



S. Gregor, H.-M. Prasser, M. Beyer

Thermohydraulische Modellierung der Kondensation von Dampf in einer unterkühlten Flüssigkeitsströmung



Wissenschaftlich-Technische Berichte
FZR-440
Juli 2006

S. Gregor, H.-M. Prasser, M. Beyer

**Thermohydraulische Modellierung
der Kondensation von Dampf in einer
unterkühlten Flüssigkeitsströmung**

Bibliothek FZ Rossendorf



01295030



**Forschungszentrum
Rossendorf**



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**



**Forschungszentrum
Rossendorf**

Thermohydraulische Modellierung der Kondensation von Dampf in einer unterkühlten Flüssigkeitsströmung

S. Gregor, H.-M. Prasser, M. Beyer

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	9
Nomenklatur	10
1 Einleitung	14
2 Experimentelle Untersuchung einer Wasser/Dampf-Strömung.....	16
2.1 Die Versuchsanlage TOPFLOW	16
2.2 Teststreckenkreislauf mit variabler Gaseinspeisung	18
2.3 Messtechnik zur Untersuchung der Wasser/Dampf-Strömung	19
2.4 Wasser/Dampf-Experimente.....	21
2.4.1 Versuchsserien D12 und D13	21
2.4.2 Versuchsserie K12	22
3 Modell zur Beschreibung der Kondensation von Dampf in einer Wasserströmung.....	23
3.1 Modellierung des Teststreckenkreislaufs	23
3.1.1 Geometrische Randbedingungen.....	23
3.1.2 Numerisches Lösungsverfahren.....	26
3.2 Charakteristische Strömungsparameter	27
3.2.1 Dampfgehalt	27
3.2.1.1 Berechnungsmodelle	28
3.2.1.2 Vergleich der Modelle mit experimentellen Daten	30
3.2.2 Zwischenphasen-Grenzflächendichte	32
3.2.2.1 Berechnung von mittleren Primärblasendurchmessern	33
3.2.2.2 Bestimmung der Grenzflächendichte bei konstanter Blasenflussdichte.....	34
3.2.2.3 Experimentell ermittelte Blasendurchmesser und Grenzflächendichten.....	36
3.3 Wärme- und Stofftransport	37
3.3.1 Bilanzgleichungen der Energie- und Stoffströme	37
3.3.1.1 Thermodynamisches Gleichgewicht	38
3.3.1.2 Thermodynamisches Nichtgleichgewicht	39
3.3.1.3 Wärmeverlust über die Rohrwand.....	40

3.3.2	<i>Konvektiver Wärmeübergang an der Blasenoberfläche</i>	41
3.4	Druckverlauf entlang der Rohrleitung	45
3.4.1	<i>Einphasiger Druckverlust</i>	45
3.4.1.1	Hydrostatischer Druckverlust.....	46
3.4.1.2	Reibungsdruckverlust in geraden Rohrleitungen mit konstantem Durchmesser.....	46
3.4.1.3	Druckverlust in Einbauten.....	48
3.4.2	<i>Zweiphasiger Druckverlust</i>	50
3.4.2.1	Hydrostatischer Druckverlust.....	51
3.4.2.2	Reibungsdruckverlust nach LOCKHART/MARTINELLI	51
3.4.2.3	Beschleunigungsdruckverlust.....	52
3.4.2.4	Druckverlust in Einbauten.....	53
3.4.2.5	Quantitativer Vergleich der Zweiphasen-Druckverluste.....	53
3.4.3	<i>Druckiteration</i>	54
3.5	Programmablauf.....	55
4	Kondensation bei Versuchen mit Drosselung	57
4.1	Thermisches Gleichgewicht an jedem Punkt der Rohrleitung	57
4.2	Berücksichtigung des Wärmeübergangs zwischen Wasser und Dampf sowie Modellierung der Phasengrenzfläche	58
4.2.1	<i>Verlauf wichtiger Strömungsparameter</i>	58
4.2.2	<i>Einfluss des Druckes auf die Vergleichbarkeit der Einspeiseebenen</i>	59
4.2.3	<i>Auswahl eines geeigneten Wärmeübergangsmodells</i>	61
4.2.4	<i>Vergleich des Dampfgehalts</i>	63
4.2.5	<i>Vergleich der Zwischenphasen-Grenzflächendichte</i>	66
4.3	Berechnung der Zwischenphasen-Grenzflächendichte unter Nutzung von experimentellen Daten für den SAUTER-Durchmesser	68
4.3.1	<i>Auswahl eines geeigneten Wärmeübergangsmodells</i>	70
4.3.2	<i>Vergleich des Dampfgehalts</i>	72
4.3.3	<i>Vergleich der Zwischenphasen-Grenzflächendichte</i>	74
5	Kondensation bei Versuchen ohne Drosselung	77
5.1	Überprüfung der Modelle zur Berechnung von Dampfgehalt und Wärmeübergang.....	78
5.1.1	<i>Drift-Flux-Modelle</i>	78
5.1.2	<i>Modelle zur Berechnung der Nusselt-Zahl</i>	83
5.2	Ergebnisse der Experimente mit Randeinspeisung des Dampfes D12 / D13	85

5.2.1	<i>Anteil der Kondensation im Vergleich zu Versuchen der Serie K12</i>	85
5.2.2	<i>Druckabhängigkeit der Kondensationsintensität</i>	87
5.2.3	<i>Einfluss der Primärblasengröße</i>	90
5.3	Ergebnisse der Experimente mit zentraler Gaseinspeisung (Igel).....	93
5.3.1	<i>Vergleich der Messergebnisse für die zentrale- und die Randeinspeisung</i>	93
5.3.2	<i>Druckeinfluss auf die Kondensation</i>	94
5.3.3	<i>Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit der flüssigen Phase</i>	95
6	Fehlerbetrachtung	98
6.1	Fehler der experimentellen Randbedingungen	98
6.2	Fehler bei der Ermittlung der Strömungsparameter mit dem Gittersensor	99
6.2.1	<i>Dampfgehalt</i>	99
6.2.2	<i>SAUTER-Durchmesser</i>	100
6.2.3	<i>Zwischenphasen-Grenzflächendichte</i>	101
6.3	Genauigkeit der numerischen Integration.....	101
6.4	Fehlerausbreitung im Modell.....	102
6.4.1	<i>Fehlerfortpflanzung bei Modellbeziehungen zur Berechnung der Zwischenphasen-Grenzflächendichte</i>	103
6.4.2	<i>Fehlerfortpflanzung bei Verwendung experimenteller SAUTER- Durchmesser</i>	105
6.5	Einschätzung des Gesamtfehlers	106
7	Zusammenfassung	107
8	Literaturverzeichnis	110
9	Anhang	113
9.1	Isometrien des simulierten Teilstücks der Teststrecke	113
9.2	Betriebs- und Strömungsparameter der Experimente ohne Drosselung: D12 und D13.....	117
9.3	Betriebs- und Strömungsparameter der Experimente mit Drosselung: K12	128
9.4	Getestete Dampfgehaltsmodelle	131
9.5	Schematischer Ablaufplan des Programms „Simulation_Teststrecke.exe“ .	136

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Schema der Versuchsanlage, dabei hervorgehoben die für den Wasser/Dampf-Betrieb relevanten Kreisläufe	16
Abb. 2.2:	Schematische Darstellung der variablen Gaseinspeisung.....	18
Abb. 2.3:	Schnittbild eines Einspeisemoduls.....	19
Abb. 2.4:	Hochtemperatur-Gittersensor im eingebauten Zustand mit Drahtgitter.....	20
Abb. 3.1:	Teststreckenkreislauf mit simuliertem Teilstück (B).....	24
Abb. 3.2:	Vergleich der getesteten Modelle in Bezug auf ihre mittleren absoluten Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Dampfgehalten	31
Abb. 3.3:	Vergleich des gewählten Drift-Flux-Modells mit experimentellen Daten.....	32
Abb. 3.4:	Bilanzraum einer Wasser/Dampf-Strömung in einem Rohr	37
Abb. 3.5:	Skizzierter Längsschnitt durch das betrachtete Rohr	40
Abb. 3.6:	Vergleich von ausgewählten Modellen zur Berechnung der Nusselt-Zahl.....	44
Abb. 3.7:	Rohrbogen	48
Abb. 3.8:	Diffusor	49
Abb. 3.9:	T-Stück	49
Abb. 4.1:	Versuch $p10dp100$, Einspeisehöhe N, Dampfgehalts- und Druckverlauf entlang der Rohrleitung, Berechnung des Dampfgehalts nach GE-RAMP	57
Abb. 4.2:	Versuch $p20dp80$, Einspeisehöhe N, berechnete Verläufe von Dampf-Volumenstromdichte J_D , Temperaturdifferenz Δt und Druck p	59
Abb. 4.3:	Versuch $p20dp80$, Vergleich der modellierten Dampfgehaltsverläufe (Wärmeübergang nach AKIYAMA) mit experimentellen Daten.....	60
Abb. 4.4:	Versuch $p20dp160$, Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Dampfgehalten, Wärmeübergang nach verschiedenen Modellen, 1 mm Öffnungen	61
Abb. 4.5:	Versuch $p20dp160$, Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Dampfgehalten, Wärmeübergang nach verschiedenen Modellen, 4 mm Öffnungen	62
Abb. 4.6:	Vergleich der gesamten mittleren absoluten Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Dampfgehalten bei unterschiedlichen Modellen für den Wärmeübergang.....	63
Abb. 4.7:	Versuch $p10dp70$, Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Dampfgehalten, Wärmeübergang nach HUGHMARK	64
Abb. 4.8:	Versuch $p10dp100$, Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Dampfgehalten, Wärmeübergang nach HUGHMARK	64
Abb. 4.9:	Versuch $p20dp80$, Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Dampfgehalten, Wärmeübergang nach HUGHMARK	65
Abb. 4.10:	Versuch $p20dp160$, Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Dampfgehalten, Wärmeübergang nach HUGHMARK	66

Abb. 4.11: Versuch <i>p10dp70</i> , Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Zwischenphasen-Grenzflächendichten, Wärmeübergang nach HUGHMARK	66
Abb. 4.12: Versuch <i>p10dp100</i> , Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Zwischenphasen-Grenzflächendichten, Wärmeübergang nach HUGHMARK	67
Abb. 4.13: Versuch <i>p20dp80</i> , Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Zwischenphasen-Grenzflächendichten, Wärmeübergang nach HUGHMARK	67
Abb. 4.14: Versuch <i>p20dp160</i> , Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Zwischenphasen-Grenzflächendichten, Wärmeübergang nach HUGHMARK	68
Abb. 4.15: Versuch <i>p20dp80</i> , Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Dampfgehalten, Wärmeübergang nach verschiedenen Modellen, 1 mm Öffnungen	70
Abb. 4.16: Versuch <i>p20dp80</i> , Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Dampfgehalten, Wärmeübergang nach verschiedenen Modellen, 4 mm Öffnungen	70
Abb. 4.17: Vergleich der gesamten absoluten mittleren Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Dampfgehalten bei unterschiedlichen Modellen für den Wärmeübergang	71
Abb. 4.18: Versuch <i>p10dp70</i> , Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Dampfgehalten, Wärmeübergang nach HUGHMARK (e-Modell) bzw. CHEN (e-LGS).....	72
Abb. 4.19: Versuch <i>p10dp100</i> , Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Dampfgehalten, Wärmeübergang nach HUGHMARK (e-Modell) bzw. CHEN (e-LGS).....	72
Abb. 4.20: Versuch <i>p20dp80</i> , Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Dampfgehalten, Wärmeübergang nach HUGHMARK (e-Modell) bzw. CHEN (e-LGS).....	73
Abb. 4.21: Versuch <i>p20dp160</i> , Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Dampfgehalten, Wärmeübergang nach HUGHMARK (e-Modell) bzw. CHEN (e-LGS).....	73
Abb. 4.22: Versuch <i>p10dp70</i> , Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Zwischenphasen-Grenzflächendichten, Wärmeübergang nach HUGHMARK (Modell) bzw. CHEN (LGS)	74
Abb. 4.23: Versuch <i>p10dp100</i> , Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Zwischenphasen-Grenzflächendichten, Wärmeübergang nach HUGHMARK (Modell) bzw. CHEN (LGS)	74
Abb. 4.24: Versuch <i>p20dp80</i> , Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Zwischenphasen-Grenzflächendichten, Wärmeübergang nach HUGHMARK (Modell) bzw. CHEN (LGS)	75
Abb. 4.25: Versuch <i>p20dp160</i> , Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Zwischenphasen-Grenzflächendichten, Wärmeübergang nach HUGHMARK (Modell) bzw. CHEN (LGS)	75
Abb. 5.1: Verteilerkopf mit 152 Bohrungen zu 0,8 mm Lochdurchmesser (Igel).....	78
Abb. 5.2: Versuch <i>p65-118</i> , Berechnete Dampf-Volumenstromdichten am Ort des Gittersensors in Abhängigkeit von der Einspeisehöhe bei 4 mm Bohrungsdurchmesser für unterschiedliche Drift-Flux-Modelle.....	79
Abb. 5.3: Vergleich der zwölf Drift-Flux-Modelle mit experimentellen Daten aller gemessenen Versuchspunkte bei einer Druckstufe von 65 bar für die Einspeisehöhe Q.....	80

Abb. 5.4:	Vergleich aller 12 Drift-Flux-Modelle in Bezug auf ihre mittleren absoluten bzw. relativen Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Dampfgehalten bei Drücken von 40 bzw. 65 bar	82
Abb. 5.5:	Entwicklung der Dampf-Volumenstromdichte bei Einspeisung über 4 mm Bohrungen mit Angabe der jeweiligen Position des Gittersensors, <i>p65-151</i>	83
Abb. 5.6:	Vergleich der 9 Wärmeübergangsmodelle, Versuchspunkt <i>140</i> bei einem Druck von 10 bar, Einspeisung durch 4 mm Bohrungen.....	84
Abb. 5.7:	Vergleich der experimentellen Dampfgehalte bei unterschiedlichen Eindrosselungen der Strömung, Versuchspunkt <i>140</i> bei 10 (links) und 20 bar (rechts), Einspeisung über 4 mm Bohrungen.....	85
Abb. 5.8:	Vergleich der Dampf-Volumenstromdichten bei unterschiedlichen Eindrosselungen der Strömung, Versuch <i>p10-140</i> , Einspeisung über 4 mm Bohrungen	86
Abb. 5.9:	Vergleich der Dampf-Volumenstromdichten bei unterschiedlichen Eindrosselungen der Strömung, Versuch <i>p20-140</i> , Einspeisung über 4 mm Bohrungen	86
Abb. 5.10:	Vergleich der Kondensationsraten bei unterschiedlichen Eindrosselungen der Strömung, Versuch <i>140</i> bei 10 (links) und 20 bar (rechts), Einspeisung über 4 mm Bohrungen.....	87
Abb. 5.11:	Entwicklung der Temperaturdifferenz zwischen beiden Phasen vom Einspeisepunkt bis zum Gittersensor (a) und der Kondensationsrate des Dampfes (b) für die 4 mm Öffnungen, Versuchspunkt <i>151</i> bei allen vier Druckstufen.....	88
Abb. 5.12:	Entwicklung des Kondensationsmassenstroms (a) sowie der Zwischenphasen-Grenzflächendichte (b) bei Einspeisung über 4 mm Bohrungen, Versuchspunkt <i>151</i> für alle vier Druckstufen	88
Abb. 5.13:	Vergleich von berechneten Dampfgehalten mit Messwerten bei den 4 mm Einspeisungen für den Versuchspunkt <i>140</i> , Druckstufen: 10, 20 und 40 bar	89
Abb. 5.14:	Entwicklung der Phasengrenzfläche bei Einspeisung über 1 bzw. 4 mm Bohrungen für die Versuchspunkte <i>096</i> und <i>140</i> der Druckstufe <i>p10</i>	90
Abb. 5.15:	Vergleich der modellierten Entwicklung von ε bei Einspeisung des Dampfes durch 1 bzw. 4 mm Öffnungen für die Versuchspunkte <i>096</i> und <i>140</i> der Druckstufe <i>p10</i> mit den entsprechenden Messwerten	91
Abb. 5.16:	Entwicklung der Phasengrenzfläche für diverse Versuchspunkte der Druckstufe <i>p40</i> , Dampfeinspeisung durch 1 bzw. 4 mm Öffnungen	91
Abb. 5.17:	Vergleich der modellierten Entwicklung von ε bei Einspeisung des Dampfes durch 1 bzw. 4 mm Öffnungen für diverse Versuchspunkte der Druckstufe <i>p40</i> mit den entsprechenden Messwerten	92
Abb. 5.18:	Einfluss des Druckes auf die am Gittersensor berechneten Dampf-Volumenstromdichten in Abhängigkeit von den eingespeisten Dampf-Volumenstromdichten.....	94
Abb. 5.19:	Eingespeiste und am Gittersensor bestimmte Dampf-Volumenstromdichten für diverse Versuchspunkte mit zentraler Dampfeinspeisung in Abhängigkeit von der jeweiligen Wasser-Volumenstromdichte bei einem Druck von 65 bar	95

Abb. 5.20: Abhängigkeit des volumetrischen Dampfgehalts an der Einspeiseposition und am Gittersensor von der Wasser-Volumenstromdichte für diverse Versuchspunkte mit zentraler Dampfeinspeisung; Druckstufe 65 bar.....	96
Abb. 6.1: Einfluss verschiedener Fehlerquellen auf den Vergleich der Modellvorhersagen mit experimentell ermittelten Daten.....	98
Abb. 6.2: Berechneter Dampfgehalt der Höhe B bei unterschiedlichen vertikalen Schrittweiten.....	102
Abb. 6.3: Maximale Abweichungen des Dampfgehalts bei Variation der experimentellen Randbedingungen für Druck und Massenstrom	103
Abb. 6.4: Maximale Abweichungen des Dampfgehalts bei Variation des Wärmeübergangsmodells nach HUGHMARK	104
Abb. 6.5: Gesamtfehler des Kondensationsmodells durch kombinierte Variation der Modellbeziehungen und experimentellen Randbedingungen.....	104
Abb. 6.6: Maximale Abweichungen des berechneten Dampfgehalts bei Variation der Werte für den experimentellen SAUTER-Durchmesser innerhalb der Toleranzgrenzen.....	105
Abb. 6.7: Gesamtfehler des Kondensationsmodells durch kombinierte Variation der experimentellen Randbedingungen und des SAUTER-Durchmessers	105

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Matrix der untersuchten Punkte innerhalb der Versuchsserien D12 und D13 mit den entsprechenden Randbedingungen für Wasser- und Dampf-Volumenstromdichten.....	22
Tab. 2.2:	Übersicht der Experimente von K12 mit ihren Randbedingungen	22
Tab. 3.1:	Geometrie der Rohrleitung von der Wassereinspeisung bis zur Dampftrommel	25
Tab. 3.2:	Mittlere absolute Fehler der untersuchten Drift-Flux-Modelle.....	31
Tab. 3.3:	Übersicht über Modelle zur Bestimmung der Nusselt-Zahl für den Wärmeübergang an kugelförmigen Körpern.....	43
Tab. 4.1:	Versuch <i>p20dp80</i> , mit dem Modell berechnete Werte für den Druck und die Unterkühlung des Wassers in Höhe der jeweiligen Dampfeinspeisung	60
Tab. 4.2:	Mittlere absolute Abweichungen der Wärmeübergangsmodelle sowohl als gesamter Wert als auch aufgeschlüsselt nach Düsendurchmessern und Kondensationsexperimenten	63
Tab. 4.3:	Vergleich der Unterkühlung an der Einspeisung für alle vier Experimente bei den beiden höchsten Einspeiseebenen für 1 mm- bzw. 4 mm Düsen.....	65
Tab. 4.4:	Mittlere absolute Abweichungen der Wärmeübergangsmodelle sowohl als gesamter Wert als auch aufgeschlüsselt nach Düsendurchmessern und Kondensationsexperimenten	71
Tab. 5.1:	Matrix aller innerhalb der Serien D12 und D13 durchgeführten VGE-Experimente	77
Tab. 5.2:	Matrix der Experimente mit zentraler Gaseinspeisung (Igel).....	78
Tab. 5.3:	Vergleich der experimentell bestimmten Dampfgehalte am Gittersensor [%] für Versuchsdaten mit zentraler- bzw. Randeinspeisung für alle 4 Druckstufen	93
Tab. 6.1:	Toleranzen der Druckmessung an der Dampftrommel und damit verbundene Abweichungen bei der Bestimmung der Siedetemperatur	99

Nomenklatur

Lateinische Formelzeichen

Symbol	Bezeichnung	Einheit
a	Fläche bezogen auf ein Volumen, Flächendichte	[1/m]
A	Fläche	[m ²]
C ₀	Profilparameter	[-]
c _p	Wärmekapazität bei konstantem Druck	[kJ/kg K]
d	Durchmesser	[m]
D	Durchmesser der Rohrleitung	[m]
F	Fehler	[-]
Fr	Froude-Zahl	[-]
g = 9,81	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
h	Enthalpie	[kJ/kg]
J	globale Volumenstromdichte bzw. Leerrohrgeschwindigkeit	[m/s]
j	lokale Volumenstromdichte	[m/s]
Ja	Jacob-Zahl	[-]
k	Rauigkeit	[mm]
L	Länge	[m]
m	Masse	[kg]
\dot{m}	Massenstrom	[kg/s]
\hat{m}	Massenstromdichte	[kg/s m ²]
N	Anzahl	[-]
n	Anzahl bezogen auf ein Volumen, Anzahldichte	[1/m ³]
\dot{n}	Anzahl pro Volumen und Zeit	[1/m ³ s]
Nu	Nusselt-Zahl	[-]
p	Druck	[MPa]
Pe	Péclet-Zahl	[-]
Pr	Prandtl-Zahl	[-]
\dot{Q}	Wärmestrom	[W]
r	Verdampfungsenthalpie	[kJ/kg]
R	Radius	[m]
Re	Reynolds-Zahl	[-]
R _k	Wärmedurchgangswiderstand	[K/W]
t	Temperatur	[°C]
U	Spannung	[V]
u	Geschwindigkeit	[m/s]

V	Volumen	[m ³]
\dot{V}	Volumenstrom	[m ³ /s]
We	Weber-Zahl	[-]
x	Massendampfgehalt	[-]
X _{LM}	LOCKHART / MARTINELLI -Parameter	[-]
\dot{x}	Massen-Strömungsdampfgehalt	[-]

Griechische Formelzeichen

Symbol	Bezeichnung	Einheit
α	Wärmeübergangskoeffizient	[W/m ² K]
γ	Winkel über der Horizontalen	[°]
δ	Winkel	[°]
ε	volumetrischer Gas- bzw. Dampfgehalt	[-]
$\dot{\varepsilon}$	volumetrischer Strömungsdampfgehalt	[-]
Φ	Zweiphasenmultiplikator nach LOCKHART/MARTINELLI	[-]
η_u	unterer Wirkungsgrad	[-]
λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/m K]
λ	Rohrreibungsbeiwert	[-]
μ	kinematische Zähigkeit	[Pa s]
ν	dynamische Zähigkeit	[m ² /s]
ρ	Dichte	[kg/m ³]
σ	Oberflächenspannung	[N m]
ζ	Widerstandsbeiwert	[-]

Indizes

' bzw. "	Werte bei x = 0 und x = 1 auf der Sättigungskurve
0	Anfangswert, Einspeisung
1	Eintritt
2	Austritt
A	Teilstück (A) des Teststreckenkreislaufs, oberflächengleich, Abzweig, Armatur
a	Umgebungszustand
abs	absolut
äqu	äquivalent
B	Teilstück (B) des Teststreckenkreislaufs, Blase, Bogen, Beschleunigung
c	Kondensation

D	Dampf, Durchgang
Dif	Diffusor
Dj	Drift der Gasphase
DT	Dampftrommel
E	Einbauten
EP	einphasig
F	Fluid
G	Gemisch
g	Grenzwert
ges	gesamt
GS	Gittersensor
H	hydrostatisch, horizontal
h	hydraulisch
hom	homogen
i	interfacial bzw. zwischen den Phasen, i-ter Wert, innen
I	Impuls
Iso	Isolierung
krit	kritischer Wert
lam	laminar
max	maximaler Wert
mess	Messwert
min	minimaler Wert
mod	Modell
N	Numerik
Nu	Nusselt-Zahl
OG	Obergrenze
P	Pumpe, Phasengrenze
R	Rohrwand, Reibung
Rb	Randbedingung
rel	relativ, Blasenanstieg
S	Sättigung, SAUTER-Durchmesser
turb	turbulent
UG	Untergrenze
V	Verlust, volumengleich, vertikal
W	Wasser
ZP	zweiphasig

Mathematische Symbole

*	dimensionsloser Wert
Δ	Differenz
$\langle \rangle$	über dem Strömungsquerschnitt gemittelter Wert
\bar{P}	mit dem Dampfgehalt gewichteter Parameter, arithmetischer Mittelwert

Abkürzungen

442AVA	Armaturenbezeichnung
444AHA	Armaturenbezeichnung
D12 / D13	Dampf/Wasser-Experimente ohne erzwungene Kondensation
DN150	Nennweite 150 mm
DN150 / 200	Erweiterung der Nennweite von 150 mm auf 200 mm
DN200	Nennweite 200 mm
DN200 / 200	Rohrelement mit konstanter Nennweite von 200 mm
DN200 / 250	Erweiterung der Nennweite von 200 mm auf 250 mm
DN250	Nennweite 250 mm
DN250 / 250	Rohrelement mit konstanter Nennweite von 250 mm
DN50	Nennweite 50 mm
FZR	Forschungszentrum Rossendorf e.V.
K12	Dampf/Wasser-Experimente mit erzwungener Kondensation
P	Parameter
VE	Volumenelement
VGE	Variable Gaseinspeisung
VP	Versuchspunkt

1 Einleitung

Ziel des vorliegenden Berichtes ist die Beschreibung der Kondensation von Dampf in einer unterkühlten Wasserströmung. Die Intensität dieses Vorgangs hängt dabei von den örtlich stattfindenden Prozessen des Phasenübergangs innerhalb der Strömung ab. Die Temperaturdifferenz zwischen Dampf und Wasser, die Höhe des Wärmeübergangskoeffizienten und die Größe der Phasengrenzfläche beeinflussen maßgeblich die Geschwindigkeit der Kondensation. Bei der Beschreibung dieses Vorgangs ist daher sowohl eine genaue Modellierung der Verläufe von thermodynamischen Parametern als auch die Berechnung der örtlich stattfindenden Prozesse innerhalb der Zweiphasenströmung notwendig.

Derzeit existieren eine Reihe von CFD-Codes (**C**omputational **F**luid **D**ynamics), die eine dreidimensionale Abbildung der Zweiphasenströmung erlauben. Vorteil dieser Verfahren ist die Möglichkeit, die Strömung zeitlich und räumlich hoch aufzulösen und dabei die Entwicklung lokaler Strömungsparameter wie Dampfgehalt und Phasengrenzfläche genau zu erfassen. Die Verläufe von thermodynamischen Parametern wie Druck, Temperatur und damit auch Enthalpien werden jedoch mit einer Genauigkeit berechnet, die zwar für die Anwendung auf Zweikomponentenströmungen ohne Phasenübergang (z.B. Luft/Wasser-Gemisch) vollkommen ausreichend ist, aber bei Einkomponentenströmungen mit Phasenübergang nur unzureichend bleibt.

Aus diesem Grund wurden Modelle für die Berechnung der Phasengrenzfläche und des Wärmeübergangskoeffizienten im Rahmen einer Diplomarbeit [GRE-05] hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit überprüft. Auf dieser Diplomarbeit basiert der vorliegende Bericht, erweitert um die Analyse von zusätzlichen Versuchsserien. Die experimentelle Basis lieferten Wasser/Dampf-Versuche, die an der Mehrzweck-Thermohydraulikversuchsanlage TOPFLOW (**T**ransient **T**wo **P**hase **F**low Test Facility) am Institut für Sicherheitsforschung (IfS) des Forschungszentrums Rossendorf durchgeführt wurden. Die Einspeisung von gesättigtem Dampf in unterkühltes Wasser erfolgte in verschiedenen Abständen zum Messort, wodurch der Kondensationsvorgang innerhalb der Rohrleitung entlang der Strömungsrichtung beobachtet werden konnte.

Veränderungen thermodynamischer und strömungstechnischer Parameter finden dabei hauptsächlich in axialer Richtung statt, weshalb die Modelle zur Berechnung von lokalen Dampfgehalten, Zwischenphasen-Grenzflächendichten und Wärmeübergangskoeffizienten in einen eindimensionalen Code eingebettet wurden. Durch den Vergleich mit experimentellen Daten

kann eine Auswahl geeigneter Modelle erfolgen. Die Grenzen des entwickelten 1D-Codes liegen dabei in der Berechnung von Strömungsparametern, die über dem Rohrquerschnitt konstant sind. Somit bleiben radiale Verteilungen unberücksichtigt.

2 Experimentelle Untersuchung einer Wasser/Dampf-Strömung

2.1 Die Versuchsanlage TOPFLOW

Die Thermohydraulikversuchsanlage TOPFLOW wurde vom Institut für Sicherheitsforschung des Forschungszentrums Rossendorf e.V. in den Jahren 2000 bis 2002 errichtet. Sie dient der experimentellen Erforschung stationärer und transients Zweiphasenströmungen sowie der Validierung und Optimierung von CFD-Codes. Es können sowohl Wasser/Dampf-Strömungen (als Einkomponentensystem) als auch Wasser/Luft-Strömungen (als Zweikomponentensystem) untersucht werden. Derzeit sind im Dampfbetrieb Maximaldrücke bis zu 7 MPa, Temperaturen bis 286 °C und Dampfmassenströme bis 1,5 kg/s einstellbar, im Luftbetrieb kann maximal ein Normvolumenstrom von 900 Nm³/h realisiert werden. Im Teststreckenkreislauf können bis zu 50 kg/s Wasser zirkulieren. Ausgerüstet ist die Anlage mit moderner Messtechnik, die eine Erfassung der Prozessgrößen mit einem relativen Fehler $\leq 1\%$ vom Messwert erlaubt [BCS-04].

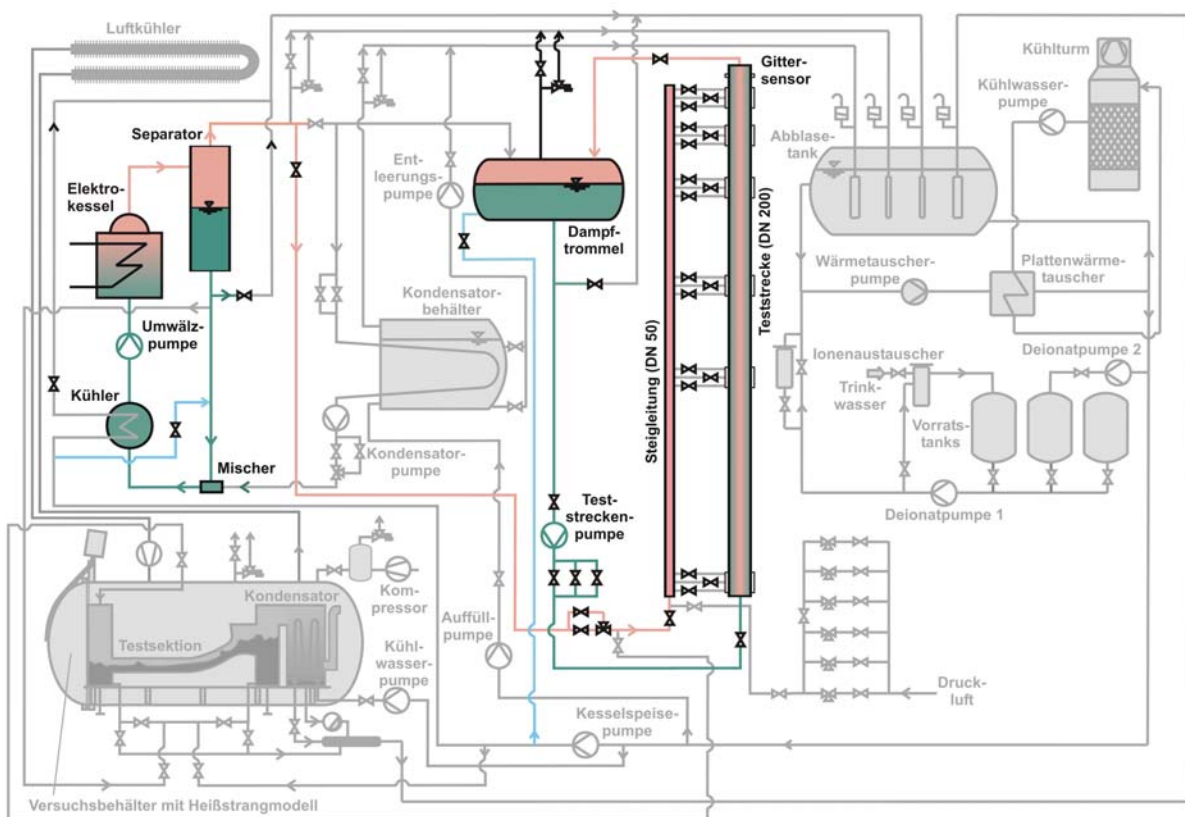


Abb. 2.1: Schema der Versuchsanlage, dabei hervorgehoben die für den Wasser/Dampf-Betrieb relevanten Kreisläufe

Abb. 2.1 zeigt schematisch den Aufbau der Anlage, die sich funktionell in Versorgungs- und Testkreisläufe gliedern lässt.

Die Versorgungskreisläufe sind:

- Der **Kesselkreislauf** (bestehend aus Elektrokessel, Separator, Wärmetauscher und Umwälzpumpe) ist die Wärmequelle der Anlage. Er erzeugt die für Wasser/Dampf-Experimente notwendigen Sattdampf-Massenströme.
- Im Gegensatz dazu dient das **Abblasesystem** (bestehend aus vier Abblaseleitungen, dem Abblasetank, drei Kühlwasserpumpen, einem Wärmetauscher und den Trockenkühltürmen) als Wärmesenke, die die von den Testsektionen abgeführte Energie an die Umgebung abgibt. Zusätzlich kann es die Massenströme aus der Anlage aufnehmen und Speisewasser bereitstellen.
- Ein weiteres Hilfssystem ist das **Deionatsystem** (bestehend aus drei Vorratsbehältern á 5 m³, sechs Mischbettfilterpatronen und zwei Deionatpumpen), welches die Kreisläufe der Versuchsanlage mit vollentsalztem Wasser versorgt.

Folgende an TOPFLOW installierte Kreisläufe dienen der Untersuchung von Zweiphasenströmungen:

- Im **Teststreckenkreislauf** (bestehend aus Testsektion, Teststreckenpumpe und Dampftrommel), können insgesamt drei verschiedene Testsektionen eingebaut werden, an denen unterschiedliche Experimente mit Zweiphasenströmungen in vertikalen Rohrleitungen möglich sind.
- Zusätzlich sind im **Kondensatorkreislauf** (bestehend aus Kondensatorbehälter und -pumpe) Versuche zu Kondensationseffekten in leicht gegenüber der Horizontalen geneigten Rohren (primärseitig) sowie die Untersuchung von Temperaturschichtungen bzw. freier Konvektion in großen Pools (sekundärseitig) möglich.
- Des Weiteren verfügt die Anlage über einen großen **Druckbehälter**, in dem Versuchsanordnungen mit dünnwandigen, teilweise transparenten Komponenten untersucht werden können. Zurzeit wird in diesem Autoklaven ein Modell des heißen Strangs eines Druckwasserreaktors aufgebaut, an dem insbesondere die freie Oberfläche zwischen Gas- und Flüssigphase bei Gleich- bzw. Gegenstrom der Medien analysiert werden soll.

2.2 Teststreckenkreislauf mit variabler Gaseinspeisung

Die im Rahmen dieses Berichtes benötigten Experimente wurden im Teststreckenkreislauf mit der Testsektion „Variable Gaseinspeisung“ (VGE) durchgeführt. Das besondere dieses Versuchsaufbaus steckt schon in der Bezeichnung: Im Gegensatz zu den meisten Versuchsanordnungen, die der Untersuchung von Zweiphasenströmungen dienen, ist hier die Messtechnik (Gittersensor) zur Erfassung der Strömungsparameter fest an einem Ort installiert und die Einspeisung der gasförmigen Phase kann variiert werden, um verschiedene Einlauf-längen zum Gittersensor zu realisieren.

Diese Anordnung erspart den zeitaufwendigen Umbau des Gittersensors und ermöglicht somit Hochdruckversuche an einer Wasser/Dampf-Strömung, die mit vertretbarem Aufwand durchgeführt werden können.

Da die Experimente in einer vertikalen Rohrleitung stattfinden, kann der Einfluss des hydrostatischen Druckes auf die Messergebnisse nicht vernachlässigt werden. In der Modellierung der Teststrecke wird daher auch der Druckverlauf entlang der Rohrleitung berechnet, um die realen Verhältnisse während der Versuche möglichst genau zu beschreiben.

Die Testsektion VGE (Abb. 2.2) besteht aus einer Steigleitung DN50 für die Zufuhr von Dampf bzw. Luft und der vertikalen Teststrecke DN200 (Innendurchmesser: 195,3 mm).

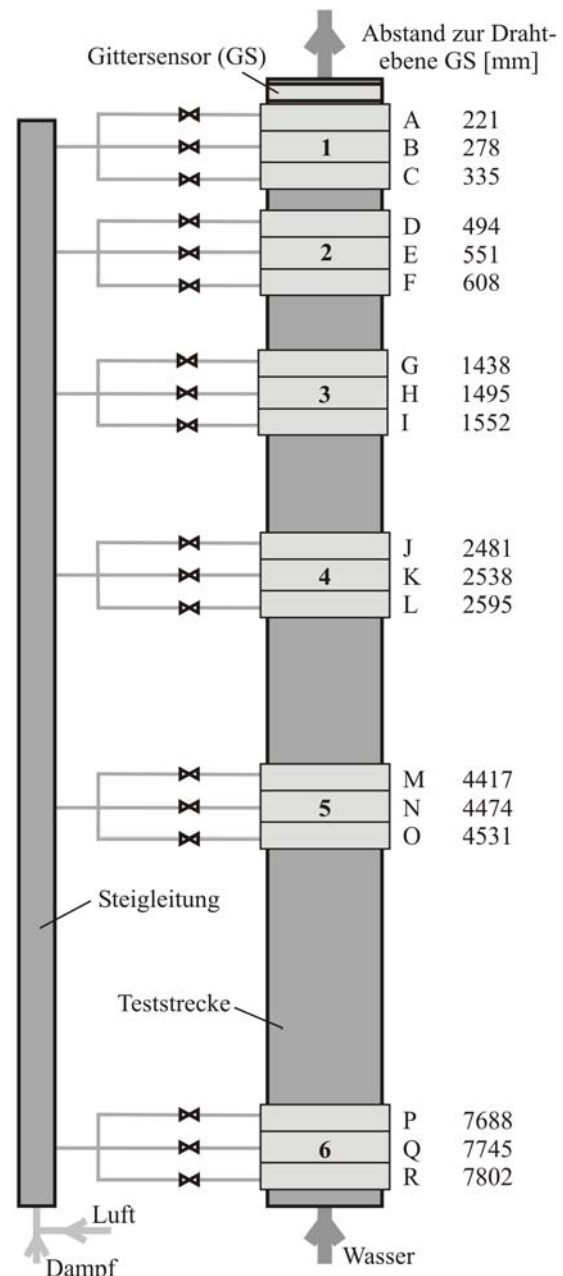
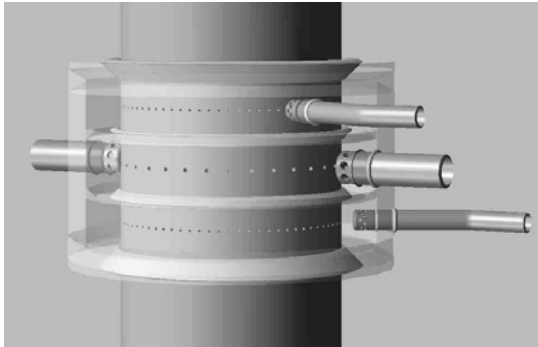


Abb. 2.2: Schematische Darstellung der variablen Gaseinspeisung

Die Einspeisung des Gases in die Wasserströmung erfolgt über insgesamt sechs Module, die in die Teststrecke DN200 an verschiedenen Höhenpositionen eingefügt sind. Jedes Modul

wiederum besteht aus 3 unabhängigen Kammern. Abb. 2.3 zeigt, wie über dem gesamten Umfang der Rohrwand gleichverteilte Bohrungen diese mit dem Innenraum der Teststrecke verbinden (obere und untere Kammer: $72 \times \varnothing 1$ mm, mittlere Kammer: $32 \times \varnothing 4$ mm). Somit wird eine rotationssymmetrische Injektion der Gasphase in die Wasserströmung ermöglicht. Alle Kammern sind einzeln über Absperrventile mit der Steigleitung DN50 verbunden. Durch die



Dampfeinspeisung über die beschriebenen Kammern bildet sich in der Teststrecke entsprechend den Versuchsbedingungen eine Zweiphasenströmung aus, deren Struktur in Abhängigkeit der Einlauflänge mit dem Gittersensor erfasst werden kann [BCS-04].

Abb. 2.3: Schnittbild eines Einspeisemoduls

2.3 Messtechnik zur Untersuchung der Wasser/Dampf-Strömung

Wichtige Strömungsparameter der Zweiphasenströmung in der vertikalen Teststrecke können mit so genannten Gittersensoren erfasst werden. Für die Wasser/Dampf-Experimente, deren Ergebnisse in diesem Bericht analysiert werden, wurde ein Hochtemperatur-Gittersensor (Abb. 2.4) verwendet, der bei Drücken bis 7 MPa und Temperaturen bis 286 °C einsetzbar ist.

Er besteht aus 2 Ebenen mit jeweils 64 Elektrodendrähten aus Edelstahl (Drahtdurchmesser: 250 μ m, Abstand zum Nachbardraht: 3 mm). Die Ebenen liegen in einem Abstand von 3 mm übereinander und sind gegeneinander um 90° verdreht. Sie bilden eine Matrix aus $64 \times 64 = 4096$ Kreuzungspunkten, von denen 3260 Messpunkte innerhalb der kreisförmigen Querschnittsfläche des Sensors liegen. Alle Drähte sind gegeneinander und gegen den leitfähigen Grundkörper des Sensors elektrisch isoliert. Um die Wärmeausdehnung der 128 Elektrodendrähte während der Versuche zu kompensieren, sind sie im Sensorkörper unter Federspannung montiert.

Das Messprinzip des Gittersensors beruht auf der Ermittlung der momentanen lokalen elektrischen Leitfähigkeit des Zweiphasengemischs. Da die Gasphase praktisch elektrisch nicht leitend ist, spiegelt der gemessene Wert den volumetrischen Flüssigkeitsanteil am Messort wieder. Dieser Effekt wird zur Messung der Gasgehaltsverteilungen und zur Detektion von Blasen in der Strömung benutzt. Die zwei übereinander liegenden Ebenen aus sich kreuzenden

Drähten bilden dabei Sender- und Empfängerelektroden. Während einer Messung wird zunächst die Senderebene durch eine speziell entwickelte Elektronik zeitlich hintereinander mit kurzen Spannungsimpulsen beaufschlagt, wodurch zwischen Sender- und Empfängerebene ein Strom fließt, der zur mittleren Leitfähigkeit des Mediums in der Umgebung des Elektroden-Kreuzungspunktes proportional ist. Die so gemessenen Stromimpulse werden in Spannungssignale umgewandelt und für alle Messpunkte des Rohrquerschnitts als Datenfile im Messrechner abgespeichert [PRM-97].

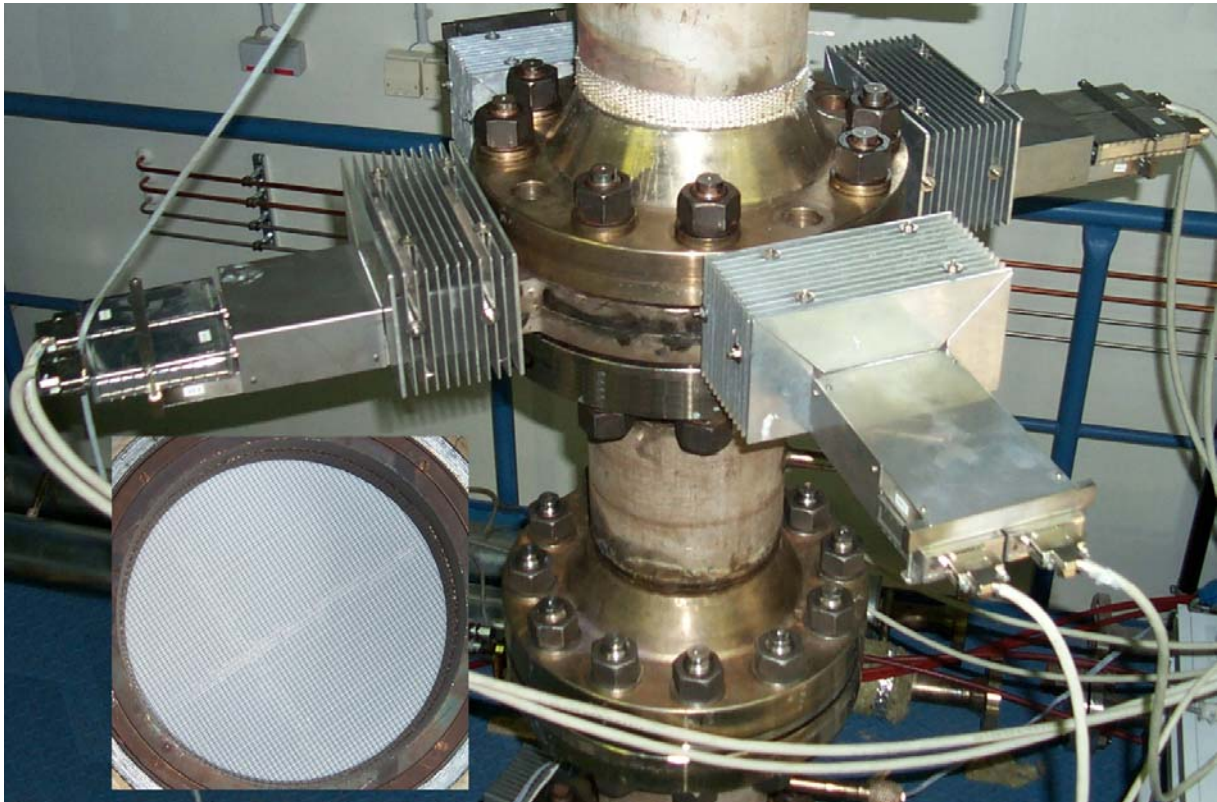


Abb. 2.4: Hochtemperatur-Gittersensor im eingebauten Zustand mit Drahtgitter

Die zeitliche Auflösung der Messungen wird durch die Abtastfrequenz der Messelektronik für alle Gitterpunkte bestimmt und beträgt für den Gittersensor mit 64x64 Messpunkten derzeit maximal 2,5 kHz.

Für die Ermittlung des lokalen volumetrischen Gasgehalts aus den gemessenen Spannungssignalen benötigt man Kalibrierdaten, die die maximale Leitfähigkeit der flüssigen Phase an den einzelnen Messpunkten widerspiegeln. Diese erhält man durch die Aufzeichnung der Signale einer reinen Wasserströmung, d.h. ohne Dampfeinspeisung, bei den entsprechenden Randbedingungen. Nach Vorverarbeitung und Filterung der Mess- sowie Kalibrierdaten kann der volumetrische Gasanteil ϵ für jeden Kreuzungspunkt bestimmt werden (Gl. 2.1):

$$\varepsilon = \frac{U_W - U_{\text{mess}}}{U_W} = 1 - \frac{U_{\text{mess}}}{U_W} \quad (\text{Gl. 2.1})$$

U_W ist dabei der Kalibrierwert der reinen Wasserströmung [GRE-03], U_{mess} der gemessene Wert der Zweiphasenströmung.

2.4 Wasser/Dampf-Experimente

Die im Rahmen dieses Berichtes verwendeten experimentellen Daten gehören zu drei unterschiedlichen Versuchsserien, die 2005 an der Versuchsanlage TOPFLOW durchgeführt worden sind. Nachfolgend werden diese vorgestellt. Die Nomenklatur der Experimentbezeichnung nennt zuerst die Druckstufe in bar, danach den Matrixpunkt und abschließend die vorgenommene Drosselung in kPa. Beträgt diese - wie bei den Versuchsserien D12 und D13 - 0 kPa, wird sie nur zu Vergleichszwecken an den Namen des Experiments angehängt, ansonsten weggelassen.

2.4.1 Versuchsserien D12 und D13

Bei den Serien D12 und D13 handelt es sich um Experimente, bei denen Sattdampf in eine Sattwasserströmung eingespeist wurde.

Die folgende Tabelle zeigt die allgemeine, am FZR entwickelte Versuchsmatrix. Dabei sind den verschiedenen Wasser- und Dampf-Volumenstromdichten spezielle Punkte zugeordnet, die als eindeutige Identifikation der Versuchsrandbedingungen dienen.

Jeder farblich unterlegte Punkt markiert eine während der Versuchsserien D12 und D13 aufgenommene Messreihe. Dabei wurden alle Einspeiseringe einzeln mit Dampf beaufschlagt, d.h. insgesamt 18 Höhen waren pro Serie einzustellen und auszumessen. Tab 2.1 listet die Versuche auf, deren Messergebnisse in diesem Bericht verwendet wurden.

Aus versuchstechnischen Gründen (z.B. Geometrie des Teststreckenkreislaufs bzw. Wärmeverluste) ist die flüssige Phase am Eintritt in die Testsektion geringfügig unterkühlt, so dass auch bei diesen Versuchen geringe Kondensationseffekte zu berücksichtigen sind.

Tab. 2.1: Matrix der untersuchten Punkte innerhalb der Versuchsserien D12 und D13 mit den entsprechenden Randbedingungen für Wasser- und Dampf-Volumenstromdichten

Volumenstromdichte Wasser in m/s		Volumenstromdichte Dampf in m/s																	
		Druck in bar	0.0096	0.0151	0.0235	0.0368	0.0574	0.0898	0.14	0.219	0.342	0.534	0.835	1.305	2.038	3.185	4.975	7.772	12.14
10	1.017	041	052	063	074	085	096	107	118	129	140	151	162	173	184	195	206	217	228
20	1.017	041	052	063	074	085	096	107	118	129	140	151	162	173	184	195	206	217	228
40	1.017	041	052	063	074	085	096	107	118	129	140	151	162	173	184	195	206	217	228
65	1.611	042	053	064	075	086	097	108	119	130	141	152	163	174	185	196	207	218	229
	1.017	041	052	063	074	085	096	107	118	129	140	151	162	173	184	195	206	217	228
	0.641	040	051	062	073	084	095	106	117	128	139	150	161	172	183	194	205	216	227
	0.405	039	050	061	072	083	094	105	116	127	138	149	160	171	182	193	204	215	226
	0.255	038	049	060	071	082	093	104	115	126	137	148	159	170	181	192	203	214	225
	0.161	037	048	059	070	081	092	103	114	125	136	147	158	169	180	191	202	213	224
	0.102	036	047	058	069	080	091	102	113	124	135	146	157	168	179	190	201	212	223

■ D12 ■ D13 ■ beide

2.4.2 Versuchsserie K12

Ziel dieser Versuchsserie war die Untersuchung von Kondensationsphänomenen. Zur Einstellung der notwendigen Unterkühlung diente eine Drosselarmatur, die sich zwischen Teststrecke und Dampftrömmel in Strömungsrichtung nach dem Gittersensor befindet. Das partielle Schließen dieser Armatur erhöht den Druck in der Testsektion gegenüber dem Sättigungsdruck in der Dampftrömmel, wodurch sich bei gleich bleibender Wassertemperatur eine Unterkühlung der Flüssigkeit ergibt.

Tab. 2.2 zeigt die Randbedingungen, bei denen die Kondensationsexperimente (alle Versuchspunkt 140) durchgeführt wurden:

Tab. 2.2: Übersicht der Experimente von K12 mit ihren Randbedingungen

Name des Experiments	p_{DT} [MPa]	Δp [kPa]	Höhenpositionen entsprechend Abb. 2.2
$p10dp70$	1,0	70	A – O (N und O kein Dampf)
$p10dp100$	1,0	100	A – R (Q und R kein Dampf)
$p10dp135$	1,0	135	Kein Dampf am Gittersensor nachweisbar
$p10dp160$	1,0	160	Kein Dampf am Gittersensor nachweisbar
$p20dp80$	2,0	80	Alle
$p20dp160$	2,0	160	A – I, K, L, N, O, Q

3 Modell zur Beschreibung der Kondensation von Dampf in einer Wasserströmung

Ziel dieses Berichtes ist die Entwicklung und Validierung eines Modells zur Untersuchung der Intensität der Dampfkondensation innerhalb einer Wasserströmung. Dabei gelten folgende Voraussetzungen und Annahmen:

- Das Modell teilt die zu untersuchende Rohrleitung in axialer Richtung in definierte Schrittweiten ein, d.h. es beschränkt sich auf eine eindimensionale Nachbildung der Strömungsverhältnisse. Es können demnach nur über dem Querschnitt gemittelte Werte zur Berechnung der Parameterverläufe verwendet werden.
- Der Vergleich mit Experimenten liefert dabei als Randbedingung die nachzubildende Geometrie sowie als Anfangsbedingung die einzuspeisenden Wasser- und Dampf-massenströme. Dabei ist die Flüssigphase unterschiedlich stark unterkühlt, der Dampf wird als gesättigt angenommen und weist eine disperse Verteilung innerhalb der Zweiphasenströmung auf.
- Der Phasenübergang findet an der Grenzfläche zwischen den Phasen statt, d.h. es stellt sich kein thermodynamisches Gleichgewicht ein.

Ein Vergleich mit experimentellen Daten für Dampfgehalt und Zwischenphasen-Grenzflächendichte findet direkt am Messort statt.

3.1 Modellierung des Teststreckenkreislaufs

3.1.1 Geometrische Randbedingungen

Das Kondensationsmodell wird speziell für einen Teil des Teststreckenkreislaufs der Versuchsanlage TOPFLOW entwickelt. Abb. 3.1 zeigt eine schematische Darstellung des Teststreckenkreislaufs, der aus Dampftrommel, Fall- (A) und Steigleitung (B) aufgebaut ist.

Beginnend bei der Dampftrommel wird ein Wassermassestrom \dot{m}_w mit der Temperatur $t_{w,1} = t_s(p)$ angesaugt, da angenommen wird, dass sich dort bei stationärem Betrieb die flüssige Phase in Sättigung mit der Gasförmigen befindet. Innerhalb der Falleitung (A) kommt es über der gesamten Länge L_A zu einer Änderung der Wassertemperatur um Δt . Dabei tritt aufgrund eines Temperaturgradienten zwischen Wasserströmung und Umgebung des Rohres ein

Wärmeverlust $\dot{Q}_{V,A}$ über die Rohrwand auf. Demgegenüber trägt die Förderpumpe einen Wärmestrom \dot{Q}_P in die Wasserströmung ein. Ursache hierfür ist einerseits die Reibung des Fluids an den Schaufeln der Pumpe, andererseits verwirbelt das Pumpenrad das Fluid und führt somit zum Energiezuwachs in Form von Turbulenzen innerhalb der Strömung. Daher beträgt die Temperatur des Wassers am Startpunkt ($L_B = 0$) der simulierten Steigleitung $t_{w,2} = t_{w,1} - \Delta t$.

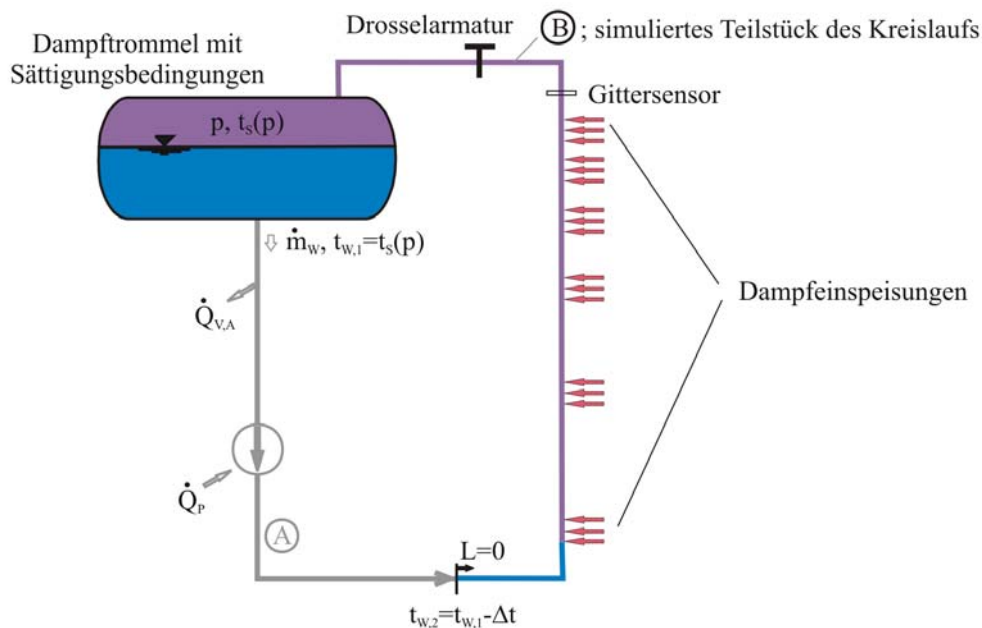


Abb. 3.1: Teststreckenkreislauf mit simuliertem Teilstück (B)

Die Änderung Δt über die Falleitung wurde durch eine Überschlagsrechnung ermittelt. Eine Bilanzierung von (A) ergibt:

$$\dot{m}_w \cdot h_{w,1} + \dot{Q}_P = \dot{m}_w \cdot h_{w,2} + \dot{Q}_{V,A} \quad (\text{Gl. 3.1})$$

Der Wärmeeintrag \dot{Q}_P der Förderpumpe kann bei maximaler Drehzahl auf 2720 W abgeschätzt werden. Durch Proberechnungen konnte der maximale Wärmeverlust über die isolierte Rohrwand zu 150 W/m ermittelt werden, was bei einer Länge des Teilstücks A von 28,91 m einem Gesamtverlust von 4325 W entspricht. Somit kann aus Gleichung 3.1 die Austrittsenthalpie des Wassers bestimmt werden:

$$h_{w,2} = h_{w,1} + \frac{\dot{Q}_P}{\dot{m}_w} - \frac{\dot{Q}_{V,A}}{\dot{m}_w} \quad (\text{Gl. 3.2})$$

Setzt man die maximalen Werte für die benötigten Parameter (Versuchsserie K12) ein, erhält man einen Enthalpieverlust Δh_{\max} von 59,4 J/kg, welcher einer Temperaturdifferenz Δt_{\max} von 0,015 K entspricht. Diese überschlägige Berechnung zeigt, dass die thermodynamischen Pro-

zesse im Teilstück (A) nur einen marginalen Einfluss auf die in Teilstück (B) entstehende Zweiphasenströmung besitzen.

Tab. 3.1: Geometrie der Rohrleitung von der Wassereinspeisung bis zur Dampftrommel

lfd. Nr.	Bezeichnung	Längen [mm] (Zentrallinie)	Gesamtlänge [mm]	Winkel γ (über Horizontaler)	Rauigkeit k [mm]
1	Flansch DN150	115	115	0	0,04
2	442 AVA	554	669	0	0,04
3	Flansch DN150	115	784	0	0,04
4	Bogen DN150	358,93	1142,93	90	0,04
5	Reduzierung DN150/200	160	1302,93	90	0,04
6	Rohr	300	1602,93	90	0,04
7	Flansch DN200	140	1742,93	90	0,04
8	Flansch DN200	140	1882,93	90	0,04
9	Rohr mit Anschluss	325	2207,93	90	0,04
10	Flansch DN200	140	2347,93	90	0,04
11	Rohr mit zwei Flanschen	2990	5337,93	90	0,01
11a	Zwischenstück	54	5391,93	90	0,01
12	Rohr mit zwei Flanschen	2985	8376,93	90	0,01
13	Rohr mit zwei Flanschen	1982	10358,93	90	0,01
14	Gittersensor	60	10418,93	90	0,04
15	Zwischenstück	60	10478,93	90	0,04
16	Rohr mit zwei Flanschen	500	10978,93	90	0,04
17	Flansch DN200	140	11118,93	90	0,04
18	Bogen DN200	479,09	11598,02	90	0,04
19	Rohr	370	11968,02	0	0,04
20	Flansch DN200	140	12108,02	0	0,04
21	Flansch DN200	140	12248,02	0	0,04
22	T-Stück DN200/200	356	12604,02	0	0,04
23	Rohr	1420	14024,02	0	0,04
24	Flansch DN200	140	14164,02	0	0,04
25	444 AHA	280	14444,02	0	0,04
26	Flansch DN200	140	14584,02	0	0,04
27	Reduzierung DN200/250	190	14774,02	0	0,04
28	Rohr	850	15624,02	0	0,04
29	Bogen DN250	598,47	16222,49	90	0,04
30	Rohr	200	16422,49	90	0,04
31	Bogen DN250	598,47	17020,96	90	0,04
32	T-Stück DN250/250	496	17516,96	0	0,04
33	Rohr	860	18376,96	0	0,04
34	Bogen DN250	598,47	18975,43	0	0,04
35	Rohr	1235	20210,43	0	0,04
36	Bogen DN250	598,47	20808,9	0	0,04
37	Rohr	1250	22058,9	0	0,04
38	Bogen DN250	598,47	22657,37	0	0,04
39	Rohr	1260	23917,37	0	0,04
40	Bogen DN250	598,47	24515,84	0	0,04
41	Rohr	1940	26455,84	0	0,04
42	Bogen DN250	598,47	27054,31	0	0,04
43	Rohr	2250	29304,31	0	0,04
44	Bogen DN250	598,47	29902,78	90	0,04
45	Flansch DN250	155	30057,78	90	0,04

VGE

Tab. 3.1 listet alle Bauteile des simulierten Teilstücks mit ihren Daten für Länge, Winkel gegenüber der Horizontalen, Rauigkeit und Widerstandsbeiwert auf. Die Isometrien der einzelnen Abschnitte befinden sich im Anhang 9.1. Die Werte für die Rauigkeit sind konstruktiven Unterlagen der Gesamtanlage TOPFLOW entnommen.

3.1.2 Numerisches Lösungsverfahren

Aufgabe des vorliegenden Berichtes ist eine eindimensionale Nachbildung der thermohydraulischen Prozesse innerhalb der Wasser/Dampf-Strömung. Dazu wird ein numerisches Lösungsverfahren ausgewählt.

Üblich ist die Verwendung von *Diskretisierungsverfahren* oder *Ansatzmethoden*. Beiden gemein ist eine Einteilung des untersuchten Gegenstands in diskrete Elemente bzw. in festgelegte Orts- oder Zeitschrittweiten. Dabei bestimmen Diskretisierungsverfahren den thermodynamischen Zustand des untersuchten Elements aus den umgebenden Nachbarelementen (Differenzenverfahren) oder bilanzieren alle ein- und ausfließenden Größen (Bilanzverfahren). Im Gegensatz dazu stellen Ansatzmethoden Variationsprinzipien bzw. Ansatzfunktionen für die zu untersuchenden Parameter auf.

Zur Lösung der gestellten Aufgabe wurde das **Bilanzverfahren** ausgewählt. Die Rohrleitung wird dabei in axialer Richtung in Volumenelemente (VE) der variablen Länge ΔL eingeteilt und alle ein- bzw. ausströmenden Größen bilanziert.

Die Lösung der benötigten Gleichungen kann explizit oder implizit erfolgen. Die explizite Methode berechnet alle Prozesse innerhalb und am Ausgang des VE aus den Eingangswerten der beteiligten Parameter P (Gl. 3.3). Wächst der Wert innerhalb des VE an, wird er hierbei unterschätzt, weshalb man dieses Vorgehen auch als Untersummenbildung bezeichnet. Daher ist es nötig, bei expliziten Berechnungen die Schrittweite ΔL so klein zu wählen, dass der Fehler zwischen angenommenem und realem Wert des Parameters gering bleibt. Im Gegensatz dazu wird bei der impliziten Lösung der Wert des Parameters P innerhalb des VE aus Eingangs- und Ausgangswert gebildet, d.h. man muss solange iterieren, bis alle Werte in sich übereinstimmen (Gl. 3.4). Vorteil dieser Methode ist die Wahl größerer Schrittweiten als bei der expliziten Lösung, da man die Veränderung des Parameters innerhalb des VE mit berücksichtigt und daher der Fehler zwischen angenommenem und realem Wert des Parameters kleiner als beim expliziten Berechnen ist.

$$\text{Explizit: } P_{\text{Volumenelement}} = P_{\text{Eintritt}} \quad (\text{Gl. 3.3})$$

$$\text{Implizit (linear): } P_{\text{Volumenelement}} = \frac{P_{\text{Austritt}} + P_{\text{Eintritt}}}{2} \quad (\text{Gl. 3.4})$$

Im Kondensationsmodell kann die Schrittweite ΔL beliebig klein gewählt werden, weshalb eine explizite Lösungsmethode gewählt wurde. Kap. 6.3 untersucht durch die Variation von ΔL , inwieweit dieser Ansatz die Ergebnisse beeinflusst.

3.2 Charakteristische Strömungsparameter

3.2.1 Dampfgehalt

Der Dampfgehalt einer Wasser/Dampf-Strömung kann auf zwei verschiedene Arten angegeben werden:

(a) *Massendampfgehalt*

$$x = \frac{m_D}{m_D + m_W} \quad (\text{Gl. 3.5})$$

(b) *Volumetrischer Dampfgehalt*

$$\varepsilon = \frac{V_D}{V_D + V_W} \quad (\text{Gl. 3.6})$$

Analog lassen sich die dazu äquivalenten Strömungsdampfgehalte berechnen:

$$\dot{x} = \frac{\dot{m}_D}{\dot{m}_D + \dot{m}_W} \quad (\text{Gl. 3.7})$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{V}_D}{\dot{V}_D + \dot{V}_W} \quad (\text{Gl. 3.8})$$

Der volumetrische Dampfgehalt ε bezeichnet den Anteil des Dampfolumens am Gesamtvolumen eines gewählten Volumenelements bzw. der Zweiphasenströmung und charakterisiert somit die vorliegende Phasenverteilung. Seine Kenntnis ist grundlegend für alle weiteren thermohydraulischen und strömungstechnischen Berechnungen.

3.2.1.1 Berechnungsmodelle

Zur Beschreibung von Zweiphasenströmungen wurden je nach Anwendungsfall verschiedene Modelle entwickelt:

(a) *Homogenes Modell*

Bei diesem Modell wird vereinfachend angenommen, dass im Strömungskanal ein homogenes Fluid strömt, d.h. beide Phasen besitzen dieselbe Geschwindigkeit, Temperatur und denselben Druck. Aus den Stoffeigenschaften werden mittlere Werte gebildet, die über dem Strömungsquerschnitt als konstant gelten. Bei auftretenden Änderungen der drei genannten Parameter kommt es zu einem Energie- und Stofftransport zwischen den Phasen, der sofort wieder zum Gleichgewichtszustand führt.

Da nach diesem Ansatz kein Geschwindigkeitsunterschied zwischen beiden Phasen auftritt, berechnet sich der Dampfgehalt nach dem homogenen Modell zu:

$$x = \dot{x} \quad (\text{Gl. 3.9})$$

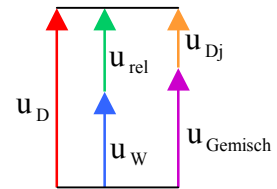
$$\varepsilon = \dot{\varepsilon} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1 - \dot{x}}{\dot{x}} \right) \frac{\rho_D}{\rho_w}} \quad (\text{Gl. 3.10})$$

Sind Massenströme und Dichten der beiden Phasen bekannt, können die Dampfgehalte direkt aus diesen berechnet werden.

(b) *Schlupfmodell*

Beim Schlupfmodell wird angenommen, dass beide Phasen mit verschiedenen Geschwindigkeiten getrennt nebeneinander im Kanal strömen. Für jede Phase wird mit konstanten Stoffwerten und mittlerer Geschwindigkeit gerechnet. Dieses Modell kann besonders bei großen Dichteunterschieden zwischen den Phasen infolge eines hohen Druckgradienten eingesetzt werden, da die wirkende Auftriebskraft eine Driftgeschwindigkeit der leichteren in der schwereren Phase induziert. Aus diesem Grund lassen sich x und ε nicht mehr analytisch berechnen. Um beide Parameter trotzdem abschätzen zu können, wurden mit Hilfe experimenteller Daten empirische Modelle entwickelt und größtenteils zu sog. Drift-Flux-Modellen zusammengefasst.

Generell lassen sich bei diesem Modell folgende Geschwindigkeiten definieren (siehe Skizze):



1. Die Geschwindigkeit u_D , mit der sich die gasförmige Phase innerhalb der Strömung bewegt,
2. Die Geschwindigkeit u_W , mit der sich die flüssige Phase innerhalb der Strömung bewegt,
3. Die Differenzgeschwindigkeit zwischen beiden Phasen, welche auch als Blasenauftstiegs- oder Relativgeschwindigkeit u_{rel} bezeichnet wird:

$$u_{rel} = u_D - u_W \quad (\text{Gl. 3.11})$$

4. Die lokale Geschwindigkeit des Zweiphasengemischs, die sich aus der Summe der Einzelgeschwindigkeiten, bezogen auf den lokalen Gasgehalt ε , bildet:

$$u_{\text{Gemisch}} = \underbrace{u_D \cdot \varepsilon}_{=j_D} + \underbrace{u_W \cdot (1 - \varepsilon)}_{=j_W} = j \quad (\text{Gl. 3.12})$$

Diese auf den Gasgehalt bezogenen Geschwindigkeiten werden auch als Leerrohrgeschwindigkeiten j bezeichnet und entsprechen der Situation, bei der die jeweilige Phase allein in dem gesamten Rohrquerschnitt strömen würde.

5. Die Driftgeschwindigkeit der Gasphase als Differenz zwischen deren Geschwindigkeit und der des Zweiphasengemischs:

$$u_{Dj} = u_D - u_{\text{Gemisch}} = u_D - j \quad (\text{Gl. 3.13})$$

(Gl. 3.12) führt zur Herleitung des über dem Strömungsquerschnitt gemittelten Dampfgehalts $\langle \varepsilon \rangle$. Er berechnet sich aus dem Verhältnis zwischen der mittleren Dampf-Volumenstromdichte und der Dampfgeschwindigkeit \bar{u}_D :

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\langle j_D \rangle}{\bar{u}_D} \quad (\text{Gl. 3.14})$$

welche den über dem Strömungsquerschnitt gemittelten und mit dem lokalen Dampfgehalt gewichteten Wert darstellt und sich aus (Gl. 3.13) ergibt:

$$\bar{u}_D = \frac{\langle \varepsilon \cdot j \rangle}{\langle \varepsilon \rangle} + \frac{\langle \varepsilon \cdot u_{Dj} \rangle}{\langle \varepsilon \rangle} \quad (\text{Gl. 3.15})$$

Man kann auch schreiben:

$$\bar{u}_D = C_0 \langle j \rangle + \bar{u}_{Dj} \quad (\text{Gl. 3.16})$$

wobei C_0 den Profilparameter zur Erfassung des Gasgehaltsprofils darstellt:

$$C_0 = \frac{\langle \varepsilon \cdot j \rangle}{\langle \varepsilon \rangle \langle j \rangle} \quad (\text{Gl. 3.17})$$

Damit berechnet sich der mittlere Dampfgehalt der Zweiphasenströmung zu:

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\langle j_D \rangle}{C_0 \langle j \rangle + \bar{u}_{Dj}} \quad (\text{Gl. 3.18})$$

Die Drift-Flux-Modelle dienen der empirischen Beschreibung der beiden Parameter C_0 und \bar{u}_{Dj} .

3.2.1.2 Vergleich der Modelle mit experimentellen Daten

Im Rahmen dieses Berichtes werden insgesamt 12 Drift-Flux-Modelle hinsichtlich der Übereinstimmung mit experimentell ermittelten Dampfgehaltsdaten untersucht. Hierfür werden die Daten der Versuchsreihen D12 und D13 bei $p = 20$ bar und einer Wasser-Volumenstromdichte von $J_W = 1$ m/s verwendet.

Die Drift-Flux-Modelle stammen aus verschiedenen Quellen und unterscheiden sich zum Teil erheblich sowohl in ihrer Komplexität als auch in den untersuchten Anwendungsbereichen für Druck, Strömungsform und Kanalgeometrie. Anhang 9.4 enthält eine Übersicht aller getesteten Modelle mit den entsprechenden Gleichungen und den jeweiligen Vergleichen mit experimentellen Daten.

Um eine Auswahl des zum Einsatz kommenden Modells zu ermöglichen, werden alle Methoden hinsichtlich ihrer Abweichungen von den Messwerten miteinander verglichen. Dabei berechnet sich der mittlere absolute Fehler zu:

$$\bar{F}_{\text{abs}} = \frac{\sum_{i=1}^N |\varepsilon_{\text{mod},i} - \varepsilon_{\text{mess},i}|}{N} \quad (\text{Gl. 3.19})$$

wobei N die Anzahl der verwendeten experimentellen Daten ist. Die Mess- und Modellwerte des Gasgehalts werden in Gl. 3.19 auf 100 % normiert.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen Abb. 3.2 und Tab. 3.2.

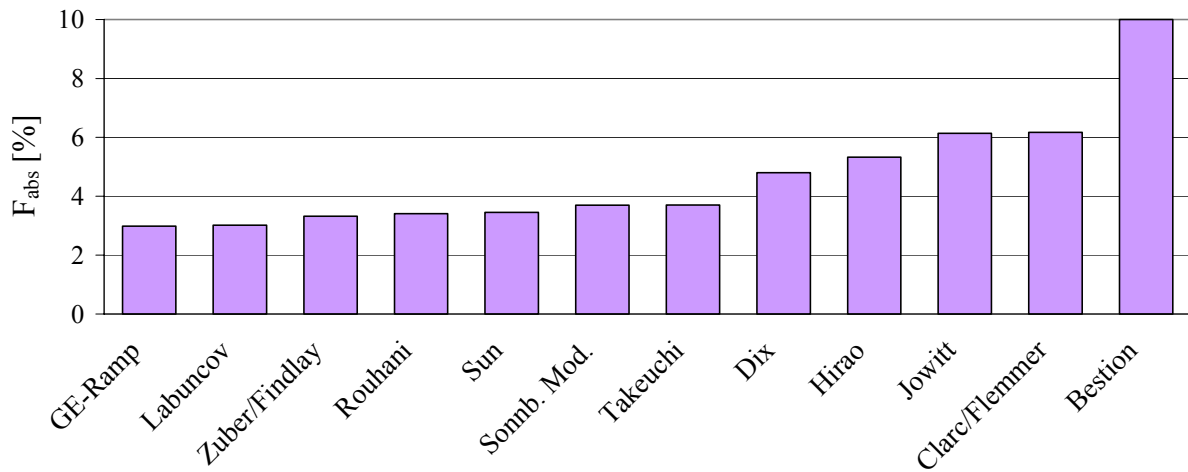


Abb. 3.2: Vergleich der getesteten Modelle in Bezug auf ihre mittleren absoluten Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Dampfgehalten

Die mittleren absoluten Fehler zwischen berechneten und gemessenen Dampfgehalten bewegen sich bei allen untersuchten Modellen zwischen 3 und 10 %. Ein Großteil dieser Modelle zeigt dabei eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten.

Tab. 3.2: Mittlere absolute Fehler der untersuchten Drift-Flux-Modelle

Modell	\bar{F}_{abs} [%]	Modell	\bar{F}_{abs} [%]	Modell	\bar{F}_{abs} [%]
Bestion ¹	9,998	Hirao ²	5,328	Sonnenburg Mod. ⁴	3,695
Clarc/Flemmer ²	6,170	Jowitt ¹	6,138	Sun ¹	3,420
Dix ¹	4,797	Labuncov ³	3,018	Takeuchi ⁴	3,703
GE-Ramp ⁴	2,982	Rouhani ⁴	3,412	Zuber/Findlay ¹	3,323

Das Modell mit den geringsten absoluten Abweichungen - GE-RAMP - wird zur Implementierung in das Simulationsprogramm gewählt. Es bestätigt auch die Feststellung von MANERA, dass bei niedrigen Drücken die damit berechneten Gasgehalte gute Übereinstimmungen mit gemessenen Werten (dort aus Flashing-Experimenten) zeigen. Damit berechnet sich der mittlere Dampfgehalt der Zweiphasenströmung nach (Gl. 3.18) iterativ mit:

$$C_0 = \begin{cases} 1,1 & \varepsilon \leq 0,65 \\ 1 + 0,1 \cdot (1 - \varepsilon) / 0,35 & \varepsilon > 0,65 \end{cases} \quad R = \begin{cases} 2,9 & \varepsilon \leq 0,65 \\ 2,9 \cdot (1 - \varepsilon) / 0,35 & \varepsilon > 0,65 \end{cases} \quad \text{(Gl. 3.20),}$$

$$\bar{u}_{Dj} = R \cdot \left(\frac{g \cdot \sigma \cdot \Delta \rho}{\rho_w^2} \right)^{1/4} \quad \text{(Gl. 3.22)}$$

Dabei ist der Profilparameter C_0 nur vom Dampfgehalt, die Driftgeschwindigkeit \bar{u}_{Dj} zwischen Gasphase und Gemisch vom Dampfgehalt sowie der Größe der Dampfblasen (R) abhängig.

¹ [COM-02]

² [HIT-03]

³ [HUJ-75]

⁴ [MAA-05]

Abb. 3.3 zeigt die Entwicklung des Dampfgehalts bei Erhöhung der Volumenstromdichte des Dampfes nach GE-RAMP im Vergleich mit experimentellen Daten der Versuchsserien D12 und D13 bei $p = 20$ bar.

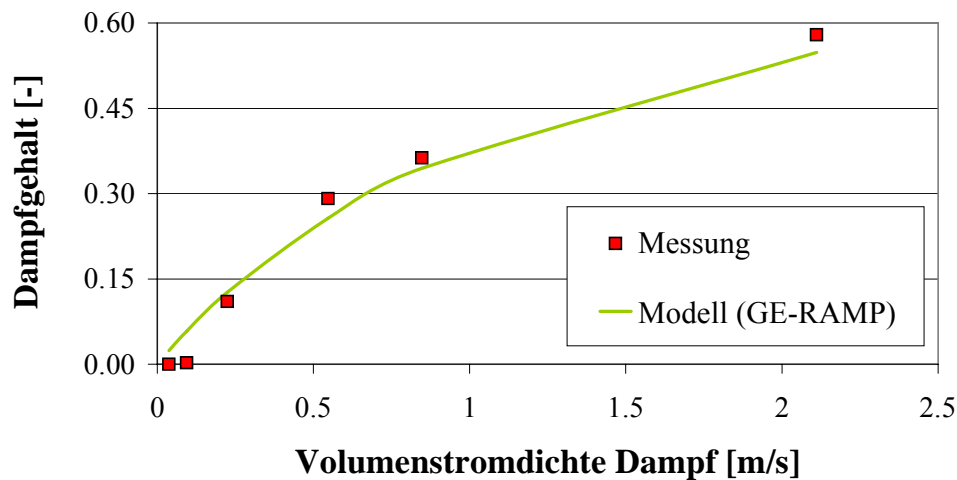


Abb. 3.3: Vergleich des gewählten Drift-Flux-Modells mit experimentellen Daten

3.2.2 Zwischenphasen-Grenzflächendichte

Die Zwischenphasengrenzfläche A_p erfasst die gesamte Fläche, die zum Energie- und Stoffaustausch zwischen Dampf und Wasser innerhalb der Strömung zur Verfügung steht. Beim dispersen Vorliegen der Gasphase bildet sie sich aus der Summe aller vorhandenen Blasenoberflächen. Ihre Kenntnis ist grundlegend bei der Berechnung von Austauschprozessen und damit für die Vorhersage von zu beobachtenden Strömungsphänomenen.

Zur Bestimmung der Zwischenphasengrenzfläche sind Aussagen über die Blasengrößenverteilung innerhalb der Zweiphasenströmung notwendig. Allerdings ermöglicht das eindimensionale Modell keine theoretische Ermittlung dieser Verteilungen, es kann nur eine mittlere Blasengröße berechnen. Zu Vergleichszwecken wird für jede Strömung die sich individuell einstellende Phasengrenze auf den untersuchten Bilanzraum bezogen:

- *Kondensationsmodell:* Bilanzraum entspricht einem Volumenelement,
- *Experiment:* Bilanzraum entspricht dem gesamten Volumen der Zweiphasenströmung während einer Messung.

Man erhält somit die sog. *Zwischenphasen-Grenzflächendichte* a_i - auch als spezifische Phasengrenze bezeichnet - mit der Einheit [1/m]:

$$a_i = \frac{A_p}{V_{\text{Bilanzraum}}} \quad (\text{Gl. 3.23})$$

3.2.2.1 Berechnung von mittleren Primärblasendurchmessern

Der sich nach der Dampfeinspeisung einstellende Primärblasendurchmesser hängt von der kinetischen Energie des Gasstroms ab, der innerhalb der Wasserströmung eine Phasengrenzfläche produziert. Abhängig von der Höhe dieser Energie unterscheidet man zwei Arten der Blasenentstehung:

- *Blasengasen:* Bei geringen Gas-Volumenstromdichten bilden sich einzelne Blasen direkt an der Einspeisedüse.
- *Strahlgasen:* Bei höheren Gas-Volumenstromdichten „schießt“ der Gasstrahl aufgrund seiner hohen kinetischen Energie zunächst in die kontinuierlich fließende flüssige Phase und zerlegt sich erst in einiger Entfernung von der Düsenmündung in zahlreiche kleine Blasen. Deren Durchmesser ist im Vergleich zum Blasengasen meist viel geringer.

Während der Kondensationsexperimente wurde der Dampf durch die Rohrwand mittels 72 bzw. 32 Bohrungen mit einem Durchmesser von 1 bzw. 4 mm symmetrisch über dem Strömungsumfang eingespeist. Dabei berechnet sich die Geschwindigkeit, mit der der Dampf in die Wasserströmung eintritt, aus der Kontinuitätsgleichung:

$$u_{D,0} = \frac{\dot{V}_{D,Düse}}{A_{Düse}} = \frac{4 \cdot \dot{m}_D}{\rho_D \cdot \pi \cdot d_{Düse}^2 \cdot N_{Düse}} \quad (\text{Gl. 3.24})$$

Der Umschlagpunkt zwischen beiden Arten der Blasenentstehung wird durch eine kritische Weber-Zahl charakterisiert:

$$We_{\text{Blasengasen}} < We_{\text{krit}} = \frac{d_{Düse} \cdot \rho_W \cdot u_{D,0}^2}{\sigma} = 2...4 < We_{\text{Strahlgasen}} \quad (\text{Gl. 3.25})$$

Folgende Weber-Zahlen wurden für die vier Kondensationsexperimente, abhängig von der Größe der Einspeisedüsen, im Mittel berechnet (Nomenklatur der Experimentbezeichnung vgl. Kap. 2.4):

	<i>p10dp70</i>	<i>p10dp100</i>	<i>p20dp80</i>	<i>p20dp160</i>
$We_{1\text{mm}}$	7440	7390	18250	18215
$We_{4\text{mm}}$	710	704	1755	1706

Die Ergebnisse zeigen, dass an der Einspeisedüse sehr große Weber-Zahlen auftreten, und damit Strahlgasen vorliegt.

Das Modell Strahlgasen verwendet folgende dimensionslose Kennzahlen [PMW-04]:

$$1. \text{ dimensionsloser Blasendurchmesser: } \bar{d}_0^* = \bar{d}_0 \sqrt[3]{\frac{g \cdot \Delta \rho}{3 \cdot d_{\text{Düse}} \cdot \sigma}} \quad (\text{Gl. 3.26})$$

$$2. \text{ Froude-Zahl: } Fr = \frac{u_{D,0}^2}{g \cdot d_{\text{Düse}}} = \frac{16 \cdot \dot{V}_{D,Düse}^2}{\pi^2 \cdot d_{\text{Düse}}^5 \cdot g} \quad (\text{Gl. 3.27})$$

$$3. \text{ Weber-Zahl: } \text{siehe (Gl. 3.25).}$$

Der mittlere Primärblasendurchmesser \bar{d}_0 in (Gl. 3.26) berechnet sich nach [PMW-04] mit den folgenden empirischen Korrelationen:

$$\Phi = 1 + \left(1 + \frac{We^2}{Fr}\right)^{1/2} = 1 + \left(1 + \frac{16 \cdot \dot{V}_{D,Düse}^2 \cdot \rho_W^2 \cdot g}{\pi^2 \cdot \sigma^2 \cdot d_{\text{Düse}}}\right)^{1/2} \quad (\text{Gl. 3.28})$$

$$\bar{d}_0^* = \sqrt[3]{\Phi} \quad \Phi < 27 \quad (\text{Gl. 3.29})$$

$$\bar{d}_0^* = 0,5 \cdot \left(\frac{We^2}{Fr}\right)^{1/6} \quad \Phi \geq 27 \quad (\text{Gl. 3.30})$$

3.2.2.2 Bestimmung der Grenzflächendichte bei konstanter Blasenflussdichte

Nun kann die Entwicklung der Phasengrenzflächendichte a_i bestimmt werden. Dabei bildet sich die Phasengrenze A_p aus der Summe aller individuellen Blasenoberflächen $A_{B,i}$ in einem definierten Bilanzraum:

$$A_p = \sum_{i=1}^{N_B} A_{B,i} \quad (\text{Gl. 3.31})$$

Durch den Primärblasendurchmesser ist nur ein mittlerer Wert A_B für die Größe der Blasen gegeben, weshalb sich (Gl. 3.31) vereinfacht:

$$A_p = A_B \cdot N_B \quad (\text{Gl. 3.32})$$

wobei die Blasenanzahl N_B durch die Blasenanzahldichte n_B - der Anzahl der Blasen pro Volumeneinheit - und das Volumen des Bilanzraums gegeben ist:

$$N_B = n_B \cdot V_{\text{Bilanzraum}} \quad (\text{Gl. 3.33})$$

Aus (Gl. 3.6) ergibt sich unter der Annahme eines mittleren Blasenvolumens V_B :

$$\varepsilon = \frac{V_D}{V_{\text{Bilanzraum}}} = \frac{N_B \cdot V_B}{V_{\text{Bilanzraum}}} = n_B \cdot V_B \quad (\text{Gl. 3.34})$$

sodass in (Gl. 3.33) die Blasenanzahldichte n_B ersetzt werden kann. Mit (Gl. 3.32) vereinfacht sich (Gl. 3.23) zu:

$$a_i = \varepsilon \cdot \frac{A_B}{V_B} \quad (\text{Gl. 3.35})$$

Unter der Annahme, dass die Blasen kugelförmig sind, kann man auch schreiben:

$$a_i = \frac{6 \cdot \varepsilon}{\bar{d}_B} \quad (\text{Gl. 3.36})$$

Zur Bestimmung von a_i sind daher Informationen über den momentanen Dampfgehalt und den mittleren Blasendurchmesser \bar{d}_B innerhalb des Bilanzraums ausreichend.

Der mittlere Blasendurchmesser kann unter der Annahme berechnet werden, dass die Blasenflussdichte, d.h. die Anzahl der Blasen, die pro Zeiteinheit durch einen Querschnitt treten, konstant bleibt. Interaktionen zwischen den einzelnen Blasen, wie Koaleszenz und Fragmentierung, bleiben dabei unberücksichtigt. Mit dem Ansatz, dass nach der Berechnung eines mittleren Primärblasendurchmessers alle Blasen dasselbe mittlere Volumen V_B aufweisen, berechnet sich die Blasenflussdichte:

$$\dot{n}_B = \frac{\dot{N}_B}{A} = \frac{\dot{V}_D}{V_B \cdot A} = \frac{J_D}{V_B} = \text{konst.} \quad (\text{Gl. 3.37})$$

Unter der Annahme, dass es sich bei den Blasen um kugelförmige Körper handelt, bestimmt sich der mittlere Blasendurchmesser aus (Gl. 3.37):

$$\bar{d}_{B,2} = \bar{d}_{B,1} \cdot \sqrt[3]{\frac{J_{D,2}}{J_{D,1}}} = \bar{d}_{B,0} \cdot \sqrt[3]{\frac{J_{D,2}}{J_{D,0}}} \quad (\text{Gl. 3.38})$$

Somit kann die Zwischenphasen-Grenzflächendichte als Funktion von momentanem Dampfgehalt und –volumenstromdichte angegeben werden:

$$a_i = \frac{6 \cdot \varepsilon}{\bar{d}_{B,0} \cdot \sqrt[3]{\frac{J_D}{J_{D,0}}}} \quad (\text{Gl. 3.39})$$

3.2.2.3 Experimentell ermittelte Blasendurchmesser und Grenzflächendichten

Nach Auswertung der Gittersensordaten stehen Informationen über die Anzahl der gemessenen Blasen N_B sowie deren Volumen $V_{B,i}$ und Oberfläche $A_{B,i}$ zur Verfügung [PRG-05]. Es können daher für jeden Versuch mittlere Blasengrößen berechnet werden.

Allgemein kann für beliebig geformte Blasen innerhalb einer Blasenströmung der Durchmesser einer volumengleichen Kugel wie folgt ermittelt werden:

$$d_V = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot \sum_{i=1}^{N_B} V_{B,i}}{\pi \cdot N_B}} \quad (\text{Gl. 3.40})$$

Der Durchmesser der oberflächengleichen Kugel ergibt sich zu:

$$d_A = d_S = \sqrt[2]{\frac{\sum_{i=1}^{N_B} A_{B,i}}{\pi \cdot N_B}} \quad (\text{Gl. 3.41})$$

und wird als SAUTER-Durchmesser bezeichnet. Liegt eine Strömung aus kugelförmigen Blasen mit unterschiedlichen Durchmessern (polydispers) vor, bestimmt sich dieser Durchmesser als Verhältnis zwischen Gesamtvolumen und -oberfläche aller Blasen in der Strömung:

$$d_S = \frac{6 \cdot \sum_{i=1}^{N_B} V_i}{\sum_{i=1}^{N_B} A_i} = \frac{\sum_{i=1}^{N_B} d_i^3}{\sum_{i=1}^{N_B} d_i^2} \quad (\text{Gl. 3.42})$$

Bei einer monodispersen Zweiphasenströmung mit kugelförmigen Blasen ist $d_S = d_V$. Liegen bei gleichem Dampfvolumen andere Blasenformen vor, ist die Oberfläche im Verhältnis zum Volumen der Blase immer größer und demzufolge $d_S > d_V$.

Während der Kondensationsversuche lag der Dampf als polydisperse Blasenströmung mit unterschiedlichen Blasenformen vor. Der SAUTER-Durchmesser wird daher mit (Gl. 3.41) ermittelt. Die experimentelle Zwischenphasen-Grenzflächendichte für jeden Versuch ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen der Summe aller Blasenoberflächen und dem gesamten Volumen der Zweiphasenströmung:

$$a_i = \frac{\sum_{i=1}^{N_B} A_i}{V_{\text{ges}}} \quad (\text{Gl. 3.43})$$

Im Anhang 9.3 befinden sich die experimentell ermittelten Werte für d_S und a_i .

3.3 Wärme- und Stofftransport

Die im Experiment eingestellte Wasser/Dampf-Strömung ist ein Einkomponentensystem. Infolge von Wärmeübergangsvorgängen kommt es zum Stoffaustausch (Kondensation bzw. Verdampfung) zwischen beiden Phasen. Durch die gezielte Einstellung des Druckverlustes an der Drosselarmatur (siehe Kap. 2.4.2) wird eine Unterkühlung der Strömung im Bereich der Dampfeinspeisung erreicht, die zu Kondensationsvorgängen führt. Zusätzlich gibt es noch einen – wenn auch geringen – Wärmeverlust über die Rohrwand.

3.3.1 Bilanzgleichungen der Energie- und Stoffströme

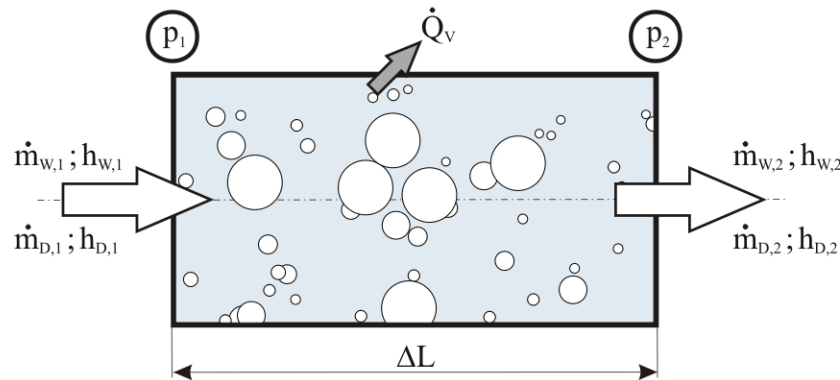


Abb. 3.4: Bilanzraum einer Wasser/Dampf-Strömung in einem Rohr

Zur Bilanzierung aller ein- und austretenden Ströme wird zunächst ein Bilanzraum definiert (Abb. 3.4). Dessen Energiebilanz lautet:

$$\underbrace{\dot{m}_{W1} \cdot h_{W1} + \dot{m}_{D1} \cdot h_{D1}}_{\text{bekannt}} = \underbrace{\dot{m}_{W2} \cdot h_{W2} + \dot{m}_{D2} \cdot h_{D2}}_{\text{unbekannt}} + \dot{Q}_v \quad (\text{Gl. 3.44})$$

und dessen Massenbilanz beträgt:

$$\dot{m}_{W1} + \dot{m}_{D1} = \dot{m}_{W2} + \dot{m}_{D2} = \dot{m} \quad (\text{Gl. 3.45})$$

Der Eintrittszustand ist dabei bekannt. Der Austrittszustand wird berechnet, indem folgendes angenommen wird:

- Der Dampf befindet sich an jedem Punkt der Rohrleitung im thermodynamischen Gleichgewicht, ist also stets gesättigt. Unter dieser Annahme sind Enthalpie und Dichte des Dampfes eindeutig durch den Druck p definiert.
- Zur Beschreibung des thermodynamischen Verhaltens des Wassers werden zwei unterschiedliche Ansätze verwendet: Thermodynamisches Gleichgewicht bei Ver-

dampfung des Wassers und thermodynamisches Nichtgleichgewicht bei Kondensation des Dampfes (Schwerpunktthema dieses Berichtes).

- Die Rohrwand wird unter zwei Annahmen modelliert: adiabat (thermisch isoliert, $\dot{Q}_v = 0$) und nicht adiabat (Wärmeverlust über die Rohrwand, $\dot{Q}_v \neq 0$).

3.3.1.1 Thermodynamisches Gleichgewicht

Im thermodynamischen Gleichgewicht ist die Temperatur von Flüssigkeit und Dampf gleich der zum vorhandenen Druck gehörenden Sättigungstemperatur. Dies gilt nur, wenn der Druckunterschied zwischen Blaseninnenraum und umgebender Flüssigkeit, der sich durch die Kapillarkraft einstellt, vernachlässigt wird. Kommt es zu einer Druckabnahme $\Delta p = p_2 - p_1$, verdampft genau die Menge der flüssigen Phase, die den Energiezuwachs durch den Druckabfall kompensiert. Diese Art des Phasenübergangs wird auch als *Nachverdampfung* bezeichnet.

Dies ist eine idealisierte Vereinfachung der physikalischen Vorgänge, da die fehlende Temperaturdifferenz als treibende Kraft für den Wärmeübergang theoretisch einen unendlich großen Wärmeübergangskoeffizienten α_p an der Phasengrenzfläche zur Folge hat. Das Temperaturgleichgewicht zwischen beiden Phasen stellt sich also in unendlich kurzer Zeit wieder ein.

Unter dieser Annahme kann der Dampfmassenstrom \dot{m}_{D2} am Austritt direkt berechnet werden, da die Enthalpie des Wassers h_{w2} der Siedeenthalpie h' beim Austrittsdruck p_2 entspricht. Somit gibt es in (Gl. 3.44) zwei unbekannte Größen. Mit (Gl. 3.45) können beide Parameter eindeutig bestimmt werden, indem zunächst (Gl. 3.45) mit h_{w2} erweitert und in (Gl. 3.44) eingesetzt wird:

$$\dot{m}_{D2} = \frac{\dot{m}_{W1} \cdot (h_{W1} - h_{W2}) + \dot{m}_{D1} \cdot (h_{D1} - h_{W2}) - \dot{Q}_v}{h_{D2} - h_{W2}} \quad (\text{Gl. 3.46})$$

Reicht die Energie des Dampfes nicht aus, das Wasser auf Sättigungstemperatur zu erwärmen, wird zunächst in (Gl. 3.46) ein negativer Austritts-Dampfmassenstrom berechnet. Damit wird in (Gl. 3.44) der Dampfmassenstrom $\dot{m}_{D2} = 0$ gesetzt und der Wassermassenstrom $\dot{m}_{W2} = \dot{m}$. In diesem Fall ergibt sich die Wasserenthalpie h_{w2} am Austritt zu:

$$h_{w2} = \frac{\dot{m}_{W1} \cdot h_{W1} + \dot{m}_{D1} \cdot h_{D1} - \dot{Q}_v}{\dot{m}} \quad (\text{Gl. 3.47})$$

3.3.1.2 Thermodynamisches Nichtgleichgewicht

Das thermodynamische Nichtgleichgewicht berücksichtigt, dass die zur Kondensation erforderliche Wärmemenge nur bei Vorhandensein einer treibenden Temperaturdifferenz zwischen Wasser und Dampf an die Phasengrenze gelangen kann. Diese entsteht durch die Ausbildung einer Grenzschicht an der wasserseitigen Oberfläche der Blase, die den Wärmeübergang behindert. Auskunft hierüber gibt der Wärmeübergangskoeffizient α_p (vgl. Kap. 3.3.2).

Der an der Phasengrenze auftretende Wärmestrom \dot{Q}_p entspricht dem Stoffübergang zwischen Dampf und Wasser:

$$\dot{Q}_p = \alpha_p \cdot A_p \cdot (t_{D1} - t_{W1}) = (\dot{m}_{D1} - \dot{m}_{D2}) \cdot r \quad (\text{Gl. 3.48})$$

Dabei ist r die Verdampfungsenthalpie am Eintritt ($h_1'' - h_1'$) und A_p beschreibt die gesamte existierende Phasengrenzfläche (siehe auch Kap. 3.2.2) und kann ausgedrückt werden durch:

$$A_p = a_i \cdot V_{\text{Bilanzraum}} \quad (\text{Gl. 3.49})$$

Mit (Gl. 3.45) ergeben sich die Massenströme für Wasser und Dampf am Austritt:

$$\dot{m}_{D2} = \dot{m}_{D1} - \frac{\dot{Q}_p}{r} \quad (\text{Gl. 3.50})$$

$$\dot{m}_{W2} = \dot{m} - \dot{m}_{D2} \quad (\text{Gl. 3.51})$$

Damit kann aus (Gl. 3.44) die Wasserenthalpie am Austritt des Bilanzraums bestimmt werden:

$$h_{W2} = \frac{\dot{m}_{W1} \cdot h_{W1} + \dot{m}_{D1} \cdot h_{D1} - \dot{m}_{D2} \cdot h_{D2} - \dot{Q}_v}{\dot{m}_{W2}} \quad (\text{Gl. 3.52})$$

3.3.1.3 Wärmeverlust über die Rohrwand

Die Abb. 3.5 zeigt einen Längsschnitt durch das Rohr inkl. Rohrwand (dunkelblau) und Isolierung (grau). Durch einen Gradienten zwischen der Temperatur der Strömung t_G und der Umgebung t_a entsteht ein nach außen fließender Wärmestrom:

$$\dot{Q}_v = \frac{t_G - t_a}{R_k} \quad (\text{Gl. 3.53})$$

wobei der resultierende Wärmedurchgangswiderstand der Wand R_k unter Annahme eines zylindrischen Rohres in Gl. 3.54 ermittelt wird.

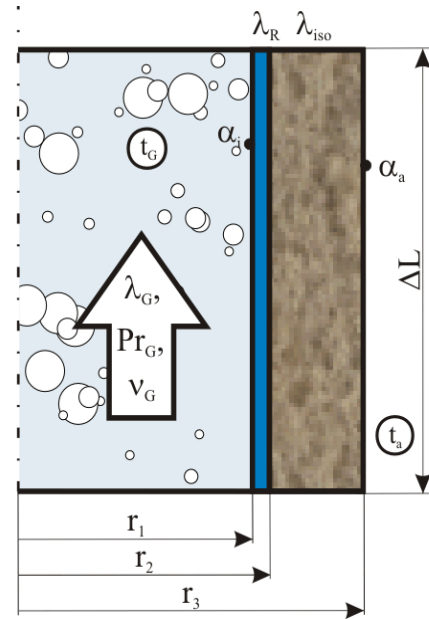


Abb. 3.5: Skizzierter Längsschnitt durch das betrachtete Rohr

$$R_k = \frac{1}{2\pi \cdot \Delta L} \left[\frac{1}{\alpha_i r_1} + \frac{1}{\lambda_R} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{\lambda_{iso}} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \frac{1}{\alpha_a r_3} \right] \quad (\text{Gl. 3.54})$$

Diese Gleichung beinhaltet den Wärmeübergang von der Zweiphasenströmung an die Rohrwand, die Wärmeleitung innerhalb von Rohrwand und Isolation sowie den Wärmeübergang von der Isolation zur Umgebung.

Der Wärmeübergangskoeffizient α_i an der Rohrinneenseite beträgt:

$$\alpha_i = \frac{Nu_i \cdot \lambda_G}{2r_1} \quad (\text{Gl. 3.55})$$

mit einer turbulenten Nusselt-Zahl nach [VDI-94b]:

$$Nu_i = \frac{\zeta (Re_G - 1000) \cdot Pr_G}{1 + 12,7 \sqrt{\frac{\zeta}{8}} (Pr_G^{2/3} - 1)}, \quad \zeta = \frac{1}{(1,82 \cdot \lg(Re_G) - 1,64)^2} \quad (\text{Gl. 3.56})$$

Die Reynolds-Zahl des Gemischs berechnet sich dabei aus:

$$Re_G = \frac{(J_D + J_W) \cdot 2r_1}{v_G} \quad (\text{Gl. 3.57})$$

Die Stoffwerte sind dabei je Zusammensetzung der Strömung abhängig von Druck und Temperatur entsprechend den Berechnungsvorschriften des homogenen Modells zu bilden.

Da die Wärmeverluste an der Rohrwand gegenüber den Vorgängen innerhalb der Strömung sehr gering sind (nach Testrechnungen abgeschätzt: maximal etwa 1:100), hat der Fehler bei der Berechnung der Stoffwerte keinen Einfluss auf das Gesamtergebnis der Simulation.

Folgende Werte sind gegeben (vgl. Abb. 3.5):

- Innenradius des Rohres: $r_1 = 97,65 \text{ mm}$,
- Außenradius des Rohres: $r_2 = 109,55 \text{ mm}$,
- Außenradius der Isolierung: $r_3 = 179,55 \text{ mm}$

oder wurden angenommen:

- Temperatur der Umgebung: $t_a = 20 \text{ °C}$,
- Wärmeübergangskoeffizient von der Isolierung zur Umgebung: $\alpha_a = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$,
- Wärmeleitfähigkeit des Isoliermaterials (Steinwolle): $\lambda_{\text{iso}} = 0,064 \text{ W/mK}$.

Die Wärmeleitfähigkeit der Rohrwand (λ_R) wird bei den Berechnungen als Funktion der Temperatur ermittelt.

3.3.2 Konvektiver Wärmeübergang an der Blasenoberfläche

Der Stoffübergang zwischen beiden Phasen findet an der Grenzfläche A_p statt. Dabei wird die verdampfende bzw. kondensierende Masse pro Zeiteinheit durch die Zu- bzw. Abfuhr von Wärme zur bzw. von der Phasengrenzfläche bestimmt (vgl. Abschnitt 3.3.1.2). Die Intensität dieses Wärmestroms \dot{Q}_p hängt daher sowohl von der Größe der Phasengrenzfläche als auch von der Höhe des Temperaturgradienten zwischen Dampf- und Wasserströmung ab:

$$\dot{Q}_p = \alpha_p \cdot A_p \cdot (t_D - t_W) \quad (\text{Gl. 3.58})$$

Zusätzlich muss auch ein endlicher Wärmeübergangskoeffizient α_p aufgrund der Behinderung des Wärmeübergangs durch die wasserseitig vorhandene Grenzschicht berücksichtigt werden. Dampfseitig wird angenommen, dass sich die Gasphase im thermodynamischen Gleichgewicht befindet und daher der Wärmeübergang unendlich schnell erfolgt. Der Fehler dieser Annahme bleibt gering, da der Dampfmassenstrom im Verhältnis zum Wassermassenstrom gering ist und somit Temperaturänderungen durch Überhitzung oder Unterkühlung des Dampfes nur geringe Wärmeströme zur Folge haben können.

Zur Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten α_p werden die Vorgänge an der Oberfläche einer Einzelblase betrachtet. Diese erfährt innerhalb der Wasserströmung einen Auftrieb und bewegt sich dadurch schneller in Strömungsrichtung als die Flüssigkeit. Sie gleicht damit dem Modell umströmter Körper, bei denen der Wärmeübergang folgendermaßen definiert ist:

$$\alpha_p = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{\bar{d}_B} \quad (\text{Gl. 3.59})$$

Dabei bestimmt sich die zur Berechnung der Nusselt-Zahl benötigte Reynolds-Zahl der als kugelförmig angenommenen Blasen:

$$\text{Re}_B = \frac{\mathbf{u}_{\text{rel}} \cdot \bar{d}_B}{\nu_w} \quad (\text{Gl. 3.60})$$

Die Geschwindigkeit u_{rel} entspricht der Relativgeschwindigkeit zwischen beiden Phasen mit der die einzelne Dampfblase von der Flüssigkeit umströmt wird (siehe Gl. 3.11).

Es wird angenommen, dass die Relativgeschwindigkeit der Gasblasen gegenüber der Flüssigkeit über dem Strömungsquerschnitt konstant ist und sich aus den globalen Volumenstromdichten beider Phasen berechnet:

$$\langle \mathbf{u}_{\text{rel}} \rangle = \frac{\mathbf{J}_D}{\langle \varepsilon \rangle} - \frac{\mathbf{J}_W}{1 - \langle \varepsilon \rangle} \quad (\text{Gl. 3.61})$$

Des Weiteren sind die Péclet-Zahl als Produkt aus der Reynolds-Zahl für die Blasen und der Prandtl-Zahl der Flüssigkeit

$$\text{Pe} = \text{Re}_B \cdot \text{Pr} \quad (\text{Gl. 3.62})$$

und die Jacob-Zahl als dimensionslose Unterkühlung definiert:

$$\text{Ja} = \frac{c_{p,w} \cdot (t_w - t_s)}{h'' - h'} \quad (\text{Gl. 3.63})$$

Nachfolgende Tab. 3.3 listet eine Auswahl dimensionsloser Korrelationen zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten α_p auf, die auf der Ermittlung der Nusselt-Zahl basieren. Dabei gliedern sich die Modelle in zwei Arten:

- Allgemeiner Wärmeübergang an einer umströmten Kugel, d.h. bei gleichen Randbedingungen ist der Wärmeübergangskoeffizient für Wärmeströme in den Körper hinein bzw. in Richtung vom Körper an die Umgebung gleich: $\alpha_{\text{Kondensation}} = \alpha_{\text{Verdampfung}}$ sowie
- Empirische Modelle aus Kondensationsexperimenten bei denen diese Theorie nicht mehr gilt: $\alpha_{\text{Kondensation}} \neq \alpha_{\text{Verdampfung}}$.

Tab. 3.3: Übersicht über Modelle zur Bestimmung der Nusselt-Zahl für den Wärmeübergang an kugelförmigen Körpern

Jahr	Autor	Gleichung zur Berechnung der Nusselt-Zahl	Anmerkung
1967	G.A. Hughmark [HUG-67]	$\text{Nu} = 2 + 0,6 \cdot \text{Re}_B^{1/2} \cdot \text{Pr}^{1/3} \quad (1)$ <p>→ für $0 \leq \text{Re}_B \leq 450$ $0 \leq \text{Pr} \leq 250$</p> $\text{Nu} = 2 + 0,27 \cdot \text{Re}_B^{0,62} \cdot \text{Pr}^{1/3} \quad (2)$ <p>→ für $\text{Re}_B > 450$ $0 \leq \text{Pr} \leq 250$</p>	Wärmeübergang an festen Kugeln, Zweikomponentensystem
1973	M. Akiyama [ZES-95]	$\text{Nu}_c = 0,37 \cdot \text{Re}_B^{0,6} \cdot \text{Pr}^{1/3}$	Wärmeübergang zwischen siedender Flüssigkeit und sich bewegenden Dampfblasen
1975	V. Gnielinski [VDI-94c]	$\text{Nu} = \text{Nu}_{\min} + \left(\text{Nu}_{\text{lam}}^2 + \text{Nu}_{\text{turb}}^2 \right)^{1/2}$ <p>$\text{Nu}_{\min} = 2$ für Kugel</p> $\text{Nu}_{\text{lam}} = 0,664 \cdot \text{Re}_B^{1/2} \cdot \text{Pr}^{1/3}$ $\text{Nu}_{\text{turb}} = \frac{0,037 \cdot \text{Re}_B^{0,8} \cdot \text{Pr}}{1 + 2,443 \cdot \text{Re}_B^{-0,1} (\text{Pr}^{2/3} - 1)}$	Wärmeübergang an überströmten festen Kugeln → für $1 \leq \text{Re}_B \leq 10^6$ $0,7 \leq \text{Pr} \leq 600$
1978	R. Clift, J.R. Grace, M.E. Weber [KAM-02]	$\text{Nu} = 1 + \frac{0,752}{\text{Pr}^{0,139}} \left(1 + \frac{1}{\text{Pe}} \right) \text{Pe}^{0,472}$	
1979	S.S. Kutateladze [KUS-79]	$\text{Nu} = 2 + 0,03 \cdot \text{Re}_B^{0,54} \text{Pr}^{1/3} +$ $+ 0,35 \cdot \text{Re}_B^{0,58} \text{Pr}^{0,35}$ <p>→ für $1 \leq \text{Re}_B^{0,54} \text{Pr}^{1/3} \leq 10^3$</p>	Wärmeübergang an einer umströmten Kugel bei quasiisothermer, stationärer Strömung
1982	J.E. Kelly M. Kazimi [ZES-95]	$\text{Nu}_c = \max \left(\frac{12}{\pi} \text{Ja}; 2 + 0,74 \cdot \text{Re}_B^{1/2} \right)$	Wasser/Dampf-Strömung
1991	Y. Hori, S. Toda [KAM-02]	$\text{Nu}_c = 0,02 \cdot \text{Re}_B \cdot \text{Pr}$	

1992	Y.M. Chen, F. Mayinger [CHM-92]	$Nu_c = 0,6 \cdot Re_B^{0,6} \cdot Pr^{1/2}$ → vor Ablösung (detachment) → $100 \leq Re_B \leq 10^3$ $Nu_c = 0,185 \cdot Re_B^{0,7} \cdot Pr^{1/2}$ → nach Ablösung, $0 \leq Re_B \leq 10^4$	Blasenbildung an der Einspeisung (Ablösungspunkt: wenn Blase gerade abreißt) beschränkter Bereich für Re
1995	O. Zeitoun, M. Shoukri [ZES-95]	$Nu_c = 2,04 \cdot Re_B^{0,61} \cdot Ja^{-0,308} \cdot \varepsilon^{0,328}$	abhängig von Jakob-Zahl und Dampfgehalt

Acht der aufgeführten Modelle wurden miteinander verglichen, indem die Autoren die Kondensation einer einzelnen Blase innerhalb einer Wasserströmung bei einem Druck von 20 bar und einer gegebenen Unterkühlung des Wassers von 1,5 K berechneten.

Abb. 3.6 zeigt den zeitlichen Verlauf des sich durch die Kondensation verringernden Blasendurchmessers. Das Modell nach ZEITOUN musste bei diesem Vergleich unberücksichtigt bleiben. Ursache dafür ist der Umstand, dass der zur Berechnung der Nusselt-Zahl benötigte Dampfgehalt bei der Betrachtung einer Einzelblase nicht ermittelt werden kann.

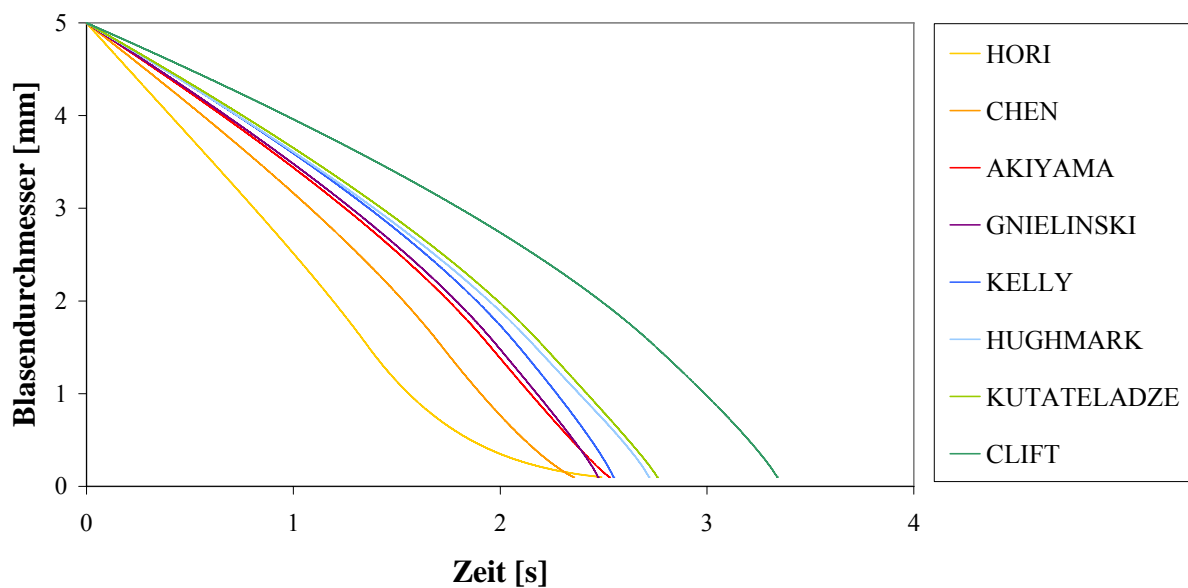


Abb. 3.6: Vergleich von ausgewählten Modellen zur Berechnung der Nusselt-Zahl

Die getesteten Modelle weisen einen qualitativ unterschiedlichen Kurvenverlauf auf. Das beschleunigte Kollabieren der Blase, was bei fünf Modellen zu beobachten ist, wird durch die Druckdifferenz zwischen Dampfblase und umgebender Flüssigkeit verursacht. Diese Differenz ergibt sich durch die an der Oberfläche der Blase wirkende Spannung. Beim Schrumpfen des Durchmessers steigt der Druck innerhalb der Dampfblase an. Durch diese lokale Er-

höhung der Sättigungstemperatur steigt auch die Unterkühlung des die Blase umgebenden Wassers an und der Kondensationsvorgang wird beschleunigt. Im Gegensatz dazu berechnet sich nach den Modellen von HORI, CHEN und AKIYAMA eine Verzögerung der Kondensation bei sich verkleinerndem Blasendurchmesser.

Die ermittelten Zeitspannen bis zum Verschwinden der Blase unterscheiden sich nicht unerheblich. Das Modell nach CHEN berechnet die kürzeste Zeit (2,3 s) bis zum Verschwinden der Blase und nach CLIFT werden dazu 3,4 s benötigt. Nach GNIELINSKI und AKIYAMA kondensiert die Blase bei unterschiedlichem Kurvenverlauf nahezu gleich schnell. Aus der Untersuchung dieser Kurvenverläufe wird die Notwendigkeit einer experimentellen Verifikation der Modelle erkennbar.

3.4 Druckverlauf entlang der Rohrleitung

In der betrachteten Rohrleitung treten innerhalb der Strömung Druckverluste auf, die von der Anzahl der existierenden Phasen beeinflusst werden. Ist das Fluid einphasig, unterscheidet man drei Druckverluste, bedingt durch:

- (1) **Höhenunterschied,**
- (2) **Reibung** des Fluids **an der Rohrwand** und
- (3) **Einzelwiderstände** (bei Einbauten wie Krümmern, Rohrbögen, Armaturen, Querschnittsänderungen) infolge zusätzlicher Verwirbelung der Strömung.

Entsteht innerhalb der Rohrleitung eine Zweiphasenströmung, treten zusätzliche Druckverluste auf:

- (4) durch **Reibung zwischen beiden Phasen** und
- (5) durch die **Beschleunigung der Phasen**, einerseits infolge des Reibungs- und hydrostatischen Druckverlustes, andererseits durch Phasenumwandlungen.

3.4.1 Einphasiger Druckverlust

Der einphasige Gesamtdruckverlust Δp_{EP} innerhalb eines betrachteten Bilanzraums der Länge ΔL berechnet sich aus den drei genannten Anteilen:

- bei geraden Rohren mit konstantem Durchmesser:

$$(\Delta p_{EP})_{\Delta L} = p_1 - p_2 = \Delta p_{H,EP} + \Delta p_{R,EP} \quad (\text{Gl. 3.64})$$

- bei Einbauten:

$$(\Delta p_{EP})_{\Delta L} = p_1 - p_2 = \Delta p_{H,EP} + \Delta p_{E,EP} \quad (\text{Gl. 3.65})$$

3.4.1.1 Hydrostatischer Druckverlust

Dieser Druckverlust tritt in geneigten Rohrleitungen auf. Es gilt der Zusammenhang:

$$\Delta p_{H,EP} = \rho_F \cdot g \cdot \sin(\gamma) \cdot \Delta L \quad (\text{Gl. 3.66})$$

wobei ρ_F die Dichte des einphasig strömenden Fluids, g die Erdbeschleunigung und γ den Winkel zwischen Strömungskanal und der Waagerechten darstellen. Bei Rohrbögen oder -winkeln, die die Rohrleitung in die Senkrechte überführen, muss beachtet werden, dass dort nur der vertikale Anteil der gesamten Bauteillänge (bezogen auf die Mittellinie) zu berücksichtigen ist.

3.4.1.2 Reibungsdruckverlust in geraden Rohrleitungen mit konstantem Durchmesser

Dieser Druckverlust wird bestimmt durch die materialabhängige Wandrauigkeit k und den sich damit auch strömungsabhängig einstellenden Rohrreibungsbeiwert λ . Dabei gilt für die Reynolds-Zahl des Fluids:

$$\text{Re}_F = \frac{J_F \cdot \rho_F \cdot d_i}{\mu_F} \quad (\text{Gl. 3.67})$$

Man unterscheidet drei Rauigkeitsbereiche:

(1) Technisch glatte Oberflächen ($k \approx 0$)

Dabei ist die Berechnung des Rohrreibungsbeiwertes λ nur abhängig von der Strömungsform und es gilt:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}_F} \quad \text{Re}_F \leq 2320 \quad (\text{Gl. 3.68})$$

$$\lambda \approx \frac{0,309}{\left[\lg \left(\frac{\text{Re}_F}{7} \right) \right]^2} \quad \text{Re}_F > 2320 \quad (\text{Gl. 3.69})$$

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{\text{Re}_F}} \quad 3000 \leq \text{Re}_F \leq 10^5 \quad \text{nach BLASIUS} \quad (\text{Gl. 3.70})$$

$$\lambda = 0,0054 + \frac{0,3964}{\text{Re}_F^{0,3}} \quad 2 \cdot 10^4 \leq \text{Re}_F \leq 2 \cdot 10^6 \quad \text{nach HERMANN} \quad (\text{Gl. 3.71})$$

$$\lambda = \frac{1}{\left[2 \cdot \lg(\text{Re}_F \cdot \sqrt{\lambda}) - 0,8\right]^2} \quad \text{Re}_F > 10^6 \quad \text{nach PRANDTL} \quad (\text{Gl. 3.72})$$

(Gl. 3.68) und (Gl. 3.69) sind aus [ROM-00], die (Gl. 3.70) - (Gl. 3.72) aus [VDI-94a] entnommen.

(2) Übergangsgebiet: glatt → vollkommen rau

Die Trennung zu vollkommen rauher Oberfläche bildet eine Grenzkurve, aus der zunächst eine Grenz-Reynolds-Zahl Re_g ermittelt wird:

$$\text{Re}_g = \frac{\sqrt{\lambda}}{200 \cdot (d_i/k)} \quad (\text{Gl. 3.73})$$

wobei sich das hier verwendete λ aus (Gl. 3.75) berechnet. Ist $\text{Re}_F < \text{Re}_g$ befindet man sich im Übergangsgebiet und λ muss iterativ neu ermittelt werden:

$$\lambda = \frac{1}{\left\{-2 \cdot \lg\left[\frac{2,51}{\text{Re}_F \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{1}{3,71 \cdot (d_i/k)}\right]\right\}^2} \quad (\text{Gl. 3.74})$$

(3) Vollkommen rau

Bei vollkommen rauher Wandoberfläche ist λ nur vom Verhältnis d_i/k abhängig:

$$\lambda = \frac{1}{\left[2 \cdot \lg(d_i/k) + 1,14\right]^2} \quad (\text{Gl. 3.75})$$

Mit dem so bestimmten Rohrreibungsbeiwert λ berechnet sich der Reibungsdruckverlust zu:

$$\Delta p_{R,EP} = \lambda \cdot \frac{\rho_F}{2} \cdot J_F^2 \cdot \frac{\Delta L}{d_i} \quad (\text{Gl. 3.76})$$

Die Gl. (3.74) und (3.75) sind [VDI-94a] entnommen.

3.4.1.3 Druckverlust in Einbauten

Bei Einbauten innerhalb der Rohrleitung treten zusätzlich zur Reibung des Fluids an der Rohrwand Einzelwiderstände auf, die durch eine turbulente Verwirbelung innerhalb der Strömung hervorgerufen werden. Dieser Einfluss wird durch den Widerstandsbeiwert ζ erfasst, wobei zu beachten ist, ob ζ den Druckverlust durch Wandreibung bereits enthält. Man unterscheidet Einbauten mit konstantem Durchmesser und solche, bei denen eine Querschnittsänderung auftritt. In diesem Bericht werden die Berechnungen zu den Einbauten erläutert, die sich im modellierten Teil der Rohrleitung des Teststreckenkreislaufs befinden (vgl. Kap. 3.1.1 sowie Anhang 9.1).

(1) Bögen

Bei Rohrbögen bleibt der Durchmesser auf der Länge ΔL konstant. Abb. 3.7 zeigt einen Bogen mit den konstruktiven Parametern, die in (Gl. 3.77) verwendet werden.

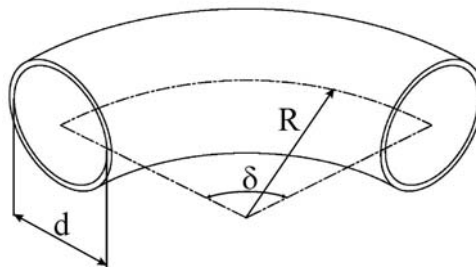


Abb. 3.7: Rohrbogen

Nach [TSI-75] berechnet sich der Druckverlust zu:

$$\Delta p_{E,EP} = \left(\zeta_B + \lambda \cdot \frac{\delta^\circ}{180^\circ} \cdot \pi \cdot \frac{R}{d} \right) \cdot \frac{\rho_F}{2} \cdot j_F^2 \quad (\text{Gl. 3.77})$$

Der Rohrreibungsbeiwert λ wird nach Kap. 3.4.1.2 bestimmt. Die Ermittlung des Widerstandsbeiwertes ζ_B folgt aus [TSI-75] (nach IDELSCHIK):

$$\zeta_B = \frac{C_\delta \cdot C_{Re} \cdot C_K \cdot C_Q}{\sqrt{R/d}} \quad (\text{Gl. 3.78})$$

Folgende Beiwerte gelten für die nachzubildenden Bögen der Rohrleitung [TSI-75]:

- Umlenkbeiwert: $C_\delta = 0,21$ für $\delta = 90^\circ$
- Reynolds-Zahl-Beiwert: $C_{Re} = 20,2 \cdot Re^{-0,25}$ für $3 \cdot 10^3 < Re < 10^5$
 $C_{Re} = 1$ für $Re > 10^5$

- Rauigkeitsbeiwert:
 (bei $4 \cdot 10^4 < Re < \infty$)

$C_K = 1$	für $0 < k/d < 0,47 \cdot Re^{-0,75}$
$C_K = 1 + k \cdot d \cdot 10^3$	für $0,47 \cdot Re^{-0,75} < k/d < 10^{-3}$
$C_K = 2$	für $10^{-3} < k/d$
- Beiwert für Querschnittsformen: $C_Q = 1$

für Kreisquerschnitt

(2) Reduzierungen

Die in der Rohrleitung vorhandenen Reduzierungen sind Diffusoren, konisch erweiternde Rohre mit gleichmäßiger Querschnittsvergrößerung (vgl. Abb. 3.8)

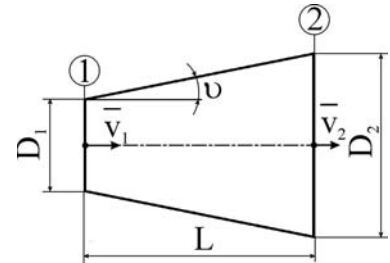


Abb. 3.8: Diffusor

Der Druckverlust ergibt sich durch Umstellung der entsprechenden BERNOULLI-Gleichung:

$$\Delta p_{E,EP} = \frac{\rho_F}{2} \cdot J_{F,1}^2 \cdot \eta_u \quad \text{mit} \quad \eta_u = \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - \zeta_{Dif} \right] \quad (\text{Gl. 3.79})$$

η_u wird als unterer Wirkungsgrad bezeichnet und bestimmt sich für die in der Rohrleitung vorhandenen Reduzierungen aus [TSI-75] zu 0,4 (Reduzierung DN150/200) bzw. 0,42 (Reduzierung DN200/250).

(3) T-Stücke

Bei Rohrverzweigungen bzw. -vereinigungen (Abb. 3.9) berücksichtigt man bei der Berechnung des Druckverlustes die Anteile der durchgehenden und abzweigenden Strömungen.

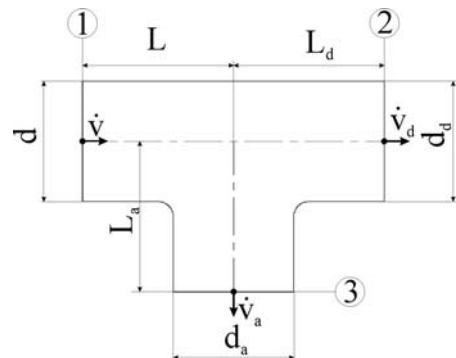


Abb. 3.9: T-Stück

Aus der BERNOULLI-Gleichung ergeben sich die Druckverluste:

$$\Delta p_{E,EP} = \frac{\rho_F}{2} \cdot J_F^2 \left(2 \cdot \lambda \cdot \frac{L}{d} + \zeta_D \right) \quad \text{für den Durchgang bzw.} \quad (\text{Gl. 3.80})$$

$$\Delta p_{E,EP} = \frac{\rho_F}{2} \cdot J_F^2 \left(2 \cdot \lambda \cdot \frac{L}{d} + \zeta_A \right) \quad \text{für den Abzweig.} \quad (\text{Gl. 3.81})$$

Dabei gelten folgende Vereinfachungen, wenn die T-Stücke jeweils an einer Seite blindgeflanscht sind (vgl. Anhang 9.1):

- generell: $d = d_A = D_D, L = L_A = L_D$
- Abzweig: $\dot{V} = \dot{V}_A \rightarrow \bar{u} = \bar{u}_A, \lambda = \lambda_A$
- Durchgang: $\dot{V} = \dot{V}_D \rightarrow \bar{u} = \bar{u}_D, \lambda = \lambda_D$

Der Rohrreibungsbeiwert λ wird nach Kap. 3.4.1.2 bestimmt. Aus [TSI-75] sind die Widerstandsbeiwerte für (Gl. 3.80) und (Gl. 3.81) entnommen:

- T-Stück DN200/200: Vereinigung, Abzweig, $\zeta_A = 0,9$
- T-Stück DN250/250: Verzweigung, Durchgang, $\zeta_D = 0,02$

(4) Armaturen

Die Widerstandsbeiwerte für die in diesem Bericht modellierten Armaturen sind vom Hersteller angegeben. Es wird dabei angenommen, dass diese Werte experimentell bestimmt wurden und daher den Reibungsdruckverlust an der Rohrwand bereits enthalten. Der Druckverlust innerhalb dieser Rohrelemente bestimmt sich entsprechend:

$$\Delta p_{E,EP} = \zeta_A \cdot \frac{\rho_F}{2} \cdot J_F^2 \quad (\text{Gl. 3.82})$$

Die Werte für ζ_A betragen für die Armaturen 442 AVA: 5,8 und 444 AHA: 0,06 (Bezeichnungen siehe Tab. 3.1 und Anhang 9.1).

3.4.2 Zweiphasiger Druckverlust

Der zweiphasige Gesamtdruckverlust Δp_{ZP} innerhalb eines betrachteten Bilanzraums der Länge ΔL berechnet sich aus den vier Anteilen:

- bei geraden Rohren mit konstantem Durchmesser:

$$(\Delta p_{ZP})_{\Delta L} = p_1 - p_2 = \Delta p_{H,ZP} + \Delta p_{R,ZP} + \Delta p_{B,ZP} \quad (\text{Gl. 3.83})$$

- bei Einbauten:

$$(\Delta p_{ZP})_{\Delta L} = p_1 - p_2 = \Delta p_{H,ZP} + \Delta p_{B,ZP} + \Delta p_{E,ZP} \quad (\text{Gl. 3.84})$$

wobei sich die Einzeldruckverluste nahezu analog zu den Einphasigen ermitteln. Die benötigten Stoffwerte des Gemischs werden dabei aus denen der einzelnen Phasen - gewichtet mit dem Dampfgehalt - berechnet.

3.4.2.1 Hydrostatischer Druckverlust

Der zweiphasige Druckverlust infolge Höhenunterschieds berechnet sich analog zu (Gl. 3.66), wobei ρ_F die Gemischdichte darstellt:

$$\rho_F = \varepsilon \cdot \rho_D + (1 - \varepsilon) \cdot \rho_W \quad (\text{Gl. 3.85})$$

3.4.2.2 Reibungsdruckverlust nach LOCKHART/MARTINELLI

Der zweiphasige Reibungsdruckverlust entsteht sowohl durch Impulsübertragung an die Rohrwand als auch durch Impulsübertragung der Phasen untereinander. Dieser Anteil der Phasenreibung hängt sowohl von der vorliegenden Strömungsform als auch vom jeweiligen -zustand (laminar oder turbulent) der beiden Phasen ab. Bei einem geringen Dampfgehalt bzw. einem laminaren Strömungszustand ist der Anteil der Phasenreibung gering und nimmt mit steigendem Dampfgehalt oder einem Umschlag zur turbulenten Strömung stark zu.

Zur analytischen Beschreibung des Reibungsdruckverlustes müssen sowohl die Geschwindigkeits- als auch die Phasenverteilungen bekannt sein, was nur selten der Fall ist. Daher wurden verschiedene Verfahren entwickelt, die vereinfachende Annahmen treffen und auf dem homogenen bzw. dem Schlupfmodell beruhen. Die Methode nach LOCKHART / MARTINELLI [HUJ-75] betrachtet die Strömung nach dem Schlupfmodell. Zunächst werden die Reibungsdruckverluste der an der Strömung beteiligten Einzelphasen bestimmt, wobei angenommen wird, dass die Phasen jeweils allein im Rohr strömen, d.h. jeweils den gesamten Rohrquerschnitt ausfüllen. Mit Hilfe der Korrekturfunktion Φ - auch Zweiphasenmultiplikator genannt - berechnet man den zweiphasigen Reibungsdruckverlust:

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta L} \right)_{R,ZP} = \Phi_W^2 \left(\frac{\Delta p}{\Delta L} \right)_{R,W} = \Phi_D^2 \left(\frac{\Delta p}{\Delta L} \right)_{R,D} \quad (\text{Gl. 3.86})$$

Aus dieser Gleichung erhält man das Verhältnis der Funktionen Φ_D zu Φ_W , abhängig vom Quotienten der Reibungsdruckverluste beider Phasen, das als LOCKHART / MARTINELLI - Parameter bezeichnet wird:

$$X_{LM} = \left[\frac{(\Delta p / \Delta L)_{R,W}}{(\Delta p / \Delta L)_{R,D}} \right]^{0,5} = \frac{\Phi_D}{\Phi_W} \quad (\text{Gl. 3.87})$$

Die Reibungsdruckverluste der Einzelphasen berechnen sich dabei nach den Gleichungen 3.67 - 3.76.

Für die Bestimmung der Funktion Φ aus dem Parameter X_{LM} wurden verschiedene Modelle entwickelt, von denen hier nur das Verfahren nach WALLIS [HUIJ-75] beschrieben werden soll, da es sowohl alle Strömungszustände als auch verschiedene Rohrneigungen berücksichtigt. Dieses Verfahren beruht ebenfalls auf dem Schlupfmodell und nimmt an, dass beide Phasen in getrennten Zylindern strömen, deren Querschnittsflächen zusammen den realen Rohrquerschnitt ergeben. Der Druckverlust in jedem Zylinder ist dem realen Druckabfall der gesamten Strömung gleich und wird aus der Einphasenströmung mit mittleren Geschwindigkeitswerten berechnet.

Der allgemeine Lösungsansatz ist hierbei:

$$\left(1/\Phi_D^2\right)^{1/n} + \left(1/\Phi_W^2\right)^{1/n} = 1 \quad (\text{Gl. 3.88})$$

Daraus folgt mit (Gl. 3.87):

$$\Phi_D^2 = \left[1 + X_{LM}^{2/n}\right]^n \quad X_{LM} < 1 \quad (\text{Gl. 3.89})$$

$$\Phi_W^2 = \left[1 + 1/X_{LM}^{2/n}\right]^n \quad X_{LM} > 1 \quad (\text{Gl. 3.90})$$

wobei der Parameter n vom Strömungszustand abhängt:

$n = 2,9$	$Re_W < 10^3, Re_D < 10^3$	
$n = 3,5$	$Re_W < 10^3, Re_D > 10^3$	Die Reynolds-Zahlen der einzelnen Phasen sind gemäß (Gl. 3.67) zu bestimmen.
	$Re_W > 10^3, Re_D < 10^3$	
$n = 4$	$Re_W > 10^3, Re_D > 10^3$	

3.4.2.3 Beschleunigungsdruckverlust

Durch den Druckabfall infolge von Reibung und Höhe steigt das spezifische Volumen der kompressiblen Gasphase an und bewirkt eine Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit. Dieser Effekt hat einen Beschleunigungsdruckverlust zur Folge, der besonders bei Strömungen mit Stoffübergang an den Phasengrenzen zu beachten ist.

$$\Delta p_{B,ZP} = \hat{m}^2 \left(1/\rho_{1,2} - 1/\rho_{1,1}\right) \quad (\text{Gl. 3.91})$$

mit der Impulsdichte

$$\frac{1}{\rho_I} = \frac{(1 - \dot{x})^2}{(1 - \varepsilon) \cdot \rho_W} + \frac{\dot{x}^2}{\varepsilon \cdot \rho_D} \quad (\text{Gl. 3.92})$$

3.4.2.4 Druckverlust in Einbauten

Der Druckverlust einer Zweiphasenströmung innerhalb von Einbauten kann in guter Näherung nach der Methode von Heckle berechnet werden:

$$\Delta p_{E,ZP} = \zeta \cdot \frac{\hat{m}^2}{2 \cdot \rho_{\text{äqu}}} \quad (\text{Gl. 3.93})$$

Der Widerstandsbeiwert ζ wird dabei analog zur Einphasenströmung berechnet (vgl. Kap. 3.4.1.3). Bei der Ermittlung der äquivalenten Dichte $\rho_{\text{äqu}}$ sind zwei Fälle zu unterscheiden, abhängig von den Hauptursachen für den Druckverlust und vom Zustand der Strömung am Austritt des Rohrelements:

- Der Druckverlust resultiert hauptsächlich aus einer Reibungswirkung (z.B. bei Drosseln, Blenden mit großem Öffnungsverhältnis), dabei ergibt sich die äquivalente Dichte aus der homogenen Dichte.

$$\rho_{\text{äqu}} = \rho_{\text{hom}} = \frac{1}{\left(\frac{\dot{x}}{\rho_D} + \frac{1-\dot{x}}{\rho_W} \right)} \quad \frac{\rho_W}{\rho_D} \frac{\dot{x}}{1-\dot{x}} < 0,3; \quad \frac{\rho_W}{\rho_D} \frac{\dot{x}}{1-\dot{x}} > 1000 \quad (\text{Gl. 3.94})$$

- Der Druckverlust wird hauptsächlich durch Trägheitswirkung (z.B. Blenden und Ventile mit kleinem Öffnungsverhältnis) verursacht, hier ergibt sich die äquivalente Dichte aus der Impulsdichte.

$$\rho_{\text{äqu}} = \rho_I = \frac{1}{\frac{(1-\dot{x})^2}{(1-\varepsilon) \cdot \rho_W} + \frac{\dot{x}^2}{\varepsilon \cdot \rho_D}} \quad 0,3 \leq \frac{\rho_W}{\rho_D} \frac{\dot{x}}{1-\dot{x}} \leq 1000 \quad (\text{Gl. 3.95})$$

3.4.2.5 Quantitativer Vergleich der Zweiphasen-Druckverluste

Anhand einer einfachen Rechnung sollen die Anteile der einzelnen Druckverluste am gesamten Druckabfall über eine vertikale Rohrleitung von 8 m Länge ohne Einbauten quantitativ verdeutlicht werden. Als Randbedingungen sind der Druck mit 20 bar und Massenströme von $\dot{m}_W = 25 \text{ kg/s}$ und $\dot{m}_D = 0,1 \text{ kg/s}$ gegeben. Wasser und Dampf stehen im thermodynamischen Gleichgewicht. Aus der Berechnung des zweiphasigen Druckverlustes entsprechend (Gl. 3.83) ergibt sich:

- gesamter Druckabfall: $\Delta p_{ZP} = 54,5 \text{ kPa}$,
- Anteil hydrostatischer Druckverlust: $\Delta p_{H,ZP} / \Delta p_{ZP} = 95,2 \%$,
- Anteil Reibungsdruckverlust: $\Delta p_{R,ZP} / \Delta p_{ZP} = 4,5 \%$ sowie

- Anteil Beschleunigungsdruckverlust: $\Delta p_{B,ZP} / \Delta p_{ZP} = 0,3 \%$.

Man erkennt, dass der Hauptanteil am gesamten Druckabfall über die vertikale Rohrleitung durch die Hydrostatik hervorgerufen wird, und der Anteil der Reibung bei kleinen Dampfgehalten demgegenüber gering ist. Der Beschleunigungsdruckverlust liegt deutlich unter 1 % und ist somit kleiner als die Toleranzgrenze des Messwert-Erfassungssystems. Außerdem ist der Fehler der Drift-Flux- und der Wärmeübergangsmodelle wesentlich größer als 1 %. Aus diesen Gründen wird der Beschleunigungsdruckverlust im vorliegenden Bericht bei der Modellierung der Strömungsvorgänge vernachlässigt.

3.4.3 Druckiteration

Innerhalb des Kondensationsmodells wird nur der Abschnitt des Teststreckenkreislaufs vom Eintritt des Wassers in die Testsektion bis zum Austritt in die Dampftrommel simuliert (vgl. Kap. 3.1.1). Daher sind Eintrittsbedingungen für Druck und Massenströme für dieses Teilstück notwendig, um eine geschlossene Druckberechnung innerhalb des Kreislaufs durchführen zu können. Die Randbedingungen für die Massenströme der beiden Phasen sind durch experimentelle Daten gegeben. Der hinter der Pumpe gemessene Druck (vgl. Abb. 3.1) ist jedoch fehlerbehaftet. Er hat großen Einfluss auf die Kondensationsintensität des Dampfes, da er durch die zugehörige Sättigungstemperatur die Unterkühlung im Teststreckenkreislauf bestimmt. Der direkte Messwert kann daher nicht verwendet werden.

Am Austritt der Zweiphasenströmung aus der Testsektion herrschen in der Dampftrommel Sättigungsbedingungen, die relativ genau messtechnisch erfasst werden können. Somit ist die Wassertemperatur am Eintritt in die Teststrecke (also bei $L = 0$) gleich der Siedetemperatur bei gegebenem Druck in der Dampftrommel abzüglich der in Abschnitt 3.1.1 bestimmten Unterkühlung Δt .

Aus diesen Gründen ist eine Iteration notwendig, die ausgehend von geeigneten Anfangsbedingungen für den Druck an der Stelle $L = 0$ die Berechnung des gesamten Teilstücks (B) solange wiederholt, bis der Druck am Austritt aus der Teststrecke gleich dem gegebenen Druck an der Dampftrommel ist. Die Abbruchbedingung lautet $|t_{D,Austritt} - t_{D,DT}| < 10^{-3}$. Die zu Beginn der Iteration festgelegten Ober- ($p_{OG} = p_{DT} + 5 \text{ bar}$) und Untergrenzen ($p_{UG} = p_{DT} - 5 \text{ bar}$) für den Druck werden mit dem Verfahren der Intervallschachtelung immer weiter eingengt, bis die Abbruchbedingung erreicht ist. Dabei ergibt sich der Druck p am Eintritt in die Teststrecke aus der arithmetischen Mittlung beider Grenzen. In Abhängigkeit der Differenz

zwischen Austrittsdruck und p_{DT} wird eine der beiden Grenzen modifiziert. Diese Druckiteration ist als äußere Schleife dem Kondensationsmodell überlagert.

3.5 Programmablauf

Die in Kap. 3 erläuterten Algorithmen zur mathematischen Bilanzierung einer Wasser/Dampf-Strömung wurden in dem Programm „Simulation_Teststrecke.exe“ umgesetzt. Im weiteren Verlauf dieses Abschnitts sollen Aufbau und Funktion dieses Programms beschrieben werden, dessen schematischer Ablaufplan sich im Anhang 9.5 befindet.

Als Eingangsdatensätze benötigt das Programm Informationen über die experimentellen und geometrischen Randbedingungen. Zur Nachrechnung der Kondensationsexperimente (vgl. Kap. 2.4.2) wurden beispielsweise folgende Dateien verwendet:

- | | |
|---------------------------------------|--|
| (1) „K12 - p10 - dp100.txt“ | } Experiment – Datensätze (siehe Anhang 9.3) |
| (2) „K12 - p10 - dp70.txt“ | |
| (3) „K12 - p20 - dp160.txt“ | |
| (4) „K12 - p20 - dp80.txt“ | |
| (5) „DS1 - Geometrie_Rohrleitung.txt“ | } Geometrie – Datensätze (siehe Tab. 3.1) |
| (6) „DS2 - VGE.txt“ | |

Zu Beginn des Programms wird ein ausgewählter Experimentdatensatz eingelesen und die Anzahl der untersuchten Einspeisehöhen bestimmt. Dadurch sind die Anfangsbedingungen für den Wasser- und Dampfmassenstrom sowie der Druckverlust an der Drosselarmatur gegeben. Danach erfolgt das Einlesen der Geometriedatensätze. Satz (5) enthält die in Tab. 3.1 beschriebene Geometrie des modellierten Teilstücks und Satz (6) die Abstände der einzelnen Dampf-Einspeisehöhen zum Gittersensor.

Nun folgen drei ineinander verschachtelte Schleifen. Die äußere dient zur Durchführung der Simulation für jede Einspeisehöhe des Experimentdatensatzes. Dazu wird zunächst ein dynamisches Array erstellt, welches abhängig vom variabel einzustellenden ΔL aus der gegebenen Geometrie die einzelnen Rohrabschnitte nodalisiert. Dabei werden Zeiger auf die Höhen der Dampfeinspeisung, die Position des Gittersensors und die Höhe der Drosselarmatur mit definiertem Druckverlust gesetzt. Die mittlere Schleife ergibt sich aus der Druckiteration.

Die innere Schleife beinhaltet die eigentliche Simulation des Teilstücks (B), welche für jedes nodalisierte Volumenelement (VE) mit der Länge ΔL die im Folgenden näher erläuterten Berechnungen durchführt. Zu Beginn sind die Anfangsbedingungen für Druck, Temperaturen

und Massenströme bekannt. Die Höhe L ergibt sich durch Summation der Längen ΔL der bearbeiteten VE. Zunächst wird geprüft, ob sich die Berechnung schon in Höhe der Dampf-einspeisung befindet, da dort der Dampfmassenstrom um den eingespeisten Massenstrom erhöht wird und somit auch der Gesamtmassenstrom um diesen Betrag zunimmt. Außerdem wird – bei einer Simulation, die nur auf Modellgleichungen beruht – der Primärblasendurchmesser gemäß Kap. 3.2.2.1 bestimmt. Die Stoffwerte der Wasser/Dampf-Strömung am Eintritt in das VE werden mit Hilfe der „LibIF97“ – einer Stoffdatenbibliothek der Hochschule Zittau/Görlitz – berechnet. Es folgt die Bestimmung des thermodynamischen Eintrittszustands der Strömung, wobei man hier bei der Berechnung des Dampfgehalts zwischen den in Kap. 3.2.1.2 erläuterten Modellen wählen kann. Die Unterprozedur „calc_QV“ berechnet daraus den Verlustwärmestrom über den Wandabschnitt des VE nach (Gl. 3.53) bis (Gl. 3.57). Die Berechnung der Zwischenphasen-Grenzflächendichte und des Wärmeübergangskoeffizienten kann entweder nach Modellgleichungen (vgl. Kap. 3.2.2.2 bzw. 3.3.2) oder mit Hilfe von experimentell bestimmten Werten erfolgen (vgl. Kap. 3.2.2.3). Befindet sich die Simulation in Höhe des Drosselventils, entspricht der Druckverlust in diesem VE dem für die Armatur definierten Wert, ansonsten bestimmt die Unterprozedur „calc_DV“ diesen Druckabfall nach Gl. 3.64 - 3.95. Der Druck verringert sich am Ende des VE um diesen Betrag.

Kernstück des Programms ist die Berechnung des Wärmestroms an der Phasengrenzfläche nach (Gl. 3.48), mit dem die Bestimmung des Dampfmassenstroms (Gl. 3.50), der Wasserenthalpie (Gl. 3.52) und des neuen mittleren Blasendurchmessers (Gl. 3.38) am Austritt des VE möglich wird.

Dem folgt die Ermittlung des thermodynamischen Zustands am Ende des VE und abschließend, bei erfüllter Abbruchbedingung für die Druckiteration, auch die Ausgabe wichtiger Parameter in ein entsprechendes Textfile. In Höhe des Gittersensors werden zusätzlich der Dampfgehalt, der Blasendurchmesser und die Zwischenphasen-Grenzflächendichte der jeweiligen Einspeisehöhe für alle simulierten Höhen in ein File ausgegeben.

4 Kondensation bei Versuchen mit Drosselung

4.1 Thermisches Gleichgewicht an jedem Punkt der Rohrleitung

Zunächst wurde das Verhalten der Zweiphasenströmung bei Annahme von thermischen Gleichgewichtsbedingungen zwischen Dampf und Wasser untersucht. Abb. 4.1 zeigt den Dampfgehaltsverlauf entlang der Rohrleitung, nachgerechnet für den Versuch $p10dp100$ und die Einspeisehöhe N (Nomenklatur siehe Kap. 2.4).

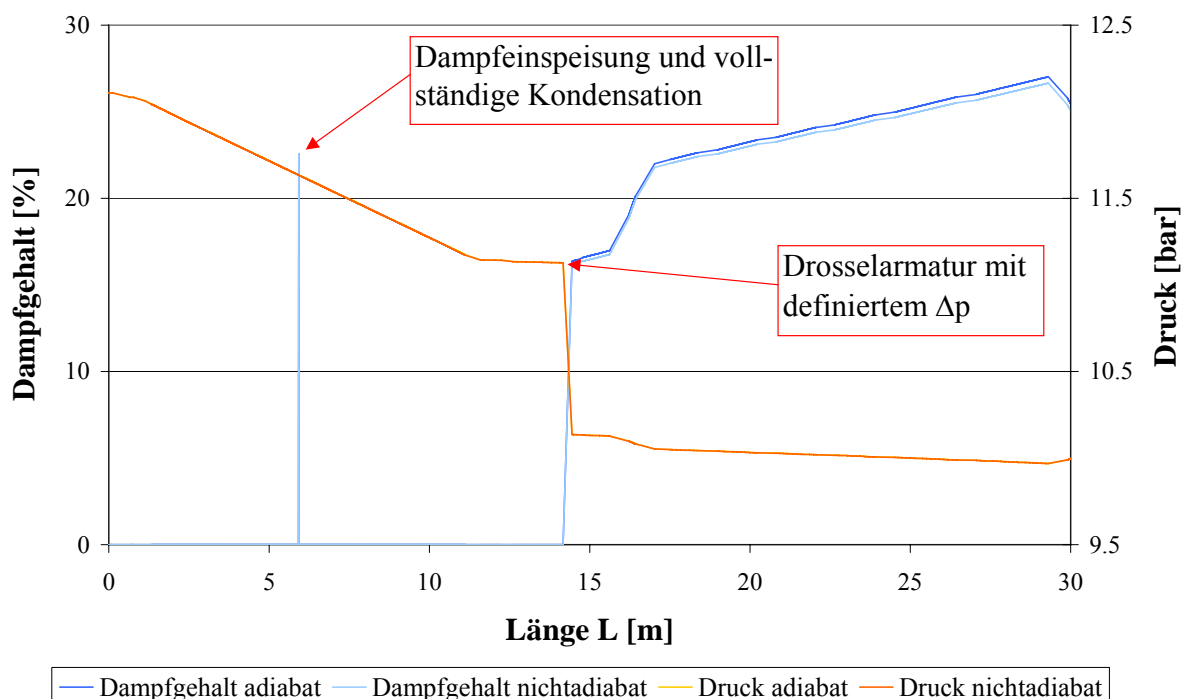


Abb. 4.1: Versuch $p10dp100$, Einspeisehöhe N, Dampfgehalts- und Druckverlauf entlang der Rohrleitung, Berechnung des Dampfgehalts nach GE-RAMP

Man erkennt, dass der Dampf vollständig am Ort der Einspeisung kondensiert. Die im Dampf gespeicherte Energie reicht nicht aus, um das Wasser auf Siedetemperatur zu erhitzen. Die Drosselarmatur erzeugt jedoch einen hohen Druckverlust, der ausreicht, das Wasser in diesem Augenblick zu überhitzen. Aufgrund des thermischen Gleichgewichtszustands baut sich diese Überhitzung sofort wieder ab, indem die entsprechende Menge Wasser verdampft (*Nachverdampfung*).

Wie Abb. 4.1 zeigt, gibt es Abschnitte mit stärker ausgeprägten Gradienten im Druckverlauf. Diese werden einerseits durch den hydrostatischen Druckabfall in vertikalen Abschnitten her-

vorgerufen. Andererseits verursachen verschiedene Einbauten einen höheren Druckverlust innerhalb der Strömung als die gerade Rohrleitung.

Zusätzlich sind in Abb. 4.1 auch die berechneten Verläufe bei adiabater bzw. nicht adiabater Rohrwand abgebildet. Man erkennt, dass der adiabate Ansatz eine Erhöhung des berechneten Dampfgehalts von maximal 0,5 % zur Folge hat. Das zeigt, dass der Einfluss der Wärmeverluste über die isolierte Rohrwand nur von marginaler Bedeutung ist. Nachfolgend wird daher die Rohrwand als adiabat angenommen.

4.2 Berücksichtigung des Wärmeübergangs zwischen Wasser und Dampf sowie Modellierung der Phasengrenzfläche

Im zweiten Schritt wurden in das Simulationsprogramm die Modelle zur Berechnung von Gasgehalt, Blasendurchmesser, Zwischenphasen-Grenzflächendichte und Wärmeübergangskoeffizient eingebaut. Unter der Annahme von thermodynamischem Nichtgleichgewicht (vgl. Kap. 3.3.1.2) wurde der Phasenübergang an der Kontaktfläche zwischen beiden Phasen bestimmt.

Die experimentellen Daten für den mittleren Dampfgehalt und die Zwischenphasen-Grenzflächendichte wurden mit Hilfe des Gittersensors (Kap. 2.3) ermittelt, d.h. für jeden Versuch liegen diese Werte nur für einen bestimmten Abstand zwischen Einspeiseebene und Messebene vor. Im Simulationsprogramm werden die Werte ebenfalls für den jeweiligen Abstand ausgegeben, was einen direkten Vergleich ermöglicht. Die folgenden Abschnitte zeigen die dabei erzielten Ergebnisse.

4.2.1 Verlauf wichtiger Strömungsparameter

Die Funktionsweise des entwickelten Kondensationsmodells soll am Beispiel der Einspeisehöhe N des Experiments *p20dp80* verdeutlicht werden. Abb. 4.2 zeigt Verläufe wichtiger Strömungsparameter, die mit dem Drift-Flux-Modell nach GE-RAMP und dem Wärmeübergangsmodell nach AKIYAMA berechnet wurden. Dabei ist der Gesamtdruck p , die mittlere Dampf-Volumenstromdichte J_D und die Temperaturdifferenz Δt zwischen Dampf- und Wassertemperatur über der gesamten Länge L des simulierten Teilstücks (B) aufgetragen.

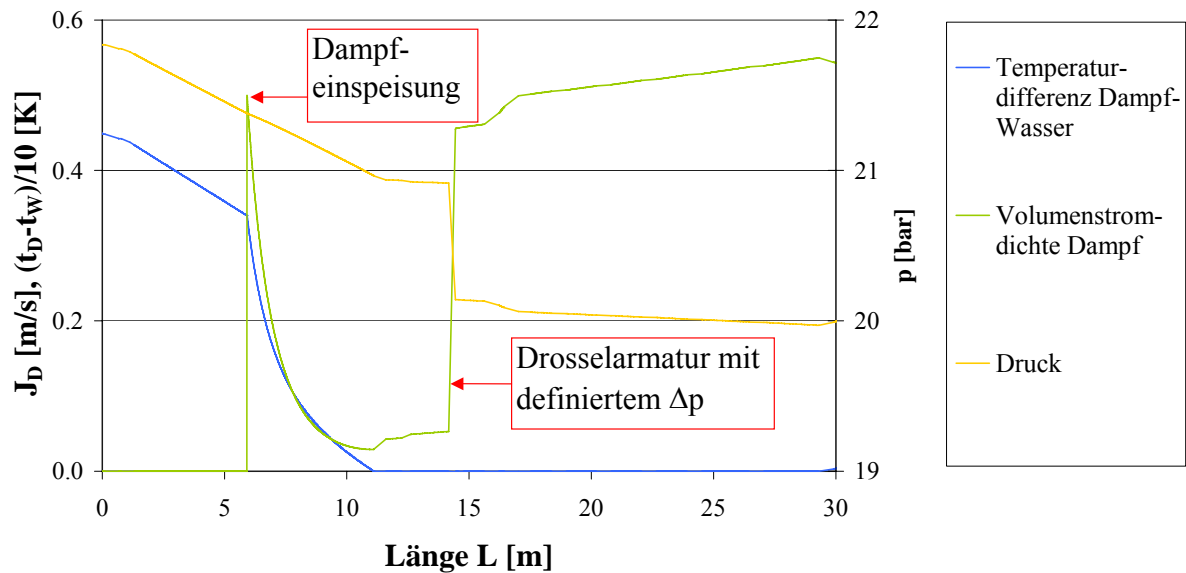


Abb. 4.2: Versuch *p20dp80*, Einspeisehöhe N, berechnete Verläufe von Dampf-Volumenstromdichte J_D , Temperaturdifferenz Δt und Druck p

Treibende Kraft für den Phasenübergang ist die Temperaturdifferenz Δt (blaue Kurve). Man erkennt, dass bis zur Höhe der Dampfeinspeisung diese Differenz nahezu linear abfällt. Ursache hierfür ist der Abfall der Sättigungstemperatur infolge des Druckabfalls innerhalb der Einphasenströmung (gelbe Kurve). Im Moment der Dampfeinspeisung (bei $L = 5,9$ m) steigt die Volumenstromdichte des Dampfes (grüne Kurve) sprunghaft an. Die Unterkühlung des Wassers von ca. 3,3 K führt zum Einsetzen der Kondensation des Dampfes, wodurch sich die Unterkühlung abbaut. Wenn Wasser und Dampf dieselbe Temperatur besitzen ($\Delta t = 0$), setzt durch den Druckabfall die Nachverdampfung des Wassers ein (siehe grüne Kurve ab ca. 11,5 m). Dabei wird angenommen, dass die Strömung sich im thermischen Gleichgewicht befindet. Aus diesem Grund führt der hohe Druckabfall innerhalb der Drosselarmatur zum sprunghaften Anstieg der Volumenstromdichte des Dampfes.

4.2.2 Einfluss des Druckes auf die Vergleichbarkeit der Einspeiseebenen

Das entwickelte Kondensationsmodell berechnet die Werte der Strömungsparameter als Funktion der Länge L . Der Einspeisepunkt für den Dampf ist dabei frei wählbar. Man erhält somit den Verlauf der Kondensation entlang der Rohrleitung. Wäre es bei der Durchführung der Experimente möglich, den Gittersensor über die Höhe der Teststrecke an beliebiger Position zu montieren, könnte dieser Verlauf direkt validiert werden. Aufgrund der Konstruktion der Testsektion und des Gittersensors ist dies leider nicht möglich. Die Änderung des Abstands zwischen Dampfeinperlung und Messort wird daher durch unterschiedliche Einspeise-

höhen realisiert (vgl. Abb. 2.2). Durch den Einfluss der Hydrostatik herrschen an den Einspeisestellen unterschiedliche Drücke. Daher muss, wie Abb. 4.3 verdeutlicht, jede Höhe einzeln simuliert werden. In diesem Bild sind die Dampfgehaltsverläufe für alle sechs 4 mm Einspeishöhen zusammen mit den experimentellen Daten über der dimensionslosen Rohrlänge L/D ab Dampfinspeisung dargestellt, wobei D dem inneren Durchmesser der Teststrecke entspricht. Der Sprung bei den Verläufen der Höhen B bis K entsteht durch das an dieser Stelle befindliche Drosselventil, das durch seinen hohen Druckabfall zur Nachverdampfung in der Strömung führt.

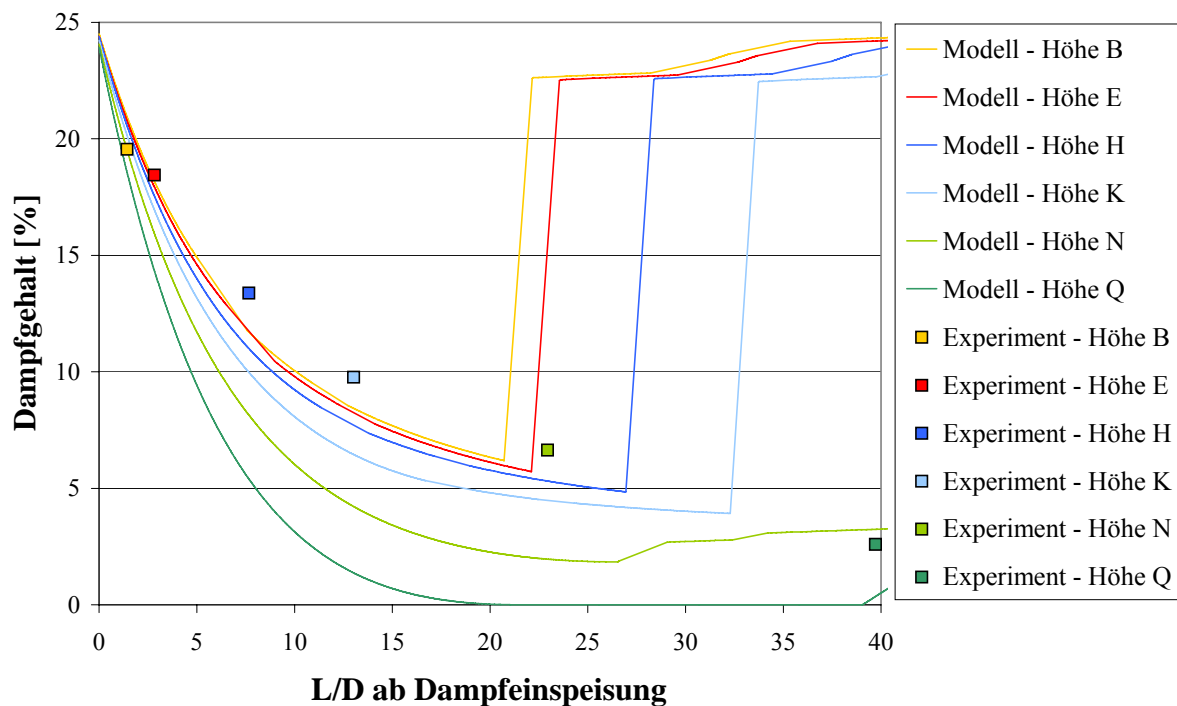


Abb. 4.3: Versuch $p20dp80$, Vergleich der modellierten Dampfgehaltsverläufe (Wärmeübergang nach AKIYAMA) mit experimentellen Daten

Man erkennt den Einfluss des hydrostatischen Druckes (vgl. Tab. 4.1): Der höhere Druck an der untersten Einspeisung (Q) verursacht eine höhere Sättigungstemperatur des eingespeisten Dampfes und damit auch eine größere Unterkühlung des Wassers. Dadurch kondensiert im Vergleich zur obersten Ebene (B) auf derselben Länge mehr Dampf. Aus diesem Grund ist es notwendig, für jede einzelne Einspeishöhe eine eigene Rechnung durchzuführen.

Tab. 4.1: Versuch $p20dp80$, mit dem Modell berechnete Werte für den Druck und die Unterkühlung des Wassers in Höhe der jeweiligen Dampfinspeisung

Einspeishöhe	B	E	H	K	N	Q
Druck p [bar]	21,052	21,074	21,144	21,220	21,379	21,655
Unterkühlung des Wasser t_s-t_w [K]	2,609	2,663	2,832	3,017	3,400	4,060

4.2.3 Auswahl eines geeigneten Wärmeübergangsmodells

Zunächst soll anhand der experimentellen Daten für den Dampfgehalt ein geeignetes Modell zur Berechnung des Wärmeübergangs ausgewählt werden. Dazu werden die Messwerte zusammen mit den aus den Modellen berechneten Kurven über dem Verhältnis $L_{[0-GS]}/D$ aufgetragen. $L_{[0-GS]}$ ist hierbei der Abstand zwischen der Einspeiseebene des Dampfes und der Gittersensorposition. Abb. 4.4 und Abb. 4.5 zeigen die Ergebnisse für die 1 mm- bzw. 4 mm Bohrungen des Versuchs *p20dp160*. Zusätzlich zu den Testrechnungen in Kap. 3.3.2 wurde hierbei auch das Modell nach ZEITOUN verwendet, da jetzt der volumetrische Dampfgehalt verfügbar ist.

Folgende Randbedingungen werden während der Modellierung berücksichtigt:

- Die simulierte Strömung wird als monodispers angenommen und besitzt daher eine konstante Blasenflussdichte, d.h. sie besteht aus einer bestimmten Anzahl Blasen desselben Durchmessers.
- Die Zwischenphasen-Grenzflächendichte wird aus dem mittleren Durchmesser der Dampfblasen und dem momentanen mittleren Dampfgehalt bestimmt, der sich nach dem Modell von GE-RAMP berechnet.

Die berechneten Werte sind dabei der Anschaulichkeit halber als Kurvenverlauf dargestellt. Für jede Einspeisehöhe wurden mit jedem Modell je eine Berechnung durchgeführt. Daher können nur die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Dampfgehalten bei gleichem L/D bewertet werden.

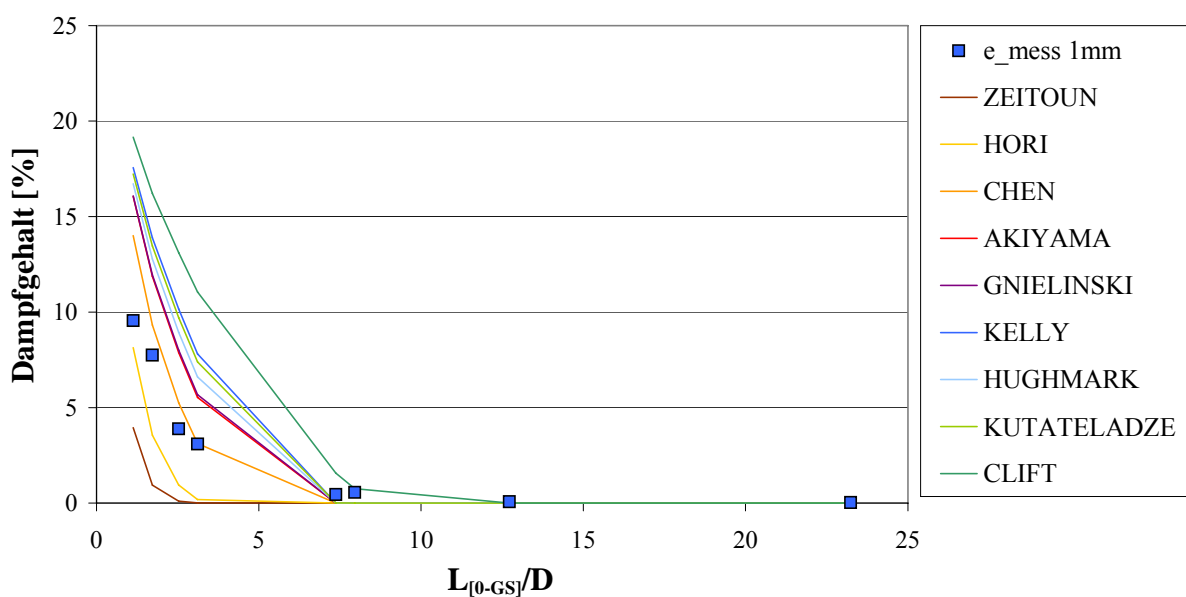


Abb. 4.4: Versuch *p20dp160*, Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Dampfgehalten, Wärmeübergang nach verschiedenen Modellen, 1 mm Öffnungen

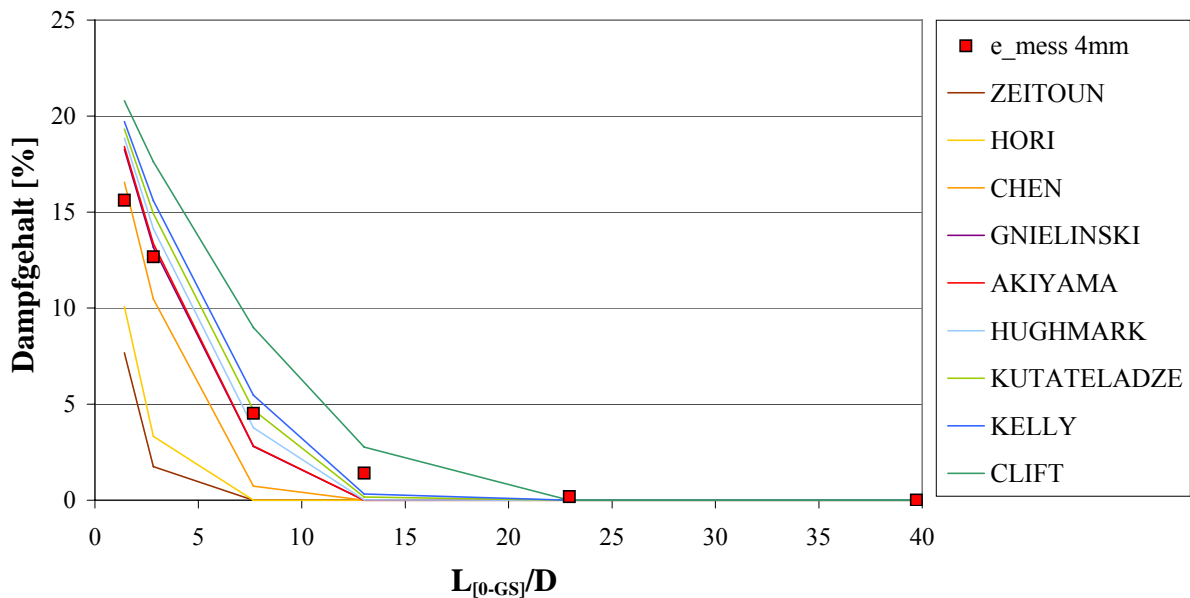


Abb. 4.5: Versuch *p20dp160*, Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Dampfgehalten, Wärmeübergang nach verschiedenen Modellen, 4 mm Öffnungen

Es zeigt sich, dass der Ansatz einer monodispersen Strömung mit konstanter Blasenflussdichte den realen Verlauf des Dampfgehalts qualitativ nachbilden kann, allerdings wird durch nahezu alle verwendeten Modelle eine zu schnelle Kondensation der Gasphase ermittelt. Ursache hierfür ist möglicherweise eine zu groß berechnete Zwischenphasen-Grenzflächendichte.

Man erkennt außerdem, dass die quantitativen Tendenzen der Kondensation nach den Modellen denen der Testrechnungen entsprechen (Kap. 3.3.2), d.h. nach dem Modell von HORI (bzw. ZEITOUN) kondensiert der Dampf am schnellsten. ZEITOUN und HORI unterschätzen die Entwicklung des Dampfgehalts bei der Einspeisung sowohl durch die 1 mm- als auch durch die 4 mm Öffnungen. Bei Verwendung des Modells nach CLIFT kondensiert der Dampf in beiden Fällen zu langsam. Somit beschreiben die verbleibenden sechs Modelle (CHEN, AKIYAMA, GNIELINSKI, KELLY, HUGHMARK und KUTATELADZE) den Verlauf des Dampfgehalts quantitativ annähernd richtig. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass keines der Modelle in der Lage ist, die Dampfgehaltsverläufe beider Einspeiseöffnungen korrekt nachzubilden.

Um eine Auswahl des Modells zur Berechnung der Nusselt-Zahl zu ermöglichen, werden die mittleren absoluten Abweichungen zu den experimentell bestimmten Dampfgehalten analog (Gl. 3.19) gebildet. Abb. 4.6 und Tab. 4.2 zeigen die Resultate dieser Analyse.

Man erkennt, dass die ersten fünf Modelle sehr dicht beieinander liegen ($\Delta F_{\text{abs,all}} = 0,115 \%$), was in den beiden vorhergehenden Abbildungen ebenfalls zu beobachten war. Dabei weist das Wärmeübergangsmodell nach HUGHMARK die geringste Gesamtabweichung von den ex-

perimentellen Werten auf. Dieses Modell wird daher bei der weiteren Auswertung zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten bei der Kondensation des Dampfes im unterkühlten Wasser gewählt.

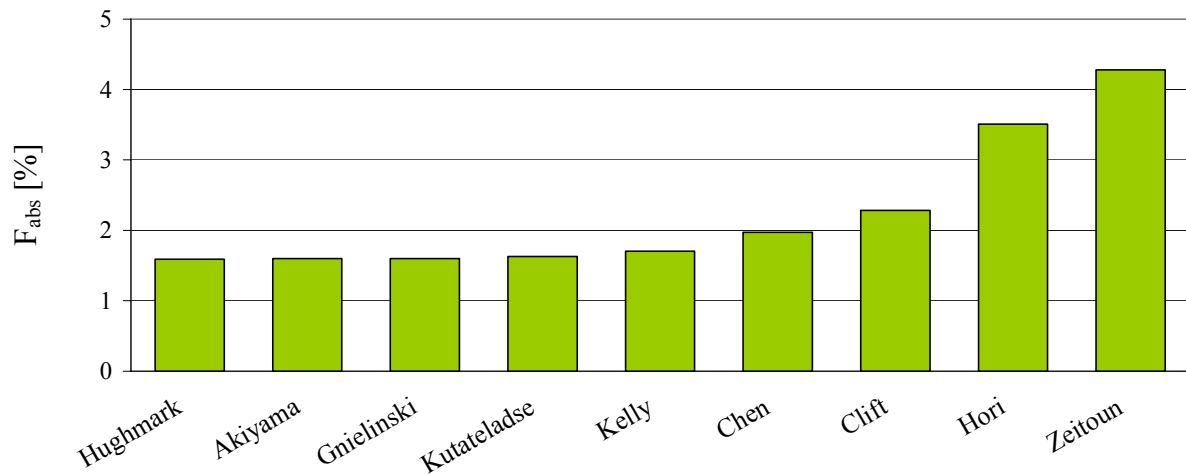


Abb. 4.6: Vergleich der gesamten mittleren absoluten Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Dampfgehalten bei unterschiedlichen Modellen für den Wärmeübergang

Tab. 4.2: Mittlere absolute Abweichungen der Wärmeübergangsmodelle sowohl als gesamter Wert als auch aufgeschlüsselt nach Düsendurchmessern und Kondensationsexperimenten

Nu-Modell	Gesamtfehler			<i>p10dp70</i>		<i>p10dp100</i>		<i>p20dp80</i>		<i>p20dp160</i>	
	$F_{abs,all} [\%]$	$F_{abs,1} [\%]$	$F_{abs,4} [\%]$	1 mm	4 mm	1 mm	4 mm	1 mm	4 mm	1 mm	4 mm
Hughmark	1,590	1,878	1,303	0,887	0,937	0,803	0,972	3,032	2,128	2,790	1,174
Akiyama	1,598	1,783	1,414	0,824	1,009	0,541	1,102	3,438	2,411	2,328	1,133
Gnielinski	1,600	1,789	1,412	0,821	1,018	0,588	1,095	3,394	2,451	2,351	1,082
Kutateladse	1,629	1,991	1,268	1,004	0,900	1,026	0,980	2,788	1,928	3,144	1,262
Kelly	1,705	2,126	1,284	1,133	0,855	1,253	0,977	2,747	1,762	3,372	1,542
Chen	1,972	1,701	2,244	0,755	2,015	0,651	2,074	4,349	3,460	1,050	1,426
Clift	2,283	2,697	1,869	1,660	1,317	2,204	1,428	2,279	2,036	4,647	2,692
Hori	3,508	2,843	4,172	1,369	3,557	1,260	3,307	6,729	6,321	2,013	3,505
Zeitoun	4,279	3,773	4,785	1,421	3,597	1,201	3,207	9,320	8,168	3,149	4,168

4.2.4 Vergleich des Dampfgehalts

Im Folgenden soll die Berechnung des Dampfgehalts als Kombination zweier Modelle für ϵ und Wärmeübergang mit experimentellen Daten verglichen werden. Dazu werden die Entwicklungen der Dampfgehaltsverläufe hinsichtlich der Einflüsse von Düsendurchmesser der Einspeisung und eingestelltem Druckverlust am Drosselventil untersucht (Abb. 4.7 bis Abb. 4.10).

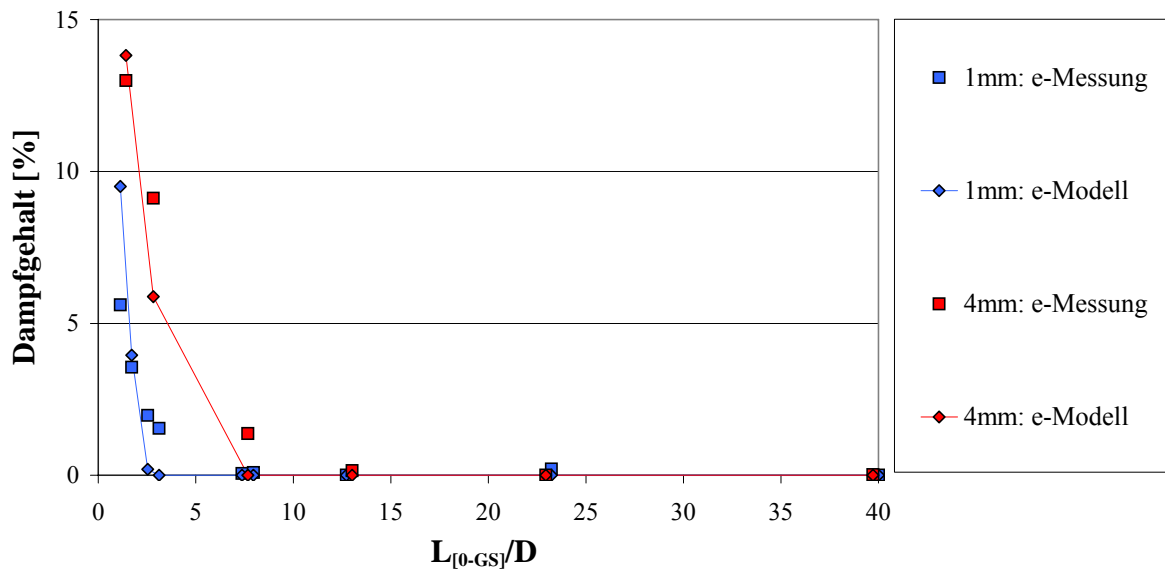


Abb. 4.7: Versuch *p10dp70*, Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Dampfgehalten, Wärmeübergang nach HUGHMARK

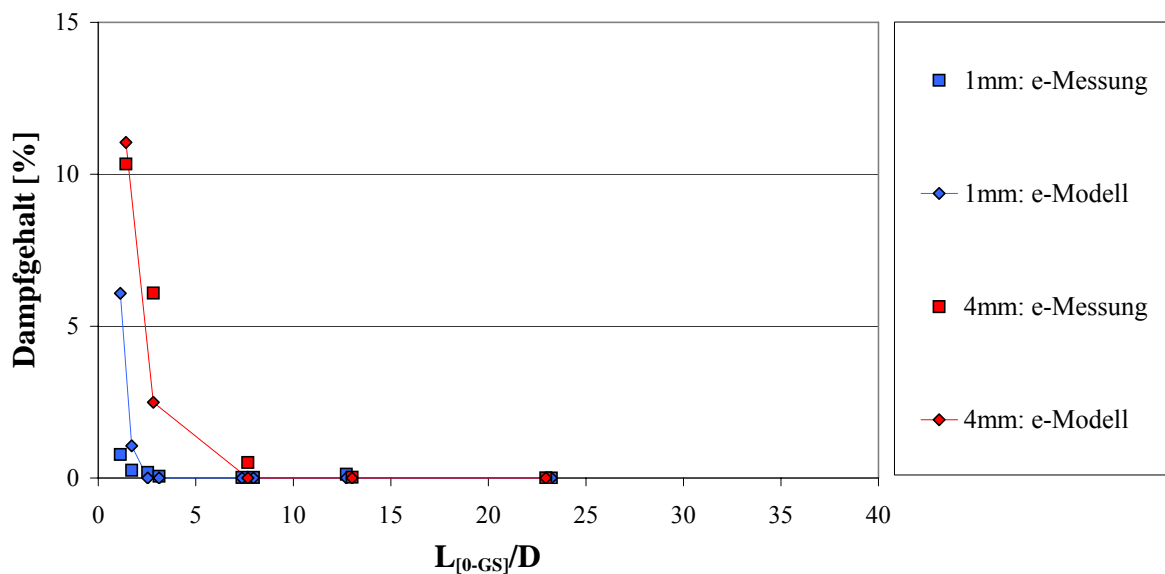


Abb. 4.8: Versuch *p10dp100*, Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Dampfgehalten, Wärmeübergang nach HUGHMARK

Man erkennt, dass der Dampfgehalt bei den 1 mm Düsen sowohl im Experiment als auch in der Berechnung geringer ist als bei den 4 mm Düsen. Ursache hierfür ist die Entstehung kleinerer Blasen bei den 1 mm Düsen. Deren gesamte Oberfläche ist im Verhältnis zum eingespeisten Dampfvolmen größer als bei den 4 mm Düsen. Somit existiert eine größere Zwischenphasengrenzfläche für den Wärme- und Phasenübergang, was zu einer beschleunigten Kondensation des Dampfes entlang der Rohrleitung führt.

Vergleicht man Abb. 4.7 mit Abb. 4.8, erkennt man den Einfluss des Druckverlustes am Drosselventil: Größere Werte für Δp bewirken eine höhere Unterkühlung der Strömung an der Einspeisestelle des Dampfes, die dazu führt, dass die Kondensation intensiver abläuft. (Tab. 4.3).

Tab. 4.3: Vergleich der Unterkühlung an der Einspeisung für alle vier Experimente bei den beiden höchsten Einspeiseebenen für 1 mm- bzw. 4 mm Düsen

Einspeisehöhe	$\Delta t_{\text{Einspeisung}} \text{ [K]}$			
	<i>p10dp70</i>	<i>p10dp100</i>	<i>p20dp80</i>	<i>p20dp160</i>
A	3,989	5,166	2,625	4,548
B	4,025	5,192	2,630	4,620

Dieser Fakt spiegelt sich auch in den Dampfgehaltsverläufen: Beträgt ε für die oberste 1 mm Einspeisung im Versuch *p10dp70* noch 9,5 %, sind es beim Versuch *p10dp100* nur noch 6 %.

Die Abb. 4.9 und Abb. 4.10 für die Versuche mit $p = 20$ bar bestätigen diese Aussagen.

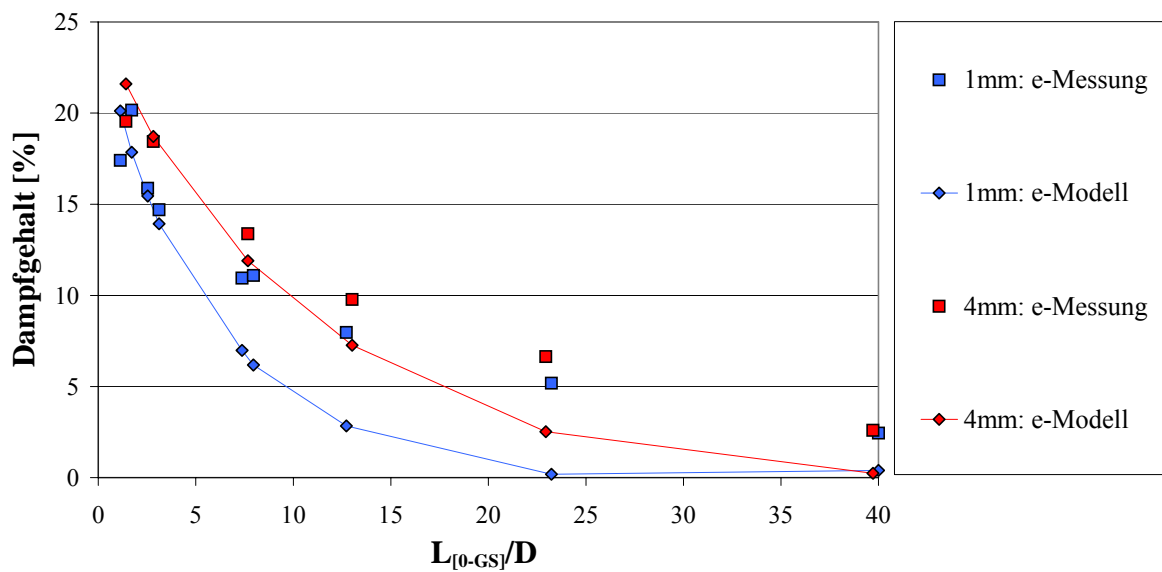


Abb. 4.9: Versuch *p20dp80*, Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Dampfgehalten, Wärmeübergang nach HUGHMARK

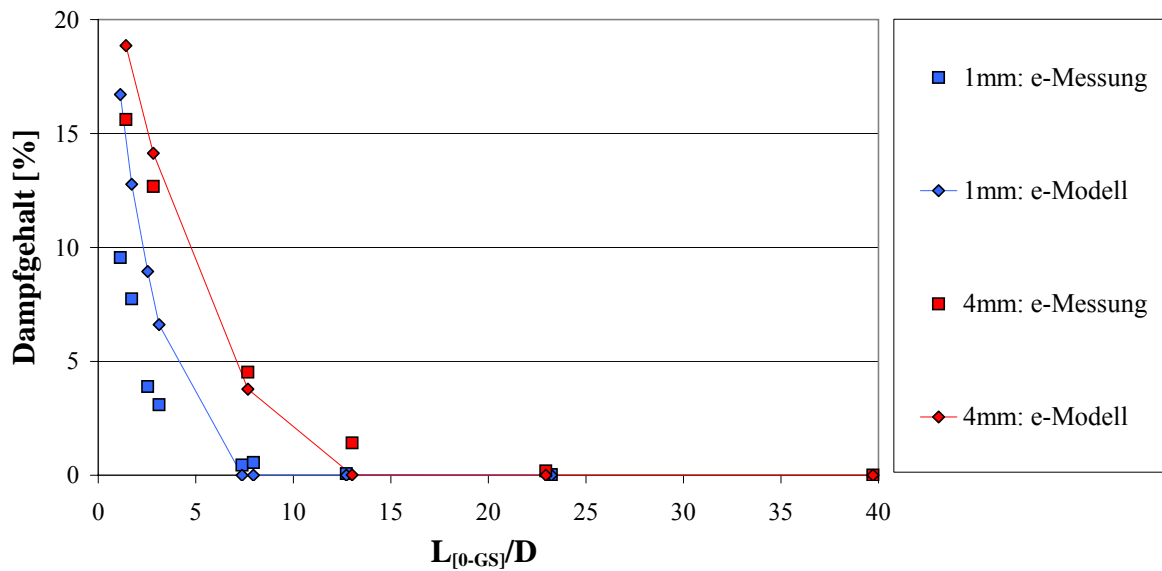


Abb. 4.10: Versuch *p20dp160*, Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Dampfgehalten, Wärmeübergang nach HUGHMARK

4.2.5 Vergleich der Zwischenphasen-Grenzflächendichte

In diesem Abschnitt werden die berechneten Zwischenphasen-Grenzflächendichten experimentellen Werten gegenübergestellt (Abb. 4.11 bis Abb. 4.14).

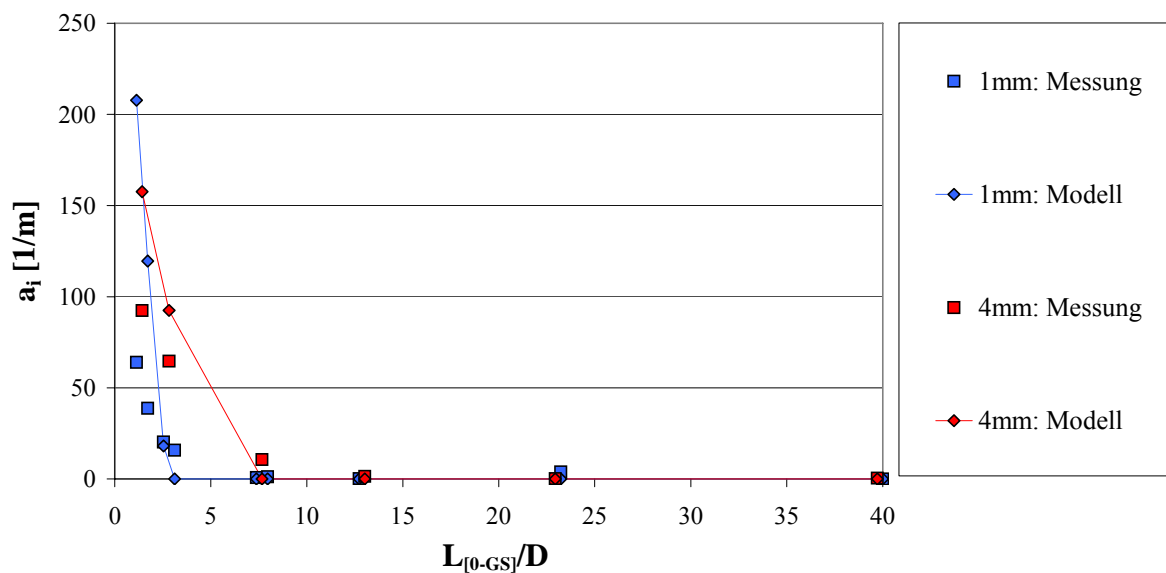


Abb. 4.11: Versuch *p10dp70*, Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Zwischenphasen-Grenzflächendichten, Wärmeübergang nach HUGHMARK

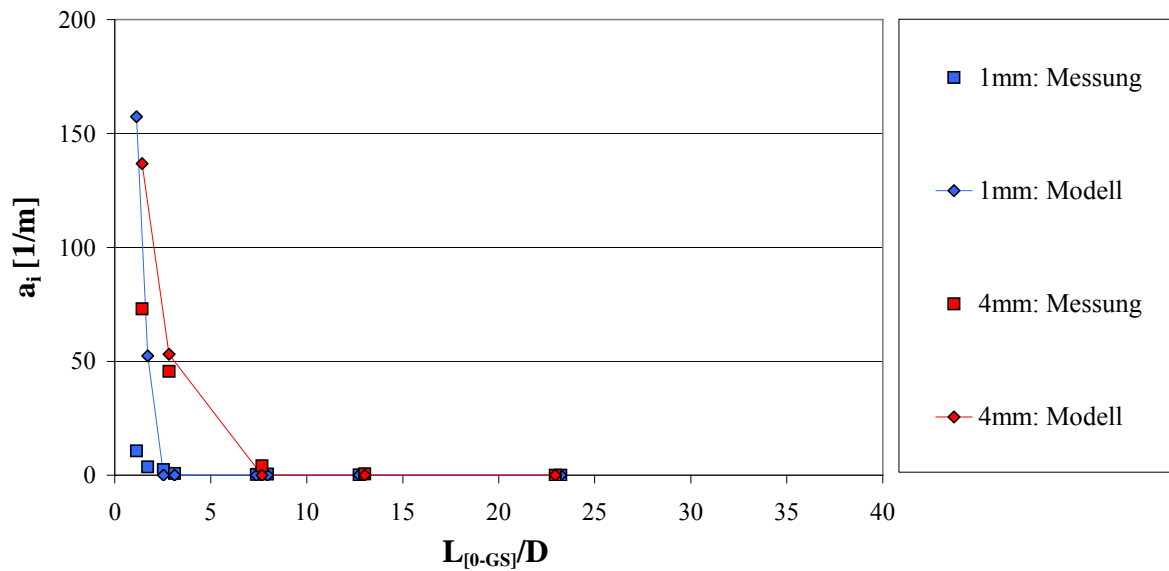


Abb. 4.12: Versuch *p10dp100*, Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Zwischenphasen-Grenzflächendichten, Wärmeübergang nach HUGHMARK

Es zeigt sich, dass die berechneten Werte für die Zwischenphasen-Grenzflächendichte durch die Berechnung des Primärblasendurchmessers mit dem Modell Strahlgasen und der Ansatz nach (Gl. 3.39) die experimentellen Daten qualitativ nachbilden können. Allerdings werden bei allen vier Kondensationsexperimenten die gemessenen Werte zum Teil gravierend überschätzt.

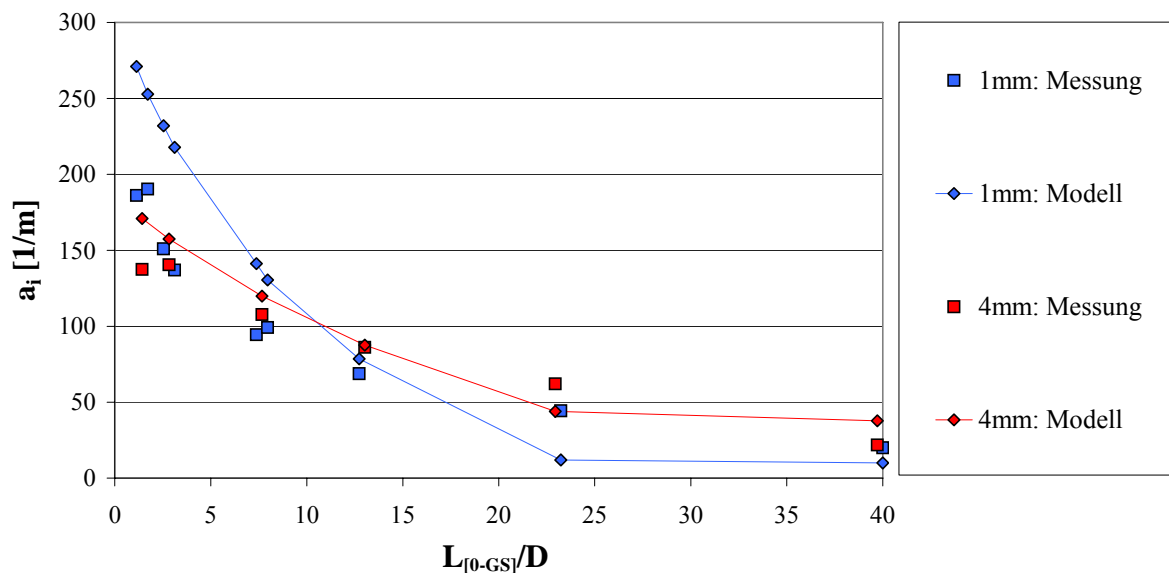


Abb. 4.13: Versuch *p20dp80*, Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Zwischenphasen-Grenzflächendichten, Wärmeübergang nach HUGHMARK

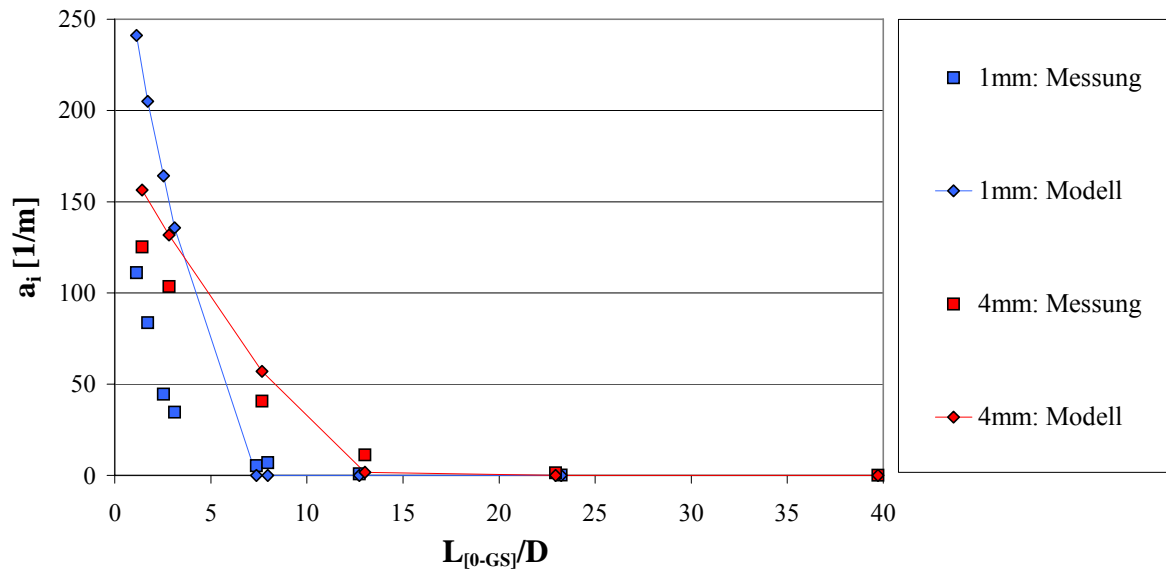


Abb. 4.14: Versuch *p20dp160*, Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Zwischenphasen-Grenzflächendichten, Wärmeübergang nach HUGHMARK

Im Gegensatz zum Experiment zeigen alle vier Abbildungen im Vergleich zu den 4 mm Düsen für die 1 mm Einspeisungen mit kleinem $L_{[0-GS]}/D$ trotz geringerer Dampfgehalte eine höhere Zwischenphasen-Grenzflächendichte a_i . Diese führt zu einer schnelleren Kondensation der Dampfblasen, in deren Folge auch a_i schneller als bei den 4 mm Einspeisungen schrumpft. Dadurch entsteht zwischen den Kurven für die 1 mm- und 4 mm Bohrungen ein Schnittpunkt, der bei den Verläufen für $p = 10$ bar teilweise außerhalb der ersten Messwerte liegt.

Im Vergleich zu den Versuchen mit $p = 10$ bar nimmt die Zwischenphasen-Grenzflächendichte bei $p = 20$ bar generell langsamer ab. Eine Ursache für die verzögerte Kondensation bei den Versuchen mit höheren Drücken ist die geringere Unterkühlung der Wasserströmung bei diesen Experimenten (vgl. Tab. 4.3).

4.3 Berechnung der Zwischenphasen-Grenzflächendichte unter Nutzung von experimentellen Daten für den SAUTER-Durchmesser

Neben der Berechnung der Zwischenphasen-Grenzflächendichte aus Blasendurchmessern, die mit Hilfe des Strahlgasenmodells ermittelt wurden, können auch experimentelle Daten verwendet werden. Diese Änderung ermöglicht eine gezieltere Untersuchung der Modelle zur Bestimmung des Wärmeübergangs. Dabei ergeben sich zwei Varianten: Erstens kann die aus den Versuchen ermittelte Zwischenphasen-Grenzflächendichte a_i direkt verwendet werden, um den Wärmeübergang zu berechnen. Zweitens ist es möglich, aus den experimentellen Bla-

sengrößenverteilungen den SAUTER-Durchmesser d_s zu bestimmen (vgl. Kap. 3.2.2.3). Diese Werte können in Abhängigkeit verschiedener Parameter gebildet werden:

- als Funktion des globalen Dampfgehalts ε , ermittelt für jedes der vier Kondensationsexperimente bzw.
- als Funktion des Abstands zwischen Dampfinspeisung und Gittersensor $L_{[0-GS]}$, gebildet für jeden Versuch.

Voruntersuchungen haben gezeigt, dass eine Abhängigkeit beider Größen vom Dampfgehalt zu schlechteren Übereinstimmungen mit den Versuchswerten führt. Durch einen berechneten Dampfgehalt, der bei einer bestimmten Länge L vom dort gemessenen abweicht weisen die so berechneten Blasendurchmesser bzw. Zwischenphasen-Grenzflächendichten ebenfalls Differenzen zu den dort experimentell ermittelten Werten auf. Das führt zu erhöhter bzw. verminderter Kondensationsintensität, wodurch die Abweichungen zu experimentellen Dampfgehaltsverläufen anwachsen.

Bei der Abhängigkeit beider Parameter von $L_{[0-GS]}$ dienen die Messwerte als Stützstellen, zwischen denen linear interpoliert werden muss. Die Schwierigkeit bei diesem Verfahren besteht im begrenzten Bereich der zur Verfügung stehenden experimentellen Daten. Den konstruktiven Gegebenheiten ist der Umstand geschuldet, dass die Strömungsparameter nicht direkt an der Dampfinspeisung gemessen werden können, d.h. innerhalb des kürzesten Abstands zwischen Dampfinspeisung und Gittersensor (Höhe A bzw. B) existieren keine Messwerte. Daher wird angenommen, dass der an der Stelle (A) bzw. (B) gemessene Wert für den vorhergehenden Bereich gilt.

Weitere Voruntersuchungen ergaben, dass die mit diesem Verfahren berechnete Zwischenphasen-Grenzflächendichte sehr empfindlich auf die Länge $L_{[0-GS]}$ reagiert. Ursache hierfür ist möglicherweise das Unterschätzen von a_i gerade bei Versuchen mit höheren Unterkühlungen des Wassers. Vermutlich ist im Bereich zwischen oberster Dampfinspeisung und Messebene der Kondensationsvorgang so stark ausgeprägt, dass die Größe der Phasengrenze schnell abnimmt und damit die getroffene Annahme nicht gelten kann.

Der SAUTER-Durchmesser hingegen zeigt eine geringere Empfindlichkeit gegenüber dem geschilderten Vorgang, da die Abhängigkeit vom Abstand Dampfinspeisung - Gittersensor nicht so stark ausgeprägt ist wie bei a_i . Daher wird er im Modell implementiert, und mit (Gl. 3.36) die Größe der Zwischenphasen-Grenzflächendichte bestimmt.

4.3.1 Auswahl eines geeigneten Wärmeübergangsmodells

Die modifizierte Bestimmung der Zwischenphasen-Grenzflächendichte erfordert die erneute Auswahl eines geeigneten Wärmeübergangsmodells. Am Beispiel des Versuchs *p20dp80* wird der Vergleich aller Modelle in Abb. 4.15 und Abb. 4.16 gezeigt.

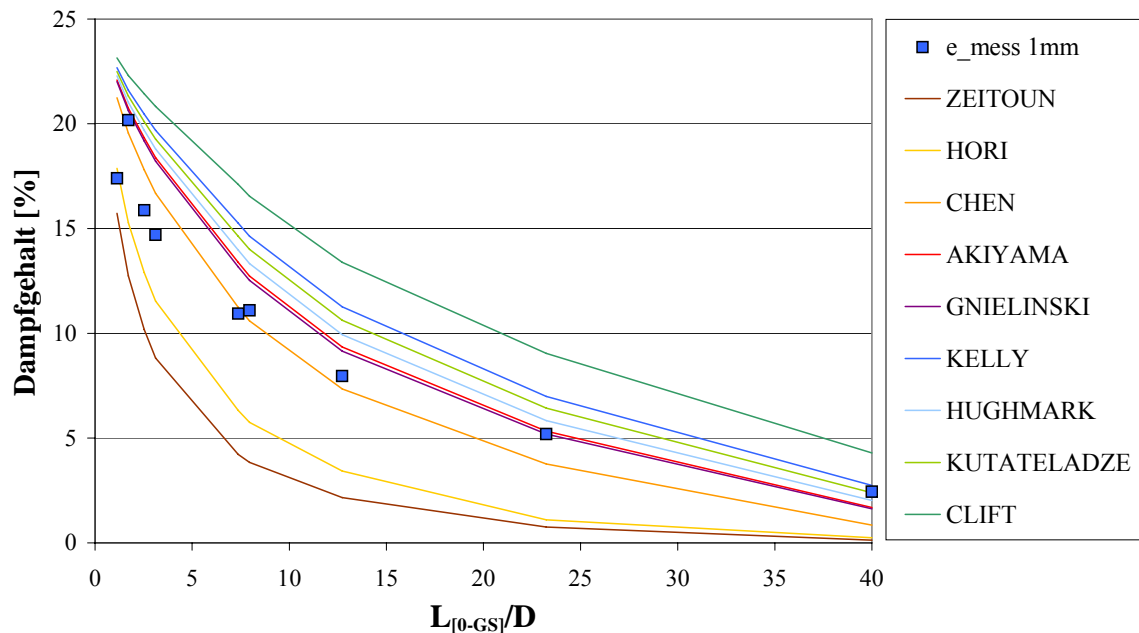


Abb. 4.15: Versuch *p20dp80*, Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Dampfgehalten, Wärmeübergang nach verschiedenen Modellen, 1 mm Öffnungen

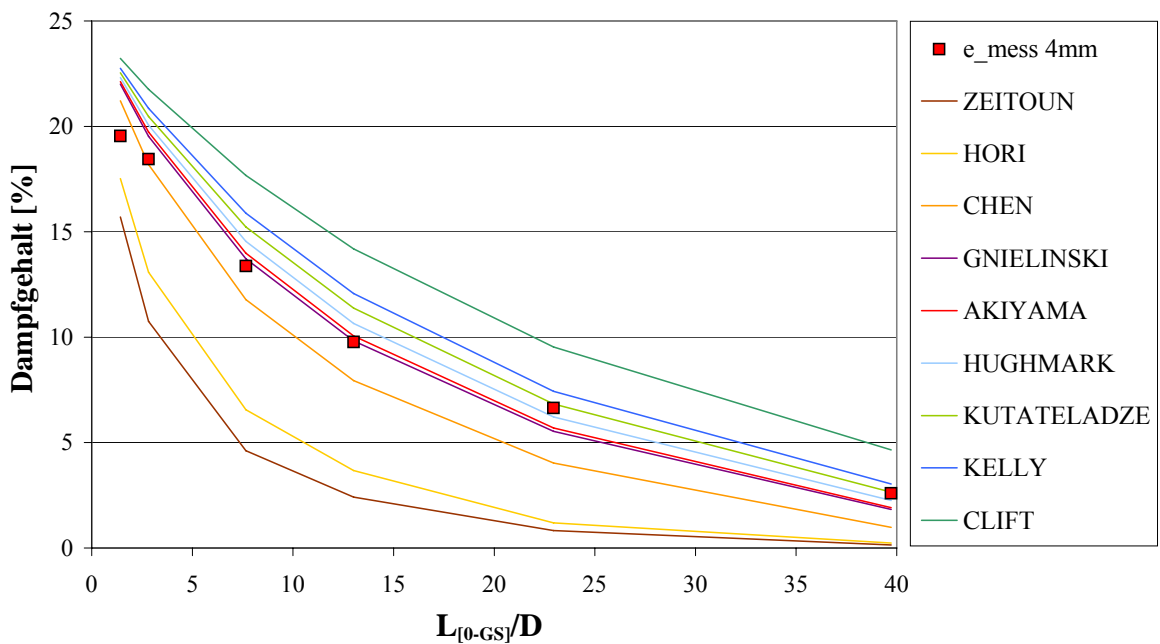


Abb. 4.16: Versuch *p20dp80*, Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Dampfgehalten, Wärmeübergang nach verschiedenen Modellen, 4 mm Öffnungen

Ähnlich wie in Kapitel 4.2.3 wird der qualitative Verlauf des Dampfgehalts von allen Modellen gut nachgebildet. Quantitativ zeigen sich jedoch deutliche Unterschiede zwischen den Versuchsdaten und den von den einzelnen Modellen berechneten Werten, die in Abb. 4.17 und in Tab. 4.4 bewertet werden.

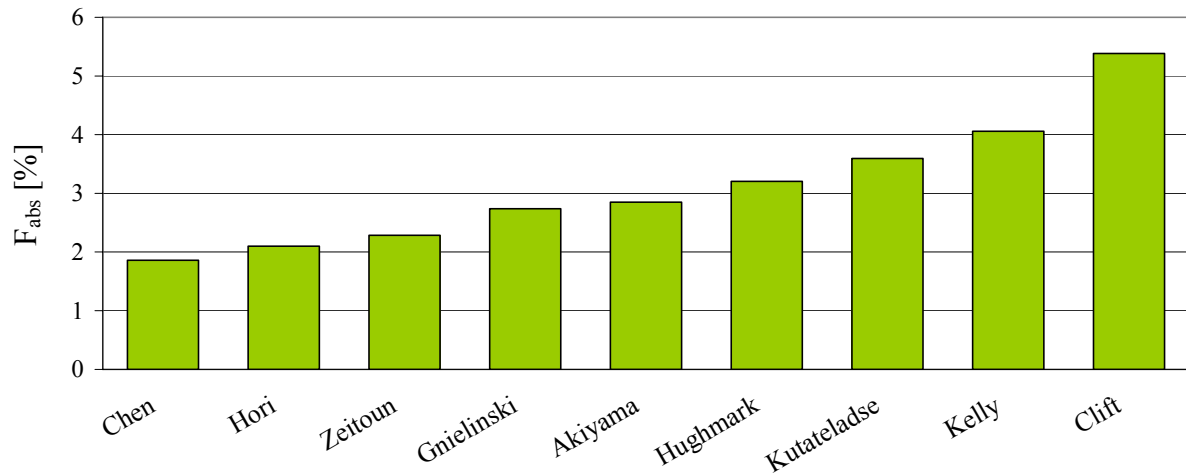


Abb. 4.17: Vergleich der gesamten absoluten mittleren Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Dampfgehalten bei unterschiedlichen Modellen für den Wärmeübergang

Die erneute Bildung der mittleren absoluten Fehler (Gl. 3.19) zeigt, dass sich die Anordnung der Modelle in Abb. 4.17 im Vergleich zu Abb. 4.6 verändert hat. Dabei weist die Simulation mit dem Wärmeübergangsmodell nach CHEN die geringste mittlere Gesamtabweichung auf.

Tab. 4.4: Mittlere absolute Abweichungen der Wärmeübergangsmodelle sowohl als gesamter Wert als auch aufgeschlüsselt nach Düsendurchmessern und Kondensationsexperimenten

Nu-Modell	Gesamtfehler			<i>p10dp70</i>		<i>p10dp100</i>		<i>p20dp80</i>		<i>p20dp160</i>	
	F _{abs,all} [%]	F _{abs,1} [%]	F _{abs,4} [%]	1 mm	4 mm	1 mm	4 mm	1 mm	4 mm	1 mm	4 mm
Chen	1,859	2,686	1,033	3,009	0,823	2,278	1,229	1,424	1,593	4,030	0,487
Hori	2,099	1,496	2,703	0,486	1,929	0,774	1,745	3,588	4,684	1,135	2,455
Zeitoun	2,283	1,874	2,692	0,663	1,320	0,791	0,805	5,247	5,985	0,794	2,659
Gnielinski	2,736	3,773	1,699	4,225	1,814	3,415	2,381	1,949	0,964	5,501	1,636
Akiyama	2,848	3,857	1,839	4,304	1,966	3,446	2,556	2,084	1,062	5,594	1,771
Hughmark	3,201	4,266	2,137	4,703	2,278	3,845	2,910	2,439	1,199	6,075	2,160
Kutateladse	3,592	4,673	2,511	5,092	2,645	4,191	3,333	2,843	1,453	6,567	2,614
Kelly	4,057	5,111	3,004	5,579	3,131	4,600	3,901	3,282	1,941	6,984	3,041
Clift	5,385	6,459	4,311	6,780	4,159	5,760	5,122	4,701	3,441	8,593	4,523

4.3.2 Vergleich des Dampfgehalts

Die folgenden Abb. 4.18 bis Abb. 4.21 zeigen die mit beiden Methoden berechneten Dampfgehaltsverläufe im Vergleich zu experimentellen Daten.

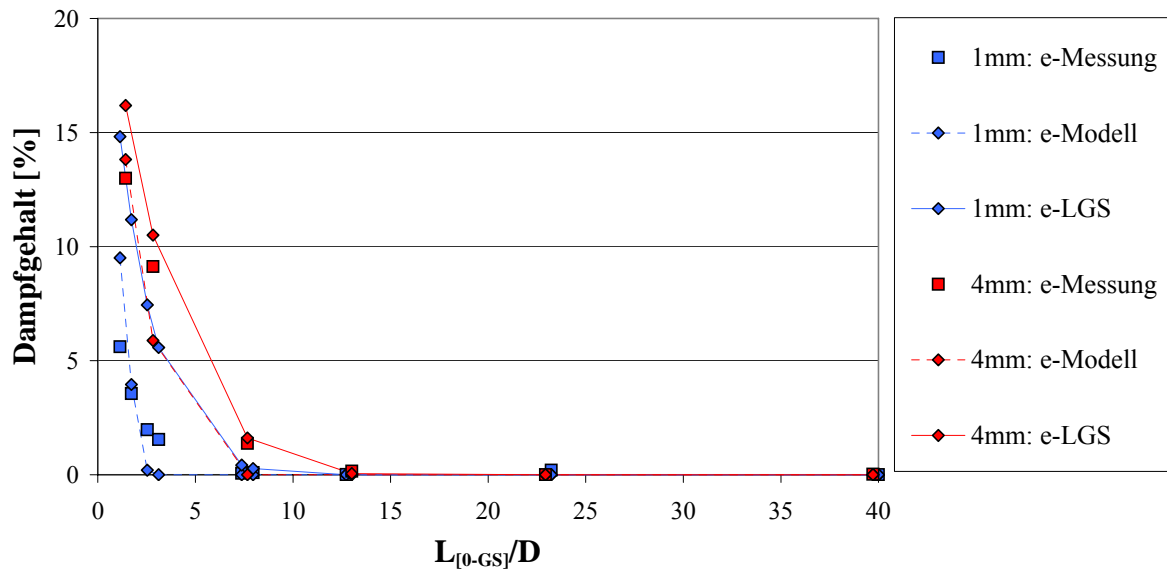


Abb. 4.18: Versuch *p10dp70*, Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Dampfgehalten, Wärmeübergang nach HUGHMARK (e-Modell) bzw. CHEN (e-LGS)

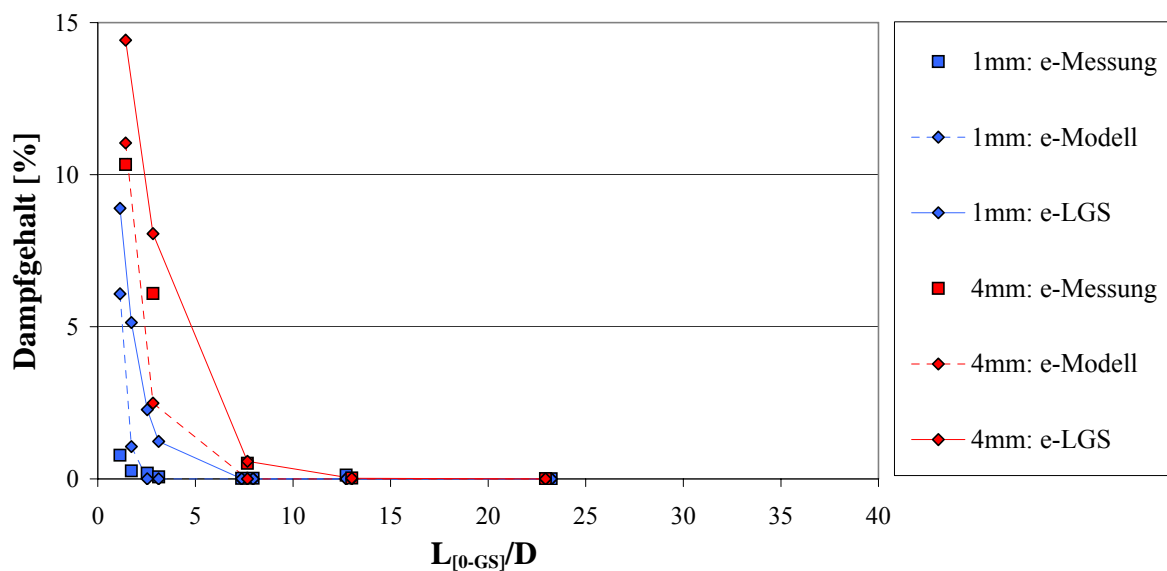


Abb. 4.19: Versuch *p10dp100*, Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Dampfgehalten, Wärmeübergang nach HUGHMARK (e-Modell) bzw. CHEN (e-LGS)

Es zeigt sich, dass die Berechnung des Dampfgehalts unter Verwendung der experimentellen SAUTER-Durchmesser höhere Werte liefert als die Verwendung von Modellbeziehungen für das Strahlgasen. Damit können insbesondere die Übereinstimmungen mit den Versuchsdaten

der 4 mm Düsen verbessert werden. Bei den 1 mm Einspeisungen sind für die Versuche mit $p = 10$ bar keine Verbesserungen festzustellen. Durch die Verwendung der experimentellen SAUTER-Durchmesser wird demnach eine langsamere Kondensation des Dampfes berechnet, was bei dem Versuch $p20dp80$ bei beiden Düsengrößen zu kleineren Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Dampfgehalten führt (vgl. Abb. 4.20).

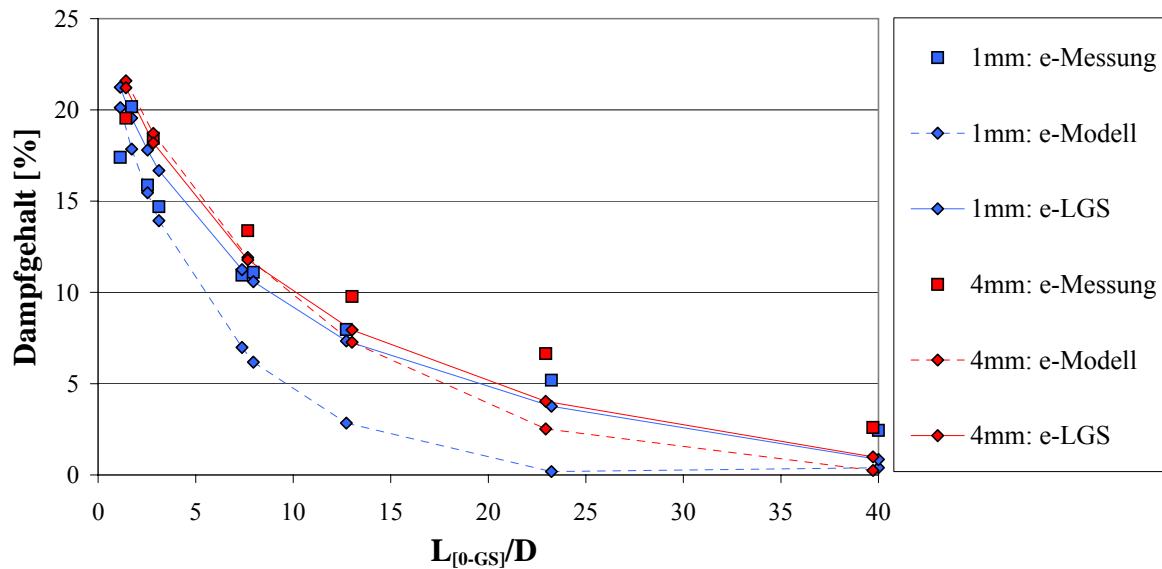


Abb. 4.20: Versuch $p20dp80$, Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Dampfgehalten, Wärmeübergang nach HUGHMARK (e-Modell) bzw. CHEN (e-LGS)

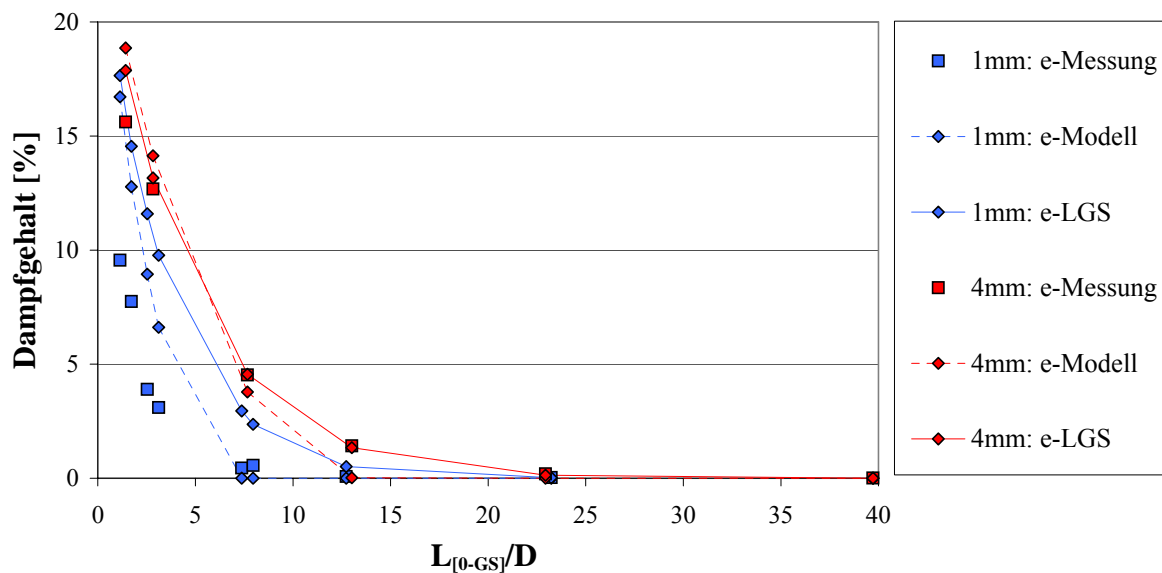


Abb. 4.21: Versuch $p20dp160$, Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Dampfgehalten, Wärmeübergang nach HUGHMARK (e-Modell) bzw. CHEN (e-LGS)

4.3.3 Vergleich der Zwischenphasen-Grenzflächendichte

Die Diagramme in diesem Abschnitt (Abb. 4.22 bis Abb. 4.25) zeigen die mit beiden Methoden berechneten Werte für die Zwischenphasen-Grenzflächendichte im Vergleich zu den entsprechenden experimentellen Daten.

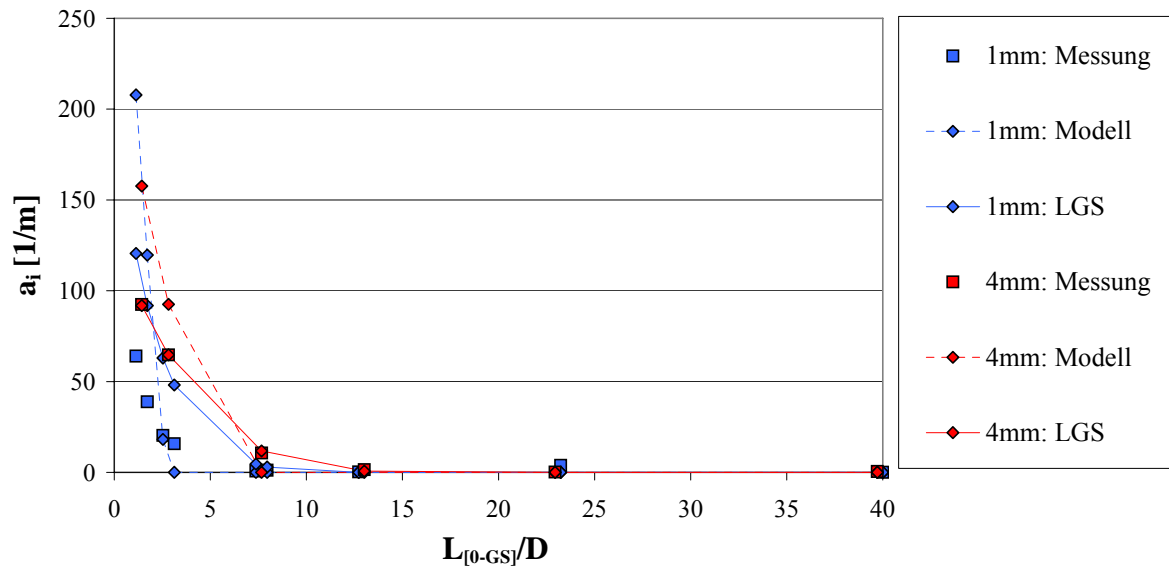


Abb. 4.22: Versuch *p10dp70*, Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Zwischenphasen-Grenzflächendichten, Wärmeübergang nach HUGHMARK (Modell) bzw. CHEN (LGS)

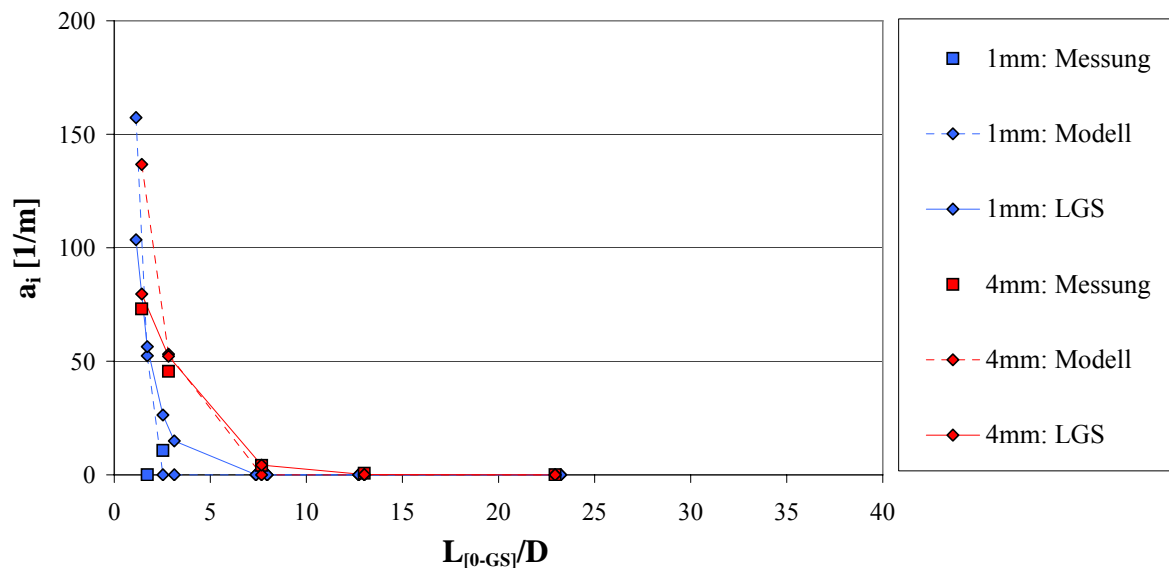


Abb. 4.23: Versuch *p10dp100*, Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Zwischenphasen-Grenzflächendichten, Wärmeübergang nach HUGHMARK (Modell) bzw. CHEN (LGS)

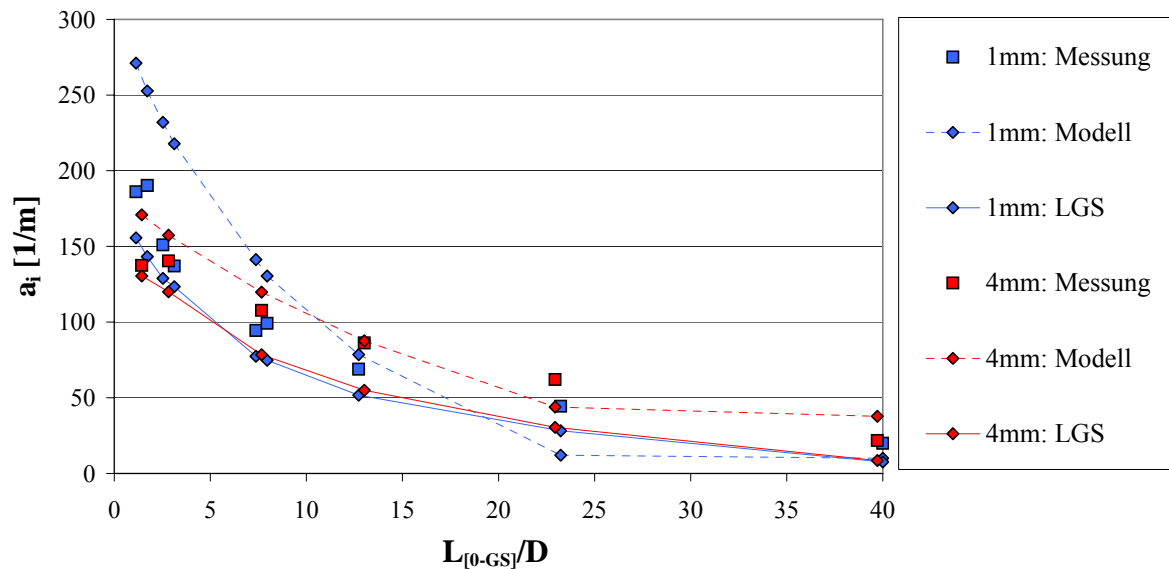


Abb. 4.24: Versuch *p20dp80*, Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Zwischenphasen-Grenzflächendichten, Wärmeübergang nach HUGHMARK (Modell) bzw. CHEN (LGS)

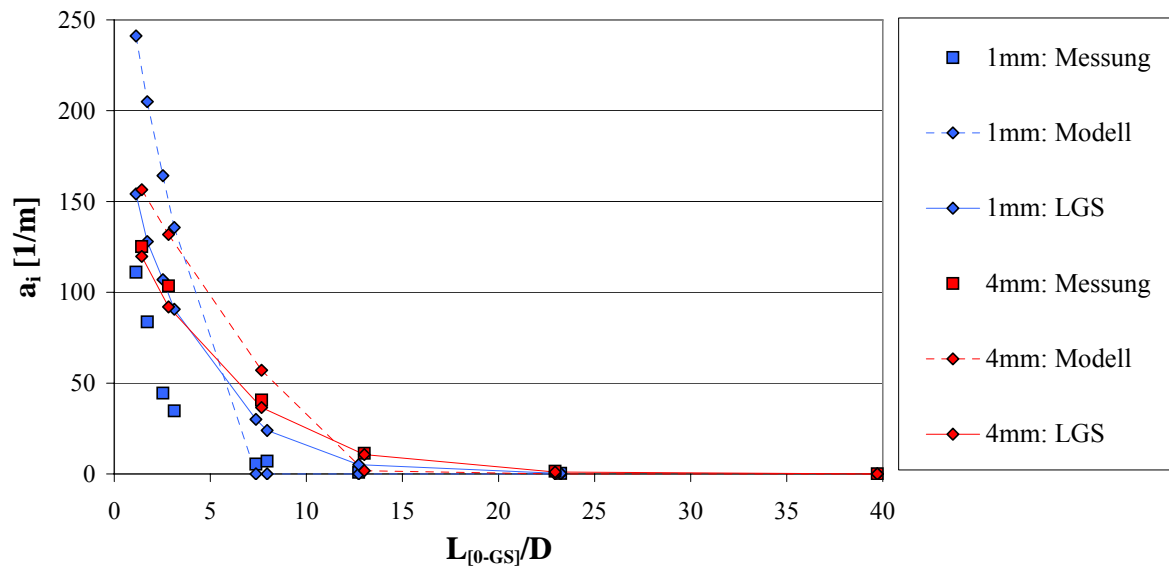


Abb. 4.25: Versuch *p20dp160*, Vergleich von berechneten mit experimentell ermittelten Zwischenphasen-Grenzflächendichten, Wärmeübergang nach HUGHMARK (Modell) bzw. CHEN (LGS)

Man erkennt, dass die Berechnung der Zwischenphasen-Grenzflächendichte unter Verwendung der experimentellen SAUTER-Durchmesser meist kleinere Werte als bei Nutzung von Modellbeziehungen für das Strahlgas liefert. Des Weiteren nimmt die nach diesen Modellbeziehungen berechnete Zwischenphasen-Grenzflächendichte schneller ab.

Die Übereinstimmung mit den experimentellen Daten verbessert sich für beide Düsengrößen. Dabei können die gemessenen Verläufe der 4 mm Einspeisungen nahezu perfekt nachgebildet werden. Die berechneten Zwischenphasen-Grenzflächendichten der 1 mm Düsen weisen im Vergleich dazu größere Abweichungen auf.

Die schon durch die Diskussion der Dampfgehaltskurven festgestellte verzögerte Kondensation bei der Verwendung der experimentellen SAUTER-Durchmesser kann hier bestätigt werden.

5 Kondensation bei Versuchen ohne Drosselung

An der Versuchsanlage TOPFLOW wurden Experimente zur Untersuchung von Kondensationsvorgängen durchgeführt, die durch eine gezielt geregelte Drucksteigerung innerhalb der vertikalen Teststrecke infolge teilweisen Schließens einer Drosselarmatur hinter der Gittersensormessstelle erreicht wurden. Es tritt jedoch auch bei Wasser/Dampf-Experimenten ohne spezielle Drosselung Kondensation auf (vgl. Abb. 5.7). Dies ist darauf zurückzuführen, dass aufgrund der Geometrie des Teststreckenkreislaufs durch die Hydrostatik eine geringe Druck-erhöhung am Eingang in die Testsektionen auftritt. Außerdem kommt es bei der Durchführung von heißen Experimenten zu Wärmeverlusten. Das in Kapitel 3 erläuterte Kondensationsmodell soll auf die entsprechenden Versuchsserien D12 und D13 angewandt werden, wobei unterschiedliche Einperlarten im Experiment zum Einsatz kamen:

- Einperlart: Randeinspeisung Zentrale Gaseinspeisung
VGE (Abb. 2.3) Igel (Abb. 5.1)
- Einspeisung in Bezug auf die Strömungsrichtung: Quer Parallel
- Abstand zum Messort: 12 bzw. 6 unterschiedliche Höhen (vgl. Abb. 2.2) 8,2 m
- Düsendurchmesser: 1 mm bzw. 4 mm 0,8 mm

Die nachstehende Tabelle listet alle Experimente an der Teststrecke mit variabler Gaseinspeisung auf (sortiert nach den Randbedingungen für den Druck in der Dampftrommel, der Volumenstromdichte des Dampfes und der Größe der Einspeiseöffnungen für die Gasphase), die bei einer Volumenstromdichte der flüssigen Phase von 1,017 m/s durchgeführt wurden.

Tab. 5.1: Matrix aller innerhalb der Serien D12 und D13 durchgeführten VGE-Experimente

Volumenstromdichte Dampf [m/s]	p [bar]		10		20		40		65		
	VP		1mm	4mm	VP		1mm	4mm	VP		
0.0235	063				063				063		
0.0368	074				074				074		
0.0574	085				085				085		
0.0898	096				096				096		
0.1400	107				107				107		
0.2190	118				118				118		
0.3420	129				129				129		
0.5340	140				140				140		
0.8350	151				151				151		
1.3050	162				162				162		
2.0380	173				173				173		
3.1850	184				184				184		
4.9750	195				195				195		

1mm

- alle Höhen
- A-I, L, O, R
- A-F
- R
- doppelt
- PR

4mm

- alle Höhen
- B, E
- Q

Die Nomenklatur der Experimentbezeichnungen wurde in Kap. 2.4 erläutert.

Außerdem wurden noch weitere Versuche mit drei verschiedenen Gas-Leerrohrgeschwindigkeiten bei einer Wasser-Volumenstromdichte von 1,611 m/s analysiert, die die Matrix nicht zeigt.

Die Randbedingungen aller innerhalb der Serien D12 und D13 mit zentraler Gaseinspeisung (Abb. 5.1) durchgeführten Experimente sind in Tab. 5.2 zusammengefasst.

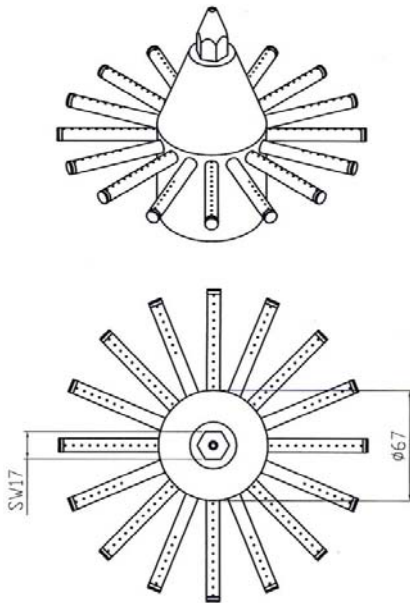


Abb. 5.1: Verteilerkopf mit 152 Bohrungen zu 0,8 mm Lochdurchmesser (Igel)

Tab. 5.2: Matrix der Experimente mit zentraler Gaseinspeisung (Igel)

		Volumenstromdichte Dampf in m/s									
		0.0235	0.0368	0.0574	0.0898	0.14	0.219	0.342	0.534	0.835	
Druck in bar	10	1.017	063	074	085	096	107	118	129	140	151
	20	1.017	063	074	085	096	107	118	129	140	151
	40	1.017	063	074	085	096	107	118	129	140	151
Volumenstromdichte Wasser in m/s	65	1.611	064	075	086	097	108	119	130	141	152
	1.017	063	074	085	096	107	118	129	140	151	
	0.641	062	073	084	095	106	117	128	139	150	
	0.405	061	072	083	094	105	116	127	138	149	
	0.255	060	071	082	093	104	115	126	137	148	
	0.161	059	070	081	092	103	114	125	136	147	
0.102	058	069	080	091	102	113	124	135	146		

■ D12 ■ D13 ■ beide

Sollwerte und Betriebsdaten der Messungen sowie die Ergebnisse der Simulation für die Experimente ohne Drosselung befinden sich tabellarisch geordnet im Anhang 9.2.

5.1 Überprüfung der Modelle zur Berechnung von Dampfgehalt und Wärmeübergang

5.1.1 Drift-Flux-Modelle

In den eindimensionalen Code wurden verschiedene Modelle implementiert, die die Beschreibung der Kondensationsvorgänge innerhalb von Wasser/Dampf-Strömungen ermöglichen. Einerseits sind das Drift-Flux-Modelle, die zur Berechnung des mittleren Dampfgehalts aus den aktuellen Volumenstromdichten dienen. Andererseits wird der Wärmeübergang an der

Phasengrenzfläche zwischen Dampf und Wasser beschrieben. Er beeinflusst den dort stattfindenden Phasenübergang, der nachfolgend analytisch bestimmt wird. Die Untersuchung von Experimenten mit Drosselung zeigt, dass die Wärmeübergangsmodelle im Vergleich zu den Drift-Flux-Modellen einen größeren Einfluss auf die Ergebnisse der Berechnungen haben. Es stellt sich daher die Frage, ob diese Annahme auch für die Experimente ohne Drosselung gilt.

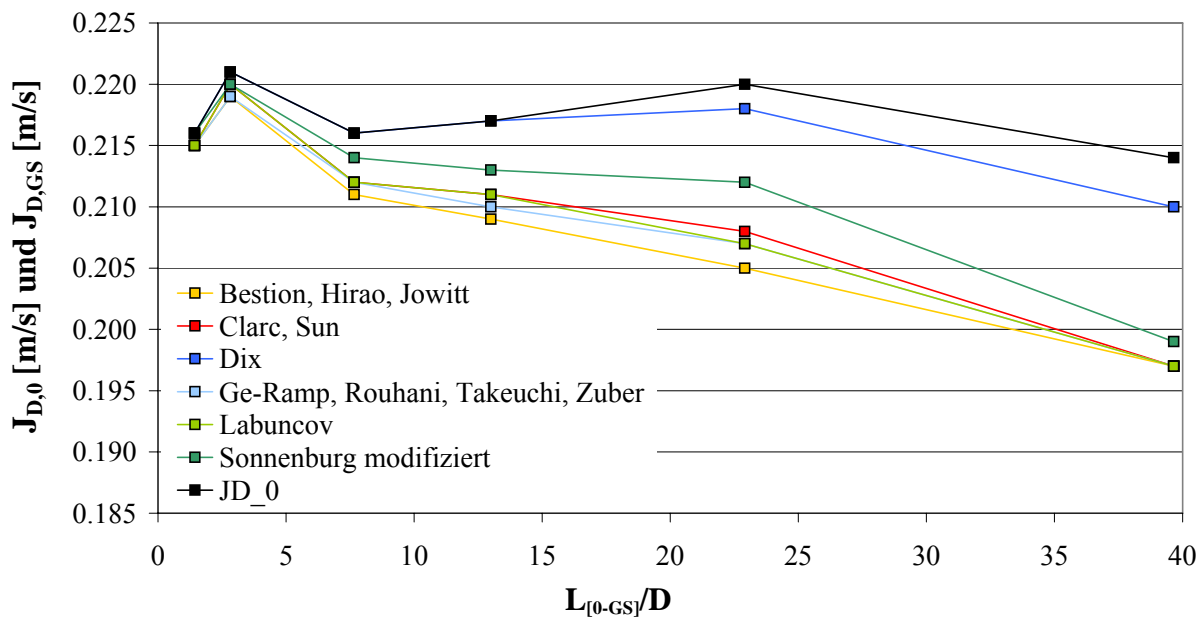


Abb. 5.2: Versuch *p65-118*, Berechnete Dampf-Volumenstromdichten am Ort des Gittersensors in Abhängigkeit von der Einspeisehöhe bei 4 mm Bohrungsdurchmesser für unterschiedliche Drift-Flux-Modelle

Abb. 5.2 zeigt den Einfluss der Drift-Flux-Modelle auf die Intensität des Kondensationsprozesses. Sie stellt die Entwicklung der berechneten Dampf-Volumenstromdichten in Abhängigkeit von der Entfernung der Einspeisung zur Messebene für einen ausgewählten Versuchspunkt dar. Die für die Position des Gittersensors berechneten Volumenstromdichten sind deutlich kleiner, als die jeweils eingespeiste Volumenstromdichte $J_{D,0}$ (schwarze Kurve), die von Messung zu Messung leichten betriebsbedingten Schwankungen unterliegt. Dabei ist die Skalierung der Ordinate zu beachten, die gespreizt wurde und nicht im Nullpunkt beginnt, um Unterschiede zwischen den Modellen besser zu verdeutlichen.

Zur Einschätzung der Kondensationsintensität in einer Zweiphasenströmung werden in diesem Kapitel Kondensationsraten nach Gl. 5.1 berechnet. Diese liegen für den in Abb. 5.2 dargestellten Versuch zwischen 2 und 8 %.

$$G = \frac{J_{D,0} - J_D}{J_{D,0}} \cdot 100\% \quad (\text{Gl. 5.1})$$

Allerdings kann mit dieser Methode die quantitative Güte der Drift-Flux-Modelle nicht beurteilt werden, da für die Dampf-Volumenstromdichte am Gittersensor keine experimentellen Werte vorliegen.

Da die Unterschiede zwischen den in Abb. 5.2 analysierten Drift-Flux-Modellen gering sind, beeinflusst die Auswahl dieser Modelle das Ergebnis der berechneten Dampf-Volumenstromdichten nur unwesentlich. Eine Ausnahme bildet das Modell von Dix. Zusätzlich zeigt Abb. 5.2, dass einige der Modelle Gruppen mit exakt denselben Verläufen ergeben (hellblau: GE-RAMP, ROUHANI, TAKEUCHI, ZUBER; gelb: BESTION, HIRAO, JOWITT, sowie rot: CLARK und SUN).

Für das weitere Vorgehen soll das am Besten geeignete Drift-Flux-Modell anhand von gemessenen Dampfgehalten ausgewählt werden. Hierzu werden, äquivalent zu den Experimenten mit gezielter Kondensation, die zwölf im Anhang 9.4 beschriebenen Drift-Flux-Modelle untersucht.

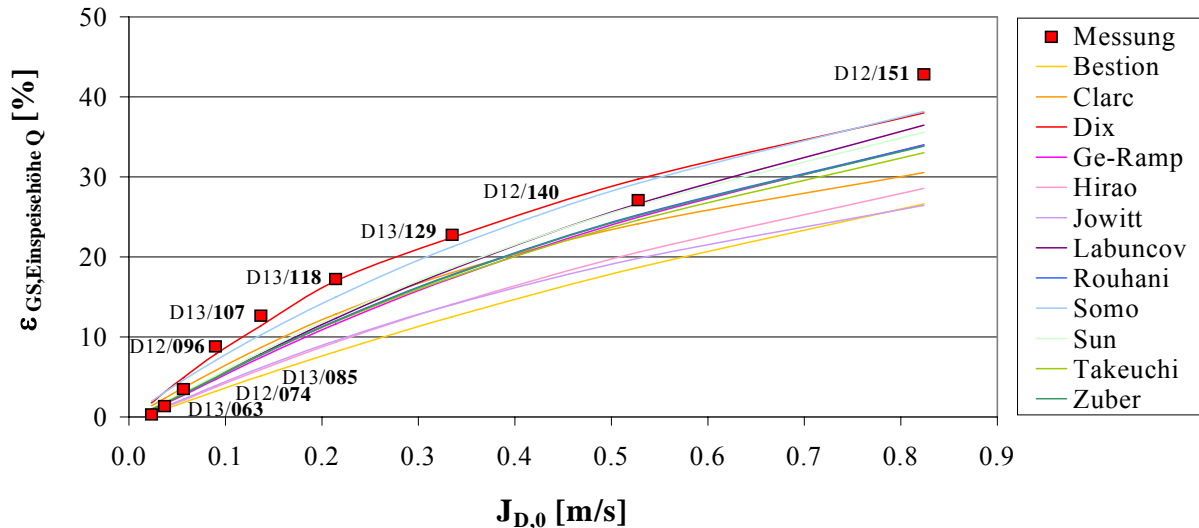


Abb. 5.3: Vergleich der zwölf Drift-Flux-Modelle mit experimentellen Daten aller gemessenen Versuchspunkte bei einer Druckstufe von 65 bar für die Einspeisehöhe Q

Abb. 5.3 zeigt den Vergleich zwischen den rechnerisch und experimentell ermittelten Dampfgehalten am Gittersensor bei Einspeisung auf Höhe Q in Abhängigkeit von den Dampf-Volumenstromdichten aller Versuche bei der Druckstufe p65. Das Modell von HUGHMARK beschreibt dabei den Wärmeübergang.

Es sind zum Teil erhebliche Abweichungen zwischen den einzelnen Modellen und den Messwerten (*I5I*: $\Delta\varepsilon = 5 \dots 16\%$) zu beobachten. Man erkennt weiterhin, dass keines der getesteten Modelle in der Lage ist, alle Messwerte exakt nachzubilden. Diese Ergebnisse bestätigen auch die in Abschnitt 3.2.1.2 beschriebene Untersuchung der Experimente mit Drosselung.

Aus Abb. 5.3 wird ersichtlich, dass der gemessene Dampfgehalt nur in begrenzten Bereichen der Dampf-Volumenstromdichte J_D in guter Näherung nachgebildet wird. Modelle, die bei großen J_D vergleichsweise die besten Ergebnisse liefern (SONNENBURG MODIFIZIERT - SOMO und DIX), ermitteln bei $J_D < 0,1$ m/s im Vergleich zu allen anderen getesteten Modellen die größten Abweichungen. Die gleichen Tendenzen zeigt die Gegenüberstellung aller Drift-Flux-Modelle bei der Druckstufe 40 bar.

Um die Modellierung für diese Experimente durchführen zu können, wird aus den verfügbaren Drift-Flux-Modellen ein geeignetes ausgewählt, das den Dampfgehalt für alle Volumenstromdichten mit guter Näherung nachbilden kann. Bei den untersuchten Kondensationsexperimenten wurde hierzu die mittlere absolute Abweichung nach Gl. 3.19 berechnet.

Um speziell bei kleinen Volumenstromdichten die Genauigkeit der Modelle besser bewerten zu können, wird in diesem Fall der mittlere relative Fehler bestimmt:

$$\bar{F}_{\text{rel}} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{|\varepsilon_{\text{mod},i} - \varepsilon_{\text{mess},i}|}{\varepsilon_{\text{mess},i}}}{N} \cdot 100\% \quad (\text{Gl. 5.2})$$

Für die unterste Dampfeinspeisung mit einem Bohrungsdurchmesser von 4 mm (Höhe Q) sind die mit beiden Methoden bestimmten Abweichungen in Abb. 5.4 dargestellt. Dabei ist ein direkter Vergleich zwischen beiden Methoden möglich, wobei die Sortierung dem kleinsten Wert von \bar{F}_{rel} für die Druckstufe 40 bar folgt.

Betrachtet man die relative Abweichung wird deutlich, dass der Großteil der 12 Modelle bei 40 bar genauer arbeitet als bei 65 bar. Eine mögliche Ursache hierfür ist die Güte der Drift-Flux-Modelle, welche nahezu ausnahmslos mittels Versuchen bei Atmosphärenbedingungen entwickelt und validiert wurden. Daher nimmt die Genauigkeit der Vorhersagen bei steigendem Druck in der Regel ab.

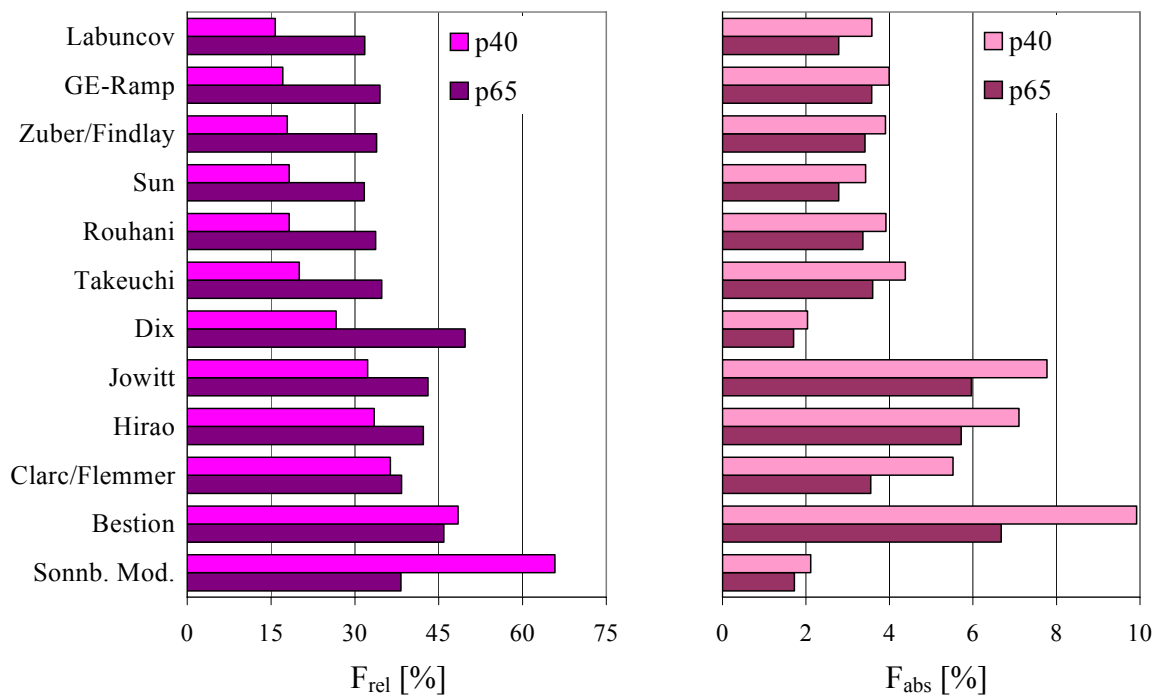


Abb. 5.4: Vergleich aller 12 Drift-Flux-Modelle in Bezug auf ihre mittleren absoluten bzw. relativen Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Dampfgehalten bei Drücken von 40 bzw. 65 bar

Des Weiteren weichen die Modelle nach SONNENBURG MODIFIZIERT und DIX bei \bar{F}_{abs} von der Sortierung der anderen Modelle ab, d.h. die mit diesen Methoden ermittelten Werte sind geringer als erwartet. Grund dafür ist deren bereits erwähnte Ungenauigkeit bei Volumenstromdichten kleiner 0,1 m/s. Diese liefert für \bar{F}_{rel} , im Gegensatz zu \bar{F}_{abs} , einen extrem großen Anteil an der Gesamtabweichung.

Unter Berücksichtigung aller genannten Kriterien wird für die folgenden Berechnungen der Dampfgehalt nach dem Drift-Flux-Modell von LABUNCOV bestimmt. Die damit ermittelten Werte zeigen, bezogen auf den mittleren relativen Fehler, die geringsten Abweichungen sowohl bei 40 als auch bei 65 bar. Betrachtet man den absoluten Fehler, liegen die Ergebnisse im mittleren Wertebereich.

Die vorangegangenen Graphiken beinhalten den Vergleich von gemessenen und berechneten Dampfgehalten exakt in der Höhe des Gittersensors. Das Kondensationsmodell ist aber auch in der Lage, die Entwicklung verschiedener Parameter über der Länge der Rohrleitung zu bestimmen. Somit liefert der Code den Zugang zu axialen Verteilungen, die aus konstruktiven Gründen momentan auf experimentellem Weg noch nicht bestimmt werden können. Ein Beispiel hierfür ist die Ermittlung des Punktes, an dem die im Vergleich zu den Kondensationsexperimenten geringe Unterkühlung zwischen beiden Phasen abgebaut ist und Nachverdamp-

fung einsetzt. Durch fehlende Temperaturmessstellen lässt sich im Experiment derzeit noch nicht feststellen, ob an einem bestimmten Ort Kondensation oder Verdampfung stattfindet.

Abb. 5.5 zeigt die berechnete Entwicklung der Dampf-Volumenstromdichte ab Einspeisehöhe (4 mm Öffnungen) für den Versuchspunkt 151 bei 65 bar. Zusätzlich ist die Volumenstromdichte für die jeweilige Position des Gittersensors eingetragen.

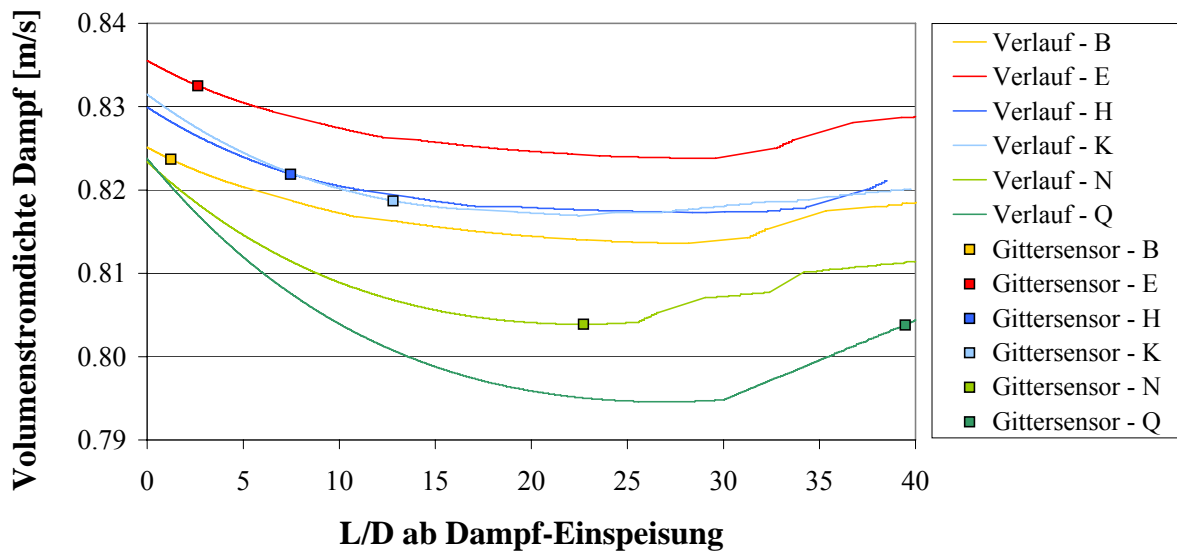


Abb. 5.5: Entwicklung der Dampf-Volumenstromdichte bei Einspeisung über 4 mm Bohrungen mit Angabe der jeweiligen Position des Gittersensors, *p65-151*

Zu beachten ist hier wieder die gedehnte Skalierung der Ordinate. Man erkennt, dass bei den Höhen B bis N der Gittersensor erreicht wird, bevor sich die Unterkühlung des Wassers abgebaut hat. Bei der untersten Höhe Q wird dieser Zustand schon vor der Messposition erreicht, am Gittersensor liegt demzufolge Nachverdampfung vor. Die maximale Kondensationsrate G (Gl. 5.1) beträgt bei dieser Höhe 3,5 % bei einer Anfangsunterkühlung $t_D - t_W = 0,75$ K. Dieser Wert unterstreicht die geringere Intensität der Kondensation im Vergleich zu den in Kapitel 4 diskutierten Versuchen mit Drosselung.

5.1.2 Modelle zur Berechnung der Nusselt-Zahl

Kap. 3.3.2 widmet sich der ausführlichen Diskussion von Modellen zur Berechnung des Wärme- und damit auch des Stoffübergangs an der Phasengrenze zwischen Dampf und Wasser. Die dort beschriebenen neun Methoden sollen auch hier getestet werden, um ihren Einfluss auf das Ergebnis der Modellvorhersagen abzuschätzen.

Abb. 5.6 vergleicht die mit Hilfe dieser Wärmeübergangsmodelle berechneten Dampf-Volumenstromdichten der Einspeisungen mit großem Düsendurchmesser für den Versuch 140 bei einem Druck von 10 bar untereinander sowie mit den Werten an den 6 Einspeisepositionen. Alle Modelle berechnen eine relativ starke Abnahme der Volumenstromdichte des Dampfes, die sich aufgrund des geringen Druckes und damit der geringen Dampfdichte ergibt.

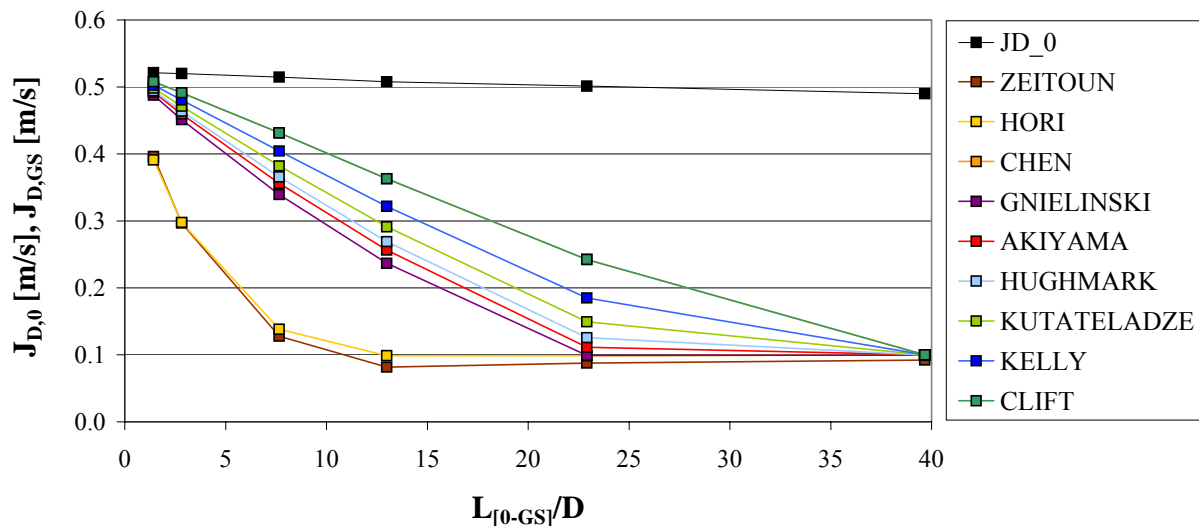


Abb. 5.6: Vergleich der 9 Wärmeübergangsmodelle, Versuchspunkt 140 bei einem Druck von 10 bar, Einspeisung durch 4 mm Bohrungen

Es zeigt sich, dass die Wärmeübergangsmodelle, analog zur Versuchsserie K12, qualitativ gleiche Verläufe berechnen. Quantitativ kann man die Modelle in zwei Gruppen mit ähnlichen Tendenzen einteilen. Eine davon wird von den Modellen nach HORI und ZEITOUN gebildet. Diese Gruppe überschätzt den Wärmeübergang und berechnet eine zu starke Kondensation. Die anderen 7 Methoden liegen, ähnlich wie in Kap. 4.2.3, relativ dicht beieinander. Weiterhin ist bemerkenswert, dass alle Modelle bei Einspeisung des Dampfes an der untersten Höhenposition annähernd dieselbe Volumenstromdichte am Gittersensor ermitteln.

Das Modell nach **HUGHMARK**, das bei den Untersuchungen zu den Versuchen mit erzwungener Kondensation die beste Übereinstimmung mit den experimentellen Daten lieferte, liegt auch in diesem Fall im mittleren Bereich der Kurvenschar und wird für die im Kap. 5 analysierten Experimente zur Beschreibung des Zwischenphasen-Wärmeübergangs genutzt.

5.2 Ergebnisse der Experimente mit Randeinspeisung des Dampfes D12 / D13

5.2.1 Anteil der Kondensation im Vergleich zu Versuchen der Serie K12

Abb. 5.6 zeigt das Ergebnis der Nachrechnungen von Experimenten ohne Drosselung bei einem Druck von 10 bar. Dabei ist die Kondensation unerwartet hoch, d.h. die am Messort registrierte Dampf-Volumenstromdichte sinkt bei Nutzung der untersten Einspeisung auf ein fünftel des Wertes ab, der bei Verwendung der oberen Einspeisung gemessen wurde. Die experimentelle Bestätigung hierfür liefert ein Vergleich mit den am Gittersensor gemessenen Dampfgehalten (siehe Anhang 9.2; Versuchsserie D12).

Abb. 5.7 zeigt Dampfgehalte für die Druckstufen 10 und 20 bar. Man erkennt sowohl im Fall der nicht gedrosselten Strömung (dp0) als auch für die Experimente der Serie K12 (dp70 und 100 bzw. dp80 und 160) Kondensation des eingespeisten Dampfes.

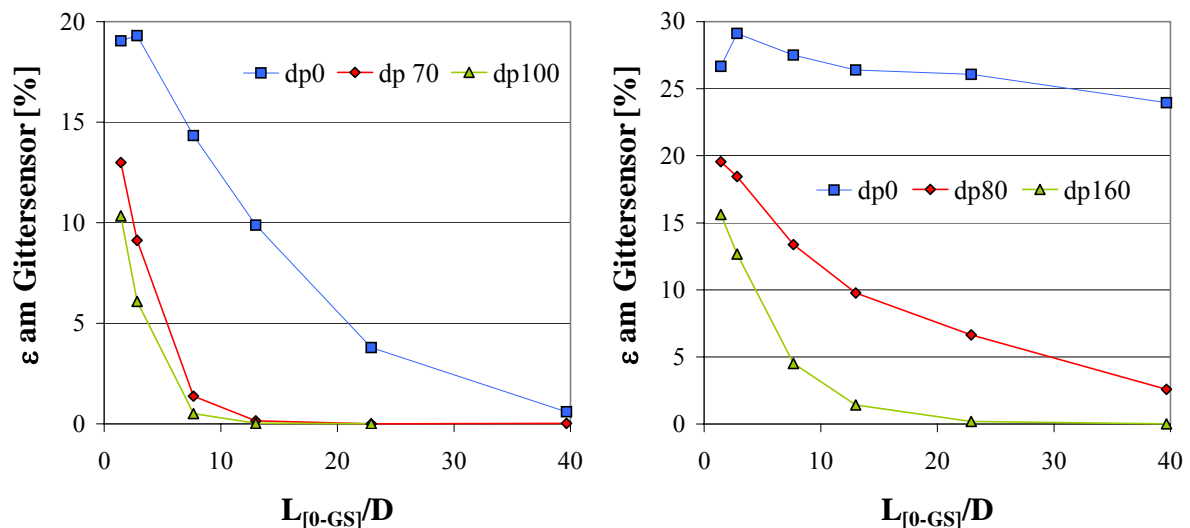


Abb. 5.7: Vergleich der experimentellen Dampfgehalte bei unterschiedlichen Eindrosselungen der Strömung, Versuchspunkt 140 bei 10 (links) und 20 bar (rechts), Einspeisung über 4 mm Bohrungen

Die nachfolgenden Bilder sollen diese Feststellung durch einen Vergleich der Modellvorhersagen für die Dampf-Volumenstromdichten der betrachteten Experimente untermauern. Sie zeigen, dass die berechnete Abnahme von J bei den Experimenten mit gezielter Kondensation (dp70 und 100 bzw. dp80 und 160) im Vergleich zu denen ohne Drosselung (dp0) weitaus stärker ausgeprägt ist.

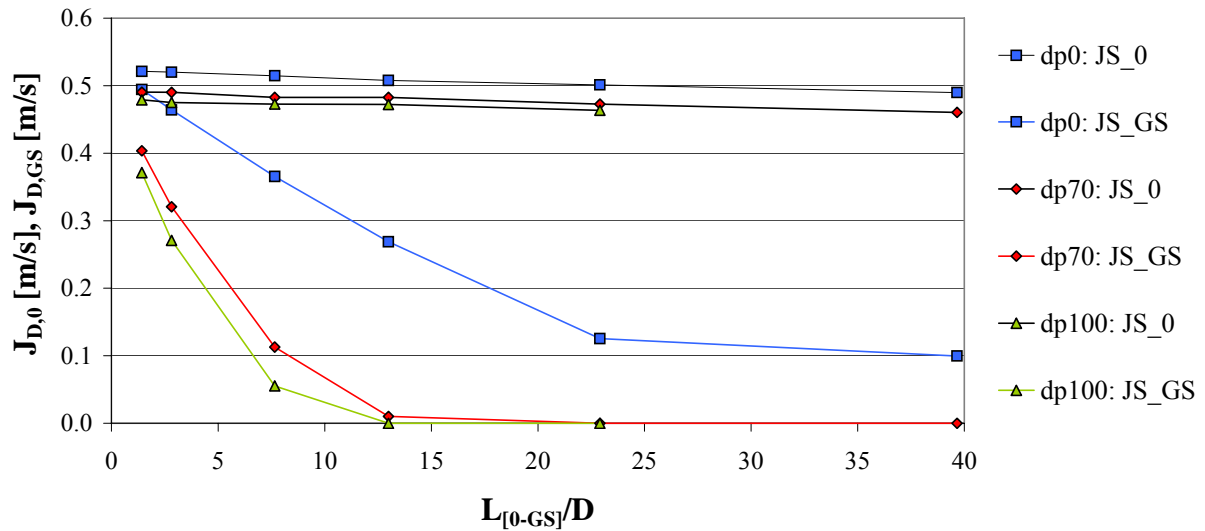


Abb. 5.8: Vergleich der Dampf-Volumenstromdichten bei unterschiedlichen Eindrosselungen der Strömung, Versuch *p10-140*, Einspeisung über 4 mm Bohrungen

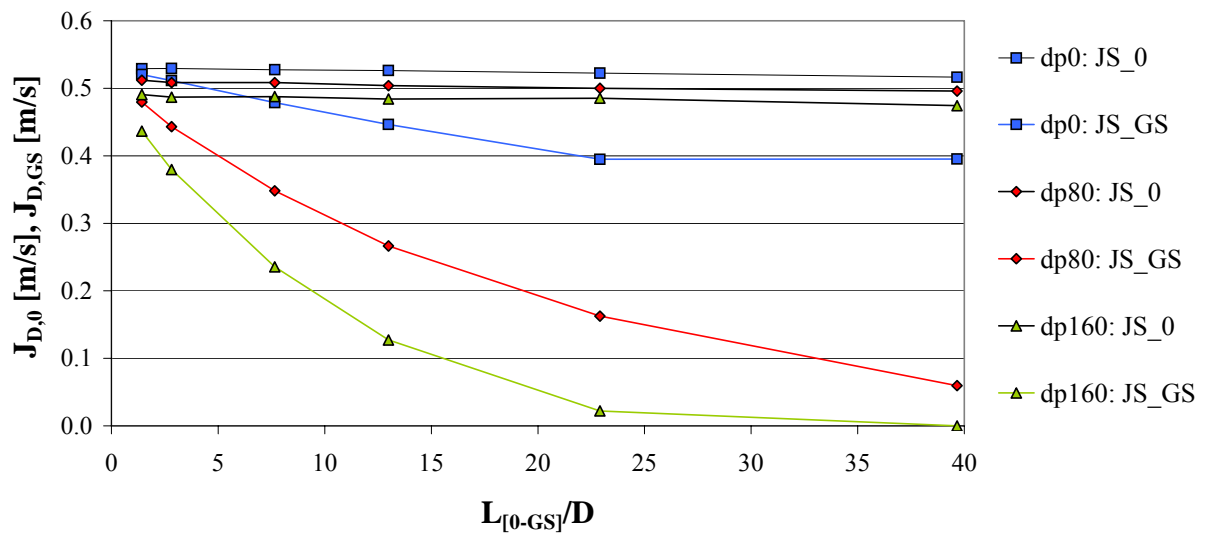


Abb. 5.9: Vergleich der Dampf-Volumenstromdichten bei unterschiedlichen Eindrosselungen der Strömung, Versuch *p20-140*, Einspeisung über 4 mm Bohrungen

Quantitativ lässt sich diese Beobachtung durch die Berechnung der Kondensationsraten nach (Gl. 5.1) erfassen:

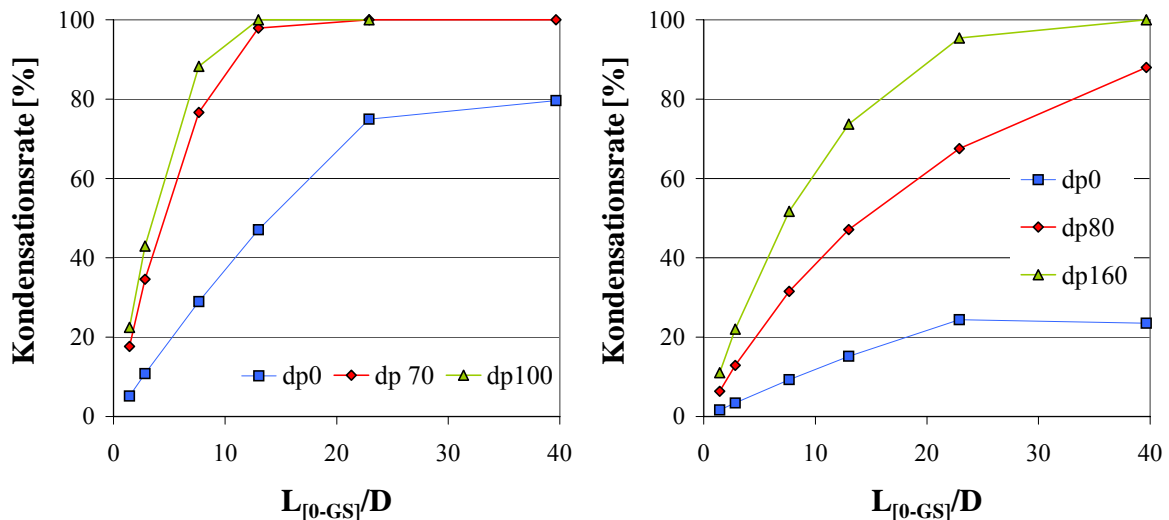


Abb. 5.10: Vergleich der Kondensationsraten bei unterschiedlichen Eindrosselungen der Strömung, Versuch 140 bei 10 (links) und 20 bar (rechts), Einspeisung über 4 mm Bohrungen

5.2.2 Druckabhängigkeit der Kondensationsintensität

Die Vielzahl der experimentell untersuchten Punkte (siehe Tab. 5.1) lässt Vergleiche zwischen den vier unterschiedlichen Druckstufen zu. Abb. 5.11-a zeigt für den Versuchspunkt 151 die Entwicklung der Temperaturdifferenzen zwischen beiden Phasen vom Einspeisepunkt bis zur Messebene bei einer Dampfeinspeisung durch die 4 mm Bohrungen für die Druckstufen 10, 20, 40 und 65 bar. Parallel dazu ist die prozentuale Abnahme der Dampf-Volumenstromdichte vom Einspeiseort bis zum Gittersensor (Kondensationsraten nach Gl. 5.1) für die gleichen Versuchsbedingungen dargestellt (Abb. 5.11-b).

In allen vier Fällen ist Kondensation zu beobachten, deren Intensität mit steigendem Druck abnimmt. Ursache hierfür ist die Unterkühlung des Wassers, die bei 10 bar ihren maximalen Wert erreicht und sich mit steigendem Druck verringert. Beide Diagramme zeigen außerdem, dass annähernd dieselben Temperaturdifferenzen bei unterschiedlichen Drücken nicht zu gleichen Kondensationsraten führen. Als Beispiel dient hier der Vergleich zwischen den Versuchen H – p20 (grüne Pfeile), K – p40 (rosa Pfeile) und N – p65 (blaue Pfeile). Alle Drei weisen eine Unterkühlung des Wassers von ca. 0,5 K auf, allerdings kondensieren bei einem Druck von 20 bar 7,4 % des eingespeisten Dampfes, bei 40 bar 3,8 % sowie bei 65 bar 2,4 %.

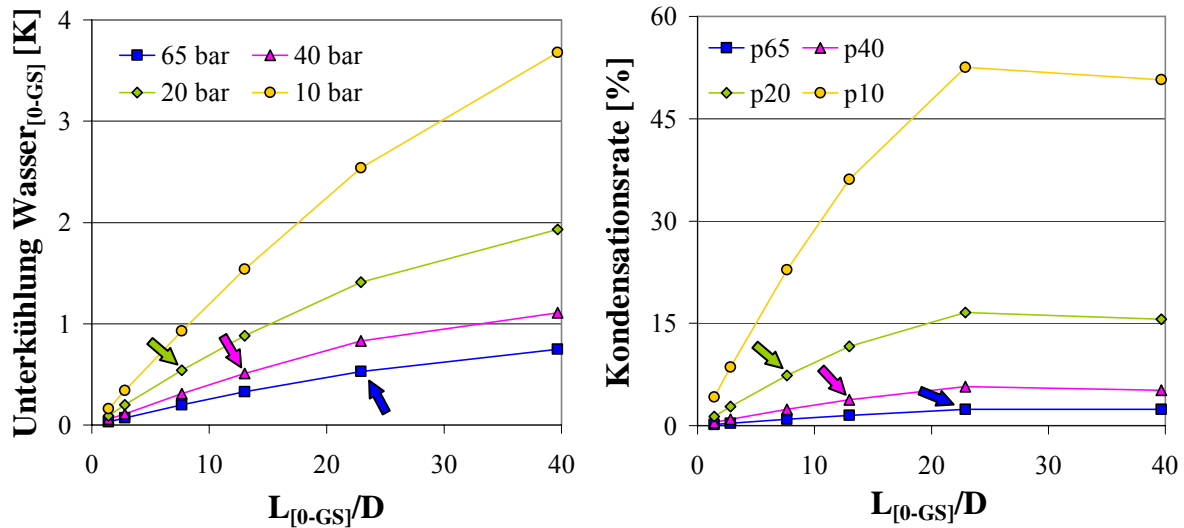


Abb. 5.11: Entwicklung der Temperaturdifferenz zwischen beiden Phasen vom Einspeisepunkt bis zum Gittersensor (a) und der Kondensationsrate des Dampfes (b) für die 4 mm Öffnungen, Versuchspunkt 151 bei allen vier Druckstufen

Die Ursache für die Abnahme der Kondensationsrate ergibt sich aus ihrer Definition entsprechend Gleichung 5.1. Sie beschreibt die relative Änderung der Dampf-Volumenstromdichte zwischen Einspeiseposition und Messebene. Ausgehend davon, dass bei gleichen Triebkräften für den Wärmeübergang (annähernd konstante Temperaturdifferenz zwischen den Phasen sowie nur geringfügige Änderungen von a_i und α) auch die gleiche Wärmemenge übertragen werden müsste, ist es in diesem Fall sinnvoll, die Änderung des Kondensationsmassenstroms zu untersuchen, da dieser Parameter die Druckabhängigkeit der Dampfdichte berücksichtigt.

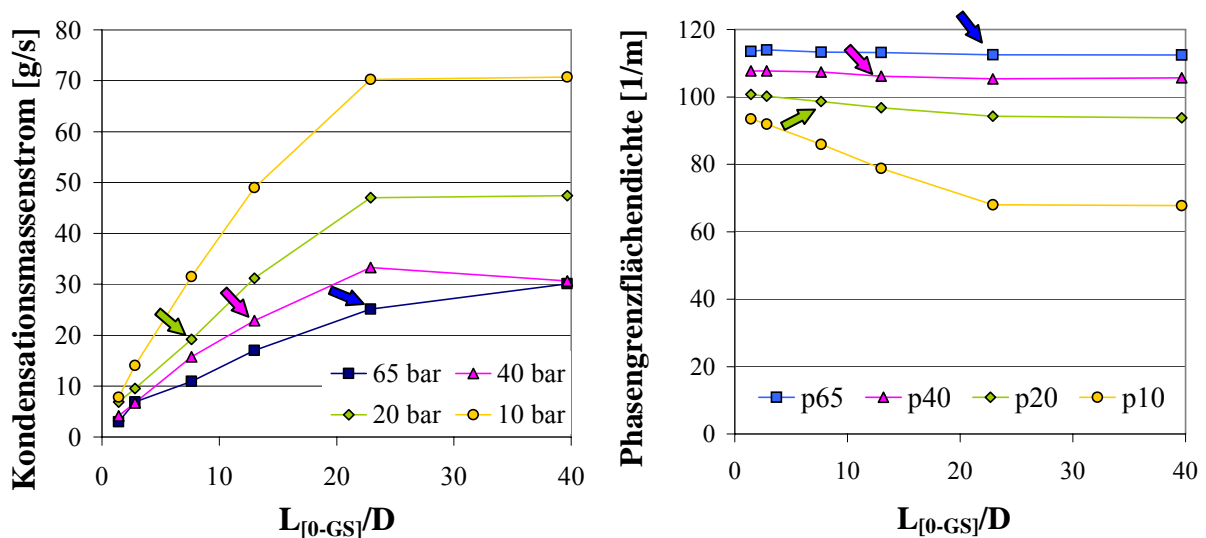


Abb. 5.12: Entwicklung des Kondensationsmassenstroms (a) sowie der Zwischenphasen-Grenzflächendichte (b) bei Einspeisung über 4 mm Bohrungen, Versuchspunkt 151 für alle vier Druckstufen

Abb. 5.12-a zeigt für die ausgewählten Versuche lediglich einen geringen Anstieg des Kondensationsmassenstroms bei Zunahme des Druckes. Daraus folgt, dass die hohe Druckabhängigkeit der Kondensationsrate in Abb. 5.11-b hauptsächlich auf den starken Anstieg der Dampfdichte bei steigendem Druck zurückzuführen ist. Die Erhöhung des Kondensationsmassenstroms lässt sich entsprechend Gl. 3.58 größtenteils mit der Zunahme der Zwischenphasen-Grenzflächendichte (Abb. 5.12-b) erklären.

Des Weiteren werden in Abb. 5.13 modellierte und gemessene Dampfgehalte am Gittersensor für den Versuchspunkt 140 bei Drücken von 10, 20 und 40 bar gegenübergestellt. Deutlich erkennt man die Kondensation eines großen Teils des eingespeisten Dampfes (ca. 75 % - Modell bzw. 100 % - Experiment) bei der Druckstufe 10 bar. Mit zunehmendem Druck verringert sich die Kondensationsintensität (20 bar: Modell: 20 %, Experiment: 11 %) bzw. 40 bar (Modell und Experiment: ca. 5 %). Die Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Daten sind hauptsächlich auf die Fehler der empirischen Modelle zur Bestimmung von Dampfgehalt bzw. Wärmeübergang zurückzuführen. Außerdem ist auch die Methode zur Ermittlung des Dampfgehalts mittels der Gittersensoren fehlerbehaftet. Eine Analyse dieser Fehler enthält Abschnitt 6.2. Weiterhin wirken sich betriebsbedingte Schwankungen von Druck und Massenströmen negativ auf die Messungen aus.

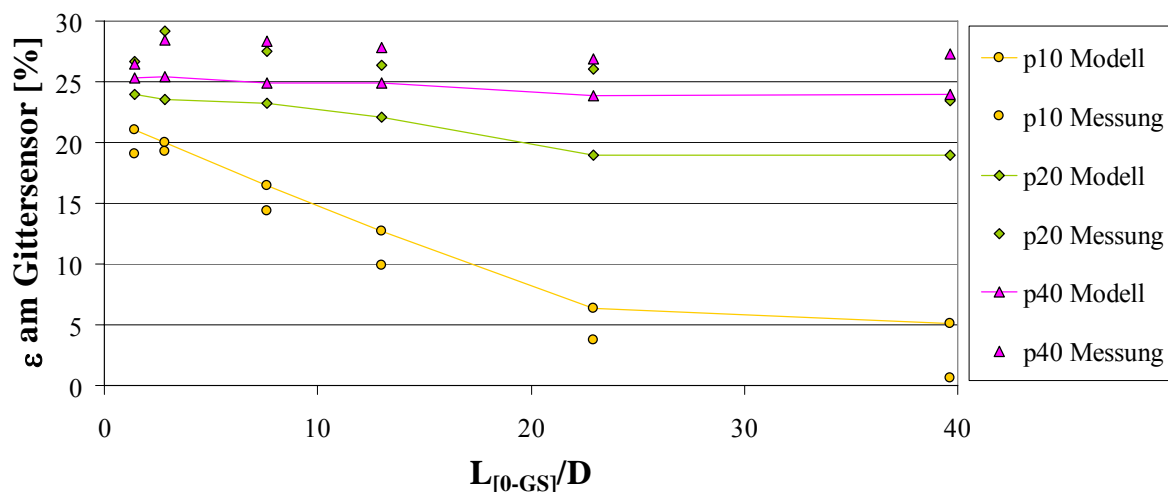


Abb. 5.13: Vergleich von berechneten Dampfgehalten mit Messwerten bei den 4 mm Einspeisungen für den Versuchspunkt 140, Druckstufen: 10, 20 und 40 bar

Bei weiteren analysierten Versuchspunkten der Druckstufe 10 bar, die weniger Dampfgehalt aufweisen (z.B. 096), konnte eine vollständige Kondensation des Dampfes schon bei höheren Einspeisepositionen nachgewiesen werden (Anhang 9.2). Wie auch beim Versuchspunkt 140 wurde in diesen Fällen aus den experimentellen Daten ein Dampfgehalt < 1 % bestimmt.

5.2.3 Einfluss der Primärblasengröße

Die Größe der an der Einspeisestelle entstehenden Dampfblasen kann an der variablen Gas-einspeisung durch das Öffnen von verschiedenen Einspeisekammern mit Bohrungsdurchmessern von 1 bzw. 4 mm geändert werden (vgl. Abschnitt 2.2).

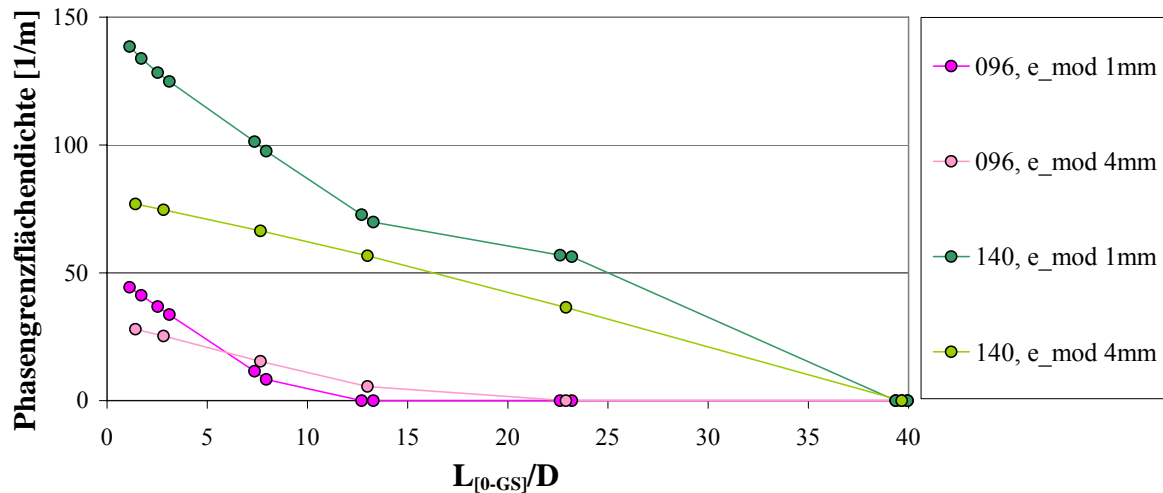


Abb. 5.14: Entwicklung der Phasengrenzfläche bei Einspeisung über 1 bzw. 4 mm Bohrungen für die Versuchspunkte 096 und 140 der Druckstufe p10

Die damit erzeugten unterschiedlich großen Primärblasen beeinflussen vor allem die Ausdehnung der Phasengrenzfläche innerhalb der Zweiphasenströmung. Abb. 5.14 vergleicht die an der Gittersensorposition berechneten Zwischenphasen-Grenzflächendichten a_i von zwei Versuchspunkten mit $p = 10$ bar, getrennt nach der Größe der Einspeiseöffnungen.

Die Abbildung zeigt deutlich, dass bei Einspeisung des Dampfes durch die oberen Kammern (A - C) die Ausdehnung von a_i für die kleineren Bohrungen um 50 – 80 % über den Werten für die großen Öffnungen liegt. Außerdem nimmt die Zwischenphasen-Grenzflächendichte der kleineren Primärblasen schneller ab als die der Größeren, so dass sich für den Punkt 096 beide Kurven schneiden. Wie schon in den Kapiteln 4.2.5 und 4.3.3 erläutert, liegt die Ursache hierfür in dem durch die größere Phasengrenzfläche erhöhten Wärmeübergang (siehe Gl. 3.58), der zur beschleunigten Kondensation und somit zur schnelleren Reduktion von a_i führt.

Abb. 5.15 bestätigt diese Aussage. Sie stellt den Einfluss der Zwischenphasen-Grenzflächendichte auf die Entwicklung des Dampfgehalts ε dar.

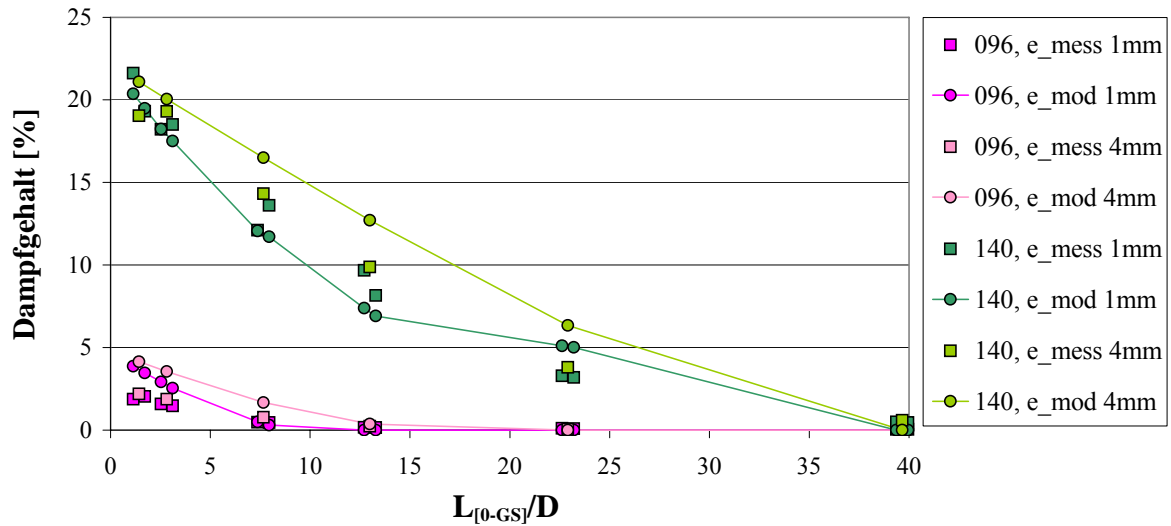


Abb. 5.15: Vergleich der modellierten Entwicklung von ϵ bei Einspeisung des Dampfes durch 1 bzw. 4 mm Öffnungen für die Versuchspunkte 096 und 140 der Druckstufe p10 mit den entsprechenden Messwerten

Die Druckabhängigkeit der Entwicklung der Zwischenphasen-Grenzflächendichte analysiert ein Vergleich der Abb. 5.14 und Abb. 5.16. In beiden Diagrammen sind die Versuchspunkte 096 und 140 dargestellt. Berücksichtigt man die Fehler bei der Berechnung und experimentellen Bestimmung von a_i sind die Werte für die oberen Dampfeinspeisungen bei beiden Druckstufen annähernd identisch.

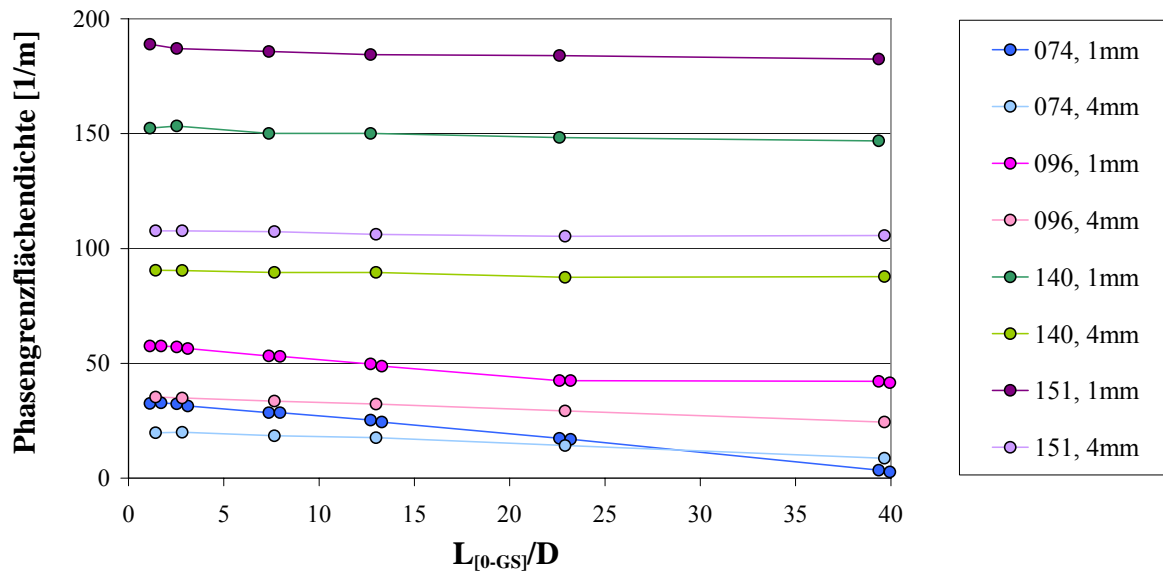


Abb. 5.16: Entwicklung der Phasengrenzfläche für diverse Versuchspunkte der Druckstufe p40, Dampfeinspeisung durch 1 bzw. 4 mm Öffnungen

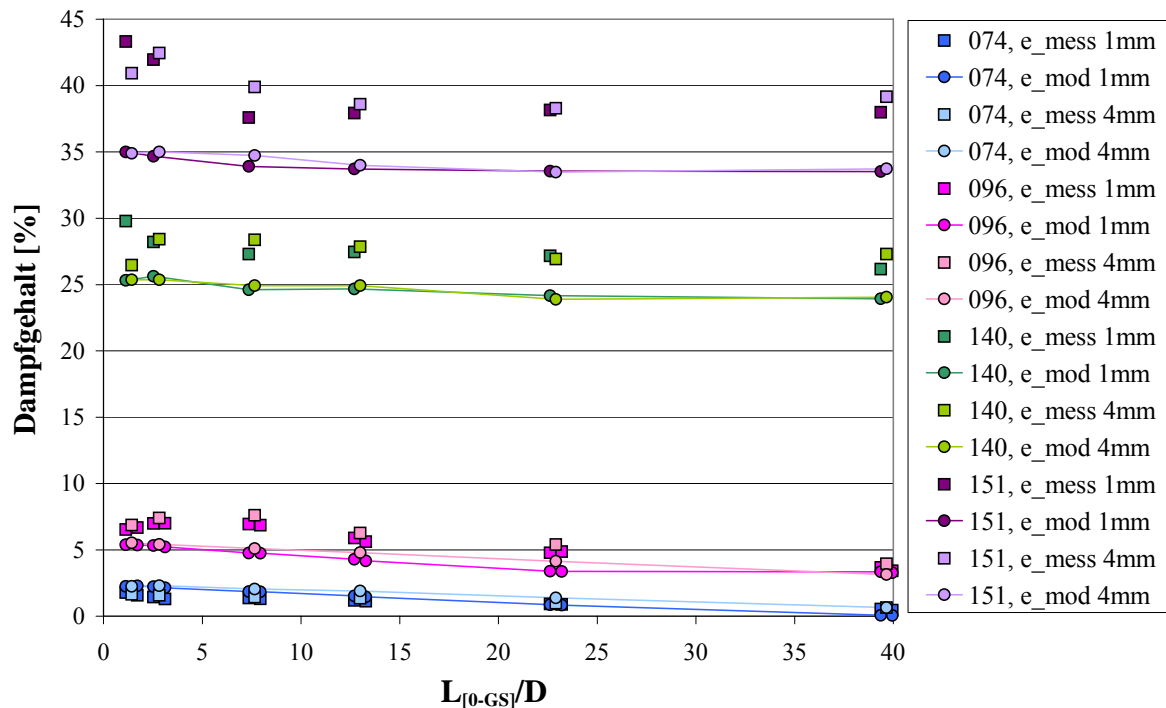


Abb. 5.17: Vergleich der modellierten Entwicklung von ε bei Einspeisung des Dampfes durch 1 bzw. 4 mm Öffnungen für diverse Versuchspunkte der Druckstufe p40 mit den entsprechenden Messwerten

Der Verlauf der Kurven unterscheidet sich jedoch wesentlich voneinander. Während die Phasengrenzfläche bei den 10 bar Versuchen schnell abnimmt, verringert sie sich bei höherem Druck nur sehr langsam.

Abb. 5.15 und Abb. 5.17 zeigen die Entwicklung des Dampfgehalts für die gleichen Versuche. Beide Bilder bestätigen die im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Druckabhängigkeit der Kondensationsintensität, d.h. bei den 10 bar Versuchen nehmen sowohl a_i als auch ε wesentlich schneller ab als bei 40 bar. Die Ursachen für diesen Effekt wurden bereits in Kapitel 5.2.2 erläutert.

Die Gegenüberstellung von experimentellen und berechneten Werten in Abb. 5.15 und Abb. 5.17 zeigt, dass sich die Abweichungen im Bereich höherer Dampfgehalte vergrößern. Qualitativ werden die Tendenzen der Versuchsdaten von den Modellen gut nachgebildet. Die quantitative Untersuchung ergibt, dass bei höheren Drücken die Dampfgehalte vom Modell meist unterschätzt werden. Eine mögliche Ursache hierfür sind die Drift-Flux-Modelle, die, basierend auf Versuchen bei Atmosphärendruck, entwickelt und validiert wurden.

5.3 Ergebnisse der Experimente mit zentraler Gaseinspeisung (Igel)

5.3.1 Vergleich der Messergebnisse für die zentrale- und die Randeinspeisung

Wie bereits zu Beginn dieses Kapitels beschrieben, wurden nicht nur Experimente an der VGE durchgeführt, bei denen aus konstruktiven Gründen die Gaseinperlung vom Rand aus erfolgt. Zusätzlich hierzu liegen Messdaten für Versuche mit zentraler Gaseinspeisung vor, die in den folgenden Abschnitten analysiert werden sollen.

Tab. 5.3: Vergleich der experimentell bestimmten Dampfgehalte am Gittersensor [%] für Versuchsdaten mit zentraler- bzw. Randeinspeisung für alle 4 Druckstufen

	10 bar				20 bar					40 bar			
Einspeisung	<i>096</i>	<i>118</i>	<i>140</i>	<i>151</i>	<i>074</i>	<i>096</i>	<i>118</i>	<i>140</i>	<i>151</i>	<i>074</i>	<i>096</i>	<i>118</i>	<i>140</i>
Rand (R bzw. P+R)	0,0	2,6	0,5	25,2	0,0	0,3	1,9	26,0	35,3	0,4	3,4	14,4	26,2
zentral (Igel)	0,0	2,5	1,2	13,3	0,0	0,1	0,8	25,0	34,7	0,0	3,1	15,5	26,7
	65 bar												
	<i>063</i>	<i>074</i>	<i>075</i>	<i>085</i>	<i>086</i>	<i>096</i>	<i>097</i>	<i>107</i>	<i>118</i>	<i>118</i>	<i>129</i>		
Rand (R bzw. P+R)	0,1	1,2	0,7	3,2	1,5	8,5	6,6	12,8	14,2	16,7	21,6		
zentral (Igel)	0,1	1,1	0,4	3,1	2,1	8,4	7,1	13,1	14,6	16,7	23,2		

Da es sich bei dem in diesem Bericht beschriebenen Code um ein Programm mit eindimensionaler Geometrie handelt, ist eine numerische Gegenüberstellung der Strömungsformen bzw. -parameter beider Einperlmethode leider nicht möglich.

Ein Vergleich der experimentell bestimmten Daten der Randeinspeisung über die 1 mm Öffnungen der Höhe R bzw. P+R und der zentralen Gaseinspeisung (0,8 mm) ergab keine signifikanten Unterschiede (Tab. 5.3). Dieses Ergebnis erklärt sich aus den großen Einlaufängen zwischen Einperlung und Messort von ca. 40 L/D, bei denen die Strömung als eingestellt betrachtet werden kann.

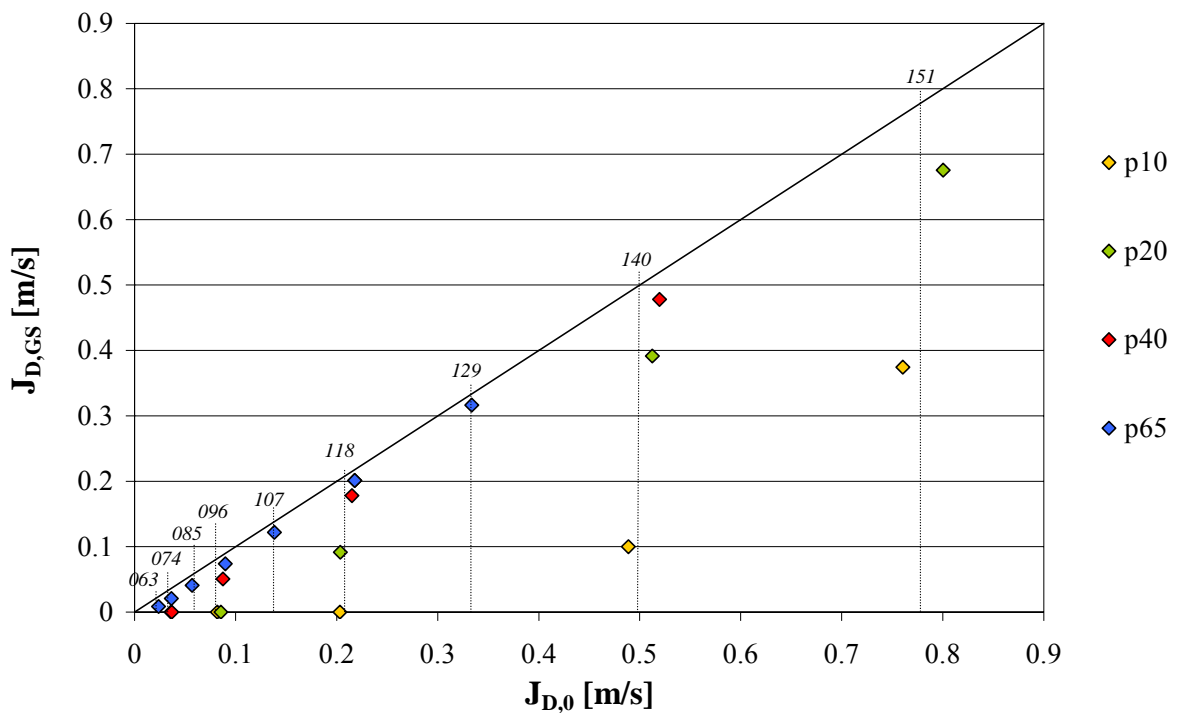
Analysiert man die in Tab. 5.3 zusammengefassten Gasgehalte ergibt sich ein mittlerer relativer Fehler (analog zu Gl. 5.2) von 22 %. Abgesehen vom Punkt *151p10*, ist die Abweichung hauptsächlich auf die Experimente mit kleinen Gasgehalten zurückzuführen. Dieser Effekt beruht auf dem Messprinzip der Gittersensoren, die bei Blasengrößen unter 3 mm bei der Erfassung des Gasgehalts ihre konstruktiven Grenzen erreichen. Davon abgesehen, bestätigen die in Tab. 5.3 gegenübergestellten Daten die grundsätzliche Eignung der Messtechnik und

der Auswerteverfahren. Außerdem belegen sie die Reproduzierbarkeit der Experimente an der Versuchsanlage.

5.3.2 Druckeinfluss auf die Kondensation

Analog zur Bewertung der experimentellen Daten der Versuchsserien D12 bzw. D13 soll auch für diese Einspeisegeometrie der Einfluss wichtiger Parameter auf die Zweiphasenströmung untersucht werden. Das folgende Bild zeigt den Druckeinfluss auf die Kondensationsvorgänge in der Testsektion durch einen Vergleich zwischen eingespeisten ($J_{D,0}$) und am Gittersensor berechneten Dampf-Volumenstromdichten ($J_{D,GS}$) für alle verfügbaren Versuchspunkte mit einer Wasser-Volumenstromdichte von 1,017 m/s (Tab. 5.2).

Für die Versuchspunkte innerhalb der vier Druckstufen bleibt der Abstand zwischen den farbigen Datenpunkten und der schwarzen Linie ($J_{D,0} = J_{D,GS}$) konstant. Hiervon ausgenommen sind die Experimente, bei denen der Dampf bis zum Gittersensor bereits vollständig kondensiert und somit $J_{D,GS} = 0$ ist. Dieser Abstand, der den unter dem Diagramm für die vier Druckstufen angegebenen mittleren Differenzen beider Volumenstromdichten entspricht, ist ein Maß für den kondensierten Dampfmassenstrom.



$J_{D,0} - J_{D,GS} = 0,39 \text{ m/s}$ $J_{D,0} - J_{D,GS} = 0,12 \text{ m/s}$ $J_{D,0} - J_{D,GS} = 0,038 \text{ m/s}$ $J_{D,0} - J_{D,GS} = 0,016 \text{ m/s}$

Abb. 5.18: Einfluss des Druckes auf die am Gittersensor berechneten Dampf-Volumenstromdichten in Abhängigkeit von den eingespeisten Dampf-Volumenstromdichten

Abb. 5.18 bestätigt, dass die Kondensationsmenge nicht von $J_{D,0}$ sondern vom Druck abhängt: Der Anteil des kondensierten Dampfes beträgt bei 65 bar nur noch 4 % im Vergleich zur Situation bei 10 bar. Berücksichtigt man die unterschiedlichen Dampfdichten bei 65 bzw. 10 bar und rechnet die Volumenstromdichten in Dampfmassenströme um, liegt dieser Anteil bei ca. 26 %.

5.3.3 Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit der flüssigen Phase

Die experimentell untersuchten Kombinationen von Dampf- und Wasser-Volumenstromdichten lassen auch eine Abhängigkeit der Kondensationsintensität von der Strömungsgeschwindigkeit erkennen. Abb. 5.19 vergleicht die Volumenstromdichten des eingespeisten und des am Gittersensor ermittelten Dampfes für verschiedene Wasser-Volumenstromdichten miteinander. Das Diagramm zeigt deutlich, dass sich mit zunehmender Wasser-Volumenstromdichte die Differenz zwischen $J_{D,0}$ und $J_{D,GS}$ vergrößert.

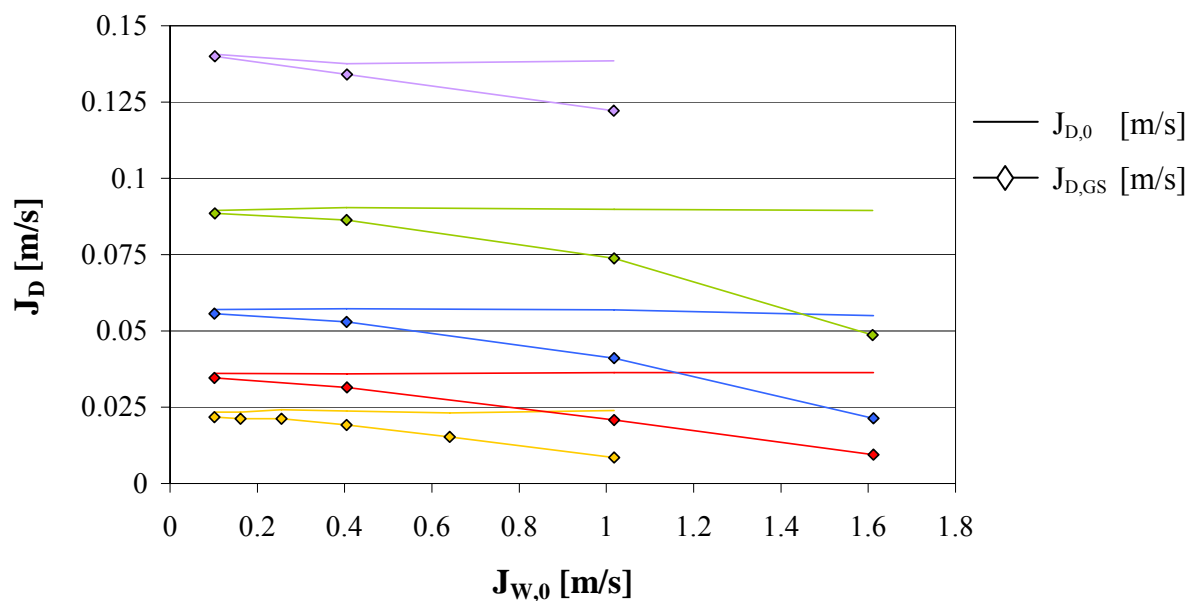


Abb. 5.19: Eingespeiste und am Gittersensor bestimmte Dampf-Volumenstromdichten für diverse Versuchspunkte mit zentraler Dampfeinspeisung in Abhängigkeit von der jeweiligen Wasser-Volumenstromdichte bei einem Druck von 65 bar

Die Ursache hierfür ergibt sich einerseits aus dem Verhalten des volumetrischen Dampfgehalts ε , der für gleiche $J_{D,0}$ absinkt, wenn sich $J_{W,0}$ erhöht. Andererseits beinhaltet die Differenz zwischen $J_{D,0}$ und $J_{D,GS}$ auch einen Anteil an Kondensation, der Volumenstromdichte bzw. Dampfgehalt reduziert. Um diese Anteile bewerten zu können, sind in Abb. 5.20 die Dampfgehalte an der Einspeiseposition und am Gittersensor dargestellt. Die Kurven bestäti-

gen die vermutete Verringerung von ε_0 . Außerdem ist eine zunehmende Differenz zwischen ε_0 und ε_{GS} mit steigender $J_{W,0}$ zu erkennen. Diese Tendenz zeigt eindeutig, dass sich die Kondensationsintensität mit steigender Wassergeschwindigkeit erhöht.

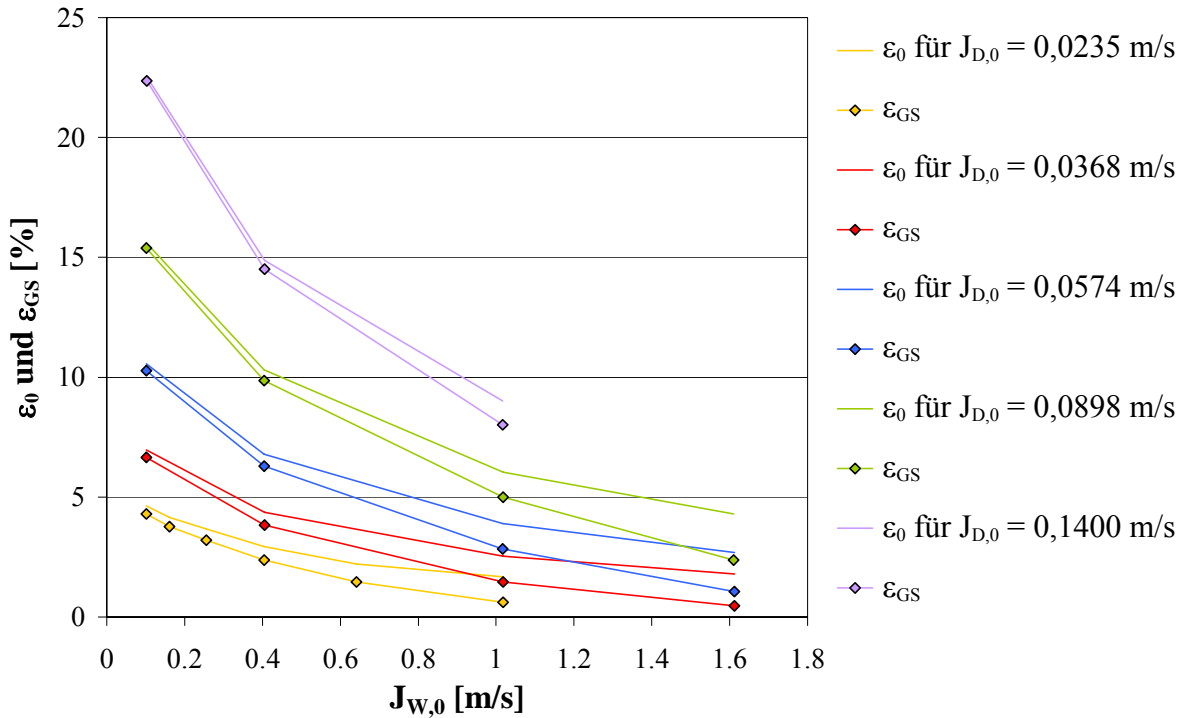


Abb. 5.20: Abhängigkeit des volumetrischen Dampfgehalts an der Einspeiseposition und am Gittersensor von der Wasser-Volumenstromdichte für diverse Versuchspunkte mit zentraler Dampfeinspeisung; Druckstufe 65 bar

Um diesen Effekt zu diskutieren, werden wiederum alle Parameter betrachtet, die den Wärmeübergang an der Phasengrenzfläche und somit die Kondensation beeinflussen (Gl. 3.58). Die Unterkühlung am Eintritt in die Testsektion wird geringfügig von der veränderlichen Wasser-Volumenstromdichte beeinflusst, da einerseits der Druck am Eintritt in die Teststrecke von einer Iterationsschleife (siehe Kapitel 3.4.3) numerisch ermittelt wird, die die Druckverluste in der Testsektion berücksichtigt, welche mit steigender $J_{W,0}$ zunehmen. Daraus folgt ein geringer Anstieg des Druckes am Eintritt in die Testsektion. Mit diesem Druckanstieg erhöht sich die Eintrittstemperatur des Dampfes, die als Sättigungstemperatur bestimmt wird. Andererseits werden die Wärmeverluste im Teilstück des Teststreckenkreislaufs zwischen Dampftrömmel und Eintritt in die Testsektion sowie die von der Umwälzpumpe zugeführte Energie (vgl. Kapitel 3.1.1) bei den Rechnungen als konstant angenommen, wodurch bei unveränderlichem Druck in der Dampftrömmel auch die Eintrittstemperatur des Wassers in die Testsektion konstant bleibt. Somit ergibt sich entsprechend den Berechnungsalgorithmen (Anlage 9.5) bei Zunahme der Wasser-Volumenstromdichte ein Anstieg der Unterkühlung der

flüssigen Phase beim Eintritt in die Teststrecke. Eine quantitative Abschätzung dieses Effekts zeigt jedoch, dass die in Abb. 5.20 festgestellten Kondensationsintensitäten hiermit nur unzureichend erklärt werden können.

Des Weiteren führt die Verringerung des Dampfgehalts primär dazu, dass die Zwischenphasen-Grenzflächendichte abnimmt, da sich im Bilanzraum die Summe der Blasenoberflächen verkleinert, der Bilanzraum jedoch konstant bleibt. Berücksichtigt man aber, dass durch die Zunahme der Wassergeschwindigkeit auch die Turbulenz in der Strömung stärker wird, könnte sich die Abnahme von a_i aufgrund stärkerer Fragmentation teilweise kompensieren.

Außerdem beeinflussen der Wärmeübergangskoeffizient bzw. die Relativgeschwindigkeit zwischen den Phasen den Stoff- und Wärmeübergang in der Zweiphasenströmung. Da sich bei konstantem Druck in der Dampftrommel die Dichtedifferenz zwischen Dampf und Wasser für die betrachteten Versuche nicht signifikant ändert, sollte auch die Relativgeschwindigkeit annähernd konstant bleiben.

Die wesentliche Ursache für diesen Effekt ergibt sich jedoch aus der energetischen Betrachtung der Experimente. Bei konstantem Dampfmassenstrom an der Einperlung und nur geringfügigen Änderungen des Druckes am Eintritt zur Teststrecke bleibt auch das Energiepotenzial des Dampfes annähernd unverändert, das für den Abbau der Unterkühlung des Wassers in der Zweiphasenströmung zur Verfügung steht. Wie Bild 5.20 zeigt, kondensiert der Dampf lediglich bei den Versuchspunkten 063 ($J_{w,0} = 1,017 \text{ m/s}$; $J_{D,0} = 0,0235 \text{ m/s}$) und 075 ($J_{w,0} = 1,611 \text{ m/s}$; $J_{D,0} = 0,0368 \text{ m/s}$) fast vollständig. Demzufolge ist die Unterkühlung der flüssigen Phase bei den meisten Versuchen bereits vor Erreichen des Gittersensors abgebaut, d.h. die Kondensation kommt zum Stillstand und der verbleibende Dampf erreicht die Messebene. Steigert man also die Wasser-Volumenstromdichte bei konstanter Dampf-Volumenstromdichte, erfordert die Temperaturerhöhung dieser größeren Wassermasse pro Zeiteinheit bis auf Sättigungsbedingungen eine höhere Wärmemenge. Diese Energie wird durch stärkere Kondensation bereitgestellt.

6 Fehlerbetrachtung

Das in diesem Bericht beschriebene Modell berechnet den Verlauf der Dampfkondensation bei Variation der Einlauf­länge einer Zweiphasenströmung. Nachfolgend werden diese Verläufe mit experimentell ermittelten Daten verglichen. Verschiedene Einflüsse führen dabei zu fehlerbehafteten Ergebnissen:

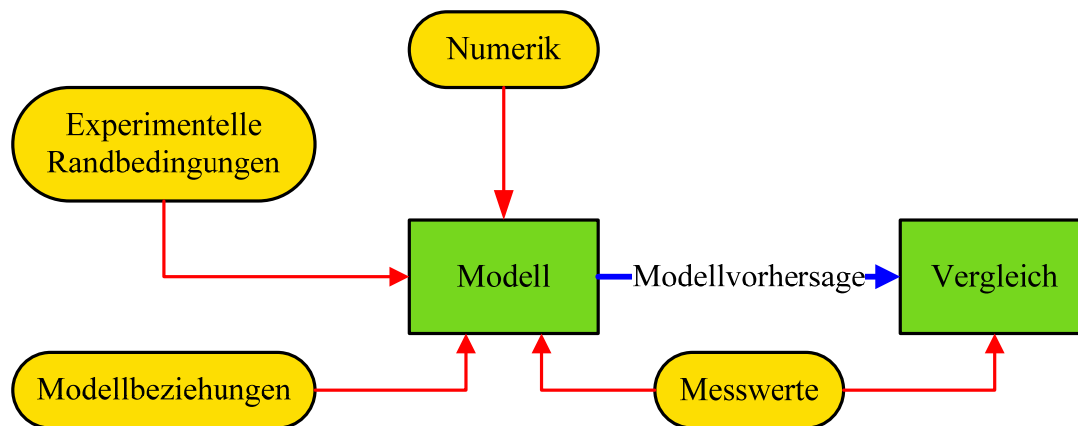


Abb. 6.1: Einfluss verschiedener Fehlerquellen auf den Vergleich der Modellvorhersagen mit experimentell ermittelten Daten

Die Fehlerbetrachtung hat die Aufgabe, die Fehlerausbreitung dieser Einflüsse im Modell zu untersuchen. Somit können Fehlerbanden ermittelt werden, die zur Bewertung des Vergleichs mit experimentellen Daten dienen.

6.1 Fehler der experimentellen Randbedingungen

Die während der Kondensationsexperimente an der Versuchsanlage eingestellten Druck- und Durchflusswerte dienen als Anfangs- und Randbedingungen für das Modell zur Berechnung der Strömungsparameter. Diese Werte sind fehlerbehaftet, da sie nur mit der Genauigkeit eingestellt werden können, die die vorhandene Betriebsmesstechnik erlaubt. Dabei gilt für die Erfassung von Druck- und Durchflussdaten ein maximaler relativer Fehler in Höhe von 1 % des Messwertes. Durch diese Fehler ergeben sich für die Druckmessung an der Dampftrommel die Toleranzgrenzen Δp , die zum Abweichen der Sättigungstemperaturen t_s führen.

Tab. 6.1 zeigt die entsprechenden Werte für vier Druckstufen. Der Wert $\Delta t_{S,max}$ beschreibt dabei die Differenz zwischen oberem und unterem Grenzwert der Sättigungstemperatur, der durch Δp hervorgerufen wird.

Tab. 6.1: Toleranzen der Druckmessung an der Dampftrommel und damit verbundene Abweichungen bei der Bestimmung der Siedetemperatur

Druck an der Dampftrommel [bar]	Toleranzgrenze Δp [bar]	$\Delta t_{S,max}$ [K]
10	$\pm 0,1$	0,87
20	$\pm 0,2$	1,01
40	$\pm 0,4$	1,19
65	$\pm 0,65$	1,33

6.2 Fehler bei der Ermittlung der Strömungsparameter mit dem Gittersensor

Die mit dem Sensor ermittelten Werte für den Dampfgehalt, den SAUTER-Durchmesser und die Zwischenphasen-Grenzflächendichte sind ebenfalls fehlerbehaftet. Vergleichsmessungen zwischen Gittersensoren und anderen Untersuchungsmethoden lieferten Aussagen zur Genauigkeit der Messtechnik und der Auswertalgorithmen bei der experimentellen Bestimmung dieser Strömungsparameter.

6.2.1 Dampfgehalt

Der Messfehler von Gittersensoren bei der Ermittlung von Gasgehaltsprofilen wurde durch Vergleichsmessungen mittels Röntgentomographie und Gammadurchstrahlung untersucht. Alle Versuche wurden dabei in Rohren mit einem Durchmesser von 50 mm durchgeführt.

Die Gammadurchstrahlung einer Luft/Wasser-Strömung mit Variation der Volumenstromdichten beider Medien und Gasgehalten zwischen 0 und 100 % konnte zeigen, dass die maximalen Abweichungen zwischen Gittersensor- und Gamma-Messung bei $\pm 5\%$ lagen [PRA-00]. Die Durchstrahlung einer Dampf/Wasserströmung bei Atmosphärendruck bestätigte diese Feststellung [MAP-01], wobei berücksichtigt werden muss, dass auch das Referenzverfahren mit Messungenauigkeiten behaftet ist.

Innerhalb einer Luft/Wasser-Strömung fanden auch Vergleichsmessungen zwischen Gittersensor und einem Röntgentomographen statt, der ein genaueres Referenzverfahren darstellt. Ergebnis dieser Untersuchung war die Feststellung, dass die Genauigkeit des über dem Strömungsquerschnitt gemittelten Gasgehalts von der Art der sich einstellenden Zweiphasenströmung abhängt. Hier wurden Unterschiede im absoluten Dampfgehalt:

- bei einer Blasenströmung von ± 1 % bzw.
- bei Pfropfenströmungen eine systematische Unterschätzung von ca. -4 %

festgestellt [PMT-05].

Des Weiteren wird in [PMT-05] gezeigt, dass die Integration von Gasgehalts- und Geschwindigkeitsprofilen, die mit Gittersensoren in der Teststrecke DN200 gemessen wurden, bei Volumenstromdichten bis etwa 1,6 m/s zur Reproduktion des eingespeisten Gasvolumenstroms führt, was die grundsätzliche Anwendbarkeit der Sensoren untermauert. Leider lässt sich daraus keine direkte Bewertung der Genauigkeit der Gasgehaltsmessung mit dem Gittersensor ableiten. Um zu einer Abschätzung des Fehlers zu gelangen, wird angenommen, dass auch in der Leitung DN200 der Messfehler dem entspricht, der für eine Blasenströmung in der Nennweite DN50 ermittelt wurde. Die größere systematische Unterbewertung, die bei einer Pfropfenströmung in Rohrleitungen mit kleinerem Querschnitt beobachtet wurde, wird nicht unterstellt, da bekannt ist, dass in Leitungen größeren Durchmessers bei den hier vorliegenden Randbedingungen keine Herausbildung von Gaspfropfen mehr beobachtet worden ist [OHA-00].

6.2.2 SAUTER-Durchmesser

Über die Messfehler des Gittersensors in Bezug auf die Ermittlung des SAUTER-Durchmessers gibt es bislang keine Angaben. Es sind jedoch quantitative Aussagen zur Genauigkeit bei der Bestimmung des äquivalenten volumengleichen Blasendurchmessers aus Vergleichsmessungen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera verfügbar. Die Untersuchung fand in einem transparenten Strömungskanal DN100 statt, in dem eine Luft/Wasserströmung mit unterschiedlichen Blasengrößen und Wassergeschwindigkeiten zwischen 0 und 0,8 m/s generiert wurden.

Dabei konnte man nachweisen, dass die örtliche Auflösung des Gittersensors die Erfassung der Blasendurchmesser auf 1,6 mm begrenzt [SCD-00]. Außerdem zeigen die Vergleiche zwischen Gittersensordaten und denen der Kamera, dass der volumengleiche Durchmesser gene-

rell mit einer Genauigkeit von $\pm 20\%$ bestimmt wird. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit des Wassers $< 0,2$ m/s kommt es zu Überbewertungen von bis zu $+ 50\%$, was jedoch für die Analyse der Kondensationsversuche ($J_{w,0} = 1,017$ m/s) nicht relevant ist. Es ist dabei jedoch zu berücksichtigen, dass die Streuung der ermittelten Blasengrößen während konstanter Strömungsbedingungen bei der Hochgeschwindigkeitskamera signifikant größer ausfallen als beim Gittersensor, d.h. es kann angenommen werden, dass die angegebenen Abweichungen zwischen beiden Verfahren vorrangig auf die Messungenauigkeit des optischen Verfahrens zurückgehen. Bei höheren Wassergeschwindigkeiten liegen die Ergebnisse in einem Band mit einer konstanten absoluten Streubreite von ca. ± 2 mm [PSZ-01]. Dieses Fehlerintervall wird bei der Fehlerausbreitungsanalyse in Ermanglung von direkten Aussagen zum SAUTER-Durchmesser unterstellt.

6.2.3 Zwischenphasen-Grenzflächendichte

Zur Bewertung des Gittersensors hinsichtlich der Genauigkeit bei der Ermittlung von Zwischenphasen-Grenzflächendichten gibt es noch keine umfassenden Untersuchungen. Allerdings kann durch den Vergleich mit Messungen mittels einer Vierpunkt-Nadelsonde gezeigt werden, dass das Verfahren grundsätzlich angewendet werden kann [PRG-05].

6.3 Genauigkeit der numerischen Integration

Numerische Fehler entstehen einerseits durch die Diskretisierung der Rohrleitung in Strömungsrichtung, d.h. das simulierte Teilstück des Teststreckenkreislaufs wird in diskrete Schrittweiten ΔL zerlegt, innerhalb derer die Konstanz der betrachteten Parameter angenommen wird (vgl. Kap. 3.1.2). In der Realität verändern sich die Zustandsgrößen jedoch kontinuierlich. Andererseits entsteht ein Fehler durch die iterative Lösung bestimmter Modellgleichungen, welcher jedoch durch eine geeignete Wahl der Abbruchbedingung gegenüber dem Diskretisierungsfehler klein gehalten werden kann. Die Genauigkeit der Berechnungen hängt demnach hauptsächlich von der gewählten Schrittweite ab. Je kleiner diese ist, desto größer ist die Genauigkeit der Ergebnisse. Um die Rechenzeit in vertretbaren Grenzen zu halten, ist es jedoch sinnvoll, eine Bedingung für den Diskretisierungsfehler aufzustellen, um die Schrittweite nach unten hin zu begrenzen. Diese Bedingung ergibt sich aus der Unsicherheit der ex-

perimentellen Randbedingungen, die nach Möglichkeit um mindestens eine Größenordnung zu unterschreiten ist.

Abb. 6.2 zeigt den am Gittersensor berechneten Dampfgehalt der Einspeisehöhe (B) des Versuchs *p20dp160* in Abhängigkeit von der Schrittweite ΔL_V . Man erkennt, dass bis zu einem Wert $\Delta L_V = 0,01$ m der Dampfgehalt eine Abweichung von maximal 0,002 % aufweist. Danach kommt es zu einer deutlichen Zunahme des Diskretisierungsfehlers.

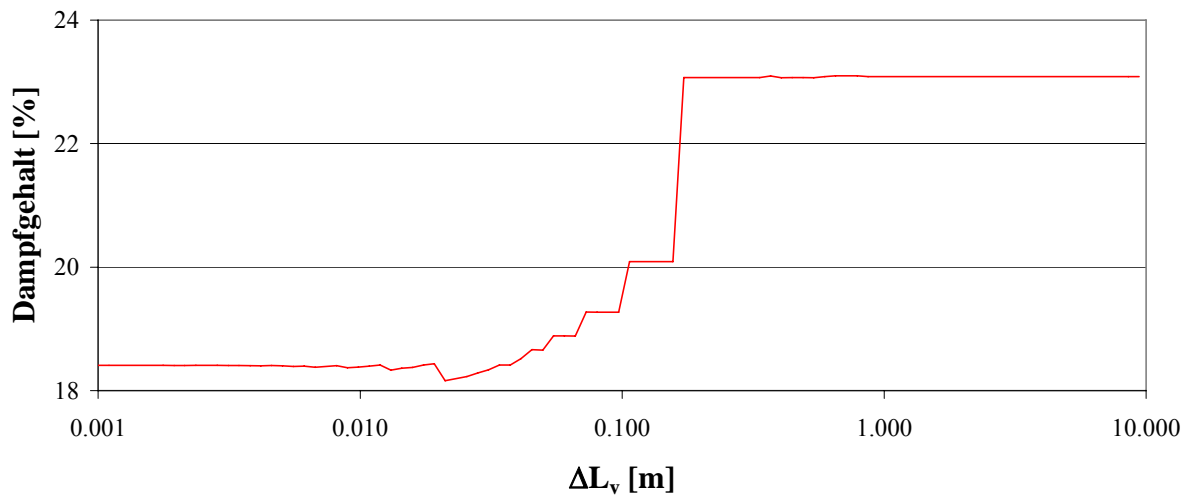


Abb. 6.2: Berechneter Dampfgehalt der Höhe B bei unterschiedlichen vertikalen Schrittweiten

Es kann festgestellt werden, dass ein ΔL_V von 10 mm innerhalb des expliziten Integrationsverfahrens hinreichend genaue Ergebnisse liefert.

6.4 Fehlerausbreitung im Modell

Wie in Abb. 6.1 erkennbar, resultieren Abweichungen der Modellvorhersagen hauptsächlich aus Fehlern, die die experimentellen Randbedingungen, die numerischen Ungenauigkeiten und die empirischen Modellbeziehungen hervorrufen. Die sich aus der Kombination aller Einflüsse ergebende Fehlerfortpflanzung kann aufgrund der Komplexität des Modells nicht als geschlossene Beziehung angegeben werden, sondern wird durch eine sog. *Sensibilitätsstudie* untersucht. Hierbei werden Berechnungen unter Variation der Eingangsgrößen und Modellparameter innerhalb ihrer jeweiligen Fehlergrenzen wiederholt und die dabei auftretenden Schwankungsbreiten der Ergebnisgrößen ermittelt. Damit ist eine Bewertung der Empfindlichkeit des Ergebnisses gegenüber den genannten Fehlerquellen und die Ermittlung der daraus resultierenden Fehlerbanden der Rechenergebnisse möglich.

Für das Drift-Flux-Modell nach GE-RAMP und den Wärmeübergang nach CHEN kann keine Aussage zur quantitativen Genauigkeit getroffen werden. Allein für das Wärmeübergangsmodell nach Hughmark [HUG-67] gilt eine mittlere relative Abweichung von 8 % für den berechneten Wert der Nusselt-Zahl (Gl. 1 – Tab. 3.3) bzw. 10,3 % (Gl. 2 – Tab. 3.3).

6.4.1 Fehlerfortpflanzung bei Modellbeziehungen zur Berechnung der Zwischenphasen-Grenzflächendichte

Fehlerquellen für toleranzbehaftete Vorhersagen auf der Grundlage von Modellbeziehungen sind diese selbst in Kombination mit den experimentellen Randbedingungen. Dabei werden beide Einflussgrößen zunächst einzeln hinsichtlich ihres Beitrags zum Gesamtfehler untersucht.

Abb. 6.3 zeigt die Entwicklung des Dampfgehalts bei variierten experimentellen Randbedingungen für den Druck in der Dampftrommel sowie die Massenströme für Wasser und Dampf. Dabei sind die maximalen Abweichungen sowohl für die aus dem Modell berechneten als auch die experimentell ermittelten Werte eingetragen.

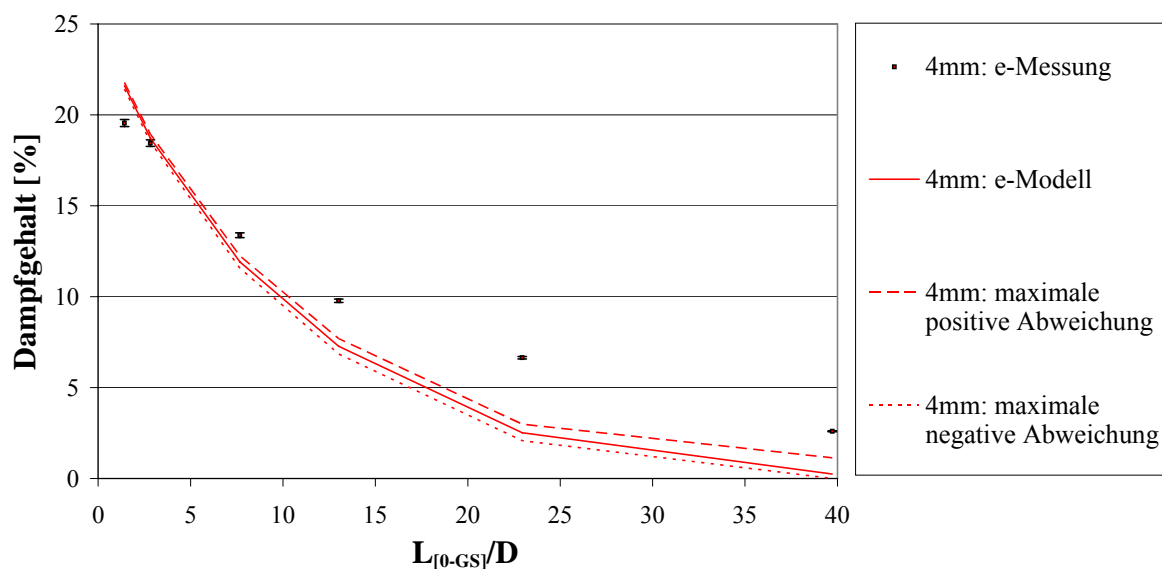


Abb. 6.3: Maximale Abweichungen des Dampfgehalts bei Variation der experimentellen Randbedingungen für Druck und Massenstrom

Der Dampfgehalt erhöht sich durch Kombination aus oberem Druckgrenzwert, unterem Grenzwert für den Wassermassenstrom und oberem für den Dampfmassenstrom. Die Verringerung wird durch die entgegengesetzten Grenzen verursacht.

Die Reaktion der Entwicklung des Dampfgehalts auf einen variierten Wärmeübergang zeigt Abb. 6.4. Dabei wird die maximale positive Abweichung durch den unteren Grenzwert des Wärmeübergangs hervorgerufen, der die berechnete Kondensation verringert.

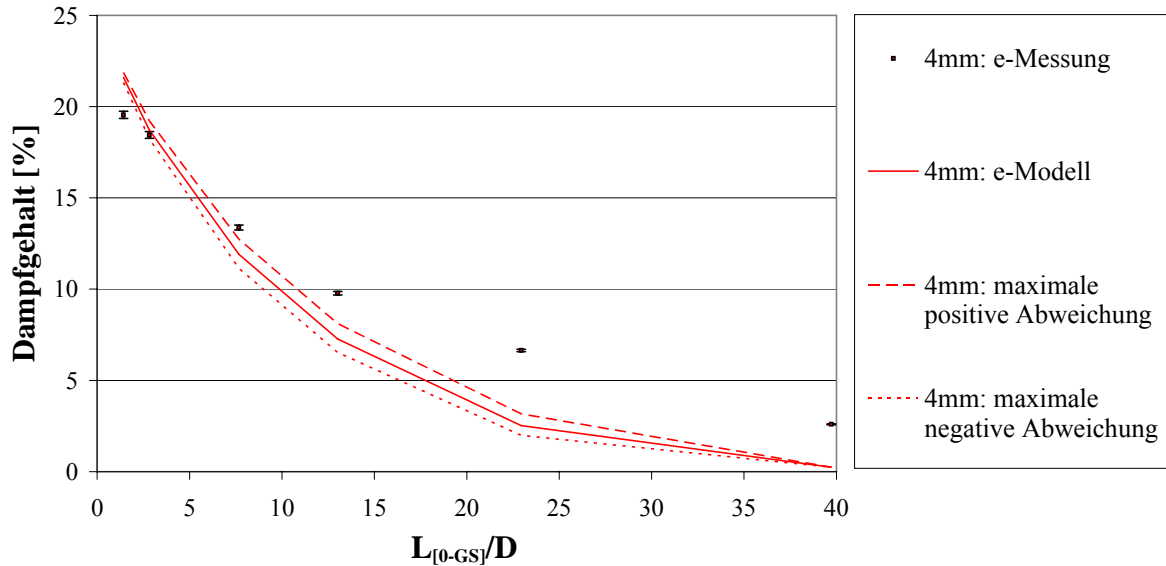


Abb. 6.4: Maximale Abweichungen des Dampfgehalts bei Variation des Wärmeübergangsmodells nach HUGHMARK

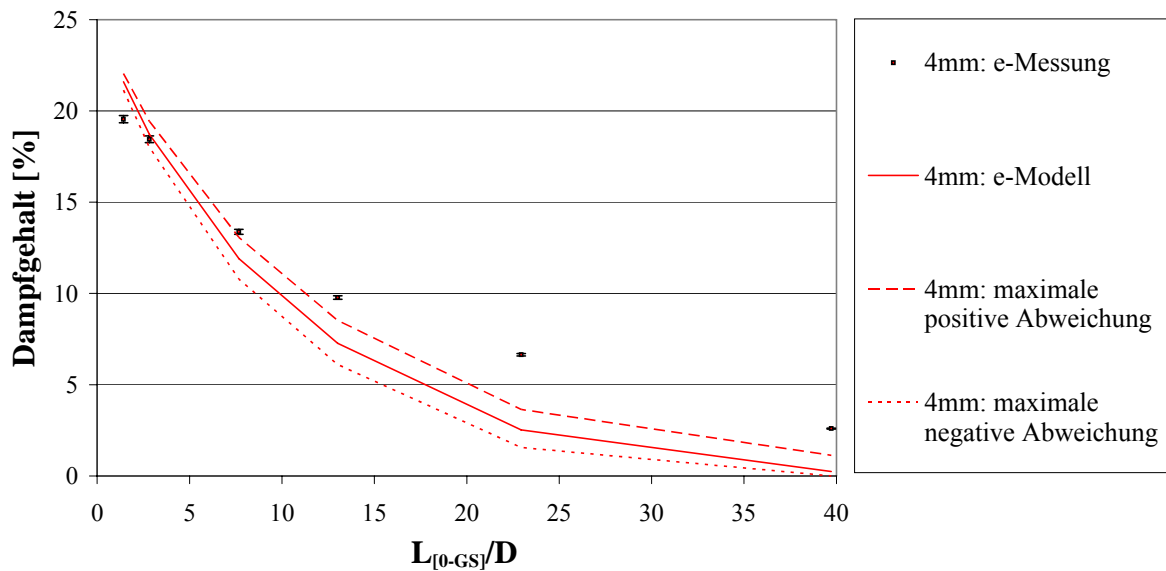


Abb. 6.5: Gesamtfehler des Kondensationsmodells durch kombinierte Variation der Modellbeziehungen und experimentellen Randbedingungen

Durch eine kombinierte Variation beider Einflussgrößen ergibt sich der maximal abschätzbare Gesamtfehler des Kondensationsmodells aus Abb. 6.5 zu $\pm 1,2$ % Dampfgehalt.

6.4.2 Fehlerfortpflanzung bei Verwendung experimenteller SAUTER-Durchmesser

Der zusätzlich zu den Modellvorhersagen verwendete experimentelle SAUTER-Durchmesser verursacht durch seine Messunsicherheit einen weiteren Beitrag zum Gesamtfehler des Kondensationsmodells (Abb. 6.6).

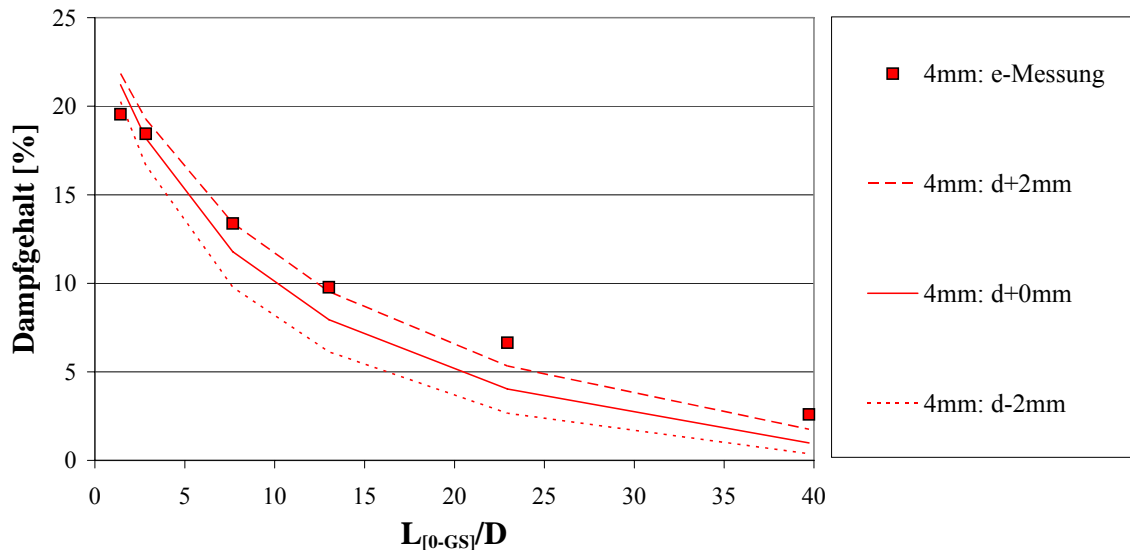


Abb. 6.6: Maximale Abweichungen des berechneten Dampfgehalts bei Variation der Werte für den experimentellen SAUTER-Durchmesser innerhalb der Toleranzgrenzen

Im Vergleich zu den beiden bereits diskutierten Faktoren besitzt dieser Parameter einen weit- aus größeren Einfluss auf das Ergebnis.

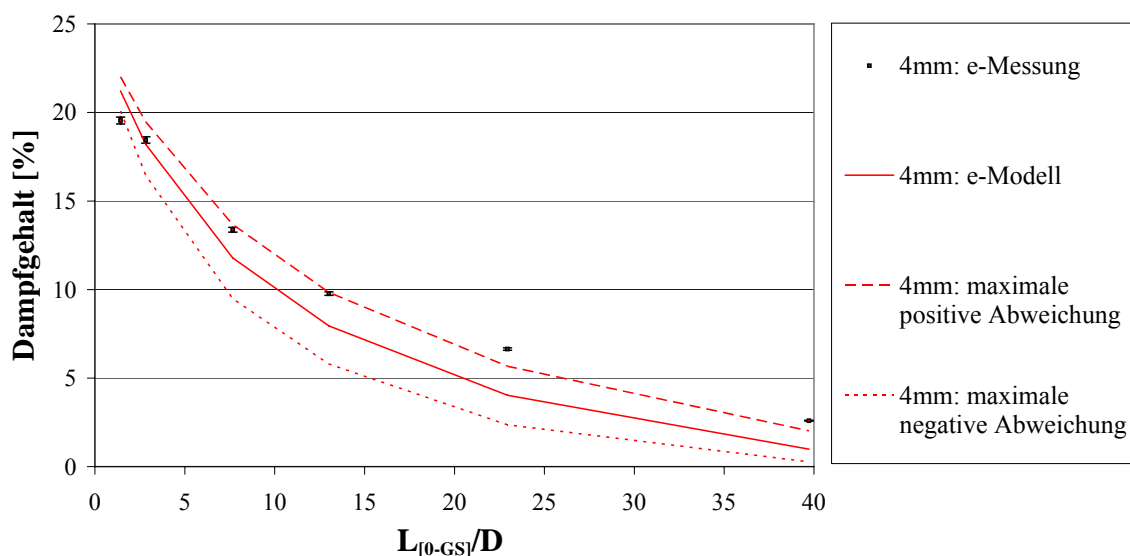


Abb. 6.7: Gesamtfehler des Kondensationsmodells durch kombinierte Variation der experimentellen Randbedingungen und des SAUTER-Durchmessers

In Abb. 6.7 zeigt sich die Fehlerfortpflanzung im Kondensationsmodell, die durch die drei Hauptfehlerquellen verursacht wird. Die maximale Abweichung ergibt sich dabei zu + 2 % und - 2,5 % vom Dampfgehalt.

6.5 Einschätzung des Gesamtfehlers

Hauptsächlich gibt es vier Faktoren, die das Ergebnis der Modellvorhersagen beeinflussen. Dabei verursacht die Numerik durch eine geeignete Wahl der Schrittweite ($\Delta L \leq 0,01$ m) den geringsten Fehler ($\Delta \varepsilon_N \leq 0,002$ %). Auch die durch die experimentellen Randbedingungen hervorgerufenen Abweichungen ($\Delta p_{\max}, \Delta \dot{m}_{D,\max}, \Delta \dot{m}_{W,\max} = \pm 1$ %) führen zu Fehlern $\Delta \varepsilon_{Rb} < 0,4$ %. Den größten Einfluss besitzen die Fehler der Modellbeziehungen und der Fehler, der durch die verwendeten Messwerte eingetragen wird. Ein Fehler $\Delta Nu_{\max} \approx 10$ % führt zu Abweichungen $\Delta \varepsilon_{\max, Nu} = \pm 0,8$ % und eine Toleranzgenauigkeit des verwendeten experimentellen SAUTER-Durchmessers von $\Delta d_{S,\max} = \pm 2$ mm verursacht den größten Fehler $\Delta \varepsilon_{\max, d_s} = \{-2,2$ %; + 1,8 %}.

In Kombination führt die Berechnung des Dampfgehalts nur auf der Grundlage von Modellbeziehungen durch eine Fehlerfortpflanzung innerhalb der Simulation zu einem Gesamtfehler von $\Delta \varepsilon_{\max, Modell} = \pm 1,2$ %. Dieser ist geringer im Vergleich zur Verwendung von experimentellen Daten für den SAUTER-Durchmesser, bei dem sich eine Abweichung von $\Delta \varepsilon_{\max, Modell+d_s} = \{-2,5$ %; + 2 %} ergibt. Allerdings entstehen hierbei auch größere Fehlerbänder des berechneten - im Vergleich zum experimentell ermittelten Dampfgehalt. Diese können die Abweichungen nahezu kompensieren, die durch die Verwendung eines Modells zur Berechnung des Wärmeübergangs entstehen.

7 Zusammenfassung

Ziel des vorliegenden Fachberichtes war die Beschreibung der Kondensation von Dampf in einer Wasserströmung, welche hauptsächlich durch die Unterkühlung des Wassers, die Größe der Phasengrenzfläche und die Intensität des Wärmeübergangs an der Phasengrenze beeinflusst wird.

Dazu wurde ein eindimensionaler Code entwickelt, der in der Lage ist, den Verlauf der thermodynamischen und strömungstechnischen Parameter entlang der Rohrleitung zu berechnen. Der Vergleich mit experimentellen Kondensationsdaten der Versuchsanlage TOPFLOW diente zur Überprüfung von Modellen für die Bestimmung der Phasengrenzfläche und des Wärmeübergangskoeffizienten hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit.

Die Berechnung der in Strömungsrichtung fortschreitenden Kondensation setzt aufgrund der Eindimensionalität des entwickelten Codes zunächst eine Konstanz aller betrachteten Parameter über dem Strömungsquerschnitt voraus. Somit bleiben lokale Abweichungen von diesem Mittelwert unberücksichtigt. Des Weiteren wird angenommen, dass der Dampf in Form von Kugelblasen mit einem mittleren Durchmesser innerhalb der Wasserströmung vorliegt.

Das Modell ist in der Lage, den Einfluss der Parameter auf die Intensität des Kondensationsprozesses tendenziell richtig zu beschreiben. Eine größere Unterkühlung der Wasserströmung, die durch eine stärkere Drosselung des Druckes innerhalb der Rohrleitung verursacht wird, führt ebenso zur schnelleren Kondensation des Dampfes, wie das Vorhandensein einer größeren Phasengrenzfläche, die bei Einspeisung des Dampfes durch kleinere Düsen entsteht.

Auch im Vergleich mit experimentellen Daten für Dampfgehalt und Zwischenphasen-Grenzflächendichte zeigt sich eine qualitative Übereinstimmung der Verläufe. Allerdings wird die Kondensationsintensität in Strömungsrichtung bei Verwendung einer Modellbeziehung zur Berechnung der Zwischenphasen-Grenzflächendichte a_i auf Grundlage der Theorie des Strahlgasens generell überschätzt, da der Wert für a_i an der Dampfeinspeisung im Vergleich zu experimentellen Daten größer ist. Die Gegenüberstellung von Methoden zur Bestimmung des Wärmeübergangs zeigt, dass alle untersuchten Modelle den Dampfgehaltsverlauf qualitativ korrekt nachbilden, wobei einige jedoch starke Abweichungen von den experimentellen Werten liefern (ZEITOUN, HORI und CLIFT). Die Berechnung des Wärmeübergangs nach HUGH-MARK hat dabei die beste Übereinstimmung erzielt.

Die Verwendung von experimentell bestimmten SAUTER-Durchmessern ermöglicht die Validierung der Wärmeübergangsmodelle, da die Anzahl der Modellbeziehungen und damit auch eine Überlagerung von Berechnungstendenzen verringert wird. Es zeigte sich, dass unter diesen Bedingungen das Wärmeübergangsmodell nach CHEN eine bessere Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Dampfgehalten bzw. Zwischenphasen-Grenzflächendichten lieferte. Die Qualifizierung des Modells nach HUGHMARK bei theoretischer Modellierung der Phasengrenzfläche könnte demzufolge auf sich teilweise kompensierende Modellfehler zurückgeführt werden. Die erzielte Verbesserung ist bei den Einspeisungen mit 4 mm Düsendurchmesser stärker ausgeprägt als bei 1 mm Öffnungen. Dies zeigt, dass die größere Unsicherheit in der korrekten Modellierung der Phasengrenzfläche besteht, während Wärmeübergangsmodelle verfügbar sind, die zu einer guten Übereinstimmung der berechneten mit den gemessenen Werten führen.

Die Nachrechnung von Dampf/Wasser-Experimenten ohne Drosselung des Druckes in der Teststrecke mit dem validierten Modell bestätigt die prinzipielle Eignung des 1 D-Codes zur Untersuchung von Zweiphasenströmungen. Auch für diese umfangreicheren Versuchsserien wurde die Anwendbarkeit der Drift-Flux-Modelle und der Algorithmen zur Bestimmung des Wärmeübergangs nochmals mit positivem Ergebnis überprüft. Eine Gegenüberstellung der Experimente mit bzw. ohne Drosselung bekräftigt den Einfluss der Unterkühlung auf die Kondensation. Ebenso konnte nachgewiesen werden, dass die Kondensationsintensität mit steigendem Druck aufgrund der Zunahme der Dampfdichte abnimmt. Unterschiedliche Primärblasengrößen wirken vor allem auf die sich ausbildende Phasengrenzfläche, deren Größe dem Wärmeübergang zwischen Dampf- und Wasserphase direkt proportional ist. Der Vergleich zwischen Randeinspeisung und zentraler Einperlung des Dampfes in die flüssige Phase zeigt die Grenzen der eindimensionalen Modellierung, die diesen Effekt nicht analysieren kann.

Eine Abschätzung der Einflüsse fehlerbehafteter Eingangsgrößen und Modellbeziehungen auf das Ergebnis konnte aufzeigen, dass die berechneten Größen bei kleinen L/D innerhalb der Fehlerbanden mit den experimentellen gut übereinstimmen. Aufgrund der Fehlerfortpflanzung innerhalb des Kondensationsmodells wandern die berechneten Werte jedoch bei größeren L/D aus diesem Bereich heraus und es verbleiben Abweichungen, die mit den abgeschätzten Unsicherheiten nicht erklärt werden können. Bei Verwendung der experimentellen SAUTER-Durchmesser mit ihren Toleranzgrenzen verbreitert sich das Fehlerband der berechneten Werte.

Ursachen für die über die abgeschätzten Fehlerbanden hinausgehenden Abweichungen zwischen Modellvorhersage und Experiment liegen vermutlich in den Grenzen der eindimensionalen Modellierung. Zum Beispiel führt die Dampfeinspeisung durch den Rohrumfang bei kleinen L/D zu einer Kondensation des Dampfes am Rand des Rohres. Dadurch wird das Wasser lokal aufgeheizt und die Intensität der Kondensation nimmt dort ab. Die Annahme einer über dem Strömungsquerschnitt konstanten Temperatur vernachlässigt diesen Effekt. Die Blasen wandern erst im weiteren Verlauf der Strömung durch das sich einstellende Geschwindigkeitsprofil ins Zentrum der Rohrleitung, um dort in Abhängigkeit vom Turbulenzgrad zu kleineren Blasen zu zerfallen oder zu größeren anzuwachsen. Dieses Phänomen bleibt durch die Annahme eines mittleren Blasendurchmessers für die Gasphase ebenso unberücksichtigt, wie die unterschiedliche Blasenauftiegs geschwindigkeit abhängig von der Position der Blase innerhalb des Strömungsquerschnitts.

Daraus ergeben sich zukünftige Aufgaben bei der Bearbeitung dieses Themas, wie zum Beispiel die Entwicklung eines dreidimensionalen Kondensationsmodells, das lokale Strömungsvorgänge berücksichtigt und dadurch die Güte der Modellvorhersagen erhöht. Zusätzlich sollte auch die Breite der Fehlerbanden sowohl der Modellergebnisse als auch der experimentellen Vergleichsdaten durch Verbesserung der Messtechnik verringert werden. Besonders wichtig ist hierbei die Installation einer die radialen Profile auflösenden Temperaturmesstechnik, die bei den hier verwendeten Experimenten nicht zur Verfügung stand.

Die eindimensionale Modellierung von Zweiphasenströmungen ist im Bereich der Reaktorsicherheit nach wie vor ein wichtiges Instrument der Störfallanalyse. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass mit 1D-Codes Kondensationsvorgänge in Rohrleitungen mit Hilfe der validierten Wärmeübergangsmodelle für viele Anwendungen mit akzeptabler Genauigkeit nachgebildet bzw. auch vorausgerechnet werden können.

8 Literaturverzeichnis

- [BCS-04] M. Beyer, H. Carl, P. Schütz, H. Pietruske, S. Lenk. *Betriebshandbuch für die Mehrzweck-Thermohydraulikversuchsanlage TOPFLOW*. Forschungszentrum Rossendorf, Wissenschaftlich-Technische Berichte, FZR-405, Juli 2004, ISSN 1437-322X
- [CHM-92] Y.M. Chen, F. Mayinger. *Measurement of Heat Transfer and the Phase Interphase of Condensing Bubbles*. International Journal of Multiphase Flow, 1992, Vol. 18(6), S. 877-890
- [COM-02] P. Coddington, R. Macian. *A Study of the Performance of Void Fraction Correlations used in the context of Drift-Flux Two-Phase Flow Models*. Nuclear Engineering and Design, 2002, S.199-216
- [GRE-03] S. Gregor. *Experimentelle Untersuchung zur Evolution der Struktur einer Luft/Wasser-Strömung in einem vertikalen Rohr der Nennweite DN200 an der Versuchsanlage TOPFLOW*. TUD, Institut für Energietechnik, Professur für Kernenergietechnik, Großer Beleg Nr. 723, 2003
- [GRE-04] S. Gregor. *Ermittlung der Zwischenphasen-Grenzflächendichte mit Gittersensoren bei unterschiedlichen Strömungsbedingungen*. TUD, Institut für Energietechnik, Professur für Kernenergietechnik, Interdisziplinäre Projektarbeit Nr. 2111, 2004
- [GRE-05] S. Gregor. *Thermohydraulische Modellierung der Kondensation von Dampf in einer unterkühlten Flüssigkeitsströmung*. TUD, Fakultät Maschinenwesen, Studiengang Maschinenbau, Studienrichtung Energietechnik, Diplomarbeit Nr. 743, 2005
- [HIT-03] T. Hibiki, M. Ishii. *One-Dimensional Drift-Flux Model for Two-Phase Flow in a large diameter Pipe*. Int. J. Heat Mass Transfer, 2003, S.1773-1790
- [HUG-67] G.A. Hughmark. *Mass and Heat Transfer from Rigid Spheres*. AIChE Journal, 1967, Vol. 13 (6), S. 1219-1211
- [HUI-75] J. Huhn, J. Wolf. *Zweiphasenströmung gasförmig/flüssig*. Fachbuchverlag Leipzig, 1975

- [KAM-02] H. Kalman, Y.H. Mori. *Experimental analysis of a single vapor bubble condensing in subcooled liquid*. Chemical Engineering Journal, 2002, Vol. 85, S. 197-206
- [KUS-79] S.S. Kutateladze. *Grundlagen der Theorie des Wärmeübergangs*. „*Osnoviy teorii teploobmena*“. Atomizdat, 1979, S. 131-132
- [MAA-05] A. Manera, H.-M Prasser, D. Lucas and T.H.J.J. van der Hagen. *Bubble size distributions and three-dimensional flow pattern visualization in stationary and transient upward flashing flow*. International Journal of Multiphase Flow, 2005
- [MAP-01] A. Manera, H.-M. Prasser, T. H. J. J. Van der Hagen, R. F. Mudde, J. M. de Kruijf. *A comparison of void-fraction measurements during flashing-induced instabilities obtained with a wire-mesh sensor and a gamma-transmission set-up*. 4th International Conference on Multiphase Flow, New Orleans, Louisiana, USA, May 27 - June 1, 2001, paper #436.
- [OHA-00] A. Ohnuki, H. Akimoto. *Experimental study on transition of flow pattern and phase distribution in upward air-water two-phase flow along a large vertical pipe*. International Journal of Multiphase Flow, 26 2000 pp. 367-386
- [PMT-05] H.-M. Prasser, M. Misawa, I. Tiseanu. *Comparison between Wire-Mesh Sensor and ultra-fast X-ray Tomograph for an Air-Water Flow in a vertical pipe*. Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 16, 2005, S. 73-83
- [PRA-00] H.-M. Prasser. *High-speed measurement of the void fraction distribution in ducts by wire-mesh sensors*. International Meeting on Reactor Noise, 11.-13.10.2000, Athen
- [PRG-05] H.-M. Prasser, S. Gregor. *Evolution of Interfacial Area Concentration in a vertical Air-Water Flow measured by Wire-Mesh Sensor*. NURETH-11, 2005, No. 398
- [PSZ-01] H.-M. Prasser, D. Scholz, C. Zippe. *Bubble size measurement using wire-mesh sensors*. Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 12, 2001, S. 299-312
- [PWM-04] M. Petermann, T. Weißert. *Apparatebau*. Vorlesungsunterlagen WS 04/05, Ruhr-Universität Bochum

- [ROM-00] W. Matek u.a. *Roloff / Matek Maschinenelemente*. Lehr- und Tabellenbuch, Vieweg Verlag, 14. Auflage, Wiesbaden, 2000
- [SCD-00] D. Scholz. *Bewertung der Genauigkeit eines Gittersensors zur Visualisierung einer Zweiphasenströmung durch Vergleich mit optischen Hochgeschwindigkeitsaufnahmen*. Forschungszentrum Rossendorf, Wissenschaftlich-Technische Berichte, FZR-300, September 2000
- [TSI-75] *Technische Strömungsmechanik I*. VEB Leipzig, 1975, 2. Auflage
- [VDI-94a] VDI-Wärmeatlas, 7. Auflage, S. Lb1-Lb3
- [VDI-94b] VDI-Wärmeatlas, 7. Auflage, S. Gb7
- [VDI-94c] VDI-Wärmeatlas, 7. Auflage, S. A12
- [ZES-95] O. Zeitoun, M. Shoukri, V. Chatoorgoon. *Interfacial Heat Transfer between Steam bubbles and Subcooled Water in Vertical Upward Flow*. Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME, 1995, Vol. 117 (2), S. 402-407

9 Anhang

9.1 Isometrien des simulierten Teilstücks der Teststrecke

1

2

3

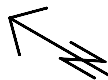
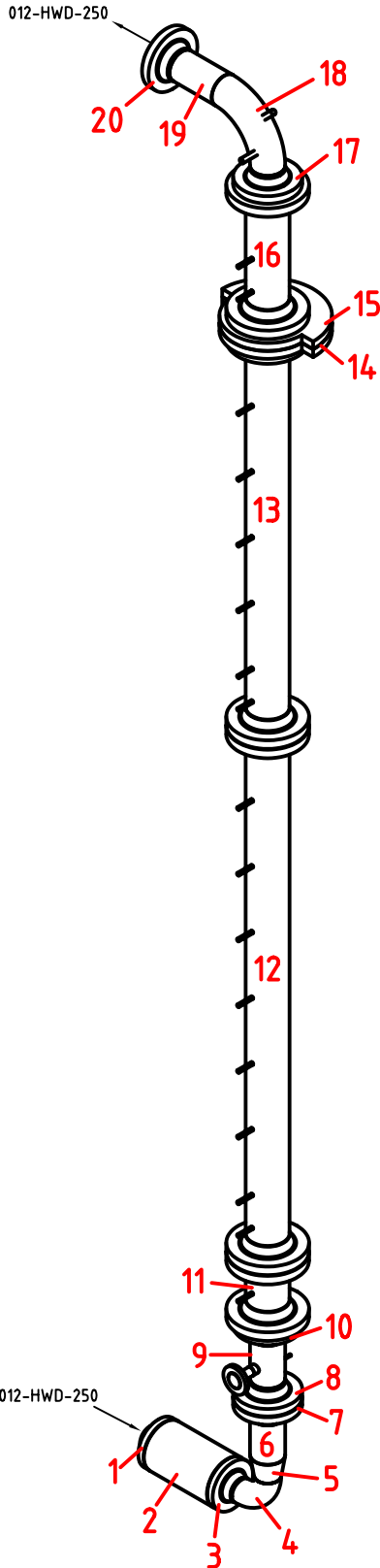
4

A

B

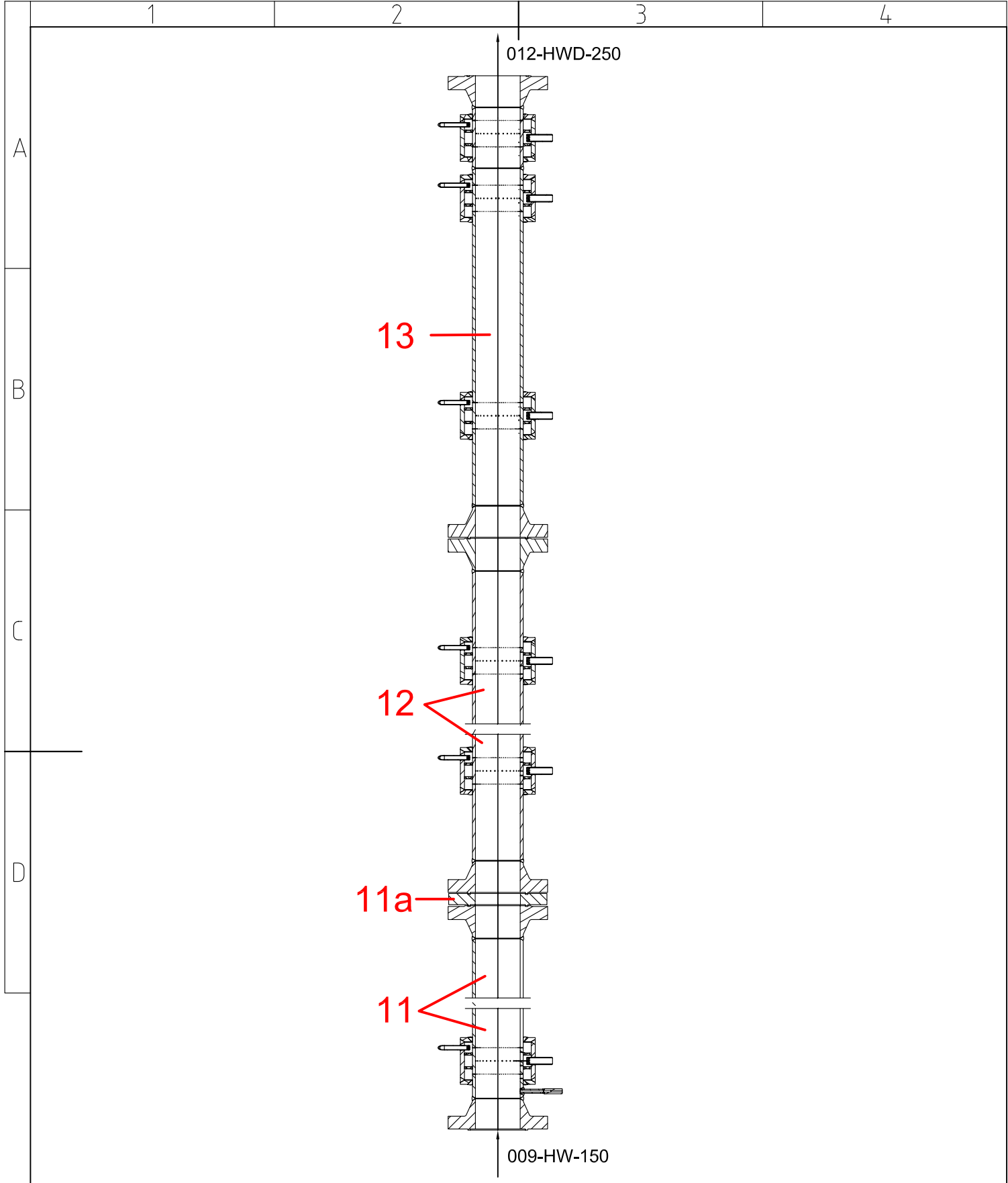
C

D



TOPFLOW		Forschungszentrum Rossendorf e.V. <small>Institut für Strahlenschutzforschung</small>		Leitung von: 009-HW-150	
		TOPFLOW		nach: 012-HWD-250	
		Datum	Name	Verwendung 010-HWD-200	
		Bearb.		(Teststrecke 1)	
		Gepr.		Rohrklasse: SA 02.160	
				Zeichnungsnummer TOP-ISO-023/1	
				Blatt 114	
Zust.	Änderung	Datum	Name		





Verwendungsbereich TOPFLOW				Zul. Abweichung	Oberfläche	Maßstab:	Gewicht:	Menge:
						Werkstoff/Halbzeug		
				Datum	Name	Benennung		
				Bearb.		Teststrecke1gesamt		
				Gepr.				
				Bezug:	VGE			
				EDV-Nr.:				
						Zeichnungsnummer		Blatt 1
Zust.	Änderungen	Datum	Name			Ersetzt für:		Plotdatum:

1

2

3

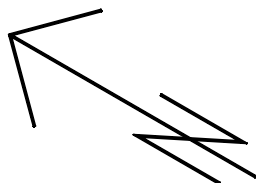
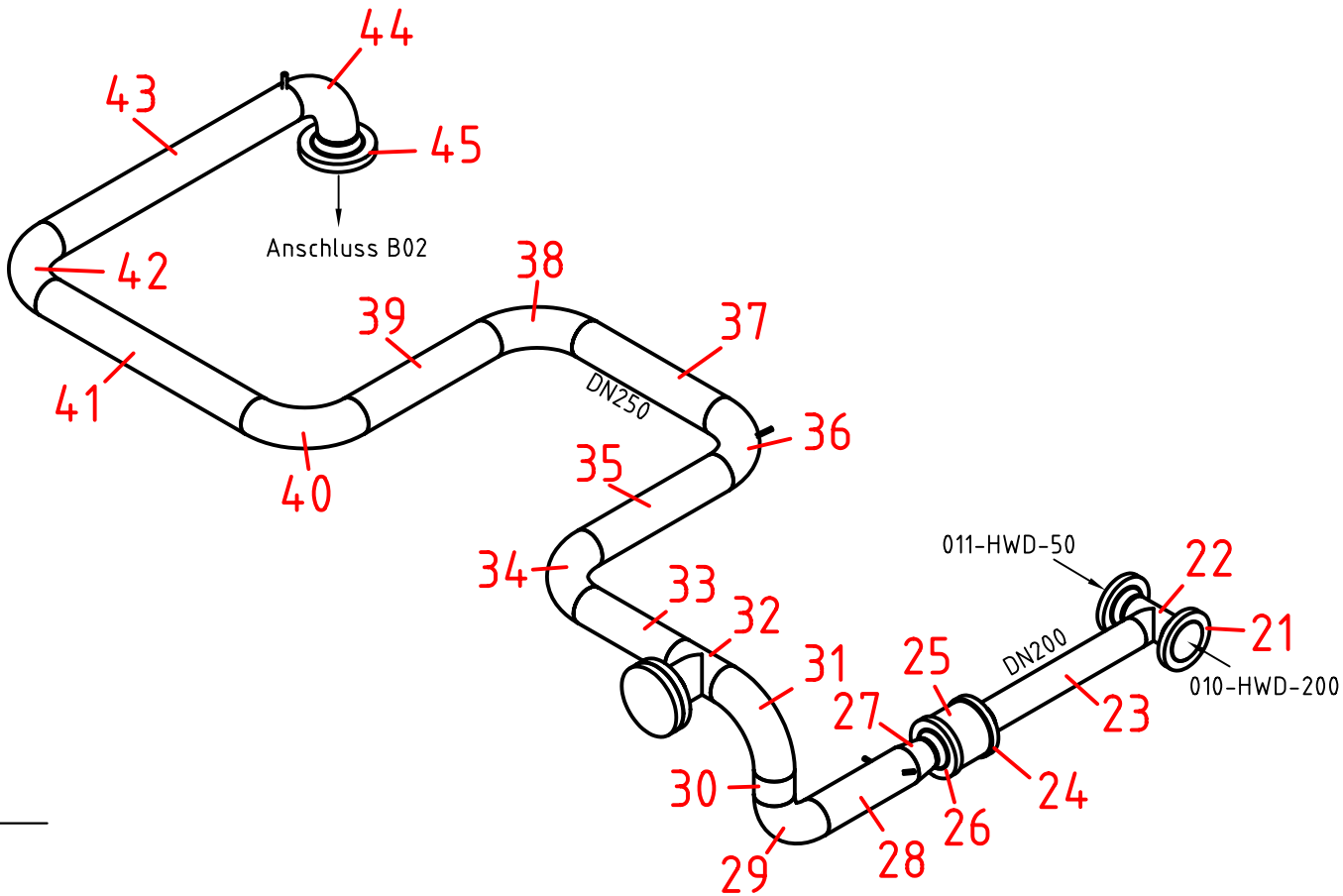
4

A

B

C

D



TOPFLOW

Forschungszentrum
Rossendorf e.V.
Institut für Sicherheitsforschung

TOPFLOW

Leitung von: 010-HWD-200 und 011-HWD-50
nach: B02 N3

Zust	Änderung	Datum	Name

	Datum	Name
Bearb.		
Gepr.		
Norm		

Verwendung

012-HWD-250

Rohrklasse: SA 02.160



Zeichnungsnummer

TOP-ISO-025

Blatt
116

9.2 Betriebs- und Strömungsparameter der Experimente ohne Drosselung: D12 und D13

Dampfversuche TOPFLOW DN200, D12

D_{innen} : 0.1953 m
 Fläche: 0.0300 m²

Formelzeichen:

- J Volumenstromdichte
- m Massenstrom
- p Druck
- t Temperatur
- ε Dampfgehalt
- ρ Dichte
- Δt Temperaturdifferenz zwischen beiden Phasen

Indizes:

- 0 Einspeisestelle
- D Dampf
- DT Dampftrommel
- FD Frischdampf
- GS Gittersensor
- W Wasser

			Solldaten							Betriebsdaten (Mittelwerte über 10 s)							Simulierte Daten								Messwert
Punkt	Höhe	L/D	$J_{D,0}$ [m/s]	$J_{W,0}$ [m/s]	p_{DT} [MPa]	ρ' [kg/m ³]	ρ'' [kg/m ³]	$m_{D,0}$ [kg/s]	$m_{W,0}$ [kg/s]	$m_{D,0}$ [kg/s]	$m_{W,0}$ [kg/s]	t_{GS} [°C]	p_{GS} [MPa]	p_{FD} [MPa]	t_{FD} [°C]	$J_{D,0}$ [m/s]	$J_{W,0}$ [m/s]	$J_{D,GS}$ [m/s]	$J_{W,GS}$ [m/s]	p_0 [MPa]	p_{GS} [MPa]	Δt_0 [K]	Δt_{GS} [K]	ε_{GS} [%]	ε_{GS} [%]
096	A	1.13	0.0898	1.017	1.0	886.99	5.15	0.014	27.023	0.014	27.023	179.8	1.046	1.094	182.6	0.08927	1.01847	0.07435	1.01864	1.05534	1.05373	1.0135	0.9053	3.873	1.87
096	C	1.72	0.0898	1.017	1.0	886.99	5.15	0.014	27.023	0.014	27.024	179.3	1.035	1.078	182.0	0.09015	1.01792	0.0663	1.01817	1.04522	1.04263	1.0618	0.888	3.465	2.04
096	D	2.53	0.0898	1.017	1.0	886.99	5.15	0.014	27.023	0.014	27.022	179.1	1.029	1.074	181.8	0.09018	1.01755	0.05475	1.01791	1.0412	1.03724	1.1225	0.8594	2.877	1.58
096	F	3.11	0.0898	1.017	1.0	886.99	5.15	0.014	27.023	0.014	27.021	178.7	1.020	1.065	181.4	0.09045	1.01701	0.04674	1.01745	1.03203	1.02708	1.1722	0.8443	2.464	1.48
096	G	7.36	0.0898	1.017	1.0	886.99	5.15	0.014	27.023	0.014	27.030	178.5	1.016	1.068	181.5	0.08914	1.01717	0.00645	1.01798	1.03665	1.02439	1.4863	0.7433	0.347	0.47
096	I	7.95	0.0898	1.017	1.0	886.99	5.15	0.014	27.023	0.014	27.020	178.2	1.009	1.059	181.1	0.0889	1.01643	0.00334	1.01725	1.03041	1.01713	1.5379	0.7421	0.18	0.47
096	J	12.70	0.0898	1.017	1.0	886.99	5.15	0.014	27.023	0.014	27.018	178.2	1.009	1.060	181.2	0.08834	1.01634	0	1.01721	1.03875	1.01719	1.888	0.7326	0	0.16
096	L	13.29	0.0898	1.017	1.0	886.99	5.15	0.014	27.023	0.014	27.025	177.9	1.004	1.057	181.1	0.0893	1.01632	0	1.01719	1.03479	1.01221	1.9408	0.737	0	0.16
096	M	22.62	0.0898	1.017	1.0	886.99	5.15	0.014	27.023	0.014	27.016	177.8	1.001	1.056	181.1	0.08874	1.01586	0	1.01675	1.0488	1.01001	2.6252	0.7353	0	0.11
096	O	23.20	0.0898	1.017	1.0	886.99	5.15	0.014	27.023	0.014	27.052	178.9	1.027	1.070	181.6	0.08695	1.01856	0	1.01946	1.07475	1.035	2.6149	0.7166	0	0.09
096	P	39.37	0.0898	1.017	1.0	886.99	5.15	0.014	27.023	0.014	27.006	178.6	1.022	1.070	181.6	0.08377	1.01653	0	1.01743	1.09782	1.03003	3.7667	0.7222	0	0.05
096	R	39.95	0.0898	1.017	1.0	886.99	5.15	0.014	27.023	0.014	27.003	178.3	1.015	1.092	182.5	0.08342	1.01608	0	1.01698	1.09225	1.02343	3.8274	0.7291	0	0.04
096	B	1.42	0.0898	1.017	1.0	886.99	5.15	0.014	27.023	0.014	27.017	179.5	1.039	1.082	182.1	0.08982	1.01785	0.0797	1.01798	1.04869	1.04659	1.0446	0.9288	4.139	2.20
096	E	2.82	0.0898	1.017	1.0	886.99	5.15	0.014	27.023	0.014	27.025	178.9	1.025	1.069	181.5	0.08972	1.01747	0.06811	1.01771	1.0378	1.03336	1.153	0.9062	3.553	1.88
096	H	7.65	0.0898	1.017	1.0	886.99	5.15	0.014	27.023	0.014	27.023	178.3	1.013	1.062	181.2	0.0894	1.01674	0.03144	1.01732	1.03353	1.02087	1.5107	0.8152	1.67	0.78
096	K	13.00	0.0898	1.017	1.0	886.99	5.15	0.014	27.023	0.014	27.033	178.0	1.008	1.063	181.3	0.08872	1.01677	0.0046	1.01759	1.03664	1.01471	1.908	0.7473	0.248	0.24
096	N	22.91	0.0898	1.017	1.0	886.99	5.15	0.014	27.023	0.014	27.038	177.7	0.998	1.062	181.2	0.08863	1.01656	0	1.01745	1.04637	1.00716	2.6466	0.7365	0	0.05
096	Q	39.66	0.0898	1.017	1.0	886.99	5.15	0.014	27.023	0.014	27.005	178.5	1.018	1.097	182.7	0.08285	1.01628	0	1.01717	1.09408	1.02584	3.7975	0.7287	0	0.07
118	Q	39.66	0.219	1.017	1.0	886.99	5.15	0.034	27.023	0.034	27.032	178.9	1.017	1.091	182.5	0.20217	1.0173	0	1.01937	1.09476	1.02695	3.8278	0.4411	0	2.62
118	R	39.95	0.219	1.017	1.0	886.99	5.15	0.034	27.023	0.034	27.016	178.7	1.011	1.131	184.1	0.20275	1.01636	0	1.01843	1.0897	1.02111	3.8744	0.4442	0	2.63
140	A	1.13	0.534	1.017	1.0	886.99	5.15	0.082	27.023	0.082	27.036	178.9	1.011	1.442	195.1	0.52021	1.01718	0.47332	1.01764	1.02389	1.02254	1.1444	0.9606	20.363	21.61
140	C	1.72	0.534	1.017	1.0	886.99	5.15	0.082	27.023	0.082	27.027	179.1	1.013	1.409	194.0	0.52006	1.01693	0.44816	1.01763	1.02659	1.02442	1.1797	0.8932	19.495	19.31
140	D	2.53	0.534	1.017	1.0	886.99	5.15	0.082	27.023	0.082	27.040	179.2	1.015	1.398	193.6	0.51684	1.01752	0.41274	1.01852	1.02963	1.0263	1.2294	0.806	18.232	18.22
140	F	3.11	0.534	1.017	1.0	886.99	5.15	0.082	27.023	0.082	27.030	179.1	1.012	1.384	193.1	0.5194	1.01699	0.39283	1.0182	1.02782	1.02364	1.2696	0.7498	17.504	18.50
140	G	7.36	0.534	1.017	1.0	886.99	5.15	0.082	27.023	0.082	27.024	179.1	1.012	1.479	196.3	0.51221	1.0168	0.25404	1.01927	1.03553	1.02491	1.5548	0.4033	12.061	12.11
140	I	7.95	0.534	1.017	1.0	886.99	5.15	0.082	27.023	0.082	27.031	179.2	1.013	1.395	193.5	0.515	1.01709	0.2457	1.01967	1.03652	1.025	1.595	0.3751	11.71	13.61
140	J	12.70	0.534	1.017	1.0	886.99	5.15	0.082	27.023	0.082	27.028	179.1	1.011	1.390	193.3	0.51358	1.01683	0.14786	1.02033	1.04212	1.0228	1.9371	0.1231	7.387	9.68
140	L	13.29	0.534	1.017	1.0	886.99	5.15	0.082	27.023	0.082	27.013	179.2	1.012	1.402	193.7	0.51184	1.0164	0.13771	1.01999	1.04553	1.02522	1.976	0.0956	6.918	8.16
140	M	22.62	0.534	1.017	1.0	886.99	5.15	0.082	27.023	0.082	27.025	179.4	1.013	1.407	193.9	0.50193	1.01683	0.09981	1.02075	1.06254	1.02555	2.6707	0.001	5.11	3.29
140	O	23.20	0.534	1.017	1.0	886.99	5.15	0.082	27.023	0.082	27.027	179.4	1.012	1.420	194.3	0.50012	1.01686	0.09773	1.02078	1.06249	1.02442	2.7179	0.001	5.008	3.19
140	P	39.37	0.534	1.017	1.0	886.99	5.15	0.082	27.023	0.082	27.040	179.3	1.013	1.392	193.4	0.48668	1.01736	0.09679	1.02131	1.09181	1.02511	3.8904	0.001	4.961	0.49
140	R	39.95	0.534	1.017	1.0	886.99	5.15	0.082	27.023	0.082	27.010	179.3	1.012	1.403	193.8	0.48637	1.01624	0.09796	1.02017	1.09282	1.02511	3.9302	0.001	5.021	0.46
140	B	1.42	0.534	1.017	1.0	886.99	5.15	0.082	27.023	0.082	27.020	179.1	1.014	1.034	180.0	0.52129	1.01674	0.49445	1.01702	1.02726	1.0255	1.1588	1.0101	21.092	19.04
140	E	2.82	0.534	1.017	1.0	886.99	5.15	0.082	27.023	0.082	27.022	179.0	1.011	1.032	180.0	0.51999	1.01668	0.46397	1.01724	1.02688	1.02315	1.2471	0.9342	20.046	19.30
140	H	7.65	0.534	1.017	1.0	886.99	5.15	0.082	27.023	0.082	27.029	179.1	1.013	1.041	180.4	0.51476	1.01703	0.36568	1.01849	1.03567	1.0249	1.5519	0.6841	16.494	14.33
140	K	13.00	0.534	1.017	1.0	886.99	5.15	0.082	27.023	0.082	27.029	179.3	1.013	1.051	180.8	0.50788	1.01706	0.26891	1.01939	1.04489	1.0259	1.9054	0.4421	12.679	9.88
140	N	22.91	0.534	1.017	1.0	886.99	5.15	0.082	27.023	0.082	27.021	179.5	1.014	1.069	181.5	0.50136	1.01673	0.12554	1.02042	1.06177	1.02623	2.6081	0.0704	6.345	3.79
140	Q	39.66	0.534	1.017	1.0	886.99	5.15	0.082	27.023	0.082	27.025	179.5	1.011	1.094	182.6	0.48997	1.01682	0.0998	1.02076	1.09121	1.02521	3.8632	0.001	5.109	0.60
173	Q	39.66	2.038	1.017	1.0	886.99	5.15	0.314	27.023	0.311	26.998	178.7	1.009	2.097	213.0	1.90706	1.01373	1.46007	1.01863	1.07189	1.02879	3.2059	0.001	44.101	31.93
173	P+R	39.66	2.038	1.017	1.0	886.99	5.15	0.314	27.023	0.314	26.947	178.6	1.006	1.220	186.3	1.88233	1.01576	1.44127	1.02064	1.0764	1.03127	3.2766	0.001	43.763	28.89
195	B	1.42	4.975	1.017	1.0	886.99	5.15	0.768	27.023	0.767	27.022	178.7	1.009	2.047	209.3	4.7685	1.01654	4.62649	1.01793	1.0461	1.04528	2.1463	1.7163	71.477	67.91
195	E	2.82	4.975	1.017	1.0	886.99	5.15	0.768	27.023	0.777	27.020	178.8	1.010	2.026	208.7	4.81756	1.01652	4.54691	1.01917	1.04814	1.04639	2.2011	1.3719	71.11	63.88
195	H	7.65	4.975																						

			Solldaten							Betriebsdaten (Mittelwerte über 10 s)							Simulierte Daten								Messwert
Punkt	Höhe	L/D	J _{D,0} [m/s]	J _{W,0} [m/s]	P _{DT} [MPa]	ρ' [kg/m³]	ρ'' [kg/m³]	m _{D,0} [kg/s]	m _{W,0} [kg/s]	m _{D,0} [kg/s]	m _{W,0} [kg/s]	t _{GS} [°C]	P _{GS} [MPa]	P _{FD} [MPa]	t _{FD} [°C]	J _{D,0} [m/s]	J _{W,0} [m/s]	J _{D,GS} [m/s]	J _{W,GS} [m/s]	P ₀ [MPa]	P _{GS} [MPa]	Δt ₀ [K]	Δt _{GS} [K]	ε _{GS} [%]	ε _{GS} [%]
074	A	1.13	0.0368	1.017	2.0	849.91	10.05	0.011	25.893	0.011	25.890	211.3	2.023	2.059	210.2	0.03567	1.01716	0.03274	1.01721	2.02787	2.02628	0.5749	0.5208	1.897	0.00
074	C	1.72	0.0368	1.017	2.0	849.91	10.05	0.011	25.893	0.011	25.895	210.6	1.996	2.077	196.0	0.03647	1.01636	0.03155	1.01645	2.0017	1.99916	0.6053	0.5172	1.827	0.00
074	D	2.53	0.0368	1.017	2.0	849.91	10.05	0.011	25.893	0.011	25.879	211.7	2.041	2.107	210.3	0.03647	1.01744	0.02931	1.01758	2.04904	2.04517	0.6274	0.4959	1.703	0.01
074	F	3.11	0.0368	1.017	2.0	849.91	10.05	0.011	25.893	0.011	25.894	210.8	2.005	2.086	194.8	0.03591	1.01667	0.02681	1.01684	2.01346	2.00862	0.6589	0.493	1.558	0.01
074	B	1.42	0.0368	1.017	2.0	849.91	10.05	0.011	25.893	0.011	25.879	210.9	2.009	2.090	202.9	0.03524	1.01616	0.03327	1.0162	2.01286	2.0108	0.5924	0.5308	1.926	0.00
074	E	2.82	0.0368	1.017	2.0	849.91	10.05	0.011	25.893	0.011	25.892	211.2	2.020	2.100	201.7	0.03574	1.01711	0.03151	1.01719	2.02733	2.02298	0.6456	0.5159	1.827	0.01
096	Q	39.66	0.0898	1.017	2.0	849.91	10.05	0.027	25.893	0.028	25.895	211.7	2.033	2.104	213.5	0.08733	1.01763	0.00015	1.01944	2.10109	2.03613	2.158	0.1199	0.009	0.26
096	R	39.95	0.0898	1.017	2.0	849.91	10.05	0.027	25.893	0.028	25.904	211.6	2.033	2.118	213.8	0.08767	1.01802	0	1.01985	2.10275	2.03705	2.1749	0.1167	0	0.34
118	A	1.13	0.219	1.017	2.0	849.91	10.05	0.066	25.893	0.066	25.891	211.3	2.018	2.173	215.1	0.21762	1.017	0.20929	1.01716	2.02484	2.02339	0.6321	0.5545	11.001	11.07
118	C	1.72	0.219	1.017	2.0	849.91	10.05	0.066	25.893	0.066	25.890	211.2	2.016	2.166	215.0	0.2156	1.01694	0.2025	1.0172	2.02465	2.02232	0.6511	0.5279	10.681	10.72
118	D	2.53	0.219	1.017	2.0	849.91	10.05	0.066	25.893	0.066	25.878	211.3	2.018	2.161	214.8	0.21758	1.01651	0.19766	1.0169	2.02761	2.02405	0.6871	0.4995	10.455	10.82
118	F	3.11	0.219	1.017	2.0	849.91	10.05	0.066	25.893	0.066	25.890	211.3	2.017	2.154	214.7	0.21614	1.01692	0.19183	1.0174	2.02676	2.02232	0.7038	0.4723	10.174	10.64
118	G	7.36	0.219	1.017	2.0	849.91	10.05	0.066	25.893	0.066	25.876	211.4	2.016	2.196	215.7	0.21432	1.01643	0.15891	1.01753	2.0348	2.02385	0.8669	0.3185	8.578	10.18
118	I	7.95	0.219	1.017	2.0	849.91	10.05	0.066	25.893	0.066	25.900	211.4	2.018	2.157	214.8	0.21664	1.01736	0.15734	1.01854	2.03554	2.0237	0.8903	0.3006	8.496	10.36
118	J	12.70	0.219	1.017	2.0	849.91	10.05	0.066	25.893	0.066	25.899	211.4	2.017	2.165	215.0	0.2144	1.0172	0.12606	1.01896	2.04025	2.02094	1.0792	0.1592	6.921	8.48
118	L	13.29	0.219	1.017	2.0	849.91	10.05	0.066	25.893	0.066	25.905	211.4	2.018	2.166	215.0	0.21431	1.01754	0.1228	1.01937	2.04352	2.02329	1.1025	0.1438	6.754	8.03
118	M	22.62	0.219	1.017	2.0	849.91	10.05	0.066	25.893	0.066	25.884	211.5	2.020	2.187	215.4	0.21332	1.0167	0.09355	1.01912	2.05896	2.02361	1.4784	0.0004	5.23	5.60
118	O	23.20	0.219	1.017	2.0	849.91	10.05	0.066	25.893	0.066	25.887	211.5	2.019	2.192	215.6	0.21352	1.01681	0.09376	1.01924	2.05942	2.02312	1.5026	0.0004	5.241	5.45
118	P	39.37	0.219	1.017	2.0	849.91	10.05	0.066	25.893	0.066	25.898	211.6	2.018	2.194	215.6	0.21084	1.01722	0.09405	1.01966	2.08668	2.02323	2.1687	0.0004	5.255	2.31
118	R	39.95	0.219	1.017	2.0	849.91	10.05	0.066	25.893	0.066	25.919	211.7	2.018	2.198	215.7	0.21017	1.01806	0.09339	1.02051	2.08833	2.02387	2.1929	0.0004	5.218	1.90
118	B	1.42	0.219	1.017	2.0	849.91	10.05	0.066	25.893	0.066	25.904	211.3	2.018	2.033	211.7	0.21683	1.01752	0.21159	1.01762	2.02539	2.0235	0.64	0.5661	11.106	10.85
118	E	2.82	0.219	1.017	2.0	849.91	10.05	0.066	25.893	0.066	25.908	211.3	2.016	2.034	211.7	0.21704	1.01763	0.20583	1.01785	2.02647	2.02248	0.6932	0.5368	10.834	11.05
118	H	7.65	0.219	1.017	2.0	849.91	10.05	0.066	25.893	0.066	25.887	211.3	2.016	2.040	211.9	0.21576	1.01684	0.18353	1.01749	2.03429	2.02296	0.8775	0.432	9.777	11.07
118	K	13.00	0.219	1.017	2.0	849.91	10.05	0.066	25.893	0.066	25.890	211.5	2.018	2.049	212.1	0.2158	1.01695	0.16027	1.01807	2.04293	2.02339	1.0819	0.3147	8.643	8.74
118	N	22.91	0.219	1.017	2.0	849.91	10.05	0.066	25.893	0.066	25.892	211.4	2.016	2.061	212.4	0.21339	1.01698	0.11675	1.01895	2.05776	2.02257	1.4734	0.111	6.444	6.14
118	Q	39.66	0.219	1.017	2.0	849.91	10.05	0.066	25.893	0.066	25.890	211.5	2.016	2.087	213.0	0.21068	1.01687	0.09367	1.01932	2.08541	2.02263	2.1534	0.0004	5.236	2.55
140	A	1.13	0.534	1.017	2.0	849.91	10.05	0.161	25.893	0.162	25.893	211.3	2.022	2.850	229.7	0.52958	1.0172	0.51442	1.0175	2.03013	2.02886	0.6837	0.5765	23.305	29.90
140	C	1.72	0.534	1.017	2.0	849.91	10.05	0.161	25.893	0.161	25.924	211.3	2.019	2.921	231.0	0.52722	1.01831	0.50327	1.01878	2.02843	2.02638	0.7043	0.5342	22.899	34.38
140	D	2.53	0.534	1.017	2.0	849.91	10.05	0.161	25.893	0.161	25.882	210.9	2.017	2.902	230.5	0.52844	1.01662	0.49326	1.01731	2.02817	2.02505	0.7307	0.4776	22.56	31.33
140	F	3.11	0.534	1.017	2.0	849.91	10.05	0.161	25.893	0.160	25.901	210.9	2.017	2.866	229.8	0.52595	1.01739	0.48347	1.01823	2.02937	2.02545	0.7504	0.4415	22.203	29.84
140	G	7.36	0.534	1.017	2.0	849.91	10.05	0.161	25.893	0.161	25.898	211.4	2.022	3.069	233.7	0.5257	1.01742	0.43699	1.01919	2.0397	2.03004	0.8955	0.2111	20.502	25.79
140	I	7.95	0.534	1.017	2.0	849.91	10.05	0.161	25.893	0.161	25.894	211.3	2.015	2.857	229.7	0.52613	1.01701	0.43355	1.01885	2.03378	2.02332	0.9181	0.1945	20.369	25.91
140	L	13.29	0.534	1.017	2.0	849.91	10.05	0.161	25.893	0.161	25.884	211.2	2.016	2.887	230.2	0.52622	1.01691	0.44638	1.01855	2.04241	2.02518	1.085	0.2459	20.852	25.07
140	O	23.20	0.534	1.017	2.0	849.91	10.05	0.161	25.893	0.161	25.908	211.3	2.014	2.919	230.9	0.52241	1.01733	0.39498	1.01999	2.0586	2.02749	1.4309	0.0004	18.894	25.18
140	R	39.95	0.534	1.017	2.0	849.91	10.05	0.161	25.893	0.161	25.859	211.1	2.012	2.836	229.3	0.52021	1.01755	0.39266	1.0202	2.05549	2.0233	1.4592	0.0004	18.798	25.98
140	B	1.42	0.534	1.017	2.0	849.91	10.05	0.161	25.893	0.161	25.887	211.4	2.019	2.057	212.3	0.51682	1.01556	0.39578	1.01823	2.07917	2.02201	2.0749	0.0004	18.935	26.66
140	E	2.82	0.534	1.017	2.0	849.91	10.05	0.161	25.893	0.161	25.912	211.3	2.015	2.052	212.1	0.52893	1.01693	0.52034	1.0171	2.02897	2.0273	0.6933	0.6079	23.513	29.12
140	H	7.65	0.534	1.017	2.0	849.91	10.05	0.161	25.893	0.162	25.883	211.4	2.016	2.058	212.3	0.52949	1.01778	0.51148	1.01815	2.02834	2.02483	0.7416	0.5619	23.191	27.51
140	K	13.00	0.534	1.017	2.0	849.91	10.05	0.161	25.893	0.162	25.889	211.3	2.015	2.065	212.4	0.5276	1.01668	0.47873	1.01768	2.03608	2.02611	0.9028	0.4038	22.04	26.39
140	N	22.91	0.534	1.017	2.0	849.91	10.05	0.161	25.893	0.162	25.899	211.1	2.018	2.081	212.8	0.52497	1.01671	0.39643	1.0193	2.04312	2.02521	1.1042	0.0115	18.954	26.07
140	Q	39.66	0.534	1.017	2.0	849.91	10.05	0.161	25.893	0.161	25.844	211.1	2.010	2.096	213.2	0.51658	1.01487	0.39506	1.01754	2.07488	2.01929	2.0379	0.0004	18.911	23.95
173	Q	39.66	2.038	1.017	2.0	849.91	10.05	0.614	25.893	0.621	25.903	211.2	2.012	2.419	219.5	1.99566	1.01733	1.83799	1.02112	2.07149	2.0346	1.8558	0.0004	52.011	57.92
184	B	1.42	3.185	1.017	2.0	849.91	10.05	0.959	25.893	0.956	25.869	211.4	2.021	2.956	229.5	3.10109	1.01627	3.06852	1.01693	2.05129	2.05031	1.191	0.9993	64.486	58.67
184	E	2.82	3.185	1.017	2.0	849.91	10.05	0.959	25.893	0.967	25.886	211.5	2.019	2											

Punkt	Höhe	L/D	Solldaten							Betriebsdaten (Mittelwerte über 10 s)							Simulierte Daten										Messwert
			J _{D,0} [m/s]	J _{W,0} [m/s]	P _{DT} [MPa]	ρ' [kg/m³]	ρ'' [kg/m³]	m _{D,0} [kg/s]	m _{W,0} [kg/s]	m _{D,0} [kg/s]	m _{W,0} [kg/s]	t _{GS} [°C]	P _{GS} [MPa]	P _{FD} [MPa]	t _{FD} [°C]	J _{D,0} [m/s]	J _{W,0} [m/s]	J _{D,GS} [m/s]	J _{W,GS} [m/s]	P ₀ [MPa]	P _{GS} [MPa]	Δt ₀ [K]	Δt _{GS} [K]	ε _{GS} [%]	ε _{GS} [%]		
074	A	1.13	0.0368	1.017	4.0	798.66	20.10	0.022	24.332	0.022	24.319	249.4	4.079	4.117	250.6	0.03613	1.01861	0.03522	1.01866	4.08765	4.08616	0.3479	0.318	2.256	1.79		
074	C	1.72	0.0368	1.017	4.0	798.66	20.10	0.022	24.332	0.022	24.357	248.3	4.003	4.063	249.7	0.03725	1.01808	0.0357	1.01815	4.01314	4.01076	0.3676	0.3186	2.28	1.59		
074	D	2.53	0.0368	1.017	4.0	798.66	20.10	0.022	24.332	0.022	24.319	248.0	3.982	4.044	249.5	0.03734	1.01588	0.03493	1.01599	3.99334	3.9897	0.3861	0.3109	2.233	1.45		
074	F	3.11	0.0368	1.017	4.0	798.66	20.10	0.022	24.332	0.022	24.348	247.4	3.944	4.007	248.9	0.03646	1.016	0.03343	1.01614	3.95604	3.95151	0.4023	0.3078	2.135	1.30		
074	G	7.36	0.0368	1.017	4.0	798.66	20.10	0.022	24.332	0.022	24.323	249.3	4.068	4.096	250.3	0.03605	1.01849	0.02887	1.01883	4.08755	4.07649	0.4881	0.2624	1.856	1.37		
074	I	7.95	0.0368	1.017	4.0	798.66	20.10	0.022	24.332	0.022	24.292	248.3	4.009	4.044	249.5	0.03684	1.01551	0.02875	1.01588	4.02874	4.01677	0.5069	0.2584	1.848	1.32		
074	J	12.70	0.0368	1.017	4.0	798.66	20.10	0.022	24.332	0.023	24.324	247.9	3.975	4.034	249.3	0.03745	1.01586	0.02393	1.01647	4.00167	3.98235	0.6192	0.2131	1.54	1.19		
074	L	13.29	0.0368	1.017	4.0	798.66	20.10	0.022	24.332	0.022	24.357	247.3	3.936	4.003	248.8	0.03712	1.01614	0.02279	1.01678	3.96418	3.94392	0.638	0.2098	1.465	1.14		
074	M	22.62	0.0368	1.017	4.0	798.66	20.10	0.022	24.332	0.022	24.336	249.1	4.061	4.134	250.8	0.03615	1.01881	0.01348	1.01986	4.10401	4.06934	0.8324	0.124	0.874	0.93		
074	O	23.20	0.0368	1.017	4.0	798.66	20.10	0.022	24.332	0.022	24.289	248.3	4.004	4.077	249.9	0.03686	1.0152	0.01297	1.01628	4.04653	4.01091	0.8543	0.1172	0.841	0.88		
074	P	39.37	0.0368	1.017	4.0	798.66	20.10	0.022	24.332	0.022	24.322	247.8	3.974	4.055	249.6	0.03672	1.01569	0.00121	1.01731	4.04189	3.98093	1.2338	0.0188	0.079	0.55		
074	R	39.95	0.0368	1.017	4.0	798.66	20.10	0.022	24.332	0.022	24.319	247.1	3.936	4.018	249.1	0.03687	1.01454	0.00085	1.01616	4.00639	3.94445	1.2565	0.0182	0.055	0.45		
074	B	1.42	0.0368	1.017	4.0	798.66	20.10	0.022	24.332	0.022	24.318	249.0	4.052	4.101	250.3	0.03584	1.01784	0.03524	1.01787	4.06192	4.05999	0.3564	0.3226	2.256	1.65		
074	E	2.82	0.0368	1.017	4.0	798.66	20.10	0.022	24.332	0.022	24.324	247.7	3.963	4.024	249.2	0.0375	1.01558	0.03611	1.01564	3.97485	3.97076	0.3945	0.3213	2.306	1.58		
074	H	7.65	0.0368	1.017	4.0	798.66	20.10	0.022	24.332	0.022	24.323	248.7	4.034	4.063	249.7	0.03599	1.01749	0.03195	1.01769	4.05313	4.04162	0.4991	0.2936	2.048	1.44		
074	K	13.00	0.0368	1.017	4.0	798.66	20.10	0.022	24.332	0.023	24.359	247.5	3.953	4.014	249.0	0.03764	1.01672	0.02974	1.01709	3.98023	3.96047	0.6289	0.2643	1.904	1.36		
074	N	22.91	0.0368	1.017	4.0	798.66	20.10	0.022	24.332	0.022	24.317	248.6	4.033	4.105	250.4	0.03572	1.01723	0.02141	1.01791	4.07641	4.04136	0.842	0.1997	1.382	0.98		
074	Q	39.66	0.0368	1.017	4.0	798.66	20.10	0.022	24.332	0.023	24.392	247.4	3.954	4.035	249.3	0.03725	1.01806	0.01014	1.01931	4.02337	3.96214	1.2432	0.0952	0.656	0.64		
096	A	1.13	0.0898	1.017	4.0	798.66	20.10	0.054	24.332	0.054	24.355	248.4	4.012	4.078	250.1	0.0886	1.01827	0.08705	1.01834	4.02331	4.02186	0.368	0.3327	5.384	6.54		
096	C	1.72	0.0898	1.017	4.0	798.66	20.10	0.054	24.332	0.054	24.336	248.5	4.012	4.087	250.2	0.08926	1.01747	0.08675	1.01758	4.02426	4.02194	0.3809	0.3243	5.369	6.68		
096	D	2.53	0.0898	1.017	4.0	798.66	20.10	0.054	24.332	0.054	24.324	248.5	4.010	4.078	250.0	0.08974	1.01693	0.0859	1.0171	4.0237	4.02017	0.3985	0.3119	5.32	7.00		
096	F	3.11	0.0898	1.017	4.0	798.66	20.10	0.054	24.332	0.054	24.333	248.6	4.009	4.078	250.0	0.08898	1.01729	0.0842	1.0175	4.02459	4.02018	0.4115	0.3036	5.219	7.01		
096	G	7.36	0.0898	1.017	4.0	798.66	20.10	0.054	24.332	0.054	24.326	248.6	4.012	4.093	250.3	0.08822	1.01707	0.0765	1.01759	4.03326	4.02247	0.5058	0.2419	4.765	6.95		
096	I	7.95	0.0898	1.017	4.0	798.66	20.10	0.054	24.332	0.054	24.311	248.6	4.010	4.084	250.1	0.08878	1.0164	0.07611	1.01697	4.0333	4.02163	0.5177	0.2324	4.744	6.86		
096	J	12.70	0.0898	1.017	4.0	798.66	20.10	0.054	24.332	0.054	24.303	248.7	4.011	4.091	250.2	0.08888	1.01602	0.06858	1.01694	4.03934	4.0205	0.6239	0.1647	4.295	5.90		
096	L	13.29	0.0898	1.017	4.0	798.66	20.10	0.054	24.332	0.053	24.327	248.7	4.010	4.088	250.2	0.0878	1.01703	0.0667	1.01798	4.03978	4.02004	0.6374	0.1579	4.179	5.62		
096	M	22.62	0.0898	1.017	4.0	798.66	20.10	0.054	24.332	0.054	24.338	248.8	4.014	4.103	250.4	0.08853	1.01753	0.05368	1.0191	4.05607	4.02212	0.846	0.035	3.389	4.78		
096	O	23.20	0.0898	1.017	4.0	798.66	20.10	0.054	24.332	0.055	24.321	248.8	4.013	4.107	250.5	0.08932	1.01677	0.05353	1.01839	4.05644	4.02161	0.8593	0.0267	3.381	4.87		
096	P	39.37	0.0898	1.017	4.0	798.66	20.10	0.054	24.332	0.055	24.330	248.8	4.011	4.116	250.6	0.08891	1.0171	0.05224	1.01882	4.07998	4.02015	1.226	0.0151	3.301	3.68		
096	R	39.95	0.0898	1.017	4.0	798.66	20.10	0.054	24.332	0.054	24.286	248.9	4.016	4.117	250.6	0.08814	1.01531	0.05098	1.01705	4.08368	4.02294	1.2376	0.0087	3.228	3.42		
096	B	1.42	0.0898	1.017	4.0	798.66	20.10	0.054	24.332	0.055	24.399	248.7	4.011	4.047	249.6	0.09064	1.02003	0.08963	1.02008	4.02168	4.0198	0.3755	0.3385	5.528	6.87		
096	E	2.82	0.0898	1.017	4.0	798.66	20.10	0.054	24.332	0.054	24.305	248.6	4.013	4.048	249.6	0.08955	1.01612	0.08737	1.01622	4.02392	4.01994	0.4051	0.3266	5.409	7.41		
096	H	7.65	0.0898	1.017	4.0	798.66	20.10	0.054	24.332	0.054	24.313	248.7	4.012	4.054	249.6	0.08867	1.01644	0.08211	1.01675	4.03135	4.02013	0.5122	0.2871	5.099	7.61		
096	K	13.00	0.0898	1.017	4.0	798.66	20.10	0.054	24.332	0.054	24.332	248.7	4.014	4.060	249.7	0.08892	1.01729	0.07705	1.01785	4.04131	4.02208	0.6297	0.2386	4.797	6.27		
096	N	22.91	0.0898	1.017	4.0	798.66	20.10	0.054	24.332	0.054	24.332	248.8	4.013	4.068	249.9	0.08853	1.01723	0.06614	1.01828	4.0554	4.02117	0.85	0.1437	4.144	5.41		
096	Q	39.66	0.0898	1.017	4.0	798.66	20.10	0.054	24.332	0.054	24.316	248.9	4.012	4.086	250.2	0.08731	1.0165	0.04959	1.01826	4.08025	4.02035	1.2265	0.0054	3.14	3.96		
118	Q	39.66	0.219	1.017	4.0	798.66	20.10	0.132	24.332	0.132	24.342	248.9	4.012	4.088	250.1	0.21455	1.0176	0.17579	1.01948	4.07904	4.02253	1.2038	0.0085	10.3	15.37		
118	R	39.95	0.219	1.017	4.0	798.66	20.10	0.132	24.332	0.132	24.330	248.9	4.015	4.310	253.3	0.21443	1.01712	0.17758	1.01897	4.08134	4.02399	1.2148	0.0234	10.398	14.40		
140	Q	39.66	0.534	1.017	4.0	798.66	20.10	0.322	24.332	0.324	24.346	248.7	4.016	4.111	250.3	0.52699	1.01786	0.48616	1.01998	4.07864	4.0292	1.1507	0.0101	24.103	31.32		
140	P+R	39.66	0.534	1.017	4.0	798.66	20.10	0.322	24.332	0.324	24.313	248.6	4.010	4.341	253.6	0.52753	1.01634	0.48614	1.01848	4.07371	4.02364	1.1606	0.0042	24.115	27.39		
162	B	1.42	1.305	1.017	4.0	798.66	20.10	0.786	24.332	0.792	24.329	248.7	4.009	4.381	253.6	1.30455	1.0171	1.29942	1.01734	4.03516	4.03393	0.5654	0.4987	45.958	46.17		
162	E	2.82	1.305	1.017	4.0	798.66	20.10	0.786	24.332	0.788	24.335	248.7	4.011	4.356	253.2	1.29605	1.01741	1.28567	1.0179	4.03841	4.03581	0.5851	0.4482	45.687	52.32		
162	H	7.65	1.305	1.017	4.0	798.66	20.10	0.786	24.332	0.786	24.343	248.9	4.010	4.358	253.2	1.29126	1.01773	1.26542	1.01895	4.04257	4.03523	0.6547	0.2989	45.275	50.38		
162	K	13.00	1.305	1.017	4.0	798.66	20.10	0.786	24.332	0.788	24.342	248.8															

Punkt	Höhe	L/D	Solldaten							Betriebsdaten (Mittelwerte über 10 s)							Simulierte Daten								Messwert
			J _{D,0} [m/s]	J _{W,0} [m/s]	P _{DT} [MPa]	ρ' [kg/m³]	ρ'' [kg/m³]	m _{D,0} [kg/s]	m _{W,0} [kg/s]	m _{D,0} [kg/s]	m _{W,0} [kg/s]	t _{GS} [°C]	P _{GS} [MPa]	P _{FD} [MPa]	t _{FD} [°C]	J _{D,0} [m/s]	J _{W,0} [m/s]	J _{D,GS} [m/s]	J _{W,GS} [m/s]	P ₀ [MPa]	P _{GS} [MPa]	Δt ₀ [K]	Δt _{GS} [K]	ε _{GS} [%]	
074	A	1.13	0.0368	1.017	6.5	749.03	33.66	0.037	22.820	0.037	22.824	279.0	6.541	6.582	280.0	0.03622	1.01829	0.03588	1.01831	6.55246	6.55107	0.222	0.2032	2.498	2.47
074	C	1.72	0.0368	1.017	6.5	749.03	33.66	0.037	22.820	0.037	22.822	278.6	6.502	6.550	279.7	0.03688	1.01722	0.0363	1.01726	6.51515	6.51292	0.2324	0.2019	2.526	2.45
074	D	2.53	0.0368	1.017	6.5	749.03	33.66	0.037	22.820	0.037	22.807	278.4	6.479	6.534	279.6	0.03663	1.01601	0.03573	1.01608	6.49316	6.48975	0.245	0.1982	2.487	2.43
074	F	3.11	0.0368	1.017	6.5	749.03	33.66	0.037	22.820	0.038	22.814	278.2	6.455	6.514	279.4	0.03742	1.01569	0.03627	1.01578	6.46957	6.46532	0.2548	0.1959	2.522	2.46
074	G	7.36	0.0368	1.017	6.5	749.03	33.66	0.037	22.820	0.037	22.825	279.4	6.574	6.617	280.4	0.0363	1.01909	0.03348	1.01934	6.59284	6.58249	0.3109	0.1685	2.335	2.55
074	I	7.95	0.0368	1.017	6.5	749.03	33.66	0.037	22.820	0.037	22.809	278.8	6.526	6.577	280.0	0.03611	1.01719	0.03299	1.01746	6.54691	6.53571	0.3226	0.167	2.302	2.49
074	J	12.70	0.0368	1.017	6.5	749.03	33.66	0.037	22.820	0.038	22.822	278.5	6.484	6.553	279.8	0.03716	1.01673	0.03174	1.01719	6.51169	6.49362	0.3941	0.1376	2.214	2.63
074	L	13.29	0.0368	1.017	6.5	749.03	33.66	0.037	22.820	0.037	22.825	278.2	6.464	6.533	279.6	0.03639	1.01635	0.03069	1.01684	6.49196	6.47303	0.405	0.1356	2.141	2.53
074	M	22.62	0.0368	1.017	6.5	749.03	33.66	0.037	22.820	0.037	24.594	279.3	6.568	6.629	280.5	0.03581	1.09785	0.02206	1.09905	6.62806	6.5955	0.7039	0.2056	1.469	2.33
074	O	23.20	0.0368	1.017	6.5	749.03	33.66	0.037	22.820	0.037	22.829	279.1	6.542	6.603	280.2	0.03581	1.01843	0.02558	1.01932	6.585	6.55177	0.5444	0.0712	1.792	2.16
074	P	39.37	0.0368	1.017	6.5	749.03	33.66	0.037	22.820	0.037	22.836	278.9	6.514	6.598	280.2	0.03596	1.01805	0.02033	1.01945	6.58159	6.52482	0.7856	0.001	1.429	1.30
074	R	39.95	0.0368	1.017	6.5	749.03	33.66	0.037	22.820	0.037	22.823	278.6	6.487	6.574	280.0	0.03639	1.01679	0.02074	1.01819	6.55543	6.49778	0.7973	0.0019	1.457	1.24
074	B	1.42	0.0368	1.017	6.5	749.03	33.66	0.037	22.820	0.037	22.830	278.1	6.458	6.513	279.4	0.0367	1.01644	0.03647	1.01645	6.46887	6.46705	0.23	0.2083	2.535	2.64
074	E	2.82	0.0368	1.017	6.5	749.03	33.66	0.037	22.820	0.037	22.819	278.4	6.480	6.538	279.6	0.03637	1.01655	0.03587	1.01659	6.49381	6.48999	0.2493	0.2034	2.496	2.56
074	H	7.65	0.0368	1.017	6.5	749.03	33.66	0.037	22.820	0.037	22.816	278.7	6.501	6.562	279.9	0.03686	1.01691	0.0353	1.01705	6.52133	6.51055	0.3173	0.1861	2.458	2.66
074	K	13.00	0.0368	1.017	6.5	749.03	33.66	0.037	22.820	0.037	22.835	279.1	6.546	6.591	280.1	0.03634	1.01881	0.03345	1.01908	6.57351	6.55504	0.3949	0.1682	2.331	2.64
074	N	22.91	0.0368	1.017	6.5	749.03	33.66	0.037	22.820	0.038	22.830	278.2	6.454	6.524	279.5	0.03739	1.01634	0.03125	1.0169	6.49729	6.46448	0.5475	0.1291	2.179	2.26
074	Q	39.66	0.0368	1.017	6.5	749.03	33.66	0.037	22.820	0.037	22.784	278.4	6.474	6.555	279.8	0.03679	1.01471	0.02476	1.01581	6.5417	6.48462	0.7934	0.0498	1.737	1.36
096	A	1.13	0.0898	1.017	6.5	749.03	33.66	0.091	22.820	0.091	22.835	278.8	6.509	6.613	280.5	0.08982	1.01792	0.08923	1.01796	6.52036	6.51901	0.236	0.2143	5.986	8.91
096	C	1.72	0.0898	1.017	6.5	749.03	33.66	0.091	22.820	0.091	22.822	278.8	6.510	6.612	280.4	0.08959	1.01739	0.08864	1.01746	6.52286	6.52069	0.2441	0.2092	5.951	9.15
096	D	2.53	0.0898	1.017	6.5	749.03	33.66	0.091	22.820	0.092	22.814	278.7	6.509	6.609	280.4	0.09102	1.01698	0.08955	1.0171	6.52243	6.51912	0.2557	0.2022	6.009	9.87
096	F	3.11	0.0898	1.017	6.5	749.03	33.66	0.091	22.820	0.091	22.816	278.8	6.511	6.606	280.3	0.08962	1.01714	0.0878	1.01729	6.52599	6.52186	0.2637	0.1971	5.899	9.80
096	G	7.36	0.0898	1.017	6.5	749.03	33.66	0.091	22.820	0.092	22.810	278.8	6.512	6.637	280.6	0.09082	1.0169	0.08619	1.01729	6.53224	6.52216	0.3247	0.1598	5.797	10.27
096	I	7.95	0.0898	1.017	6.5	749.03	33.66	0.091	22.820	0.091	22.841	278.7	6.509	6.609	280.4	0.08978	1.01818	0.0848	1.0186	6.53029	6.51939	0.3334	0.1554	5.703	10.25
096	J	12.70	0.0898	1.017	6.5	749.03	33.66	0.091	22.820	0.091	22.845	278.8	6.510	6.617	280.4	0.08982	1.01839	0.08167	1.01909	6.53822	6.52064	0.4013	0.1129	5.502	9.96
096	L	13.29	0.0898	1.017	6.5	749.03	33.66	0.091	22.820	0.090	22.818	278.8	6.509	6.614	280.4	0.08918	1.01717	0.08068	1.01789	6.53898	6.52057	0.409	0.1074	5.444	9.98
096	M	22.62	0.0898	1.017	6.5	749.03	33.66	0.091	22.820	0.091	22.805	278.9	6.510	6.628	280.6	0.08921	1.01655	0.07468	1.0178	6.55215	6.52059	0.5431	0.0267	5.06	9.50
096	O	23.20	0.0898	1.017	6.5	749.03	33.66	0.091	22.820	0.091	22.834	278.9	6.511	6.636	280.6	0.08965	1.01789	0.07471	1.01917	6.5539	6.52151	0.5519	0.022	5.057	9.39
096	P	39.37	0.0898	1.017	6.5	749.03	33.66	0.091	22.820	0.092	22.807	279.0	6.509	6.640	280.7	0.08975	1.01661	0.07352	1.01809	6.57536	6.52002	0.7855	0.0011	4.984	8.80
096	R	39.95	0.0898	1.017	6.5	749.03	33.66	0.091	22.820	0.091	22.844	279.0	6.510	6.642	280.7	0.08921	1.01824	0.07299	1.01973	6.57685	6.52066	0.7939	0.0011	4.945	8.50
096	B	1.42	0.0898	1.017	6.5	749.03	33.66	0.091	22.820	0.091	22.831	278.8	6.511	6.547	279.8	0.08963	1.01786	0.08926	1.01788	6.52393	6.52217	0.24	0.2168	5.988	8.69
096	E	2.82	0.0898	1.017	6.5	749.03	33.66	0.091	22.820	0.091	22.807	278.8	6.508	6.545	279.7	0.08986	1.01666	0.08905	1.01673	6.5216	6.51788	0.2599	0.2107	5.979	9.56
096	H	7.65	0.0898	1.017	6.5	749.03	33.66	0.091	22.820	0.091	22.799	278.9	6.509	6.549	279.8	0.08976	1.01632	0.08727	1.01655	6.52947	6.51899	0.3293	0.1879	5.867	10.44
096	K	13.00	0.0898	1.017	6.5	749.03	33.66	0.091	22.820	0.092	22.825	278.9	6.509	6.557	279.8	0.09046	1.01748	0.08585	1.01789	6.53883	6.52087	0.4052	0.1587	5.772	10.14
096	N	22.91	0.0898	1.017	6.5	749.03	33.66	0.091	22.820	0.091	22.830	278.9	6.507	6.566	280.0	0.08937	1.01765	0.08042	1.01846	6.55054	6.51863	0.5469	0.0994	5.425	9.44
096	Q	39.66	0.0898	1.017	6.5	749.03	33.66	0.091	22.820	0.091	22.837	278.9	6.507	6.584	280.1	0.0896	1.01789	0.07348	1.01937	6.57421	6.51863	0.7868	0.0015	4.977	8.81
118	Q	39.66	0.219	1.017	6.5	749.03	33.66	0.221	22.820	0.219	22.834	279.0	6.509	6.592	280.2	0.2149	1.01778	0.19798	1.01939	6.57339	6.52116	0.7761	0.0015	12.368	14.26
118	R	39.95	0.219	1.017	6.5	749.03	33.66	0.221	22.820	0.221	22.804	279.0	6.512	6.972	284.0	0.21696	1.01646	0.20014	1.01807	6.57554	6.52281	0.7806	0.0015	12.497	14.18
140	Q	39.66	0.534	1.017	6.5	749.03	33.66	0.538	22.820	0.538	22.824	278.9	6.513	6.649	280.6	0.52754	1.01743	0.50922	1.01932	6.57485	6.52919	0.754	0.001	26.638	27.08
151	B	1.42	0.835	1.017	6.5	749.03	33.66	0.842	22.820	0.835	22.831	278.7	6.505	6.765	281.5	0.8251	1.01766	0.82364	1.01778	6.52793	6.52662	0.345	0.3103	37.023	42.15
151	E	2.82	0.835	1.017	6.5	749.03	33.66	0.842	22.820	0.847	22.767	278.7	6.513	6.763	281.4	0.83553	1.01495	0.83249	1.01522	6.53614	6.53339	0.36	0.2874	37.32	45.20
151	H	7.65	0.835	1.017	6.5	749.03	33.66	0.842	22.820	0.841	22.824	278.7	6.507	6.754	281.4	0.82993	1.01736	0.82193	1.01809	6.53593	6.52815	0.4104	0.2133	36.97	42.90
151	K	13.00	0.835	1.017	6.5	749.03	33.66	0.842	22.820	0.844	22.812	278.8	6.506	6.760	281.4	0.83146	1.01681	0.81868	1.01799	6.54092	6.52759	0.468	0.1425	36.88	42.97
151	N	22.91	0.835	1.017	6.5	749.03	33.66	0.842	22.820	0.837	22.824	278													

Dampfversuche TOPFLOW DN200, D13

D_{innen}: 0.1953 m
 Fläche: 0.0300 m²

Formelzeichen:

J Volumenstromdichte
m Massenstrom
p Druck
t Temperatur
ε Dampfgehalt
ρ Dichte
Δt Temperaturdifferenz zwischen beiden Phasen

Indizes:

0 Einspeisestelle
D Dampf
DT Dampftrommel
FD Frischdampf
GS Gittersensor
W Wasser

Punkt	Höhe	Solldaten							Betriebsdaten (Mittelwerte über 10 s)							Simulierte Daten								Messwert
		J _{D,0} [m/s]	J _{W,0} [m/s]	p _{DT} [MPa]	ρ' [kg/m ³]	ρ'' [kg/m ³]	m _{D,0} [kg/s]	m _{W,0} [kg/s]	m _{D,0} [kg/s]	m _{W,0} [kg/s]	t _{GS} [°C]	p _{GS} [MPa]	p _{FD} [MPa]	t _{FD} [°C]	J _{D,0} [m/s]	J _{W,0} [m/s]	J _{D,GS} [m/s]	J _{W,GS} [m/s]	p ₀ [MPa]	p _{GS} [MPa]	Δt ₀ [K]	Δt _{GS} [K]	ε _{GS} [%]	
151	A	0.835	1.017	1.0	886.99	5.15	0.129	27.023	0.130	27.008	179.5	1.016	1.971	210.5	0.81912	1.01629	0.75209	1.01694	1.02808	1.02688	1.1925	0.9598	28.91	32.72
151	C	0.835	1.017	1.0	886.99	5.15	0.129	27.023	0.129	27.024	179.5	1.016	1.972	210.4	0.81664	1.01687	0.71397	1.01786	1.02911	1.02717	1.2276	0.8669	27.844	36.73
151	D	0.835	1.017	1.0	886.99	5.15	0.129	27.023	0.129	27.039	179.4	1.014	1.914	208.9	0.81787	1.01735	0.67141	1.01875	1.0281	1.0251	1.2771	0.7536	26.611	32.23
151	F	0.835	1.017	1.0	886.99	5.15	0.129	27.023	0.129	27.031	179.6	1.015	1.886	208.2	0.81243	1.01715	0.63917	1.0188	1.03083	1.02706	1.3091	0.6793	25.666	30.36
151	G	0.835	1.017	1.0	886.99	5.15	0.129	27.023	0.129	27.025	179.6	1.016	2.042	212.2	0.80713	1.0169	0.47555	1.02007	1.03687	1.02721	1.572	0.2597	20.427	24.93
151	I	0.835	1.017	1.0	886.99	5.15	0.129	27.023	0.129	27.032	179.9	1.020	2.081	213.2	0.80164	1.01744	0.45711	1.02076	1.04318	1.03267	1.6027	0.2162	19.797	27.66
151	L	0.835	1.017	1.0	886.99	5.15	0.129	27.023	0.129	27.037	180.0	1.024	2.066	212.8	0.79645	1.0178	0.377	1.02187	1.05428	1.03567	1.9431	0.0009	16.911	26.69
151	O	0.835	1.017	1.0	886.99	5.15	0.129	27.023	0.130	27.050	180.2	1.027	2.101	213.7	0.78626	1.01843	0.38043	1.0225	1.07374	1.03888	2.6105	0.0009	17.039	26.05
151	R	0.835	1.017	1.0	886.99	5.15	0.129	27.023	0.129	26.992	180.0	1.024	1.868	207.6	0.76367	1.01608	0.37857	1.02017	1.10081	1.03595	3.8356	0.0009	16.982	25.17
151	B	0.835	1.017	1.0	886.99	5.15	0.129	27.023	0.128	27.041	179.3	1.012	1.057	181.1	0.81277	1.01742	0.77847	1.01777	1.02642	1.02483	1.21	1.0478	29.609	31.09
151	E	0.835	1.017	1.0	886.99	5.15	0.129	27.023	0.129	27.009	179.7	1.018	1.063	181.4	0.81395	1.01649	0.74387	1.01719	1.03341	1.03004	1.2826	0.9453	28.69	33.85
151	H	0.835	1.017	1.0	886.99	5.15	0.129	27.023	0.129	27.016	179.0	1.003	1.053	181.0	0.81781	1.01591	0.63087	1.01772	1.02445	1.01473	1.5776	0.648	25.399	28.88
151	K	0.835	1.017	1.0	886.99	5.15	0.129	27.023	0.129	27.046	179.1	1.002	1.061	181.3	0.81012	1.0171	0.51782	1.01994	1.03315	1.01598	1.9021	0.3638	21.824	28.54
151	N	0.835	1.017	1.0	886.99	5.15	0.129	27.023	0.129	27.024	179.2	1.006	1.079	182.0	0.79954	1.01643	0.37972	1.02054	1.05185	1.01961	2.5399	0.001	16.994	27.66
151	Q	0.835	1.017	1.0	886.99	5.15	0.129	27.023	0.129	27.009	180.0	1.023	1.122	185.3	0.76479	1.01676	0.37676	1.02085	1.09761	1.03661	3.6794	0.0009	16.911	27.43
151	Igel	0.835	1.017	1.0	886.99	5.15	0.129	27.023	0.128	27.015	179.9	1.020	1.934	209.7	0.76037	1.01663	0.37425	1.02074	1.10057	1.03066	4.0566	0.001	16.808	13.34

Punkt	Höhe	Solldaten							Betriebsdaten (Mittelwerte über 10 s)							Simulierte Daten								Messwert
		J _{D,0} [m/s]	J _{W,0} [m/s]	p _{DT} [MPa]	ρ' [kg/m ³]	ρ'' [kg/m ³]	m _{D,0} [kg/s]	m _{W,0} [kg/s]	m _{D,0} [kg/s]	m _{W,0} [kg/s]	t _{GS} [°C]	p _{GS} [MPa]	p _{FD} [MPa]	t _{FD} [°C]	J _{D,0} [m/s]	J _{W,0} [m/s]	J _{D,GS} [m/s]	J _{W,GS} [m/s]	p ₀ [MPa]	p _{GS} [MPa]	Δt ₀ [K]	Δt _{GS} [K]	ε _{GS} [%]	
151	A	0.835	1.017	2.0	849.91	10.05	0.251	25.893	0.252	25.909	211.7	2.021	3.945	248.2	0.82565	1.01772	0.80316	1.01816	2.02911	2.02796	0.7347	0.5944	32.167	32.31
151	C	0.835	1.017	2.0	849.91	10.05	0.251	25.893	0.251	25.911	211.7	2.018	3.968	248.5	0.82372	1.01774	0.789	1.01842	2.02864	2.0268	0.7533	0.535	31.775	36.05
151	D	0.835	1.017	2.0	849.91	10.05	0.251	25.893	0.251	25.891	211.7	2.019	3.829	246.4	0.82326	1.01696	0.77402	1.01793	2.02959	2.02677	0.7763	0.461	31.367	40.62
151	F	0.835	1.017	2.0	849.91	10.05	0.251	25.893	0.251	25.906	211.6	2.017	3.836	246.6	0.82317	1.01749	0.76397	1.01867	2.0291	2.02557	0.7952	0.4128	31.076	39.67
151	G	0.835	1.017	2.0	849.91	10.05	0.251	25.893	0.251	25.908	211.5	2.013	4.121	250.8	0.82306	1.01744	0.70953	1.01971	2.03032	2.02158	0.9294	0.1441	29.497	35.13
151	I	0.835	1.017	2.0	849.91	10.05	0.251	25.893	0.251	25.893	211.7	2.019	3.847	246.7	0.81918	1.01703	0.70321	1.01935	2.03654	2.02708	0.9447	0.1271	29.323	35.13
151	L	0.835	1.017	2.0	849.91	10.05	0.251	25.893	0.251	25.892	211.7	2.018	3.797	245.9	0.81634	1.01693	0.67651	1.01977	2.04131	2.02511	1.1141	0.0004	28.519	34.68
151	O	0.835	1.017	2.0	849.91	10.05	0.251	25.893	0.252	25.900	211.7	2.018	3.945	248.2	0.81549	1.0173	0.68074	1.02017	2.05613	2.02718	1.4303	0.0004	28.645	34.01
151	R	0.835	1.017	2.0	849.91	10.05	0.251	25.893	0.252	25.912	212.0	2.029	3.716	244.7	0.80165	1.01813	0.6765	1.02101	2.08898	2.03771	1.9724	0.0004	28.522	35.30
151	B	0.835	1.017	2.0	849.91	10.05	0.251	25.893	0.252	25.906	211.7	2.022	2.098	213.4	0.82374	1.01771	0.81261	1.01794	2.03272	2.03122	0.7424	0.6478	32.431	35.96
151	E	0.835	1.017	2.0	849.91	10.05	0.251	25.893	0.251	25.897	211.6	2.016	2.090	213.2	0.82393	1.01711	0.80084	1.01758	2.0276	2.02443	0.7856	0.5879	32.106	36.31
151	H	0.835	1.017	2.0	849.91	10.05	0.251	25.893	0.251	25.894	210.8	1.987	2.065	212.6	0.83077	1.01593	0.7688	1.01718	2.00498	1.996	0.9427	0.4004	31.186	36.94
151	K	0.835	1.017	2.0	849.91	10.05	0.251	25.893	0.251	25.877	211.2	1.999	2.083	213.0	0.82457	1.01571	0.72871	1.01768	2.02389	2.00835	1.1032	0.2198	30.061	36.10
151	N	0.835	1.017	2.0	849.91	10.05	0.251	25.893	0.252	25.889	211.6	2.016	2.111	213.7	0.81496	1.01681	0.67984	1.01967	2.05386	2.0258	1.4087	0.0004	28.622	35.82
151	Q	0.835	1.017	2.0	849.91	10.05	0.251	25.893	0.250	25.867	212.0	2.032	2.140	214.4	0.79654	1.01653	0.67228	1.01938	2.09158	2.04154	1.9354	0.0004	28.419	35.81
151	Igel	0.835	1.017	2.0	849.91	10.05	0.251	25.893	0.251	25.898	211.7	2.019	3.075	234.2	0.80052	1.01721	0.67568	1.02009	2.08224	2.02729	2.0709	0.0004	28.494	34.72

Punkt	Höhe	Solldaten							Betriebsdaten (Mittelwerte über 10 s)						Simulierte Daten								Messwert	
		J _{D,0} [m/s]	J _{W,0} [m/s]	P _{DT} [MPa]	ρ' [kg/m³]	ρ'' [kg/m³]	m _{D,0} [kg/s]	m _{W,0} [kg/s]	m _{D,0} [kg/s]	m _{W,0} [kg/s]	t _{GS} [°C]	P _{GS} [MPa]	P _{FD} [MPa]	t _{FD} [°C]	J _{D,0} [m/s]	J _{W,0} [m/s]	J _{D,GS} [m/s]	J _{W,GS} [m/s]	P ₀ [MPa]	P _{GS} [MPa]	Δt ₀ [K]	Δt _{GS} [K]	ε _{GS} [%]	ε _{GS} [%]
140	A+C	0.534	1.017	4.0	798.66	20.10	0.322	24.332	0.316	24.303	248.8	4.009	4.333	253.7	0.52204	1.016	0.51765	1.0162	4.02458	4.02339	0.4401	0.3826	25.311	29.79
140	D+F	0.534	1.017	4.0	798.66	20.10	0.322	24.332	0.325	24.301	248.8	4.011	4.323	253.5	0.53681	1.01591	0.5264	1.01637	4.02604	4.02314	0.4676	0.3301	25.627	28.22
140	G+I	0.534	1.017	4.0	798.66	20.10	0.322	24.332	0.320	24.336	248.9	4.013	4.348	253.9	0.5264	1.01739	0.49953	1.0186	4.03408	4.02519	0.5544	0.1776	24.616	27.30
140	J+L	0.534	1.017	4.0	798.66	20.10	0.322	24.332	0.329	24.325	248.9	4.011	4.345	253.9	0.54176	1.0169	0.50167	1.01873	4.0401	4.02463	0.6549	0.0574	24.693	27.46
140	M+O	0.534	1.017	4.0	798.66	20.10	0.322	24.332	0.323	24.328	248.9	4.010	4.354	253.9	0.53036	1.01699	0.48697	1.01905	4.051	4.023	0.8378	0.0131	24.14	27.16
140	P+R	0.534	1.017	4.0	798.66	20.10	0.322	24.332	0.321	24.384	248.9	4.013	4.328	253.5	0.52334	1.01937	0.48295	1.02146	4.07508	4.02564	1.1519	0.0161	23.961	26.16
140	B	0.534	1.017	4.0	798.66	20.10	0.322	24.332	0.316	24.295	248.9	4.012	4.067	249.8	0.52171	1.01566	0.51898	1.01579	4.026	4.02445	0.4453	0.3966	25.365	26.47
140	E	0.534	1.017	4.0	798.66	20.10	0.322	24.332	0.319	24.338	248.9	4.013	4.065	249.8	0.52541	1.01748	0.51967	1.01775	4.02841	4.02514	0.4718	0.3695	25.367	28.42
140	H	0.534	1.017	4.0	798.66	20.10	0.322	24.332	0.318	24.340	248.9	4.012	4.070	249.9	0.5235	1.01754	0.50785	1.01827	4.03395	4.0247	0.5599	0.2758	24.927	28.37
140	K	0.534	1.017	4.0	798.66	20.10	0.322	24.332	0.324	24.317	249.0	4.014	4.081	250.1	0.53311	1.01665	0.5074	1.01787	4.04282	4.027	0.6558	0.1789	24.917	27.86
140	N	0.534	1.017	4.0	798.66	20.10	0.322	24.332	0.318	24.303	248.9	4.013	4.090	250.2	0.52114	1.01598	0.48001	1.01794	4.0537	4.0254	0.8399	0.0303	23.892	26.92
140	Q	0.534	1.017	4.0	798.66	20.10	0.322	24.332	0.321	24.249	248.9	4.011	4.107	250.5	0.52332	1.01366	0.48239	1.01577	4.07239	4.02292	1.1503	0.0067	24.006	27.30
140	Igel	0.534	1.017	4.0	798.66	20.10	0.322	24.332	0.319	24.391	249.0	4.014	4.604	257.4	0.51941	1.01968	0.47802	1.02184	4.08104	4.02742	1.2118	0.0021	23.772	26.75
151	A+C	0.835	1.017	4.0	798.66	20.10	0.503	24.332	0.505	24.352	249.1	4.025	4.974	261.9	0.82963	1.01839	0.82344	1.01867	4.04059	4.03951	0.4863	0.4142	35.004	43.31
151	D+F	0.835	1.017	4.0	798.66	20.10	0.503	24.332	0.500	24.308	248.9	4.013	4.880	260.8	0.82489	1.01623	0.81088	1.01685	4.03027	4.02765	0.5087	0.3422	34.671	41.97
151	G+I	0.835	1.017	4.0	798.66	20.10	0.503	24.332	0.498	24.324	249.0	4.014	4.950	261.6	0.81866	1.01694	0.78472	1.01848	4.03813	4.03009	0.5878	0.1573	33.911	37.60
151	J+L	0.835	1.017	4.0	798.66	20.10	0.503	24.332	0.502	24.311	249.0	4.013	4.890	260.9	0.82483	1.01634	0.77803	1.0185	4.04268	4.02866	0.6775	0.0351	33.718	37.93
151	M+O	0.835	1.017	4.0	798.66	20.10	0.503	24.332	0.501	24.336	248.9	4.015	4.914	261.2	0.8211	1.01744	0.77462	1.0197	4.05583	4.03054	0.843	0.018	33.604	38.16
151	P+R	0.835	1.017	4.0	798.66	20.10	0.503	24.332	0.499	24.340	248.9	4.010	4.824	260.0	0.81364	1.01744	0.76982	1.01978	4.07036	4.02582	1.1235	0.0055	33.46	37.99
151	B	0.835	1.017	4.0	798.66	20.10	0.503	24.332	0.498	24.311	248.9	4.008	4.157	250.9	0.82242	1.01626	0.81875	1.01643	4.02643	4.02503	0.4905	0.4352	34.894	40.93
151	E	0.835	1.017	4.0	798.66	20.10	0.503	24.332	0.503	24.343	248.9	4.008	4.147	250.8	0.83065	1.01759	0.82304	1.01795	4.0272	4.02426	0.5153	0.3998	34.989	42.45
151	H	0.835	1.017	4.0	798.66	20.10	0.503	24.332	0.506	24.310	248.9	4.011	4.157	250.9	0.83333	1.01627	0.81344	1.01721	4.03592	4.02762	0.5939	0.2817	34.737	39.89
151	K	0.835	1.017	4.0	798.66	20.10	0.503	24.332	0.498	24.335	248.9	4.012	4.157	250.9	0.81864	1.01732	0.78767	1.0188	4.04258	4.02825	0.6809	0.1726	33.989	38.60
151	N	0.835	1.017	4.0	798.66	20.10	0.503	24.332	0.497	24.298	248.9	4.007	4.163	251.0	0.81586	1.01565	0.76934	1.0179	4.04854	4.02301	0.8457	0.016	33.471	38.29
151	Q	0.835	1.017	4.0	798.66	20.10	0.503	24.332	0.501	24.306	248.5	3.987	4.155	250.9	0.82302	1.01541	0.78034	1.0177	4.04845	4.0039	1.1298	0.0188	33.773	39.16

Punkt	Höhe	Solldaten							Betriebsdaten (Mittelwerte über 10 s)						Simulierte Daten								Messwert	
		J _{D,0} [m/s]	J _{W,0} [m/s]	P _{DT} [MPa]	ρ' [kg/m ³]	ρ'' [kg/m ³]	m _{D,0} [kg/s]	m _{W,0} [kg/s]	m _{D,0} [kg/s]	m _{W,0} [kg/s]	t _{GS} [°C]	P _{GS} [MPa]	P _{FD} [MPa]	t _{FD} [°C]	J _{D,0} [m/s]	J _{W,0} [m/s]	J _{D,GS} [m/s]	J _{W,GS} [m/s]	P ₀ [MPa]	P _{GS} [MPa]	Δt ₀ [K]	Δt _{GS} [K]	ε _{GS} [%]	ε _{GS} [%]
063	A	0.0235	1.017	6.5	749.03	33.66	0.024	22.820	0.024	22.824	278.5	6.515	6.541	279.8	0.02332	1.01761	0.02305	1.01763	6.52545	6.52404	0.2192	0.2013	1.618	0.74
063	C	0.0235	1.017	6.5	749.03	33.66	0.024	22.820	0.024	22.817	278.3	6.513	6.539	279.8	0.02346	1.01724	0.02284	1.01727	6.52357	6.52132	0.2274	0.1986	1.604	0.70
063	D	0.0235	1.017	6.5	749.03	33.66	0.024	22.820	0.024	22.831	278.7	6.534	6.562	280.0	0.02416	1.01838	0.02277	1.01843	6.54613	6.5427	0.2379	0.194	1.6	0.71
063	F	0.0235	1.017	6.5	749.03	33.66	0.024	22.820	0.025	22.825	278.7	6.534	6.564	280.0	0.02309	1.01813	0.02328	1.0182	6.54714	6.54287	0.2479	0.1927	1.635	0.85
063	G	0.0235	1.017	6.5	749.03	33.66	0.024	22.820	0.024	22.822	278.4	6.503	6.538	279.8	0.02362	1.01731	0.02148	1.01751	6.52638	6.51594	0.311	0.174	1.509	0.65
063	I	0.0235	1.017	6.5	749.03	33.66	0.024	22.820	0.024	22.812	278.8	6.547	6.579	280.2	0.02368	1.01783	0.02064	1.01804	6.56584	6.55456	0.3174	0.1704	1.453	0.50
063	L	0.0235	1.017	6.5	749.03	33.66	0.024	22.820	0.024	22.825	278.9	6.543	6.584	280.3	0.02357	1.01828	0.01915	1.01867	6.56989	6.55087	0.3966	0.1443	1.349	0.55
063	O	0.0235	1.017	6.5	749.03	33.66	0.024	22.820	0.024	22.823	278.8	6.542	6.596	280.3	0.02316	1.01815	0.01512	1.0189	6.58369	6.55027	0.542	0.0916	1.068	0.46
063	R	0.0235	1.017	6.5	749.03	33.66	0.024	22.820	0.024	22.798	278.6	6.519	6.594	280.3	0.02323	1.01638	0.0085	1.01772	6.58492	6.52702	0.7923	0.0033	0.603	0.15
063	B	0.0235	1.017	6.5	749.03	33.66	0.024	22.820	0.024	22.852	278.8	6.538	6.564	280.0	0.02328	1.01941	0.02365	1.01942	6.54846	6.54664	0.2225	0.2015	1.659	0.99
063	E	0.0235	1.017	6.5	749.03	33.66	0.024	22.820	0.024	22.820	278.3	6.495	6.522	279.6	0.02378	1.01687	0.02318	1.0169	6.50612	6.50227	0.2444	0.1998	1.627	0.77
063	H	0.0235	1.017	6.5	749.03	33.66	0.024	22.820	0.024	22.817	278.8	6.540	6.575	280.1	0.02352	1.01786	0.02223	1.01797	6.5589	6.54805	0.3143	0.1876	1.563	0.79
063	K	0.0235	1.017	6.5	749.03	33.66	0.024	22.820	0.024	22.821	278.8	6.538	6.579	280.2	0.02382	1.01799	0.02086	1.01821	6.56469	6.5461	0.3922	0.1723	1.468	0.67
063	N	0.0235	1.017	6.5	749.03	33.66	0.024	22.820	0.024	22.838	278.7	6.528	6.579	280.1	0.02345	1.01848	0.01909	1.01894	6.56916	6.53619	0.5397	0.1403	1.343	0.79
063	Q	0.0235	1.017	6.5	749.03	33.66	0.024	22.820	0.024	22.788	279.0	6.547	6.618	280.6	0.02389	1.01666	0.01381	1.01755	6.61222	6.55489	0.7833	0.0765	0.977	0.30
085	A	0.0574	1.017	6.5	749.03	33.66	0.058	22.820	0.058	22.827	278.6	6.513	6.578	280.3	0.05733	1.01766	0.05688	1.01769	6.52339	6.52201	0.2286	0.2085	3.901	4.83
085	C	0.0574	1.017	6.5	749.03	33.66	0.058	22.820	0.058	22.823	278.6	6.513	6.573	280.1	0.05728	1.01746	0.05655	1.01752	6.52389	6.52169	0.2372	0.2048	3.88	5.18
085	D	0.0574	1.017	6.5	749.03	33.66	0.058	22.820	0.058	22.815	278.6	6.511	6.579	280.2	0.05746	1.01708	0.05633	1.01717	6.52306	6.51969	0.2488	0.1993	3.866	5.27
085	F	0.0574	1.017	6.5	749.03	33.66	0.058	22.820	0.058	22.839	278.5	6.509	6.578	280.2	0.05727	1.0181	0.05585	1.01822	6.522	6.5178	0.2575	0.1956	3.831	5.20
085	G	0.0574	1.017	6.5	749.03	33.66	0.058	22.820	0.057	22.818	278.6	6.509	6.590	280.3	0.0566	1.01719	0.05296	1.0175	6.52892	6.51866	0.3195	0.1663	3.642	5.28
085	I	0.0574	1.017	6.5	749.03	33.66	0.058	22.820	0.058	22.802	278.7	6.508	6.572	280.1	0.05681	1.01642	0.05286	1.01675	6.5277	6.51661	0.3276	0.1616	3.637	5.74
085	L	0.0574	1.017	6.5	749.03	33.66	0.058	22.820	0.058	22.812	278.7	6.509	6.583	280.3	0.057	1.01684	0.05004	1.01743	6.53637	6.51766	0.4057	0.1221	3.448	4.69
085	O	0.0574	1.017	6.5	749.03	33.66	0.058	22.820	0.058	22.833	278.8	6.509	6.594	280.4	0.05705	1.01774	0.04443	1.01883	6.55008	6.51716	0.55	0.0467	3.071	4.19
085	R	0.0574	1.017	6.5	749.03	33.66	0.058	22.820	0.058	22.797	278.9	6.512	6.606	280.5	0.05714	1.01613	0.0413	1.01757	6.5768	6.51973	0.795	0.0015	2.863	3.20
085	B	0.0574	1.017	6.5	749.03	33.66	0.058	22.820	0.058	22.822	278.7	6.513	6.553	280.0	0.05725	1.01745	0.05696	1.01746	6.52297	6.52118	0.2329	0.2106	3.907	5.34
085	E	0.0574	1.017	6.5	749.03	33.66	0.058	22.820	0.059	22.824	278.8	6.509	6.550	279.9	0.05788	1.01744	0.05725	1.01749	6.52143	6.51765	0.2534	0.2061	3.925	5.92
085	H	0.0574	1.017	6.5	749.03	33.66	0.058	22.820	0.058	22.812	278.6	6.512	6.557	280.0	0.05763	1.01691	0.05565	1.01709	6.53039	6.51973	0.3236	0.1878	3.821	5.88
085	K	0.0574	1.017	6.5	749.03	33.66	0.058	22.820	0.057	22.830	278.6	6.509	6.558	280.1	0.05669	1.01768	0.05301	1.01802	6.53614	6.51786	0.4013	0.1648	3.644	5.24
085	N	0.0574	1.017	6.5	749.03	33.66	0.058	22.820	0.058	22.806	278.7	6.511	6.569	280.2	0.05716	1.01661	0.04981	1.01728	6.55156	6.51912	0.5445	0.1145	3.434	4.54
085	Q	0.0574	1.017	6.5	749.03	33.66	0.058	22.820	0.058	22.822	278.9	6.512	6.586	280.3	0.05644	1.01732	0.04214	1.01861	6.5777	6.5212	0.7895	0.0223	2.918	3.49
107	A	0.14	1.017	6.5	749.03	33.66	0.141	22.820	0.140	22.819	279.0	6.512	6.727	281.8	0.13882	1.01728	0.13805	1.01733	6.52416	6.52284	0.2447	0.2209	8.972	13.38
107	C	0.14	1.017	6.5	749.03	33.66	0.141	22.820	0.141	22.825	279.0	6.511	6.719	281.7	0.13947	1.01752	0.13824	1.01761	6.52289	6.52077	0.2532	0.215	8.981	13.35
107	D	0.14	1.017	6.5	749.03	33.66	0.141	22.820	0.141	22.829	278.9	6.512	6.717	281.6	0.13921	1.01772	0.13734	1.01787	6.52504	6.52181	0.2635	0.2054	8.926	13.79
107	F	0.14	1.017	6.5	749.03	33.66	0.141	22.820	0.141	22.841	279.1	6.511	6.709	281.5	0.1394	1.01828	0.13707	1.01847	6.52678	6.52275	0.2724	0.1998	8.906	13.68
107	G	0.14	1.017	6.5	749.03	33.66	0.141	22.820	0.141	22.827	279.0	6.512	6.767	282.1	0.13916	1.01758	0.13341	1.01806	6.53067	6.52084	0.3315	0.1536	8.691	13.65
107	I	0.14	1.017	6.5	749.03	33.66	0.141	22.820	0.142	22.842	279.1	6.511	6.711	281.5	0.14029	1.01824	0.13409	1.01876	6.5316	6.52098	0.3393	0.1473	8.728	13.90
107	L	0.14	1.017	6.5	749.03	33.66	0.141	22.820	0.139	22.833	279.2	6.511	6.716	281.6	0.13718	1.01782	0.12692	1.01869	6.53916	6.5212	0.4143	0.0927	8.3	13.75
107	O	0.14	1.017	6.5	749.03	33.66	0.141	22.820	0.141	22.620	279.2	6.513	6.742	281.9	0.13829	1.00834	0.12158	1.0098	6.55426	6.52269	0.5513	0.0015	8.027	12.61
107	R	0.14	1.017	6.5	749.03	33.66	0.141	22.820	0.140	22.755	279.1	6.514	6.740	281.9	0.13752	1.01433	0.12114	1.01586	6.5785	6.52368	0.788	0.0011	7.968	12.77
107	B	0.14	1.017	6.5	749.03	33.66	0.141	22.820	0.141	22.822	279.1	6.510	6.539	279.9	0.13987	1.01734	0.13939	1.01737	6.52135	6.51963	0.2477	0.2235	9.05	11.78
107	E	0.14	1.017	6.5	749.03	33.66	0.141	22.820	0.142	22.799	279.0	6.512	6.542	279.9	0.14058	1.01635	0.13955	1.01644	6.52495	6.52133	0.2682	0.2167	9.065	12.69
107	H	0.14	1.017	6.5	749.03	33.66	0.141	22.820	0.141	22.832	279.1	6.513	6.548	280.0	0.13884	1.01787	0.13573	1.01815	6.5331	6.52287	0.3358	0.1881	8.829	14.10
107	K	0.14	1.017	6.5	749.03	33.66	0.141	22.820	0.140	22.817	279.2	6.512	6.554	280.0	0.13809	1.01715	0.13246	1.01766	6.539	6.52147	0.4099	0.153	8.638	13.89
107	N	0.14	1.017	6.5	749.03	33.66	0.141	22.820	0.145	22.817	279.3	6.515	6.571	280.2	0.14208	1.01719	0.13132	1.01817	6.55657	6.52552	0.5477	0.0822	8.567	13.22
107	Q	0.14	1.017	6.5	749.03	33.66	0.141	22.820	0.140	22.847	279.1	6.511	6.584	280.3	0.13679	1.01839	0.12027	1.01994	6.57558	6.5213	0.7837	0.0015	7.893	12.66

Punkt	Höhe	Solldaten							Betriebsdaten (Mittelwerte über 10 s)							Simulierte Daten								Messwert
		J _{D,0} [m/s]	J _{W,0} [m/s]	P _{DT} [MPa]	ρ' [kg/m ³]	ρ'' [kg/m ³]	m _{D,0} [kg/s]	m _{W,0} [kg/s]	m _{D,0} [kg/s]	m _{W,0} [kg/s]	t _{GS} [°C]	P _{GS} [MPa]	P _{FD} [MPa]	t _{FD} [°C]	J _{D,0} [m/s]	J _{W,0} [m/s]	J _{D,GS} [m/s]	J _{W,GS} [m/s]	P ₀ [MPa]	P _{GS} [MPa]	Δt ₀ [K]	Δt _{GS} [K]	ε _{GS} [%]	ε _{GS} [%]
118	A	0.219	1.017	6.5	749.03	33.66	0.221	22.820	0.223	22.818	278.8	6.501	7.016	284.5	0.221	1.01692	0.21997	1.017	6.51282	6.51156	0.2581	0.2313	13.571	19.10
118	C	0.219	1.017	6.5	749.03	33.66	0.221	22.820	0.219	22.822	278.9	6.502	6.977	284.1	0.21707	1.01714	0.21546	1.01727	6.51551	6.51347	0.2657	0.2229	13.328	17.92
118	D	0.219	1.017	6.5	749.03	33.66	0.221	22.820	0.219	22.810	279.1	6.521	6.988	284.1	0.21648	1.01708	0.21406	1.01728	6.53453	6.53142	0.2739	0.2093	13.26	18.44
118	F	0.219	1.017	6.5	749.03	33.66	0.221	22.820	0.221	22.821	279.0	6.511	7.015	284.4	0.21842	1.01736	0.21537	1.01761	6.52695	6.52308	0.2837	0.2027	13.324	17.75
118	G	0.219	1.017	6.5	749.03	33.66	0.221	22.820	0.225	22.834	279.1	6.512	7.139	285.5	0.22161	1.0179	0.21427	1.01852	6.53265	6.52321	0.3411	0.1451	13.258	17.44
118	I	0.219	1.017	6.5	749.03	33.66	0.221	22.820	0.220	22.828	278.9	6.506	6.983	284.1	0.21692	1.01755	0.20916	1.0182	6.5286	6.51837	0.3487	0.1389	12.984	18.01
118	L	0.219	1.017	6.5	749.03	33.66	0.221	22.820	0.222	22.830	279.1	6.518	7.036	284.6	0.21894	1.0179	0.20648	1.01897	6.54702	6.52977	0.4202	0.0745	12.836	16.97
118	O	0.219	1.017	6.5	749.03	33.66	0.221	22.820	0.220	22.814	279.1	6.520	7.011	284.4	0.2163	1.0172	0.19872	1.01876	6.56259	6.53219	0.5532	0.0013	12.417	17.29
118	R	0.219	1.017	6.5	749.03	33.66	0.221	22.820	0.220	22.810	279.0	6.506	7.008	284.3	0.21565	1.01662	0.19879	1.01823	6.57094	6.51816	0.7814	0.0012	12.42	16.67
118	B	0.219	1.017	6.5	749.03	33.66	0.221	22.820	0.219	22.826	279.1	6.528	6.565	280.0	0.21585	1.01795	0.21525	1.018	6.54011	6.53846	0.2602	0.2347	13.32	15.90
118	E	0.219	1.017	6.5	749.03	33.66	0.221	22.820	0.223	22.837	278.8	6.495	6.533	279.7	0.22092	1.01765	0.21958	1.01776	6.50981	6.50633	0.2811	0.2265	13.542	16.96
118	H	0.219	1.017	6.5	749.03	33.66	0.221	22.820	0.220	22.815	279.2	6.531	6.582	280.2	0.21613	1.01755	0.21226	1.0179	6.55232	6.54249	0.3435	0.1886	13.162	17.78
118	K	0.219	1.017	6.5	749.03	33.66	0.221	22.820	0.221	22.842	279.0	6.514	6.579	280.1	0.21748	1.01833	0.21058	1.01896	6.54222	6.52537	0.4161	0.1469	13.056	17.33
118	N	0.219	1.017	6.5	749.03	33.66	0.221	22.820	0.224	22.820	279.0	6.506	6.569	280.0	0.22018	1.01713	0.20751	1.01828	6.54781	6.51792	0.5495	0.0664	12.894	17.34
118	Q	0.219	1.017	6.5	749.03	33.66	0.221	22.820	0.218	22.841	279.0	6.501	6.588	280.2	0.21421	1.01788	0.19729	1.0195	6.56487	6.51261	0.7768	0.0016	12.326	17.24
129	A+C	0.342	1.017	6.5	749.03	33.66	0.345	22.820	0.338	22.812	278.9	6.505	6.708	281.5	0.3338	1.01682	0.33252	1.01692	6.52017	6.51897	0.2743	0.2445	19.187	20.60
129	D+F	0.342	1.017	6.5	749.03	33.66	0.345	22.820	0.341	22.826	279.2	6.526	6.723	281.6	0.33647	1.0179	0.33341	1.01815	6.54172	6.53878	0.2915	0.2196	19.224	21.84
129	G+I	0.342	1.017	6.5	749.03	33.66	0.345	22.820	0.340	22.817	279.0	6.512	6.732	281.7	0.33576	1.01717	0.32705	1.01791	6.53518	6.52623	0.3532	0.1423	18.924	22.31
129	J+L	0.342	1.017	6.5	749.03	33.66	0.345	22.820	0.344	22.822	279.3	6.520	6.728	281.7	0.33858	1.01758	0.32469	1.01878	6.54864	6.53304	0.4213	0.0706	18.807	22.41
129	M+O	0.342	1.017	6.5	749.03	33.66	0.345	22.820	0.348	22.824	279.0	6.514	6.744	281.9	0.34174	1.01746	0.32314	1.01914	6.55523	6.52726	0.5481	0.0014	18.728	21.89
129	P+R	0.342	1.017	6.5	749.03	33.66	0.345	22.820	0.345	22.819	279.2	6.517	6.743	281.9	0.33755	1.01726	0.32019	1.01898	6.57864	6.52951	0.7614	0.0013	18.591	21.64
129	B	0.342	1.017	6.5	749.03	33.66	0.345	22.820	0.348	22.827	279.0	6.510	6.556	279.9	0.34393	1.01758	0.34312	1.01764	6.52427	6.52271	0.2792	0.2517	19.672	20.87
129	E	0.342	1.017	6.5	749.03	33.66	0.345	22.820	0.346	22.818	278.8	6.505	6.550	279.9	0.34176	1.01704	0.34005	1.01719	6.52067	6.51737	0.2965	0.2382	19.533	21.10
129	H	0.342	1.017	6.5	749.03	33.66	0.345	22.820	0.345	22.825	279.0	6.500	6.551	279.9	0.34116	1.01725	0.33625	1.01769	6.52308	6.51379	0.358	0.1927	19.35	23.00
129	K	0.342	1.017	6.5	749.03	33.66	0.345	22.820	0.340	22.822	279.1	6.511	6.567	280.1	0.33512	1.01735	0.32679	1.01811	6.54054	6.52458	0.4242	0.1419	18.909	22.23
129	N	0.342	1.017	6.5	749.03	33.66	0.345	22.820	0.338	22.817	279.3	6.536	6.603	280.4	0.33065	1.0177	0.31634	1.01902	6.57732	6.54894	0.548	0.0533	18.417	21.26
129	Q	0.342	1.017	6.5	749.03	33.66	0.345	22.820	0.342	22.836	279.1	6.512	6.597	280.4	0.33487	1.01793	0.31745	1.01966	6.57535	6.52594	0.765	0.0014	18.453	22.75
075	A	0.0368	1.611	6.5	749.03	33.66	0.037	36.148	0.038	36.162	278.5	6.475	6.534	279.8	0.03762	1.61061	0.03723	1.61063	6.49484	6.49338	0.3354	0.3173	1.832	2.13
075	C	0.0368	1.611	6.5	749.03	33.66	0.037	36.148	0.037	36.139	278.4	6.464	6.521	279.5	0.03711	1.6092	0.03649	1.60924	6.48613	6.48379	0.344	0.3149	1.797	2.09
075	D	0.0368	1.611	6.5	749.03	33.66	0.037	36.148	0.037	36.139	279.5	6.564	6.595	280.4	0.03661	1.61307	0.03569	1.61314	6.58609	6.58254	0.3507	0.307	1.758	2.25
075	F	0.0368	1.611	6.5	749.03	33.66	0.037	36.148	0.036	36.141	279.1	6.540	6.575	280.2	0.03559	1.61228	0.03445	1.61237	6.56451	6.56008	0.3595	0.3049	1.698	2.02
075	G	0.0368	1.611	6.5	749.03	33.66	0.037	36.148	0.038	36.138	279.0	6.528	6.574	280.2	0.03712	1.61167	0.03409	1.61195	6.55933	6.54853	0.4262	0.2908	1.681	1.91
075	I	0.0368	1.611	6.5	749.03	33.66	0.037	36.148	0.039	36.157	278.6	6.493	6.547	279.9	0.03813	1.61115	0.03473	1.61146	6.5252	6.51351	0.438	0.2902	1.711	2.12
075	L	0.0368	1.611	6.5	749.03	33.66	0.037	36.148	0.037	36.168	278.6	6.482	6.546	279.9	0.03663	1.6112	0.0307	1.61174	6.52262	6.5029	0.5199	0.2688	1.515	2.06
075	O	0.0368	1.611	6.5	749.03	33.66	0.037	36.148	0.037	36.152	278.5	6.471	6.548	279.9	0.03678	1.60996	0.02557	1.61097	6.52596	6.4913	0.6716	0.2238	1.265	1.47
075	R	0.0368	1.611	6.5	749.03	33.66	0.037	36.148	0.037	36.136	278.4	6.458	6.543	279.8	0.03643	1.60865	0.01611	1.61047	6.5379	6.47795	0.9282	0.1464	0.801	0.75
075	B	0.0368	1.611	6.5	749.03	33.66	0.037	36.148	0.037	36.145	278.3	6.464	6.519	279.5	0.03684	1.60954	0.0366	1.60955	6.48775	6.48586	0.3401	0.3186	1.802	2.27
075	E	0.0368	1.611	6.5	749.03	33.66	0.037	36.148	0.038	36.153	278.4	6.474	6.531	279.7	0.03757	1.6103	0.03704	1.61035	6.49934	6.49535	0.3613	0.3158	1.823	2.25
075	H	0.0368	1.611	6.5	749.03	33.66	0.037	36.148	0.038	36.136	278.5	6.483	6.543	279.8	0.03783	1.60983	0.03619	1.61	6.51489	6.50363	0.4351	0.3061	1.782	2.03
075	K	0.0368	1.611	6.5	749.03	33.66	0.037	36.148	0.037	36.155	278.8	6.510	6.572	280.1	0.0367	1.61172	0.03374	1.61202	6.55053	6.53125	0.5137	0.2922	1.663	2.11
075	N	0.0368	1.611	6.5	749.03	33.66	0.037	36.148	0.038	36.144	279.0	6.532	6.602	280.3	0.0368	1.61202	0.03091	1.61261	6.58704	6.55289	0.6623	0.2655	1.526	1.46
075	Q	0.0368	1.611	6.5	749.03	33.66	0.037	36.148	0.037	36.139	279.3	6.546	6.622	280.6	0.03578	1.61223	0.02428	1.61338	6.62478	6.56542	0.9142	0.216	1.202	0.75
086	A	0.0574	1.611	6.5	749.03	33.66	0.058	36.148	0.057	36.136	278.6	6.497	6.562	280.1	0.05733	1.01766	0.05688	1.01769	6.52339	6.52201	0.2286	0.2085	3.901	4.19
086	C	0.0574	1.611	6.5	749.03	33.66	0.058	36.148	0.057	36.156	278.8	6.503	6.570	280.1	0.05728	1.01746	0.05655	1.01752	6.52389	6.52169	0.2372	0.2048	3.88	4.87
086	D	0.0574	1.611	6.5	749.03	33.66	0.058	36.148	0.058	36.137	278.8	6.511	6.579	280.2	0.05746	1.01708	0.05633	1.01717	6.52306	6.51969	0.2488	0.1993	3.	

Punkt	Höhe	Solldaten							Betriebsdaten (Mittelwerte über 10 s)						Simulierte Daten								Messwert	
		J _{D,0} [m/s]	J _{W,0} [m/s]	P _{DT} [MPa]	ρ' [kg/m³]	ρ'' [kg/m³]	m _{D,0} [kg/s]	m _{W,0} [kg/s]	m _{D,0} [kg/s]	m _{W,0} [kg/s]	t _{GS} [°C]	P _{GS} [MPa]	P _{FD} [MPa]	t _{FD} [°C]	J _{D,0} [m/s]	J _{W,0} [m/s]	J _{D,GS} [m/s]	J _{W,GS} [m/s]	P ₀ [MPa]	P _{GS} [MPa]	Δt ₀ [K]	Δt _{GS} [K]	ε _{GS} [%]	ε _{GS} [%]
097	A	0.0898	1.611	6.5	749.03	33.66	0.091	36.148	0.092	36.141	278.8	6.510	6.615	280.5	0.09028	1.61113	0.08964	1.61118	6.53502	6.53358	0.3603	0.3402	4.302	8.69
097	C	0.0898	1.611	6.5	749.03	33.66	0.091	36.148	0.091	36.149	278.8	6.509	6.609	280.5	0.08932	1.61147	0.08828	1.61155	6.5351	6.5328	0.3693	0.337	4.238	9.77
097	D	0.0898	1.611	6.5	749.03	33.66	0.091	36.148	0.091	36.144	278.7	6.510	6.608	280.5	0.0898	1.61126	0.0882	1.6114	6.53704	6.53353	0.3816	0.3322	4.235	9.91
097	F	0.0898	1.611	6.5	749.03	33.66	0.091	36.148	0.091	36.133	278.7	6.508	6.606	280.5	0.09012	1.6107	0.08811	1.61087	6.53615	6.53178	0.3903	0.3286	4.232	9.76
097	G	0.0898	1.611	6.5	749.03	33.66	0.091	36.148	0.090	36.148	278.8	6.511	6.634	280.7	0.0891	1.61145	0.08402	1.61189	6.5452	6.53453	0.4537	0.302	4.041	8.89
097	I	0.0898	1.611	6.5	749.03	33.66	0.091	36.148	0.091	36.154	278.6	6.505	6.608	280.4	0.08977	1.61161	0.08423	1.61209	6.54282	6.53128	0.463	0.2985	4.051	9.19
097	L	0.0898	1.611	6.5	749.03	33.66	0.091	36.148	0.092	36.133	278.7	6.510	6.625	280.6	0.09014	1.61078	0.08045	1.61163	6.55405	6.53459	0.5421	0.2619	3.877	9.01
097	O	0.0898	1.611	6.5	749.03	33.66	0.091	36.148	0.091	36.161	278.8	6.504	6.626	280.6	0.08945	1.6118	0.07167	1.61337	6.56508	6.53087	0.6924	0.194	3.465	9.62
097	R	0.0898	1.611	6.5	749.03	33.66	0.091	36.148	0.091	36.149	279.1	6.509	6.646	280.8	0.08858	1.61132	0.05702	1.61409	6.59379	6.53454	0.9444	0.0763	2.776	6.61
097	B	0.0898	1.611	6.5	749.03	33.66	0.091	36.148	0.091	36.166	278.7	6.507	6.545	279.8	0.0902	1.61218	0.08979	1.61221	6.53352	6.53166	0.3663	0.3436	4.306	10.43
097	E	0.0898	1.611	6.5	749.03	33.66	0.091	36.148	0.091	36.127	278.8	6.508	6.546	279.8	0.08946	1.61052	0.08859	1.61059	6.53747	6.53353	0.386	0.3381	4.255	9.72
097	H	0.0898	1.611	6.5	749.03	33.66	0.091	36.148	0.092	36.152	278.7	6.505	6.548	279.8	0.09037	1.61146	0.08768	1.61172	6.54151	6.53041	0.4599	0.3234	4.21	9.74
097	K	0.0898	1.611	6.5	749.03	33.66	0.091	36.148	0.091	36.154	278.7	6.509	6.557	279.9	0.08964	1.61168	0.08475	1.61215	6.55368	6.53466	0.5397	0.3036	4.075	9.33
097	N	0.0898	1.611	6.5	749.03	33.66	0.091	36.148	0.091	36.119	278.9	6.506	6.566	280.0	0.08977	1.60997	0.08011	1.61088	6.56612	6.53239	0.6907	0.264	3.863	9.59
097	Q	0.0898	1.611	6.5	749.03	33.66	0.091	36.148	0.091	36.133	279.0	6.505	6.582	280.2	0.08931	1.61043	0.07055	1.61219	6.58865	6.52996	0.9406	0.183	3.415	7.23
058	Igel	0.0235	0.102	6.5	749.03	33.66	0.024	2.289	0.024	2.287	279.0	6.540	6.615	280.5	0.02341	0.10196	0.02176	0.10213	6.59689	6.53867	0.8343	0.0012	4.296	0.01
059	Igel	0.0235	0.161	6.5	749.03	33.66	0.024	3.613	0.024	3.611	278.4	6.536	6.610	280.5	0.02341	0.16103	0.02126	0.16124	6.59363	6.53499	0.7917	0.0012	3.76	0.01
060	Igel	0.0235	0.255	6.5	749.03	33.66	0.024	5.722	0.025	5.726	278.3	6.494	6.569	280.0	0.02424	0.2551	0.02121	0.25539	6.55203	6.49286	0.7741	0.0016	3.207	0.04
061	Igel	0.0235	0.405	6.5	749.03	33.66	0.024	9.088	0.024	9.075	278.6	6.499	6.572	280.1	0.02378	0.40439	0.01918	0.40483	6.55975	6.49995	0.7692	0.0019	2.372	0.09
062	Igel	0.0235	0.641	6.5	749.03	33.66	0.024	14.383	0.024	14.387	278.4	6.497	6.570	280.1	0.0231	0.64107	0.01527	0.64179	6.56113	6.5008	0.782	0.0011	1.466	0.00
063	Igel	0.0235	1.017	6.5	749.03	33.66	0.024	22.820	0.024	22.818	278.9	6.532	6.606	280.4	0.02388	1.0176	0.00856	1.01898	6.60129	6.53976	0.828	0.0012	0.607	0.08
069	Igel	0.0368	0.102	6.5	749.03	33.66	0.037	2.289	0.037	2.286	279.2	6.538	6.613	280.5	0.03614	0.10194	0.03462	0.1021	6.59274	6.53589	0.8185	0.0012	6.664	2.84
072	Igel	0.0368	0.405	6.5	749.03	33.66	0.037	9.088	0.037	9.085	279.0	6.530	6.605	280.4	0.03588	0.40512	0.03142	0.40556	6.58836	6.52938	0.7575	0.0013	3.831	0.50
075	Igel	0.0368	1.611	6.5	749.03	33.66	0.037	36.148	0.037	36.158	279.0	6.518	6.597	280.1	0.03634	1.61192	0.00948	1.6143	6.60051	6.53684	0.9584	0.0884	0.473	0.40
080	Igel	0.0574	0.102	6.5	749.03	33.66	0.058	2.289	0.058	2.289	279.0	6.509	6.588	280.3	0.05706	0.10198	0.05572	0.10214	6.5632	6.50841	0.7991	0.0013	10.283	9.20
083	Igel	0.0574	0.405	6.5	749.03	33.66	0.058	9.088	0.058	9.078	278.9	6.510	6.591	280.3	0.05727	0.40463	0.05298	0.40507	6.56814	6.5105	0.7457	0.0013	6.293	
085	Igel	0.0574	1.017	6.5	749.03	33.66	0.058	22.820	0.058	22.823	278.8	6.515	6.598	280.4	0.05688	1.01738	0.04105	1.01883	6.58432	6.52358	0.832	0.0014	2.845	3.13
086	Igel	0.0574	1.611	6.5	749.03	33.66	0.058	36.148	0.056	36.157	279.0	6.517	6.598	280.2	0.05504	1.6118	0.0213	1.61475	6.59992	6.53641	0.9695	0.043	1.055	2.07
091	Igel	0.0898	0.102	6.5	749.03	33.66	0.091	2.289	0.091	2.290	279.0	6.509	6.600	280.4	0.08951	0.10206	0.08847	0.10221	6.56001	6.50819	0.7615	0.0013	15.394	15.85
094	Igel	0.0898	0.405	6.5	749.03	33.66	0.091	9.088	0.092	9.083	278.8	6.510	6.605	280.4	0.09035	0.40483	0.08641	0.40526	6.56532	6.5097	0.7232	0.0017	9.868	8.09
097	Igel	0.0898	1.611	6.5	749.03	33.66	0.091	36.148	0.092	36.133	279.1	6.509	6.611	280.2	0.08942	1.61048	0.04866	1.61404	6.59438	6.53128	0.9846	0.0013	2.379	7.07
102	Igel	0.14	0.102	6.5	749.03	33.66	0.141	2.289	0.143	2.292	279.0	6.516	6.641	280.8	0.14068	0.10217	0.14003	0.10232	6.56184	6.51406	0.713	0.0016	22.365	22.91
105	Igel	0.14	0.405	6.5	749.03	33.66	0.141	9.088	0.140	9.094	278.9	6.510	6.636	280.7	0.1376	0.40531	0.13402	0.40574	6.56253	6.50954	0.6968	0.0017	14.509	14.44
107	Igel	0.14	1.017	6.5	749.03	33.66	0.141	22.820	0.141	22.821	279.1	6.509	6.644	280.7	0.13852	1.01715	0.1221	1.0187	6.57781	6.51946	0.8254	0.0015	8.01	13.08
118	Igel	0.219	1.017	6.5	749.03	33.66	0.221	22.820	0.222	22.815	279.0	6.510	6.743	281.8	0.21777	1.01691	0.20099	1.01854	6.57782	6.5217	0.8156	0.0011	12.539	16.69
129	Igel	0.342	1.017	6.5	749.03	33.66	0.345	22.820	0.341	22.846	279.0	6.518	6.826	283.0	0.33387	1.01846	0.31665	1.02019	6.58324	6.53005	0.8029	0.0013	18.411	23.19

Dampfversuche TOPFLOW DN200, Igeleinperlung

D_{innen} : 0.1953 m
 Fläche: 0.0300 m²

Formelzeichen:

J Volumenstromdichte
 m Massenstrom
 p Druck
 t Temperatur
 ε Dampfgehalt
 ρ Dichte
 Δt Temperaturdifferenz zwischen beiden Phasen

Indizes:

0 Einspeisestelle
 D Dampf
 DT Dampftrommel
 FD Frischdampf
 GS Gittersensor
 W Wasser

		Solldaten							Betriebsdaten (Mittelwerte über 10 s)							Simulierte Daten								Messwert
Punkt	Höhe	$J_{D,0}$ [m/s]	$J_{W,0}$ [m/s]	p_{DT} [MPa]	ρ' [kg/m ³]	ρ'' [kg/m ³]	$m_{D,0}$ [kg/s]	$m_{W,0}$ [kg/s]	$m_{D,0}$ [kg/s]	$m_{W,0}$ [kg/s]	t_{GS} [°C]	p_{GS} [MPa]	p_{FD} [MPa]	t_{FD} [°C]	$J_{D,0}$ [m/s]	$J_{W,0}$ [m/s]	$J_{D,GS}$ [m/s]	$J_{W,GS}$ [m/s]	p_0 [MPa]	p_{GS} [MPa]	Δt_0 [K]	Δt_{GS} [K]	ε_{GS} [%]	ε_{GS} [%]
096	Igel	0.0898	1.017	1.0	886.99	5.15	0.014	27.023	0.014	27.026	180.2	1.053	1.126	183.9	0.08169	1.01889	0	1.01981	1.13337	1.06043	3.877	0.6904	0	0.05
118	Igel	0.219	1.017	1.0	886.99	5.15	0.034	27.023	0.034	27.031	178.9	1.023	1.117	183.4	0.20313	1.01752	0	1.01962	1.10505	1.03219	4.0176	0.431	0	2.54
140	Igel	0.534	1.017	1.0	886.99	5.15	0.082	27.023	0.082	27.020	179.4	1.010	1.227	187.6	0.48878	1.01647	0.0998	1.02042	1.09478	1.02254	4.1241	0.001	5.108	1.23
151	Igel	0.835	1.017	1.0	886.99	5.15	0.129	27.023	0.128	27.015	179.9	1.020	1.934	209.7	0.76037	1.01663	0.37425	1.02074	1.10057	1.03066	4.0566	0.001	16.808	13.34

		Solldaten							Betriebsdaten (Mittelwerte über 10 s)							Simulierte Daten								Messwert
Punkt	Höhe	$J_{D,0}$ [m/s]	$J_{W,0}$ [m/s]	p_{DT} [MPa]	ρ' [kg/m ³]	ρ'' [kg/m ³]	$m_{D,0}$ [kg/s]	$m_{W,0}$ [kg/s]	$m_{D,0}$ [kg/s]	$m_{W,0}$ [kg/s]	t_{GS} [°C]	p_{GS} [MPa]	p_{FD} [MPa]	t_{FD} [°C]	$J_{D,0}$ [m/s]	$J_{W,0}$ [m/s]	$J_{D,GS}$ [m/s]	$J_{W,GS}$ [m/s]	p_0 [MPa]	p_{GS} [MPa]	Δt_0 [K]	Δt_{GS} [K]	ε_{GS} [%]	ε_{GS} [%]
074	Igel	0.0368	1.017	2.0	849.91	10.05	0.011	25.893	0.011	25.896	211.4	2.028	2.106	211.1	0.03599	1.0175	0	1.01829	2.10081	2.03086	2.2569	0.3512	0	0.00
096	Igel	0.0898	1.017	2.0	849.91	10.05	0.027	25.893	0.027	25.884	211.8	2.042	2.116	213.8	0.08532	1.0175	0	1.01929	2.11462	2.04479	2.2681	0.124	0	0.05
118	Igel	0.219	1.017	2.0	849.91	10.05	0.066	25.893	0.065	25.889	212.6	2.064	2.176	215.3	0.20362	1.01863	0.0915	1.02106	2.13965	2.07079	2.2604	0.0005	5.131	0.78
140	Igel	0.534	1.017	2.0	849.91	10.05	0.161	25.893	0.161	25.918	211.3	2.018	2.423	220.9	0.51236	1.01806	0.39158	1.02075	2.08875	2.02729	2.1805	0.0004	18.755	24.95
151	Igel	0.835	1.017	2.0	849.91	10.05	0.251	25.893	0.251	25.898	211.7	2.019	3.075	234.2	0.80052	1.01721	0.67568	1.02009	2.08224	2.02729	2.0709	0.0004	28.494	34.72

		Solldaten							Betriebsdaten (Mittelwerte über 10 s)							Simulierte Daten								Messwert
Punkt	Höhe	$J_{D,0}$ [m/s]	$J_{W,0}$ [m/s]	p_{DT} [MPa]	ρ' [kg/m ³]	ρ'' [kg/m ³]	$m_{D,0}$ [kg/s]	$m_{W,0}$ [kg/s]	$m_{D,0}$ [kg/s]	$m_{W,0}$ [kg/s]	t_{GS} [°C]	p_{GS} [MPa]	p_{FD} [MPa]	t_{FD} [°C]	$J_{D,0}$ [m/s]	$J_{W,0}$ [m/s]	$J_{D,GS}$ [m/s]	$J_{W,GS}$ [m/s]	p_0 [MPa]	p_{GS} [MPa]	Δt_0 [K]	Δt_{GS} [K]	ε_{GS} [%]	ε_{GS} [%]
074	Igel	0.0368	1.017	4.0	798.66	20.10	0.022	24.332	0.023	24.334	248.4	4.020	4.095	250.1	0.03671	1.01753	0	1.01923	4.09434	4.02866	1.2923	0.0031	0	0.04
096	Igel	0.0898	1.017	4.0	798.66	20.10	0.054	24.332	0.054	24.303	248.7	4.022	4.108	250.3	0.08727	1.01627	0.05071	1.018	4.09681	4.032	1.2957	0.0133	3.21	3.07
118	Igel	0.219	1.017	4.0	798.66	20.10	0.132	24.332	0.132	24.319	248.9	4.014	4.179	251.3	0.21506	1.01664	0.17807	1.01846	4.08476	4.02359	1.2716	0.021	10.427	15.54
140	Igel	0.534	1.017	4.0	798.66	20.10	0.322	24.332	0.319	24.391	249.0	4.014	4.604	257.4	0.51941	1.01968	0.47802	1.02184	4.08104	4.02742	1.2118	0.0021	23.772	26.75

		Solldaten							Betriebsdaten (Mittelwerte über 10 s)							Simulierte Daten								Messwert
Punkt	Höhe	$J_{D,0}$ [m/s]	$J_{W,0}$ [m/s]	p_{DT} [MPa]	ρ' [kg/m ³]	ρ'' [kg/m ³]	$m_{D,0}$ [kg/s]	$m_{W,0}$ [kg/s]	$m_{D,0}$ [kg/s]	$m_{W,0}$ [kg/s]	t_{GS} [°C]	p_{GS} [MPa]	p_{FD} [MPa]	t_{FD} [°C]	$J_{D,0}$ [m/s]	$J_{W,0}$ [m/s]	$J_{D,GS}$ [m/s]	$J_{W,GS}$ [m/s]	p_0 [MPa]	p_{GS} [MPa]	Δt_0 [K]	Δt_{GS} [K]	ε_{GS} [%]	ε_{GS} [%]
058	Igel	0.0235	0.102	6.5	749.03	33.66	0.024	2.289	0.024	2.287	279.0	6.540	6.615	280.5	0.02341	0.10196	0.02176	0.10213	6.59689	6.53867	0.8343	0.0012	4.296	0.01
069	Igel	0.0368	0.102	6.5	749.03	33.66	0.037	2.289	0.037	2.286	279.2	6.538	6.613	280.5	0.03614	0.10194	0.03462	0.1021	6.59274	6.53589	0.8185	0.0012	6.664	2.84
080	Igel	0.0574	0.102	6.5	749.03	33.66	0.058	2.289	0.058	2.289	279.0	6.509	6.588	280.3	0.05706	0.10198	0.05572	0.10214	6.5632	6.50841	0.7991	0.0013	10.283	9.20
091	Igel	0.0898	0.102	6.5	749.03	33.66	0.091	2.289	0.091	2.290	279.0	6.509	6.600	280.4	0.08951	0.10206	0.08847	0.10221	6.56001	6.50819	0.7615	0.0013	15.394	15.85
102	Igel	0.14	0.102	6.5	749.03	33.66	0.141	2.289	0.143	2.292	279.0	6.516	6.641	280.8	0.14068	0.10217	0.14003	0.10232	6.56184	6.51406	0.713	0.0016	22.365	22.91
059	Igel	0.0235	0.161	6.5	749.03	33.66	0.024	3.613	0.024	3.611	278.4	6.536	6.610	280.5	0.02341	0.16103	0.02126	0.16124	6.59363	6.53499	0.7917	0.0012	3.76	0.01
060	Igel	0.0235	0.255	6.5	749.03	33.66	0.024	5.722	0.025	5.726	278.3	6.494	6.569	280.0	0.02424	0.2551	0.02121	0.25539	6.55203	6.49286	0.7741	0.0016	3.207	0.04
061	Igel	0.0235	0.405	6.5	749.03	33.66	0.024	9.088	0.024	9.075	278.6	6.499	6.572	280.1	0.02378	0.40439	0.01918	0.40483	6.55975	6.49995	0.7692	0.0019	2.372	0.09
072	Igel	0.0368	0.405	6.5	749.03	33.66	0.037	9.088	0.037	9.085	279.0	6.530	6.605	280.4	0.03588	0.40512	0.03142	0.40556	6.58836	6.52938	0.7575	0.0013	3.831	0.50
083	Igel	0.0574	0.405	6.5	749.03	33.66	0.058	9.088	0.058	9.078	278.9	6.510	6.591	280.3	0.05727	0.40463	0.05298	0.40507	6.56814	6.5105	0.7457	0.0013	6.293	
094	Igel	0.0898	0.405	6.5	749.03	33.66	0.091	9.088	0.092	9.083	278.8	6.510	6.605	280.4	0.09035	0.40483	0.08641	0.40526	6.56532	6.5097	0.7232	0.0017	9.868	8.09
105	Igel	0.14	0.405	6.5	749.03	33.66	0.141	9.088	0.140	9.094	278.9	6.510	6.636	280.7	0.1376	0.40531	0.13402	0.40574	6.56253	6.50954	0.6968	0.0017	14.509	14.44
062	Igel	0.0235	0.641	6.5	749.03	33.66	0.024	14.383	0.024	14.387	278.4	6.497	6.570	280.1	0.0231	0.64107	0.01527	0.64179	6.56113	6.5008	0.782	0.0011	1.466	0.00
063	Igel	0.0235	1.017	6.5	749.03	33.66	0.024	22.820	0.024	22.818	278.9	6.532	6.606	280.4	0.02388	1.0176	0.00856	1.01898	6.60129	6.53976	0.828	0.0012	0.607	0.08
074	Igel	0.0368	1.017	6.5	749.03	33.66	0.037	22.820	0.037	22.814	279.2	6.535	6.616	280.0	0.0363	1.01754	0.02078	1.01896	6.60582	6.54457	0.8292	0.0011	1.461	1.08
085	Igel	0.0574	1.017	6.5	749.03	33.66	0.058	22.820	0.058	22.823	278.8	6.515	6.598	280.4	0.05688	1.01738	0.04105	1.01883	6.58432	6.52358	0.832	0.0014	2.845	3.13
096	Igel	0.0898	1.017	6.5	749.03	33.66	0.091	22.820	0.092	22.834	279.0	6.512	6.613	280.1	0.08992	1.01787	0.07377	1.01937	6.58342	6.52363	0.8303	0.0014	4.996	8.41
107	Igel	0.14	1.017	6.5	749.03	33.66	0.141	22.820	0.141	22.821	279.1	6.509	6.644	280.7	0.13852	1.01715	0.1221	1.0187	6.57781	6.51946	0.8254	0.0015	8.01	13.08
118	Igel	0.219	1.017	6.5	749.03	33.66	0.221	22.820	0.222	22.810	279.1	6.511	6.748	281.5	0.21776	1.01676	0.20097	1.01838	6.58001	6.5239	0.8156	0.0011	12.54	14.56
118	Igel	0.219	1.017	6.5	749.03	33.66	0.221	22.820	0.222	22.815	279.0	6.510	6.743	281.8	0.21777	1.01691	0.20099	1.01854	6.57782	6.5217	0.8156	0.0011	12.539	16.69
129	Igel	0.342	1.017	6.5	749.03	33.66	0.34																	

9.3 Betriebs- und Strömungsparameter der Experimente mit Drosselung: K12

• *p10dp70:*

Höhe	m_D [kg/s]	m_W [kg/s]	Δp_K [Pa]	p_{FD} [bar]	ϵ_{mess} [%]	$d_{S,mess}$ [mm]	$a_{i,mess}$ [1/m]
A	0.0819	27.0269	69318.67	14.5907	5.6078	7.4636	64.0103
C	0.0819	27.0294	69792.00	14.5447	3.5606	7.3616	38.8418
D	0.0818	27.0195	70368.00	14.4483	1.9696	7.1414	20.3005
F	0.0821	27.0414	69995.33	14.3173	1.5446	6.9948	15.7717
G	0.0819	27.0224	69426.00	14.9697	0.0614	5.5738	0.7229
I	0.0820	27.0202	70015.33	14.3243	0.0943	5.6601	1.1539
L	0.0825	27.0341	69702.67	14.3680	0.0097	3.0115	0.2043
O	0.0821	27.0432	69829.33	14.7763	0.2028	10.2702	3.8323
R	0.0821	26.9917	70552.67	14.4557	0.0053	2.3562	0.0263
B	0.0824	27.0264	69490.67	10.9947	12.9941	10.6626	92.4411
E	0.0824	27.0308	68878.00	11.0007	9.1237	9.7107	64.6657
H	0.0819	27.0302	69608.67	11.0950	1.3748	8.2453	10.5921
K	0.0826	27.0302	69872.67	11.1937	0.1525	4.2588	1.4714
N	0.0821	27.0074	69984.67	11.3643	0.0037	3.9721	0.1785
Q	0.0819	27.0166	69906.00	11.6350	0.0225	8.1534	0.4547

• *p10dp100:*

Höhe	m_D [kg/s]	m_W [kg/s]	Δp_K [Pa]	p_{FD} [bar]	ϵ_{mess} [%]	$d_{S,mess}$ [mm]	$a_{i,mess}$ [1/m]
A	0.0819	27.0059	98811.33	14.7813	0.7775	5.2843	10.7357
C	0.0827	27.0346	98236.00	14.6377	0.2588	5.7041	3.7060
D	0.0818	27.0344	99558.67	14.5960	0.1855	5.2102	2.4242
F	0.0817	27.0248	99256.00	14.4530	0.0617	5.0301	0.7816
G	0.0827	27.0204	98404.67	15.3630	0.0174	3.3504	0.3113
I	0.0822	27.0086	98794.00	14.5197	0.0210	4.5344	0.5269
L	0.0819	27.0361	98962.00	14.6360	0.1225	3.2733	0.1590
O	0.0820	26.9976	98894.00	14.7620	0.0013	3.3461	0.0147
B	0.0823	27.0555	98674.00	11.2290	10.3356	10.9712	73.0535
E	0.0820	27.0379	97767.33	11.2690	6.0920	9.1631	45.6263
H	0.0825	27.0293	98946.00	11.3913	0.5114	8.1986	4.1203
K	0.0828	27.0317	99338.00	11.4707	0.0277	7.2246	0.6472
N	0.0824	27.0180	99230.00	11.6283	0.0078	3.8177	0.0128

- *p20dp80:*

Höhe	m_D [kg/s]	m_W [kg/s]	Δp_K [Pa]	p_{FD} [bar]	ϵ_{mess} [%]	$d_{S,mess}$ [mm]	$a_{i,mess}$ [1/m]
A	0.1614	25.8946	79296.00	30.2633	17.4018	8.2162	186.1026
C	0.1602	25.8994	79174.00	29.7337	20.1717	11.2822	190.2838
D	0.1606	25.9024	77828.00	29.4957	15.8767	8.3351	151.0181
F	0.1609	25.8754	78182.67	29.1643	14.6993	8.0534	137.0068
G	0.1619	25.8899	78097.33	31.2557	10.9442	8.7610	94.4094
I	0.1606	25.8974	78500.67	28.9447	11.0963	8.4212	99.2085
L	0.1609	25.8931	76515.33	29.3810	7.9641	8.5386	68.8425
O	0.1610	25.8953	76645.33	29.7220	5.1883	8.0091	44.3754
R	0.1619	25.9116	76924.00	28.8597	2.4389	6.6650	19.9310
B	0.1620	25.8959	78798.67	21.2753	19.5493	9.7776	137.4072
E	0.1610	25.8760	78992.67	21.2833	18.4466	9.0343	140.4540
H	0.1615	25.8661	78591.33	21.3463	13.3799	9.0294	107.7641
K	0.1606	25.9041	77804.67	21.4180	9.7740	8.6804	86.1741
N	0.1605	25.9075	77298.00	21.5660	6.6429	7.9532	62.0347
Q	0.1611	25.9015	76428.00	21.8337	2.5953	6.9753	21.7671

- *p20dp160:*

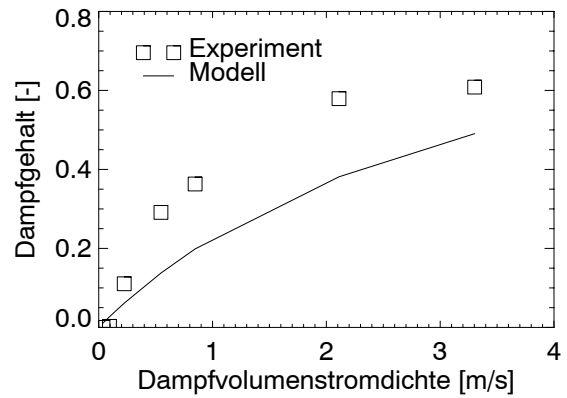
Höhe	m_D [kg/s]	m_W [kg/s]	Δp_K [Pa]	p_{FD} [bar]	ϵ_{mess} [%]	$d_{S,mess}$ [mm]	$a_{i,mess}$ [1/m]
A	0.1621	25.9057	159789.33	30.7897	9.5590	6.9209	111.0453
C	0.1600	25.8920	163571.33	30.3340	15.6150	6.8543	83.7162
D	0.1602	25.9008	160711.33	28.9997	7.7460	6.4768	44.5074
F	0.1607	25.8677	161559.33	28.8937	3.8940	6.5261	34.7226
G	0.1618	25.8995	161345.33	30.8213	12.6780	5.9183	5.3866
I	0.1614	25.9035	164190.67	29.8087	3.0990	5.9976	7.0105
L	0.1608	25.9360	161976.00	29.0560	0.4490	6.1126	0.8235
O	0.1614	25.9193	164888.67	29.3153	4.5260	16.6560	0.2482
B	0.1613	25.8852	162977.33	22.1293	0.5630	9.0074	125.1767
E	0.1602	25.8510	162916.67	22.1183	1.4180	8.5874	103.5515
H	0.1610	25.8929	164344.67	22.1933	0.0730	7.4791	40.6638
K	0.1606	25.8985	164581.33	22.2840	0.1900	7.6047	11.3215
N	0.1614	25.9193	164888.67	22.3587	0.0290	7.8556	1.4571
Q	0.1601	25.8799	162059.33	22.7047	0.0100	4.1927	0.0668

9.4 Getestete Dampfgehaltsmodelle

Bestion (1985) [COM-02]

$$C_0 = 1$$

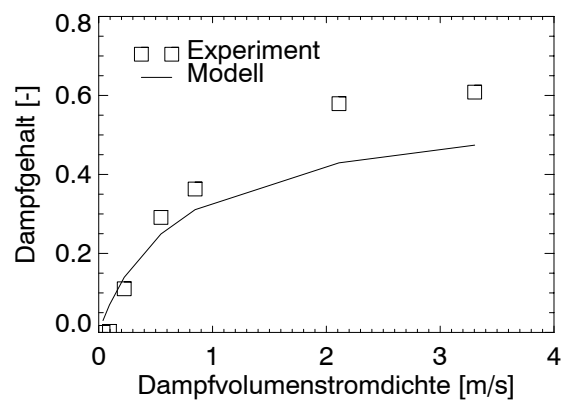
$$\bar{u}_{Dj} = 0,188 \left(\frac{g \cdot d_h \cdot \Delta\rho}{\rho_D} \right)$$



Clarc & Flemmer (1985/86) [HIT-03]

$$C_0 = 0,934 \cdot (1 + 1,42 \cdot \varepsilon)$$

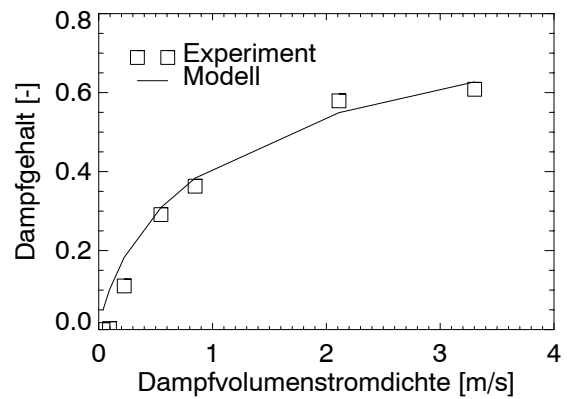
$$\bar{u}_{Dj} = 1,53 \left(\frac{g \cdot \sigma}{\rho_w} \right)^{1/4}$$



Dix (1971) [COM-02]

$$C_0 = \frac{j_D}{j} \left(1 + \left(\frac{j}{j_D} - 1 \right)^{(\rho_D/\rho_w)^{0,1}} \right)$$

$$\bar{u}_{Dj} = 2,9 \cdot \left(\frac{g \cdot \sigma \cdot \Delta\rho}{\rho_w^2} \right)^{1/4}$$

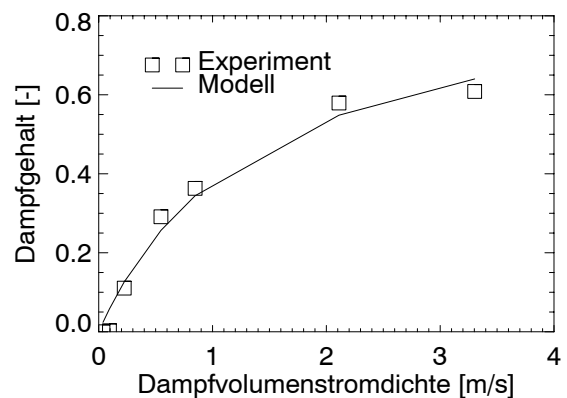


Ge-Ramp (2001) [MAA-05]

$$C_0 = \begin{cases} 1,1 & \varepsilon \leq 0,65 \\ 1 + 0,1 \cdot (1 - \varepsilon) / 0,35 & \varepsilon > 0,65 \end{cases}$$

$$R = \begin{cases} 2,9 & \varepsilon \leq 0,65 \\ 2,9 \cdot (1 - \varepsilon) / 0,35 & \varepsilon > 0,65 \end{cases}$$

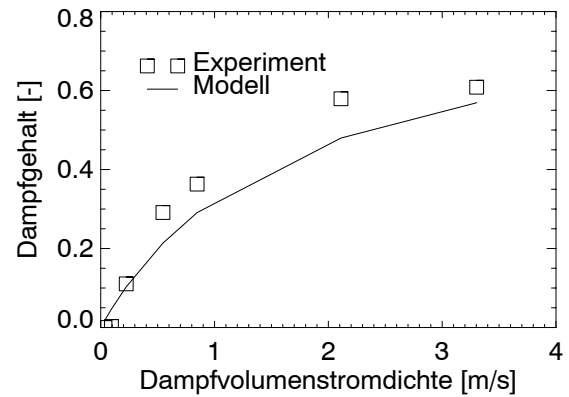
$$\bar{u}_{Dj} = R \cdot \left(\frac{g \cdot \sigma \cdot \Delta\rho}{\rho_w^2} \right)^{1/4}$$



Hirao (1986/90) [HIT-03]

$$C_0 = 1,2 - 0,2 \cdot \sqrt{\frac{\rho_D}{\rho_W}}$$

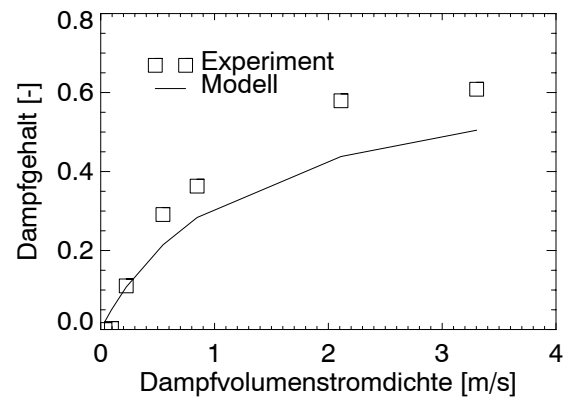
$$\bar{u}_{Dj} = 0,52 \cdot \sqrt{\frac{g \cdot d_i \cdot \Delta\rho}{\rho_W}} \quad \text{für } j > 0,24 \text{ m/s}$$



Jowitt (1981) [COM-02]

$$C_0 = 1 + 0,796 \cdot \exp\left(-0,061 \sqrt{\frac{\rho_W}{\rho_D}}\right)$$

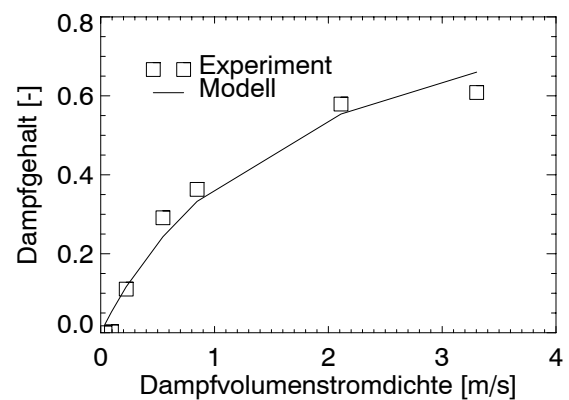
$$\bar{u}_{Dj} = 0,034 \cdot \left(\sqrt{\frac{\rho_W}{\rho_D}} - 1\right)$$



Labuncov (1968) [HUJ-75]

$$C_0 = 1$$

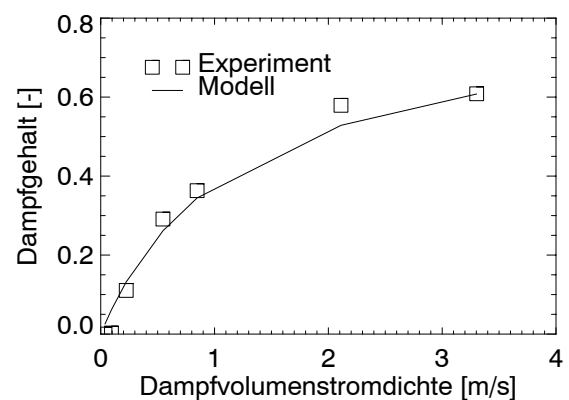
$$\bar{u}_{Dj} = 1,4 \cdot \left(\frac{\rho_W}{\rho_D}\right)^{0,2} \left(1 - \frac{\rho_D}{\rho_W}\right)^5 \cdot 1,5 \cdot \left(\frac{g \cdot \sigma \cdot \Delta\rho}{\rho_W^2}\right)^{0,25}$$



Rouhani (1969) [MAA-05]

$$C_0 = 1 + 0,2 \cdot (1-x) \cdot \left(\frac{g \cdot d_h \cdot \rho_W^2}{\hat{m}^2}\right)^{1/4}$$

$$\bar{u}_{Dj} = 1,18 \cdot (1-x) \cdot \left(\frac{g \cdot \sigma \cdot \Delta\rho}{\rho_W^2}\right)^{1/4}$$



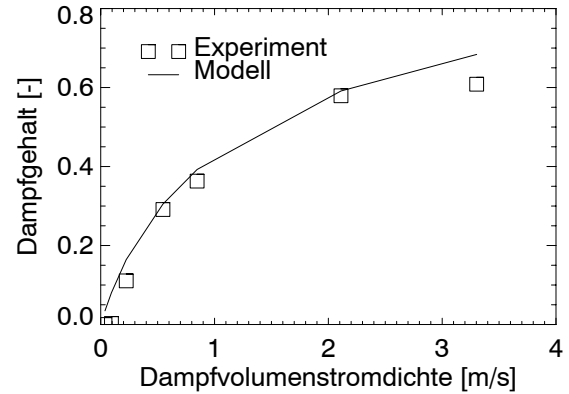
Sonnenburg modifiziert (1994) [MAA-05]

$$C_0 = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,2 - 0,2 \cdot \sqrt{\frac{\rho_D}{\rho_w}} \\ 1 + \frac{(1 - E_d) \cdot (1 - \varepsilon)}{\varepsilon + \sqrt{\left(\frac{\rho_D}{\rho_w}\right) \cdot (1 + 75 \cdot \varepsilon)} / \sqrt{\varepsilon}} \end{array} \right.$$

$$t = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,2 \\ \frac{3}{4} \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \sqrt{\frac{\rho_D}{\rho_w}} \end{array} \right. \quad D^* = \min \left\{ \begin{array}{l} d_h \\ 30 \sqrt{\frac{\sigma}{g \Delta \rho}} \end{array} \right.$$

$$E_d = 1 - \exp\left(\frac{u_c - u_D}{u_c}\right) \quad u_c = 0,6 \cdot \sqrt{\frac{\rho_D}{\rho_w}}$$

$$\bar{u}_{Dj} = \frac{9}{16} \cdot C_0 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{\frac{g \cdot D^* \cdot \Delta \rho}{\rho_w}} \cdot \left(\frac{1 + 4 \cdot t^2}{3 \cdot t^4} \cdot \sqrt{t^2 + 0,25} - \frac{1 + 6 \cdot t^2}{6 \cdot t^4} \right)$$

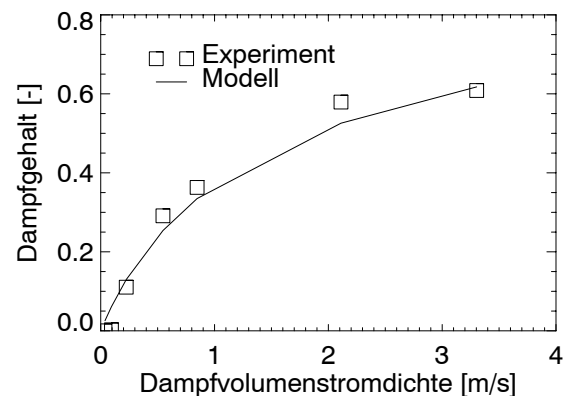


Takeuchi (1992) [MAA-05]

$$C_0 = 1,11775 + 0,45881 \cdot \varepsilon - 0,57656 \cdot \varepsilon^2$$

$$k = \sqrt{\frac{K_{dh}^2}{d_h^*}} \quad K_{dh}^* = \sqrt{d_h^* \cdot \min \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ 2,4 \\ 10,24 \\ d_h^* \end{array} \right.}$$

$$d_h^* = d_h \cdot \sqrt{\frac{g \cdot \Delta \rho}{\sigma}}$$

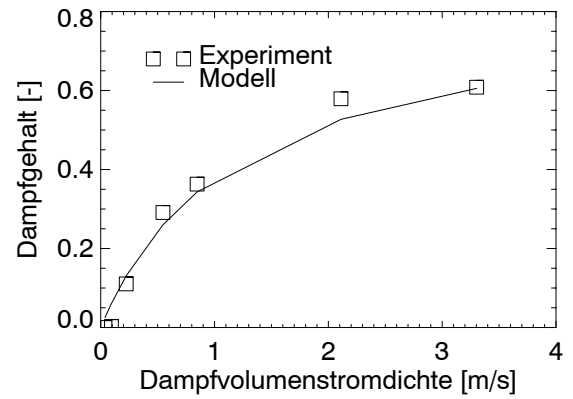


$$\bar{u}_{Dj} = k \frac{C_0 \cdot (1 - C_0 \cdot \varepsilon)}{1,367^2 + C_0 \cdot \varepsilon \cdot \left(\sqrt{\frac{\rho_D}{\rho_w}} - 1,367^2 \right)} \cdot \sqrt{\frac{g \cdot d_h \cdot \Delta \rho}{\rho_w}}$$

Sun (1980) [COM-02]

$$C_0 = \frac{1}{0,82 + 0,18 \frac{p}{p_{kr}}}$$

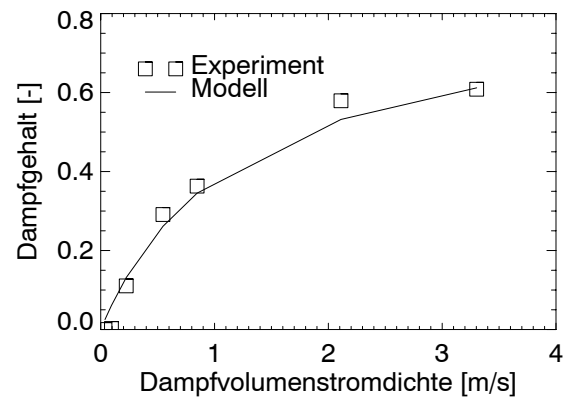
$$\bar{u}_{Dj} = 1,41 \cdot \left(\frac{g \cdot \sigma \cdot \Delta \rho}{\rho_w^2} \right)^{1/4}$$



Zuber/Findlay (1965) [COM-02]

$$C_0 = 1,2$$

$$\bar{u}_{Dj} = 1,53 \cdot \left(\frac{g \cdot \sigma \cdot \Delta \rho}{\rho_w^2} \right)^{1/4}$$



9.5 Schematischer Ablaufplan des Programms
„Simulation_Teststrecke.exe“

