedergegeben.

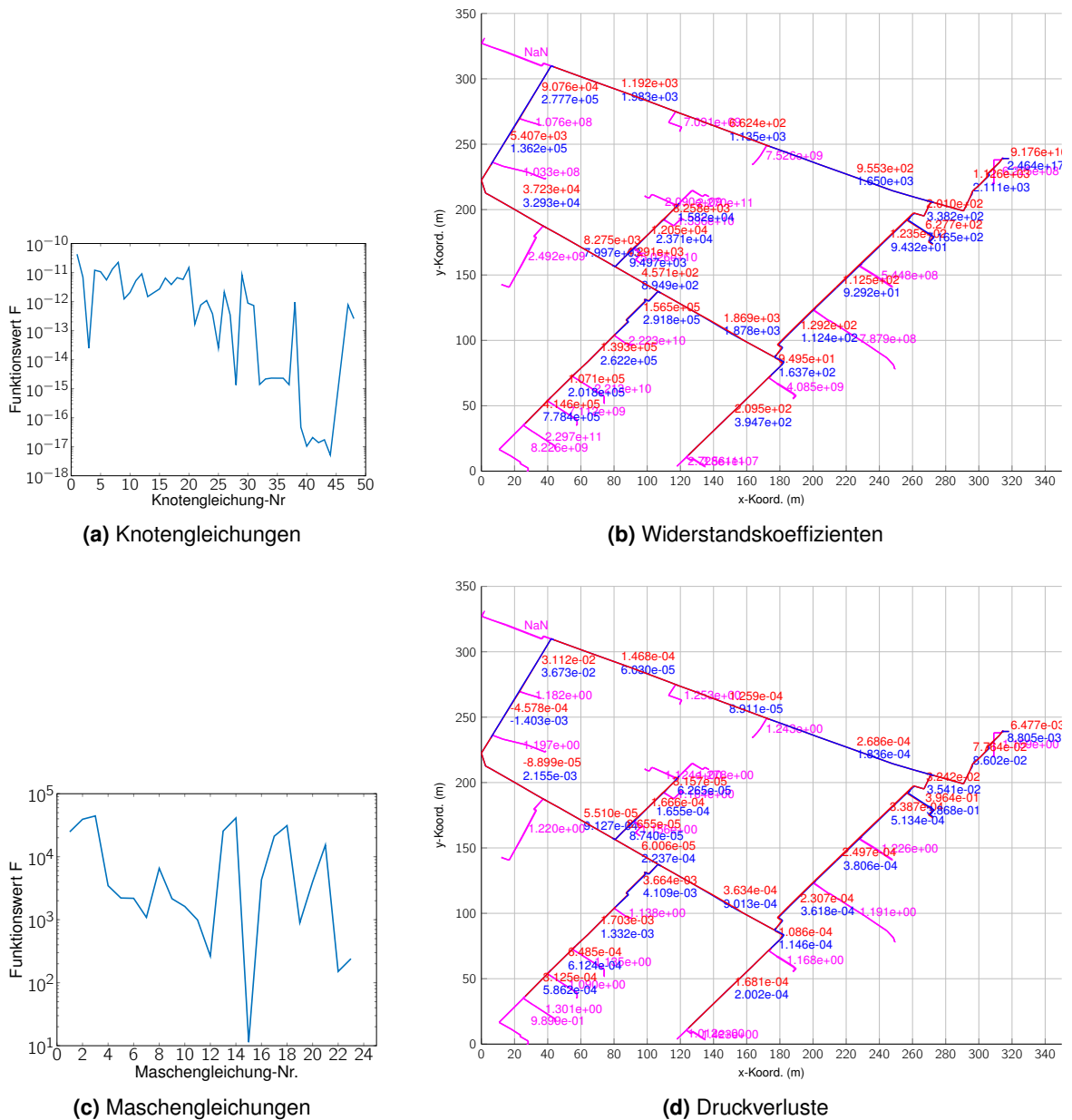


Abbildung 5.42.: Knoten-Strang-Verfahren mit interner R-Berechnung:

- (a) Funktionswerte der Knotengleichungen in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ (nur ganzzahlige Gleichungsnr. sinnvoll)
- (b) Berechnete Widerstandskoeffizienten ($\frac{\text{Pa}}{(\text{kg}/\text{s})^2}$)
- (c) Funktionswerte der Maschengleichungen in Pa (nur ganzzahlige Gleichungsnr. sinnvoll)
- (d) Berechneter Druckabfall (in bar) in den Teilstrecken

Während beim Energieverbund die Massenströme in allen nebeneinander liegenden Verteil-

und Sammelleitungen stets von gleicher Höhe sind, weichen beim 'Vermaschten Energieverbund' die Massenströme der nebeneinander liegenden Verteil- und Sammelleitungen in der neu entstandenen großen Ringleitung in Abbildung 5.41b voneinander ab.

Die berechneten Massenströme der Teilstrecken liegen in den meisten Teilstrecken nicht in der Größenordnung der Startwerte gemäß Abbildung 5.39b. Entsprechend der berechneten Lösung fließen mit ca. $8,9 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ fast 90% des Gesamtmassenstroms ($10,10 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$) durch die Teilstrecken 40/41 und damit über die drei Wärmeübergabestationen 2, 3 und 4. Die Massenströme in den übrigen Teilstrecken fallen dementsprechend gering aus.

Anders als beim CROSS-Verfahren kommt es in den Teilstrecken 72, 73 und 21 zur Strömungsumkehr. Damit fließen im Vorlauf die Massenströme der Teilstrecken 21 und 22 gemeinsam in die Teilstrecke 9. Andererseits trennt sich der Rücklauf aus Teilstrecke 10 auf die beiden Teilstrecken 73 und 20 auf.

Quantitativ und qualitativ weicht die Lösung damit signifikant von der des CROSS-Verfahrens in Abbildung 5.39d ab.

Die Druckverluste in den Leitungen mit Wärmeübergabestationen liegen gemäß Abbildung 5.42d in der Größenordnung von 1 bis 1,3 bar, während die Druckverluste in den Verteil- und Sammelleitungen (rot und blau) um mindestens zwei Größenordnungen niedriger ausfallen.

Die Widerstandskoeffizienten (s. Abb. 5.42b) und Druckverluste (s. Abb. 5.42d) in den Sammelleitungen (blau) sind im Vergleich zu denen in den entsprechenden Verteilleitungen (rot) bei identischen Massenströmen i.d.R. etwas höher.

Die Funktionswerte in den Knotengleichungen sind gemäß Abbildung 5.42d kleiner als $10^{-10} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ und damit quasi Null. Die Funktionswerte der Maschengleichungen in Abbildung 5.42c liegen zwischen 10 und $5 \cdot 10^4$ Pa.

5.5. Tabellarische Ergebniszusammenfassung

In diesem Abschnitt werden einige Merkmale der Berechnungsverfahren für die zuvor betrachteten Modellvarianten nochmals tabellarisch zusammengestellt.

In Tabelle 5.4 sind die Merkmale der Berechnungsverfahren für das Beispiel von AIGNER aus Unterabschnitt 5.1.1 nochmals zusammengefasst.

Tabelle 5.4.: Ergebniszusammenfassung für das Beispiel von AIGNER

Merkmal	Verfahren	
	Cross	Knoten-Strang
Lösung des Beispiels berechnet	ja	ja
Anzahl Iterationen bis zur Lösung	6	2
Abbruchkrit. $\epsilon = \ F_{\text{Maschen}}\ $ in m	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$
Abbruchkrit. erfüllt	ja	ja
Anzahl Iterationen	9	3
Endergebnis beider Verfahren ist gleich (im Rahmen der angegebenen Genauigkeit)	ja	

Tabelle 5.5 zeigt die Merkmale der Berechnungsverfahren für das Beispiel von GROMBACH aus Unterabschnitt 5.1.2.

Tabelle 5.5.: Ergebniszusammenfassung für das Beispiel von GROMBACH

Merkmal	Verfahren	
	Cross	Knoten-Strang
Lösung des Beispiels berechnet	ja, mit Gesamtschrittverfahren	nicht explizit berechnet
Anzahl Iterationen bis zur Lösung	2	-
Abbruchkrit. $\epsilon = \ F_{\text{Maschen}}\ $ in l/s	$< 10^{-2}$	$< 10^{-2}$
Abbruchkrit. erfüllt	ja	ja
Anzahl Iterationen	17	9
Endergebnis beider Verfahren ist gleich (im Rahmen der angegebenen Genauigkeit)	ja	

Die tabellarische Zusammenfassung der Merkmale der Berechnungsverfahren für das einfache Maschennetz aus Abschnitt 5.2 ist Tabelle 5.6 zu entnehmen.

Tabelle 5.6.: Ergebniszusammenfassung für das 'Einfache Maschennetz'

Spalte (1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Merkmal	Cross (s. Abschn. 5.2.1)	Knoten-Strang R-Ber. intern (s. Abschn. 5.2.2)	Knoten-Str. R-Ber. extern (s. Abschn. 5.2.2)	Cross (s. Abschn. 5.2.3)	Verfahren Knoten-Str. R-Ber. intern (s. Abschn. 5.2.3)	Cross (s. Abschn. 5.2.4)	Knoten-Str. R-Ber. intern (s. Abschn. 5.2.4)	Knoten-Str. R-Ber. intern (s. Abschn. 5.2.5)	Knoten-Str. R-Ber. intern (s. Abschn. 5.2.5)
\dot{m}_{ges} in $\frac{kg}{s}$	10	10	10	10	10	1	1	10	10
Startwerte	s. Abb. 5.13a	s. Abb. 5.13a	s. Abb. 5.13a	s. Abb. 5.17	s. Abb. 5.17	s. Abb. 5.20	s. Abb. 5.20	s. Abb. 5.13a	s. Abb. 5.13a
unveränderl. Massenströme	keine	keine	keine	keine	keine	keine	keine	TS 1/10 TS 5/6	TS 1/10 TS 5
Abbruchkriterium $\epsilon = \ F_{Maschen}\ $ in Pa $\epsilon_{RTS} = 1 - \frac{\ RTS^{(n)}\ }{\ RTS^{(n-1)}\ } $	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Abbruchkriterium erfüllt	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein	ja
Anzahl Iterationen	6	6	12	15	15	114	114	300	7
Knotengl. erfüllt, wenn $ F_{Knotengl.} \approx 0 \frac{kg}{s}$	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein	nein
Maschengl. erfüllt, wenn Abbruchkritt. erfüllt	$< 10^{-15}$	$< 10^{-15}$	$< 10^{-14}$	$< 2 \cdot 10^{-14}$	$< 3 \cdot 10^{-16}$	$< 6,3 \cdot 10^{-16}$	$< 2 \cdot 10^{-16}$	-	$> 0,14$
Endergebnis der Verfahren identisch (im Rahmen der angegebenen Genauigkeit)	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein	ja

Die Merkmale der Berechnungsverfahren für den Energieverbund in Abschnitt 5.3 fasst Tabelle 5.7 zusammen.

Tabelle 5.7.: Ergebniszusammenfassung für den 'Energieverbund'

Spalte (1) Merkmal	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	Cross	Verfahren Knoten-Strang R-Ber. intern	Knoten-Str. R-Ber. intern	Startwerte $p_{wuest} = \text{Fkt.}$	Startwerte $p_{wuest} = \text{Messwerte}$
Rauigkeit k in m	10^{-5}	10^{-5}	10^{-3}	10^{-5}	10^{-5}
Startwerte und \dot{m}_{ges}	s. Abb. 5.26a gemäß Tab. 5.3	s. Abb. 5.26a gemäß Tab. 5.3	s. Abb. 5.26a gemäß Tab. 5.3	s. Abb. 5.26a gemäß Tab. 5.3	s. Abb. 5.26a gemäß Tab. 5.3
unveränderl. Massenströme	keine	keine	keine	-	-
Abbruchkriterium $\epsilon = \ F_{Maschen}\ $ in Pa	$< 10^4$	$< 10^4$	$< 10^4$	-	-
Abbruchkriterium erfüllt	nein	nein	nein	-	-
min(ϵ) in Pa	$\approx 6 \cdot 10^4$	$\approx 3 \cdot 10^4$	$\approx 5,5 \cdot 10^4$	-	-
min(ϵ) bei Iteration	43	8	6	-	-
Knotengl. erfüllt, wenn $ F_{Knotengl.} \approx 0 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$	ja $< 10^{-14}$	ja $< 6 \cdot 10^{-12}$	ja $< 2 \cdot 10^{-11}$	ja $< 7 \cdot 10^{-16}$	ja $< 7 \cdot 10^{-16}$
$\ F_{Maschen}\ $ in Pa bei min(ϵ)	20 bis $3 \cdot 10^4$	100 bis $1,3 \cdot 10^4$	300 bis $3,3 \cdot 10^4$	40 bis $2 \cdot 10^8$	700 bis $3 \cdot 10^5$
Endergebnis der Verfahren identisch (im Rahmen der angege- benen Genauigkeit)	nein		-	-	

Die Tabelle 5.8 fasst die Merkmale der Berechnungsverfahren für den 'Vermaschten Energieverbund' aus Abschnitt 5.4 zusammen.

Tabelle 5.8.: Ergebniszusammenfassung für den 'Vermaschten Energieverbund'

Merkmal	Verfahren	
	Cross	Knoten-Strang R-Ber. intern
Rauigkeit k in m	10^{-5}	10^{-5}
Startwerte und \dot{m}_{ges}	s. Abb. 5.39b gemäß Tab. 5.3	s. Abb. 5.39b gemäß Tab. 5.3
unveränderl. Massenströme	keine	keine
Abbruchkriterium $\epsilon = \ F_{Maschen}\ $ in Pa	$< 10^4$	$< 10^4$
Abbruchkriterium erfüllt	nein	nein
min(ϵ) in Pa	$\approx 2 \cdot 10^5$	$\approx 9 \cdot 10^4$
min(ϵ) bei Iteration	7	6
Knotengl. erfüllt, wenn $ F_{Knotengl.} \approx 0 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$	ja $< 10^{-14}$	ja $< 10^{-10}$
$\ F_{Maschen}\ $ in Pa bei min(ϵ)	800 bis $2 \cdot 10^5$	10 bis $5 \cdot 10^4$
Endergebnis der Verfahren identisch (im Rahmen der angegebenen Genauigkeit)	nein	

6. Auswertung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den verschiedenen vorgestellten Beispielen und Modellvarianten primär hinsichtlich der Plausibilität der Lösungen qualitativ diskutiert, um zu überprüfen, ob das Berechnungsmodell grundsätzlich geeignet ist die Massenströme in Rohrnetzen mit Maschen zu berechnen.

Die für das Gesamtmodell zur Berechnung der Widerstandskoeffizienten R benötigten Funktionen wurden bereits in Abschnitt 3.3 vorgestellt und verifiziert. Somit wird auf diese in der folgenden Auswertung nicht mehr eingegangen.

6.1. Beispielaufgaben

6.1.1. Beispiel von Aigner

Das als Gesamtschrittverfahren implementierte CROSS-Verfahren wird aufgrund der Ergebnisse in Unterabschnitt 5.1.1 als verifiziert betrachtet, da das Ergebnis von AIGNER im Rahmen der angegebenen Genauigkeit reproduziert wird.

Da mit dem Knoten-Strang-Verfahren im Rahmen der angegebenen Genauigkeit das gleiche Endergebnis wie mit dem zuvor verifizierten CROSS-Verfahren berechnet wird, wird der Lösungsalgorithmus für das Knoten-Strang-Verfahren-Verfahren in Skript *SolveNLGS*.m* ebenfalls als verifiziert betrachtet.

Beide Lösungsverfahren sind geeignet die Massen- bzw. Volumenströme dieses vermaschten Rohrnetzes richtig zu berechnen.

Mit dem Knoten-Strang-Verfahren werden bei vergleichbarem Endergebnis weniger Iterationen als mit dem CROSS-Verfahren benötigt.

6.1.2. Beispiel von Grombach

Das Ergebnis der eigenen Berechnung mit dem CROSS-Verfahren weicht von den Ergebnissen von GROMBACH in Unterabschnitt 5.1.2 etwas ab. Die Ursache dafür wird in den folgenden Punkten gesehen:

1. GROMBACH berechnet die Maschen sequentiell, während die eigene Berechnung auf dem Gesamtschrittverfahren basiert.
2. Während bei der eigenen Nachrechnung die Startwerte für identische Teilstrecken in allen Maschen identisch sind, setzt GROMBACH für die Teilstrecken 'B-D' und 'D-E'¹ in den Maschen I bis III unterschiedliche Werte ein.

Trotz dieser unterschiedlichen Berechnungswege liegen die Ergebnisse so nah beieinander, dass das vom Autor der vorliegenden Arbeit als Gesamtschrittverfahren implementierte CROSS-Verfahren, inklusive der Berechnung der Rohrreibungswiderstände, als verifiziert betrachtet wird.

Da das Endergebnis des Knoten-Strang-Verfahrens im Rahmen der angegebenen Genauigkeit identisch mit dem bereits verifizierten CROSS-Verfahren ist, wird dessen Lösungsalgorithmus, inklusive der Berechnung der Rohrreibungswiderstände, ebenfalls als verifiziert betrachtet.

Beide Lösungsverfahren sind geeignet die Massen- bzw. Volumenströme dieses vermaschten Rohrnetzes richtig zu berechnen.

Mit dem Knoten-Strang-Verfahren werden bei vergleichbarem Endergebnis weniger Iterationen als mit dem CROSS-Verfahren benötigt.

6.2. Rohrnetz 'Einfaches Maschennetz'

Die nachfolgende Auswertung baut auf den bereits verifizierten Lösungsalgorithmen für das als Gesamtschrittverfahren implementierte CROSS-Verfahren und das Knoten-Strang-Verfahren in Abschnitt 6.1, sowie auf den bereits verifizierten bzw. als plausibel überprüften Funktionen in Abschnitt 3.3 auf.

¹Aufgrund eines Druckfehlers bei [14] in Masche III auch als 'D-C' bezeichnet.

6.2.1. Vergleich der Verfahrensvarianten

Die berechneten Ergebnisse dieses Simulationsmodells für einen Gesamtmassenstrom von $\dot{m}_{ges} = 10 \frac{kg}{s}$ sind nicht ohne weiteres validierbar, da für dieses Rohrnetz keine Referenzwerte vorhanden sind.

Jedoch erscheinen die Ergebnisse für das CROSS-Verfahren in Unterabschnitt 5.2.1 und das Knoten-Strang-Verfahren in Unterabschnitt 5.2.2, sowohl mit interner als auch mit externer R-Berechnung, für die Simulationsläufe der Spalten 2 bis 4 in Tabelle 5.6 durchaus plausibel, denn folgende Punkte werden erfüllt:

- Das gewählte Abbruchkriterium wird erfüllt.
- Die Knotenregel wird erfüllt.
- Die Maschenregel wird, angesichts der geringen Restdifferenz von 1 Pa bei Druckverlusten in den Teilstrecken in der Größenordnung von 1000 Pa und mehr, als erfüllt angesehen.
- Teilt sich bei einer Stromtrennung ein Massenstrom auf, so führt die Teilstrecke mit dem höheren Widerstandskoeffizienten erwartungsgemäß einen geringeren Massenstrom als die Teilstrecke mit dem kleineren Widerstandskoeffizienten.
- Die Widerstandskoeffizienten in Teilstrecken mit kleinerem Rohrdurchmesser weisen erwartungsgemäß in der Regel² einen größeren Widerstandskoeffizienten auf, als Teilstrecken mit größerem Rohrdurchmesser.
- Bei gleichem Rohrdurchmesser und gleichem Massenstrom weisen Teilstrecken mit einer Fluidtemperatur von 35°C erwartungsgemäß einen höheren Widerstandskoeffizienten auf als Teilstrecken mit 75°C. Dieser Umstand wird auf den Einfluss der Viskosität zurückgeführt, die gemäß Abbildung 3.9 bei abnehmender Temperatur ansteigt.

Unabhängig von der Wahl des Lösungsverfahrens sind die Endergebnisse im Rahmen der angegebenen Genauigkeit für alle drei in den Spalten 2 bis 4 der Tabelle 5.6 angegebenen Varianten identisch.

Das NEWTON-Verfahren mit externer R-Berechnung benötigt insgesamt mehr Iterationen als die anderen beiden Lösungsverfahren, um das gleiche Endergebnis zu berechnen. Bemerkenswert ist jedoch, dass die Konstanz der R-Werte bei der externen R-Berechnung, die Konvergenzgeschwindigkeit des Schleifenparameters ϵ in diesem Modell erhöht.

²Auch andere Größen, z.B. der Massenstrom, haben einen Einfluss auf den Widerstandskoeffizienten.

6.2.2. Einfluss der Startwerte

Die Veränderung der Startwerte in Unterabschnitt 5.2.3 und den Spalten 5 und 6 der Tabelle 5.6 gegenüber den Spalten 2 bis 4 hat bei ansonsten gleichen Randbedingungen für das CROSS- und das Knoten-Strang-Verfahren im Rahmen der angegebenen Genauigkeit keine Auswirkungen auf das Endergebnis.

Die Ursache für die größere Anzahl an Iterationen bis zum Endergebnis wird in der numerisch größeren Abweichung der Startwerte vom Endergebnis vermutet, denn der Schleifenparameter ϵ weist nun zu Beginn Werte in der Gegend von 10^{10} Pa auf und ist damit um den Faktor 10^5 größer als bei den Simulationen der Spalten 2 bis 4 in Tabelle 5.6 .

Die Punkte aus Unterabschnitt 6.2.1 treffen auch hier zu, deswegen werden die Ergebnisse ebenfalls als plausibel angesehen.

6.2.3. Einfluss des Gesamtmassenstroms

Wird der Gesamtmassenstrom auf $\dot{m}_{ges} = 1 \frac{kg}{s}$, also ein Zehntel des vorher betrachteten Gesamtmassenstroms, erhöht sich sowohl beim CROSS- als auch beim Knoten-Strang-Verfahren gemäß Unterabschnitt 5.2.4 und den Spalten 7 und 8 in Tabelle 5.6 der Rechenaufwand auf nahezu das 20-fache (114 statt 6 Iterationen).

Die Ursache für den deutlich erhöhten Rechenaufwand wird in der Reduzierung des Gesamtmassenstroms auf ein Zehntel vermutet. Die Steigung, der mit dem NEWTON-Verfahren berechneten Tangenten ist dadurch geringer und der neue Startpunkt $\dot{m}^{(n+1)}$ der Iteration n+1 gemäß Gleichung 2.15 damit weiter vom Ausgangspunkt $\dot{m}^{(n)}$ der Iteration n entfernt, als bei größeren Massenströmen.

Eine Zehntelung des Gesamtmassenstrom führt in Abbildung 5.21b nicht zu einer Zehntelung der Massenströme gegenüber den Ergebnissen in den Abbildungen 5.14b und 5.15b. Die Ursache für dieses nichtlineare Verhalten wird darauf zurückgeführt, dass die Druckverluste in den Teilstrecken nicht linear abhängig von den Massenströmen sind auch die Widerstandskoeffizienten ihrerseits von den Massenströmen abhängen.

Die Punkte aus Unterabschnitt 6.2.1 treffen auch hier zu, deswegen werden die Ergebnisse ebenfalls als plausibel angesehen.

6.2.4. Festlegen unveränderlicher Massenströme

Das Festlegen unveränderlicher Startwerte in Unterabschnitt 5.2.5 und den Spalten 9 und 10 der Tabelle 5.6 gegenüber den Spalten 2 bis 4 hat bei ansonsten gleichen Rand- und Startwerten zeigt deutliche Auswirkungen auf das Endergebnis des Knoten-Strang-Verfahrens.

Das Festlegen der Massenströme in den Teilstrecken 1 und 10 stellt nur sicher, dass der Gesamtmassenstrom der Lösung wie beabsichtigt bei $\dot{m}_{ges} = 10 \frac{kg}{s}$ liegt. In der Variante der Spalte 9 in Tabelle 5.6, bei der die Massenströme der Teilstrecke 5 und 6 festgelegt werden, konvergiert das Knoten-Strang-Verfahren innerhalb von 300 Iterationen nicht.

In der Variante der Spalte 10 in Tabelle 5.6, bei der nur der Massenstrom der Teilstrecke 5 festgelegt wird, konvergiert das Knoten-Strang-Verfahren zwar, erfüllt aber die Knotenregel nicht mehr. Die Lösung ist damit nicht plausibel und somit physikalisch wertlos.

Dieses Verhalten bei Festlegen unveränderlicher Massenströme ist nicht überraschend, wenn man beachtet, dass die festgelegten Massenströme, bei ansonsten gleichen Bedingungen, nicht mit der bereits in Unterabschnitt 5.2.1 und Unterabschnitt 5.2.2 berechneten Lösung übereinstimmen.

Daraus wird umgekehrt der Schluss gezogen, dass ein Festlegen von Massenströmen innerhalb der Systemgrenzen nur zu physikalisch sinnvollen Lösungen führen wird, wenn deren Werte möglichst exakt mit der mathematischen Lösung des Modells übereinstimmen.

Da auch experimentelle Messwerte diese Bedingung in der Regel nur eingeschränkt erfüllen, wird das Festlegen unveränderlicher Massenströme innerhalb der Systemgrenzen nicht empfohlen.

6.3. Rohrnetz 'Energieverbund'

Die nachfolgende Auswertung baut auf den bereits verifizierten Lösungsverfahren für das als Gesamtschrittverfahren implementierte CROSS-Verfahren und das Knoten-Strang-Verfahren in Abschnitt 6.1, sowie auf den bereits verifizierten bzw. als plausibel überprüften Funktionen in Abschnitt 3.3 auf.

6.3.1. Schwachstellen des Modells

In Unterabschnitt 4.3.2 wurden bezüglich der bei der Parametrierung verwendeten Werte bereits unterschiedliche potentielle Schwachstellen des Modells genannt. Besonders betroffene Teilstrecken wurden in Abbildung 5.24 farblich hervorgehoben. Bei der Auswertung der

Druckmesswerte der Wärmeübergabestationen fiel desweiteren auf, dass diese nur mit einer Genauigkeit von 0, 1 bar vom Betreiber gespeichert wurden. Um die damit verbundene Stufenbildung und verminderte Genauigkeit der empirisch ermittelten Funktionen *calcRWuestFit* zu reduzieren wird empfohlen, die Druckmesswerte mit verbesserter Genauigkeit zu speichern.

Unter Berücksichtigung der angesprochenen Schwachstellen des Modells kann eine sehr gute Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse mit dem realen Rohrnetz nicht erwartet werden. Es wird daher empfohlen durch folgende Maßnahmen eine bessere Übereinstimmung des Simulationsmodells mit dem realen Rohrnetz anzustreben:

- Durchführung einer ausführlichen Rohrnetzanalyse, mit dem Ziel die in Unterabschnitt 4.3.2 geschätzten Parameter, unter anderem die lokal als unterschiedlich anzunehmenden Werte der Rauigkeit k , durch verifizierte Parameter zu ersetzen
- Temperaturen in den Teilstreckenabschnitten aus Temperatur-Messwerten oder einem validierten thermischem Modell ableiten, anstatt diese als konstant anzunehmen
- Druckverluste der Wärmeübergabestationen genauer bestimmen, indem diese entweder bei realen Rohrnetzen mit den tatsächlichen Druckmesswerten ermittelt oder bei geplanten Rohrnetzen unter Kenntnis aller Einflussgrößen mit dem theoretischen Ansatz in Abschnitt 2.3.2 berechnet werden
- Um künftig die wahren Werte der Prozessgrößen anhand der fehlerbehafteten Messwerte schätzen zu können, wird der Einsatz von *Data validation and reconciliation* empfohlen

6.3.2. Vergleich der Verfahrensvarianten

Die Ergebnisse für das CROSS-Verfahren in Unterabschnitt 5.3.1 und das Knoten-Strang-Verfahren mit interner R-Berechnung in Unterabschnitt 5.3.2 sind trotz der genannten Schwachstellen für die Simulationsläufe der Spalten 2 und 3 in Tabelle 5.7 durchaus plausibel, denn:

- Die Knotenregel wird erfüllt.
- Teilt sich bei einer Stromtrennung ein Massenstrom auf, so führt die Teilstrecke mit dem höheren Widerstandskoeffizienten erwartungsgemäß einen geringeren Massenstrom als die Teilstrecke mit dem kleineren Widerstandskoeffizienten.
- Die Widerstandskoeffizienten in Teilstrecken mit kleinerem Rohrdurchmesser weisen erwartungsgemäß in der Regel einen größeren Widerstandskoeffizienten auf, als Teilstrecken mit größerem Rohrdurchmesser.

- Bei gleichem Rohrdurchmesser und gleichem Massenstrom weisen Teilstrecken mit einer Fluidtemperatur von 35°C erwartungsgemäß einen höheren Widerstandskoeffizienten auf als Teilstrecken mit 75°C . Dieser Umstand wird auf den Einfluss der Viskosität zurückgeführt, die gemäß Abbildung 3.9 bei abnehmender Temperatur ansteigt.

Allerdings wird sowohl beim CROSS-Verfahren als auch beim Knoten-Strang-Verfahren die Maschenregel im Rahmen der geforderten Genauigkeit von $\Delta p_{\text{Masche}} < 10^4 \text{ Pa}$ in vielen Maschen nicht erfüllt. Deswegen wird auch das Abbruchkriterium bei keinem der Verfahren erfüllt.

Unter Berücksichtigung der folgenden Überlegung kann man jedoch auch die geforderte Genauigkeit überdenken:

Für die empirisch bestimmten Fitkurven der Wärmeübergabestationen lassen sich mit statistischen Methoden Konfidenzintervalle bestimmen. Auch für die berechneten Widerstandskoeffizienten lassen sich mittels Fehlerfortpflanzung absolute und relative Fehler berechnen. Der mit diesen Werten berechnete absolute Fehler für die Druckdifferenz in einer Masche sei $\overline{\Delta p_{\text{Masche}}}$. Dann wäre die Maschenregel erfüllt wenn $0 \in [\Delta p_{\text{Masche}} - \overline{\Delta p_{\text{Masche}}}, \Delta p_{\text{Masche}} + \overline{\Delta p_{\text{Masche}}}]$.

Dass das CROSS-Verfahren erst in der 43.ten Iteration das Minimum des Schleifenparameters erreicht, während das Knoten-Strang-Verfahren dieses bereits nach der achten Iteration erreicht, entspricht nach Ansicht des Autors dem bereits in Unterabschnitt 2.1.2 genannten Nachteil des CROSS-Verfahrens, dass seine Konvergenzrate in großem Maß von der Netzstruktur abhängig ist.

Die Schwingungen des CROSS-Verfahrens ab etwa der 80.ten Iteration werden als Anzeichen dafür angesehen, dass das CROSS-Verfahren mathematisch nicht mehr stabil ist.

Das Knoten-Strang-Verfahren weist diese zwei Nachteile im Verlauf des Schleifenparameters gemäß Abbildung 5.30a nicht auf und das wird als Hauptursache dafür angesehen, dass die Ergebnisse der beiden Verfahren sich so deutlich voneinander unterscheiden.

Es stellt sich jedoch die Frage, warum wird das Minimum des Schleifenparameters überhaupt erst nach mehreren Iterationen berechnet? Denn wenn alle Komponenten des realen Rohrnetzes mathematisch optimal modelliert sind, die Eingangsparameter, wie z.B. die Rauigkeit, zutreffend gewählt sind und die Startwerte wie in Abschnitt 5.3 beschrieben tatsächlichen Messwerten entsprechen, sollten bei einem System im Gleichgewichtszustand der verwendete Schleifenparameter bereits mit den Startwerten sein Minimum erreichen.

Tatsächlich wird das Minimum des Schleifenparameters ϵ mit dem Knoten-Strang-Verfahren gemäß Spalte 3 in Tabelle 5.7 jedoch erst nach acht Iterationen ermittelt. Unter der Annahme, dass der Einfluss von Messfehlern auf die Startwerte als Hauptursache nicht infrage kommt, wird die Ursache vom Autor darin gesehen, dass die mathematische Beschreibung des realen Rohrnetzes nicht optimal ist. Den größten Einfluss auf die Druckdifferenzen in den

Maschengleichungen haben dabei die Wärmeübergabestationen. Auf deren Besonderheiten bei der Modellierung wurde bereits hingewiesen. Kann das Ersetzen einer wahrscheinlich fehlerbehafteten Modellierung der Wärmeübergabestationen durch direktes Einsetzen der tatsächlich gemessenen Druckdifferenzen in die Maschengleichungen den Wert $\|F_{\text{Maschen}}\|$ weiter vermindern?

Der Vergleich der Funktionswerte $\|F_{\text{Maschen}}\|$ in Spalte 6 der Tabelle 5.7 mit den Werten in Spalte 5 zeigt qualitativ tatsächlich eine Verringerung der Funktionswerte in den Maschengleichungen. Jedoch wird noch immer in den Maschengleichungen 6, 8, 9, 10, 12 und 14 die geforderten Genauigkeit von 10^4 Pa nicht erreicht.

Die Teilstrecken, die zu diesen Maschen gehören, sind in Abbildung 6.1 einem Auszug aus der Variablen NLGSNETZ zu entnehmen. Demnach besteht Masche M10 aus den Teilstrecken 10 und 11. Auf die Besonderheit der Teilstrecken 10 und 11 wurde bereits in Zusammenhang mit Abbildung 5.24 hingewiesen.

Mit der Funktion *DeltaPTS* wird in Abbildung 6.2 der Druckverlauf innerhalb der Masche M9 (vgl. Abbildung 4.1) nach Berechnung mit dem CROSS-Verfahren aufgezeigt. Die Druckdifferenz in dieser Masche beträgt ca. 2,5 bar. Die Teilstrecken 21 und 20 führen aufgrund der auffallend großen Massenströme in den Teilstrecken 10 und 11 ebenfalls vergleichsweise große Massenströme, die ihrerseits zu recht hohen Druckverlusten führen. Auch die Maschen M8 und M6 liegen im selben Rohrstrang wie die Teilstrecken 10 und 11. Bei den Maschenglei-

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
VarName	VarName	VarName	VarName	A	B	C	VarName	VarName	VarName	VarName	VarName	VarName	VarName	F
47	'M'	1	NaN	29	38	30	39	12	-1	NaN	NaN	NaN	NaN	0
48	'M'	2	NaN	28	40	41	13	NaN	-39	-30	-38	NaN	NaN	0
49	'M'	3	NaN	27	4	14	NaN	NaN	-40	-41	NaN	NaN	NaN	0
50	'M'	4	NaN	26	5	15	NaN	NaN	-4	NaN	NaN	NaN	NaN	0
51	'M'	5	NaN	25	47	42	48	16	-5	NaN	NaN	NaN	NaN	0
52	'M'	6	NaN	24	60	49	61	17	-48	-42	-47	NaN	NaN	0
53	'M'	7	NaN	23	70	62	71	18	-60	-49	-61	NaN	NaN	0
54	'M'	8	NaN	22	9	19	NaN	NaN	-70	-62	-71	NaN	NaN	0
55	'M'	9	NaN	21	10	20	NaN	NaN	-9	NaN	NaN	NaN	NaN	0
56	'M'	10	NaN	11	NaN	NaN	NaN	NaN	-10	NaN	NaN	NaN	NaN	0
57	'M'	11	NaN	37	31	34	NaN	NaN	-30	NaN	NaN	NaN	NaN	0
58	'M'	12	NaN	36	32	35	NaN	NaN	-31	NaN	NaN	NaN	NaN	0
59	'M'	14	NaN	46	43	45	NaN	NaN	-42	NaN	NaN	NaN	NaN	0
60	'M'	15	NaN	44	NaN	NaN	NaN	NaN	-43	NaN	NaN	NaN	NaN	0
61	'M'	16	NaN	59	50	54	NaN	NaN	-49	NaN	NaN	NaN	NaN	0
62	'M'	17	NaN	58	51	55	NaN	NaN	-50	NaN	NaN	NaN	NaN	0
63	'M'	18	NaN	57	52	56	NaN	NaN	-51	NaN	NaN	NaN	NaN	0
64	'M'	19	NaN	53	NaN	NaN	NaN	NaN	-52	NaN	NaN	NaN	NaN	0
65	'M'	20	NaN	69	63	66	NaN	NaN	-62	NaN	NaN	NaN	NaN	0
66	'M'	21	NaN	68	64	67	NaN	NaN	-63	NaN	NaN	NaN	NaN	0
67	'M'	22	NaN	65	NaN	NaN	NaN	NaN	-64	NaN	NaN	NaN	NaN	0

Abbildung 6.1.: Auszug aus der Variablen NLGSNETZ, in der die Knoten- und Maschengleichungen teilstreckenorientiert abgelegt sind.

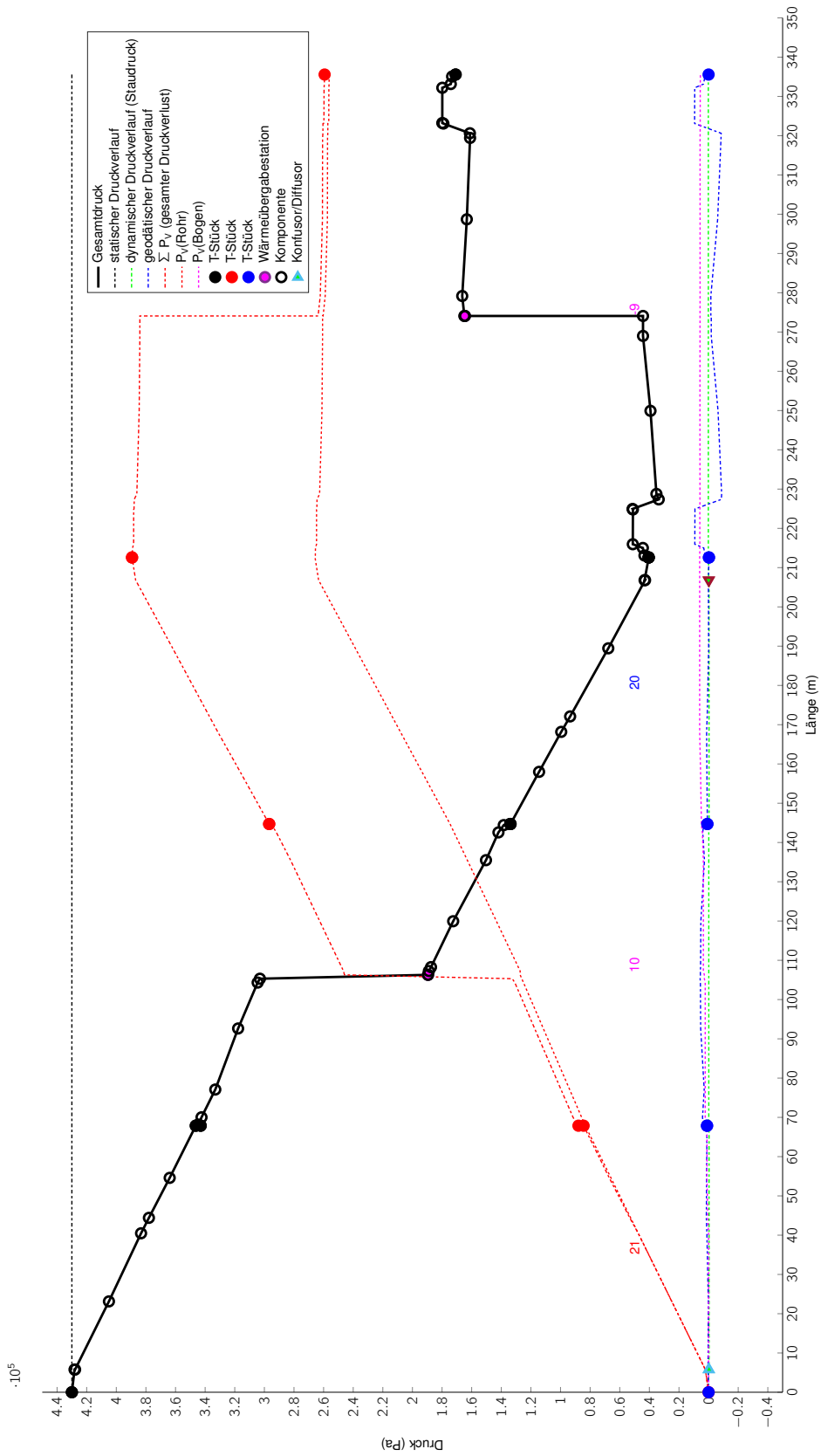


Abbildung 6.2.: Druckverlauf (in Pa) in Masche 9 des 'Energieverbundes' (CROSS-Verfahren)

chungen 12 und 14 handelt es sich um die Maschen M12 und M15. Diese beiden Maschen enthalten mit den Teilstrecken 32 und 44 zwei Kurzschlussleitungen, die in Abbildung 5.24 aufgrund der unbekanntenen Kugelhahnstellungen ebenfalls als potentielle Fehlerquellen gekennzeichnet wurden.

Die Werte oberhalb der geforderten Genauigkeit von 10^4 Pa beruhen nach Ansicht des Autors damit überwiegend auf bekannten Schwachstellen des Modells, nämlich den fehlerbehafteten Messwerten der Wärmeübergabestationen 15 und 16 in den Teilstrecken 10 und 11 sowie den unbekanntenen Öffnungswinkeln der Kugelhähne in den Kurzschlussleitungen.

Auswirkung von Druckdifferenzen in Maschen In Abbildung 6.2 ist deutlich zu erkennen, dass anders als es für einen Gleichgewichtszustand zu erwarten ist, die Druckdifferenz in der Masche nicht Null ist, da der Anfangswert links und der Endwert rechts unterschiedliche Höhen aufweisen, obwohl es sich um denselben Punkt im Rohrnetz handelt.

Solange die verbleibenden Druckdifferenzen in den Maschen nicht gegen Null gehen bedeutet das jedoch, dass die berechneten Druckdifferenzen zwischen zwei Punkten abhängig vom Weg sind, wenn dabei unterschiedliche Teilstrecken involviert sind. In Abbildung 6.2 macht es z.B. einen erheblichen Unterschied, ob die Druckdifferenz zum Punkt bei Längener 230 vom Anfang (Längener 0) oder vom Ende (Längener 335) des Maschenverlaufs bestimmt wird, obwohl dies jeweils derselbe Punkt ist!

Bei zukünftigen Druckberechnungen mit diesem Simulationsmodell sollte dieser Aspekt berücksichtigt werden.

6.3.3. Einfluss der dissipativen Temperaturerhöhung

Da die dissipative Temperaturerhöhung entsprechend Abbildung 5.34 nur maximal einige hundertstel Grad beträgt, ist es zulässig den Einfluss der Reibungswärme wie in Abschnitt 4.1 aufgeführt zu vernachlässigen.

Die etwas höhere dissipative Temperaturerhöhung im Rücklauf lässt sich auf die etwas größere Viskosität des Wassers in den kühleren Rücklaufleitungen zurückführen.

6.3.4. Änderung der Rauigkeit

Eine Rauigkeit k von $10^{-3} m$ in Unterabschnitt 5.3.4 führt quantitativ zu einer anderen Verteilung der Massenströme als eine Rauigkeit von $10^{-5} m$ in Unterabschnitt 5.3.2.

Es wirkt plausibel, dass bei erhöhter Rauigkeit, das Fluid den Weg des kleinsten Widerstandes bei den drei parallel geschalteten Wärmeübergabestationen 2, 3 und 4 bei den Teilstrecken 40/41 findet, denn diese haben einen geringeren Gesamtwiderstand als der kleinste Einzelwiderstand. Es muss einschränkend jedoch darauf hingewiesen werden, dass eben diese Teilstrecken bereits in Unterabschnitt 4.3.2 und Abbildung 5.24 als Schwachstellen des Modells identifiziert wurden. Der genaue Leitungsverlauf zu diesen Wärmeübergabestationen sollte bis zu den Druckmessstellen noch ermittelt werden.

Der Einfluss der Rauigkeit auf das Ergebnis der Berechnung führt zur Empfehlung die lokalen Rauigkeiten in den zu simulierenden Rohrnetzen möglichst genau zu ermitteln.

6.4. Planungsvariante 'Vermaschter Energieverbund'

Die nachfolgende Auswertung baut auf den bereits verifizierten Lösungsalgorithmen für das als Gesamtschrittverfahren implementierte CROSS-Verfahren und das Knoten-Strang-Verfahren in Abschnitt 6.1, sowie die bereits verifizierten bzw. als plausibel überprüften Funktionen in Abschnitt 3.3 auf.

Da die Planungsvariante 'Vermaschter Energieverbund' auf dem Modell für den Energieverbund basiert, gelten bezüglich der Schwachstellen des Modells die in Abschnitt 6.3 gemachten Aussagen.

6.4.1. Vergleich der Verfahrensvarianten

Die Ergebnisse für das CROSS-Verfahren in Unterabschnitt 5.4.1 und das Knoten-Strang-Verfahren mit interner R-Berechnung in Unterabschnitt 5.4.2 sind trotz der genannten Schwachstellen durchaus plausibel, denn:

- Die Knotenregel wird erfüllt.
- Teilt sich bei einer Stromtrennung ein Massenstrom auf, so führt die Teilstrecke mit dem höheren Widerstandskoeffizienten erwartungsgemäß einen geringeren Massenstrom als die Teilstrecke mit dem kleineren Widerstandskoeffizienten.
- Die Widerstandskoeffizienten in Teilstrecken mit kleinerem Rohrdurchmesser weisen erwartungsgemäß in der Regel einen größeren Widerstandskoeffizienten auf, als Teilstrecken mit größerem Rohrdurchmesser.

- Bei gleichem Rohrdurchmesser und gleichem Massenstrom weisen Teilstrecken mit einer Fluidtemperatur von 35°C erwartungsgemäß einen höheren Widerstandskoeffizienten auf als Teilstrecken mit 75°C . Dieser Umstand wird auf den Einfluss der Viskosität zurückgeführt, die gemäß Abbildung 3.9 bei abnehmender Temperatur ansteigt.

Allerdings wird sowohl beim CROSS-Verfahren als auch beim Knoten-Strang-Verfahren die Maschenregel im Rahmen der geforderten Genauigkeit von 10^4 Pa in vielen Maschen nicht erfüllt. Deswegen wird auch das Abbruchkriterium bei keinem der Verfahren erfüllt.

Die Schwingungen des CROSS-Verfahrens ab etwa der 20.ten Iteration werden als Anzeichen dafür angesehen, dass das CROSS-Verfahren mathematisch nicht mehr stabil ist.

Die Lösungen der beiden Verfahren unterscheiden sich quantitativ vor allem aufgrund der Tatsache, dass beim Ergebnis des Knoten-Strang-Verfahren fast 90% des Gesamtmassenstroms durch die Teilstrecken 40/41 und damit über die drei Wärmeübergabestationen fließen. Bemerkenswert ist auch die Strömungsumkehr in den Teilstrecken 72, 73 und 21 beim Knoten-Strang-Verfahren. Solange das vorher betrachtete Simulationsmodell 'Energieverbund' nicht validiert ist, ist eine verlässliche Aussage zum Ergebnis für die Planungsvariante 'Vermaschter Energieverbund' jedoch schwerlich möglich.

Es wird empfohlen zunächst das Simulationsmodell 'Energieverbund' zu validieren, indem die Schwachstellen solange verbessert werden, bis das Modell das reale Rohrnetz ausreichend präzise simuliert. Die Planungsvarianten sollten dann ausgehend von dem validierten Ausgangsmodell simuliert werden.

6.5. Empfehlungen an den Betreiber

Es wird die Durchführung einer ausführlichen Rohrnetzanalyse empfohlen, mit dem Ziel die in Unterabschnitt 4.3.2 geschätzten Parameter, unter anderem die lokal als unterschiedlich anzunehmenden Werte der Rauigkeit k , durch verifizierte Parameter zu ersetzen.

Für die Temperaturen in den Teilstreckenabschnitten des Modells sollten reale Messwerte oder die Werte eines validierten thermischem Modell eingesetzt werden, anstatt diese wie in dieser Arbeit als konstant anzunehmen.

Die Druckverluste der Wärmeübergabestationen sollten besser modelliert werden, indem diese entweder bei realen Rohrnetzen mit den tatsächlichen Druckmesswerten ermittelt oder bei geplanten Rohrnetzen unter Kenntnis aller Einflussgrößen mit dem theoretischen Ansatz in Abschnitt 2.3.2 berechnet werden.

Um künftig die wahren Werte der Prozessgrößen anhand der fehlerbehafteten Messwerte schätzen zu können, wird der Einsatz von *Data validation and reconciliation* empfohlen.

Das Simulationsmodell 'Energieverbund' sollte zuerst validiert werden, indem die Schwachstellen solange verbessert werden bis das Modell das reale Rohrnetz ausreichend präzise simuliert, bevor Planungsvarianten des 'Energieverbundes' simuliert werden.

Das Festlegen unveränderlicher Massenströme innerhalb der Systemgrenzen wird nicht empfohlen.

Bezüglich Konvergenzverhalten und Stabilität des Lösungsverfahrens erscheint auf Grundlage der Ergebnisse in dieser Arbeit das Knoten-Strang-Verfahren geeigneter als das CROSS-Verfahren.

Neben der Vermeidung von *for*-Schleifen im Programmcode lassen sich weitere Geschwindigkeitsvorteile bei der Konvergenz des Knoten-Strang-Verfahrens möglicherweise erzielen, wenn anstatt der internen R-Berechnung die Variante mit externer R-Berechnung eingesetzt wird.

7. Derzeitiger Entwicklungsstand

In den folgenden Abschnitten werden zu den einzelnen Bestandteilen des Simulationsmodells Informationen zum derzeitigen Entwicklungsstand gegeben. Sind die entsprechenden Merkmale vorhanden, so wird dies durch den Dateinamen oder ein Pluszeichen angezeigt. Fehlt das Merkmal, so wird dies durch ein Minuszeichen angezeigt.

7.1. Datenbanksystem

Für das Rohrnetz 'Energieverbund' sind die in den Abbildungen 7.1 und 7.2 dargestellten Hauseinführungen nicht in der Datenbank erfasst und somit im Modell nicht berücksichtigt, da deren Daten im Koordinatenverzeichnis nicht enthalten sind.

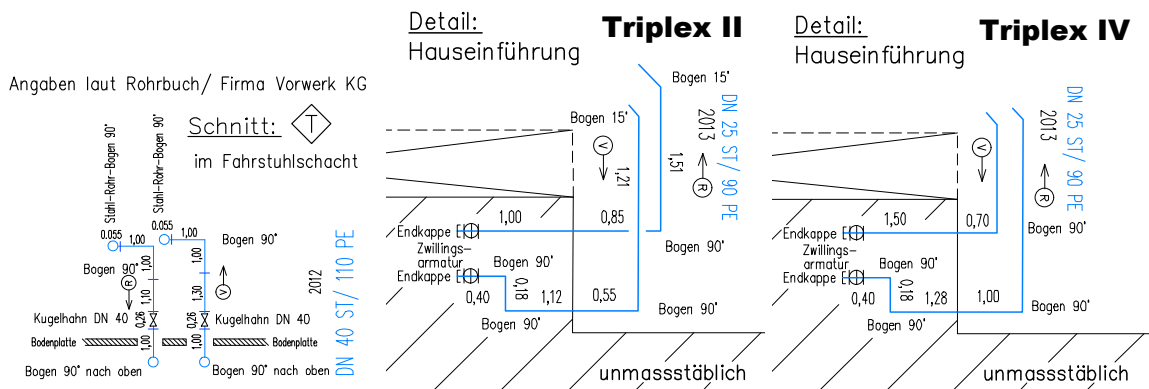


Abbildung 7.1.: Hauseinführungen für Hybrid House Mitte, Triplex II und Triplex IV

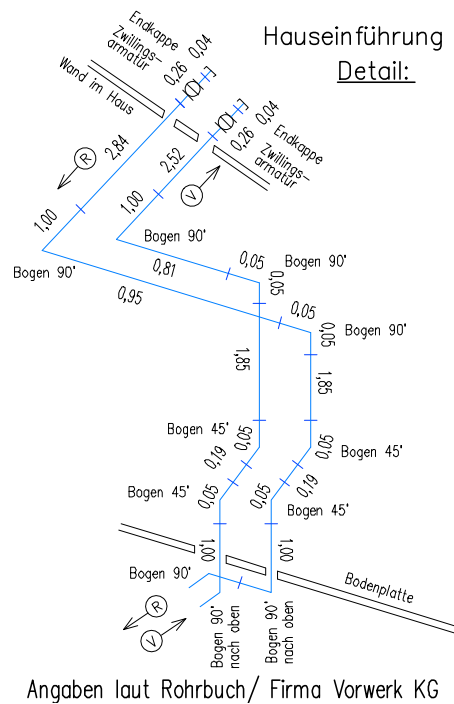


Abbildung 7.2.: Hauseinführung Siedeln im Grundbau

In Tabelle 7.1 ist der Umsetzungsstatus unterschiedlicher Merkmale des Datenbanksystems angegeben.

Tabelle 7.1.: Stand des Datenbanksystems

Merkmal	umgesetzt
verwendetes Datenbankmanagementsystem	Access
DMS-Struktur anpassbar	+
flexible Anpassung der Formulare möglich	+
Übergabedatei	HeatGridTable.csv
Berechnungen in DB möglich	+
erfasste Rohrnetze	Beispiel von GROMBACH 'Einfaches Maschennetz' 'Energieverbund' 'Vermaschter Energieverbund'
Import der Access-Übergabedatei	ImportHeatGridTable.m
thermische Daten implementierbar	+
thermische Daten implementiert	-

Merkmal	umgesetzt
einfaches Handling der DB	-
Auswertung Rohrnetzdaten	- (vorgesehen in ImportHeatGridTable.m)

7.2. Empirische Funktionen für Wärmeübergabestationen

In Tabelle 7.2 ist der Umsetzungsstatus unterschiedlicher Merkmale der Wärmeübergabestationen angegeben.

Tabelle 7.2.: Stand der Wärmeübergabestationen

Merkmal	umgesetzt
Auswertung der Messdaten der Wärmeübergabestationen	Step01ImportWuestenCSV.m Step02SaveCalculations.m, Step03PlotRWuestFit.m, Step04SaveRWuestFit.m, Step05OtherAnalysis.m)
Aufbereitung Wuest-Messdaten	- (nur in geringem Umfang)

7.3. Systeme und Subsysteme

Das Aufstellen des Gleichungssystems entsprechend Gleichung 2.5 ist eine wichtige und mit zunehmender Komplexität des Rohrnetzes immer fehleranfälliger Aufgabe des Anwenders. In der vorliegenden ersten Version gibt es hierfür jedoch noch keine grafische Oberfläche oder andere Werkzeuge, die ein automatisches Einlesen der Netzstrukturmatrix aus vorhandenen Datenquellen (CAD-Zeichnungen, etc.) ermöglichen.

In Tabelle 7.3 ist der Umsetzungsstatus unterschiedlicher Merkmale der Systeme und Subsysteme angegeben.

Tabelle 7.3.: Stand der Systeme und Subsysteme

Merkmal	umgesetzt
Simulationssoftware	MATLAB
Startdatei	StarteMasterthesisMM
Eingabe der Netzstrukturmatrix	direkt in SolveNLGS*.m oder in Excel-Datei
R's von Teilstreckenabschnitten	calcRTSAY.m
R's von Teilstrecken	calcRTSY.m
CROSS-Verfahren	+
Knoten-Strang-Verfahren	+
Newton-Raphson-Verfahren	+
Levenberg-Marquardt-Algorithmus	-
Halley-Verfahren	-
Euler-Tschebyschow-Verfahren	-
Verknüpfung mit therm. Modell	-

7.4. Stoffdaten

In Tabelle 7.4 ist der Umsetzungsstatus unterschiedlicher Merkmale der Stoffdaten angegeben.

Tabelle 7.4.: Stand der Stoffdaten

Merkmal	umgesetzt
Berechnung der Fluiddaten von Wasser gemäß VDI-Wärmeatlas	calc_rhoH2O.m, calc_etaH2O.m, calc_mdot.m, calc_cpH2O.m, calc_lambdaH2O.m
Speicherung der Rohrnetz- und Fluiddaten	Netz.mat, CONST.mat
Verwendung der XSteam-Funktionen	-
X-Steam an vektorielle Eingangsgrößen angepasst	-

7.5. Implementierte Komponenten

Es wurden ausschließlich für die Komponenten MATLAB-Funktionen geschrieben, die im Rohrnetz 'Energieverbund' vorhanden sind. Wenn nötig wurden Parameter so gewählt, dass sie für das Rohrnetz 'Energieverbund' zweckmäßig sind.

Vor der Simulation anderer Wärmenetze sind ggf. MATLAB-Funktionen für weitere Komponenten zu erstellen, die bestehenden Funktionen zu erweitern und die vom Verfasser in dieser Arbeit gewählten Parameter hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf andere Wärmenetze zu überprüfen (z.B. bei Bögen)

Für die detaillierte mathematische Modellierung eines Wärmetauscher hat der Autor beispielhaft einen Wärmetauscher gewählt, wie er in [26] beschrieben ist. Sollen andere Typen von Wärmetauschern simuliert werden oder Wärmetauscher mit anderen Randbedingungen als die in dieser Arbeit angegebenen, müssen entsprechend angepasste neue Funktionen in das Simulationsmodell integriert werden.

In Tabelle 7.5 ist der Umsetzungsstatus unterschiedlicher Merkmale der implementierten Funktionen angegeben.

Tabelle 7.5.: Stand der implementierten Komponenten

Merkmal	umgesetzt
Berechnung der REYNOLDS-Zahl	calc_Reynolds.m
Berechnung gerade Rohrleitungen (λ)	calc_lambdaRohr_dkmT.m
Berechnung Bogen (ζ_{Bogen})	zetaBogenHerning.m
Berechnung Diffusor (ζ_{Diff}) incl. Strömungsumkehr	zetaKonDiff.m
Berechnung Konfusor (ζ_{Kon}) incl. Strömungsumkehr	zetaKonDiff.m
Berechnung Kugelhahn (ζ_{Kh}) incl. Schließwinkel	zetaKugelh.m
Empirische Berechnung der EVB-Wärmeübergabestationen	calcRWuestFit.m
Druckabfall des Regelventils S46	calcDpRVS46.m
Druckabfall eines Plattenwärmetauschers	calcDpWT.m
Verwendung calcDpRVS46.m (Regelventil) und calcDpWT.m (Wärmetauscher) im Modell	-
Schweißnähte	-
Distanzcheck bzgl. $l_a \lesssim (50 \dots 70)d$ zwischen Komponenten	-

Merkmal	umgesetzt
die Berechnungsempfehlung für hintereinander gesetzte Bögen nach [28]	-

Für ein abbruchfreies Simulationsmodell vermaschter Rohrnetze ist es notwendig, in T-Stücken auch Strömungsvarianten zu erlauben, die den Strömungen in Y-Stücken (Hosenstücken) entsprechen.

Dabei ist hier jedoch folgendes anzumerken: Während in T-Stücken der Abzweig (C) in der Regel einen Durchmesser $d_C \leq d_A = d_B$ hat, gilt die Gleichung von AIGNER für Y-Stücke nach seinen Angaben nur für Durchmesser $d_C \geq d_A, d_B$. Insofern stellt der Einsatz dieser Gleichung einen Kompromiss dar: Es ist nicht sicher, ob der für T-Stücke bei den Strömungsvarianten (-1,1,-1) und (1,-1,1) für Stromtrennung/-vereinigung berechnete Widerstandsbeiwert realistisch ist, aber das Simulationsmodell verwendet immerhin bekannte Gleichungen und bricht die Berechnung nicht ab.

Mit der vorgestellten Funktionen für T-Stücke lassen sich die Stromtrennung und die Stromvereinigung sowohl für T-Stücke als auch auch für Hosenstücke berechnen.

Die Eingabe der Daten in die Datenbank erfolgte z.T. manuell (z.B. Zuordnung der Teilstrecken zu den Anschlüssen der T-Stücke, sowie einige andere Parameter). Es ist zweckmäßig hierfür geeignete Funktionen zu schreiben, die anhand der bereits bekannten Angaben, diese Zuordnung automatisch und damit wesentlich schneller durchführen können.

In Tabelle 7.6 ist der Umsetzungsstatus unterschiedlicher Merkmale der T-Stücke angegeben.

Tabelle 7.6.: Stand der T-Stücke

Merkmal	umgesetzt
Berechnung T-Stück ($\zeta_{vAV}, \zeta_{vDV}, \zeta_{vAT}, \zeta_{vDT}$) incl. Strömungsumkehr	zetaTYStueck.m
Berechnung der Strömungsvarianten Hosenstück (Y) für Stromvereinigung und -trennung	zetaTYStueck.m
Berücksichtigung der $3^3 = 27$ Strömungszustände	zetaTYStueck.m
Auswahl der relevanten ζ für den betrachteten TSA	idenTEEFy.m
dritter Massenstrom=0 , wenn sinnvoll	idenTEEFy.m

Merkmal	umgesetzt
Strömungszustände in T-Stücken auf Plausibilität prüfen	PlausibilitEEY.m
Abläufe=0 setzen , wenn Zuläufe=0	-
Zuläufe=0 setzen , wenn Abläufe=0	-

7.6. Unterstützende Funktionen

In Tabelle 7.7 ist der Umsetzungsstatus unterschiedlicher Merkmale der unterstützenden Funktionen angegeben.

Tabelle 7.7.: Stand der Hilfsfunktionen

Merkmal	umgesetzt
Druckverlauf entlang Teilstreckenpfad	DeltaPTS
Umrechnung von Innendurchmesser zu DN	d2DN.m
Umrechnung von DN zu Innendurchmesser	DN2d.m
Umrechnung von Grad in rad	deg2rad.m
Umrechnung von rad in Grad	rad2deg.m
Bestimmung des vom DN abhängigen Kugelradius (Kugelhahn)	DN2KugelR2.m
Bestimmung des vom DN abhängigen Krümmungsradius (Bogen)	DN2Rkrued.m
Umrechnung von Stunden- in Sekundenwerte	PerH2ProS.m
3D-Plot des Rohrnetz-Modells incl. Datenanzeige	FuncPlotNetz.m, FuncPlotMdot.m, FuncPlotLoesung.m

7.7. Empfehlungen für künftige Verbesserungen

In Tabelle 7.8 sind weitere offene Entwicklungspunkte angegeben.

Tabelle 7.8.: Empfehlungen für künftige Verbesserungen

Merkm ^{al}	umgesetzt
Hydraulische Überprüfung des Rohrnetzmodells 'Energieverbund'	-
Einsatz von <i>Data validation and reconciliation</i>	-
verbesserte Modellierung der Wärmeübergabestationen durch verstärkte Vor-Ort-Analyse der Komponenten	-
Verifizierung der Eingangsparameter durch verstärkte Komponenten- und Rohrnetzanalyse	-
hydraulisches Modell mit einem thermischen Modell koppeln	-
Erhöhung der Berechnungsgeschwindigkeit, indem <i>calcRTSY.m</i> und <i>calcRTSAY.m</i> ohne <i>for</i> -Schleife aufgerufen werden	-
Erstellung einer graphischen Benutzeroberfläche für Simulationsmodell, Datenbank und deren Schnittstelle	-
Optimierung der Datenbankstruktur	-
Überprüfung der Übergabedatei <i>HeatGridTable</i> auf Vollständigkeit und Plausibilität der Daten bzw. automatisiertes Berechnen	-
Schnittstellen zum Einlesen externer Daten (z.B. CAD-Zeichnungen) mit automatisiertem Aufstellen der Netzstrukturmatrix	-
Netzstrukturmatrix M dynamisch anpassen, wenn Teilstrecken nicht durchströmt werden, d.h. Maschengleichungen entfernen bzw. zusammenführen, wenn Teilstrecken ohne Strömung sind	-
direktes Einlesen der Netzstrukturmatrix M aus den Excel-Sheets anstatt aus csv-Dateien	-
die Skripte <i>ImportNLGS*.m</i> , <i>CreateMstringNLGS*.m</i> , <i>CreateMstringNLGS*.m</i> , <i>Startwerte*.m</i> , <i>SolveNLGS*.m</i> so allgemein schreiben, dass sie nicht mehr für jedes Modell manuell anzupassen sind	-
Mit der Funktion <i>FuncNetzPlot</i> Richtungspfeile anzeigen, damit Vergleich	-

Merkmal	umgesetzt
mit Systemskizze entfallen kann	
Einsatz Superpositionsprinzip wenn mehrere Kraftwerke einspeisen	-

8. Zusammenfassung

Die Zielsetzung dieser Arbeit wurde erreicht.

Für die geforderten Einflußgrößen (Rohrreibungsbeiwert, T-Stücke, Bögen, Kugelhähne, Konfusoren, Diffusoren) zur Berechnung der Widerstandskoeffizienten wurden Funktionen erstellt und mit geeigneten Methoden verifiziert. Bei den Wärmeübergabestationen wurde ein empirischer Berechnungsansatz gewählt, da die verfügbaren Daten für einen theoretischen Ansatz nicht ausreichend waren. Für die T-Stücke wurde eine Fallunterscheidung implementiert, die den relevanten Widerstandsbeiwert anhand der aktuellen Strömungsvariante am T-Stück auswählt.

Zur Erfassung und Zusammenstellung der umfangreichen Netzdaten für das Rohrnetz 'Energieverbund' wurde eine ACCESS-Datenbank erstellt, die die für das Simulationsmodell erforderlichen Daten in der Übergabetabelle *HeatGridTable* zusammenfasst. Die Netzstrukturmatrix wurde entweder direkt im Skript *SolveNLGS** eingegeben oder bei umfangreicheren Netzen in einer Excel-Tabelle erfasst und von dort in das Simulationsmodell eingelesen.

Als Lösungsverfahren wurden das CROSS-Verfahren und das Knoten-Strang-Verfahren umgesetzt, mit zwei Varianten zur Berechnung der Widerstandskoeffizienten. Die für diese zwei Verfahren implementierten Lösungsalgorithmen konnten mittels zweier Lehrbuchbeispiele verifiziert werden.

Die Berechnungsergebnisse der Rohrnetze für das 'Einfache Maschennetz', den 'Energieverbund' und den 'Vermaschten Energieverbund' wurden qualitativ als plausibel bewertet, konnten quantitativ jedoch nicht validiert werden.

Es wurde dem Netzbetreiber empfohlen durch folgende Maßnahmen die Validierung des Simulationsmodells 'Energieverbund' anzustreben:

- hydraulische Überprüfung des Rohrnetzmodells 'Energieverbund' mit Verifizierung der benötigten Eingangsparameter;
- die Modellierung der Wärmebergabestationen verbessern;
- da Messstellenausfälle eine Schwachstelle der Modellierung darstellen, wird der Einsatz von *Data validation and reconciliation* empfohlen;
- Kopplung des hydraulischen Modells mit einem thermischen Modell.

Literatur

- [1] Detlef Aigner. *Gleichung zur Berechnung der hydraulischen Verluste der Rohrvereinigung*. <http://rcswww.urz.tu-dresden.de/daigner/pdf/vereinig.pdf>. 2008 (siehe S. 43, 44, 89).
- [2] Detlef Aigner und Gerhard Bollrich. *Handbuch der Hydraulik : für Wasserbau und Wasserwirtschaft*. 1. Aufl. Beuth WissenBauwesen. Berlin: Beuth, 2015. ISBN: 978-3-410-21341-3 (siehe S. 16, 25).
- [3] Walter Winter et al. "Hydraulische Rohrrauigkeit von Stahlmediumrohren für Fernwärmenetze". In: *Euroheat Power* 29.05 (2000), S. 24–33 (siehe S. 34, 113, 117).
- [4] Willi Bohl und Wolfgang Elmendorf. *Technische Strömungslehre : Stoffeigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen, Hydrostatik, Aerostatik, inkompressible Strömungen, kompressible Strömungen, Strömungsmesstechnik*. 14., überarb. und erw. Aufl. Kamprath-ReiheVogel-Fachbuch. Würzburg: Vogel, 2008. ISBN: 978-3-8343-3129-8 (siehe S. 16, 30–32, 38, 48–51).
- [5] Leopold Böswirth. *Technische Strömungslehre : Lehr- und Übungsbuch*. Hrsg. von Sabine Bschorer. Wiesbaden, 2014 (siehe S. 58).
- [6] Fritz Brandt. *Dampferzeuger : Kesselsysteme; Energiebilanz; Strömungstechnik*. 2. Aufl. FDBR-Fachbuchreihe ; 3. Essen: Vulkan-Verl., 1999. ISBN: 3-8027-3504-8 (siehe S. 38, 39, 46, 49, 52, 55, 57, 82, 84, 88, 91, 207).
- [7] Freie Hansestadt Bremen. *UTM-Abbildung Information und Handlungsempfehlung*. Apr. 2014 (siehe S. 112).
- [8] Ilja N. Bronštejn u. a., Hrsg. *Taschenbuch der Mathematik*. 9., korr. Aufl. Edition Harri DeutschEuropa Lehrmittel. Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel, 2013. ISBN: 978-3-8085-5673-3 (siehe S. 16, 27).
- [9] Hardy Cross. "Analysis of flow in networks of conduits or conductors". In: *University of Illinois. Engineering Experiment Station. Bulletin ; no. 286* 286 (1936) (siehe S. 22).
- [10] Ivan Diankov. "Umweltgerechte Raumkonditionierung : Behaglichkeitsregelung und komplexe Rohrnetzberechnung". Karlsruhe. Diss. 2001 (siehe S. 16, 21, 26).
- [11] Bruno Eck. *Technische Strömungslehre*. 9., überarb. Aufl. Bd. 2: Anwendungen. Mit 294 Abb. Berlin: Springer, 1991. ISBN: 3-540-53426-1 (siehe S. 37).

- [12] Dr.-Ing. Eckehard Fiedler. "Richtig berechnet - Über die Druckverlustberechnung „von Hand“ und mittels Simulation". In: *tab* (März 2009), S. 84–88 (siehe S. 38).
- [13] Bernd Glück. *Heizwassernetze für Wohn- und Industriegebiete*. Frankfurt/M.: Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke mbH, 1985 (siehe S. 31, 33).
- [14] Peter Grombach, Hrsg. *Handbuch der Wasserversorgungstechnik*. 3., völlig überarb. Aufl. München: Oldenbourg-Industrieverl., 2000. ISBN: 3-486-26394-3 (siehe S. 125, 128, 130, 131, 176).
- [15] Christian Hähnlein. "Numerische Modellierung zur Betriebsoptimierung von Wasserverteilnetzen". Diss. Darmstadt: TU Darmstadt, Jan. 2008. ISBN: 3-932518-93-4 (siehe S. 22, 25, 26).
- [16] Fritz Herning. *Stoffströme in Rohrleitungen*. 4., neubearb. u. erw. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl., 1966 (siehe S. 16, 34, 52).
- [17] Detlef Aigner [Hrsg.], Hrsg. *Technische Hydromechanik*. 2., vollst. überarb. Aufl. Bd. 2: Spezialfälle. BauwesenWissen. Berlin: Beuth, 2015. ISBN: 978-3-410-22209-5 (siehe S. 16, 25, 128, 129).
- [18] Isaak E. Idelčik. *Handbook of hydraulic resistance*. 3. ed. New York, NY: Begell House, 1996. ISBN: 1-56700-074-6 (siehe S. 80, 89, 91).
- [19] Isaak E. Idelčik. *Handbook of hydraulic resistance*. 4th revised and augmented ed. New York, NY: Begell House, 2007. ISBN: 978-1-56700-251-5 (siehe S. 16, 38, 44–46, 49).
- [20] LOGSTOR. *Produktkatalog 2015.12*. <https://www.logstor.com/media/5279/produktkatalog-se.pdf>. LOGSTOR, Dez. 2015 (siehe S. 96, 97, 112, 113).
- [21] Peter Lorenzen. "Das Wärmenetz als Speicher im Smart Grid: Betriebsführung eines Wärmenetzes in Kombination mit einem stromgeführten Heizkraftwerk". Masterthesis. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Fakultät Technik und Informatik, Dez. 2013 (siehe S. 15, 102, 244–246).
- [22] Donald S. [Hrsg.] Miller, Hrsg. *Discharge characteristics*. Hydraulic structures design manual ; 8 : Hydraulic design considerations. Rotterdam [u.a.]: Balkema, 1994. ISBN: 90-5410-180-6 (siehe S. 33–35, 43).
- [23] Johann Mutschmann, Fritz Stimmelmayer und Peter Fritsch, Hrsg. *Taschenbuch der Wasserversorgung*. Wiesbaden, 2014 (siehe S. 16, 22, 34, 126).
- [24] Hugo Richter. *Rohrhydraulik : ein Handbuch zur praktischen Strömungsberechnung*. 5., neubearb. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer, 1971. ISBN: 3-540-05240-2 (siehe S. 16, 29, 30, 33, 34, 37).
- [25] Fa. SAMSON. *Regler ohne Hilfsenergie Bauart 46 Differenzdruckbegrenzer mit Volumenstrombegrenzer Typ 46-5 · Typ 46-6* (siehe S. 59, 93, 115).

- [26] *VDI-Wärmeatlas*. 11., bearb. und erw. Aufl. VDI-BuchSpringerLink : Bücher. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013. ISBN: 978-364-21998-1-3 (siehe S. 16, 36, 48, 53–55, 57, 59–63, 75–78, 93, 122, 192, 204–206).
- [27] Walter Wagner. *Rohrleitungstechnik*. 10., überarb. und erw. Aufl. Vogel Fachbuch : Kamprath-Reihe. Würzburg: Vogel, 2008. ISBN: 978-3-8343-3133-5 (siehe S. 16, 21).
- [28] Walter Wagner. *Strömung und Druckverlust : mit Beispielsammlung*. 6., bearb. Aufl. Vogel FachbuchKamprath-Reihe. Würzburg: Vogel, 2008. ISBN: 978-3-8343-3132-8 (siehe S. 16, 33, 34, 36, 38, 39, 48, 49, 52, 55, 56, 82, 193).
- [29] Walter Wagner. *Wärmeaustauscher : Grundlagen, Aufbau und Funktion thermischer Apparate*. 3., überarb. und erw. Aufl. Kamprath-ReiheVogel-Fachbuch. Würzburg: Vogel, 2005. ISBN: 3-8343-3026-4 (siehe S. 16, 59).
- [30] Dieter [Hrsg.] Will und Reiner Nollau, Hrsg. *Hydraulik : Grundlagen, Komponenten, Schaltungen*. 4., neu bearb. Aufl. Berlin: Springer, 2008. ISBN: 978-3-540-79534-6 (siehe S. 16).
- [31] Heinz Zobl und Julius Kruschik. *Stroemung durch Rohre und Ventile : Tab. u. Berechnungsverfahren zur Dimensionierung von Rohrleitungssystemen*. 2., Neubearb. Aufl. Wien: Springer, 1982. ISBN: 3-211-81695-X (siehe S. 16).

Teil I.
Anhang

A. Zeichenverzeichnis

Tabelle A.1.: Zeichenverzeichnis

Zeichen	Einheit	Bedeutung
α	$^\circ$	Winkel
A_t	J	am oder vom System verrichtete technische Arbeit
B_p	m	Breite der Platte eines Plattenwärmetauschers
β	-	Durchmesser Verhältnis d/D
d, D	m	Durchmesser
DN, d_{nom}	mm	nominaler Durchmesser
η	$Pa \cdot s$	dynamische Viskosität
ϵ	-	relative Rauigkeit, Schleifenparameter im NEWTON-Verfahren
E_p	J	potentielle Energie
E_k	J	kinetische Energie
g	$\frac{m}{s^2}$	Erdbeschleunigung
h	m	Höhe
l	J	Enthalpie
k	m	Rauigkeit
k_{vs}	$\frac{m^3}{h}$	maximaler Volumenstrom eines Ventils bei Druckdifferenz von 1 bar
l	m	Länge
L_p	m	Länge der Platte eines Plattenwärmetauschers
λ	-	Rohrreibungsbeiwert
\dot{m}	$\frac{kg}{s}$	Massenstrom
\underline{M}	-	Netzstrukturmatrix
p	Pa	Druck
δp	Pa	Druckdifferenz
φ	$^\circ, rad$	Winkel
Q	J	Wärme
q	$\frac{J}{kg}$	spezifische Wärme

Zeichen	Einheit	Bedeutung
R	$\frac{\text{Pa} \cdot \text{s}^2}{\text{kg}^2}, \text{ m}$	Widerstandskoeffizient, Radius
Re	-	Reynoldszahl
ρ, ϱ	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Dichte
ϑ	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur in Grad Celsius
T	K	Temperatur in Kelvin
U	J	innere Energie
u	$\frac{\text{J}}{\text{kg}}$	spezifische innere Energie
V	m^3	Volumen
\dot{V}	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	Volumenstrom
w	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Strömungsgeschwindigkeit
ζ	-	Widerstandsbeiwert, Einzelwiderstandsbeiwert

B. Stoffeigenschaften von Wasser

In [26] sind für die Dichte ρ , die dynamische Viskosität η , die spezifische Wärmekapazität c_p und die Wärmeleitfähigkeit λ von Wasser sowie für viele andere Flüssigkeiten die entsprechenden Berechnungsformeln mit den dazu gehörenden Koeffizienten aufgelistet.

Die Berechnungsgleichungen nach [26] gelten nur im Temperaturbereichen von 0°C und 250°C und sind für die Dichte und die dynamische Viskosität in Unterabschnitt 3.3.3 und Unterabschnitt 3.3.4 aufgeführt. Der für die Modellierung relevante Temperaturbereich zwischen 20°C und 100°C ist davon ausreichend abgedeckt.

Alternativ stehen zur Berechnung der Stoffeigenschaften von Wasser auch die Berechnungsfunktionen der kostenlos downloadbaren Matlab-Funktion *X Steam* zur Verfügung.

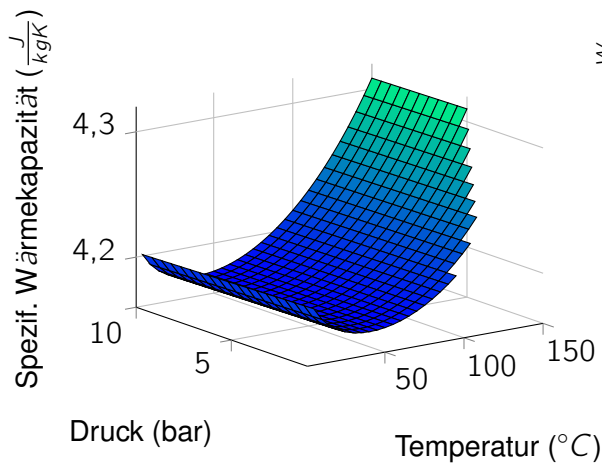


Abbildung B.1.: Spezif. Wärmekapazität von Wasser über Druck und Temperatur (berechnet mit XSTEAM)

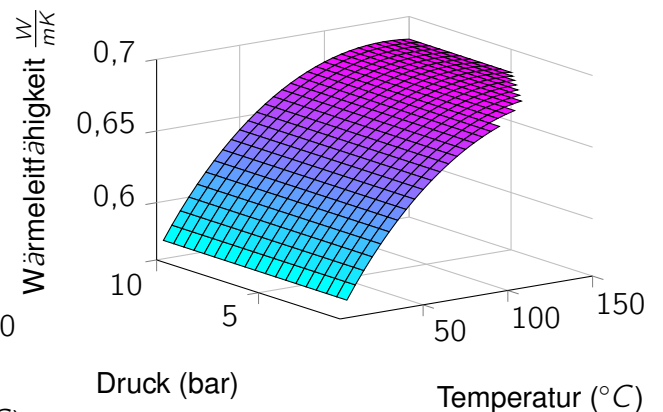


Abbildung B.2.: Wärmeleitfähigkeit von Wasser über Druck und Temperatur (berechnet mit XSTEAM)

B.1. Spezifische Wärmekapazität von Wasser

Die spezifische Wärmekapazität von Wasser wird nach [26] gemäß folgender Gleichung berechnet:

$$c_p^{H_2O} = R \left[\frac{A}{1 - \frac{T}{T_c}} + B + C \left(1 - \frac{T}{T_c}\right) + D \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^2 + E \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^3 + F \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^4 \right] \quad (\text{B.1})$$

mit:

$$A = 0,2399$$

$$B = 12,8647$$

$$C = -33,6392$$

$$D = 104,7686$$

$$E = -155,4709$$

$$F = 92,3726$$

$$R = 0,461526 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \text{spezifische Gaskonstante}$$

$$T_c = 647,10\text{K} \quad \text{kritische Temperatur}$$

T : Temperatur in Kelvin

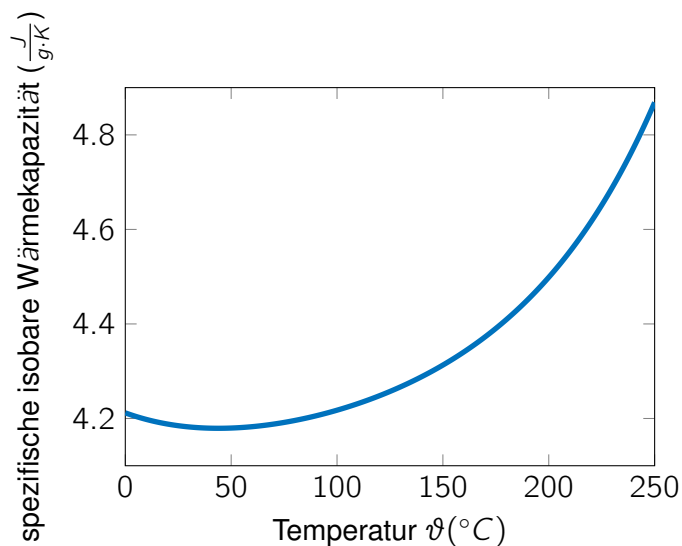


Abbildung B.3.: Spezifische isobare Wärmekapazität ($\frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}}$) von Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur (berechnet *calc_cpH2O.m* nach [26])

B.2. Wärmeleitfähigkeit von Wasser

Die Wärmeleitfähigkeit von Wasser wird nach [26] gemäß folgender Gleichung berechnet:

$$\lambda^{H_2O} = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 \quad (\text{B.2})$$

mit:

$$A = -2,4149$$

$$B = 2,45165$$

$$C = -0,73121$$

$$D = 0,99492$$

$$E = -0,53730$$

T : Temperatur in Kelvin

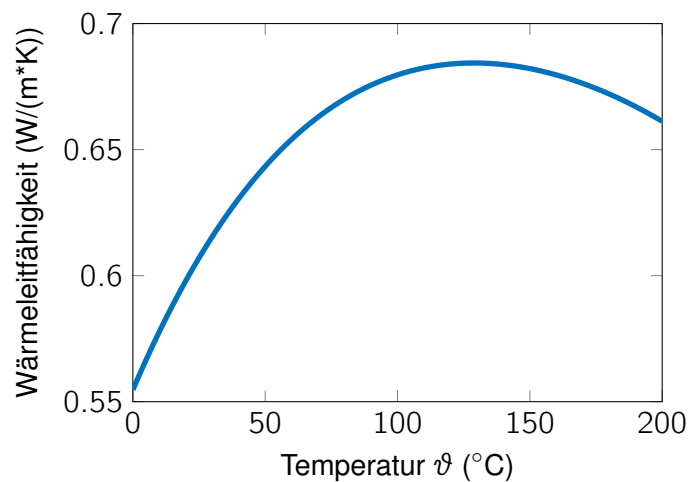


Abbildung B.4.: Wärmeleitfähigkeit von Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur (berechnet mit *calc_lambdaH2O.m* nach [26])

C. T-Stücke

Ausgehend von der BERNOULLISCHEN Gleichung ergibt sich gemäß [6] für die Vereinigung der Massenströme (vgl. Abbildung 2.11)

$$\text{im Durchgang: } p_1 + w_1^2 \frac{\rho}{2} = p_2 + w_2^2 \frac{\rho}{2} + \Delta p_{VdV} + \Delta p_{Rd} \quad (\text{C.1})$$

$$\text{im Abzweig: } p_3 + w_3^2 \frac{\rho}{2} = p_2 + w_2^2 \frac{\rho}{2} + \Delta p_{VaV} + \Delta p_{RaV} \quad (\text{C.2})$$

und bei der Trennung der Massenströme (vgl. Abbildung 2.12)

$$\text{im Durchgang: } p_1 + w_1^2 \frac{\rho}{2} = p_2 + w_2^2 \frac{\rho}{2} + \Delta p_{VdT} + \Delta p_{Rd} \quad (\text{C.3})$$

$$\text{im Abzweig: } p_1 + w_1^2 \frac{\rho}{2} = p_3 + w_3^2 \frac{\rho}{2} + \Delta p_{VaT} + \Delta p_{RaT} \quad (\text{C.4})$$

Darin sind Δp_{Rd} , Δp_{RaV} und Δp_{RaT} die Reibungsverluste auf den geraden Rohrstrecken, wobei die geraden Strecken jeweils bis zum Schnittpunkt der Rohrachsen im T-Stück (bezeichnet mit Index 0) reichen.

$$\Delta p_{Rx} = \lambda_{R,e} \frac{l_{e,0}}{D_e} w_e^2 \frac{\rho}{2} + \lambda_{R,a} \frac{l_{0,a}}{D_a} w_a^2 \frac{\rho}{2} \begin{cases} \text{Durchgang } x=d: e=1, a=2 \\ \text{Abzweig Vereinigung } x=aV: e=3, a=2 \\ \text{Abzweig Trennung } x=aT: e=1, a=3 \end{cases} \quad (\text{C.5})$$

Da der Widerstandsbeiwert eines T-Stückes üblicherweise auf den Staudruck des Rohres bezogen wird in dem der gesamte Massenstrom fließt, erhält man bei Vereinigung der Massenströme

$$\text{im Durchgang: } \zeta_{VdV} = \frac{p_{VdV}}{w_2^2 \frac{\rho}{2}} \quad (\text{C.6})$$

$$\text{im Abzweig: } \zeta_{VaV} = \frac{p_{VaV}}{w_2^2 \frac{\rho}{2}} \quad (\text{C.7})$$

und bei Trennung der Massenströme

$$\text{im Durchgang: } \zeta_{VdT} = \frac{\rho_{VdT}}{w_1^2 \frac{\rho}{2}} \quad (\text{C.8})$$

$$\text{im Abzweig: } \zeta_{VaT} = \frac{\rho_{VaT}}{w_1^2 \frac{\rho}{2}} \quad (\text{C.9})$$

Wird mit x das Verhältnis des Massenstroms im Abzweig zum Gesamtmassenstrom und mit a das Querschnittsverhältnis von Durchgang zu Abzweig bezeichnet, so erhält man für den Druckverlust zwischen einem Punkt der Rohrleitung vor dem T-Stück und einem Punkt dahinter bei Vereinigung der Massenströme

$$\text{D: } p_1 - p_2 = w_2^2 \frac{\rho}{2} \left(\zeta_{VdV} + \left(1 - (1-x)^2\right) + \lambda_{R,1} \frac{l_{1,0}}{D_1} (1-x)^2 + \lambda_{R,2} \frac{l_{0,2}}{D_2} \right) \quad (\text{C.10})$$

$$\Rightarrow \zeta_{VdV,ges} = \left(\zeta_{VdV} + \left(1 - (1-x)^2\right) + \lambda_{R,1} \frac{l_{1,0}}{D_1} (1-x)^2 + \lambda_{R,2} \frac{l_{0,2}}{D_2} \right) \quad (\text{C.11})$$

$$\text{A: } p_3 - p_2 = w_2^2 \frac{\rho}{2} \left(\zeta_{VaV} + \left(1 - (ax)^2\right) + \lambda_{R,3} \frac{l_{3,0}}{D_3} (ax)^2 + \lambda_{R,2} \frac{l_{0,2}}{D_2} \right) \quad (\text{C.12})$$

$$\Rightarrow \zeta_{VaV,ges} = \left(\zeta_{VaV} + \left(1 - (ax)^2\right) + \lambda_{R,3} \frac{l_{3,0}}{D_3} (ax)^2 + \lambda_{R,2} \frac{l_{0,2}}{D_2} \right) \quad (\text{C.13})$$

und bei Trennung der Massenströme

$$\text{D: } p_1 - p_2 = w_2^2 \frac{\rho}{2} \left(\zeta_{VdT} + \left((1-x)^2 - 1\right) + \lambda_{R,1} \frac{l_{1,0}}{D_1} + \lambda_{R,2} \frac{l_{0,2}}{D_2} (1-x)^2 \right) \quad (\text{C.14})$$

$$\Rightarrow \zeta_{VdT,ges} = \left(\zeta_{VdT} + \left((1-x)^2 - 1\right) + \lambda_{R,1} \frac{l_{1,0}}{D_1} + \lambda_{R,2} \frac{l_{0,2}}{D_2} (1-x)^2 \right) \quad (\text{C.15})$$

$$\text{A: } p_1 - p_3 = w_2^2 \frac{\rho}{2} \left(\zeta_{VaT} + \left((ax)^2 - 1\right) + \lambda_{R,1} \frac{l_{1,0}}{D_1} + \lambda_{R,3} \frac{l_{0,3}}{D_3} (ax)^2 \right) \quad (\text{C.16})$$

$$\Rightarrow \zeta_{VaT,ges} = \left(\zeta_{VaT} + \left((ax)^2 - 1\right) + \lambda_{R,1} \frac{l_{1,0}}{D_1} + \lambda_{R,3} \frac{l_{0,3}}{D_3} (ax)^2 \right) \quad (\text{C.17})$$

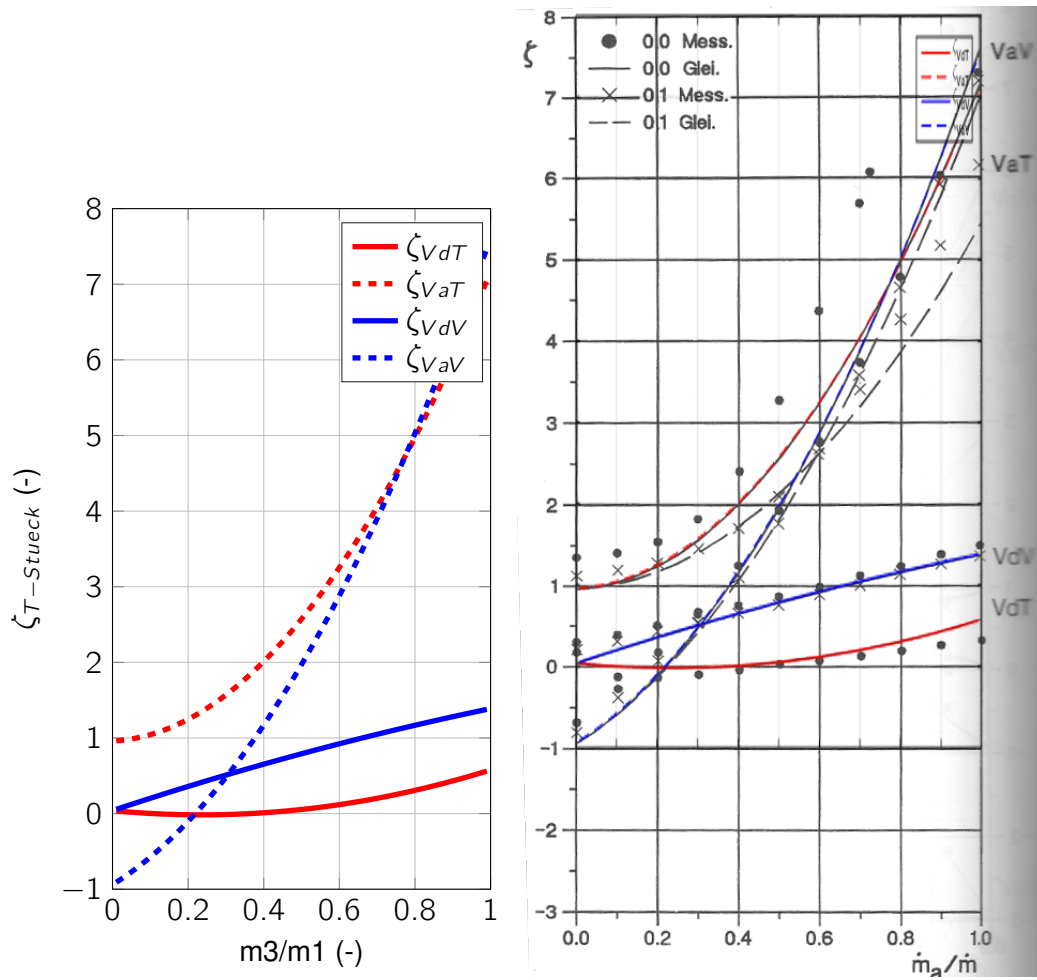


Abbildung C.1.: Verifizierung der Funktion $\zeta_{T\text{Stueck}}$ für ein T-Stück mit 90° -Abzweig und Querschnittsverhältnis $A = 2,96$

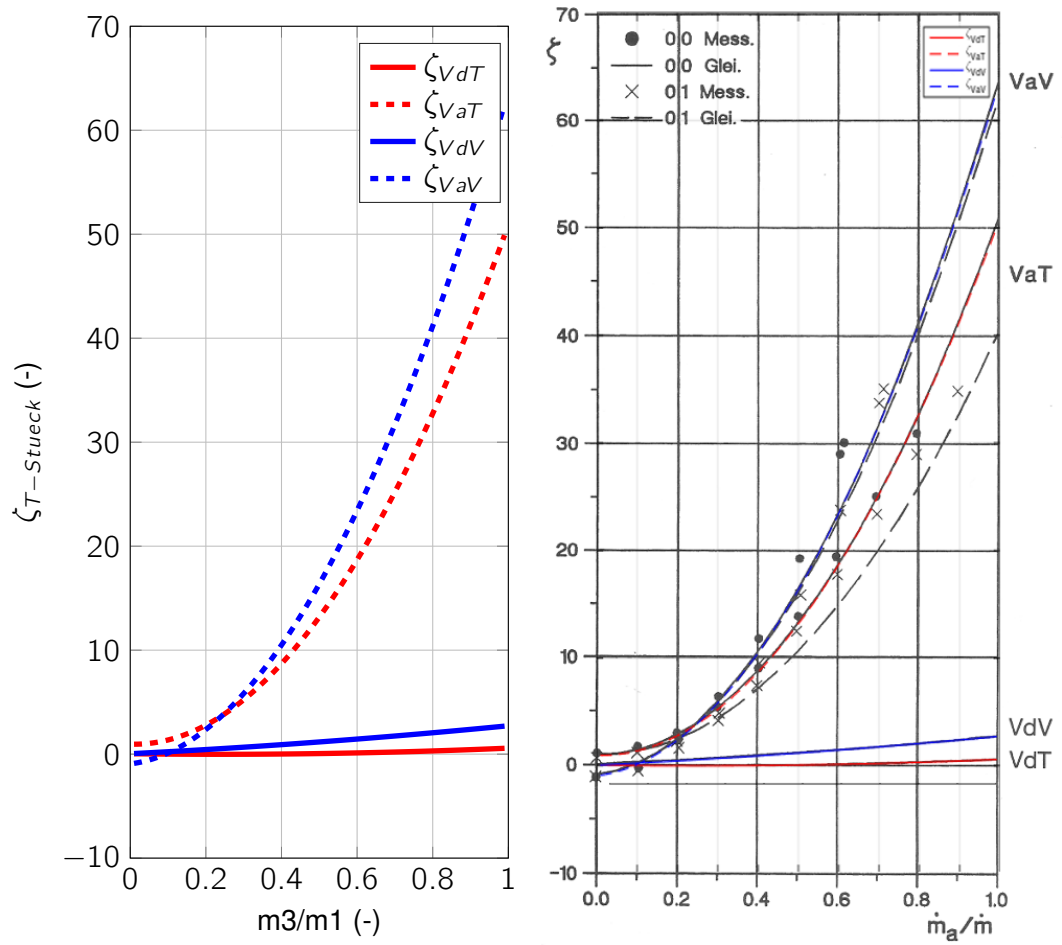


Abbildung C.2.: Verifizierung der Funktion $\zeta_{T\text{Stueck}}$ für ein T-Stück mit 90° -Abzweig und Querschnittsverhältnis $A = 8,22$

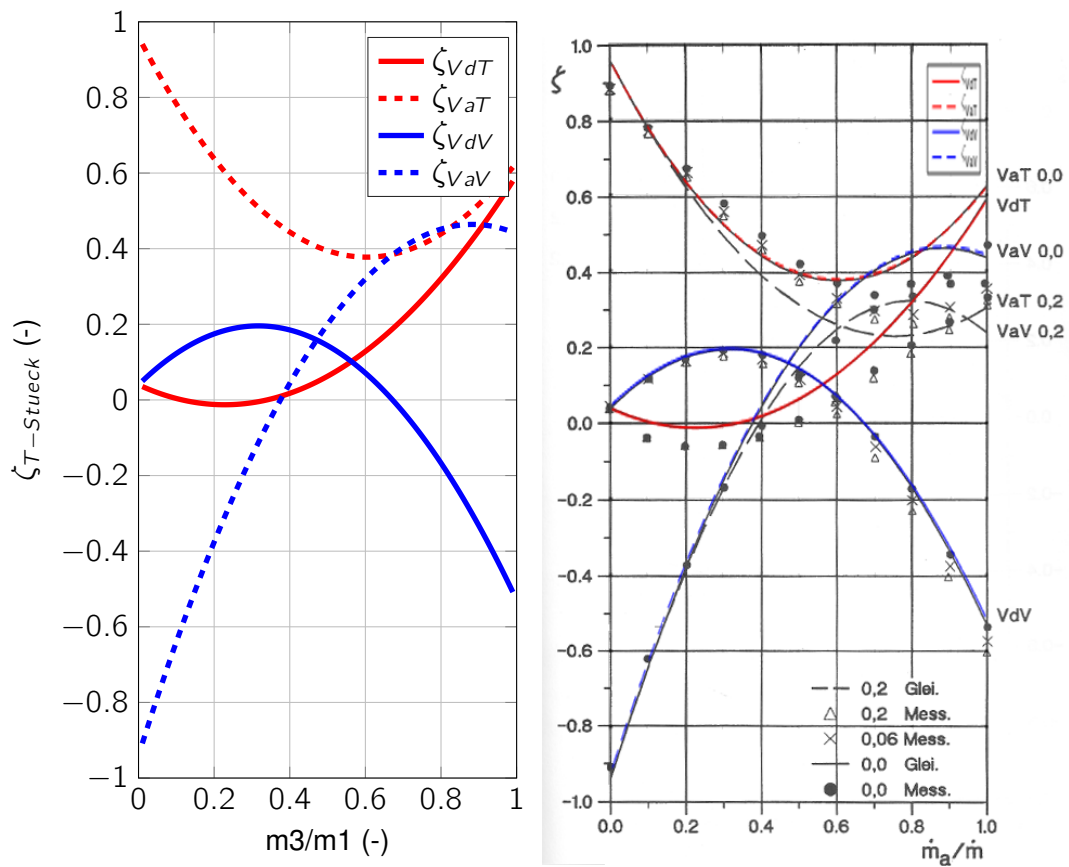


Abbildung C.3.: Verifizierung der Funktion $\zeta_{T\text{-Stueck}}$ für ein T-Stück mit 45° -Abzweig und Querschnittsverhältnis $A = 1,00$

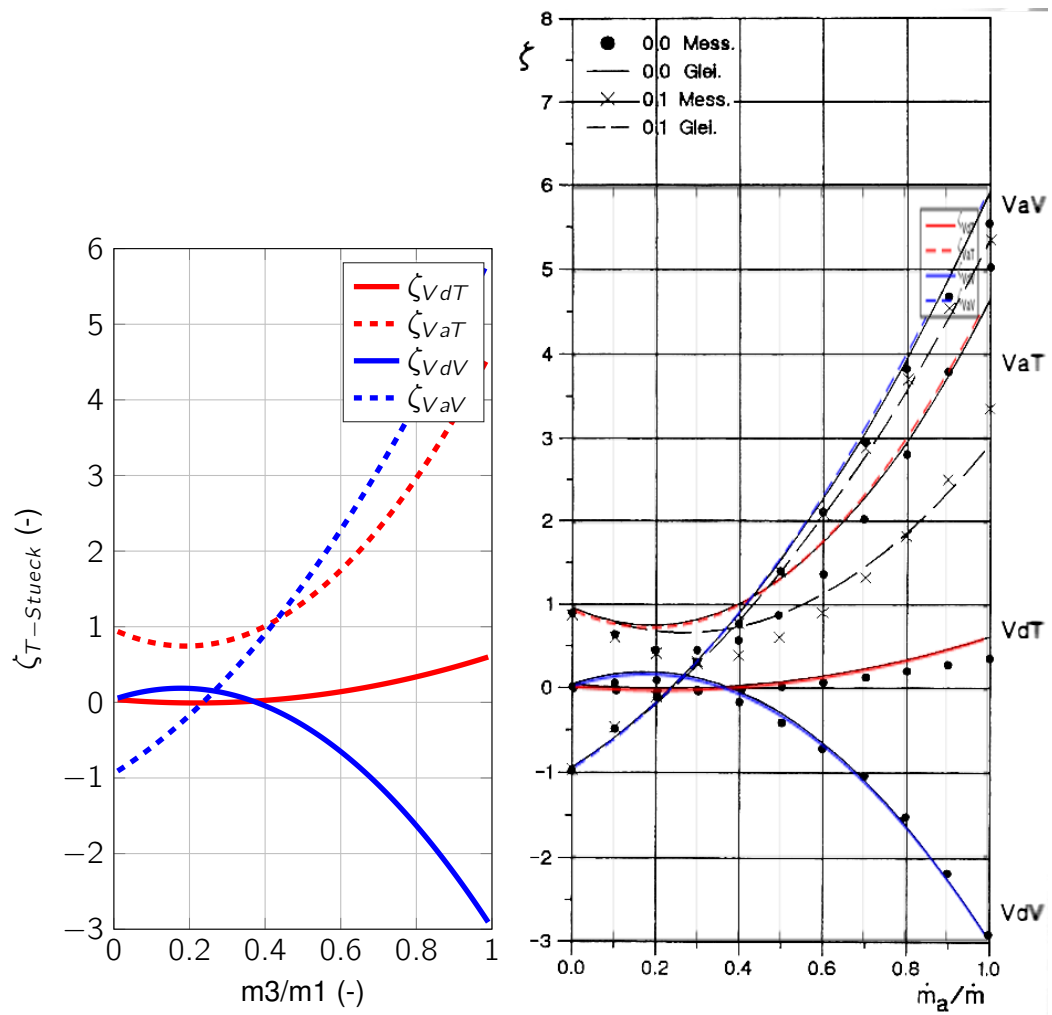


Abbildung C.4.: Verifizierung der Funktion $\zeta_{T\text{-Stueck}}$ für ein T-Stück mit 45° -Abzweig und Querschnittsverhältnis $A = 2,96$

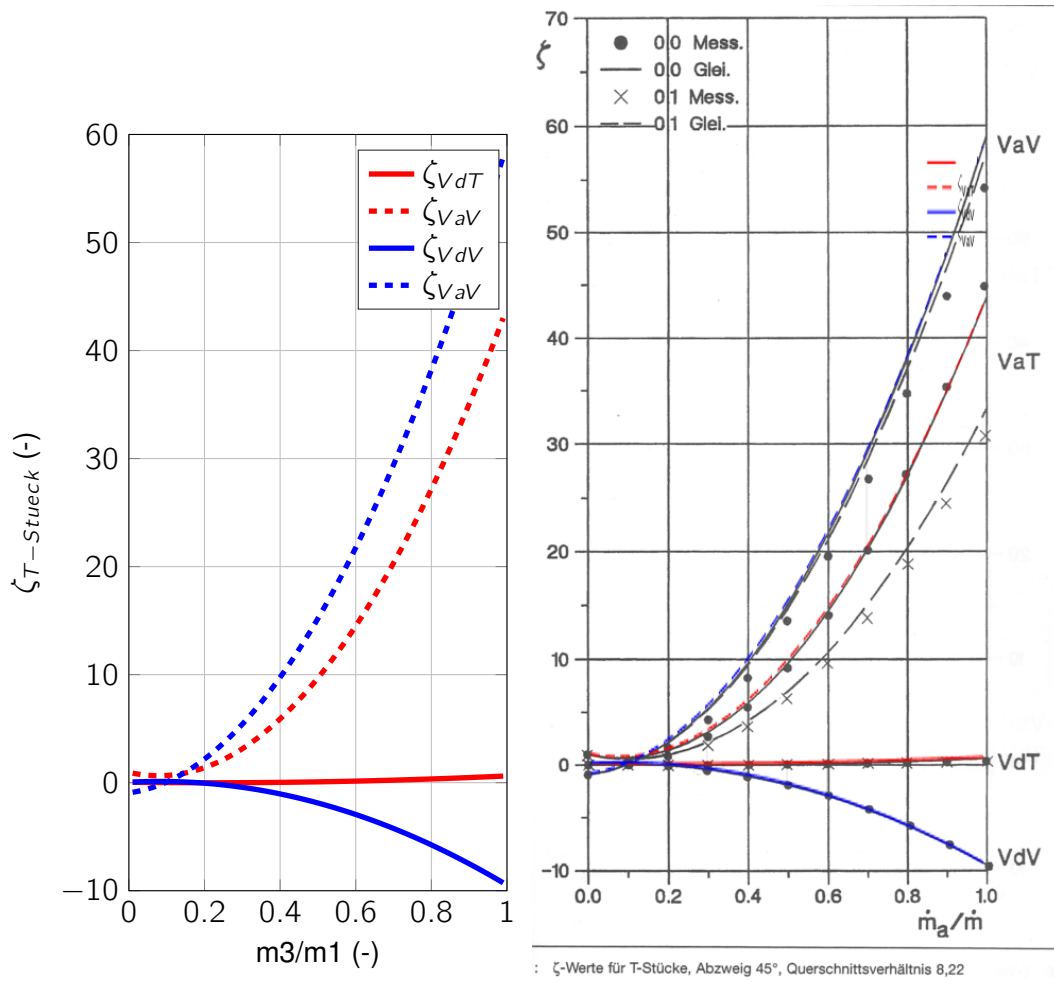


Abbildung C.5.: Verifizierung der Funktion $\zeta_{T\text{Stueck}}$ für ein T-Stück mit 45°-Abzweig und Querschnittsverhältnis $A = 8,22$

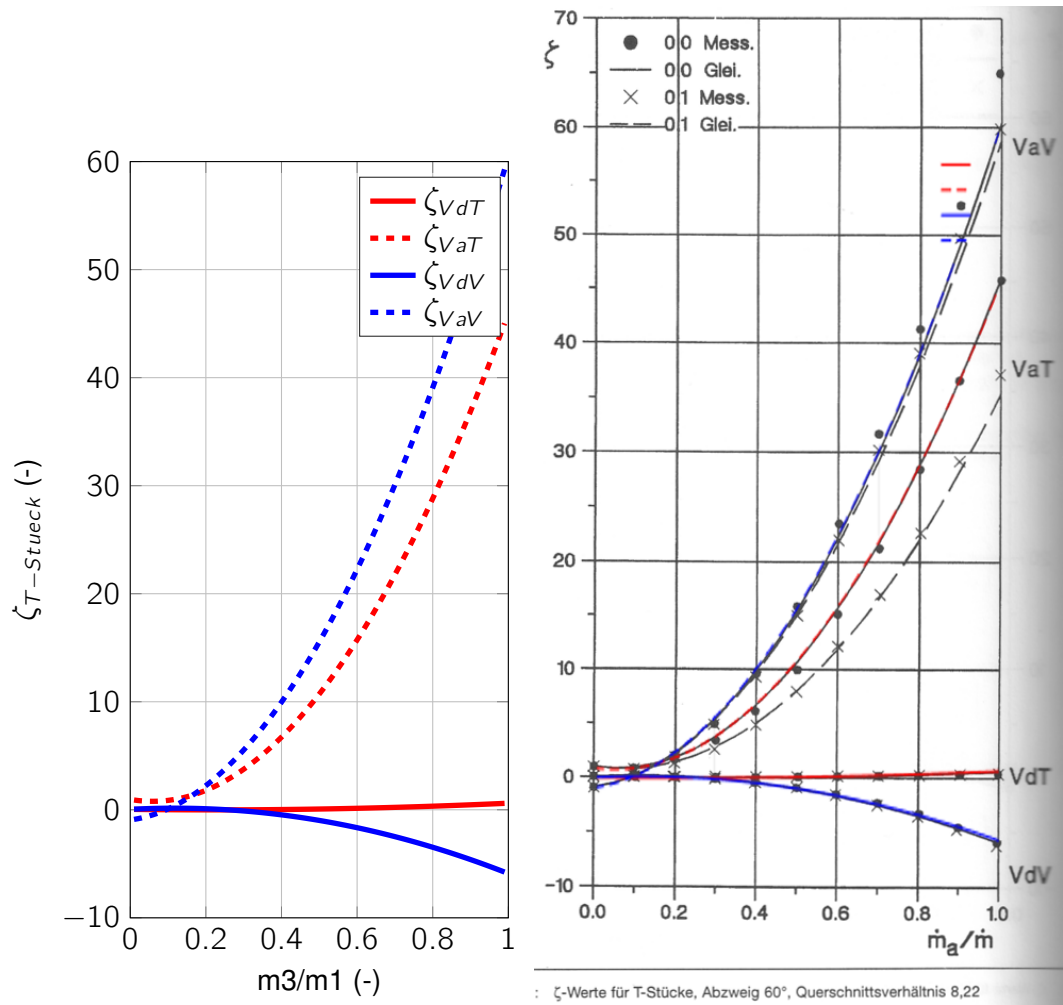


Abbildung C.6.: Verifizierung der Funktion $\zeta_{T\text{Stueck}}$ für ein T-Stück mit 60° -Abzweig und Querschnittsverhältnis $A = 8,22$

D. HeatGridTable für das 'Einfache Maschennetz'

Die folgenden Seiten enthalten einen Ausdruck der Übergabetabelle *HeatGridTable* für das 'Einfache Maschennetz', so dass für Interessierte die Möglichkeit besteht dieses Rohrnetz selbst zu berechnen und mit den Ergebnissen in dieser Arbeit zu vergleichen.

TSlauf	TsalD	RohrBez	d1_innen	PunktNr
v	109 DN 150 ST / 250 PE		150	2013
v	109 DN 150 ST / 250 PE		150	2012
v	109 DN 150 ST / 250 PE		150	2000
v	136 DN 150 ST / 250 PE		150	2000
v	136 DN 150 ST / 250 PE		150	30
v	138 DN 150 ST / 250 PE		150	2000
v	138 DN 150 ST / 250 PE		150	33
v	3 DN 150 ST / 250 PE		150	30
v	3 DN 150 ST / 250 PE		150	5
v	3 DN 150 ST / 250 PE		150	6
v	3 DN 150 ST / 250 PE		150	7
v	3 DN 150 ST / 250 PE		150	33
k	6 DN 65 ST / 140 PE		65	30
k	6 DN 65 ST / 140 PE		65	31
k	6 DN 65 ST / 140 PE		65	32
k	6 DN 65 ST / 140 PE		65	1269
k	7 DN 32 ST / 110 PE		32	1269
k	7 DN 32 ST / 110 PE		32	1274
k	7 DN 32 ST / 110 PE		32	1272
k	7 DN 32 ST / 110 PE		32	1268
k	7 DN 32 ST / 110 PE		32	1273
k	7 DN 32 ST / 110 PE		32	2028
k	58 DN 32 ST / 110 PE		32	1273
k	58 DN 32 ST / 110 PE		32	1268
k	58 DN 32 ST / 110 PE		32	1272
k	58 DN 32 ST / 110 PE		32	1274
k	58 DN 32 ST / 110 PE		32	1269
k	57 DN 65 ST / 140 PE		65	1269
k	57 DN 65 ST / 140 PE		65	32
k	57 DN 65 ST / 140 PE		65	31
k	57 DN 65 ST / 140 PE		65	30
k	8 DN 65 ST / 140 PE		65	33
k	8 DN 65 ST / 140 PE		65	34
k	8 DN 65 ST / 140 PE		65	35
k	8 DN 65 ST / 140 PE		65	36
k	8 DN 65 ST / 140 PE		65	1200
k	9 DN 32 ST / 110 PE		32	1200
k	9 DN 32 ST / 110 PE		32	1201
k	9 DN 32 ST / 110 PE		32	1202
k	9 DN 32 ST / 110 PE		32	1204
k	9 DN 32 ST / 110 PE		32	1205
k	9 DN 32 ST / 110 PE		32	2026
k	60 DN 32 ST / 110 PE		32	1205
k	60 DN 32 ST / 110 PE		32	1204
k	60 DN 32 ST / 110 PE		32	1202

PunktBez	x-Koord	y-Koord	z-Koord	dx	dy
Pumpendruckmessung_VL	3566660.685	5930466.871	3.8		
St-Bogen_90°_VL	3566656.685	5930466.871	3.8	-4	0
St-T-Stueck	3566656.685	5930466.871	4.3	0	0
St-T-Stueck	3566656.685	5930466.871	4.3		
St-T-Stueck	3566516.445	5930476.054	1.74	-140.24	9.183
St-T-Stueck	3566656.685	5930466.871	4.3		
St-T-Stueck	3566461.317	5930501.911	1.1	-195.368	35.04
St-T-Stueck	3566516.445	5930476.054	1.74		
St-T-Stueck	3566506.898	5930480.584	1.45	-9.547	4.53
St-Leitung	3566488.281	5930489.242	1.15	-18.617	8.658
St-Leitung	3566471.884	5930497.049	1.14	-16.397	7.807
St-T-Stueck	3566461.317	5930501.911	1.1	-10.567	4.862
St-T-Stueck	3566516.445	5930476.054	1.74		
St-Bogen_90°	3566514.597	5930476.902	1.17	-1.848	.848
Einmalhahn	3566510.651	5930468.825	1.45	-3.946	-8.077
St-Reduktion	3566510.61	5930468.77	1.45	-0.041	-0.055
St-Reduktion	3566508.81	5930465.94	1.51	-1.8	-2.83
St-Leitung	3566506.73	5930463.01	1.61	-2.08	-2.93
St-Bogen_90°	3566506.15	5930462.19	1.64	-5.8	-8.2
St-Bogen_45°	3566505.71	5930462.48	2.48	-4.4	.29
WUESt_11_SiedelnImGrundbau	3566505.71	5930462.48	2.48	0	0
St-Bogen_45°	3566505.71	5930462.48	2.48		
St-Bogen_90°	3566506.15	5930462.19	1.64	.44	-2.9
St-Leitung	3566506.73	5930463.01	1.61	.58	.82
St-Leitung	3566508.81	5930465.94	1.51	2.08	2.93
St-Reduktion	3566510.61	5930468.77	1.45	1.8	2.83
St-Reduktion	3566510.61	5930468.77	1.45		
Einmalhahn	3566510.651	5930468.825	1.45	.041	.055
St-Bogen_90°	3566514.597	5930476.902	1.17	3.946	8.077
St-T-Stueck	3566516.445	5930476.054	1.74	1.848	-8.48
St-T-Stueck	3566461.317	5930501.911	1.1		
St-Bogen_90°	3566459.615	5930502.744	.62	-1.702	.833
St-Bogen_45°	3566459.224	5930501.874	.22	-.391	-.87
Einmalhahn	3566455.813	5930495.309	.33	-3.411	-6.565
St-Schw.Naht_mit_Reduzierung65/32	3566455.76	5930495.2	.34	-.053	-.109
St-Schw.Naht_mit_Reduzierung65/32	3566455.76	5930495.2	.34		
St-Bogen_90°	3566455.42	5930494.4	.22	-.34	-.8
St-Bogen_90°	3566455.37	5930494.46	1.34	-.05	.06
St-Bogen_90°	3566463.29	5930490.85	1.41	7.92	-3.61
St-Leitung	3566462.02	5930487.7	1.22	-1.27	-3.15
WUESt_9_SmartlistGrün	3566462.02	5930487.7	1.22	0	0
St-Leitung	3566462.02	5930487.7	1.22		
St-Bogen_90°	3566463.29	5930490.85	1.41	1.27	3.15
St-Bogen_90°	3566455.37	5930494.46	1.34	-7.92	3.61

dz	dl	k	Bogen	B_d1	B_d2	B_Rkrue_d
0	0	.00001	0			
.5	4	.00001	-1	150	150	2
	.5	.00001	0			
-2.56	140.56364639906	.00001	0			2
	0	.00001	0			2
-3.2	198.51120125748	.00001	0			2
	0	.00001	0			
-29	10.5711971412892	.00001	0			
-3	20.5339634021297	.00001	0			
-0.1	18.1606981693987	.00001	0			
-0.4	11.6319445064013	.00001	0			
	0	.00001	0			
-57	2.11166001051306	.00001	-1	65	65	2
.28	8.9937336518267	.00001	0			
0	.06860029154457	.00001	0			
.06	3.3544746235439	.00001	0			
.1	3.59462098141098	.00001	0			
.03	1.00483829544858	.00001	-1	32	32	2
.84	.991614844584327	.00001	-1	32	32	2
0	0	.00001	0			
-84	.991614844584327	.00001	-1	32	32	2
-0.3	1.00483829544858	.00001	0			
-1	3.59462098141098	.00001	0			
-0.6	3.3544746235439	.00001	0			
0	.06860029154457	.00001	0			
-28	8.9937336518267	.00001	-1	65	65	2
.57	2.11166001051306	.00001	0			
	0	.00001	0			
-48	1.95476162229567	.00001	-1	65	65	2
-4	1.03430218021621	.00001	-1	65	65	2
.11	7.39907061731404	.00001	0			
.01	.121614143914267	.00001	0			
	0	.00001	0			
-12	.877496438739212	.00001	-1	32	32	2
1.12	1.12271991164315	.00001	-1	32	32	2
.07	8.70421736860931	.00001	-1	32	32	2
-19	3.40169075607998	.00001	0			
0	0	.00001	0			
.19	3.40169075607998	.00001	-1	32	32	2
-0.7	8.70421736860931	.00001	-1	32	32	2

B_alphaHGrad	Leitung	KD	KD_d1	KD_d2	KD_alphaHGrad	KD_KonDiff
		0	0			
90	0	0				
	0	0				
	0	0			16	1
	0	0			16	1
	0	0			16	1
	0	0			16	1
	0	0				
	0	0				
	-1	0				
	-1	0				
	-1	0				
	0	0				
	0	0				
90	0	0				
	0	0				
	0	-1	65	32	16	1
	0	-1	32	65	16	1
	-1	0				
	-1	0				
90	0	0				
45	0	0				
	0	0				
45	0	0				
90	0	0				
	-1	0				
	-1	0				
	0	-1	32	65	16	-1
	0	-1	65	32	16	-1
	0	0				
90	0	0				
	0	0				
90	0	0				
45	0	0				
	0	0				
	0	-1	65	32	16	1
	0	-1	32	65	16	1
90	0	0				
90	0	0				
90	0	0				
	-1	0				
	0	0				
90	0	0				
90	0	0				
	-1	0				
90	0	0				
90	0	0				

EbenenBeschr	TSNumber	TSBezeichnung
Strang mit den meisten Kunden (BSU-HybridNord)	6	SmartlistGrün
Strang mit den meisten Kunden (BSU-HybridNord)	6	SmartlistGrün
Strang mit den meisten Kunden (BSU-HybridNord)	6	SmartlistGrün
Strang mit den meisten Kunden (BSU-HybridNord)	6	SmartlistGrün
Strang mit den meisten Kunden (BSU-HybridNord)	6	SmartlistGrün
Strang mit den meisten Kunden (BSU-HybridNord)	6	SmartlistGrün
Strang mit den meisten Kunden (BSU-HybridNord)	6	SmartlistGrün
Strang mit den meisten Kunden (BSU-HybridNord)	7	7
Strang mit den meisten Kunden (BSU-HybridNord)	7	7
Strang mit den meisten Kunden (BSU-HybridNord)	7	7
Strang mit den meisten Kunden (BSU-HybridNord)	7	7
Strang mit den meisten Kunden (BSU-HybridNord)	8	8TS8
Strang mit den meisten Kunden (BSU-HybridNord)	8	8TS8
Strang mit den meisten Kunden (BSU-HybridNord)	9	9TS9
Strang mit den meisten Kunden (BSU-HybridNord)	9	9TS9
Strang mit den meisten Kunden (BSU-HybridNord)	10	10EVB_ges_aus
Strang mit den meisten Kunden (BSU-HybridNord)	10	10EVB_ges_aus
Strang mit den meisten Kunden (BSU-HybridNord)	10	10EVB_ges_aus

TSlauf	TsaID	RohrBez	d1_innen	PunktNr
k	60	DN 32 ST / 110 PE	32	1201
k	60	DN 32 ST / 110 PE	32	1200
k	59	DN 65 ST / 140 PE	65	1200
k	59	DN 65 ST / 140 PE	65	36
k	59	DN 65 ST / 140 PE	65	35
k	59	DN 65 ST / 140 PE	65	34
k	59	DN 65 ST / 140 PE	65	33
r	54	DN 150 ST / 250 PE	150	33
r	54	DN 150 ST / 250 PE	150	7
r	54	DN 150 ST / 250 PE	150	6
r	54	DN 150 ST / 250 PE	150	5
r	54	DN 150 ST / 250 PE	150	30
r	139	DN 150 ST / 250 PE	150	33
r	139	DN 150 ST / 250 PE	150	2000
r	137	DN 150 ST / 250 PE	150	30
r	137	DN 150 ST / 250 PE	150	2000
r	112	DN 150 ST / 250 PE	150	2000
r	112	DN 150 ST / 250 PE	150	2014
r	112	DN 150 ST / 250 PE	150	2015

PunktBez	x-Koord	y-Koord	z-Koord	dx	dy
St-Bogen_90°	3566455.42	5930494.4	.22	.05	-0.06
St-Schw.Naht_mit_Reduzierung65/32	3566455.76	5930495.2	.34	.34	.8
St-Schw.Naht_mit_Reduzierung65/32	3566455.76	5930495.2	.34		
Einmalhahn	3566455.813	5930495.309	.33	.053	.109
St-Bogen_45°	3566459.224	5930501.874	.22	3.411	6.565
St-Bogen_90°	3566459.615	5930502.744	.62	.391	.87
St-T-Stueck	3566461.317	5930501.911	1.1	1.702	-833
St-T-Stueck	3566471.884	5930497.049	1.14	10.567	-4.862
St-Leitung	3566488.281	5930489.242	1.15	16.397	-7.807
St-Leitung	3566506.898	5930480.584	1.45	18.617	-8.658
St-T-Stueck	3566516.445	5930476.054	1.74	9.547	-4.53
St-T-Stueck	3566461.317	5930501.911	1.1		
St-T-Stueck	3566656.685	5930466.871	4.3	195.368	-35.04
St-T-Stueck	3566516.445	5930476.054	1.74		
St-T-Stueck	3566656.685	5930466.871	4.3	140.24	-9.183
St-T-Stueck	3566656.685	5930466.871	4.3		
St-Bogen_90°_RL	3566656.685	5930466.871	2.3	0	0
Pumpendruckmessung_RL	3566660.685	5930466.871	2.3	4	0

dz	dl	k	Bogen	B_d1	B_d2	B_Rkrue_d
-1.12	1.12271991164315	.00001	-1	32	32	2
.12	.877496438739212	.00001	0			
	0	.00001	0			
-01	.121614143914267	.00001	0			
-1.1	7.39907061731404	.00001	-1	65	65	2
.4	1.03430218021621	.00001	-1	65	65	2
.48	1.95476162229567	.00001	0			
	0	.00001	0			
.04	11.6319445064013	.00001	0			
.01	18.1606981693987	.00001	0			
.3	20.5339634021297	.00001	0			
.29	10.5711971412892	.00001	0			
	0	.00001	0			2
3.2	198.511201255748	.00001	0			2
	0	.00001	0			2
2.56	140.56364639906	.00001	0			2
	0	.00001	0			2
-2	2	.00001	-1	150	150	2
0	4	.00001	0			

B_alphaInGrad	Leitung	KD	KD_d1	KD_d2	KD_alphaInGrad	KD_KonDiff
90	0	0				
	0	-1	32	65	16	-1
	0	-1	65	32	16	-1
	0	0				
45	0	0				
90	0	0				
	0	0				
	0	0				
	-1	0				
	-1	0				
	-1	0				
	0	0				
	0	0			16	1
	0	0			16	1
	0	0			16	1
	0	0			16	1
90	0	0				
	0	0				
	0	0				

KD_Richtung	TStueck	TX_r	TX_alphaInGrad	TX_TrennVer	TX_Richtung
	0				
1	0				
1	0				
	0				
	0				
	0				
	0				
	-1	0	90	2	1
	-1	0	90	2	1
	0				
	0				
	0				
	0				
	-1	0	90	-1	1
1	-1	0	90	2	1
1	-1	0	90	-1	1
1	-1	0	90	-1	1
1	-1	0	90	-1	1
	0				
	0				
	0				

W_d2	UntereEbene	NrEbene	TSSort	TSA Sort	TSAPunktSort	TSCode
	0		6	127		42,2
	0		6	127		52,2
	0		6	128		12,2
	0		6	128		22,2
	0		6	128		32,2
	0		6	128		42,2
	0		6	128		52,2
	0		7	129		12,p+1
	0		7	129		22,p+1
	0		7	129		32,p+1
	0		7	129		42,p+1
	0		7	129		52,p+1
	0		8	1		1TS8
	0		8	1		2TS8
	0		9	1		1TS9
	0		9	1		2TS9
	0		10	.4		1EVB_ges_a
	0		10	.4		2EVB_ges_a
	0		10	.4		3EVB_ges_a

TSA Lauf	TSAbschnitt	thetaquer
r	2,2.2 SmartlistGrün	35
r	2,2.2 SmartlistGrün	35
r	2,2.1 SmartlistGrün	35
r	2,2.1 SmartlistGrün	35
r	2,2.1 SmartlistGrün	35
r	2,2.1 SmartlistGrün	35
r	2,2.1 SmartlistGrün	35
r	2,p+1	35
r	2,p+1	35
r	2,p+1	35
r	2,p+1	35
r	2,p+1	35
r	TSA5-6	
r	TSA5-6	
r	TSA7-6	
r	TSA7-6	
r	EVB_ges_aus	35
r	EVB_ges_aus	35
r	EVB_ges_aus	35



Abbildung E.2.: Ausschnitt aus dem Lageplan des Wärmenetz 'Energieverbund' in Hamburg-Wilhelmsburg

Koordinatenverzeichnis Lagestatus 320							Koordinatenverzeichnis Lagestatus 320						
Punkt	Rechtswert	Hochwert	Höhe	Beschreibung	Punkt	Rechtswert	Hochwert	Höhe	Beschreibung				
1	3566565.880	5930453.438	3.53	St-Leitung	501	3566520.744	5930294.873	1.01	Einmalhahn				
2	3566545.364	5930462.713	2.73	St-Leitung	502	3566520.952	5930294.709	0.99	St-Endkappe				
3	3566534.844	5930467.660	2.37	St-Leitung	503	3566514.890	5930298.421	0.90	St-Leitung				
4	3566521.198	5930473.915	1.96	St-Leitung	504	3566506.663	5930288.197	0.41	St-Leitung				
5	3566506.898	5930480.584	1.45	St-Leitung	505	3566498.176	5930277.814	0.34	St-Leitung				
6	3566488.281	5930489.242	1.15	St-Leitung	506	3566490.040	5930267.943	0.43	St-Leitung				
7	3566471.884	5930497.049	1.14	St-Leitung	513	3566469.425	5930242.633	0.74	St-Leitung				
8	3566456.307	5930504.387	1.10	St-Leitung	514	3566467.860	5930240.665	0.83	St-Schw.Naht				
9	3566433.760	5930515.154	1.09	St-Leitung	515	3566467.424	5930240.128	0.84	St-T-Stück				
10	3566408.767	5930526.515	1.08	St-Leitung	516	3566466.945	5930239.578	0.89	St-Schw.Naht				
11	3566395.868	5930532.457	0.91	St-Leitung	517	3566466.557	5930239.052	0.92	St-Schw.Naht				
15	3566634.709	5930430.537	5.79	St-Leitung	518	3566466.166	5930238.474	0.92	St-Bogen 90°				
16	3566633.245	5930426.817	5.93	St-Bogen 90°	519	3566466.766	5930237.762	0.96	St-Schw.Naht				
17	3566624.306	5930429.973	5.75	St-Leitung	520	3566471.157	5930234.408	1.04	St-Schw.Naht				
18	3566615.239	5930433.192	5.50	St-T-Stück	521	3566471.990	5930233.730	1.00	Klöpperboden				
19	3566615.045	5930433.183	5.03	St-Bogen 90°	522	3566466.150	5930238.506	0.41	St-Leitung				
20	3566613.517	5930433.753	4.94	St-Bogen 90°	523	3566466.943	5930239.539	0.45	St-Schw.Naht				
21	3566608.965	5930421.873	4.46	St-Schw.Naht	524	3566463.226	5930234.942	0.47	St-Schw.Naht				
22	3566611.728	5930434.432	5.32	Kugelhahn	525	3566462.772	5930234.373	0.47	Kugelhahn				
23	3566603.879	5930437.224	5.01	St-Leitung	526	3566462.352	5930233.867	0.48	St-Schw.Naht				
24	3566590.368	5930442.253	4.52	St-Leitung	527	3566462.280	5930233.777	0.47	St-Bogen 90° (2x)				
30	3566516.445	5930476.054	1.74	St-T-Stück	528	3566461.616	5930233.013	-0.33	St-Schw.Naht				
31	3566514.597	5930476.902	1.17	St-Bogen 90°	529	3566460.411	5930231.529	-0.47	St-Reduktion				
32	3566510.651	5930468.825	1.45	Einmalhahn	530	3566460.349	5930231.460	-0.47	St-T-Stück				
33	3566461.317	5930501.911	1.10	St-T-Stück	531	3566460.298	5930231.414	-0.47	St-Schw.Naht				
34	3566459.615	5930502.744	0.62	St-Bogen 90°	532	3566460.220	5930231.308	-0.42	Einmalhahn				
35	3566459.224	5930501.874	0.22	St-Bogen 45°	534	3566370.059	5930495.461	0.95	St-Schw.Naht				
36	3566455.813	5930495.309	0.33	Einmalhahn	535	3566377.791	5930492.550	1.10	St-Leitung				
37	3566386.229	5930536.896	1.16	St-T-Stück und Bogen 90°	540	3566378.374	5930492.253	1.17	St-Bogen 90°				
38	3566384.582	5930537.783	0.73	St-Bogen 90°	541	3566378.388	5930492.264	1.29	Kugelhahn				

Abbildung E.3.: Ausschnitt aus dem Koordinatenverzeichnis für den 'Energieverbund'

E.1. Auswertungen 'Energieverbund'

Die Häufigkeitsverteilungen in Abbildung E.4 wurden aus den Rohdaten des Betreibers erstellt. Es wurden keinerlei Korrekturen durchgeführt, die z.B. ausgefallene Messtellen oder offensichtlich falsche Werte berücksichtigen.

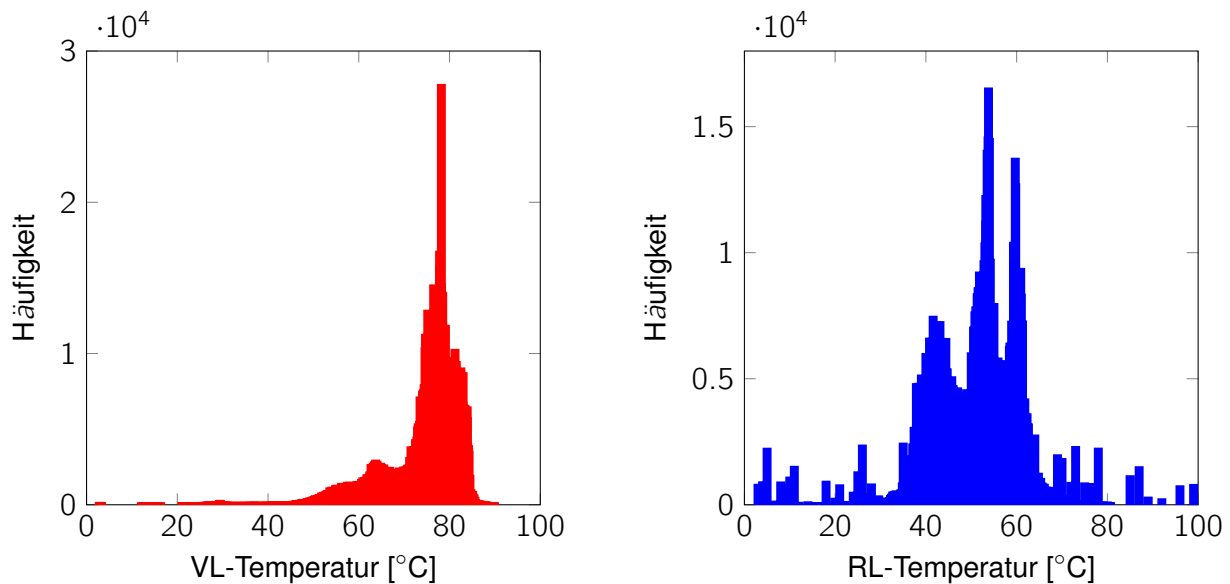


Abbildung E.4.: Häufigkeitsverteilung der Temperaturen in Vor- und Rücklauf des 'Energieverbundes' (Zeitraum 01.01.2016 00:00:00 Uhr bis 01.4.2016 00:00:00 Uhr), VL: $T_m = 75.04^\circ\text{C}$ (min= 2.8°C , max= 89.9°C), RL: $T_m = 51.70^\circ\text{C}$ (min= 3°C , max= 255°C)

Obwohl die Häufigkeitsverteilungen primär erstellt wurden, um daraus die mittleren Temperaturen für Vorlauf und Rücklauf zu bestimmen, lassen sich aus ihnen noch weitere Informationen gewinnen.

- Beide Häufigkeitsverteilungen erscheinen wie die Überlagerungen mehrerer GAUSS'scher Normalverteilungen. Im Vorlauf sind vier Maxima (bei $\approx 57^\circ\text{C}$, $\approx 62^\circ\text{C}$, $\approx 78^\circ\text{C}$ und $\approx 83^\circ\text{C}$) und im Rücklauf drei Maxima (bei $\approx 42^\circ\text{C}$, $\approx 55^\circ\text{C}$ und $\approx 60^\circ\text{C}$) recht deutlich ausgeprägt.
- Im Vorlauf sind bei Temperaturen $\vartheta \lesssim 40^\circ\text{C}$ Messfehler zu vermuten. Die Ursachen dieser Messwerte sollten vom Betreiber bei Gelegenheit gesucht werden.
- Möglicherweise sind im Vorlauf die Temperaturen zwischen 40°C bis 70°C durch Wärmeverluste auf dem Weg zum Kunden zu erklären.

- Im Rücklauf sind bei Temperaturen $\vartheta \lesssim 30^\circ\text{C}$ und $\vartheta \gtrsim 80^\circ\text{C}$ Messfehler zu vermuten. Die Ursachen dieser Messwerte sollten vom Betreiber bei Gelegenheit gesucht werden.
- Bereits ein Blick auf das Diagramm zeigt, dass die mittlere Rücklauftemperatur deutlich über dem vom Betreiber angestrebten Wert von $\approx 35^\circ\text{C}$ liegt.

Zur Berechnung der Mittelwert-Temperaturen hat der Autor im Vorlauf nur Werte $40^\circ\text{C} < \vartheta_{VL} < 90^\circ\text{C}$ und im Rücklauf $30^\circ\text{C} < \vartheta_{RL} < 80^\circ\text{C}$ berücksichtigt.

Die Mittelwert-Temperaturen liegen danach im Vorlauf bei ca. 52°C und im Rücklauf bei ca. 75°C (ermittelt mit *Hf2016_VLTempWUESTEN.m*).

Die vom Betreiber direkt beeinflussbare mittlere Vorlauftemperatur liegt damit bei den vorgesehenen 75°C .

Die vom Kundenverhalten beeinflusste mittlere Rücklauftemperatur liegt jedoch deutlich über den vom Betreiber vorgesehenen 35°C .

Da Wärmeverluste an die Umgebung proportional zum Temperaturgradienten sind, erscheint dem Autor eine zukünftige Optimierung der Rücklauftemperaturen zielführend hinsichtlich der Verbesserung der Energieeffizienz des Wärmenetzes.

E.2. Fitkurven für die Wärmeübergabestationen im 'Energieverbund'

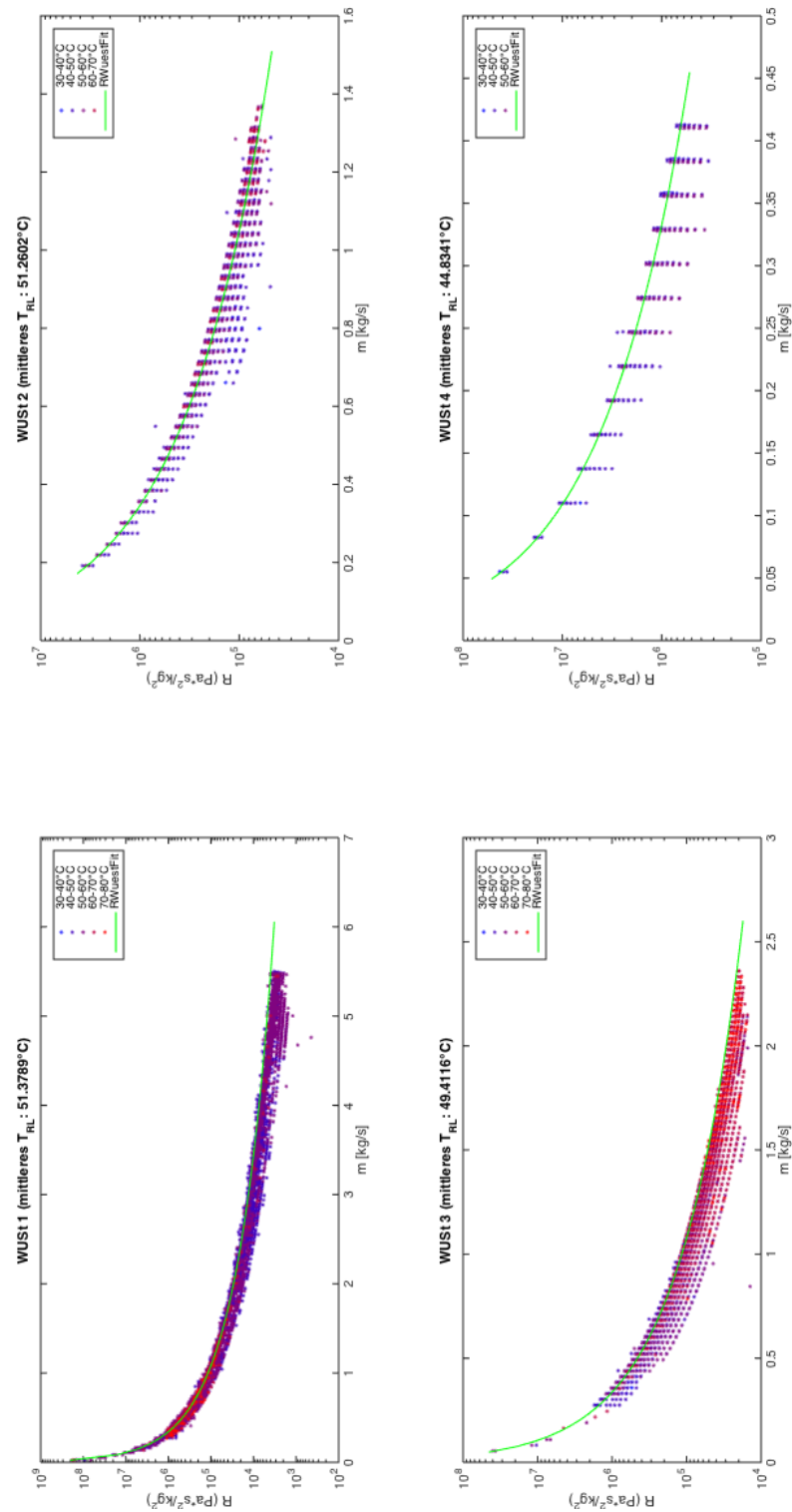


Abbildung E.5.: Widerstandskoeffizient R über Massenstrom (mit Werten vom 01.01.16 bis 01.04.16), Blatt 1

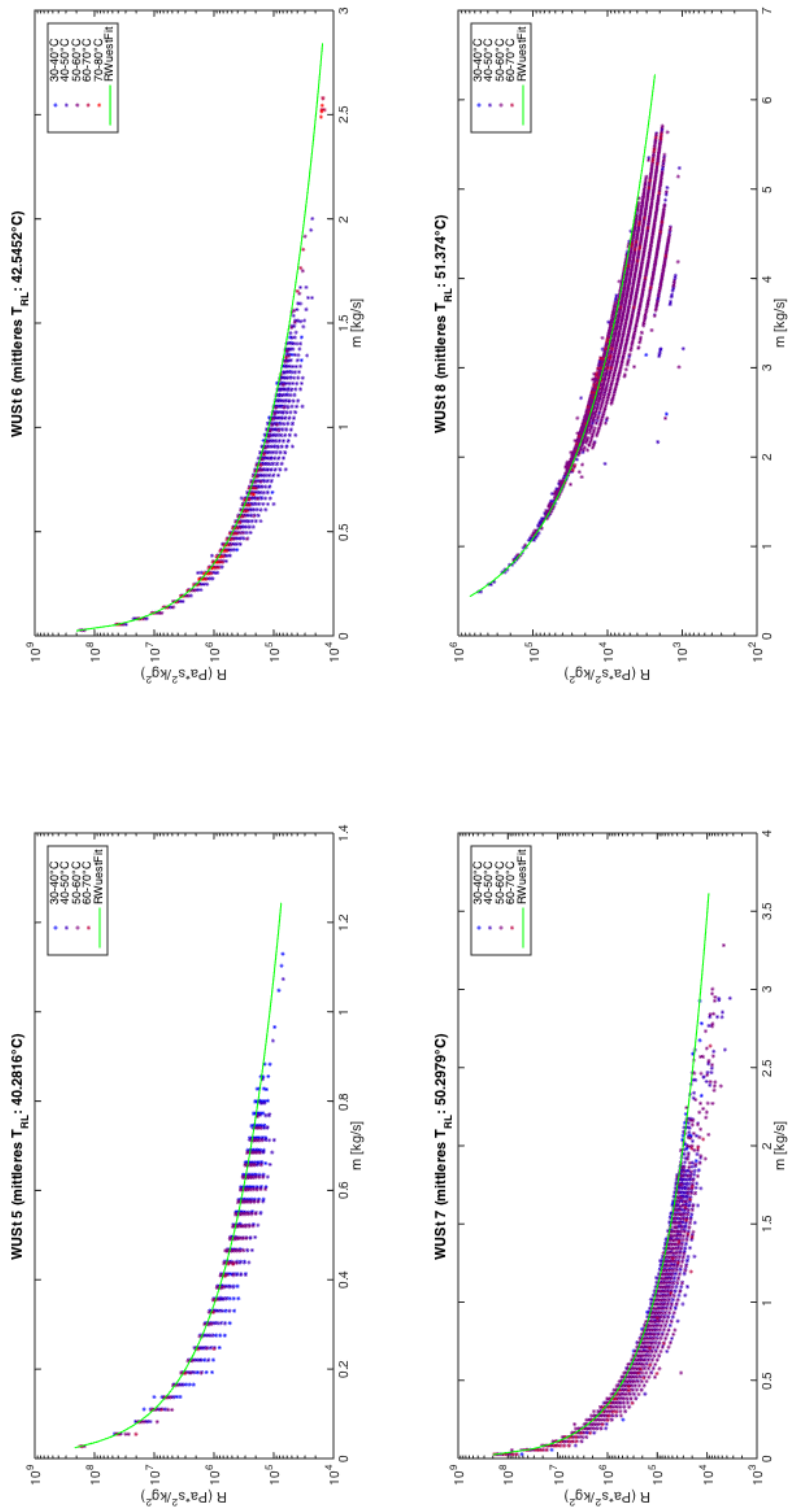


Abbildung E.6.: Fitkurven der Wärmeübergabestationen, Blatt 2

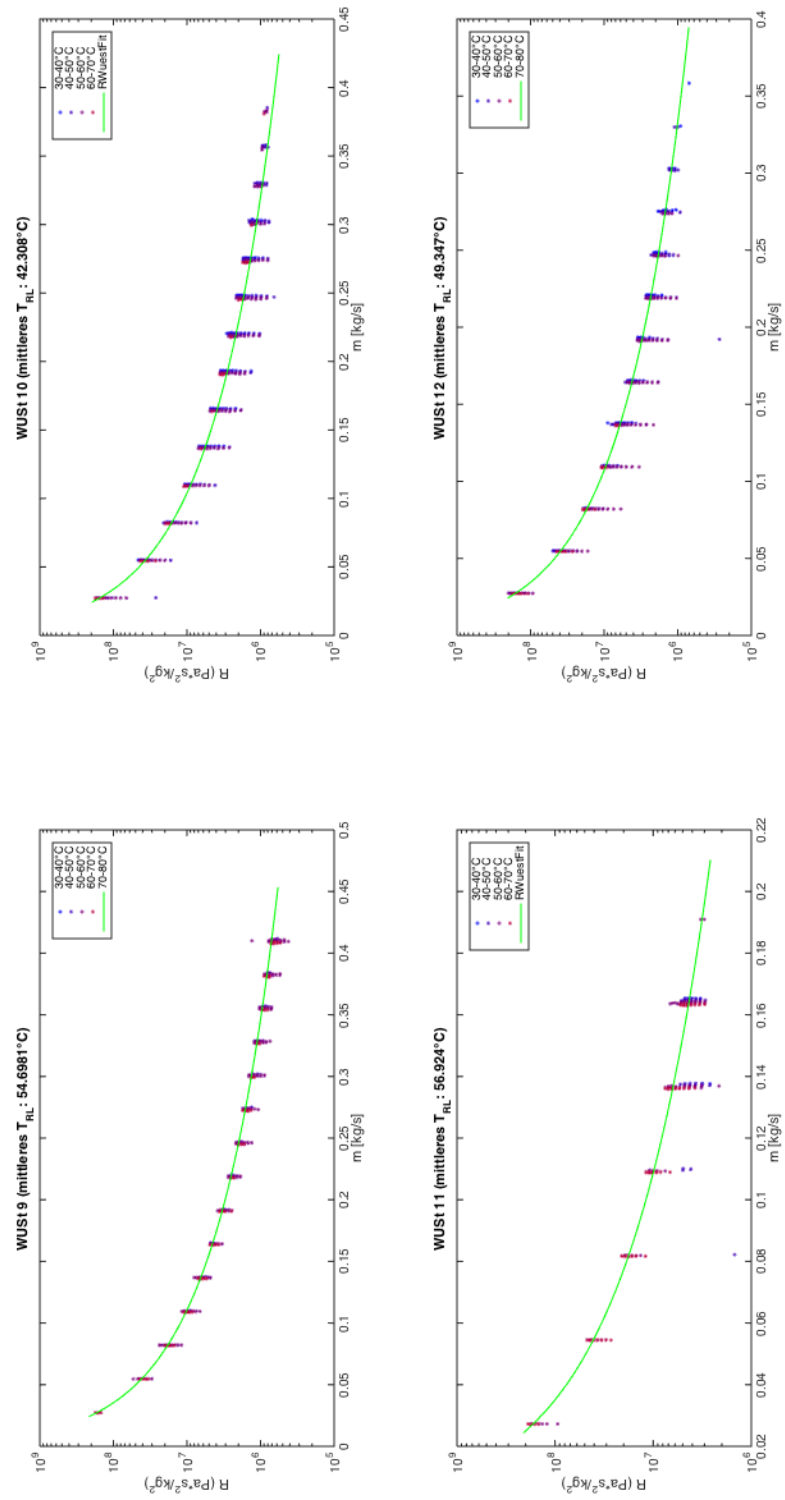


Abbildung E.7.: Fitkurven der Wärmeübergabestationen, Blatt 3

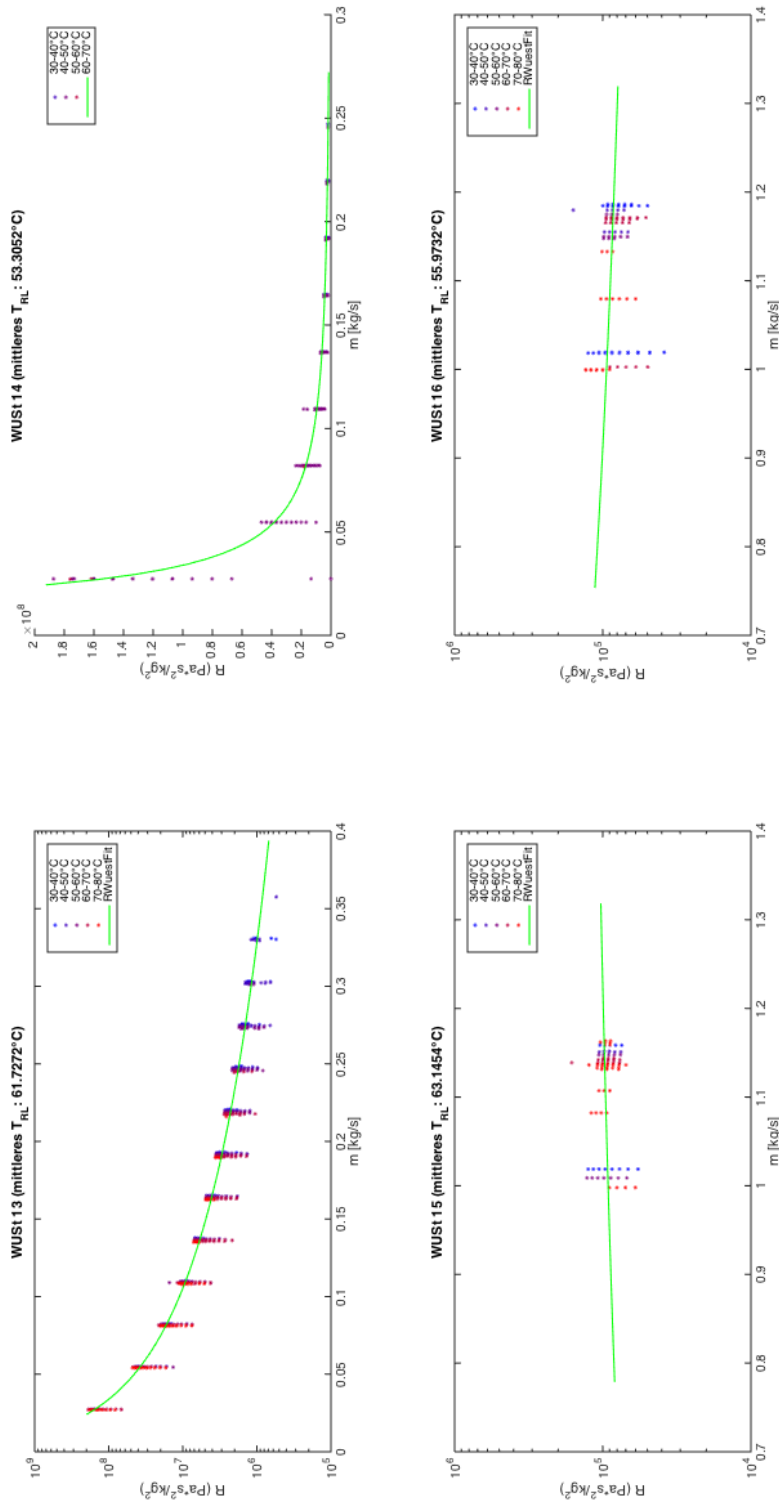


Abbildung E.8.: Fitkurven der Wärmeübergabestationen, Blatt 4

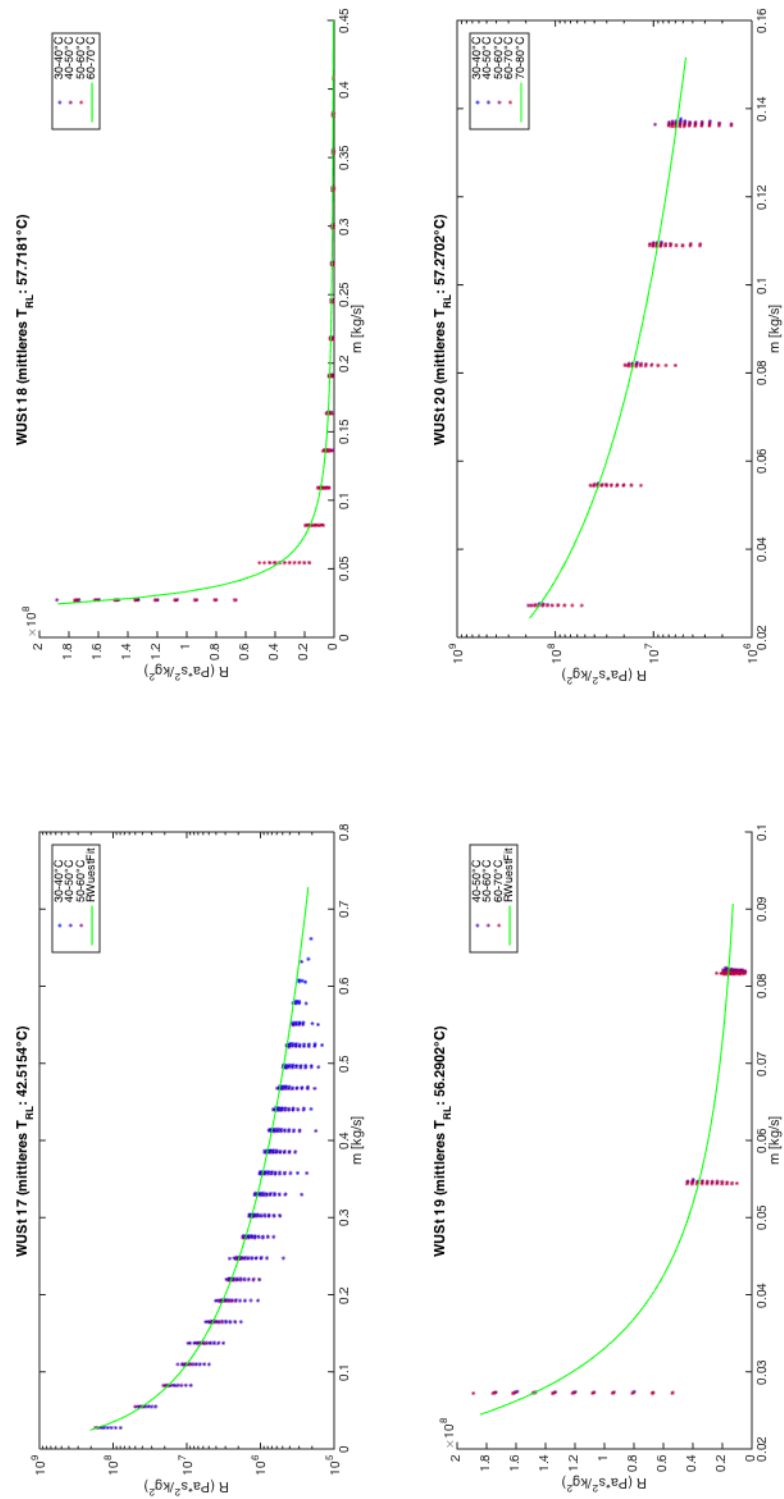


Abbildung E.9.: Fitkurven der Wärmeübergabestationen, Blatt 5

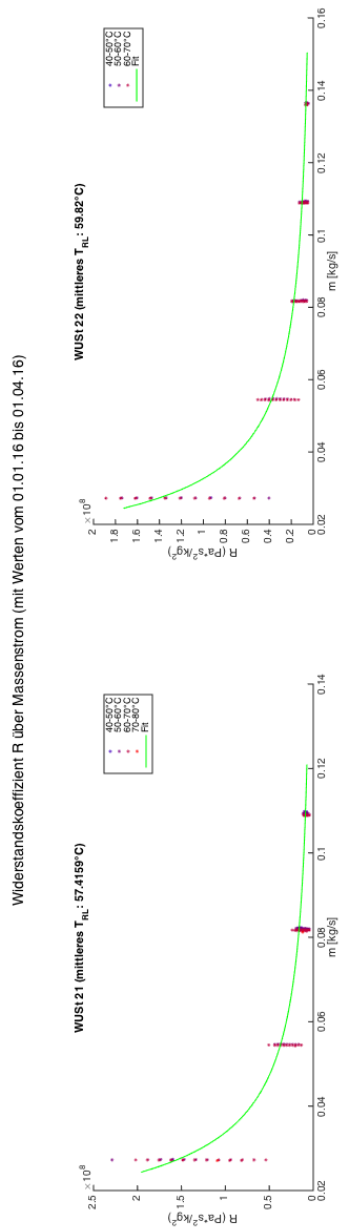


Abbildung E.10.: Fitkurven der Wärmeübergabestationen, Blatt 6

E.3. Herstellerbescheinigung einer Wärmeübergabestation

HERSTELLERBESCHEINIGUNG


FW-Hausstation

Leistung : 57 kW
 Fertigung-Nr. : 106248.11
 Herstellerjahr : 2012
 Auftrags-Nr. : 106248

	Übergabestation		Hauszentrale	
	VL	RL	VL	RL
Zul. Betriebsdruck bar	6	6	6	6
Auslegungstemp. °C	90	50	90	50
Nennweite DN mm	25	25	25	25
Prüfdruck bar	6,0		6,0	

Folgende Prüfungen wurden durchgeführt.


Elektrotechnik:

* überprüft am: 04. DEZ. 2012 durch: 

Werksprüfung:

* überprüft am: 04. DEZ. 2012 durch: 

Druckprüfung:

* überprüft am: 03. DEZ. 2012 durch: 

Dokumentation:

* überprüft am: 04. DEZ. 2012 durch: 

Das Erzeugnis ist nach dem Ergebnis vor genannter Prüfungen in ordnungsgemäßen und voll funktionstüchtigem Zustand.

 den: 04. DEZ. 2012 

WERKSACHVERSTÄNDIGER

Abbildung E.11.: Herstellerbescheinigung für eine Hausstation (Wärmeübergabestation)

E.4. Abschätzung des Radienverhältnisses bei Kugelhähnen im 'Energieverbund'

Die Bestimmung des Radienverhältnisses $\frac{R}{r}$ bei Kugelhähnen im 'Energieverbund' erfolgte anhand einer geometrischen Abschätzung des Kugelradius in der Armatur nach den Daten E.12 und E.13.

Hamburg Energie 26.03.2013

Wärmeversorgung Wilhelmsburg Aufstellung der Werkstoffnachweise - Armaturen						
Lfd. Nr.	Art	Zeugnis Nr.	Hersteller	Werkstoff	Abmessung / DN	Kennzeichnung Nr. Charge Nr.
1.	Kugelhahn	11-01113	Böhmer	P 235 GH TC1	32	0103309
2.	Kugelhahn	11-01113	Böhmer	P 235 GH TC1	40	0103431
3.	Kugelhahn	11-02700	Böhmer	P 235 GH TC1	40	0103431
4.	Kugelhahn	11-02412	Böhmer	RST 35.8/I	50	0100126
5.	Kugelhahn	11-03111	Böhmer	RST 35.8/I	80	0103187
			<i>Behälter / Deckel</i>		<i>B/150/15/40</i>	
					<i>150 X 65</i>	

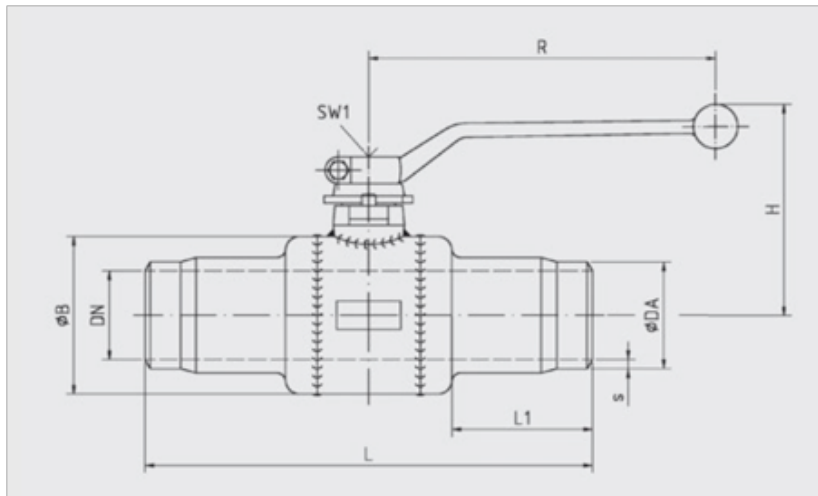
Erhaltungsmaßnahmen

Erhaltungsarbeiten

Siehe Produktkennzeichner Logsystem

Abbildung E.12.: Werkstoffnachweis für Kugelhähne im 'Energieverbund' (Auszug aus der technischen Dokumentation)

Böhmer-Kugelhähne nach http://www.boehmer.de/fileadmin/PDF_Dateien/FW_14-04-2014-op.pdf (Zugriff am 23.8.2015)



DN	PN	DA	s	L	L1	B	H	R	SW1	Masse	Art.-Nr.
mm	bar	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	kg	
10	25	17,2	2,3	270	102	39	66	130	10	0,9	010.6807
15	25	21,3	2,6	270	97	39	68	130	10	1,0	010.3233
20	25	26,9	3,2	270	97	44	70	130	10	1,3	010.2936
25	25	33,7	3,2	270	90	54	82	180	12	1,7	010.2955
32	25	42,4	3,2	270	95	64	110	205	16	2,6	010.3309
40	25	48,3	3,2	270	90	76	115	205	16	3,3	010.3431
50	25	60,2	3,2	250	80	80	125	205	16	4,4	010.3250
80	25	88,9	4,0	280	78	140	160	350	22	11,5	010.3187

DN	DA	s	L	L1	B
32	42,4	3,2	270	95	64
40	48,3	3,2	270	90	76
80	88,9	4	280	78	140

- Annahme 1: Die Wandstärke des Kugelhahns beträgt 2*s (s. Skizze)
- Annahme 2: Dichtigkeit des Kugelhahns steigt mit Radius
- Annahme 3: Hersteller hat maximalen Radius gewählt

L-2L1	d=DA-2s	r=d/2	< R <	(B-4s)/2	Verhältnis R/r
90	36	18	25,6	25,6	1,422 --> für DN<=32 wird R/r=1,42 verwendet
114	41,9	20,95	31,6	31,6	1,508 --> für 32<DN<80 wird R/r=1,51 verwendet
280	80,9	40,45	62	62	1,533 --> für DN>=80 wird R/r=1,53 verwendet

(wird für die Berechnung des Widerstandsbeiwertes zeta nach Wagner(2008): Strömung und Druckverlust, S. 191 benötigt)

Abbildung E.13.: Abschätzung des Verhältnisses R/r für die im 'Energieverbund' eingesetzten Kugelhähne

F. Begriffliche Unterschiede zu LORENZEN

Um Missverständnissen bei der Interpretation vorzubeugen, die entstehen könnten, wenn die vorliegende Arbeit gemeinsam mit der Arbeit [21] gelesen wird, werden an dieser Stelle die Komponenten und die damit verbundenen physikalischen und mathematischen Begriffe so angesprochen, wie sie in der vorliegenden Arbeit zu verstehen sind.

Rohrleitung (Praxis) Darunter wird in dieser Arbeit die in der Praxis verbaute Rohrleitung mit konstantem Innendurchmesser mit ihren ggf. diversen Einzelwiderständen, wie z.B. Bögen, Hähne usw. verstanden. Eine Rohrleitung hat zwei durchströmbare Querschnitte. Eine Rohrleitung ist an mindestens einem Ende mit einer Reduzierung oder einem T-Stück verbunden.

Pendants in physikalisches Modell: Teilstrecke oder nur ein Teilstreckenabschnitt

Pendants im mathematischen Modell: Kante oder nur Bestandteil einer Kante

T-Stück (Praxis) Ein T-Stück verbindet drei Rohrleitungen miteinander. Ein T-Stück hat drei durchströmbare Querschnitte. Die Massenströme durch die drei Querschnitte des T-Stücks sind unterschiedlich groß.

Pendant in physikalisches Modell: Verzweigung und als Einzelwiderstand Bestandteil von drei Teilstrecken (Ausnahme hiervon: Wenn mindestens eine an ein T-Stück angeschlossene Leitung am anderen Ende blindgeflanscht wurde, wirkt dieses T-Stück eventuell nur noch wie eine Reduzierung oder kann im physikalischen Modell sogar komplett ignoriert werden)

Pendant im mathematischen Modell: Knoten und als Einzelwiderstand Bestandteil von drei Kanten (Ausnahme hiervon: Wenn mindestens eine an ein T-Stück angeschlossene Leitung am anderen Ende blindgeflanscht wurde, wirkt dieses T-Stück eventuell nur noch wie eine Reduzierung oder kann im mathematischen Modell sogar komplett ignoriert werden)

Reduzierung (Praxis) Eine Reduzierung verbindet zwei Rohrleitungen mit unterschiedlichen Durchmessern. Eine Reduzierung hat zwei durchströmbare Querschnitte. Die Massenströme durch die zwei Querschnitte der Reduzierung sind gleich groß, die Strömungsgeschwindigkeiten durch die Querschnitte sind jedoch unterschiedlich.

Pendant in physikalischen Modell: als Einzelwiderstand Bestandteil von zwei Teilstreckenabschnitten

Pendant im mathematischen Modell: als Einzelwiderstand Bestandteil einer Kante

Verzweigung / Teilstrecke (physikalisches Modell) Der Massenstrom über eine Teilstrecke (TS) ist konstant. Eine Teilstrecke kann jedoch aus mehreren Rohrleitungen und Einzelwiderständen zusammengesetzt sein, die sich z.B. im Innendurchmesser oder anderen Kenndaten unterscheiden. Eine Teilstrecke beginnt und/oder endet stets an einer Verzweigung.

Pendants in der Praxis: T-Stück (o.a. Kreuzstück) / eine Rohrleitung oder mehrere über Reduzierungen verbundene Rohrleitungen

Pendants im mathematischen Modell: Knoten / Kante

Teilstreckenabschnitt (physikalisches Modell) Ein Teilstreckenabschnitt (TSA) ist eine kleinere Einheit einer Teilstrecke. In einem TSA ist die Strömungsgeschwindigkeit konstant (gleichbleibender Innendurchmesser, Rauigkeit, mittlere Fluidtemperatur, etc.). Die Strömungsgeschwindigkeiten unterschiedlicher TSA in derselben TS können sich jedoch bei identischem Massenstrom unterscheiden! [Anm.: In [21] stellen TSA die Kanten dar und die Übergänge zwischen den TSA sind die Knoten!]

Pendants in der Praxis: eine Rohrleitung mit ihren ggf. diversen Einzelwiderständen

Pendants im mathematischen Modell: Bestandteil einer Kante

Knoten / Kante (mathematisches Modell) Die im Modell von LORENZEN [21] definierten Knoten (siehe w-Knoten) haben eine andere physikalische Bedeutung als die für die Druckberechnung in dieser Arbeit verwendeten Knoten (siehe m-Knoten). Auch die in [21] definierten Kanten (siehe w-Kanten) haben damit eine andere physikalische Bedeutung als die für die Druckberechnung in dieser Arbeit verwendeten Kanten (siehe m-Kanten).

Der Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Definitionen sei mathematisch folgendermaßen beschrieben:

Wird die Menge der Knoten mit K bezeichnet, so gilt:

$$K_w \supseteq K_m \quad (\text{F.1})$$

Wird die Menge der Kanten mit E (engl.: edges) bezeichnet, so gilt:

$$e_m \in E_m \Rightarrow e_m = \sum e_w, e_w \in E_w \quad (\text{F.2})$$

w-Knoten / w-Kante Entlang der w-Kanten zwischen benachbarten w-Knoten bleibt die Strömungsgeschwindigkeit w konstant. Die Verwendung von w-Knoten und w-Kanten

ist sinnvoll bei der Berechnung von Größen, die von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig sind.

Die in der Arbeit von LORENZEN [21] definierten Knoten und Kanten sind w-Knoten und w-Kanten. In der vorliegenden Arbeit werden die w-Knoten für die Berechnung der Widerstandskoeffizienten der Teilstreckenabschnitte verwendet.

Pendants in der Praxis: z.B. Reduzierung, T-Stück / eine einzelne Rohrleitung

Pendants in physikalischen Modell: z.B. Querschnittsänderung, Verzweigung / Teilstreckenabschnitt

m-Knoten / m-Kante Entlang der m-Kanten zwischen benachbarten m-Knoten bleibt der Massenstrom m konstant. Die Definition von m-Knoten und m-Kanten ist sinnvoll bei der Berechnung von Größen, die vom Massenstrom abhängig sind. In der vorliegenden Arbeit werden die m-Knoten zur Berechnung der Druckdifferenzen entlang der Teilstrecken verwendet.

Pendants in der Praxis: T-Stück / eine einzelne Rohrleitung oder mehrere über Reduzierungen verbundene Rohrleitungen

Pendants in physikalischen Modell: Verzweigung / Teilstrecke

Masche Als Masche wird in der vorliegenden Arbeit ein bei einem Anfangsknoten beginnender, geschlossener Weg entlang mehrerer Kanten zurück dem Anfangsknoten bezeichnet, der von keinen anderen Kanten geschnitten wird.

Beispiel: In Abbildung 2.2 beschreibt der von Knoten K3 ausgehende Weg entlang der Kanten 3-4-2 eine Masche. Der ebenfalls von Knoten K3 ausgehende Weg entlang der Kanten 3-6-7-5-2 ist jedoch keine Masche, da er von der Kante 4 geschnitten wird.

Außer es wird verbal explizit unterschieden, so ist die Wörter *Knoten* und *Kanten* in dieser Arbeit im Sinne der Definition von *m-Knoten* und *m-Kanten* zu verstehen.

G. Struktur der Dateiablage

Die Struktur der Dateiablage orientiert sich an der Struktur der Abbildungen 3.1 und 3.2.

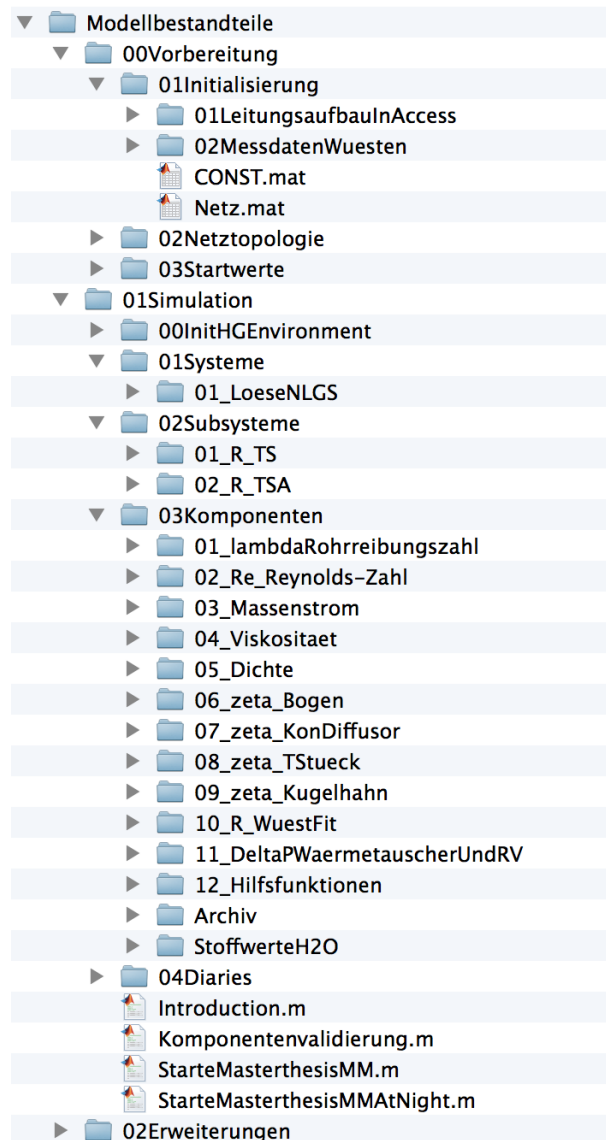


Abbildung G.1.: Struktur der Dateiablage



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Müller _____

Vorname: Mario René _____

dass ich die vorliegende Masterarbeit _____ bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:
Simulationsmodell für vermaschte Rohrnetze

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Karlsruhe

_____ Ort

_____ Datum

_____ Unterschrift im Original