Michael Stein

Systematische Untersuchung der kritischen Wärmestromdichte beim Strömungssieden von Wasser in lotrechten Kreisrohren mit und ohne poröser Beschichtung

Berlin

Systematische Untersuchung der kritischen Wärmestromdichte beim Strömungssieden von Wasser in lotrechten Kreisrohren mit und ohne poröser Beschichtung

Vorgelegt von

Diplom-Ingenieur

Michael Stein

aus Berlin

An der Fakultät III – Prozesswissenschaften

der Technischen Universität Berlin

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

- Dr.-Ing. -

Promotionsausschuß

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Jörg Steinbach

Berichter: Prof. Dr.-Ing. Hein Auracher

Berichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gerhard Bartsch

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 13.04.2004

Berlin 2004

D 83

WIDMUNG

Meiner Familie und meinen Freunden...

VORWORT

Die in dieser Arbeit vorgestellten experimentellen Untersuchungen und entwickelten Modellvorstellungen entstanden während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energietechnik der Technischen Universität Berlin. Die vorliegende Dissertation wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft, der Karl Fischer Stiftung und der Robert Bosch GmbH gefördert. Ihnen gehört mein erster Dank.

Herrn Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing Gerhard Bartsch danke ich ganz herzlich für sein reges Interesse am Fortgang dieser Arbeit sowie für die zahlreichen und richtungsweisenden Diskussionen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Hein Auracher danke ich für die freundliche Unterstützung und Diskussionen sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Steinbach für den Vorsitz im Promotionsausschuß.

Unserem Kooperationspartner, Herrn Prof. Dr.-Ing. Yuri A. Kuzma-Kichta vom Moskauer Power Engineering Institut danke ich für die gelegentlichen Diskussionen.

Meinem Kollegen Robert Goldschmidt danke ich für die Gesellschaft, die nächtlichen konstruktiven Gespräche und die gegenseitige Motivation.

Bedanken möchte ich mich weiter bei den Mitarbeitern des Instituts für die zahlreichen Anregungen. Mein herzlicher Dank gilt besonders den Mitarbeitern der Werkstatt, ohne deren spontanen und teilweise privaten Einsatz die experimentellen Untersuchungen teilweise gar nicht möglich gewesen wären. Danke an Herrn Walter Frydek, Herrn Achim Klein und Herrn Klaus Letsch. Herrn Manfred Strangalis danke ich für die Betreuung im Bereich Elektronik. Weiter danke ich Dirk Hammler und Bernhard Wilms, die mich mit Ihrem Engagement tatkräftig unterstützt haben.

Für die Vermittlung der Stelle als wissenschaftlicher Mitarbeiter und für die vielen wertvollen Gespräche möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulfried Wesser herzlich danken.

Nicht zuletzt danke ich Herrn Frank Bodemann und Herrn Werner Kubenz für die warmherzige Unterstützung in den vergangenen Jahren.

KURZFASSUNG

In dieser Arbeit wurde der Einfluß poröser Heizflächenbeschichtung auf kritische Wärmestromdichten (CHF) beim Strömungssieden im Bereich niedriger Massenstromdichten (25 – 300 kg/m^{2}s) und Drücken (0,12 – 0,7 MPa) sowie variierter Eintrittsunterkühlungen (15 – 50 K) systematisch untersucht. Durch geeignete Parametervariation wurden die Strömungsbereiche des wahren und scheinbaren DNB sowie die Bereiche des Dryout (Grenzdampfgebiet und Microfilm-Dryout) erreicht. Für die Untersuchungen standen zwei glatte und vier innen porös beschichtete Kreisrohrmeßstrecken zur Verfügung. Die Herstellung der porösen Beschichtung erfolgte am Fraunhofer-Institut für Angewandte Materialforschung in Dresden durch Sintern. Alle Rohre und Beschichtungen sind aus Inconel-600 gefertigt. Jeweils drei der sechs Teststrecken besitzen die gleiche Länge, unterscheiden sich aber in den Parametern der Beschichtung. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich der experimentell ermittelten Daten.

Bei Rohren mit poröser Innenbeschichtung verschieben sich die Bereiche der Strömungsregime in Abhängigkeit von den Beschichtungsparametern der porösen Schicht gegenüber glatt bei sonst gleichen Bedingungen. Diese Veränderung des Strömungszustandes führt zu einer Abnahme oder Erhöhung der kritischen Wärmestromdichte gegenüber dem glatten Rohr. Für das Strömungsregime des DNB wurde ein positiver Effekt bei poröser Beschichtung beobachtet. Die Verbesserung betrug hier bis zu 72 %. Im Bereich des Grenzdampfgebietes wurde in Abhängigkeit von der Rohrgeometrie eine Verbesserung von bis zu 58 % aber auch eine Abnahme der kritischen Wärmestromdichte um bis zu 40 % beobachtet. Die maximale Verbesserung der kritischen Wärmestromdichte in dieser Arbeit von 80 % zeigte sich, wenn infolge poröser Beschichtung ein Wechsel des Strömungsregimes des Grenzdampfgebietes in den DNB verhindert wurde. Im Microfilm-Dryout zeigte sich dagegen kein Einfluß poröser Beschichtungen auf die CHF.

Weiterführende physikalische Erklärungen für den Einfluß poröser Beschichtungen auf die kritische Wärmestromdichte werden gegeben. Der Autor erklärt die Verbesserung der CHF bei poröser Beschichtung durch die Erhöhung der Keimstellendichte bei kleineren Blasen und erhöhter Blasenfrequenz sowie durch eine verbesserte Versorgung der Heizfläche mit Flüssigkeit in der porösen Beschichtung durch Kapillarkräfte. Im Bereich des Grenzdampfgebietes kann in Abhängigkeit von der Rohrgeometrie ein zweiter negativer Effekt diesen positiven Effekt überlagern. Durch poröse Beschichtung kann das Entrainment im Bereich der Ringströmung erhöht werden, was zu einer Abnahme der Flüssigkeitsfilmdicke und damit zu einer früheren Austrocknung der Heizfläche führt.

Für die genaue Vorhersage der kritischen Wärmestromdichte wurde eine neue Korrelation für glatte sowie für porös beschichtete Rohre entwickelt. Die unterschiedlichen Strömungsformen DNB und Dryout wurden hierbei berücksichtigt. Über eine neu entwickelte Berechnungslogik kann die jeweilige Strömungsform erkannt und die für diese Strömungsform gültige Berechnungsgleichung angewandt und die CHF sicher bestimmt werden.

Für eine maximale Verbesserung der kritischen Wärmestromdichte im untersuchten Parameterbereich empfiehlt der Autor die Verwendung einer porösen Beschichtung mit den folgenden Beschichtungsparametern:

- Korngröße: 20-30 µm im Durchmesser.
- Schichtdicke: 5-6 Kornlagen.
- Porosität: 60-70 %.

1 EINLEITUNG 1

1.1 Problemstellung 1

1.2 Sieden, Siedekurve und die kritische Wärmestromdichte 2

1.3 Charakteristische Strömungsformen 5

1.4 Einflußparameter auf die kritische Wärmestromdichte 10

1.5 Vorhersage der kritischen Wärmestromdichte 12

2 STAND DER FORSCHUNG 14

2.1 Verbesserung des Wärmeübergangs beim Sieden 15

2.2 Sieden an poröser Beschichtung (Behältersieden) 16

2.3 Datenlage zur CHF beim glatten Kreisrohr 20

2.4 Datenlage zur CHF beim innen porös beschichteten Kreisrohr 30

2.5 Schlußfolgerung für die eigene Aufgabenstellung 37

3 EXPERIMENTELLES VERFAHREN 39

3.1 Der Wasserkreislauf 40

3.1.1 Regelung und Messung des Druckes 42

3.1.2 Regelung und Messung der Eintrittstemperatur 43

3.1.3 Messung und Einstellung des Massenstroms 44

3.1.4 Reinhaltung, Entgasung und Entlüftung des Wasserkreislaufes 44

3.2 Die Teststrecken 45

3.3 Stromversorgung der Testsektion 51

3.4 Die Meßwerterfassung 52

3.5 Berechnung der kritischen Wärmestromdichte 54

3.6 Der Versuchsablauf 59

4 EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE 60

4.1 Versuchsergebnisse 60

4.2 Messung der kritischen Wärmestromdichte 62

4.3 Einfluß poröser Beschichtungen und Strömungsparameter 65

4.3.1 Einfluß der Massenstromdichte 66

4.3.2 Einfluß des Druckes 73

4.3.3 Einfluß der Eintrittsunterkühlung 80

5 DISKUSSION DER EXPERIMENTELLEN ERGEBNISSE 88

5.1 Erkennen der Strömungsform 88

5.1.1 Erkennen der Strömungsform für die Rohre mit der Geometrie $L/D = 50$ 92

5.1.2 Erkennen der Strömungsform für die Rohre mit der Geometrie $L/D = 14{,}1$ 99

5.1.3 Zusammenhang zwischen poröser Beschichtung und der Strömungsform 106

5.2 Vergleich der eigenen Ergebnisse mit denen anderer Autoren 112

5.3 Bedeutung der Ergebnisse 115

5.3.1 Einfluß poröser Beschichtungen bei DNB 121

5.3.2 Einfluß poröser Beschichtungen im Grenzdampfgebiet 122

5.3.3 Einfluß poröser Beschichtungen bei Microfilm-Dryout 126

5.3.4 Weiterführende Erklärungen zum Einfluß poröser Beschichtungen 126

6 KORRELATION DER ERGEBNISSE 132

6.1 Vergleich der Ergebnisse mit der Korrelation anderer Autoren 132

6.1.1 Korrelation anderer Autoren für glatte Rohre 132

6.1.2 Korrelation anderer Autoren für porös beschichtete Rohre 137

6.2 Vergleich der Ergebnisse mit der eigenen Korrelation 139

6.2.1 Eigene Korrelation für glatte Rohre bei DNB 140

6.2.2 Eigene Korrelation für glatte Rohre bei Dryout 143

6.2.3 Eigene Korrelation für porös beschichtete Rohre bei DNB 147

6.2.4 Eigene Korrelation für porös beschichtete Rohre bei Dryout 150

6.3 Zusammenfassung der eigenen Korrelation 152

6.3.1 Anwendung der eigenen Korrelation für glatte Rohre 155

6.3.2 Anwendung der eigenen Korrelation für porös beschichtete Rohre 157

7 ZUSAMMENFASSUNG 161

8 DISKUSSION UND AUSBLICK 165

ANHANG 168

LITERATURVERZEICHNIS 222

SYMBOLVERZEICHNIS

Lateinische Formelzeichen:

A_n, I_n, E	Koeffizienten der Besselfunktion
C	Faktor nach KATTO ET AL. [26]
C_f	Faktor nach KUZMA-KICHTA ET AL. [34]
CHF_D	Faktor nach GROENEVELD ET AL. [20], [21]
$CHF_{D=8mm}$	Faktor nach GROENEVELD ET AL. [20], [21]
D^*	Dimensionsloser Durchmesser
D	Innendurchmesser des Rohres, (m)
d_P	Partikeldurchmesser, (m)
D_P	Porendurchmesser in der porösen Schicht, (m)
$dr, dz, d\zeta$	Differentiale
F	Druckfaktor nach YILDIZ [68]
h'	Eintrittsenthalpie der gesättigten Flüssigkeit (kJ/kg)
h_i	Eintrittsenthalpie der Flüssigkeit bei Eintrittstemperatur (kJ/kg)
I	Strom, (A)
K	Unterkühlungsfaktor nach KATTO ET AL. [26]
L	beheizte Länge des Rohres, (m)
L_U	Abstand zwischen den Spannungsmeßstellen der Testsektion, (m)

m	Faktor nach KUZMA-KICHTA ET AL. [34]
$\dot{m}^*$	Dimensionslose Massenstromdichte
$\dot{m}$	Massenstromdichte, (kg/m^{2}s)
N	Faktor nach KUZMA-KICHTA ET AL. [34]
n	Koeffizientenanzahl
p	Druck, (MPa)
p_{cr}	kritischer Druck, (MPa)
$\dot{q}$	Wärmestromdichte, (W/cm^2)
$\dot{q}^*_{crF}$	Dimensionslose kritische Wärmestromdichte
$\dot{q}_{cr}$	kritische Wärmestromdichte, (W/cm^2)
$\dot{q}_r$	Wärmestromdichte in r-Richtung, (W/cm^2)
$\dot{q}_u$	homogene Wärmeproduktionsdichte, (W/cm^3)
$\dot{q}_z$	Wärmestromdichte in z-Richtung, (W/cm^2)
$\dot{q}_\zeta$	Wärmestromdichte in ζ-Richtung, (W/cm^2)
R_a	Rohraußenradius, (m)
R_i	Rohrinnenradius, (m)
T_s	absolute Sättigungstemperatur, (K)
T_w	absolute Wandtemperatur, (K)
U	Spannung, (V)

V_{Rohr}	Rohrvolumen, (m^3)
w	Strömungsgeschwindigkeit, (m/s)
x_{cr}	thermodynamischer Strömungsdampfgehalt am Ort der Siedekrise
x_b	Grenzdampfgehalt
z	Laufkonstante, (m)
z_{cr}	Ort der Siedekrise, (m)

Griechische Formelzeichen:

α_{cr}	Dampfvolumenanteil am Ort der Siedekrise
χ	Konstante
δ	Dicke der porösen Beschichtung, (µm)
Δ	Differenz
Δh_{sub}	Unterkühlungsenthalpie, (kJ/kg)
Δh_v	Verdampfungsenthalpie, (kJ/kg)
ΔT_{sub}	Eintrittsunterkühlung, (K)
ΔT_W	Wandüberhitzung, (K)
ε	Porosität der porösen Beschichtung, (%)
ε_g	Volumenanteil der gasförmigen Phase in der porösen Beschichtung
ε_l	Volumenanteil der flüssigen Phase in der porösen Beschichtung

λ	Länge der Helmholtz-Instabilität nach CHANG ET AL. [14], (m)
λ_{CM}	thermische Leitfähigkeit poröser Beschichtung, (W/mK)
λ_{ef}	Faktor nach KUZMA-KICHTA ET AL. [34]
λ_g	thermische Leitfähigkeit der gasförmigen Phase, (W/mK)
$\lambda_{Inconel}$	thermische Leitfähigkeit von Inconel, (W/mK)
λ_l	thermische Leitfähigkeit der flüssigen Phase, (W/mK)
μ	Dynamische Viskosität, (kg/ms)
$\varpi_{Inconel}$	elektrischer Widerstand, ($\Omega mm^2/m$)
Ψ	Faktor nach KUZMA-KICHTA ET AL. [34]
ρ	Dichte, (kg/m^3)
ρ_g	Dichte der gasförmigen Phase, (kg/m^3)
ρ_l	Dichte der flüssigen Phase, (kg/m^3)
σ	Oberflächenspannung, (N/m)
τ	Zeitkonstante
ν_l	Kinematische Visosität der flüssigen Phase, (m^2/s)

Indizes:

b	boundary; Grenzdampfgehalt
c_0	krit. Wärmestromdichte bei gesättigtem Zustand nach KATTO ET AL. [26]
$c_{01, 02, 03}$	wie c_0 bei L-, H-, N-Regime nach KATTO ET AL. [26]
CM	coating material; Material der porösen Beschichtung
cr	critial; Siedekrise, kritische Wärmestromdichte
e	exit; Austritt Testsektion
ef	effective
i	inlet; Eintritt Testsektion
pc	porous coating; Porös beschichtet
s	Sättigungszustand
sub	subcooling; Eintrittsunterkühlung
w	Wand (Heizfläche)

Sonstige Abkürzungen:

CHF	Critical Heat Flux; Kritische Wärmestromdichte
DNB	Departure from Nucleate Boiling; Verlassen des Blasensiedens
ONB	Onset of Nucleate Boiling; Beginn des Blasensiedens
P1	poröse Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 1
P2	poröse Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 2

1 EINLEITUNG

1.1 Problemstellung

In den meisten technischen Apparaten mit hoher Heizflächenbelastung wie z.B. in Verdampfern, in kältetechnischen Anlagen oder bei der Kühlung von elektronischen Bauteilen wird siedendes Wasser zur gesicherten Wärmeabfuhr eingesetzt. Häufig steht hier die Übertragung eines möglichst hohen Wärmestroms über eine möglichst kleine Wärmeübertragungsfläche im Vordergrund (Wirtschaftlichkeit). Primär wird dabei das Blasensieden oder die konvektive Verdampfung genutzt. Die auf diese Weise maximal übertragbaren Wärmestromdichten sind jedoch durch die sogenannte **Siedekrise** begrenzt. Die Wärmestromdichte, bei der die Siedekrise auftritt, wird **kritische Wärmestromdichte** oder auch **Critical Heat Flux (CHF)** genannt. Sie ist die Grenze zwischen dem Bereich der effizienten Wärmeübertragung im Blasensieden und dem Bereich der weniger effizienten Wärmeübertragung im Übergangssieden. Erfolgt die Wärmezufuhr mittels elektrischer oder nuklearer Beheizung oder auch durch Strahlung, so steigt bei Überschreitung der kritischen Wärmestromdichte die Heizflächentemperatur nahezu sprunghaft an. Dieser Temperaturanstieg kann so hoch sein, daß eine thermische Zerstörung der Heizfläche die Folge ist. Die Kenntnis und zuverlässige Berechnung der kritischen Wärmestromdichte sind daher von großer Relevanz für die sichere Betriebsführung - um ausreichende Sicherheitsabstände zur Heizflächenzerstörung einzuhalten - und Konstruktion wärmetechnischer Komponenten.

Die Wirtschaftlichkeit und die immer höher werdenden Ansprüche an Kühlsysteme, z.B. der Trend zur Anordnung von mikroelektronischen Komponenten und deren Kühlung auf engstem Raum, haben das Interesse zur Verbesserung der kritischen Wärmestromdichte in den letzten Jahren erheblich gesteigert. Verschiedene Möglichkeiten zur Verbesserung der kritischen Wärmestromdichte sind z.B. die Verwendung von Rohren mit aufgerauten oder strukturierten Oberflächen, Rohren mit Rippen oder Rohren mit **aufgesinterten porösen Beschichtungen**. Nach den wenigen und fast nur aus Rußland bekanntgewordenen Untersuchungen läßt sich die kritische Wärmestromdichte beim Strömungssieden von Wasser beträchtlich verbessern, wenn man die Heizflächen mit aufgesinterten porösen Schichten versieht. Durch die Verwendung von Rohren mit porös beschichteten Heizflächen in der

Industrie könnten somit optimale Konstruktionen, kleinere Baugrößen und damit gleichzeitig eine Reduktion der Investitionskosten von technischen Apparaten erreicht werden.

Die kritische Wärmestromdichte beim Strömungssieden an porös beschichteten Heizflächen ist bislang unzureichend untersucht worden, so daß zum jetzigen Zeitpunkt eine fundierte Auslegung solcher Systeme der Wärmeübertragung nur bedingt möglich ist.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird daher erstmalig der Einfluß von gesinterten, porösen Beschichtungen auf die kritische Wärmestromdichte beim Strömungssieden systematisch untersucht. Zu diesem Zweck werden neben den Beschichtungsparametern der porösen Schicht auch die Strömungszustände sowie die Geometrie der Heizflächen variiert. Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen dazu beitragen, das Phänomen der Siedekrise und der physikalischen Vorgänge beim Sieden an porös beschichteter Heizflächen zu verstehen und mit Hilfe empirischer Korrelationen besser zu beschreiben.

1.2 Sieden, Siedekurve und die kritische Wärmestromdichte

Das **Sieden** im Allgemeinen beschreibt den mit Phasenumwandlung gekoppelten Prozeß der Wärmeübertragung und ist unter Beachtung bestimmter thermohydraulischer Bedingungen einer der effektivsten Mechanismen der Wärmeübertragung. Seine allgemeine Anwendung in vielen technischen Apparaten sowie seine überaus komplizierten Gesetzmäßigkeiten führten in diesem Jahrhundert zu einer Vielzahl von theoretischen und experimentellen Untersuchungen.

Man unterscheidet zwischen dem Behältersieden (Sieden bei freier Konvektion, eine Strömung entsteht hier nur durch den Auftrieb entstehender Dampfblasen bzw. durch Dichteunterschiede in der Flüssigkeit) und dem Strömungssieden (Sieden bei Zwangskonvektion, z.B. durch Pumpenförderung). Bei den meisten technischen Anwendungen erfolgt das Sieden unter Zwangskonvektion.

Ein hilfreiches Mittel bei der Untersuchung von Siedephänomenen ist die **Siedekennlinie**, auch Nukiyama-Kurve genannt. Sie beschreibt den funktionalen Zusammenhang zwischen dem einer Flüssigkeit zugeführten Wärmestrom pro Flächeneinheit (Wärmestromdichte $\dot{q}$)

und der Temperaturdifferenz zwischen einer festen Heizfläche und der Sättigungstemperatur der Flüssigkeit (Wandüberhitzung $\Delta T_W = T_W - T_S$). Der charakteristische Kurvenverlauf, erstmalig beschrieben von NUKIYAMA [51], ist für alle Systeme Heizfläche / Flüssigkeit nahezu identisch. Die Abbildung 1-1 zeigt den prinzipiellen Verlauf der Siedekurve bei Zwangskonvektion an einem Ort im Strömungskanal.

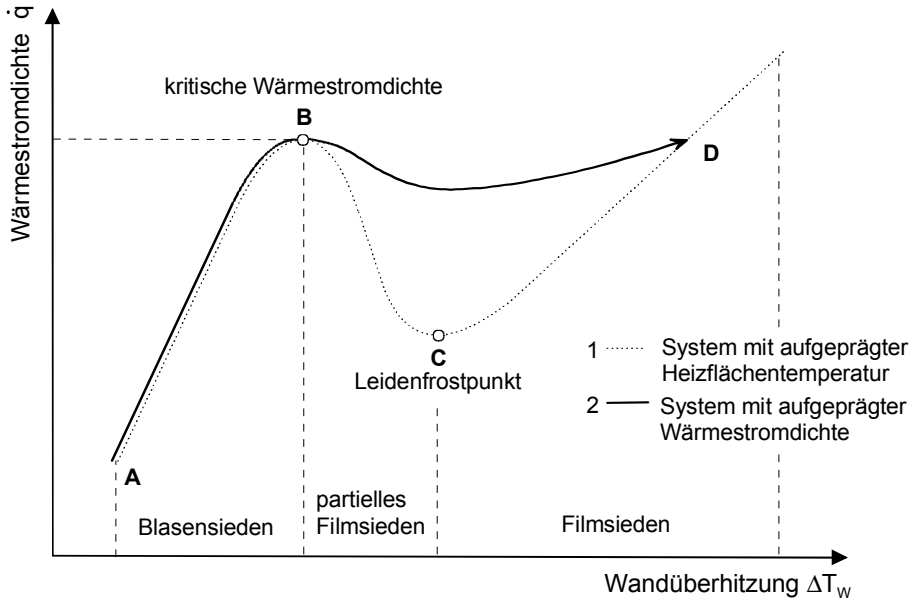


Abbildung 1-1: Schematische Darstellung der Siedekurve

Im Bereich des Blasensiedens (Nucleate Boiling) zeigt sich ein steiler Anstieg der Wärmestromdichte bei kleinem Anstieg der Wandüberhitzung (Verlauf A-B). Mit zunehmender Wandüberhitzung steigt auch die Anzahl sich ablösender Blasen. Sie fördern den Transport heißer Flüssigkeit von der Heizfläche weg und begünstigen das Nachströmen kalter Flüssigkeit im Sog der abströmenden Basen. Zusätzlich erfolgt die Abführung der Verdampfungsenthalpie durch die Verdampfung am Fuß einer wachsenden Dampfblase. Bei weiterer Zunahme der Heizflächentemperatur behindern die immer zahlreicher produzierten Blasen und ihr Zusammenwachsen den effektiven Kontakt zwischen Flüssigkeit und Heizfläche. Der Verlauf der Siedekurve flacht leicht ab.

Bei Punkt B erreicht die Wärmestromdichte ihren maximalen Wert, der im allgemeinen als **kritische Wärmestromdichte** (**Critical Heat Flux = CHF**) oder als **Siedekrise** bezeichnet wird.

Bei **Systemen mit aufgeprägter Heizflächentemperatur** (System 1 in Abbildung 1-1) folgt mit einer geringen Erhöhung der Heizflächentemperatur ein starker Rückgang der Wärmestromdichte (Verlauf B-C). Dieser Bereich der Siedekurve wird **partielles Filmsieden** oder **Übergangssieden** (**Transition Boiling**) genannt. Mit zunehmender Heizflächentemperatur steigt der Anteil der mit Dampf bedeckten Heizfläche an, und die isolierende Wirkung des Dampfes nimmt zu. Am Punkt C ist die Heizfläche vollständig mit Dampf bedeckt, dieser Punkt wird **Leidenfrostpunkt** genannt. Ab hier tritt Filmsieden ein, d.h. die Blasenentstehung erfolgt an der Phasengrenze von Dampffilm und Flüssigkeit. Durch Dampfkonvektion und Strahlung wird der Wärmeübergang verbessert, und die Wärmestromdichte steigt mit zunehmender Wandtemperatur wieder an (Verlauf C-D).

Bei **Systemen mit aufgeprägter Wärmestromdichte** wie in dieser Arbeit (System 2 Abbildung 1-1), kann die Siedekurve stationär nur bis zum Erreichen der Siedekrise gemessen werden. Bei Erreichen oder Überschreiten der kritischen Wärmestromdichte (Punkt B) kommt es zu einem mehr oder minder starken Anstieg der Heizflächentemperatur (Verlauf B-D). In den meisten Fällen liegt die erreichte Temperatur höher als die Schmelztemperatur des Heizflächenmediums und es erfolgt die **thermische Zerstörung der Heizfläche** (**Burnout**). Burnout oder auch **Heizflächenversagen** ist bei technischen Systemen der Wärmeübertragung zu vermeiden.

Eine detailliertere Beschreibung der Siedephänomene bieten z.B. COLLIER [16] und CAREY [13] an.

Weitere in der Literatur vorkommende Begriffe für die Siedekrise sind z.B. **DNB** (**Departure of Nucleate Boiling**), **Dryout** oder **Microfilm-Dryout** (auch **Deposition Controlled Burnout**). Dies sind Bezeichnungen, die neben dem Auftreten der Siedekrise auch gleichzeitig den dabei auftretenden Strömungszustand beschreiben. Sie werden im folgenden Kapitel erläutert.

1.3 Charakteristische Strömungsformen

Die für diese Arbeit interessanten und charakteristischen Strömungsformen kurz vor dem Auftreten der Siedekrise sind Blasenströmung, Pfropfen- oder Kolbenströmung, Schaumströmung, Strähnen-Ringströmung und Ringströmung. Sie sind in Abbildung 1-2 für senkrechte, aufwärts durchströmte und unbeheizte Rohre dargestellt. Sie lassen sich nach STEPHAN [7], MAYINGER [46] und HEWITT [23] bei steigendem thermodynamischen Gas- oder Dampfgehalt von (a) bis (e) wie folgt definieren:

(a) **Blasenströmung**; Kleine Gas- oder Dampfblasen sind gleichmäßig in der kontinuierlichen Flüssigkeitsphase verteilt.

(b) **Pfropfen- oder Kolbenströmung**; Mit steigendem Gas- oder Dampfgehalt schließen sich die Blasen zu größeren Blasen zusammen und bilden Pfropfen- oder Kolbenblasen. Sie füllen fast den ganzen Rohrquerschnitt aus und werden nur von einem dünnen Flüssigkeitsfilm von der Rohrwand getrennt. Zwischen den Pfropfen strömt mit kleinen Blasen durchsetzte Flüssigkeit.

(c) **Schaumströmung**; Bei weiter steigendem Gas- oder Dampfgehalt wird die Blasenstruktur stark instabil und löst sich zunehmend auf. Es bleiben mehr oder weniger große Gasfetzen von unregelmäßiger Gestalt übrig.

(d) **Strähnen- Ringströmung**; Sie besteht aus einem sehr dicken Flüssigkeitsfilm an der Wand mit hohem Anteil flüssiger Phase in Form von Strähnen oder großen Tropfen im Gaskern der Strömung. Der Flüssigkeitsfilm ist mit kleinen Blasen durchsetzt.

(e) **Ringströmung**; Bei hohem Gas- oder Dampfgehalt befindet sich ein blasenfreier dünner Flüssigkeitsfilm an der Wand mit der gasförmigen Phase im Strömungskern. In Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsunterschied zwischen dem Gas- bzw. Dampfkern und der flüssigen Phase an der Wand lösen sich Flüssigkeitströpfchen aus dem Flüssigkeitsfilm (**Entrainment**), die sich durch vorhandene Turbulenzen in der Gas- oder Dampfströmung wieder an den Film an der Wand ablagern können (**Deposition** oder **Deentrainment**).

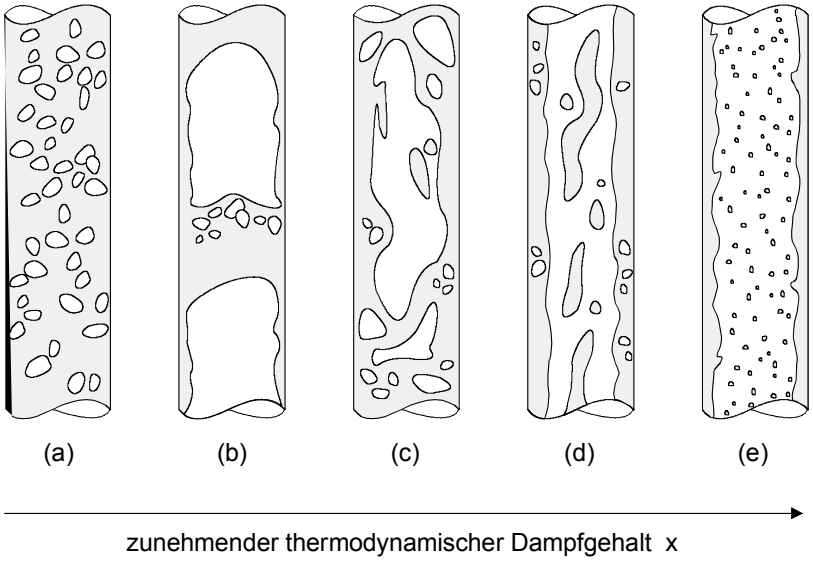


Abbildung 1-2: Strömungsformen in einem adiabaten senkrechten Kreisrohr

Auch während der Verdampfung einer aufwärts strömenden Flüssigkeit in einem homogen beheizten Kreisrohr bis kurz vor der Siedekrise treten die oben genannten Strömungsformen mehr oder minder ausgeprägt aus.

Als Beispiel zeigt die Abbildung 1-3 die Entwicklung der Strömungsformen mit zunehmender Wärmestromdichte bei niedriger Massenstromdichte. Am Eintritt des Rohrkanals ist die Flüssigkeit unterkühlt, und der Dampfgehalt nimmt in Strömungsrichtung bis zur vollständigen Verdampfung mit steigender Wärmestromdichte stetig zu. Mit Ausbildung der Ringströmung sammelt sich die Flüssigkeit zunehmend an der Rohrwand, der Dampf bildet eine kontinuierliche Phase im Strömungskern (Abbildung 1-3 (c)). Durch Entrainment und durch die zunehmende Verdampfung bei steigender Wärmestromdichte wird der Flüssigkeitsfilm an der Wand dünner. Bei weiterer Verdampfung kommt es schließlich am Rohrende zur vollständigen Austrocknung der Heizfläche (Abbildung 1-3 (d)). Je nach Dicke des ausgetrockneten Flüssigkeitsfilms an der Wand wird diese Art der Siedekrise **Dryout** oder bei sehr dünnen Flüssigkeitsfilmen mit Sprühkühlung im Kern **Microfilm-Dryout** bzw. **Deposition Controlled Burnout** genannt. Die Siedekrise tritt zunächst am Rohrende auf und breitet sich bei zunehmender Beheizung in Richtung Rohrmitte aus.

Dryout ist der am häufigsten auftretende CHF-Mechanismus bei niedrigen Massenstromdichten und hohem thermodynamischen Dampfgehalt (Abbildung 1-4 (b)).

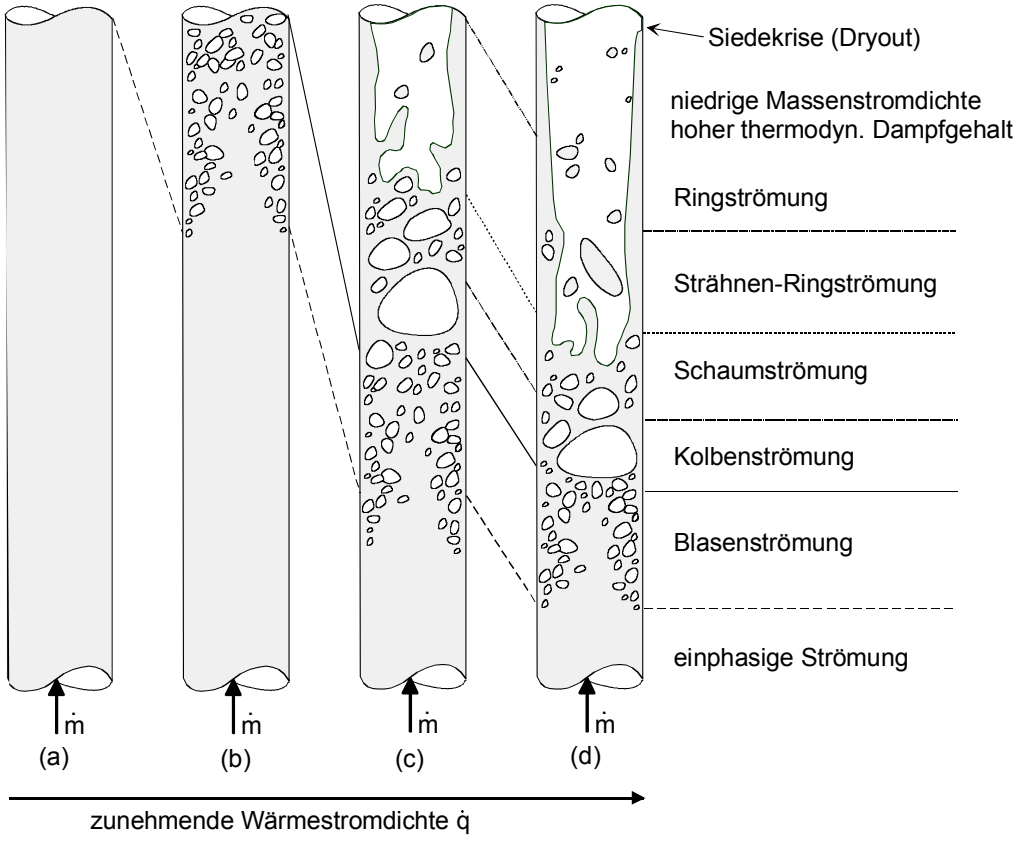


Abbildung 1-3: Strömungsformen beim Sieden im beheizten senkrechten Rohr bei erzwungener Aufwärtsströmung mit kleinen Massenstromdichten

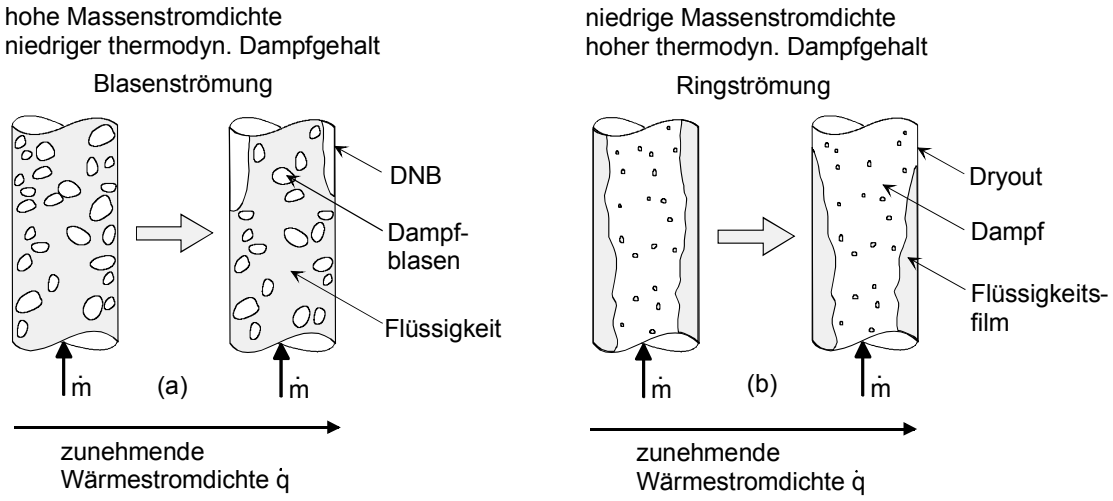


Abbildung 1-4: Vergleich der CHF-Mechanismen DNB und Dryout

Bei hohen Massenstromdichten kommt es zu veränderten Strömungsformen. Die Siedekrise kann bereits bei niedrigen Dampfgehalten einsetzen, obwohl noch Blasensieden oder Pfropfen- bzw. Kolbenströmung vorliegt und genügend Flüssigkeit im Strömungskern existiert. Am Ort der Siedekrise trennt ein Dampffilm die als kontinuierliche Phase im Strömungskern vorliegende Flüssigkeit von der Heizfläche. Dieser Vorgang der Siedekrise wird als **Departure from Nucleate Boiling**, kurz **DNB** bezeichnet (Abbildung 1-4 (a)).

Nach COLLIER [16], KANDLIKAR ET AL. [25] und MAYINGER [46] entsteht diese Art von CHF-Mechanismus z.B. bei der Austrocknung der Heizfläche unter einer wachsenden Dampfblase (Abbildung 1-5 (a)), bei der Austrocknung der dünnen Flüssigkeitsschicht zwischen der Heizfläche und einer Pfropfen- bzw. Kolbenblase (Abbildung 1-5 (b)) oder bei der Behinderung von sich ablösenden Blasen bei zu großer Blasendichte in der Nähe der Heizfläche (Abbildung 1-5 (c)). Der Mechanismus des **DNB** tritt bei hohen Massenstromdichten mit niedrigem thermodynamischen Dampfgehalt auf.

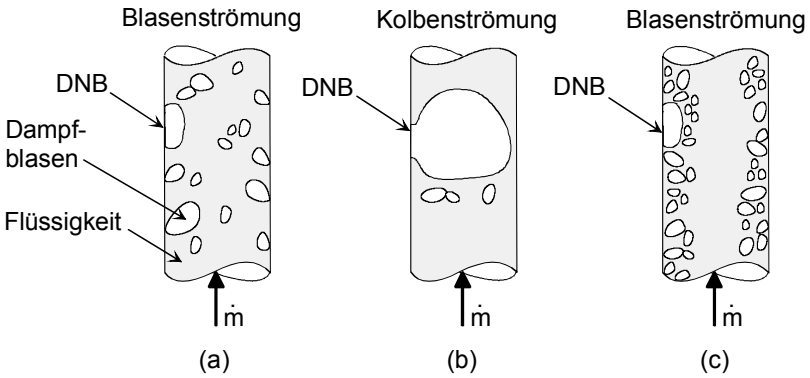


Abbildung 1-5: DNB unter einer wachsenden Dampfblase (a), DNB unter einer Kolbenblase (b) und DNB bei großer Blasendichte (c)

Wie bereits erwähnt, hängt die Art der Siedekrise vom thermodynamischen Dampfgehalt x ab. Die Darstellung $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} (Abbildung 1-6) veranschaulicht den qualitativen Verlauf der kritischen Wärmestromdichte mit der Änderung des Strömungsdampfgehaltes. Die oben beschriebenen Mechanismen der Siedekrise (DNB und Dryout) zeigen sich als charakteristische Kurvenabschnitte. Im Bereich des DNB-Mechanismus nimmt die kritische

Wärmestromdichte annähernd linear mit dem Strömungsdampfgehalt ab, mit dem Wechsel zum Dryout fällt sie stark mit dem Strömungsdampfgehalt ab (in der Literatur als Phänomen des Grenzdampfgehaltes beschrieben, z.B. DOROSCHUK [19], KITTO [28], YILDIZ [68]) und sinkt dann bei großen Strömungsdampfgehalten im Bereich des Microfilm-Dryout (Deposition Controlled Burnout) wieder schwächer mit zunehmenden Strömungsdampfgehalt. YILDIZ [68] trennt in Ihrer Arbeit den Bereich des DNB-Mechanismus in **wahres DNB** für $x_{cr} < 0$ und **scheinbares DNB** für $0 < x_{cr} < x_b$ (Abbildung 1-6).

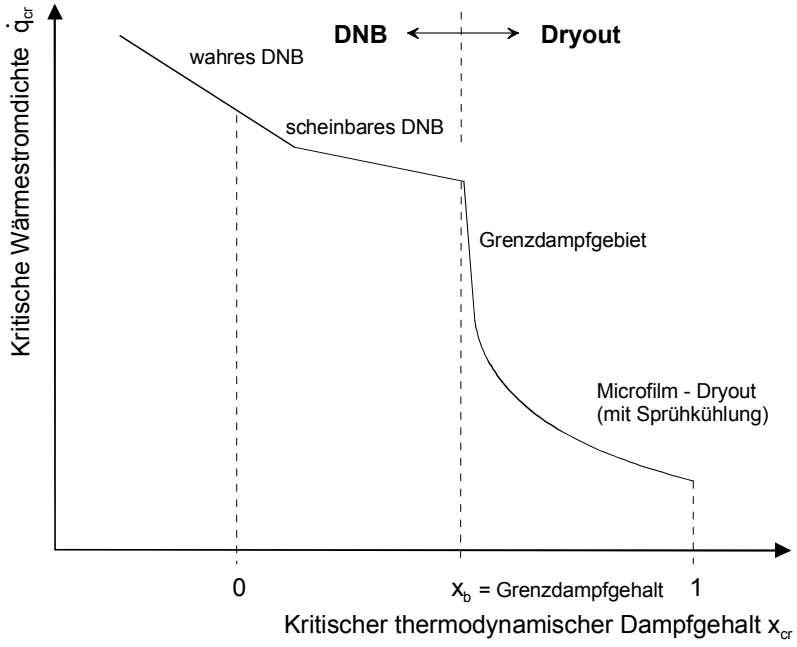


Abbildung 1-6: $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr}-Diagramm mit Zuordnung wahres DNB / scheinbares DNB / Grenzdampfphänomen / Microfilm-Dryout

Die Kenntnis der kritischen Wärmestromdichte ist für die Auslegung und den Betrieb technischer Systeme der Wärmeübertragung von großer Bedeutung. Mit Auftreten der Siedekrise kann Heizflächenversagen auftreten (Abbildung 1-1), dies ist bei technischen Anlagen unerwünscht. Neben den Strömungsparametern und der sich dadurch einstellenden Strömungsform hängt die Siedekrise auch von anderen Faktoren ab. Diese Faktoren sind z.B. die Geometrie des Strömungskanals, Art der Beheizung und die Oberflächeneigenschaften.

1.4 Einflußparameter auf die kritische Wärmestromdichte

Einen Überblick über weitere vorhandene Einflußparameter auf die kritische Wärmestromdichte geben BOYD [11] und BUTTERWORTH ET AL. [12]. Nach BOYD [11] hängt die kritischen Wärmestromdichte von bis zu 20 Einflußparametern ab.

Die Tabelle 1-1 zeigt eine Klassifizierung der Einflußparameter in Gruppen (VDI-WÄRMEATLAS [64]):

Tabelle 1-1: Einflußparameter auf die kritische Wärmestromdichte

Parameter:	Erläuterung:
Art der Flüssigkeit	Stoffwerte, Zusammensetzung
thermodynamischer Zustand der Flüssigkeit	Massenstromdichte, Druck, Unterkühlung, Dampfvolumenanteil
Verteilung der Phasen	Strömungsform
Strömungsart	ruhend oder strömend, aufwärts oder abwärts strömend
Geometrische Anordnung der Heizfläche	Beheizte Länge, Durchmesser, senkrecht, geneigt oder waagerecht
Art der Beheizung	Homogen oder inhomogen, stationär oder transient
Oberflächenbeschaffenheit	Glatt, rauh, strukturiert, Material der Heizfläche
Strömungsinstabilität	Systembedingungen

Die experimentelle Untersuchung der kritischen Wärmestromdichte erfolgt in dieser Arbeit in lotrechten aufwärts durchströmten Rohren bei homogener elektrischer Beheizung in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit (mit und ohne poröser Beschichtung). Als Versuchsmedium wird reines, destilliertes und entgastes Wasser verwendet. Die Experimente finden unter langsam zunehmender Wärmezufuhr bei sonst konstanten System- und Strömungsparametern statt. Die kritische Wärmestromdichte ist erreicht, wenn bei vorgegebenen $\dot{q}$ die Heizflächentemperatur mehr oder minder stark ansteigt. Wie von

LOWDERMILK ET AL. [41] und MISHIMA [50] vorgeschlagen, wird zur Gewährleistung stabiler CHF-Messungen eine Drosselung vor der Teststrecke vorgenommen. Zum Erreichen der unterschiedlichen Entstehungsmechanismen der Siedekrise (scheinbares DNB, Grenzdampfgebiet oder Microfilm-Dryout) werden die Rohrlänge und die Strömungsparameter (Massenstromdichte, Eintrittsdruck und Eintrittsunterkühlung) variiert.

Bei diesen Versuchsbedingungen der CHF-Messungen reduziert sich die Anzahl der genannten Einflußparameter auf die folgenden:

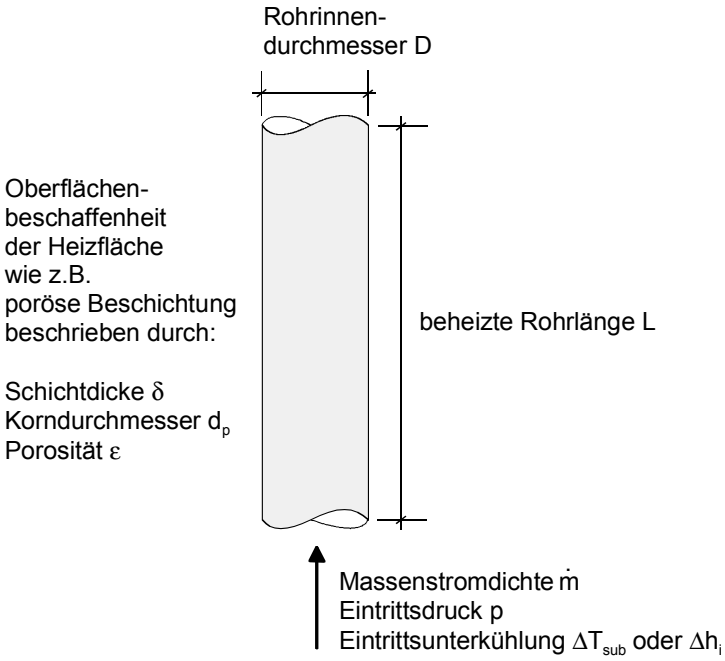


Abbildung 1-7: Einflußparameter auf die kritische Wärmestromdichte für diese Arbeit

1.5 Vorhersage der kritischen Wärmestromdichte

Nach Abschluß der Experimente werden die ermittelten CHF-Daten im untersuchten Parameterbereich korreliert. In der Literatur findet man zwei Korrelationsmöglichkeiten:

- Die **lokale Hypothese**; Es erfolgt eine Korrelation der Daten unter Verwendung des thermodynamischen Dampfgehaltes oder des Dampfvolumenanteils am Ort der Siedekrise (Berücksichtigung der **lokalen Bedingungen**),

  $\dot{q}_{cr} = f\left(\dot{m}, p, x_{cr} \; oder \; \alpha_{cr}, D\right).$

- Die **globale Hypothese**; Hier wird statt dessen mit Hilfe der Eintrittsunterkühlung und der beheizten Länge der Teststrecke korreliert (Verwendung der **Eintrittsbedingungen**),

  $\dot{q}_{cr} = f\left(\dot{m}, p, \Delta h_{sub}, L, D\right).$

Korrelationen unter Annahme der lokalen Hypothese haben den Vorteil, daß sie eine Information über den Ort der Siedekrise beinhalten. Gleichzeitig aber haben sie den Nachteil, daß x_{cr} sowie α_{cr} nicht direkt meßbar sind und zu deren Bestimmung die Eintrittsunterkühlung und die kritische Wärmestromdichte selbst benötigt werden.

Zur Korrelation der kritische Wärmestromdichte nach der globalen Hypothese werden häufig dimensionslose Kennzahlen verwendet. KATTO [27] schlägt folgende dimensionslose Kennzahlen zur Verwendung vor:

$$\frac{\dot{q}_{cr}}{\dot{m}\Delta h_v}, \frac{L}{D}, \frac{\Delta h_{sub}}{\Delta h_v}, \frac{\rho_g}{\rho_l}, \frac{\sigma\rho_l}{\dot{m}^2 L}.$$

Außer der Methode der Korrelation gibt es noch die sogenannten **Look-up Tabellen**. Ein Beispiel dafür ist die CHF-Datentabelle von GROENEVELD ET AL. [20], [21]. Die Tabelle gilt für ein senkrechtes Rohr mit 8 mm Innendurchmesser mit aufwärts innen strömendem Wasser unter gleichmäßiger Beheizung für $L/D > 100$. Rohre mit anderen Durchmessern können über die Beziehung $CHF_D / CHF_{D=8mm} = (D/8)^n$ auf einen Innendurchmesser von 8 mm nomiert werden. Für einen Rohrdurchmesser von 7 mm bis 9 mm wird ein Exponent von $n = -1/3$ vorgeschlagen (GROENEVELD ET AL. [20], [21]).

Die Vorteile einer solchen Tabelle sind:

- Die hohe Zuverlässigkeit,
- das Vorhandensein einer großen Datenbasis,
- eine einfache Anwendung und
- die Möglichkeit einer einfachen Aktualisierung.

Nachteil: Der Erfolg dieser Methode hängt von dem Vorhandensein ausreichend genauer Meßdaten aus umfassenden Parameterbereichen ab.

2 STAND DER FORSCHUNG

Für eine wirtschaftliche Betriebsweise werden technische Apparate der Wärmeübertragung so ausgelegt, daß sie im Blasensieden nahe der kritischen Wärmestromdichte arbeiten, ohne sie dabei zu überschreiten. Daher besteht ein großes Interesse daran, das Auftreten der kritischen Wärmestromdichte zuverlässig vorauszusagen und Wege zu finden, die ein Verschieben der kritischen Wärmestromdichte zu höheren Werten bei sonst gleichen Betriebsbedingungen ermöglichen.

Einen umfassenden Überblick über den aktuellen Stand der Literatur zur kritischen Wärmestromdichte beim glatten Rohr weltweit geben z.B. BOYD [11], GROENEVELD ET AL. [20] und [21], VDI-WÄRMEATLAS [64] und HALL ET AL. [22]. Doch trotz zahlreicher theoretischer und experimenteller Untersuchungen auf diesem Gebiet sind die physikalischen Phänomene und Gesetzmäßigkeiten beim Strömungssieden aufgrund der Vielfalt von Einflußparametern keinesfalls ausreichend erforscht (BEHR ET AL. [6]). GROENEVELD ET AL. [21] bemerken dazu: „In flow boiling, the phenomenon most frequently studied and least understood is the critical heat flux (CHF).“

Über die allgemeinen Möglichkeiten zur Verbesserung des Wärmeübergangs beim Sieden geben die Autoren BOYD [11], BERGLES [9], [8] und THOME [61] einen Überblick. Die Möglichkeiten zur Verbesserung der kritischen Wärmestromdichte wurden von YILDIZ [68] zusammengefaßt. Untersuchungen, die sich direkt mit dem Einfluß poröser Beschichtungen zur Verbesserung der kritischen Wärmestromdichte beim Strömungssieden befassen, gibt es nur wenige (KOTOV [30], KOVALEV [31], [32], KUZMA-KICHTA [33], [34], [35], [36], MALYSHENKO [43], [44], SUGIYAMA [59] und YILMAZ [69]).

Im Folgenden werden die Verbesserungsmöglichkeiten des Wärmeübergangs beim Sieden kurz dargestellt, die Vorstellungen zum Sieden an porös beschichteten Heizflächen diskutiert und die verfügbaren Daten und Korrelationen für die kritische Wärmestromdichte bei niedrigen Massenstromdichten und mäßig hohen Drücken für das glatte und porös beschichtete Kreisrohr zusammengefaßt und verglichen.

2.1 Verbesserung des Wärmeübergangs beim Sieden

Zur Verbesserung des Wärmeübergangs beim Sieden gibt es nach BERGLES [8] und THOME [61] die sogenannten **passiven und aktiven Verfahren**.

Zu den **passiven Verfahren** zur Steigerung des Wärmeübergangs zählen:

- Mit Drahtnetzen oder porösen Beschichtungen überzogene Heizflächen,
- durch z.B. Sandstrahlen oder Schleifen aufgeraute Heizflächen,
- profilierte Heizfläche mit z.B. Rippen verschiedener Geometrien versehen,
- Heizflächen die mit z.B. Kanälen oder Schlitzen ausgestattet wurden oder
- dem Kühlmedium beigemischte feste oder flüssige Zusätze.

Die **aktiven Verfahren** zur Verbesserung des Wärmeübergangs sind:

- Mechanische Hilfen wie z.B. das Wischen der Heizfläche,
- vibrierende Heizoberflächen oder
- vibrierende Flüssigkeiten,
- auf die siedende Flüssigkeit aufprägte elektrostatische Felder und
- zusätzliches Einblasen von Gas in die siedende Flüssigkeit durch eine poröse Wand.

Im Gegensatz zu den passiven Verfahren wird bei den aktiven Techniken zur Erhöhung des Wärmeübergangs eine externe Aktivierungs- oder Versorgungsenergie benötigt. Auch Kombinationen von passiven und aktiven Verfahren zur Verbesserung des Wärmeübergangs kommen zur Anwendung.

In der Praxis werden hauptsächlich die passiven Verfahren zur Verbesserung des Wärmeübergangs angewendet. Ziel all dieser Verfahren ist die Erhöhung der aktiven Blasenkeimstellen durch die Beeinflussung der Oberflächeneigenschaften der Heizfläche oder durch die Verringerung der Oberflächenspannung der Flüssigkeit.

Unter den bekannten Oberflächenstrukturen zur Verbesserung des Wärmeübergangs scheinen poröse Beschichtungen die günstigsten zu sein. Sie scheinen mehr als andere Oberflächenstrukturen den Wärmeübergang beim Blasensieden zu erhöhen (YILMAZ [69], SUGIYAMA ET AL. [59], [60]) und können beim Strömungssieden unter Umständen zu einer erheblichen Erhöhung der kritischen Wärmestromdichte führen (KOMENDANTOV [29], KUZMA-KICHTA ET AL. [34]).

2.2 Sieden an poröser Beschichtung (Behältersieden)

Obwohl für technische Anwendungen hauptsächlich das Strömungssieden von Interesse ist, erfolgten die meisten Untersuchungen zum Sieden an poröser Beschichtung beim Behältersieden (Pool Boiling). Betrachtet man die Vorgänge der Wärmeübertragung in der wandnahen Flüssigkeitsschicht oder in der porösen Schicht selbst, so können die beim Pool Boiling gewonnenen Erkenntnisse teilweise auch auf die Vorgänge beim Strömungssieden übertragen werden.

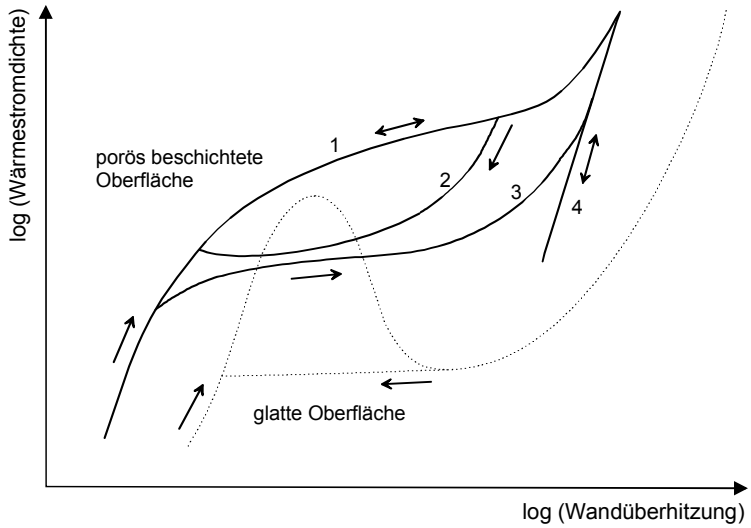


Abbildung 2-1: Qualitative Verläufe von Siedekennlinien bei glatten und porös beschichteten Heizflächen aus KOVALEV ET AL. [32] (Pool-Boiling)

Nach KOVALEV ET AL. [32] hängt der Verlauf der Siedekurve an einer beschichteten Heizfläche von der Schichtdicke, der Porosität und der thermischen Leitfähigkeit des Materials der porösen Schicht ab. In Abbildung 2-1 ist der Verlauf der Siedekurve für glatt und unterschiedliche poröse Beschichtungen dargestellt. Poröse Schichten mit einer hohen Durchlässigkeit und einer hohen thermischen Leitfähigkeit verbessern besonders im Bereich kleiner Wärmestromdichten den Wärmeübergang beim Sieden gegenüber glatten Heizflächen (Abbildung 2-1 Kurve 1). Beim Rücklauf kann die Kurve den Verlauf 1 oder 2 annehmen (Abbildung 2-1 Kurve 1, 2). Auch die kritische Wärmestromdichte kann sich erhöhen. Kurve 3 zeigt den Verlauf der Siedekurve für eine andere poröse Schicht. Die zwar im Bereich kleiner Wärmeströme eine Verbesserung bewirkt, sich dann aber stark abflacht und die kritische Wärmestromdichte, im Gegensatz zur glatten Heizfläche, nicht eindeutig als Maximum zu erkennen ist (Abbildung 2-1 Kurve 3). Die Kurve 4 zeigt den Bereich des Filmsiedens, der im Falle dicker Beschichtungen in den Bereich kleiner Wandüberhitzungen verschoben wird. KOVALEV ET AL. [32] begründen dies mit dem Temperaturgradienten in der dicken Schicht, der das Blasensieden am Außenrand der Beschichtung aufrecht erhält (Abbildung 2-1 Kurve 4).

Auch AFGAN ET AL. [1] untersuchten die Mechanismen der Blasenentstehung an glatten und porös beschichteten Heizflächen. An glatten Heizflächen entstehen Dampfblasen äußerlich an kleinen Vertiefungen (Keimstellen) der Heizfläche (Abbildung 2-2 (a)), während bei porösen Beschichtungen der Dampf im Innern der Schicht erzeugt wird. Bei kleinen Wärmestromdichten (Abbildung 2-2 (b)) ist die eigentliche Heizfläche am Fuße der porösen Schicht noch mit Flüssigkeit benetzt. Die Flüssigkeit dringt in die Beschichtung durch die kleinen Poren ein und verdampft an der Heizfläche und am porösen Körpergerüst, welches bei Kontakt der Partikel ebenfalls überhitzt wird. Mit zunehmender Wärmestromdichte bildet sich am Fuße der porösen Schicht ein kontinuierlicher Dampffilm aus (Abbildung 2-2 (c)), die Heizfläche ist nicht mehr mit Flüssigkeit benetzt. AFGAN ET AL. [1] nehmen an, daß diese Zustände auch beim unterkühlten Strömungssieden in einem beschichteten Verdampferrohr anzutreffen sind, wo die Verdampfung in einer porösen Matrix erfolgt, und der Dampf oberhalb der Blasenentstehung wieder in der kühleren Kernflüssigkeit kondensiert. Das Blasensieden wird quasi durch die Beschichtung stabilisiert und somit länger aufrechterhalten.

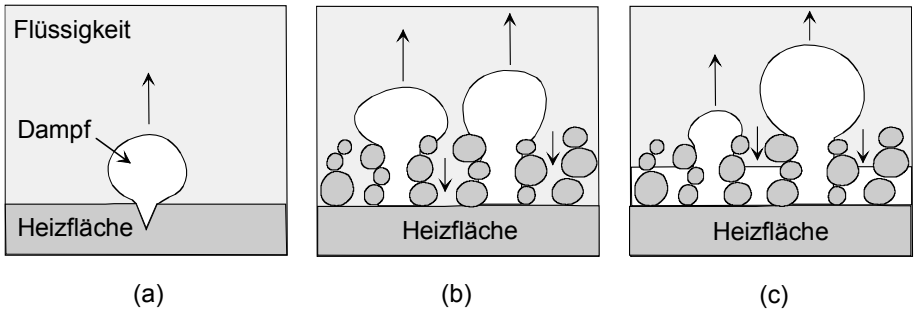


Abbildung 2-2: Dampfentstehungsprozeß nach AFGAN ET AL. [32] mit (a) Wachstum von Dampfblasen an Siedekeimen bei glatter Heizfläche; (b) Blasenwachstum durch Kanäle der porösen Beschichtung und (c) Sieden an einem Dampffilm in der porösen Beschichtung

Mit den Annahmen von AFGAN ET AL. [1] lassen sich die Verläufe der Siedekurven für poröse Beschichtungen von KOVALEV ET AL. [32] besser erläutern. Die in Abbildung 2-1 bei Kurve 1 ersichtliche Verschlechterung des Wärmeübergangs mit steigender Wärmestromdichte läßt sich mit einem Wechsel von Zustand (b) nach (c) in Abbildung 2-2 erklären. Die mit der Kurve 2 dargestellte Hysterese kann mit einem Bestehenbleiben des Dampffilms in der Beschichtung gemäß Zustand (c) in Abbildung 2-2 beim Rücklauf der Siedekennlinie begründet werden. Durch eine dicke Beschichtung Kurve 3 in Abbildung 2-1 kann sich der Zustand (c) in Abbildung 2-2 schon bei kleinen Wärmestromdichten einstellen, hier tritt eine Verschlechterung des Wärmeübergangs gegenüber der glatten Heizfläche ein.

MALYSHENKO [43], [44] und ANDRIANOV ET AL. [3] gehen ebenfalls von verschiedenen Mechanismen der Dampfentstehung in porösen Beschichtungen aus (Abbildung 2-3).

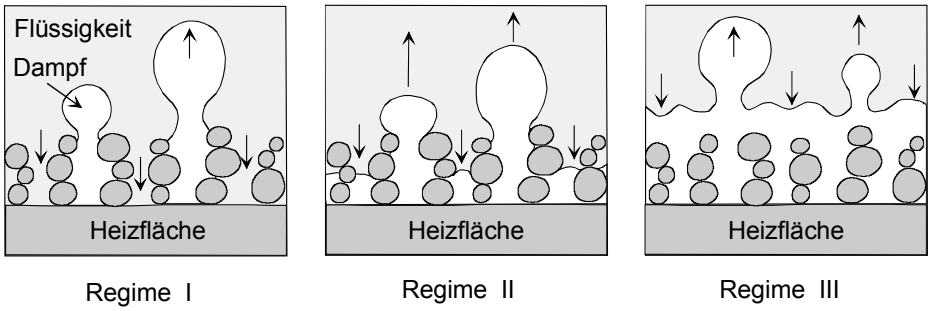


Abbildung 2-3: Siedezustände nach MALYSHENKO [43]

- Regime I; Im Bereich kleiner Wärmestromdichten sind die dampferzeugenden Zonen in der porösen Schicht nicht über dampfgefüllte Hohlräume miteinander verbunden (Blasensieden).
- Regime II; Mit steigender Wärmestromdichte verbinden sich die dampfgefüllten Poren über das gesamte System und es bildet sich ein dünner Dampffilm aus, der sich im Körper der Beschichtung stabilisiert. Durch die Isolierwirkung des Dampfes flacht sich die Siedekennlinie im Bereich des Blasensiedens ab (Blasensieden).
- Regime III; Nach einer weiteren Erhöhung der Wärmestromdichte bildet sich über der gesamten Beschichtung ein Dampffilm aus, dessen Dicke die der Beschichtung überschreitet. Angaben zum instabilen Bereich des Übergangssiedens werden nicht gemacht.

Neben der Schichtdicke, der Durchlässigkeit und der thermischen Leitfähigkeit des Materials der porösen Schicht hängt nach MALYSHENKO [43] der Verlauf der Siedekurve bei porösen Beschichtungen zusätzlich von der Porosität, der Verteilung der Porengröße, dem Durchmesser der Partikel sowie der Form der Beschichtung und dem Typ des Porengitters ab. Diese Beschichtungsparameter beeinflussen sich untereinander und sind stark vom verwendeten Beschichtungsverfahren abhängig. Quantitative Aussagen bezüglich der Abhängigkeiten werden jedoch nicht gemacht.

2.3 Datenlage zur CHF beim glatten Kreisrohr

GROENEVELD ET AL. [20] erkannten 1986 in ihrer Look-up Tabelle einen Mangel an CHF-Messungen für den Bereich niedriger Drücke und Massenstromdichten und schlugen vor, diesen Bereich genauer zu untersuchen. Diese Aussage ergibt sich auch aus der neuen Look-up Tabelle von 1996 mit 22964 CHF-Messungen (GROENEVELD ET AL. [21]). Hier befinden sich immer noch wenige Daten für Messungen der kritischen Wärmestromdichte für den Bereich niedriger Drücke und Massenstromdichten. Auch die neueste und umfangreichste Übersicht über die weltweite Datenlage der CHF-Messungen von HALL ET AL. [22] mit 29.560 CHF-Daten für senkrechte und aufwärts durchströmte glatte Rohre zeigt den gleichen Sachverhalt.

Die Tabelle 2-1 zeigt eine Zusammenstellung der verfügbaren CHF-Daten für niedrige Drücke und niedrige Massenstromdichten ($p < 1$ MPa, $\dot{m} < 400$ kg/m^{2}s).

Tabelle 2-1: CHF-Daten für senkrechte glatte Kreisrohre verschiedener Autoren

Datenquelle	Datenmenge	p, MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{sub}, K	L/D
CLARK ET AL. [15]	42	0,7-13,8	10-100	21-158	52
LOWDERMILK ET AL. [41]	74	0,1	27-420	75-78	25-100
BECKER ET AL. [7]	93	0,22-1,19	102-406	42-157	46-105
HEWITT ET AL. [24]	423	0,1-0,2	90-300	0-91	25-328
BABARIN ET AL. [5]	64	2,94	50-400	8-112	80-150
ALAD`YEV ET AL. [2]	260	0,15-0,41	22-334	$x_i = (-0,2) - 0$	30-100
MISHIMA [49]	79	0,1	10-1.800	2-5	57
WEBER [65]	55	0,1-1,2	11-301	3-100	4,47
RUAN [52]	162	0,1-1,0	12-208	3,5-65,8	44,3
YILDIZ [68]	385	0,1-0,7	50-400	1-72,3	28,33; 38,75

Für die Vorausberechnung der kritischen Wärmestromdichte beim glatten Rohr existieren viele Korrelationen. WEBER [65] identifizierte in seiner Arbeit die folgenden Korrelationen für Aufwärtsströmung bei niedrigen Drücken und niedrigen Massenstromdichten in einem senkrechten Rohr als die am geeignetsten:

- LOWDERMILK ET Al. [41]
- MACBETH [42]
- KATTO ET AL. [26]

In der Tabelle 2-2 wurden diese mit den in der letzten Zeit neu entwickelten Korrelationen von WEBER [65], CHANG ET AL. [14], RUAN [52], SCHROEDER-RICHTER ET AL. [56], VDI-Wärmeatlas [64], YILDIZ [68] und KUZMA-KICHTA ET AL. [37] ergänzt. Zusätzlich werden in der Tabelle 2-2 die vorhandenen Korrelationen für den Grenzdampfgehalt aufgeführt. Alle dargestellten Korrelationen sind empirische Korrelationen. Ihre Anwendung ist stark auf den jeweiligen Gültigkeitsbereich beschränkt. Extrapolationen über die Parametergrenzen hinaus führen meist zu unzuverlässigen Ergebnissen. Ein Vergleich der CHF-Korrelationen mit den eigenen Meßdaten wird in Kapitel 4 und 6 durchgeführt.

LOWDERMILK ET AL. [41] bieten zur Berechnung der kritischen Wärmestromdichte zwei Gleichungen an. Die Autoren geben die kritische Wärmestromdichte als Funktion von der Massenstromdichte $\dot{m}$, dem Verhältnis L/D und des inneren Rohrdurchmessers D an.

MACBETH [42] entwickelte ebenfalls zwei Korrelationen, jedoch gelten diese für unterschiedliche Bereiche von Massenstromdichten. In Tabelle 2-2 wird nur die für den Bereich kleiner Massenstromdichten gültige Korrelation dargestellt.

DOROSCHUK ET AL. [18] korrelieren nur den lokalen thermodynamischen Dampfgehalt beim Auftreten der Siedekrise für den Bereich des Grenzdampfgehaltes. Die Autoren berichten von einer Abhängigkeit des Grenzdampfgehaltes von Druck, Massenstromdichte und Rohrinnendurchmesser.

LEVITAN ET AL. [40] passen die Korrelation für den Grenzdampfgehalt von DOROSCHUK ET AL. [18] weiter an. Die Korrelation von LEVITAN ET AL. [40] gilt nur für Kreisrohre mit $D = 8$ mm Innendurchmesser.

KATTO ET AL. [26] berücksichtigen als Erste in ihrer Berechnungsgleichung den Einfluß aller Strömungsmechanismen beim Auftreten der Siedekrise. Die Autoren teilen ihre Korrelation in 4 Regime ein (N-, H-, L- und HP-Regime). Das N-Regime gilt für DNB (Blasenströmung bis Schaumströmung, Abbildung 1-2 (a) bis (c)), das H-Regime bildet den Übergangsbereich vom N-Regime zum L-Regime (Strähnen-Ringströmung, Abbildung 1-2 (d)) und das L-Regime gilt für Dryout (Ringströmung mit und ohne Entrainment, Abbildung 1-2 (e)). Bei sehr hohem Druck wird das N-Regime durch das HP-Regime ersetzt. Es wird hier demzufolge nicht berücksichtigt.

WEBER [65] verwendete für seine Korrelation nahezu die gleichen dimensionslosen Kennzahlen wie KATTO ET AL. [26]. Er entwickelte eine Korrelation unter Verwendung seiner eigenen CHF-Daten ($L/D = 4{,}47$) und erweiterte den Anwendungsbereich mit Hilfe der von ihm erstellten CHF-Datenbank.

CHANG ET AL. [14] bieten eine CHF-Korrelation für aufwärts und abwärts durchströmte senkrechte Kreisrohre speziell für den Fall mäßig hoher Drücke und niedriger Massenstromdichten an.

RUAN [52] erstellt eine Korrelation unter Verwendung seiner eigenen CHF-Daten. In der Korrelation wird der Einfluß von L/D und der Eintrittsunterkühlung ΔT_{sub} nicht berücksichtigt.

Die Autoren SCHROEDER-RICHTER ET AL. [56], [55] entwickelten speziell eine Korrelation zur Berechnung der kritischen Wärmestromdichte beim unterkühlten Blasensieden (DNB). Für Dryout hat diese Korrelation keine Gültigkeit.

Der VDI-Wärmeatlas [64] bietet im Abschnitt Hbc unterschiedliche Gleichungen zur Berechnung der kritischen Wärmestromdichte je nach Art der Entstehungsmechanismen der Siedekrise (DNB oder Dryout) an. Auch zur Bestimmung des lokalen kritischen Dampfgehalts werden je nach Strömungszustand verschiedene Korrelationen vorgestellt.

Allerdings gilt die Korrelation für DNB nicht für den Bereich mäßig hoher Drücke, so daß hier nur die CHF-Korrelation für Dryout betrachtet wird.

YILDIZ [68] berücksichtigt bei der Entwicklung einer Korrelation die verschiedenen Entstehungsmechanismen der Siedekrise. Für den Bereich des DNB entwickelte YILDIZ [68] eine neue Korrelation unter Verwendung des Korrelationansatzes von SCHROEDER-RICHTER ET AL. [56], [55]. Im Bereich des Grenzdampfgebietes (Dryout) wird der lokale thermodynamische Dampfgehalt und die kritische Wärmestromdichte korreliert. Der Gültigkeitsbereich der Grenzdampfkorrelation wurde mit Hilfe von Daten und Korrelationen anderer Autoren erweitert. Für den Bereich des Microfilm-Dryout empfiehlt YILDIZ [68] die Verwendung der Korrelationen von WEBER [65] oder CHANG ET AL. [14].

Auch KUZMA-KICHTA ET AL. [37], [36] geben für die drei Entstehungsmechanismen der Siedekrise unterschiedliche Korrelationen an. Für DNB korrelieren KUZMA-KICHTA ET AL. [36] nur die kritische Wärmestromdichte, dabei berücksichtigen sie die Strömungsparameter und den Rohrinnendurchmesser. Für den Bereich des Dryout entwickelten KUZMA-KICHTA ET AL. [37] eine Korrelation für den Grenzdampfgehalt. Im Microfilm-Dryout werden die kritische Wärmestromdichte und der lokale thermodynamische Dampfgehalt korreliert. Für die Korrelation der kritischen Wärmestromdichte erfolgt hier nur die Verwendung der Massenstromdichte, andere Abhängigkeiten werden nicht berücksichtigt.

Tabelle 2-2: CHF-Korrelationen verschiedener Autoren für glatte Kreisrohre

Autor:	Korrelation für niedrige Drücke und niedrige Massenstromdichten:
LOWDERMILK ET AL. [41] Gültigkeitsbereich: p = 0,1–0,738 MPa ΔT_{sub} = 0–78 K w = 0,03–29,8 m/s L/D = 25–250	$\dot{q}_{cr} D^{0,2} (L/D)^{0,85} = 270 \cdot \dot{m}^{0,85}$, wenn $\dot{m}(L/D)^{-2} < 150$ (2-1) $\dot{q}_{cr} D^{0,2} (L/D)^{0,15} = 1400 \cdot \dot{m}^{0,5}$, wenn $\dot{m}(L/D)^{-2} > 150$ (2-2)
MACBETH [42] Gültigkeitsbereich: p = 0,1–13,8 MPa ΔT_{sub} = 1–137 K $\dot{m}$ = 14–841 kg/m²s D = 0,003–0,01 m L = 0,15–3 m	$\dot{q}_{cr} \times 10^{-6} = \frac{(\dot{m} \times 10^{-6}) \cdot (\Delta h_v + \Delta h_i)}{158 D^{0,1} (\dot{m} \times 10^{-6})^{0,49} + 4(L/D)}$ (2-3)
DOROSCHUK ET AL. [26] Gültigkeitsbereich: p = 1–16,7 MPa $\dot{m}$ = 750–3.000 kg/m²s D = 8 mm	Für Grenzdampfgehalt gilt: $x_b = \left[0,39 + 3,53\left(\frac{p}{p_{cr}}\right) - 10,3\left(\frac{p}{p_{cr}}\right)^2 + 7,62\left(\frac{p}{p_{cr}}\right)^3 \right] \left(\frac{\dot{m}}{1000}\right)^{-0,5} \left(\frac{8}{D}\right)^{0,15}$ (2-4) mit $\frac{p}{p_{cr}}$: Reduzierter Druck
LEVITAN ET AL. [26] Gültigkeitsbereich: p = 1–16,7 MPa $\dot{m}$ = 750–3000 kg/m²s D = 8 mm	Für Grenzdampfgehalt gilt: $x_b = \left[0,39 + 1,57\left(\frac{p}{98}\right) - 2,04\left(\frac{p}{98}\right)^2 + 0,68\left(\frac{p}{98}\right)^3 \right] \left(\frac{\dot{m}}{1000}\right)^{-0,5}$ (2-5)

Tabelle 2-2: CHF-Korrelationen verschiedener Autoren für glatte Kreisrohre, Fortsetzung

Autor:	Korrelation für niedrige Drücke und niedrige Massenstromdichten:
KATTO ET AL. [26] Gültigkeitsbereich: $\rho_g / \rho_l < 0{,}15$ $\dot{m}$ = 6–143571 kg/m²s L/D = 5–940	$\dot{q}_{cr} = \dot{q}_{c0}\left(1 + K\frac{\Delta h_i}{\Delta h_v}\right)$ (2-6) für $\dot{q}_{c0}$ stehen folgende Gleichungen zur Verfügung: L-Regime: $\frac{\dot{q}_{c01}}{\dot{m}\Delta h_v} = C\left(\frac{\sigma\rho_l}{\dot{m}^2 L}\right)^{0{,}043}\frac{1}{L/D}$ (2-7) H-Regime: $\frac{\dot{q}_{c02}}{\dot{m}\Delta h_v} = 0{,}1\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0{,}133}\left(\frac{\sigma\rho_l}{\dot{m}^2 L}\right)^{1/3}\frac{1}{1+0{,}0031(L/D)}$ (2-8) N-Regime: $\frac{\dot{q}_{c03}}{\dot{m}\Delta h_v} = 0{,}098\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0{,}133}\left(\frac{\sigma\rho_l}{\dot{m}^2 L}\right)^{0{,}133}\frac{(L/D)^{0{,}27}}{1+0{,}0031(L/D)}$ (2-9) $C = 0{,}25$ für $L/D < 50$ $C = 0{,}25+0{,}0009\,(L/D - 50)$ für $L/D = 50$ bis 150 $C = 0{,}34$ für $L/D > 150$ $\dot{q}_{c01} \le \dot{q}_{c02} \rightarrow \dot{q}_{c0} = \dot{q}_{c01}$ $\dot{q}_{c01} > \dot{q}_{c02}$ und $\dot{q}_{c02} > \dot{q}_{c03} \rightarrow \dot{q}_{c0} = \dot{q}_{c03}$ $\dot{q}_{c02} \le \dot{q}_{c03} \rightarrow \dot{q}_{c0} = \dot{q}_{c02}$ Der Unterkühlungsparameter K soll den größeren der folgenden beiden Werte annehmen: $K1 = \frac{1{,}043}{4C\left(\frac{\sigma\rho_l}{\dot{m}^2 L}\right)^{0{,}043}}$ oder $K2 = \frac{5}{6}\frac{0{,}0124 + D/L}{\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0{,}133}\left(\frac{\sigma\rho_l}{\dot{m}^2 L}\right)^{1/3}}$
WEBER [65] Gültigkeitsbereich: p = 0,1–1,2 MPa ΔT_{sub} = 0–156,4 K $\dot{m}$ = 10–300 kg/m²s D = 0,0013–0,0239m L = 0,0434–1,2 m L/D = 4,47–100	$\frac{\dot{q}_{cr}}{\dot{m}\Delta h_v} = \frac{0{,}1274\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0{,}2334}\left(\frac{\sigma\rho_l}{\dot{m}^2 D}\right)^{0{,}3907}\left(1 + 0{,}6\frac{\Delta h_{Sub}}{\Delta h_v}\right)}{\left[0{,}96 + 0{,}17\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0{,}064}\left(\frac{\sigma\rho_l}{\dot{m}^2 D}\right)^{0{,}375}\frac{L}{D}\right]}$ (2-10)

Tabelle 2-2: CHF-Korrelationen verschiedener Autoren für glatte Kreisrohre, Fortsetzung

Autor:	Korrelation für niedrige Drücke und niedrige Massenstromdichten:
CHANG ET AL. [14] Gültigkeitsbereich: p = 0,1–1,1 MPa $\dot{m}$ = -231–250 kg/m²s D = 0,003–0,0239 m L/D = 4,47–250	Die dimensionslose Wärmestromdichte $\dot{q}_{cr}^{\ *}$ ist der kleinere der beiden folgenden Werte $\dot{q}_{crL}^{\ *}$ und $\dot{q}_{crH}^{\ *}$: $\dot{q}_{crL}^{\ *} = \dot{q}_{cF}^{\ *} + 0{,}01351(D)^{-0{,}473}\left(\frac{L}{D}\right)^{-0{,}533}\left(\left\|\dot{m}^*\right\|\right)^{1{,}45}$ (2-11) $\dot{q}_{crH}^{\ *} = \dot{q}_{cF}^{\ *} + 0{,}05664(D)^{-0{,}247}\left(\frac{L}{D}\right)^{-0{,}501}\left(\left\|\dot{m}^*\right\|\right)^{0{,}77}$ (2-12) $\dot{q}_{cF}^{\ *} = \frac{1{,}61\left(\frac{A}{A_H}\right)(D)^{*0{,}5}}{\left[1+\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0{,}25}\right]^2}$ (2-13) mit: $\dot{q}_{cr}^{\ *} = \frac{\dot{q}_{cr}}{\Delta h_v\sqrt{\lambda\rho_g g\Delta\rho}}$, $\dot{m}^* = \frac{\dot{m}}{\sqrt{\lambda\rho_g g\Delta\rho}}$, $\lambda = \sqrt{\frac{\sigma}{g\Delta\rho}}$, $D^* = \frac{D}{\lambda}$.
RUAN [52] Gültigkeitsbereich: p = 0,11–1,0 MPa ΔT_{sub} = 3–60 K $\dot{m}$ = 25–200 kg/m²s D = 0,009 m L/D = 44,33	$\frac{\dot{q}_{cr}}{\dot{m}\Delta h_v} = 0{,}009765\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0{,}1101}\left(\frac{\sigma\rho_l}{\dot{m}^2 D}\right)^{0{,}074}$ (2-14)
SCHROEDER-RICHTER ET AL. [56]; [55] Gültigkeitsbereich: $p \le$ 1,2 MPa $\dot{m}$ = 10–300 kg/m²s	Folgende Gleichung gilt nur für DNB: $\dot{q}_{cr} = 1100\frac{W}{m^2K^2}exp\left(\frac{p_l}{4{,}34MPa}\right)(T_{DNB}-T_S)^2$ (2-15) mit: $T_{DNB} = \frac{T_S}{1-0{,}6\frac{T_S}{\Delta h_v}\frac{kJ}{kgK}}, p_{DNB} = 3{,}67\,p_l$ (2-16)

Tabelle 2-2: CHF-Korrelationen verschiedener Autoren für glatte Kreisrohre, Fortsetzung

Autor:	Korrelation für niedrige Drücke und niedrige Massenstromdichten:
VDI-Wärmeatlas [64] Gültigkeitsbereich: p = 0,49–2,94 MPa $\dot{m}$ = 200-5000 kg/m²s D = 0,004–0,032 m	Für Dryout gilt: $\dot{q}_{cr} = 1{,}8447\times10^{8}\, x^{-8}\dot{m}^{-2{,}664}\left(D\times1000\right)^{-0{,}56} e^{0{,}1372\cdot p}$ (2-17) $x_{cr} = 10{,}795\,\dot{q}^{-0{,}125}\dot{m}^{-0{,}333}\left(D\times1000\right)^{-0{,}07} e^{0{,}01715\cdot p}$ (2-18)
YILDIZ [68] Gültigkeitsbereich: • Für DNB: p = 0,116–0,159 MPa $\dot{m}$ = 300–400 kg/m²s L/D = 28,33	Für DNB gilt: $\dot{q}_{cr} = 0{,}1728\frac{W}{cm^2K^2}\exp\left(\frac{p_l}{43{,}4bar}\right)\left(T_{DNB}-T_S\right)^2$ (2-19) mit SCHROEDER-RICHTER ET AL. [55]: $T_{DNB} = \frac{T_S}{1-0{,}6\frac{T_S}{\Delta h_v}\frac{kJ}{kgK}}, p_{DNB} = 3{,}67\,p_l$ (2-20)
• Für Grenzdampfgehalt: p = 0,11–16,7 MPa $\dot{m}$ = 50–3000 kg/m²s D = 0,006–0,01 m	Für Grenzdampfgehalt gilt: $x_b = \frac{0{,}291}{9{,}85F(p)\left[\frac{\dot{m}}{1000}\left(\frac{1}{kg/m^2s}\right)\right]^{1{,}39}+0{,}39}+0{,}255$ (2-21) $F(p) = 0{,}0199+0{,}00047\left(\frac{1}{bar}\right)p+0{,}987\exp\left[-0{,}018\left(\frac{1}{bar^2}\right)p^2\right]$ Verwendung der Grenzdampfgehaltskorrelation für die kritische Wärmestromdichte: $\frac{\dot{q}_{cr}}{\dot{m}\Delta h_v} = \frac{x_b+(h_s-h_i)/\Delta h_v}{4}\frac{D}{L}$ (2-22) Für die kritische Wärmestromdichte im Microfilm-Dryout gilt: Anwendung der Korrelation von WEBER [65] oder CHANG ET AL. [14]

Tabelle 2-2: CHF-Korrelationen verschiedener Autoren für glatte Kreisrohre, Fortsetzung

Autor:	Korrelation für niedrige Drücke und niedrige Massenstromdichten:
KUZMA-KICHTA ET AL. [37], [36] Gültigkeitsbereich: • Für DNB: p = 0,5 Mpa $\dot{m}$ = 200–10000 kg/m²s D = 8 mm	Für DNB gilt: $\dot{q}_{cr} = 9{,}1\times10^{-3}\,\Delta h_v \left(\frac{\sigma\rho_g}{D}\right)^{0,5}\left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{0,25}\left(\frac{\dot{m}D}{\mu_S}\right)^{0,26}\Psi_{SUB}$ (2-23) mit $\Psi_{SUB} = 1 + 1{,}65\left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{0,25}\frac{(T_S - T_i)c_p}{\Delta h_v}\left(\frac{\Delta h_v}{c_p T_S}\right)^{0,25}$
• Für Grenzdampfgehalt: p = 0,3–1,6 Mpa $\dot{m}$ = 100–600 kg/m²s L/D = 250	Für Grenzdampfgehalt gilt: $x_b = 1 - 64{,}3\left(\frac{\dot{q}}{\Delta h_v\sqrt{\rho_l}\sqrt[4]{\sigma g(\rho_l-\rho_g)}}\right)^{0,28}\left(\frac{\dot{m}\nu_l}{\sigma}\sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}}\right)^{1,25}$ (2-24)
• Für Microfilm-Dryout: p = 0,3–1,6 Mpa $\dot{m}$ = 30–100 kg/m²s L/D = 250	Für Microfilm-Dryout gilt: $\dot{q}_{cr} = 21 + 1{,}14\cdot\dot{m}^{1,2}$ (2-25) und $x_{cr} = 0{,}73 - 0{,}33\cdot C_f^{1,15}$ (2-26) mit $C_f = \frac{\dot{m}^2}{\rho_g^2 g\sqrt{\sigma/(g\cdot(\rho_l-\rho_g))}}\cdot\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0,55}$

Zusammenfassend zeigt sich, daß die Datenlage für CHF-Messungen bei glatten Heizoberflächen im Bereich mäßig hoher Drücke und niedriger Massenstromdichten für kleine Verhältnisse von L/D noch lückenhaft ist. In neuester Zeit werden CHF-Korrelationen in die verschiedenen Entstehungsmechanismen der Siedekrise (DNB, Dryout bzw. Grenzdampfgebiet und Microfilm-Dryout) eingeteilt (KUZMA-KICHTA ET AL. [34], YILDIZ [68]). Dies ist sicher sinnvoll, da hier unterschiedliche physikalische Bedingungen beim Auftreten der Siedekrise vorliegen. Daher erfolgt auch in dieser Arbeit die Einteilung in die unterschiedlichen Entstehungsmechanismen der Siedekrise.

2.4 Datenlage zur CHF beim innen porös beschichteten Kreisrohr

Experimentelle Untersuchungen zum Einfluß poröser Beschichtungen auf die kritische Wärmestromdichte in senkrechten Kreisrohren liegen nur wenige vor. In den meisten Fällen erfolgten die Untersuchungen nur im Bereich hoher Drücke oder sehr hoher Massenstromdichten. Eine Auflistung der Untersuchungen erfolgt in Tabelle 2-3.

MEL`NIKOV ET AL. [47] untersuchten den Einfluß poröser Eisenoxid-Beschichtungen auf die kritische Wärmestromdichte in einem Kreisrohr bei Aufwärtsströmung. Die Autoren variierten die Schichtdicke und stellten eine zunehmende Verschlechterung mit steigender Schichtdicke im Vergleich zum glatten Rohr fest.

LEONT`EV ET AL. [38] berichten von einer Steigerung der kritischen Wärmestromdichte durch das Auskleiden der inneren Rohrwand mit einer porösen Filtergaze im Bereich hoher Massenstromdichten und positiver Dampfgehalte. Für Ihre Experimente verwendeten die Autoren horizontale Rohre mit ungleichförmiger Beheizung. Die Steigerung der kritischen Wärmestromdichte erklären LEONT`EV ET AL. [38] durch die Zunahme der Turbulenz in der Strömung durch die Verwendung der Gaze-Struktur.

Den Einfluß poröser Beschichtungen auf die CHF untersuchten KOVALEV ET AL. [31] an einer anderen Geometrie. Die Autoren verwendeten einseitig beheizte horizontale Rechteckkanäle mit verschiedenen porösen Beschichtungen. Für die beschichteten Heizflächen ergab sich eine 3- bis 4-fache Verbesserung der kritische Wärmestromdichte gegenüber dem glatten Rohr. KOVALEV ET AL. [31] stellten einen nur geringen Einfluß der Porengröße auf das Verbesserungspotential bei poröser Beschichtung fest. Die Autoren verwendeten allerdings nur sehr grobe Beschichtungen (Schichtdicken von 1 und 2 mm sowie sehr große Partikeldurchmesser $d_p > 63$ µm).

KOMENDANTOV ET AL. [29] untersuchten den Einfluß einer porösen Kupfer-Beschichtung an einem horizontalem Rohr mit ungleichförmiger Beheizung. Die Autoren erhielten eine 2,5- bis 3-fache Verbesserung beim Rohr mit poröser Beschichtung bei großen Massenstromdichten. Über eine Verbesserung der kritischen Wärmestromdichte bei kleinen Massenstromdichten wird keine Aussage gemacht. Die Autoren erklären die Verbesserung der kritischen Wärmestromdichte durch die Kapillarkraft in porösen Schichten. Sie verstärkt den

Flüssigkeitstransport zur Heizfläche und führt somit zu einer besseren Benetzung der Heizfläche. CHF-Untersuchungen mit verdrilltem Band ergaben dagegen nur eine Verbesserung um den Faktor 1,5.

KOTOV ET AL. [30] führten Untersuchungen der kritischen Wärmestromdichte an innen porös beschichteten Rohren beim Strömungssieden durch. Die Autoren stellten eine Abhängigkeit des Einflusses poröser Schichten von der Massenstromdichte und dem Druck fest. So zeigen die Daten z.B. bei einer Massenstromdichte von $\dot{m} = 1500\ \mathrm{kg/m^2s}$ für Drücke $p > 12\ \mathrm{MPa}$ eine Verbesserung und für Drücke $p < 12\ \mathrm{MPa}$ eine Verschlechterung der kritischen Wärmestromdichte.

KUZMA-KICHTA ET AL. [34], [35] verwendeten eine poröse Kupfer-Beschichtung für die Untersuchungen des Einflusses poröser Schichten auf die kritische Wärmestromdichte. Die CHF-Messungen erfolgten an einem horizontalen ungleichförmig beheizten Rohr im Bereich negativer thermodynamischer Dampfgehalte am Eintritt der Rohrstrecke bei Variation der Massenstromdichte und des Druckes. Für eine Massenstromdichte von $\dot{m} = 200\ \mathrm{kg/m^2s}$ beobachten KUZMA-KICHTA ET AL. [34], [35] eine 3,5-fache Verbesserung infolge poröser Beschichtung, die sich bei großen Massenströmen ($\dot{m} = 3000–10.000\ \mathrm{kg/m^2s}$) auf eine Verdopplung reduziert.

Im Bereich des Blasensiedens untersuchten KUZMA-KICHTA ET AL. [34] den Einfluß des thermischen Widerstandes verschiedener poröser Beschichtungen auf das Verbesserungpotential bei der Wärmeübertragung. Die ermittelten Daten belegen, daß bei einer Abnahme des thermischen Widerstandes poröser Schichten eine Zunahme der Verbesserung der Wärmeübertragung infolge poröser Beschichtungen erfolgt.

ZUEV ET AL. [70] untersuchten die CHF an senkrechten aufwärts durchströmten Rohren mit und ohne poröser Beschichtung bei homogener Beheizung. Die Autoren berichten von einer Reduzierung der kritischen Wärmestromdichte für Massenstromdichten $\dot{m} < 1500\ \mathrm{kg/m^2s}$ und einer Verbesserung der kritischen Wärmestromdichte für Massenstromdichten $\dot{m} > 1500\ \mathrm{kg/m^2s}$ gegenüber dem glatten Rohr. Die Autoren beschreiben, daß beim Erreichen der Siedekrise der zeitliche Temperaturanstieg bei poröser Beschichtung langsamer erfolgt als beim glatten Rohr.

Untersuchungen am Institut für Energietechnik der TU Berlin YILDIZ [68], YILDIZ ET AL. [67] belegen bei bestimmten Randbedingungen eine Steigerung der kritischen Wärmestromdichte bei innen porös beschichteten Rohren um maximal 41 % gegenüber glatten Heizflächen. Diese experimentellen Untersuchungen wurden am Versuchsstand mit lotrechter Kreisrohrmeßstrecke bei niedrigen Massenstromdichten (0 bis 400 kg/m² s) und mäßig hohen Drücken (0,1 bis 0,7 MPa) durchgeführt. Es wurden vier Rohrstrecken untersucht von denen zwei glatt und zwei innen porös beschichtet waren. Zwei Teststrecken waren aus Inconel 600 mit einer Länge von 170 mm, glatt und innen porös beschichtet (Schichtdicke 350 µm, Korngröße 80-100 µm und Porosität 60-70 %). Die übrigen zwei Rohre bestanden aus Stahl 1X18H9T mit einer Länge von 310 mm, glatt und innen porös beschichtet (Schichtdicke 180 µm, Korngröße 100-140 µm und Porosität 50 %). Die Messungen fanden zum größten Teil im Übergangsbereich zwischen scheinbarem DNB und Grenzdampfgebiet sowie im Übergangsbereich zwischen Grenzdampfgebiet und Microfilm-Dryout statt. Erste Anfänge einer physikalischen Interpretation erklärten die Intensivierung der kritischen Wärmestromdichte mit einem Wechsel der Entstehungsmechanismen der Siedekrise, ausgelöst durch die poröse Beschichtung bei sonst gleichen Bedingungen. Die Erkenntnisse für den untersuchten Parameterbereich wurden in Form einer neu entwickelten Strömungskarte festgehalten. Aufgrund der unterschiedlichen Beschichtungsparameter und der unterschiedlichen Materialien bei den verschiedenen Längen lassen die Daten keine systematischen Untersuchungen des Einflusses der porösen Schicht zu. Da nur wenige Daten im Bereich des scheinbaren DNB sowie im Bereich des Microfilm-Dryouts gewonnen werden konnten, die jedoch für eine Abgrenzung der Übergänge zwischen den Strömungszuständen nötig sind, besteht hier noch Untersuchungsbedarf.

KUZMA-KICHTA ET AL. [37] untersuchten den Einfluß poröser Nickel-Beschichtungen auf die Verbesserung der kritischen Wärmestromdichte beim unterkühlten Blasensieden. Die Experimente erfolgten in senkrechten einseitig beheizten Rechteckkanälen mit unterschiedlichen Beschichtungsparametern unter Atmosphärendruck. Die Ergebnisse zeigten eine Verbesserung des Wärmeübergangs im Bereich der kritischen Wärmestromdichte um den Faktor 1,7. Für den Vergleich glatt/porös stand jedoch nur eine vollständig funktionierende Teststrecke zur Verfügung, so daß der Einfluß der Beschichtungsparameter besonders im kritischen und postkritischen Bereich nicht ausreichend untersucht werden konnte.

Tabelle 2-3: Experimente zum Einfluß poröser Beschichtungen auf die CHF gegenüber glatt

Datenquelle	Beschichtung	p, MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{sub}, K	x_e	L/D
MEL`NIKOV ET AL. [47] • senkrechtes Rohr • 7 – 35 % Verschlechterung	Poröse Eisenoxidschicht d_p = 1; 2; 55 µm	7	2500 – 3000	Keine Angabe	(-0,2) – 0,15	29,16
LEONT`EV ET AL. [38] • horizontales Rohr • Verbesserung bei großem $\dot{m}$ und $x_{cr} > 0$. • Verschlechterung bei kleinem $\dot{m}$ und $x_{cr} < 0$.	Poröse Innenauskleidung in Form von Filtergaze No. 120	6,8 – 13,73	1000 – 2000	Keine Angabe	(-0,85) – 1,0	57,14; 81,42
KOVALEV ET AL. [31] • horizontaler Rechteckkanal • 3 bis 4-fache Verbesserung	Bronze δ = 1; 2 mm d_p = 63 – 100; 215 – 300; 300 – 400; 400 – 500 µm $\varepsilon \approx$ 15; 35; 64 %	0,1	90	40	Keine Angabe	Heizfläche: 90 x 100 mm
KOMANDANTOV ET AL. [29] • horizontales Rohr • 3-fache Verbesserung	Kupfer δ = 150 µm d_p = 40 – 60 µm $\varepsilon \approx$ 60 %	0,1 – 1,0	200 – 3000	25 – 98	Keine Angabe	6,25
KOTOV ET AL. [30] • senkrechtes Rohr • Verbesserung bei p > 12 MPa und $\dot{m}$ = 1500 kg/m²s. • Verschlechterung bei p < 12 MPa und $\dot{m}$ = 1500 kg/m²s.	δ = 180 – 300 µm d_p = 50 – 63 µm $\varepsilon \approx$ 60 % δ = 150 – 200 µm	6,9 – 17,6	500 – 2500	Keine Angabe	Keine Angabe	32,7; 65,62

Tabelle 2-3: Fortsetzung

Datenquelle	Beschichtung	p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{sub} , K	x_e	L/D
KUZMA-KICHTA ET AL. [35] • horizontales Rohr • 2 bis 3,5-fache Verbesserung	Bronze δ = 120 µm d_p = 40 µm $\varepsilon \approx$ 60 %	0,1 – 1,0	200 – 10.000	Keine Angabe	(-0,2) – 0,0	6,25
ZUEV ET AL. [70] • senkrechtes Rohr • Verbesserung bei $\dot{m}$ > 1500 kg/m²s. • Verschlechterung bei $\dot{m}$ < 1500 kg/m²s.	δ = 200 µm d_p = 63 – 100 µm $\varepsilon \approx$ 40 – 50 %	0,1 – 0,7	50 – 400	Keine Angabe	0,1 – 1,0	125
YILDIZ [68] • senkrechtes Rohr • 41% Verbesserung • Für p > 0,1 MPa Verschlechterung	Inconel 600 δ = 350 µm d_p = 80 – 100 µm $\varepsilon \approx$ 60 – 70 % sowie: Stahl 1X18H9T δ = 180 µm d_p = 100–140 µm $\varepsilon \approx$ 50 %	0,1 – 0,7 0,1 – 0,7	50 – 400 50 – 200	3,4 – 72,8 5,3 – 71,3	0,0 – 0,87 0,5 – 0,93	28,33; 38,75
KUZMA-KICHTA ET AL. [33] • senkrechter Rechteckkanal • 1,7 bis 2-fache Verbesserung	Nickel δ = 320 µm d_p = 100 µm $\varepsilon \approx$ 40 % sowie: Nickel δ = 150 µm d_p = 40 µm $\varepsilon \approx$ 60 %	0,1	10 – 200	3 – 20	< 0,0	Heizfläche: 8 x 50 mm

Die Tabelle 2-3 gibt einen Überblick über die Untersuchungen zum Einfluß poröser Beschichtungen auf die CHF gegenüber glatten Heizflächen bei sonst gleichen Versuchsbedingungen. In der Tabelle werden auch Untersuchungen an Rechteckkanälen und waagerechten Rohren mit eingeschlossen.

Aus der Tabelle wird deutlich, daß Messungen des Wärmeübergangs einschließlich der kritischen Wärmestromdichte beim Strömungssieden an porösen Beschichtungen in nur unzureichendem Umfang vorliegen. Die Datenlage nimmt noch mehr ab, wenn die Untersuchungen für Rechteckkanäle und horizontale Kreisrohre weggelassen werden. Zusätzlich erfolgten die meisten CHF-Untersuchungen entweder bei sehr hohen Drücken oder bei sehr hohen Massenstromdichten.

Korrelationen für die Vorausberechnung der kritischen Wärmestromdichte beim Strömungssieden mit poröser Oberflächenbeschichtung sind kaum vorhanden. Die Tabelle 2-4 enthält eine Zusammenstellung aller dem Autor zum jetzigen Zeitpunkt bekannten Korrelationen bei poröser Beschichtung in senkrechten Kreisrohren.

Tabelle 2-4: CHF-Korrelationen verschiedener Autoren für porös beschichtete Kreisrohre

Autor:	Korrelation für niedrige Drücke und niedrige Massenstromdichten:
YILDIZ [68] Gültigkeitsbereich: p = 0,18–0,76 MPa ΔT_{sub} = 3–70 K $\dot{m}$ = 200–400 kg/m²s D = 0,006 m L/D = 28,33 $\delta \approx$ 350 µm $d_P \approx$ 80–100 µm $\varepsilon \approx$ = 60–70 %	Für DNB gilt (beschichtet): $\frac{\dot{q}_{cr}}{\dot{m}\Delta h_v} = 0{,}04\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0{,}269}\left(\frac{\sigma\rho_l}{\dot{m}^2 D}\right)^{0{,}191}$ (2-27) Für die kritische Wärmestromdichte im Grenzdampfgebiet erfolgt die Verwendung der gleichen Korrelation wie beim glatten Rohr Gleichung (2-21) und (2-22) (siehe Tabelle 2-2). Für die kritische Wärmestromdichte im Microfilm-Dryout erfolgt die Verwendung der Korrelation von WEBER [65] oder CHANG ET AL. [14] (glattes Rohr, siehe Tabelle 2-2).
KUZMA-KICHTA ET AL. [34] Gültigkeitsbereich: p = 0,5 MPa $\dot{m}$ = 200–10000 kg/m²s D = 8 mm $\delta \approx$ 120 µm $d_P \approx$ 40 µm $\varepsilon \approx$ = 60 %	Für DNB gilt (beschichtet): $\dot{q}_{cr} = 9{,}1\times10^{-3}\Delta h_v\left(\frac{\sigma\rho_g}{D}\right)^{0{,}5}\left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{0{,}25}\left(\frac{\dot{m}D}{\mu_S}\right)^{0{,}26}\Psi_{SUB}\Psi_{PC}$ (2-28) mit $\Psi_{SUB} = 1 + 1{,}65\left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{0{,}25}\frac{(T_S - T_i)c_p}{\Delta h_v}\left(\frac{\Delta h_v}{c_p T_S}\right)^{0{,}25}$ $\Psi_{PC} = 1 + 0.44N^{0{,}1}\left[1 - 0{,}25\left(\frac{\dot{m}D}{\mu_S}\right)^{0{,}1}\right]$ und $N = \left[\frac{D_{P\,max}\Delta h_v\rho_g(T_S - T_i)}{4\sigma T_S}\right]^m$ $m = -1630\frac{\delta}{\lambda_{ef}} + 4$ $\lambda_{ef} = \lambda_{CM}\left(1-\varepsilon^{1/3}\right)^2 + \left[1-\left(1-\varepsilon^{1/3}\right)^2\right]\left(\frac{1-\varepsilon}{\lambda_{CM}} + \frac{\varepsilon_l}{\lambda_l} + \frac{\varepsilon_g}{\lambda_g}\right)^{-1}$ Für den Grenzdampfgehalt im Grenzdampfgebiet erfolgt die Verwendung der gleichen Korrelation wie beim glatten Rohr Gleichung (2-24) (Tabelle 2-2). Für die kritische Wärmestromdichte im Microfilm-Dryout erfolgt die Verwendung der gleichen Korrelation wie beim glatten Rohr Gleichung (2-25) und (2-26) (siehe Tabelle 2-2).

2.5 Schlußfolgerung für die eigene Aufgabenstellung

Die Übersicht über die bisher durchgeführten Arbeiten zeigt einen deutlichen Bedarf an Untersuchungen zum Einfluß poröser Beschichtungen auf die kritische Wärmestromdichte beim Strömungssieden im Bereich mäßig hoher Drücke und niedriger Massenstromdichten. Bislang erfolgten noch keine systematischen Untersuchungen zu diesem Thema, entweder wurden die Strömungsparameter nur bei einer einzigen vorgegebenen porösen Beschichtung und Geometrie variiert, oder es wurde der Effekt einer Variation der Sinterschicht bei festen Strömungsparametern analysiert.

Erste Anfänge einer physikalischen Interpretation über den Einfluß poröser Beschichtungen erklären die Intensivierung der kritischen Wärmestromdichte mit einem Wechsel der Entstehungsmechanismen der Siedekrise vom Grenzdampfgebiet (Dryout) zum DNB, ausgelöst durch die poröse Beschichtung bei sonst gleichen Versuchsbedingungen (YILDIZ [68]). Die Frage, ob auch bei einem Wechsel des Mechanismus der Siedekrise vom Microfilm-Dryout zum Grenzdampfgebiet infolge poröser Beschichtung eine Intensivierung erfolgt oder wie sich der Einfluß poröser Beschichtungen mit variierten Parametern auf die Siedemechanismen verhält, konnte bislang noch nicht geklärt werden. Grund dafür waren mangelnde CHF-Daten bei glatten und porös beschichteten Rohren für den Bereich des DNB, den Bereich des Microfilm-Dryouts sowie den Übergangsbereich zwischen Grenzdampfgebiet und Microfilm-Dryout.

Die Aufgabe der vorliegenden Arbeit ist es, erstmalig den Einfluß definierter poröser Beschichtungen auf die kritische Wärmestromdichte und deren Entstehungsmechanismen beim Strömungssieden systematisch zu untersuchen. Zu diesem Zweck werden neben der Korngröße der porösen Schicht auch die Eintrittsbedingungen (Massenstromdichte, Eintrittsunterkühlung, Druck) variiert, so daß für ausgewählte Oberflächenbeschichtungen CHF-Messungen bei gleichen Eintrittsbedingungen erfolgen. Angestrebt sind CHF-Messungen für thermodynamische Dampfgehalte von $0 < x_{cr} < 1$. Durch die Veränderung der Rohrlänge bei festem Rohrinnendurchmesser D und durch geeignete Variation der Strömungsparameter sollen die dabei auftretenden Entstehungsmechanismen der Siedekrise, DNB, Grenzdampfgebiet und Microfilm-Dryout sowie deren Übergangsbereiche, realisiert werden.

Die Datenlage für die kritische Wärmestromdichte am glattem Rohr ist bei kleinem Verhältnis L/D für den Bereich niedriger Massenstromdichte und mäßig hoher Drücke lückenhaft. Für einen systematischen Vergleich des Einflusses poröser Beschichtungen auf die CHF bei unterschiedlichen Strömungsregimen ($0 < x_{cr} < 1$, Abbildung 1-6) ist es daher notwendig, die eigenen CHF-Messungen nicht nur an porös beschichteten Rohren, sondern auch für das glatte Rohr unter gleichen Versuchsbedingungen durchzuführen.

Die im Rahmen dieser Forschungsarbeit ermittelten experimentellen Ergebnisse sollen sowohl zur Entwicklung von Korrelationen für die speziellen Siedephänomene (DNB, Grenzdampfgebiet und Microfilm-Dryout) als auch zur Weiterentwicklung theoretischer Ansätze bzw. physikalischer Erklärungen zur Verbesserung der CHF beim Strömungssieden infolge porös beschichteter Heizflächen dienen. Außerdem sollen mit den durchgeführten Messungen die Datenbanken für kritische Siedezustände (z.B. Look-up Tabelle von GROENEVELD ET AL. [21]) erweitert werden.

3 EXPERIMENTELLES VERFAHREN

Für die systematischen Untersuchungen der kritischen Wärmestromdichte stand eine Versuchsanlage für Siedeexperimente unter Druck (VASEUD) zur Verfügung. Sie wurde im Rahmen eines TU Berlin - EURATOM Forschungsprogramms (1986 – 1989) konzipiert und errichtet. Der Versuchsstand diente neben der Ermittlung der kritischen Wärmestromdichte (RUAN [52], YILDIZ [68]) auch zur Bestimmung kompletter Siedekurven (WEBER [65]). Zur Anpassung an die vorliegende eigene Fragestellung wurde die Versuchsanlage umgebaut und gleichzeitig ertüchtigt.

Ziel der Untersuchung ist die experimentelle Ermittlung der kritischen Wärmestromdichte in kreisrunden, lotrechten und direkt beheizten Rohrstrecken in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit der Heizfläche bei unterschiedlichen Strömungsmechanismen (DNB, Dryout, Microfilm-Dryout und deren Übergangsbereiche). Die Versuchsanlage arbeitet als ein System mit aufgeprägter Wärmestromdichte. Beim Überschreiten der kritischen Wärmestromdichte steigt die Heizflächentemperatur mehr oder minder stark an. Um eine thermische Zerstörung der Teststrecke zu vermeiden (Burnout), erfolgt eine rechtzeitige Abschaltung der Heizleistung.

Die Versuchsanlage ermöglicht einen sicheren und automatischen Betrieb im folgenden Parameterbereich:

- Systemdruck von 0,11 bis 0,7 MPa
- Massenstromdichte von 25 bis 300 kg/m^{2}s
- Eintrittsunterkühlung von 15 bis 50 K

Der Systemdruck sowie die Eintrittstemperatur an der Testsektion werden automatisch geregelt. Die Massenstromdichte wird manuell eingestellt. Als Arbeitsmedium dient hochreines, entgastes Wasser.

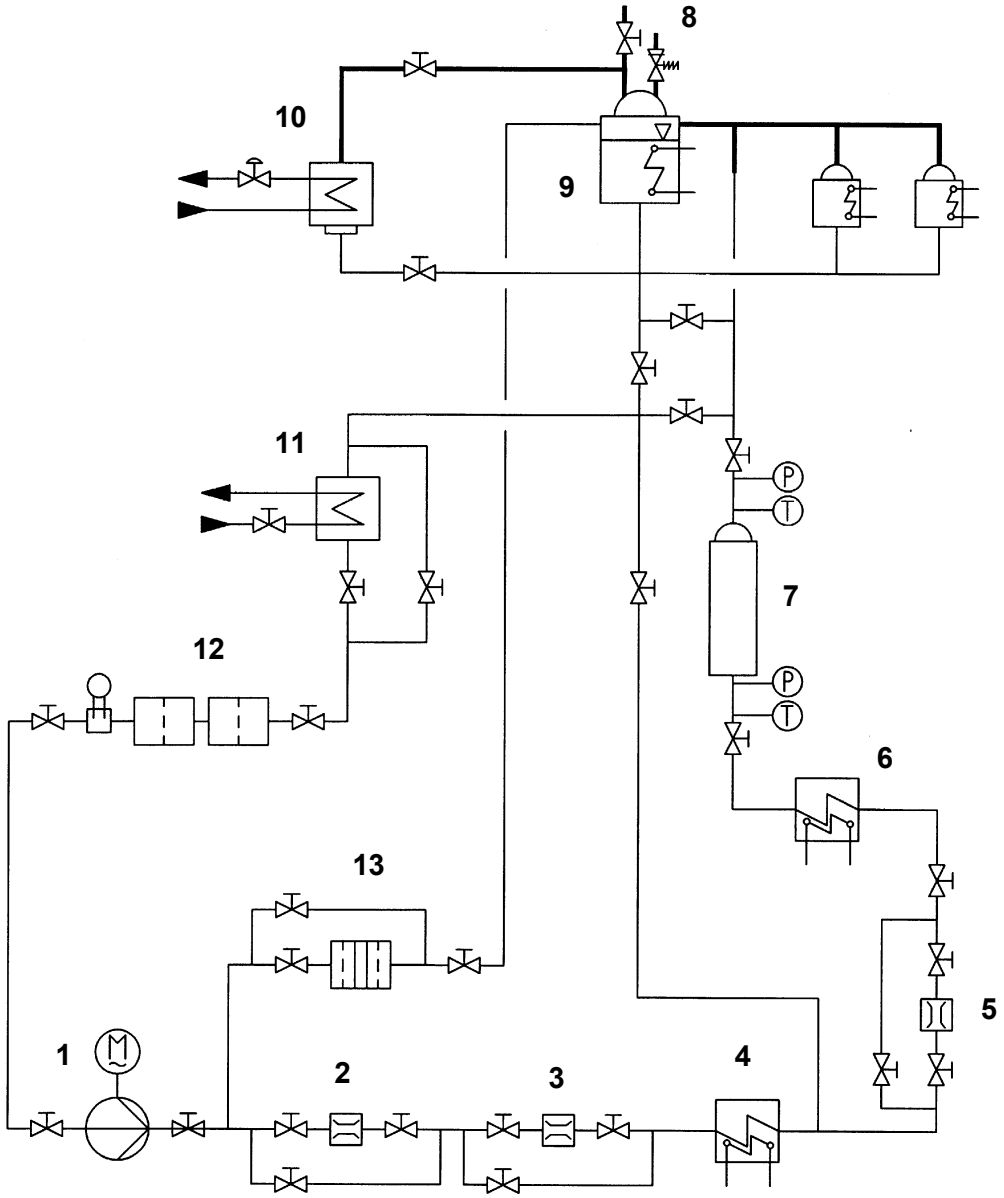
Die Versuchsanlage besteht aus vier Hauptkomponenten: Einem Wasserkreislauf, einer direkt beheizten Inconel 600 Kreisrohrmeßstrecke, einem Stromversorgungssystem für die Teststrecke sowie einem Meßdatenerfassungssystem.

3.1 Der Wasserkreislauf

Die Hauptkomponenten des Wasserkreislaufs sind Förderpumpe, Druckhalter, Kondensator, Vorwärmer, Nachkühler, drei Durchflußmeßgeber, einige Filter, ein Ionenaustauscher und eine Testsektion.

Die Abbildung 3-1 zeigt den schematischen Aufbau der Versuchsanlage. Alle Komponenten, Armaturen und Rohrleitungen, die mit dem Versuchsmedium „Reinstwasser“ Kontakt haben, sind aus austenitischem Edelstahl (V4A, 1.4571) oder gleichwertigen Materialien (Inconel, Edelstahlguß) gefertigt.

Die Pumpe (1) fördert das Kreislaufwasser durch die Turbinendurchflußmeßgeber (2) und (3) oder deren Bypass in den Vorwärmer (4). Die Funktionalität des Vorwärmers (4) ist nur bei großen Massenstromdichten gewährleistet. Kleine Massenstromdichten lassen sich nur über den zwischen dem Vorwärmer (4) und Turbinendurchflußmeßgeber (5) liegenden Bypass realisieren. Die Massenstromdichte wird mit Hilfe eines Kugelhahns direkt vor der Testsektion (7) eingestellt. Ein kleinerer Vorwärmer (6) kompensiert die Wärmeverluste zwischen dem Austritt aus dem Vorwärmer (4) und dem Eintritt in die Testsektion (7). Oberhalb der Testsektion (7) wird die Rohrleitung auf NW 100 erweitert, der erzeugte Dampf steigt störungsfrei auf und trennt sich von dem horizontal weggeführten Wasser. Über den Nachkühler (11) und die Filterstrecke (12) wird der Kreislauf geschlossen. Der in der Testsektion (7) erzeugte Dampf strömt über den Druckhalter (9) und wird im Kondensator (10) kondensiert.



1	Pumpe	6	Vorwärmer	11	Nachkühler
2	Durchflußmeßgeber	7	Testsektion	12	Filterstrecke
3	Durchflußmeßgeber	8	Abblasventil	13	Leitfähigkeitsmeßzelle
4	Vorwärmer	9	Druckhalter		
5	Durchflußmeßgeber	10	Kondensator		

Abbildung 3-1: Schemaskizze der Versuchsanlage

Die Verwendung von doppelt destilliertem Wasser, Filtern und Ionenaustauscher im Kreislauf garantieren eine sehr hohe Wasserqualität (Leitfähigkeitswert < 0,1 µS/cm). Das Kühlwasser (Stadtwasser) für Kondensator, Nachkühler und Pumpe wird filtriert. Zusätzlich wird das Kühlwasser für den Kondensator enthärtet, um Ablagerungen auf der Kondensationsfläche zu verhindern.

Ein komplettes Anlagenschutzsystem gewährleistet den sicheren Betrieb der Versuchsanlage. Dazu gehören am Druckhalter und am Vorwärmer installierte elektronische Druckbegrenzer, Sicherheitsventile, Temperaturbegrenzer und Füllstandswächter sowie weitere interne Abschaltsysteme.

3.1.1 Regelung und Messung des Druckes

Die Regelung des Systemdrucks erfolgt über das Zusammenspiel von Druckhalter, Kondensator und einem Regelsystem. Der Druckhalter (9) ist mit drei Heizgruppen versehen, die jeweils eine Leistung von 5 kW, 7,5 kW und 15 kW haben. Der hier kontinuierlich erzeugte Dampf und der Dampf aus der Testsektion werden im Kondensator (10) kondensiert und gelangen als Flüssigkeit in den Druckhalter zurück. Durch Einstellung der Kondensatorleistung, über den Massendurchfluß des Kühlwassers geregelt, wird der Systemdruck automatisch bei einem vorgegebenen Wert festgehalten. Ein pneumatisches Regelventil im Kühlwasserstrom des Kondensators, das durch ein PID-Reglerausgangssignal gesteuert wird, ermöglicht eine schnelle Änderung der Kondensatorleistung. Der Anlagendruck kann so während der Messungen mit einer Abweichung von ± 2 kPa geregelt werden.

Die Messung des Druckes erfolgt mit Hilfe von drei Druckaufnehmern:

- Druckaufnehmer 1; Messung des Systemdrucks (im Druckhalter) Maximaldruck: 16 bar, Meßfehler: 1%
- Druckaufnehmer 2; Messung des Druckes am Eintritt der Testsektion Maximaldruck: 10 bar, Meßfehler: 0,5%
- Druckaufnehmer 3; Messung des Druckes am Austritt der Testsektion Maximaldruck: 10 bar, Meßfehler: 0,5%

Die Druckaufnehmer wurden mit Hilfe eines Feinmeßmanometers mit der Genauigkeit 0,1 % vom Meßbereichsendwert kalibriert und der Zusammenhang Druck/Ausgangssignal durch lineare Regression ermittelt.

Schwierigkeiten bei der Druckregelung treten bei mäßig hohem Druck ($p = 0{,}7$ MPa) und gleichzeitig höheren Massenstromdichten der Testsektion $L / D = 50$ auf. In diesem Fall wird im Bereich der kritischen Wärmestromdichte so viel Dampf in der Testsektion produziert, daß die Kondensatorleistung sogar beim Ausschalten aller Heizelemente im Druckerzeuger nicht mehr ausreicht. In der vorliegenden Arbeit kann dieses Problem mittels einer per Hand einstellbaren zusätzlichen Kühlwasserströmung gelöst werden.

3.1.2 Regelung und Messung der Eintrittstemperatur

Im Vorwärmer (4) sind drei Heizgruppen installiert. Mit ihnen wird die Eintrittstemperatur der Testsektion auf ca. ± 1 K konstant gehalten. Zwei der Heizgruppen werden manuell über Drehstromtransformatoren eingestellt. Die dritte wird in einem geschlossenen Regelkreis mittels Thyristorstellgliedern so eingestellt, daß die Austrittstemperatur aus dem Vorwärmer bei einem vorgegebenen Wert festgehalten werden kann. Da bei kleinen Massenstromdichten die automatische Regelung nicht stabil wird, ist ein Bypass nach dem Vorwärmer vorgesehen. Er gewährleistet, daß der Durchfluß durch den Vorwärmer einen Minimalwert nicht unterschreitet.

Eintritts- und Austrittstemperatur der Testsektion werden mit einem Pt-100 Widerstandsthermometer der Genauigkeitsklasse A in 4-Leitertechnik gemessen.

Die Eintrittsunterkühlung errechnet sich aus der Differenz der Sättigungstemperatur bei Eintrittsdruck und der Eintrittstemperatur.

3.1.3 Messung und Einstellung des Massenstroms

Für die Messung des Volumenstroms stehen drei Durchflußmeßgeber der Firma Küppers (zwei Turbinen, ein Peltonrad) mit folgenden Meßbereichen zur Verfügung:

- Durchflußmeßgeber A: von 1,0 bis 10,0 l/min
- Durchflußmeßgeber B: von 0,33 bis 1,48 l/min
- Durchflußmeßgeber C: von 0,05 bis 0,75 l/min

Der Meßfehler liegt bei 1-2 % vom Endwert des jeweiligen Meßbereiches. Zur Kontrolle können die Volumendurchflußmesser gegeneinander verglichen werden. Die zur Massenstrombestimmung benötigte Wassertemperatur wird mit einem NiCr-Ni Thermoelement an der jeweiligen Meßstelle bestimmt.

Die Einstellung des Massenstroms erfolgt manuell mit einem Kugelhahn nahe dem Eintritt der Testsektion.

3.1.4 Reinhaltung, Entgasung und Entlüftung des Wasserkreislaufes

Bei Untersuchungen des Wärmeübergangs beim Strömungssieden ist eine hohe Reinheit des Wassers von großer Wichtigkeit. Das Kreislaufwasser stammt aus einem Duo-Destillierautomaten und wird kontinuierlich mikro- und sterilfiltriert. Die Filter ermöglichen eine nominelle Rückhaltung von Partikeln bis 0,2 µm. Die Qualität des Wassers wird mit Hilfe einer Leitfähigkeitsmeßzelle ständig kontrolliert. Bei Überschreitung eines

Leitwertes von 0,1 μS/cm wird das Kreislaufwasser zusätzlich durch einen Ionenaustauscher geleitet.

Die Entgasung des Kreislaufwassers erfolgt thermisch über den Druckhalter (9). Hier wird das Wasser stets auf Sättigungstemperatur gehalten. Über einen Bypass wird ein Teil des umgewälzten Wassers direkt in den Druckhalter von oben eingesprüht und so zum Sieden gebracht. Freigesetzte Gase werden über ein elektromagnetisches Ventil in die Atmosphäre geblasen. Ein niedriger elektrischer Leitwert des Wassers ist ein Hinweis für eine vollständige Entgasung.

Für die Stabilität der Strömung ist eine gute Entlüftung des Kreislaufs von großer Bedeutung. Diese geschieht an den dafür vorgesehenen Entlüftungsschrauben und Entlüftungsventilen.

3.2 Die Teststrecken

Für die experimentellen Untersuchungen stehen zwei glatte und vier innen porös beschichtete Kreisrohrmeßstrecken zur Verfügung. Die Herstellung der porösen Beschichtung erfolgte am Fraunhofer-Institut für Angewandte Materialforschung in Dresden durch Sintern. Alle Rohre und Beschichtungen sind aus Inconel-600 gefertigt. Jeweils drei der sechs Teststrecken besitzen die gleiche Länge, unterscheiden sich aber in den Parametern der Beschichtung. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich der experimentell ermittelten Daten.

Laut YILDIZ [67], [68] erfolgt eine Verbesserung der CHF durch einen Wechsel des Strömungsregimes infolge poröser Beschichtung bei sonst gleichen Strömungsbedingungen. Die Korrelation von KATTO ET AL. [26] enthält eine Angabe über die Strömungsform. Mit Hilfe dieser Korrelation und der aus Vorversuchen gewonnenen Erkenntnisse (YILDIZ [68]) wurden die Längen der Testsektionen so gewählt, daß Messungen der kritischen Wärmestromdichte im Bereich des scheinbaren DNB und Dryout (kurze Teststrecken) sowie Messungen im Bereich des Dryout und Microfilm-Dryout (lange Teststrecken) und deren Übergangsbereich zu erwarten sind.

Die Tabelle 3-1 gibt einen Überblick über die Längen der Testsektionen und deren Beschichtungsparameter.

Tabelle 3-1: Eigenschaften der Testsektionen

Testsektion	Innendurch-messer D, mm	Länge L, mm	Partikeldurch-messer d_p, µm	Schichtdicke δ, µm	Porosität ε, %
Unbeschichtet	9	450	Keine	Keine	Keine
Beschichtung 1	9	450	30 – 40	300	60 – 75
Beschichtung 2	9	450	60 – 80	300	60 – 75
Unbeschichtet	9	127	Keine	Keine	Keine
Beschichtung 1	9	127	30 – 40	300	60 – 75
Beschichtung 2	9	127	60 – 80	300	60 – 75

An den Enden der Rohre wurden jeweils zwei Flansche angeschweißt. Die Stromversorgungseinheiten der Gleichstromversorgung der Testsektion wurde an den Flanschen montiert, so daß die Testsektion elektrisch direkt und homogen beheizt werden kann. Die Testsektion ist von der Anlage elektrisch isoliert. Die Spannung wird direkt an der Testsektion und der Strom direkt am Ausgang des Netzgerätes gemessen.

Zum Messen des mehr oder minder starken Anstiegs der Wandtemperatur beim Erreichen oder Überschreiten der kritischen Wärmestromdichte werden Thermoelemente der Firma Thermocoax Typ LKI 05/25 (Durchmesser: 0,5 mm, Länge: 250 mm) verwendet.

Von besonderer Bedeutung für die Genauigkeit der aus der Temperaturmessung berechneten Verteilungen der Heizflächentemperatur und der Wärmestromdichten ist die Kalibrierung der Thermoelemente. Zur Kalibrierung wurde ein vom Eichamt München geeichtes Pt-100 Widerstandsthermometer in 4-Leitertechnik benutzt. Die Kalibrierung der Thermoelemente fand unter betriebsähnlichen Bedingungen statt. Die sonst an der

Außenwand der Teststrecke befestigten Thermoelemente wurden in einem Kalibrierofen direkt neben der laufenden Versuchsanlage auf 500° C erwärmt. Nach der Abschaltung des Kalibrierofens konnte bei sehr langsam abfallender Temperatur der systematische Fehler bestimmt werden. Die gemessenen systematischen Fehler der Thermoelemente waren reproduzierbar und wurden bei der Datenauswertung mittels Approximationspolynomen individuell korrigiert (siehe Abbildung 3-2).

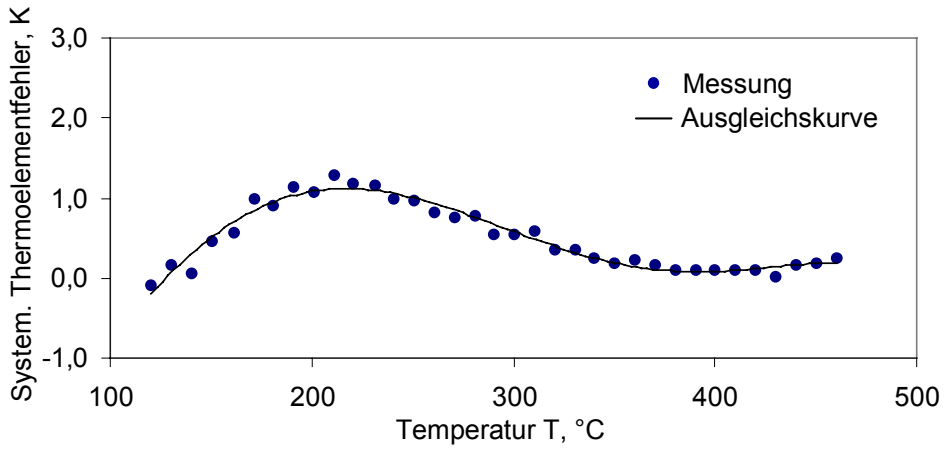


Abbildung 3-2: Beispiel für den gemessenen systematischen Thermoelementfehler, Vergleich mit geeichtem PT-100

Es wurden 16 Thermoelemente für die langen und zunächst 8 Thermoelemente für die kurzen Teststrecken an der Außenwand des Rohres fixiert. Die Befestigung der Thermoelemente erfolgte durch Laserschweißen ohne zusätzlichen Materialauftrag, ausgeführt durch die Laser- und Medizin-Technologie GmbH Berlin.

Bei Vorversuchen mit den kurzen Teststrecken zeigte sich, daß 8 Thermoelemente zur sicheren Abschaltung der Stromversorgung nicht ausreichten. Es wurde um 180° versetzt eine weitere Reihe von 8 Thermoelementen mittels Laser angebracht. Zur größeren Sicherheit wurden die 16 Thermoelemente um 6 weitere ergänzt, diese wurden aber nur für die Sicherheitsabschaltung verwendet und daher nur mit hochtemperaturfestem Keramikzement fixiert.

Die porösen Beschichtungen wurden mit Hilfe eines Elektronenrastermikroskops am Institut für Metallkunde der TU-Berlin untersucht. Korngröße, Schichtdicke und Porosität der Beschichtungsparameter 1 und 2 wurden mit Hilfe von Schliffbildern und Oberflächenaufnahmen der porösen Schicht an verschiedenen Stellen der Testsektionen ermittelt. Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5 zeigen die Oberflächenaufnahmen und Schliffbilder der porösen Schicht mit den Beschichtungsparametern 1 und 2 nach Betrieb der Teststrecken. Die Schliffbilder wurden an dem Ort gemacht, an dem die Siedekrise in den meisten Fällen auftrat. Trotz der hohen Betriebszeiten von ca. 350 Betriebsstunden der einzelnen Teststrecken, lassen sich hier keine Ablagerungen erkennen. Die Abbildung 3-3 zeigt die Korngrößenverteilung der Beschichtungen beider Beschichtungsparameter.

Zur Erhöhung der Sicherheit, d.h. zur Vermeidung einer thermischen Zerstörung der Heizfläche (Burnout), werden die Signale von zehn Thermoelementen zu digitalen Komparatoren geleitet. Die Komparatoren sind mit der Gleichstromversorgung der Testsektion verbunden und bilden ein sogenanntes Burnout-Schutzsystem. Überschreitet eines der Thermoelementsignale den am Komparator eingestellten Wert, so führt dies zu einer Abschaltung der Stromversorgung. Abbildung 3-6 zeigt den schematischen Aufbau einer Teststrecke und des Burnout-Schutzsystems. Als Isolierung gegen die Wärmeverluste der Testsektion werden Mineralwolle und Rohrhalbschalen aus Steinwolle verwendet.

Die thermischen Eigenschaften von Inconel 600 wurden von der Herstellerfirma (Fa. Ethen) bestimmt und sind im Anhang A1 angegeben.

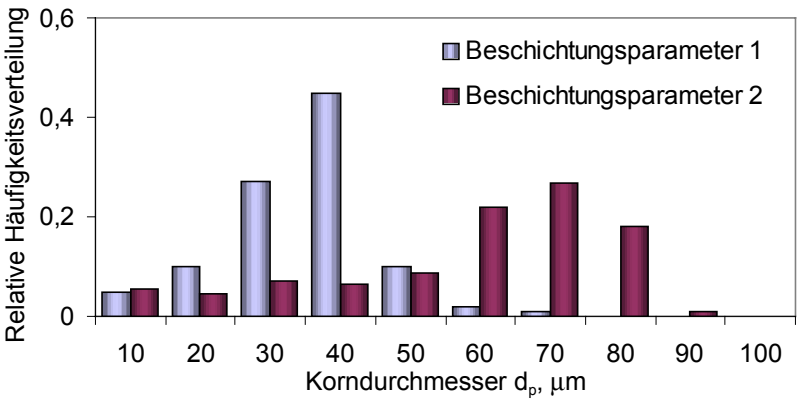


Abbildung 3-3: Korngrößenverteilung in der porösen Schicht

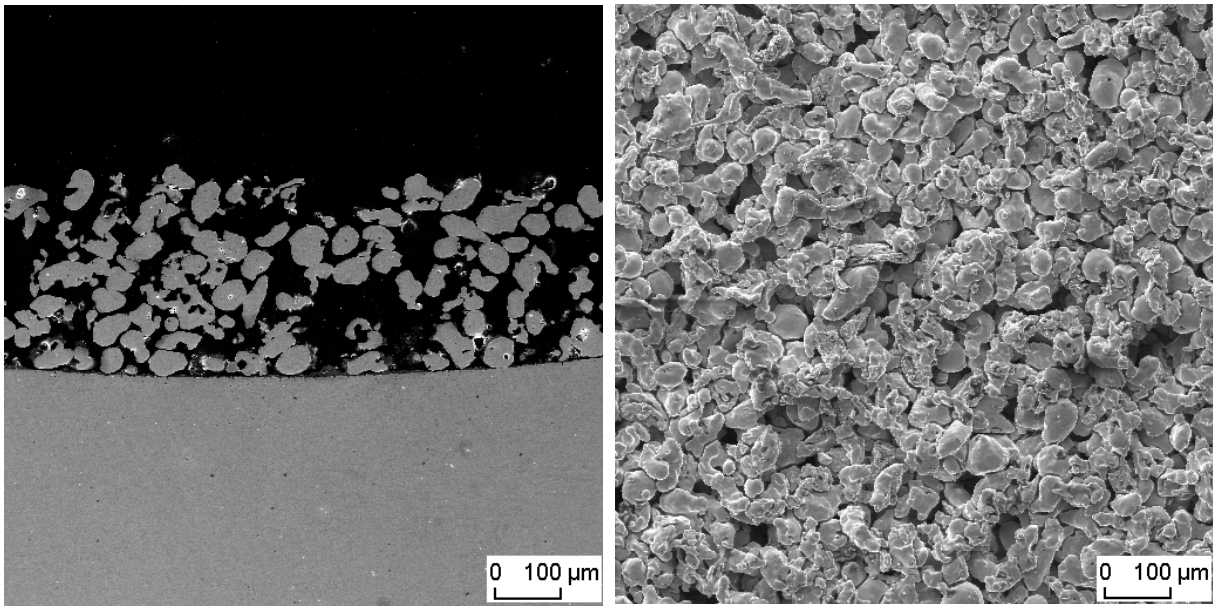


Abbildung 3-4: REM-Aufnahmen von Schnitt und Oberfläche der porösen Schicht mit den Beschichtungsparametern 1 (100-fache Vergrößerung)

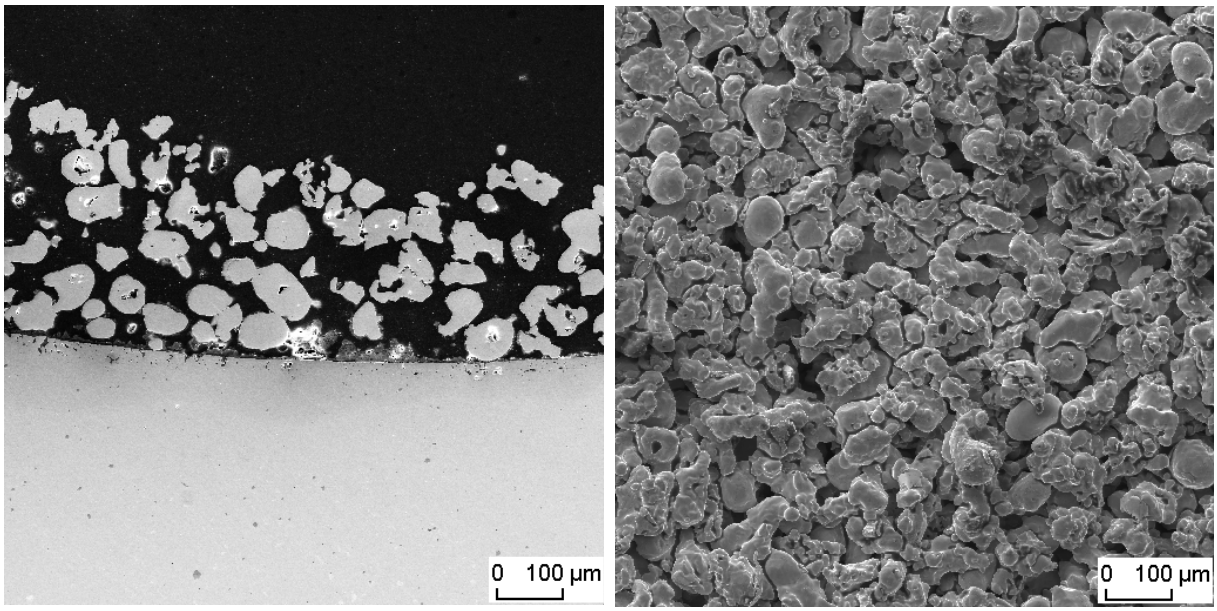


Abbildung 3-5: REM-Aufnahmen von Schnitt und Oberfläche der porösen Schicht mit den Beschichtungsparametern 2 (100-fache Vergrößerung)

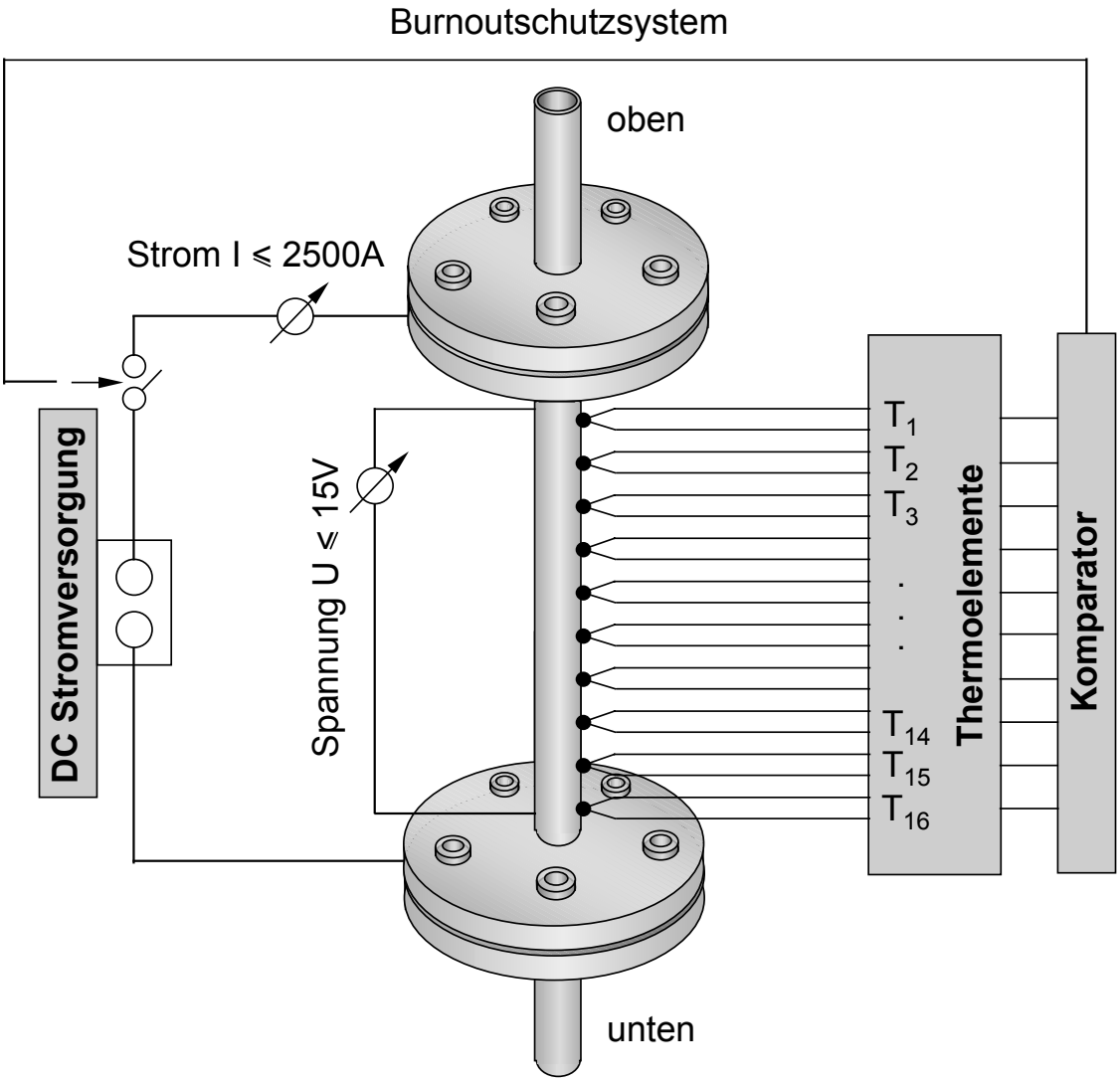


Abbildung 3-6: Schema der Testsektion

3.3 Stromversorgung der Testsektion

Die Stromversorgung der Testsektion erfolgt mit Gleichstrom. Das Stromversorgungssystem ist für eine Stromstärke von 2500 A bei einer Ansteuerung von max. 15 V ausgelegt. Sie kann sowohl durch eine interne manuelle Einstellung als auch durch ein externes Signal gesteuert werden. Die externe Steuerung ermöglicht eine lineare Erhöhung der aufgeprägten Heizleistung mit der Zeit, siehe Abbildung 3-7.

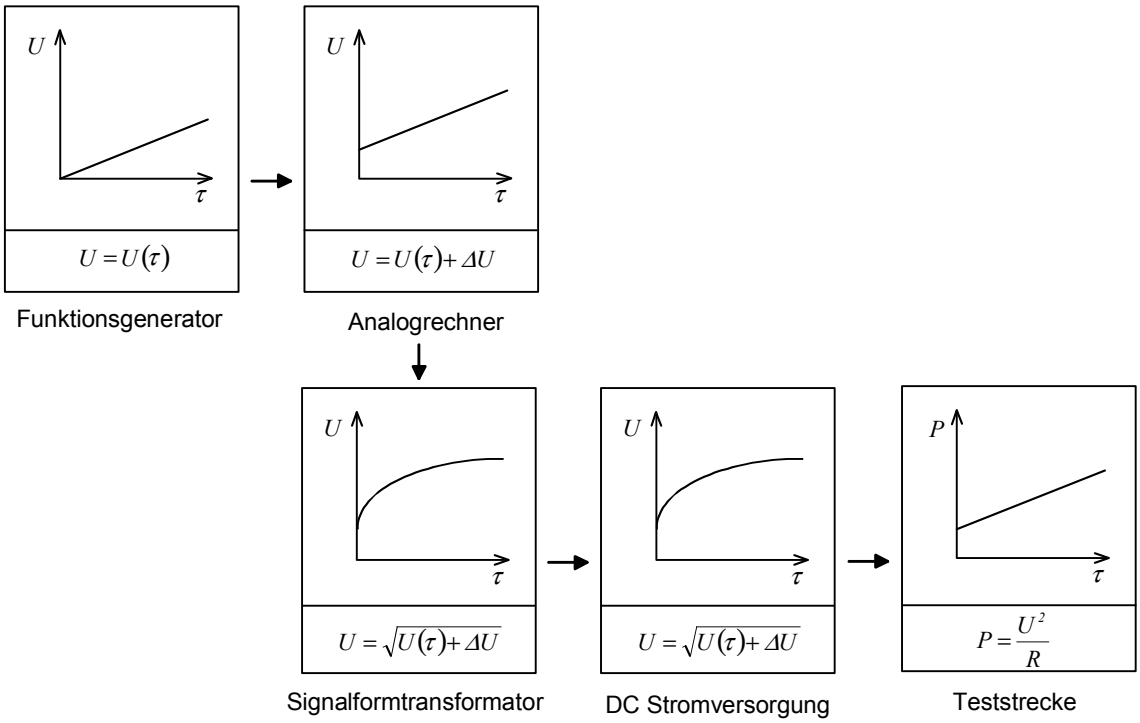


Abbildung 3-7: Schaltbild des Regelsystems der Stromversorgung

Ein Funktionsgenerator erzeugt ein linear mit der Zeit ansteigendes Spannungssignal. Mit einem Analogrechner wird dieses Signal verstärkt und nach Bedarf eine Offset-Spannung hinzu addiert. Das Ausgangssignal des Analogrechners wird mit einem Signaltransformator in ein parabolisch mit der Zeit ansteigendes Signal umgewandelt, so daß die Spannung des Transistor-Netzgerätes auch parabolisch mit der Zeit ansteigt. Mit diesem Verfahren wird eine lineare Steigerung der Heizleistung bzw. der Wärmestromdichte der Teststrecke erreicht.

Die zeitliche Veränderung der Heizleistung läßt sich über die Periode des Funktionsgenerators bei vorgegebener Amplitude einstellen.

3.4 Die Meßwerterfassung

Alle Prozeßgrößen der Versuchsanlage liegen im Spannungsbereich von wenigen mV bis maximal 15 V. Durch eine PC-gestützte Datenerfassungseinheit werden sie verstärkt, digitalisiert, zeitlich gemittelt und umgerechnet.

Die Meßwerterfassung erfolgt mit einem *Keithley Series 500 Measurement and Control System* zusammen mit einem IBM-PC AT 03. Ein SOFT 500 Softwarepaket steuert die Erfassung der Daten, die Umwandlung in SI-Einheiten und das Abspeichern der Ergebnisse. Alle Signale der Versuchsanlage laufen in eine modular aufgebaute Meßbox, die über eine parallele Interfacekarte mit dem IBM AT 03 verbunden ist, siehe Abbildung 3-8. Die Daten werden im ASCII-Code auf der Festplatte gespeichert und können mittels einer Diskette zur weiteren Verarbeitung übertragen werden.

Das Meßwerterfassungsprogramm ermöglicht eine kontinuierliche Aufnahme und Speicherung aller Parameter mit einer Abfragefrequenz von 10 Hz.

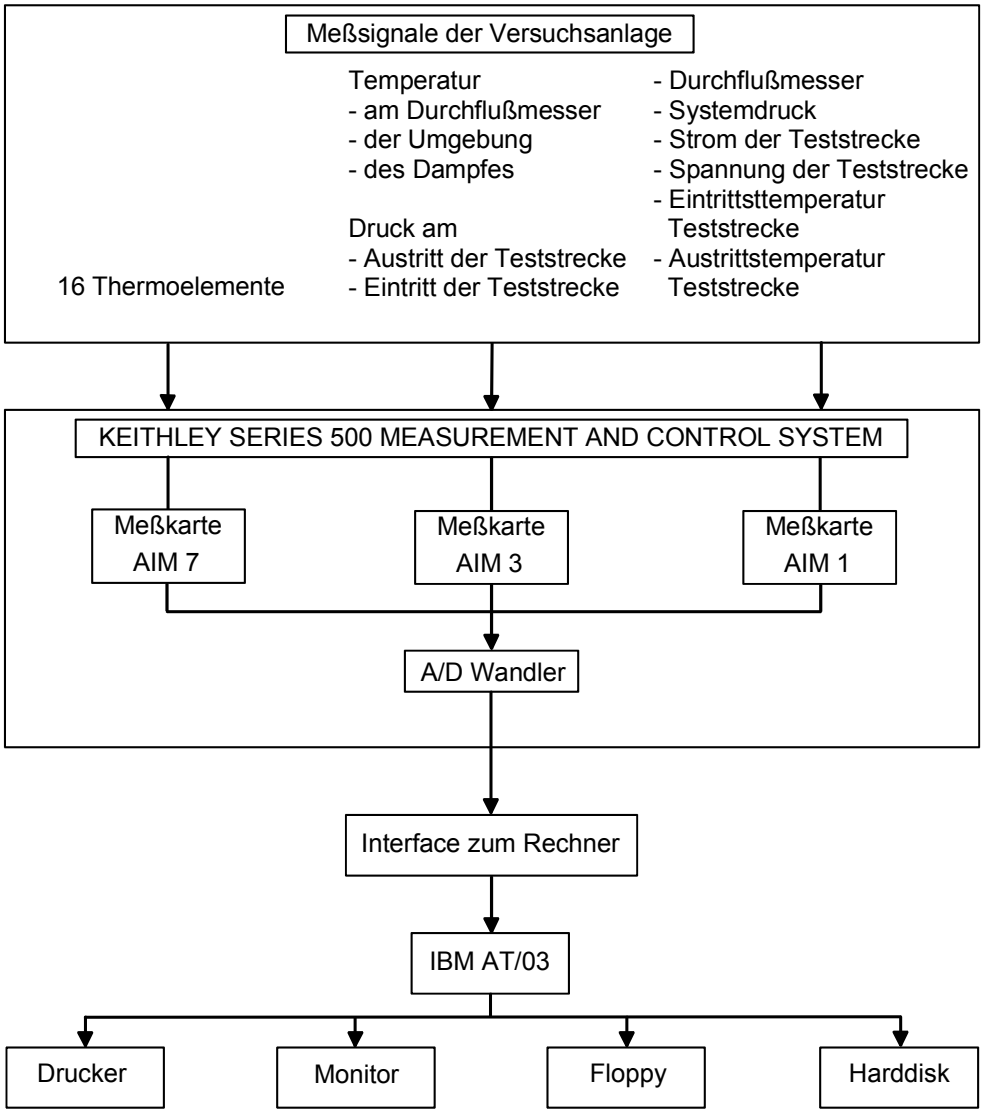


Abbildung 3-8: Aufbau der Meßwerterfassung

3.5 Berechnung der kritischen Wärmestromdichte

Bei Messungen mit gleichmäßiger und stationärer Wärmezufuhr ändert sich der Verlauf der Wandtemperatur längs der Testsektion im Bereich des Blasensiedens nur geringfügig. Vernachlässigt man die Wärmeverluste, dann ist die lokale Wärmestromdichte längs der Teststrecke näherungsweise gleich der über die Heizfläche gemittelten Wärmestromdichte, wobei L_U die Länge zwischen den Meßstellen der Spannung über die Teststrecke ist. Die mittlere Wärmestromdichte berechnet sich aus:

$$\dot{q} = \frac{IU}{\pi D L_U} \quad . \tag{3-1}$$

mit $\dot{q}$: Wärmestromdichte,

I : Stromstärke,

U : Spannung,

L_U : Länge zwischen den Meßstellen der Spannung der Testsektion,

D : Innendurchmesser der Testsektion.

Die kritische Wärmestromdichte $\dot{q}_{cr}$ ist dann die Wärmestromdichte $\dot{q}$, bei der die Siedekrise auftritt.

Die Spannung U und der Strom I wurden mit einer Genauigkeit von $\pm$ 0,5 % gemessen. Berücksichtigt man einen zusätzlichen Fehler durch Wärmeverluste (eine Abschätzung ergab $\pm$ 1 %) so bekommt man eine Meßungenauigkeit, mit der die kritische Wärmestromdichte bestimmt wird von $\pm$ 4 %.

Stimmt der Ort der Siedekrise mit dem Ort der oberen Meßstelle für den Spannungsabfall überein, d.h. der Spannungsabfall im Rohr bis zum Ort der Siedekrise ist bekannt, so kann die

Berechnung der kritischen Wärmestromdichte nach der Formel (3-1) erfolgen (siehe Abbildung 3-6). Bei den Messungen für Dryout ist dies immer der Fall. Anders bei den Messungen für DNB, hier wird auf die Lösung des zweidimensionalen inversen Wärmeleitproblems zurückgegriffen.

Das zweidimensionale inverse Wärmeleitproblem wurde von WILMS [66] gelöst und in Mathematica 3.0 programmiert. Der Lösungsweg wird im folgenden nur kurz dargestellt.

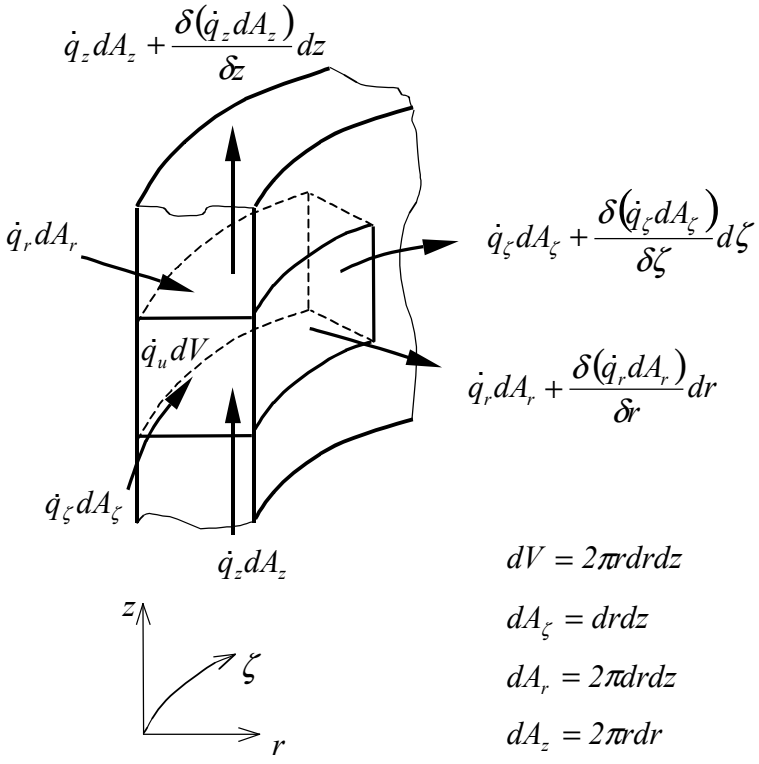


Abbildung 3-9: Differentieller Bilanzraum innerhalb der Rohrwand

Aus dem differentiellen Bilanzraum innerhalb der Rohrwand (Abbildung 3-9) ergibt sich unter Vernachlässigung der Wärmeleitung in ζ-Richtung die folgende Differentialgleichung

$$0 = -\frac{\delta(\dot{q}_z A_z)}{\partial z} dz - \frac{\delta(\dot{q}_r A_r)}{\partial r} dr + \dot{q}_u dV \,. \tag{3-2}$$

Unter der Annahme, daß das Rohrmaterial homogen ist, gilt das Fouriersche Gesetz der Wärmeleitung für homogene isotrope Kontinua in r- und z-Richtung,

$$\dot{q}_r = -\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r} \tag{3-3}$$

und

$$\dot{q}_z = -\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}. \tag{3-4}$$

Die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit wird vernachlässigt ($\lambda \neq f(T)$). Bei der Berechnung des Temperaturfeldes in der Rohrwand wird die poröse Beschichtung vernachlässigt.

Weiterhin gilt die Annahme der idealen Isolierung der Testsektion an sich und die Annahme der idealen Isolierung der Testsektion an den Enden der Rohrstrecke (Anfang und Ende in z-Richtung), d.h. es treten keine Wärmeverluste in z-Richtung auf. Die Genauigkeit der Berechnung nimmt mit größerer Entfernung von den Randwerten zu.

Die direkte Beheizung der Teststrecke liefert die homogene Wärmeproduktionsdichte

$$\dot{q}_u = \frac{U \cdot I}{V_{Rohr}}. \tag{3-5}$$

Für den stationären Fall ergibt sich nun mit den oben festgelegten Annahmen die zweidimensionale Wärmeleitgleichung für den Zylinder

$$0 = \frac{\partial^2 T(r,z)}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T(r,z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T(r,z)}{\partial r} + \frac{\dot{q}_u}{\lambda_{Inconel}} \tag{3-6}$$

mit den Randbedingungen der 1. Art

$$T(r = R_a, z) = T_{Ra}(z), \tag{3-7}$$

$$T(r, z = L) = T_{Ra}(z = L), \tag{3-8}$$

$$T(r, z = 0) = T_{Ra}(z = 0) \tag{3-9}$$

und den Randbedingungen der 2.Art

$$\frac{\partial T(r = R_a, z)}{\partial r} = 0, \tag{3-10}$$

$$\frac{\partial T(r, z = 0)}{\partial r} = 0, \tag{3-11}$$

$$\frac{\partial T(r, z = L)}{\partial r} = 0. \tag{3-12}$$

Nach Anwendung des Produktansatzes $G(r,z) = Z(z)R(r)$ mit anschließender Trennung der Variablen und Lösung der Besseldifferentialgleichung für $R(r)$ erhält man die analytische Lösung mit modifizierter Besselfunktion

$$T(r,z) = T_{Ra} + \frac{\dot{q}_u R_a^{\,2}}{4\lambda_{Inconel}} - \frac{\dot{q}_u r^2}{4\lambda_{Inconel}} + \frac{\dot{q}_u R_a^{\,2}}{2\lambda_{Inconel}} ln\left(\frac{r}{R_a}\right) + E\sum_{n=2}^{k} A_n \cdot I_n(\chi_n(R_a - r))cos(\chi_n \cdot z) \tag{3-13}$$

mit

$$E = \frac{T_{Ra}(z)}{cos(\frac{\pi \cdot z}{L})},$$

$$A_n = \frac{T_{Ra}(z) - E\sum_{i}^{n-1} A_i \, cos(\chi_i z)}{E \, cos(\chi_n z)}$$

und

$$\chi_n = \frac{n \cdot \pi}{L}.$$

Das daraus resultierende zweidimensionale Temperaturfeld in der Rohrwand ermöglicht die Berechnung der örtlichen Wärmestromdichte an der Innenseite des Rohres (Heizfläche). Die kritische Wärmestromdichte ist die Wärmestromdichte an dem Ort z_{cr}, an dem die Siedekrise auftritt (identifiziert durch den nahezu sprunghaften Anstieg der gemessenen Wandtemperatur):

$$\dot{q}_{cr}(r = R_i, z_{cr}) = -\lambda_{Inconel} \frac{\delta T(r = R_i, z_{cr})}{\delta r} \approx -\lambda_{Inconel} \frac{T(R_i, z_{cr}) - T(R_i - \Delta r, z_{cr})}{\Delta r}. \tag{3-14}$$

3.6 Der Versuchsablauf

Vor jedem Versuch wird das Kreislaufwasser mindestens drei Stunden filtriert, entsalzt und entgast. Für alle Messungen der kritischen Wärmestromdichte wird die Anlage von der Atmosphäre getrennt. Bei manueller Steuerung der Kühlleistung des Kondensators wird der Systemdruck langsam gesteigert. Ist der vorgesehene Systemdruck erreicht, wird von manueller Steuerung auf automatische Regelung umgestellt. Der Druck wird jetzt auf ± 2 kPa geregelt. Nun werden die Massenstromdichte sowie die Eintrittstemperatur der Testsektion eingestellt.

Ist das System stabil, d.h. zeigt das Meßwerterfassungsprogramm eine Änderung der relevanten Parameter (Druck, Unterkühlung und Massenstromdichte) kleiner ± 0,5 % innerhalb einer Minute an, wird mit der Dauermessung begonnen. Mit dem Funktionsgenerator wird die Wärmestromdichte linear mit der Zeit erhöht. Die Steigerungsrate beträgt 0,024–0,048 W/cm^2 pro Sekunde. Kommt es während der Annäherung an die Siedekrise zu einer Temperaturerhöhung, wird der Funktionsgenerator gestoppt. Daraus ergeben sich zwei Möglichkeiten:

- Die Temperatur steigt bei konstanter Heizleistung mehr oder minder stark mit der Zeit an: Die Siedekrise ist erreicht bzw. überschritten. Der Komparator schaltet bei einer vorgegebenen Temperatur (700°C) die Heizleistung ab.
- Die Temperatur steigt nicht weiter an: Die Siedekrise ist noch nicht erreicht, so daß weiterhin Heizleistung aufgeprägt werden muß.

4 EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

4.1 Versuchsergebnisse

Insgesamt wurden 1125 Messungen der kritischen Wärmestromdichte bei mäßig hohen Drücken in lotrechten, mit Wasser durchströmten und homogen beheizten Kreisrohren durchgeführt. Es erfolgten 383 CHF-Messungen an glatten Rohren und 742 CHF-Messungen an Kreisrohren mit ausgewählten porösen Beschichtungen. Die Eigenschaften der verwendeten Testsektionen sind im Kapitel 3 in der Tabelle 3-1 dargestellt.

Bei der vorliegenden experimentellen Untersuchung der kritischen Wärmestromdichte wurden zum Erreichen der unterschiedlichen Strömungsformen wie DNB, Grenzdampfgehalt, oder Microfilm-Dryout neben der Geometrie der Teststrecken auch die Strömungsparameter wie z.B. Massenstromdichte $\dot{m}$, Eintrittsunterkühlung ΔT_{sub} und Druck p variiert. Einen Überblick über den Versuchsparameterbereich der durchgeführten CHF-Messungen gibt die Tabelle 4-1. Mit jeder Teststrecke der gleichen Geometrie wurden die gleichen Parameterpaarungen angefahren, so daß hier ein direkter Vergleich zwischen den glatten und den porös beschichteten Rohren erfolgen kann. Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wurde jede dieser Messungen für einen Parameterbereich drei bis viermal wiederholt. Die Reproduzierbarkeit der gewonnenen Meßdaten lag im Bereich der Meßungenauigkeit der kritischen Wärmestromdichte von ± 4 %.

Für die in diesem Kapitel nachfolgenden Diagramme wurde der arithmetische Mittelwert der kritischen Wärmestromdichte gebildet.

Die Eingrenzung des Parameterbereichs der durchgeführten CHF-Messungen erfolgte zum einen durch die Obergrenze der maximal zur Verfügung stehenden Heizleistung für die Testsektion und zum anderen durch die Stabilitätsgrenze der Strömung.

So führt zum Beispiel der Einsatz von Zusatzheizungen zum Erreichen von Unterkühlungen $\Delta T_{sub} < 15$ K bei mäßig hohen Drücken zu starken Schwankungen des Massenstroms und bei niedrigen Drücken kommt es bei Messungen mit Eintrittsunterkühlungen $\Delta T_{sub} > 50$ K zu gut hörbaren Kondensationsschlägen in der Testsektion.

Tabelle 4-1: Parameterbereiche der durchgeführten CHF-Messungen

Parameter	Testsektionen der Geometrie L/D = 14,1	Testsektionen der Geometrie L/D = 50
Systemdruck p, MPa	0,12 / 0,4 / 0,7	0,12 / 0,4 / 0,7
Massenstromdichte $\dot{m}$, kg/m^{2}s	25 / 50 / 100 / 200* / 300*	25 / 50 / 75 / 100 / 125 / 150 / 175
Eintrittsunterkühlung ΔT_{sub}, K	15 / 30 / 50	15 / 30 / 50

* keine CHF-Messung für das Rohr mit den Beschichtungsparametern 1 aufgrund zu geringer zur Verfügung stehender Heizleistung

Grenzen des Versuchsparameterbereichs durch die maximal zur Verfügung stehenden Heizleistung der Testsektion ergaben sich beim glatten Rohr bei mäßig hohem Druck von $p = 0{,}7$ MPa. Hier wurde für die kurzen Teststrecken ($L/D = 14{,}1$) ab einer Massenstromdichte $\dot{m} > 300$ kg/m^{2}s und bei den langen Testsektionen ($L/D = 50$) für Massenstromdichten ab $\dot{m} > 175$ kg/m^{2}s die CHF für das glatte Rohr nicht mehr erreicht. Messungen der kritischen Wärmestromdichte für die Rohre mit poröser Beschichtungen erfolgten hier nicht mehr, da keine CHF-Messungen für das unbeschichtete Rohr zum Vergleich zur Verfügung standen. Für die beschichtete Teststrecke mit den Beschichtungsparametern 1 und der Rohrgeometrie $L/D = 14{,}1$ konnten bei einem Druck von 0,7 MPa und einer Massenstromdichte von $\dot{m} = 200$ kg/m^{2}s sowie 300 kg/m^{2}s keine Messungen der kritischen Wärmestromdichte erfolgen. Die maximal zur Verfügung stehende Heizleistung von 490 W/cm^2 war auch hier zu gering (Tabelle 4-1).

4.2 Messung der kritischen Wärmestromdichte

Bei DNB-Phänomenen wird das Auftreten der Siedekrise im mittleren Bereich der Teststrecke erwartet. Bei Dryout-Phänomenen tritt dagegen die Siedekrise nahe dem Austritt der Teststrecken auf. Der Dampfvolumenanteil in der Testsektion nimmt hier infolge der homogenen Beheizung in Strömungsrichtung monoton zu, am Austritt ist der Dampfgehalt am größten.

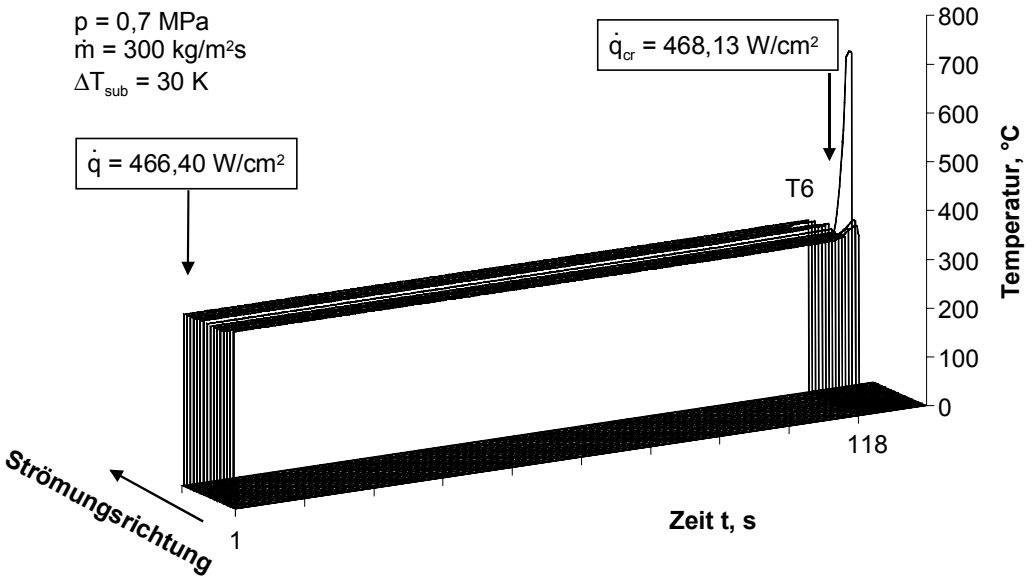


Abbildung 4-1: Zeitlicher Verlauf der Wandtemperatur längs der glatten Teststrecke beim Auftreten der Siedekrise bei erhöhter Massenstromdichte und erhöhtem Druck

Die Abbildung 4-1, Abbildung 4-2 und die Abbildung 4-3 zeigen den zeitlichen Verlauf der Wandtemperatur längs der Teststrecken (technisch glatt) beim Auftreten der Siedekrise. Zusätzlich sind die zu einem bestimmten Zeitpunkt aufgeprägten Wärmestromdichten eingezeichnet. Jedem Temperaturverlauf ist ein Thermoelement auf der Rohraußenwand zugeordnet.

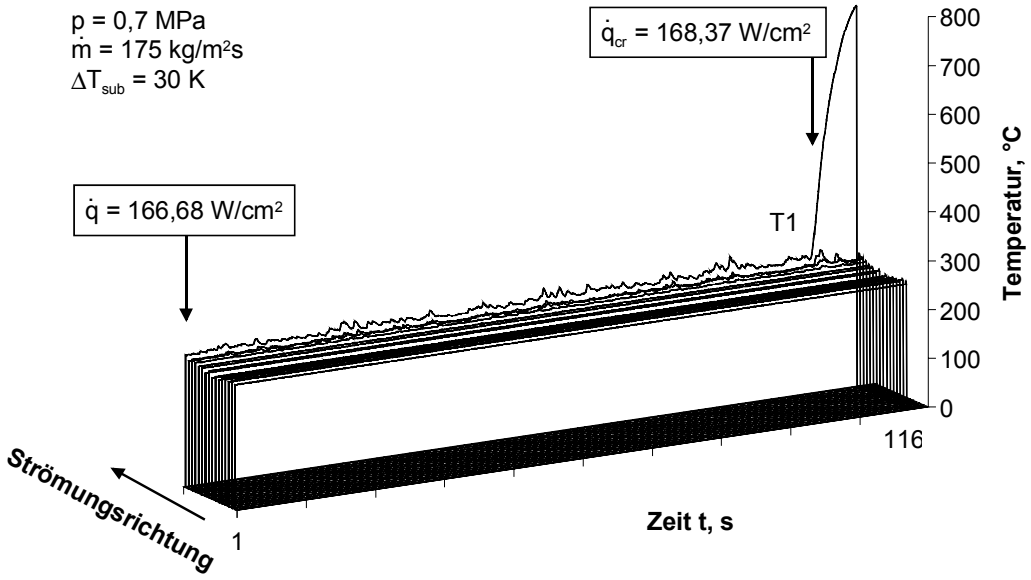


Abbildung 4-2: Zeitlicher Verlauf der Wandtemperatur längs der glatten Teststrecke beim Auftreten der Siedekrise bei mittlerer Massenstromdichte und erhöhtem Druck

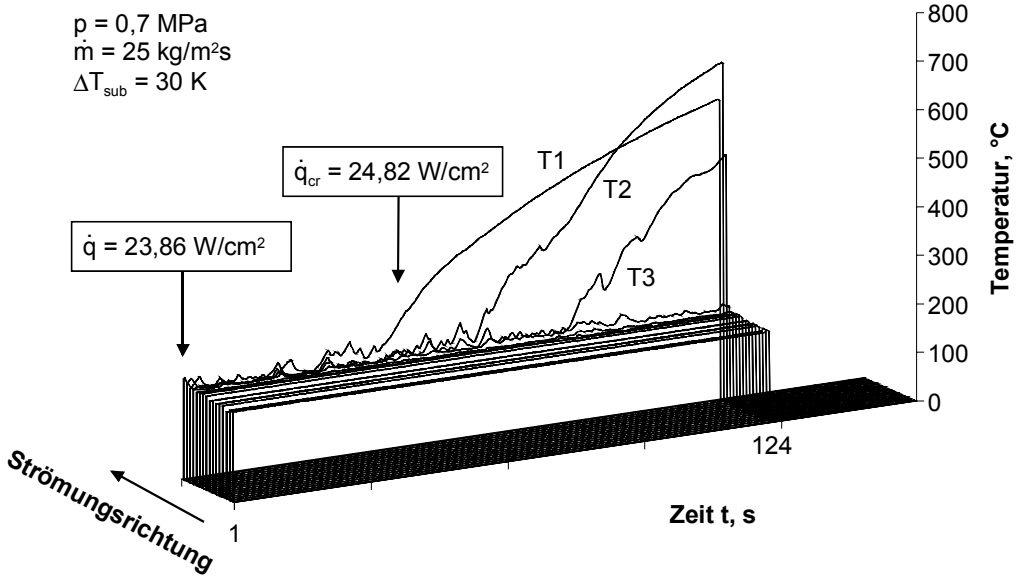


Abbildung 4-3: Zeitlicher Verlauf der Wandtemperatur längs der glatten Teststrecke beim Auftreten der Siedekrise bei niedriger Massenstromdichte und erhöhtem Druck

Maßgebend für das Auftreten der Siedekrise ist der zeitliche Verlauf der Temperatur an einem der Thermoelemente bei festgehaltenem $\dot{q}$. Die Stromversorgung wird abgeschaltet, wenn die an diesem Ort gemessene Temperatur 700 °C erreicht hat. Die zugehörige Wärmestromdichte ist $\dot{q}_{cr}$. In Abbildung 4-1 trat die Siedekrise im Bereich nahe des Eintritts der Testsektion auf. Bei Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3 trat die kritische Wärmestromdichte am Austritt der Testsektion auf.

Die folgenden Punkte fassen die wesentlichen Zusammenhänge der Abbildung 4-3, Abbildung 4-2 und Abbildung 4-1 zusammen:

- Ab der kritischen Wärmestromdichte $\dot{q}_{cr}$ ist der zeitliche Temperaturgradient für eine erhöhte Massenstromdichte (Abbildung 4-1) steiler als der Gradient bei mittlerer und geringer Massenstromdichte (Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3). Die Ursache für den flacheren Anstieg bei kleinerer Massenstromdichte ist auf den Dryout zurückzuführen.
- Im Bereich der Heizleistungszufuhr zeigen sich in Abbildung 4-3 und Abbildung 4-2 hochfrequente Temperaturschwankungen. Auf Grund der kleinen Zeitkonstante der Testsektion (eine Abschätzung ergab 2 ms) und einer Ansprechzeit der Thermoelemente von 25 ms wird der Wechsel zwischen Wiederbenetzung und Austrocknung der Heizfläche sichtbar. Ab der kritischen Wärmestromdichte $\dot{q}_{cr}$ erscheint der entscheidende Temperaturverlauf geglättet. Der die Heizfläche benetzende Flüssigkeitsfilm ist an diesem Ort ausgetrocknet.

Die zeitlichen Temperaturverläufe für die Teststrecken glatt und porös beschichtet unterscheiden sich in den Werten von $\dot{q}_{cr}$. Die folgende Tabelle zeigt eine Auswahl der verschiedenen kritischen Wärmestromdichten für die Rohre glatt und beschichtet bei $L/D = 50$ ($\dot{m} = 25,\ 175$ kg/m^{2}s) sowie $L/D = 14{,}1$ ($\dot{m} = 300$ kg/m^{2}s) bei sonst gleichen Versuchsparametern.

Für $\dot{q}_{cr}$ wurde der arithmetische Mittelwert der Wiederholungsmessungen eingesetzt. Man erkennt, daß poröse Beschichtungen in Abhängigkeit von den Beschichtungsparametern, der Rohrgeometrie und der Strömungsparameter die Werte von $\dot{q}_{cr}$ negativ oder positiv beeinflussen können. Diese Beobachtung wird in den folgenden Kapiteln genauer untersucht.

Tabelle 4-2: Auswahl verschiedener kritischer Wärmestromdichten für die Rohre glatt und beschichtet bei sonst gleichen Versuchsparametern ($L/D = 50$)

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{sub} , K	$\dot{q}_{cr}$, W/cm²	$\dot{q}_{cr\,P1}$, W/cm²	$\dot{q}_{cr\,P2}$, W/cm²
0,7	300	30	468,13	Keine CHF	450,24
0,7	175	30	168,37	165,67	159,58
0,7	25	30	24,82	24,26	24,46
0,12	300	30	208,41	367,07	308,75
0,12	175	30	142,22	108,05	94,01
0,12	25	30	24,46	24,82	24,05

p : Systemdruck $\dot{m}$: Massenstromdichte

ΔT_{sub} : Eintrittsunterkühlung $\dot{q}_{cr}$: $\dot{q}_{CHF}$ für glattes Rohr

$\dot{q}_{crP1}$: $\dot{q}_{CHF}$ für Beschichtungsparameter 1 $\dot{q}_{crP2}$: $\dot{q}_{CHF}$ für Beschichtungsparameter 2

4.3 Einfluß poröser Beschichtungen und Strömungsparameter

Die folgenden Kapitel, Kapitel 4.3.1 bis Kapitel 4.3.3, sollen den Einfluß der porösen Beschichtung gegenüber dem unbeschichteten Rohr auf die kritische Wärmestromdichte in Abhängigkeit von der Massenstromdichte, vom Druck und von der Eintrittsunterkühlung verdeutlichen. Für eine bessere Übersicht wurde in den nachfolgenden Diagrammen der arithmetische Mittelwert der Wiederholungsmessungen in jedem Parameterpaar abgebildet. Die Daten werden mit den Korrelationen von MACBETH [42], KATTO ET AL. [26], WEBER [65] und YILDIZ [68] (glattes Rohr) verglichen.

Zusätzlich wurde ein direkter Vergleich der ermittelten CHF-Daten zwischen glatter und porös beschichteter Oberfläche erstellt. Die Werte der kritischen Wärmestromdichte bei jedem Parameterpaar für die Messungen bei porös beschichteter Heizfläche ($\dot{q}_{crP1}$ oder $\dot{q}_{crP2}$) und bei unbeschichteter Heizfläche ($\dot{q}_{cr}$) wurden zueinander ins Verhältnis gesetzt ($\dot{q}_{crP1}/\dot{q}_{cr}$ oder $\dot{q}_{crP2}/\dot{q}_{cr}$). $\dot{q}_{crP1}$ steht für die gemessene kritische Wärmestromdichte für die Rohre mit den Beschichtungsparametern 1 und $\dot{q}_{crP2}$ steht für die gemessene kritische Wärmestromdichte für die Rohre mit den Beschichtungsparametern 2.

4.3.1 Einfluß der Massenstromdichte

Die Abbildung 4-4 bis Abbildung 4-9 verdeutlichen den Einfluß der porösen Beschichtung gegenüber dem unbeschichteten Rohr auf die kritische Wärmestromdichte in Abhängigkeit von der Massenstromdichte bei einer festen Eintrittsunterkühlung von ΔT_{sub} = 50 K. Die Darstellungen erfolgen für einen Druck von p = 0,12; 0,4 und 0,7 MPa sowie für die Geometrien L/D = 50 (Abbildung 4-4) und L/D = 14,1 (Abbildung 4-5).

Die Abbildung 4-4 und die Abbildung 4-5 zeigen im Bereich niedriger Massenstromdichten einen annähernd linearen Anstieg der kritischen Wärmestromdichte mit zunehmender Massenstromdichte sowohl bei den porös beschichteten Rohren als auch bei glatten Rohren. Im Bereich hoher Massenstromdichten flacht der Anstieg für beschichtet und unbeschichtet ab.

Für die CHF-Messungen mit den Rohren der Geometrie L/D = 50 (Abbildung 4-4) nimmt die kritische Wärmestromdichte mit steigender Massenstromdichte infolge poröser Beschichtung ab. Bei einem Druck von p = 0,12 MPa zeigt sich bei poröser Beschichtungen eine deutliche Verringerung der kritischen Wärmestromdichte oberhalb einer Massenstromdichte von $\dot{m}$ = 50 kg/m^{2}s (Abbildung 4-4 (a)). Mit steigendem Druck nimmt dieser Einfluß ab, so daß sich bei einen Druck von 0,7 MPa ein nur noch geringer negativer Einfluß der porösen Beschichtung auf die kritische Wärmestromdichte ab einer Massenstromdichte von $\dot{m}$ > 125 kg/m^{2}s bemerkbar macht (Abbildung 4-4 (c)). Weiterhin fällt auf, daß die Verringerung der kritischen Wärmestromdichte bei der porösen Schicht mit

den Beschichtungsparametern 2 gegenüber dem glatten Rohr am größten ist (Abbildung 4-4 (a) und (b)). Die Korrelation von MACBETH [42] zeigt hier die beste Übereinstimmung mit den gemessenen CHF-Daten. Die Gleichung von YILDIZ [68] (glattes Rohr) unterschätzt die Daten (Abbildung 4-4). Für einen Druck von 0,12 MPa stimmt die Vorhersage von YILDIZ [68] (glattes Rohr) zufälligerweise mit den Daten für das beschichtete Rohr überein (Abbildung 4-4 (a)).

Für eine Rohrgeometrie von $L/D = 14{,}1$ führen poröse Beschichtungen zu einer Erhöhung der kritischen Wärmestromdichte gegenüber dem glatten Rohr bei sonst gleichen Bedingungen (Abbildung 4-5). Eine eindeutige Erhöhung der kritischen Wärmestromdichte erfolgt bei einem Druck von 0,12 MPa oberhalb einer Massenstromdichte von 25 kg/m^{2}s für die Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 2 und für die poröse Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 1 ab einer Massenstromdichte von $\dot{m} > 50$ kg/m^{2}s. Die Korrelation von WEBER [65] zeigt bis zu einer Massenstromdichte von 100 kg/m^{2}s die beste Übereinstimmung für das glatte Rohr (Abbildung 4-5 (a)).

Bei mäßig hohen Drücken (Abbildung 4-5 (b) und (c)) ergibt sich bei der porösen Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 1 weiterhin ein positiver Effekt oberhalb einer Massenstromdichte von $\dot{m} = 100$ kg/m^{2}s. Hier konnte die kritische Wärmestromdichte nicht immer erreicht werden, siehe Abbildung 4-5 (b) $\dot{m} = 300$ kg/m^{2}s sowie Abbildung 4-5 (c) $\dot{m} = 200$ kg/m^{2}s und 300 kg/m^{2}s. Die vorhandene Gleichstromversorgung (15 V, 2500 A) der Testsektion reichte nicht aus. Für eine Rohrgeometrie von $L/D = 14{,}1$ kann mit der vorhandenen Gleichstromversorgung eine Wärmestromdichte von maximal 490 W/cm^2 aufgeprägt werden. Die Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 1 führte hier also zu einer Verbesserung der CHF. Für die Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 2 zeigt sich bei mäßig hohen Drücken nur bei einem Druck von 0,7 MPa und einer Massenstromdichte von 100 kg/m^{2}s eine deutliche Erhöhung der kritischen Wärmestromdichte (Abbildung 4-5 (c)).

Mit Zunahme des Druckes nimmt auch die Vorhersagegenauigkeit der Korrelationen von KATTO ET AL. [26] und WEBER [65] zu. Die Korrelation von YILDIZ [68] (glattes Rohr) dagegen überschätzt ab einer Massenstromdichte von 100 kg/m^{2}s für alle Drücke die in dieser Arbeit ermittelten CHF-Daten. Die Korrelation von MACBETH [42] unterschätzt die kritische Wärmestromdichte. Sie liegt außerhalb ihres Gültigkeitsbereichs (Abbildung 4-5).

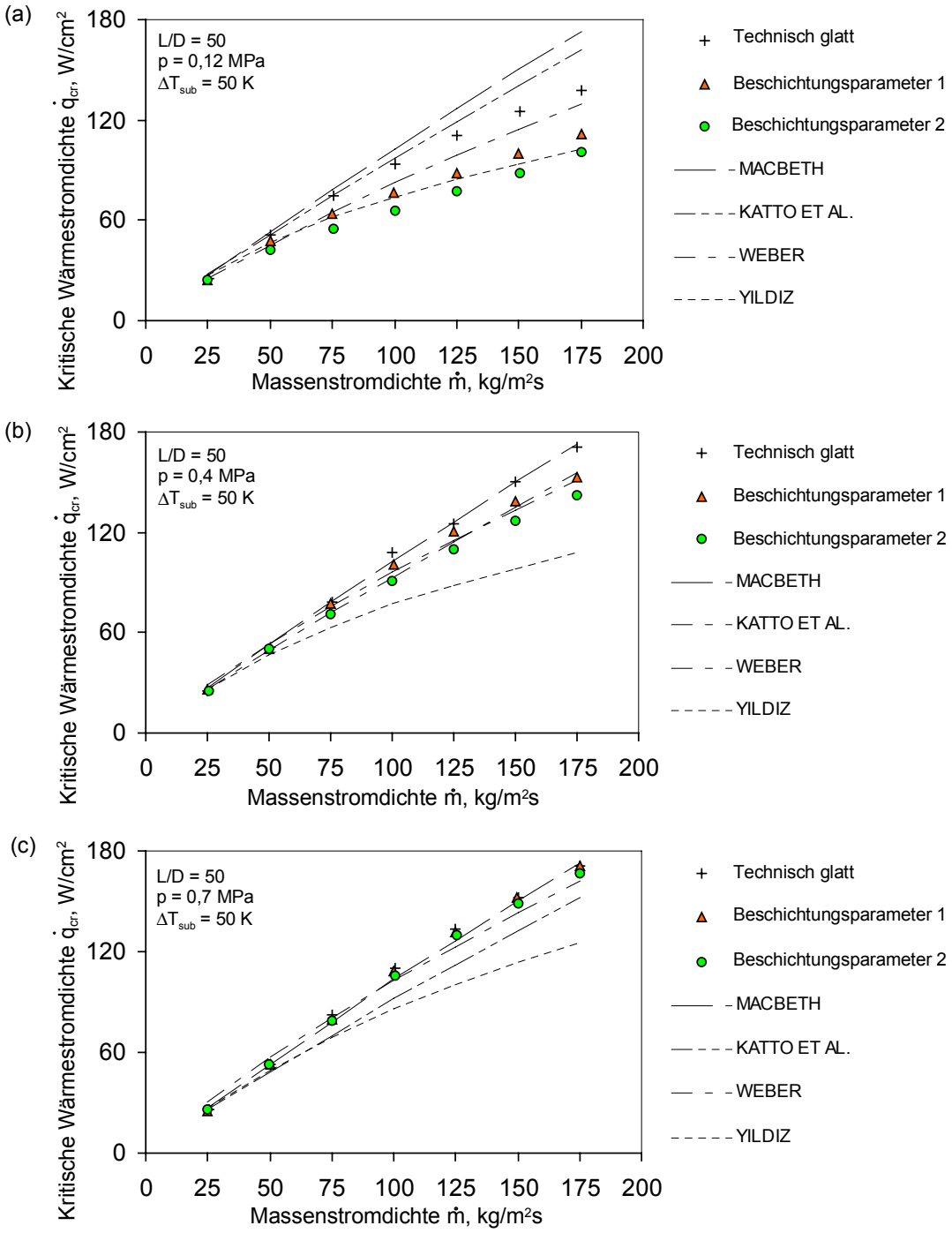


Abbildung 4-4: Einfluß der porösen Beschichtung auf die kritische Wärmestromdichte bei variierter Massenstromdichte (L/D = 50)

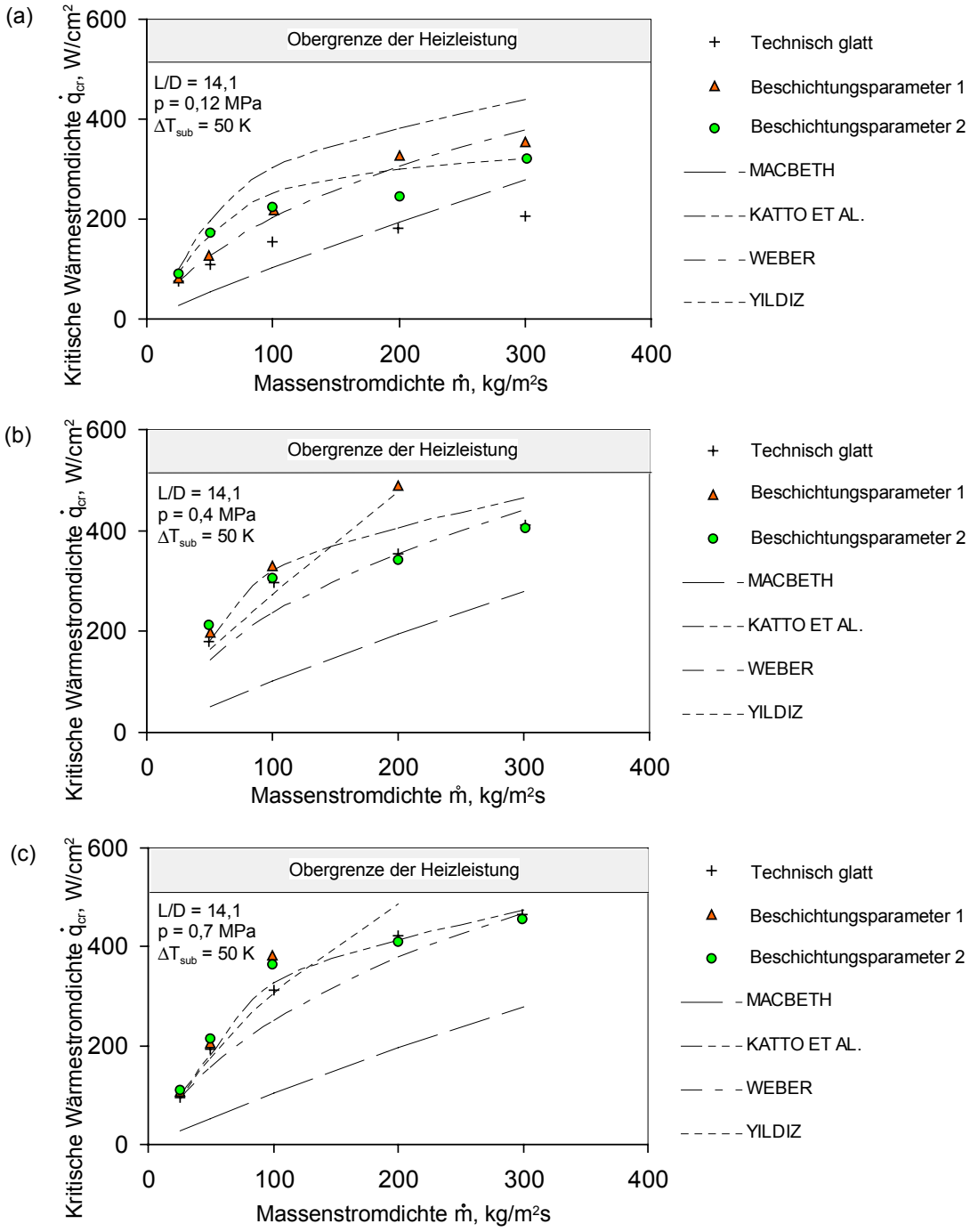


Abbildung 4-5: Einfluß der porösen Beschichtung auf die kritische Wärmestromdichte bei variierter Massenstromdichte (L/D = 14,1)

Einen direkten Vergleich der experimentell ermittelten CHF-Daten bei glatter und porös beschichteter Heizfläche liefern die Abbildung 4-6 bis Abbildung 4-9.

Es werden die Abbildungen für einen Druck von p = 0,12 MPa dargestellt, da hier der größte Einfluß der porösen Beschichtungen auf die kritische Wärmestromdichte gegenüber dem glatten Rohr besteht. Die Darstellungen erfolgen für L/D = 14,1 und L/D = 50.

Aus der Abbildung 4-6 bis Abbildung 4-9 läßt sich erkennen, daß der Einfluß poröser Beschichtungen auf die CHF nicht nur von der Massenstromdichte und dem Druck, sondern auch von der Eintrittsunterkühlung abhängt. Der Einfluß poröser Beschichtungen auf die kritische Wärmestromdichte kann positiv oder negativ sein.

Eine maximale Verringerung der kritischen Wärmestromdichte von 40 % wurde bei der porösen Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 2 und der Rohrgeometrie L/D = 50 beobachtet ($\dot{m}$ = 150 kg/m^{2}s, ΔT_{sub} = 15 K). Für die poröse Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 1 ergibt sich eine maximale Verschlechterung der CHF von 28 % ($\dot{m}$ = 175 kg/m^{2}s, ΔT_{sub} = 15 K).

Im Gegensatz dazu zeigt sich bei der Geometrie von L/D = 14,1 ein positiver Effekt auf die CHF infolge poröser Beschichtung. Eine maximale Verbesserung der kritischen Wärmestromdichte erfolgt bei der porösen Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 1 (Abbildung 4-8). Hier wurde gegenüber dem glatten Rohr eine maximale Steigerung von 80 % bei sonst gleichen Versuchsbedingungen gemessen ($\dot{m}$ = 200 kg/m^{2}s, ΔT_{sub} = 50 K). Bei der porösen Schicht mit den Beschichtungsparametern 2 beträgt die maximale Verbesserung 58 % ($\dot{m}$ = 50 kg/m^{2}s, ΔT_{sub} = 50 K).

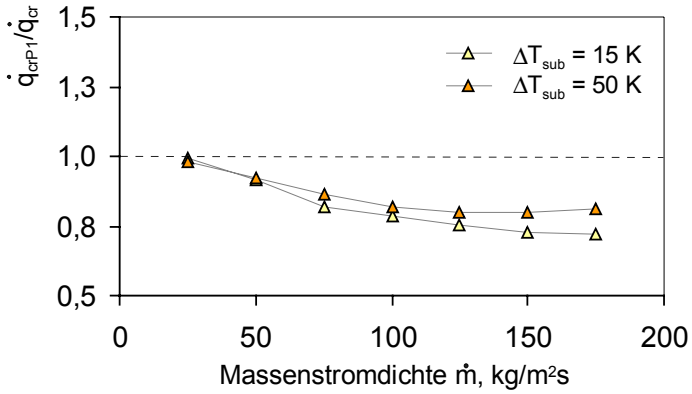


Abbildung 4-6: Einfluß der Massenstromdichte auf die Abnahme der kritischen Wärmestromdichte mit ($\dot{q}_{crP1}$) und ohne ($\dot{q}_{cr}$) poröse Beschichtung ($L/D = 50,\ p = 0{,}12$ MPa, Beschichtungsparameter 1)

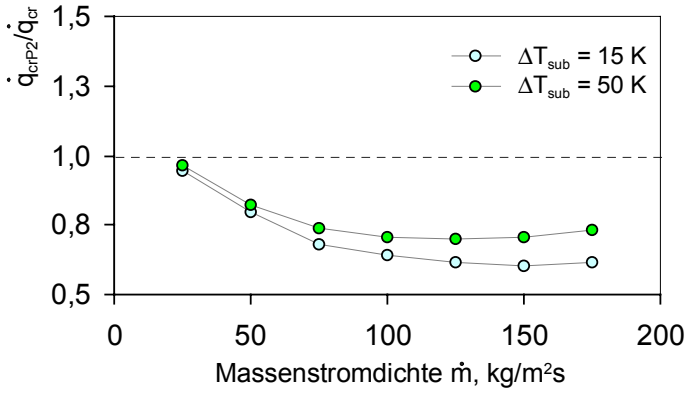


Abbildung 4-7: Einfluß der Massenstromdichte auf die Abnahme der kritischen Wärmestromdichte mit ($\dot{q}_{crP2}$) und ohne ($\dot{q}_{cr}$) poröse Beschichtung ($L/D = 50,\ p = 0{,}12$ MPa, Beschichtungsparameter 2)

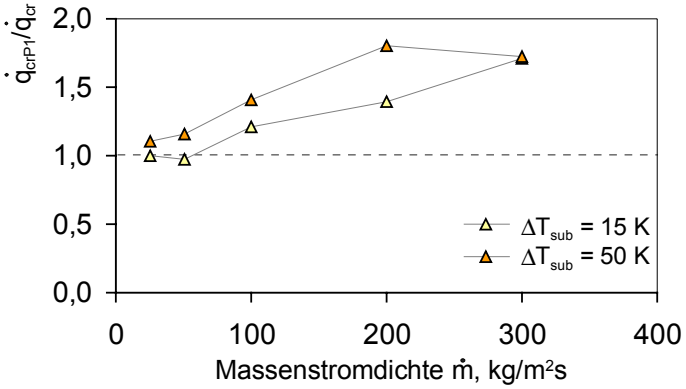


Abbildung 4-8: Einfluß der Massenstromdichte auf die Intensivierung der kritischen Wärmestromdichte mit ($\dot{q}_{crP1}$) und ohne ($\dot{q}_{cr}$) poröse Beschichtung (L/D = 14,1, p = 0,12 MPa, Beschichtungsparameter 1)

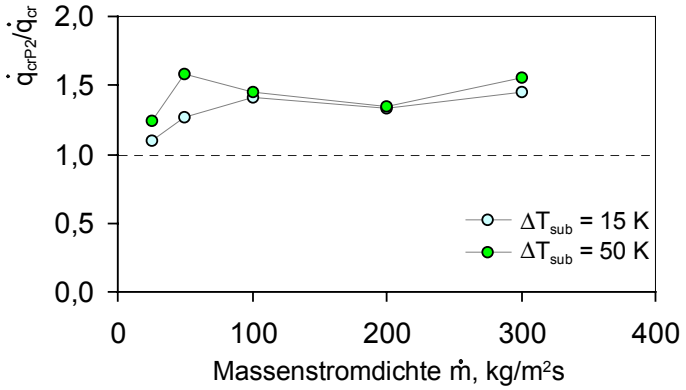


Abbildung 4-9: Einfluß der Massenstromdichte auf die Intensivierung der kritischen Wärmestromdichte mit ($\dot{q}_{crP2}$) und ohne ($\dot{q}_{cr}$) poröse Beschichtung (L/D = 14,1, p = 0,12 MPa, Beschichtungsparameter 2)

Wie die Abbildung 4-6 bis Abbildung 4-9 zeigen, nimmt der Einfluß der Eintrittsunterkühlung und der Einfluß der porösen Beschichtung auf die kritischen Wärmestromdichte im Bereich niedriger Massenstromdichte mit steigender Massenstromdichte bis zu einem Maximum zu. Bei weiter steigender Massenstromdichte nimmt der Einfluß der Eintrittsunterkühlung ganz ab (Abbildung 4-8). Bei der porösen Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 2 zeigt sich dieser Effekt schon ab einer Massenstromdichte von $\dot{m} > 50$ kg/m^{2}s (Abbildung 4-9).

Bei weiterer Zunahme der Massenstromdichte erfolgt eine geringe Abnahme des positiven Einflusses der porösen Beschichtung auf die kritischen Wärmestromdichte (Abbildung 4-9). Das deckt sich im Prinzip mit den Messungen von KUZMA-KICHTA ET AL. [34], die im Bereich niedriger Massenstromdichten eine 3,5-fache Verbesserung beobachteten, die mit Zunahme der Massenstromdichte auf eine 2-fache Verbesserung abnahm.

4.3.2 Einfluß des Druckes

Der Einfluß poröser Beschichtungen auf die CHF gegenüber dem glatten Rohr in Abhängigkeit vom Druck ist in Abbildung 4-10 bis Abbildung 4-15 wiedergegeben.

Die Visualisierung erfolgt bei einer Massenstromdichte von 50; 100 und 175 kg/m^{2}s für die Rohrgeometrie von L/D = 50 (Abbildung 4-10) sowie bei einer Massenstromdichte von 50, 200 und 300 kg/m^{2}s bei einer Geometrie von L/D = 14,1 (Abbildung 4-11) unter Variation des Druckes bei fester Eintrittsunterkühlung von 50 K.

Generell zeigen die Abbildung 4-10 und Abbildung 4-11 für alle Teststrecken eine Zunahme der kritischen Wärmestromdichte mit steigendem Druck. Dieser Anstieg erfolgt im Bereich niedriger Drücke relativ stark und flacht bis zu einem Druck von 0,7 MPa ab und ist mit Zunahme der Massenstromdichte ausgeprägter. Für alle Teststrecken (L/D = 50 und L/D = 14,1) läßt sich eine deutliche Abhängigkeit des Einflusses poröser Beschichtungen auf die kritische Wärmestromdichte vom Druck erkennen, ausgenommen die Teststrecke mit der Länge 127 mm und den Beschichtungsparameter 1 (Abbildung 4-11 (b) und (c)).

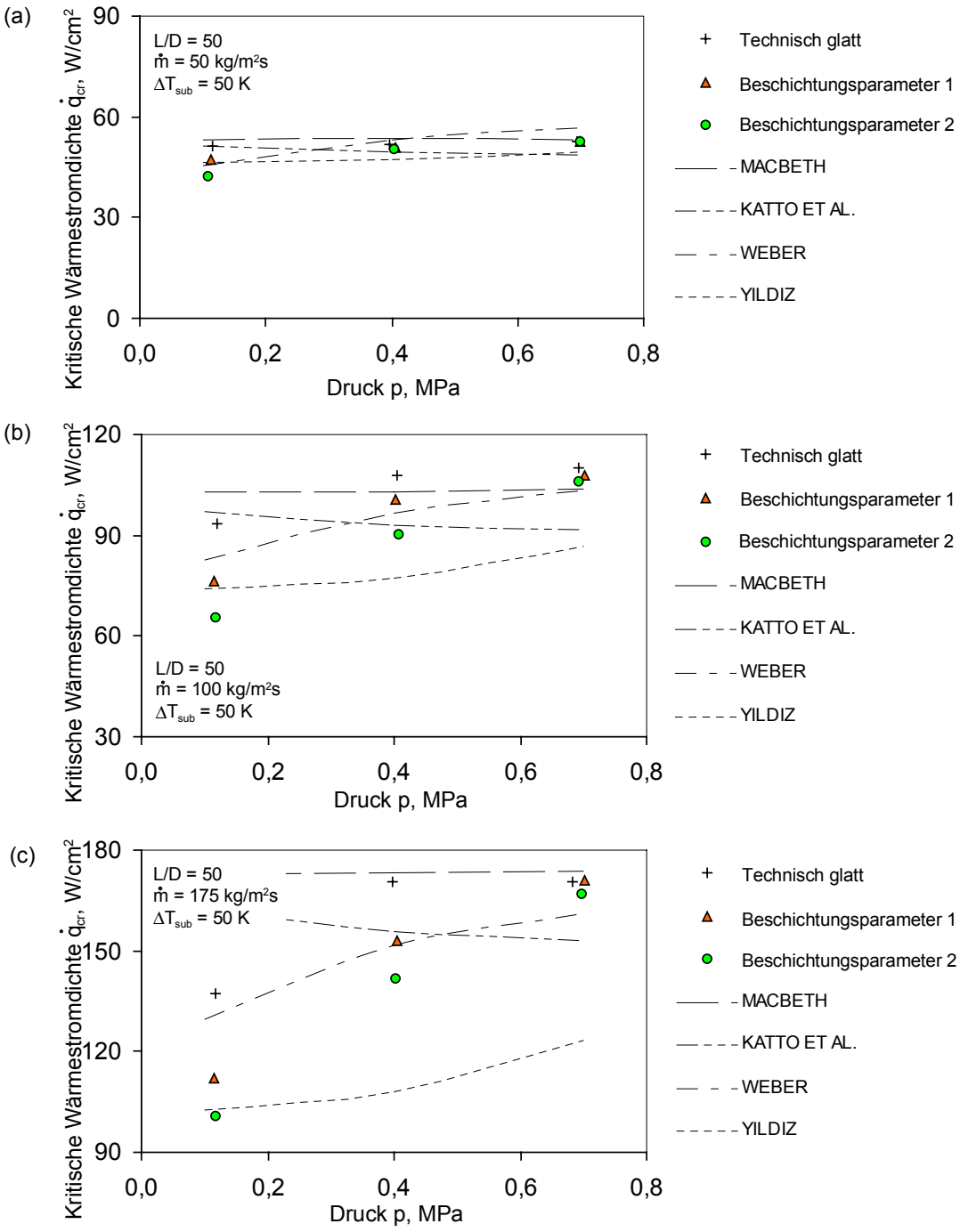


Abbildung 4-10: Einfluß der porösen Beschichtung auf die kritische Wärmestromdichte bei variiertem Druck (L/D = 50)

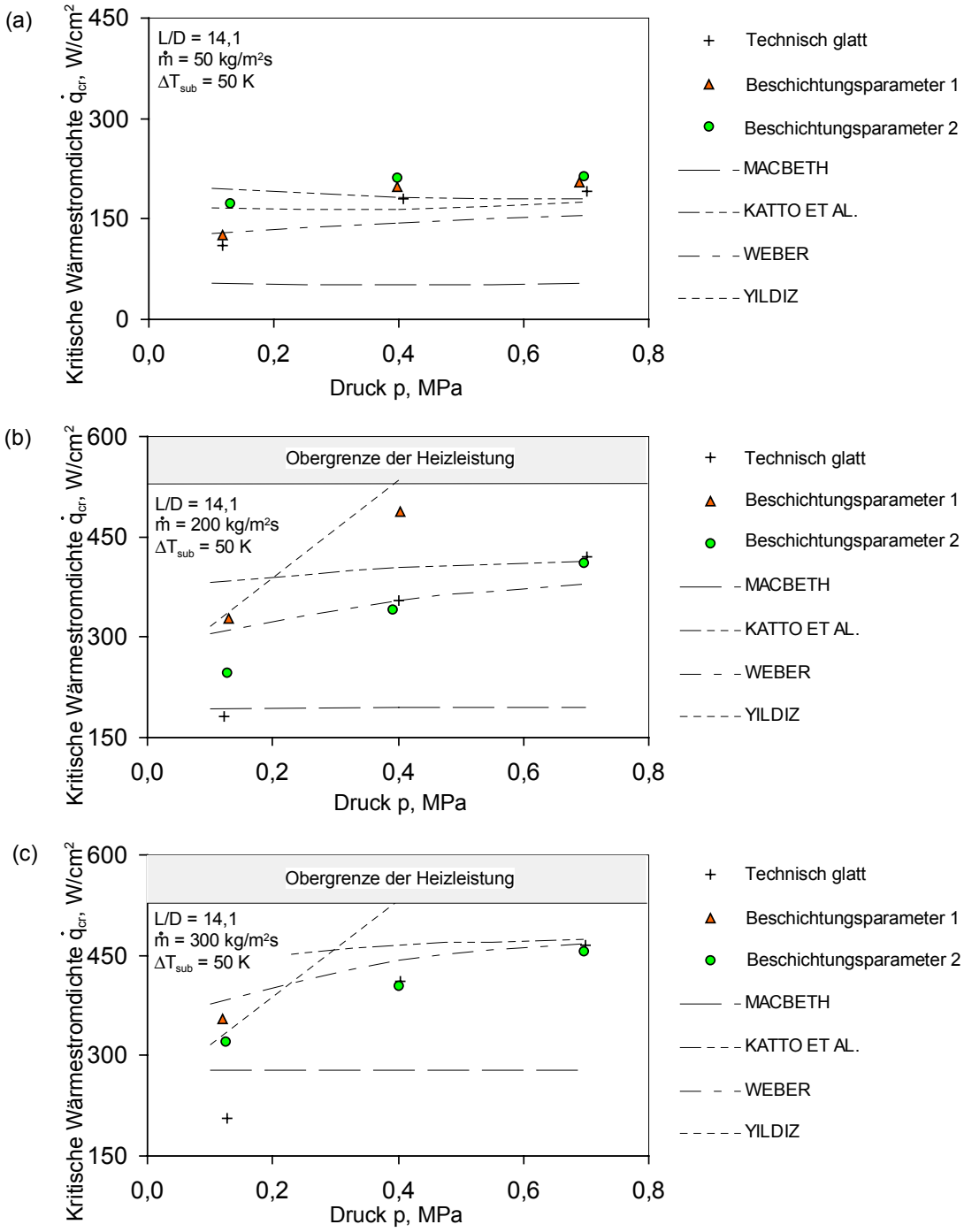


Abbildung 4-11: Einfluß der porösen Beschichtung auf die kritische Wärmestromdichte bei variiertem Druck (L/D = 14,1)

Die in Abbildung 4-10 ersichtliche Abnahme der CHF infolge poröser Beschichtung bei den Teststrecken der Geometrie $L/D = 50$ nimmt mit einer Steigerung des Druckes ab. Bei einem Druck von $p = 0{,}7$ MPa ist kaum noch ein Einfluß poröser Beschichtungen zu erkennen. Diese Beobachtung ist unabhängig von der Massenstromdichte und den in dieser Arbeit verwendeten Beschichtungsparametern.

Bei niedriger Massenstromdichte treffen alle Korrelationen eine gute Vorhersage der kritischen Wärmestromdichte für das glatte Rohr. Mit steigender Massenstromdichte nimmt die Genauigkeit der Korrelationen von MACBETH [42], KATTO ET AL. [26] und YILDIZ [68] (glattes Rohr) ab. Die beste Vorhersage über den gesamten Druckbereich macht die Korrelation von WEBER [65] (Abbildung 4-10).

Bei den Testsektionen der Länge $L = 127$ mm ist auch die Abnahme des Effektes der porösen Beschichtung mit steigendem Druck zu beobachten (Abbildung 4-11 (a)). Die Erhöhung der kritischen Wärmestromdichte durch poröse Oberflächenbeschichtung nimmt ab. Diese Aussage trifft jedoch nicht für alle Testsektionen zu (siehe Abbildung 4-11 (b) und (c)). Während für die Teststrecken mit den Beschichtungsparametern 2 der positive Einfluß mit steigendem Druck abnimmt und ab 0,4 MPa kein Einfluß mehr zu erkennen ist, bleibt der positive Effekt auf die CHF durch poröse Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 1 gegenüber glatt erhalten. Teilweise reicht hier die maximal mögliche erreichbare Heizleistung von 490 W/cm^2 nicht aus um die kritische Wärmestromdichte zu erreichen (Abbildung 4-11 (b) bei 0,7 MPa und Abbildung 4-11 (c) bei 0,4 sowie 0,7 MPa). Eine mögliche Erklärung für diese Abweichungen bietet hier der Ort der Siedekrise. Im Gegensatz zu den Teststrecken mit der Länge von 450 mm tritt bei den kurzen Testsektionen die Siedekrise nicht immer am Austritt der Teststrecke auf. Die Parameterbereiche, bei denen der Ort der Siedekrise vom Austritt der Teststrecke abweicht, sind für die glatte Testsektion und der mit den Beschichtungsparametern 2 nahezu identisch. Für die Testsektion mit den Beschichtungsparametern 1 trat die Siedekrise fast immer am Austritt der Teststrecke auf. Die Korrelation von WEBER [65] zeigt wiederum die größte Vorhersagegenauigkeit (Abbildung 4-11).

In Abbildung 4-12 bis Abbildung 4-15 wird wie bereits in Kapitel 4.3.1 ein direkter Vergleich zwischen den experimentell ermittelten CHF-Daten der Teststrecken mit und ohne poröser Beschichtung durchgeführt, allerdings in Abhängigkeit des variierten Druckes.

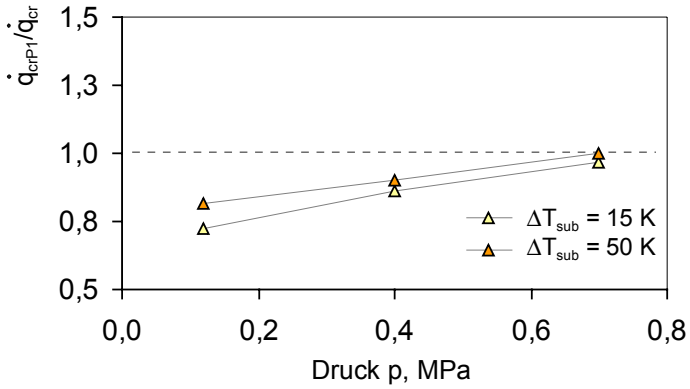


Abbildung 4-12: Einfluß des Druckes auf die Abnahme der kritischen Wärmestromdichte mit ($\dot{q}_{crP1}$) und ohne ($\dot{q}_{cr}$) poröse Beschichtung
(L/D = 50, $\dot{m}$ = 175 kg/m^{2}s, Beschichtungsparameter 1)

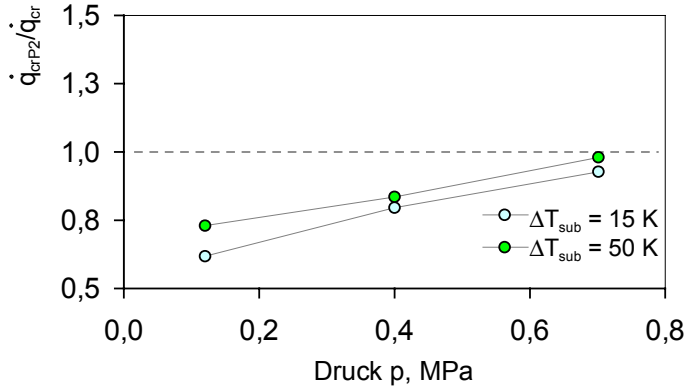


Abbildung 4-13: Einfluß des Druckes auf die Abnahme der kritischen Wärmestromdichte mit ($\dot{q}_{crP2}$) und ohne ($\dot{q}_{cr}$) poröse Beschichtung
(L/D = 50, $\dot{m}$ = 175 kg/m^{2}s, Beschichtungsparameter 2)

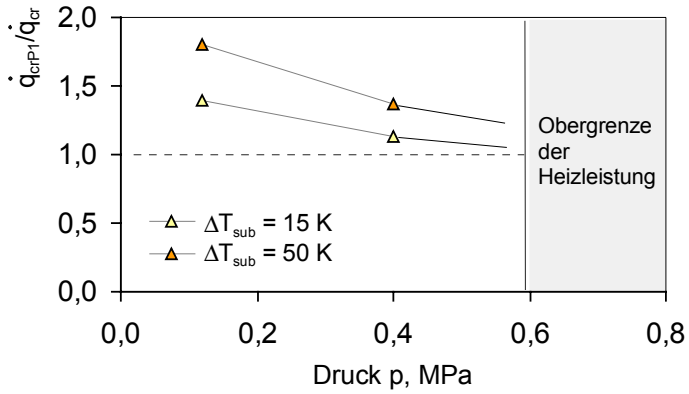


Abbildung 4-14: Einfluß des Druckes auf die Zunahme der kritischen Wärmestromdichte mit ($\dot{q}_{crP1}$) und ohne ($\dot{q}_{cr}$) poröse Beschichtung
(L/D = 14,1, $\dot{m}$ = 200 kg/m^{2}s, Beschichtungsparameter 1)

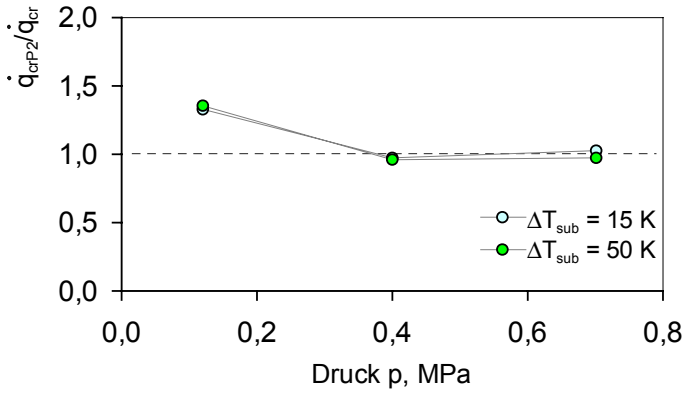


Abbildung 4-15: Einfluß des Druckes auf die Zunahme der kritischen Wärmestromdichte mit ($\dot{q}_{crP2}$) und ohne ($\dot{q}_{cr}$) poröse Beschichtung
(L/D = 14,1, $\dot{m}$ = 200 kg/m^{2}s, Beschichtungsparameter 2)

Für die Teststrecken der Geometrie $L/D = 50$ wurde eine Massenstromdichte von 175 kg/m^{2}s gewählt (siehe Abbildung 4-12 und Abbildung 4-13). Für die Testsektionen der Länge von 127 mm erfolgt die Darstellung bei einer Massenstromdichte von 200 kg/m^{2}s (Abbildung 4-14 und Abbildung 4-15). Bei den gewählten Massenströmen zeigte sich jeweils der maximale Einfluß der porösen Beschichtungen auf die CHF gegenüber dem glatten Rohr.

Die Abbildung 4-12 bis Abbildung 4-15 belegen eine Abnahme des negativen bzw. positiven Effektes poröser Beschichtungen gegenüber glatt mit einem steigenden Druck bis 0,7 MPa.

Bei den Teststrecken der Geometrie $L/D = 50$ (Abbildung 4-12 und Abbildung 4-13) läßt sich neben der Abnahme des negativen Einflusses der porösen Beschichtung bei steigendem Druck zusätzlich eine leichte Abnahme des Einflusses der Eintrittsunterkühlung auf die kritische Wärmestromdichte erkennen.

Für die Teststrecken der Geometrie $L/D = 14{,}1$ konnte nicht in allen Fällen die kritische Wärmestromdichte gemessen werden. Für die Teststrecke mit den Beschichtungsparametern 1 reichte für einen Druck von 0,7 MPa die maximal zur Verfügung stehende Heizleistung nicht aus (siehe Abbildung 4-14). Auch hier zeigt sich mit Abnahme des Effektes der porösen Schicht auf die CHF eine leichte Abnahme des Einflusses der Eintrittsunterkühlung mit zunehmenden Druck.

Bei einem Vergleich der CHF-Daten zwischen dem Rohr mit den Beschichtungsparametern 2 und dem glatten Rohr zeigt sich wiederum eine Abnahme des Einflusses, jedoch läßt sich kein Einfluß der Eintrittsunterkühlung feststellen (Abbildung 4-15). Ab einem Druck von 0,4 MPa zeigt sich hier auch kein Einfluß poröser Beschichtung auf die CHF gegenüber glatt.

4.3.3 Einfluß der Eintrittsunterkühlung

Der als letzter noch zu untersuchende Einflußparameter auf die kritische Wärmestromdichte ist die Eintrittsunterkühlung. Die Abbildung 4-16 bis Abbildung 4-21 zeigen den Einfluß poröser Oberflächenbeschichtungen gegenüber glatter Oberfläche auf die CHF in Abhängigkeit von der Eintrittsunterkühlung bei einem festen Druck von 0,12 MPa. In Abbildung 4-16 erfolgt die Darstellung für eine Rohrgeometrie von $L/D = 50$ und einer Massenstromdichte von $\dot{m} = 25;\ 100$ und 175 kg/m^{2}s. Für die Geometrie von $L/D = 14{,}1$ wurden Massenstromdichten von $\dot{m} = 25;\ 200$ und 300 kg/m^{2}s gewählt (Abbildung 4-17).

Für einen gegebenen Druck, einer festen Massenstromdichte und fester Rohrgeometrie steigt die kritische Wärmestromdichte annähernd linear mit steigender Eintrittsunterkühlung und steigender Massenstromdichte (Abbildung 4-16 (b) und (c)). Dieser Effekt ist bei den Teststrecken mit poröser Beschichtung stärker ausgeprägt als bei den Rohren ohne Beschichtung. Diese Aussage gilt nur, wenn die Siedekrise am Austritt der Testsektion auftritt.

Die Abhängigkeit von der Eintrittsunterkühlung wird von keiner der Korrelationen berücksichtigt. Für eine niedrige Massenstromdichte haben auch hier alle Korrelationen eine hohe Genauigkeit. Mit Zunahme der Massenstromdichte nimmt die Genauigkeit der Vorhersage der CHF bei allen Korrelationen ab. Die Korrelation von KATTO ET AL. [26] und WEBER [65] zeigen die größte Genauigkeit in der Vorhersage. Die Korrelation von YILDIZ [68] (glattes Rohr) hat zufälligerweise eine gute Übereinstimmung mit den Daten für das Rohr mit der porösen Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 1 (Abbildung 4-16).

Erfolgt für die Rohre mit poröser Beschichtung immer ein Anstieg der CHF mit steigender Eintrittsunterkühlung, so zeigt sich in Abbildung 4-16 (b) und (c) bei einen Druck von 0,12 MPa eine Abnahme der kritischen Wärmestromdichte beim glatten Rohr mit zunehmender Unterkühlung bis $\Delta T_{sub} = 50$ K. Auch BERGLES [10] und YILDIZ [68]

berichten bei CHF-Messungen für $p < 0{,}2$ MPa und erhöhter Massenstromdichte von einem Minimum im Kurvenverlauf $\dot{q}_{cr}$ über ΔT_{sub} beim glatten Rohr. Die Autoren erklären die höheren kritischen Wärmestromdichten im Bereich kleinerer Eintrittsunterkühlung mit der Zunahme der mittleren Geschwindigkeit, bedingt durch die Erhöhung des Dampfvolumenanteils.

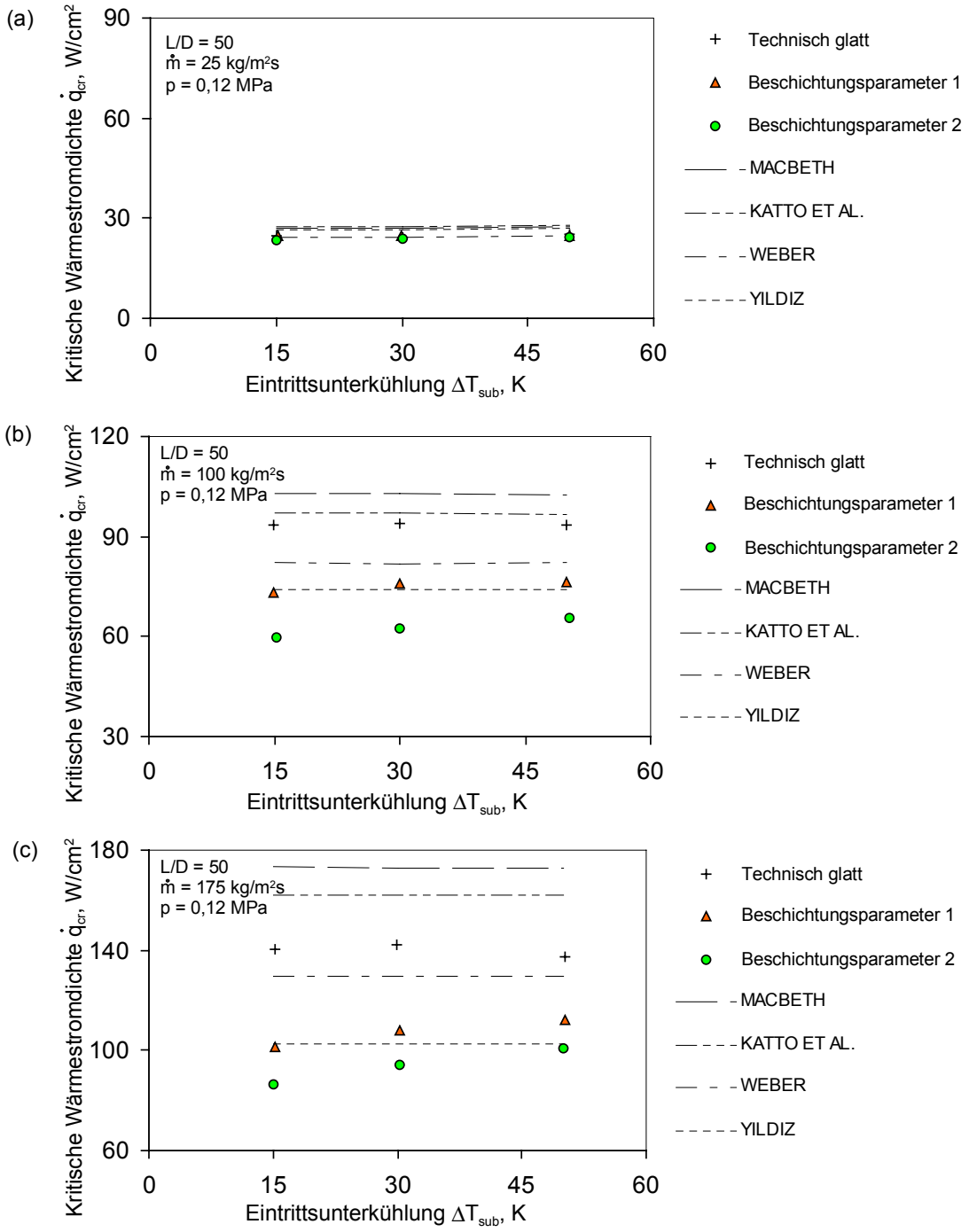


Abbildung 4-16: Einfluß der porösen Beschichtung auf die kritische Wärmestromdichte bei variierter Eintrittsunterkühlung (L/D = 50)

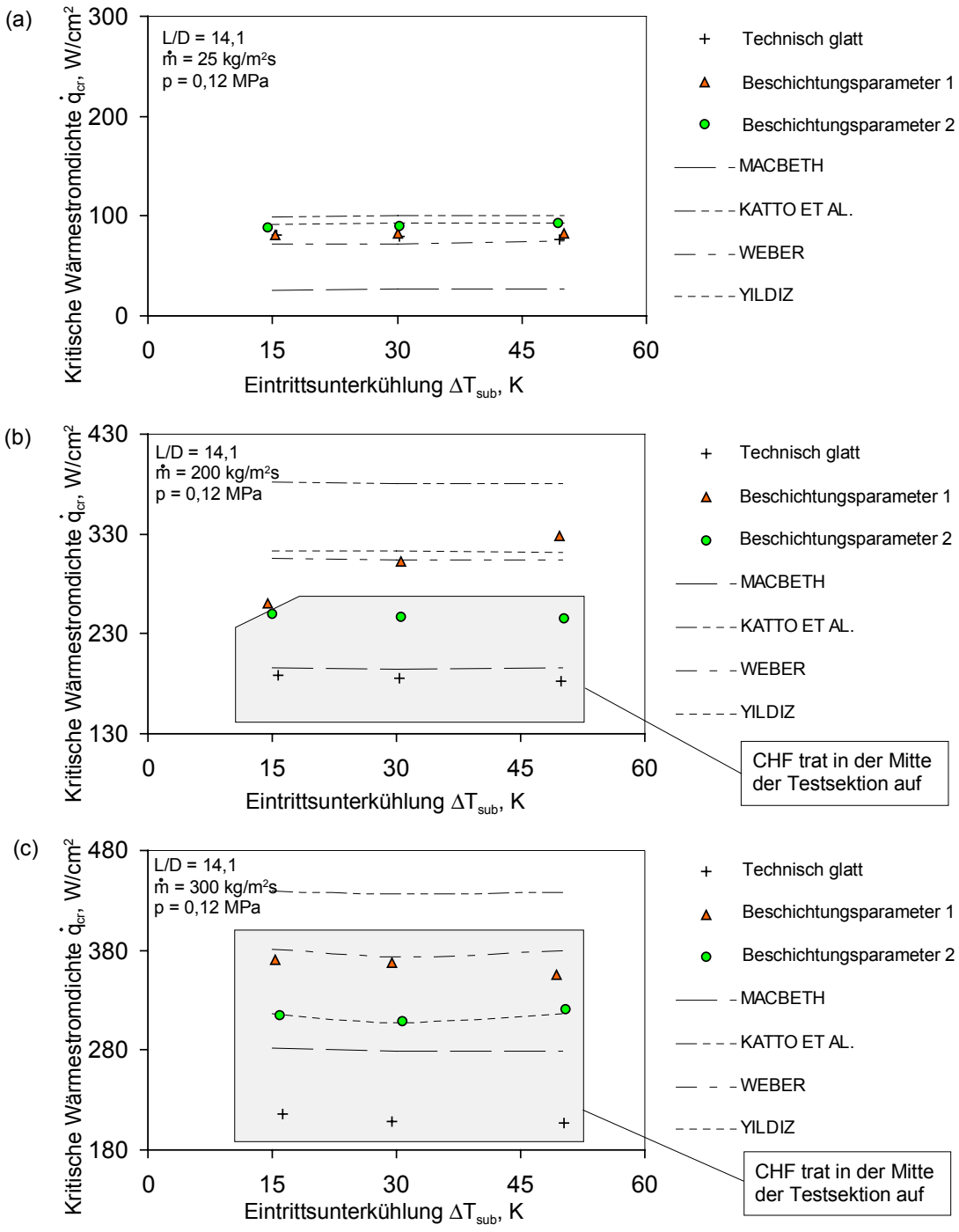


Abbildung 4-17: Einfluß der porösen Beschichtung auf die kritische Wärmestromdichte bei variierter Eintrittsunterkühlung (*L/D* = 14,1)

Ist die Massenstromdichte sehr gering (Abbildung 4-16 (a) und Abbildung 4-17 (a)) oder tritt die Siedekrise im mittleren Bereich der Testsektion auf (Abbildung 4-17 (b) und (c)), läßt sich kein wesentlicher Einfluß der Eintrittsunterkühlung auf die kritische Wärmestromdichte für die Testsektionen mit und ohne poröser Beschichtung erkennen.

Bei der beschichteten Teststrecke mit den Beschichtungsparameter 1 trat in Abbildung 4-17 (b) die Siedekrise am Austritt des Rohres auf. Hier nimmt mit steigender Eintrittsunterkühlung die kritische Wärmestromdichte zu.

Die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 4-18 bis Abbildung 4-21) zeigen wieder den direkten Vergleich zwischen porös beschichteter und glatter Heizfläche, diesmal in Abhängigkeit von der Eintrittsunterkühlung.

Die Darstellungen erfolgen für einen Druck von 0,12 MPa und mit den gleichen Massenstromdichten wie bei den vorherigen Abbildungen.

Wie die Abbildung 4-18 bis Abbildung 4-21 zeigen, hat die Eintrittsunterkühlung einen Einfluß auf den Effekt der porösen Beschichtung. Der Einfluß ist abhängig von den Strömungsparametern.

In Abbildung 4-18 und in Abbildung 4-19 erfolgt für eine Rohrgeometrie von L/D = 50 und $\dot{m}$ = 100 und 175 kg/m^{2}s eine Abnahme des negativen Einflusses poröser Beschichtungen mit zunehmender Eintrittsunterkühlung. Bei einer Massenstromdichte von 25 kg/m^{2}s zeigt sich kein wesentlicher Einfluß auf den Effekt poröser Beschichtungen.

Bei den kurzen Rohren (L = 127 mm) zeigt sich in einem direkten Vergleich zwischen dem glatten Rohr und den Rohren mit Oberflächenbeschichtung bei bestimmten Versuchsparametern eine Verstärkung des positiven Effektes poröser Beschichtungen auf die CHF.

In Abbildung 4-20 trifft dies für eine Massenstromdichte von 200 kg/m^{2}s zu (Vergleich glatt und poröse Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 1). Der Ort der Siedekrise bei der beschichteten Teststrecke war der Austritt. Beim glatten Rohr trat die Siedekrise in der Mitte des Rohres auf.

Eine leichte Zunahme des Einflusses poröser Beschichtungen mit steigender Eintrittsunterkühlung läßt sich bei einem Vergleich glatt mit poröser Beschichtung 2 schon bei einer Massenstromdichte von 25 kg/m^{2}s erkennen, siehe Abbildung 4-21.

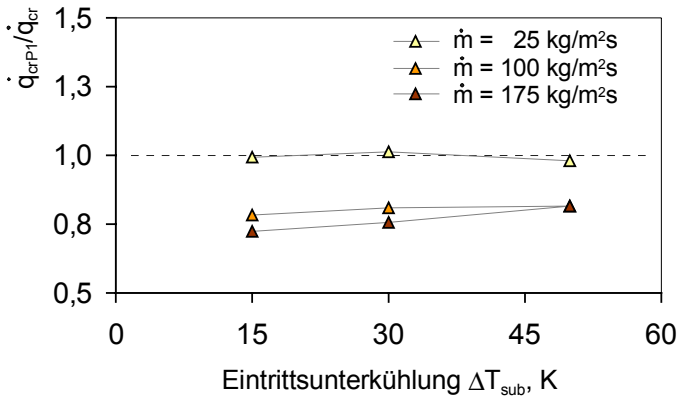


Abbildung 4-18: Einfluß der Eintrittsunterkühlung auf die Abnahme der kritischen Wärmestromdichte mit ($\dot{q}_{crP1}$) und ohne ($\dot{q}_{cr}$) poröse Beschichtung (L/D = 50, p = 0,12 MPa, Beschichtungsparameter 1)

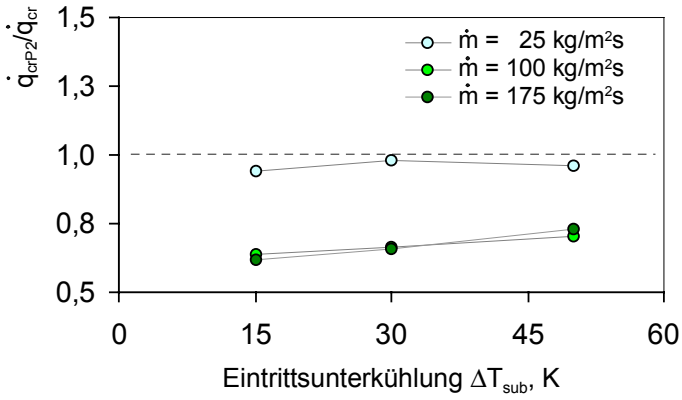


Abbildung 4-19: Einfluß der Eintrittsunterkühlung auf die Abnahme der kritischen Wärmestromdichte mit ($\dot{q}_{crP2}$) und ohne ($\dot{q}_{cr}$) poröse Beschichtung (L/D = 50, p = 0,12 MPa, Beschichtungsparameter 2)

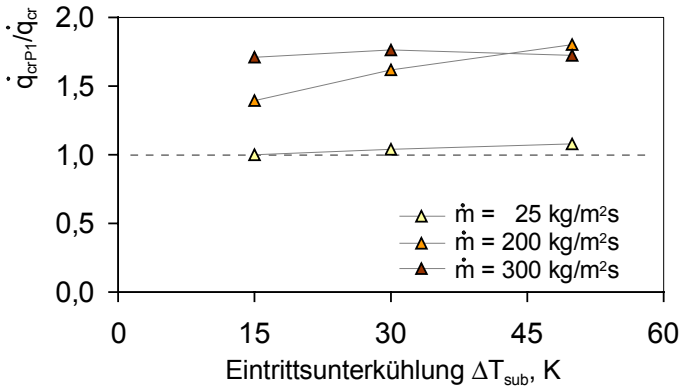


Abbildung 4-20: Einfluß der Eintrittsunterkühlung auf die Zunahme der kritischen Wärmestromdichte mit ($\dot{q}_{crP1}$) und ohne ($\dot{q}_{cr}$) poröse Beschichtung (L/D = 14,1, p = 0,12 MPa, Beschichtungsparameter 1)

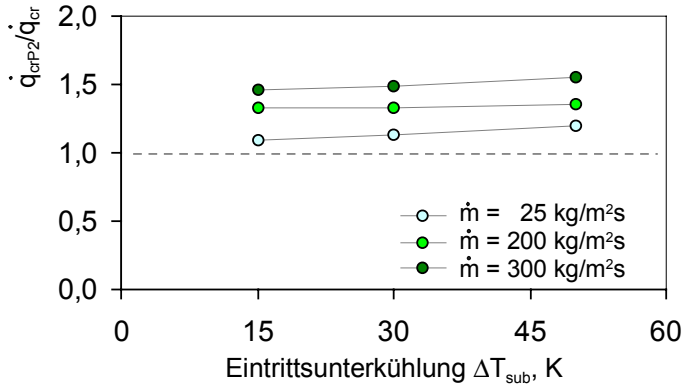


Abbildung 4-21: Einfluß der Eintrittsunterkühlung auf die Zunahme der kritischen Wärmestromdichte mit ($\dot{q}_{crP2}$) und ohne ($\dot{q}_{cr}$) poröse Beschichtung (L/D = 14,1, p = 0,12 MPa, Beschichtungsparameter 2)

Tritt die Siedekrise im mittleren Bereich der Teststrecke auf, zeigt sich kein wesentlicher Einfluß der Eintrittsunterkühlung auf den Effekt der porösen Schicht ($\dot{m}$ = 300 kg/m^{2}s in Abbildung 4-20 sowie $\dot{m}$ = 200 und 300 kg/m^{2}s in Abbildung 4-21).

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß der Einfluß poröser Beschichtungen auf die kritische Wärmestromdichte abhängig von den Strömungsparametern wie Massenstromdichte, Druck und Eintrittsunterkühlung sowie der Rohrlänge und der Art der porösen Beschichtung verschlechternd als auch verbessernd ist.

In Abhängigkeit vom Parameterbereich nimmt in dieser Arbeit mit steigendem Druck der Einfluß poröser Beschichtungen ab und mit steigender Massenstromdichte zu. Die Eintrittsunterkühlung hat nur in bestimmten Parameterbereichen einen Einfluß auf die CHF. Tritt die Siedekrise am Austritt der Testsektion auf und ist die Massenstromdichte groß genug, steigt mit zunehmender Eintrittsunterkühlung auch die kritische Wärmestromdichte. Dieser Effekt ist bei poröser Oberflächenbeschichtung bei sonst gleichen Bedingungen stärker ausgeprägt. Daraus ergibt sich bei den Rohren der Länge 450 mm eine Abnahme des negativen Einflusses poröser Beschichtungen und bei den Rohren der Länge 127 mm eine Steigerung des positiven Einflusses poröser Beschichtungen.

Die poröse Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 2 bei einer Rohrgeometrie von L/D = 50 zeigt den stärksten die CHF verringernden Einfluß gegenüber glatt. Dagegen hat die poröse Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 1 bei einer Geometrie von L/D = 14,1 die größte Steigerung der kritischen Wärmestromdichte gegenüber dem glatten Rohr.

Wie sich zeigt, führt die alleinige Betrachtung dieser 3 Einflußparameter ($\dot{m}$, p, ΔT_{sub}) zu keiner zufriedenstellenden Aussage über den Einfluß poröser Beschichtungen auf die kritische Wärmestromdichte. Wie beobachtet, hängt der Effekt poröser Beschichtungen auch vom Ort der Siedekrise ab. Die im Rohr jeweils vorherrschende Strömungsform ist somit ein weiterer Einflußparameter und wird im folgenden Kapitel 5 genauer untersucht.

5 DISKUSSION DER EXPERIMENTELLEN ERGEBNISSE

Für eine systematische Untersuchung des Einflusses porös beschichteter Oberflächen auf die CHF erfolgt in diesem Kapitel zuerst eine Einteilung der CHF-Daten in die zugehörige Strömungsform (DNB, Grenzdampfgebiet oder Microfilm-Dryout) im jeweiligen Parameterbereich. Weiter erfolgt eine Analyse des Zusammenhanges zwischen dem auftretenden Strömungsmechanismus der Siedekrise und dem Einfluß poröser Beschichtungen auf die kritische Wärmestromdichte.

5.1 Erkennen der Strömungsform

Um die Mechanismen der Siedekrise besser beschreiben zu können, ist es notwendig, den dabei vorliegenden Strömungszustand zu berücksichtigen. In der Literatur werden verschiedene Möglichkeiten zur Bestimmung der Strömungsform erwähnt:

- Die Anwendung von Strömungskarten,
- die Regimeunterscheidung nach KATTO ET AL. [26],
- die Analyse der Heizflächentemperatur und
- die Darstellung der kritischen Wärmestromdichte $\dot{q}_{cr}$ über dem kritischen Dampfgehalt x_{cr} (siehe Kapitel 1).

YILDIZ [68] führte in ihrer Arbeit einen Vergleich dieser vier Möglichkeiten durch. Die Darstellung $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} zeigte sich im vorliegenden Parameterbereich als geeignet; sie wird im folgenden verwendet.

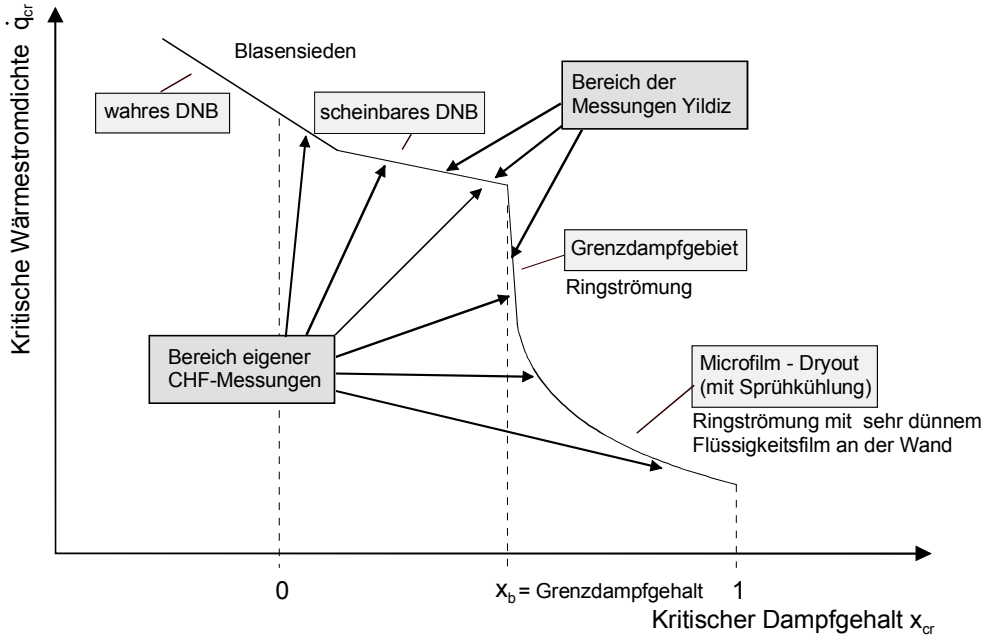


Abbildung 5-1: Prinzipieller Verlauf der kritischen Wärmestromdichte in Abhängigkeit vom thermodynamischen Dampfgehalt mit x_b = Grenzdampfgehalt

Die Abbildung 5-1 zeigt den typischen Verlauf der kritischen Wärmestromdichte in Abhängigkeit vom zugehörigen thermodynamischen Dampfgehalt für Wasser. Für den Bereich $x_{cr} < x_b$ liegt DNB als Mechanismus der Siedekrise vor. YILDIZ [68] spricht vom wahren DNB für $x_{cr} \leq 0$ und vom scheinbaren DNB für $0 < x_{cr} < x_b$. Der VDI-Wärmeatlas [64] macht keine Unterscheidung. Bei $x_{cr} = x_b$ (Phänomen des Grenzdampfgehaltes) ist die kritische Wärmestromdichte nahezu unabhängig vom thermodynamischen Dampfgehalt. In diesem Bereich liegt Ringströmung vor und Dryout führt zur Siedekrise. Dampfgehalte von $x_b < x_{cr} < 1$ werden mit Microfilm-Dryout (auch Deposition Controlled Burnout) bezeichnet. Charakterisiert wird dieser Bereich durch eine Ringströmung mit sehr dünnem Flüssigkeitsfilm an der Rohrwand und einer Sprühströmung im Kern (VDI-Wärmeatlas [64]).

YILDIZ [68] beobachtete im Bereich niedriger Dampfgehalte eine Verbesserung der kritischen Wärmestromdichte in Verbindung mit einem Wechsel des Strömungsregimes vom Grenzdampfgebiet zu scheinbarem DNB infolge poröser Beschichtung bei sonst gleichen Versuchsbedingungen (siehe Abbildung 5-1). Ob eine Intensivierung der CHF durch poröse Beschichtung auch ohne einen Wechsel des Strömungsregime bei Dampfgehalten $x_{cr} > 0$ auftritt, konnte bislang nicht geklärt werden.

Die eigenen Messungen der kritischen Wärmestromdichte wurden daher in einem breiten Bereich niedriger und hoher Dampfgehalte ($0 < x_{cr} < 1$) durchgeführt.

Der in der Darstellung $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} verwendete kritische Dampfgehalt ist der thermodynamische Dampfgehalt am Ort der Siedekrise. Er wird mit Hilfe einer Energiebilanz bestimmt:

$$x_{cr} = \frac{4\,\dot{q}_{cr}\,L}{\dot{m}\,\Delta h_V\,D} - \frac{h' - h_E}{\Delta h_V} \tag{5-1}$$

mit x_{cr}: kritischer Dampfgehalt

$\dot{q}_{cr}$: kritische Wärmestromdichte

$\dot{m}$: Massenstromdichte

Δh_V: Verdampfungsenthalpie bei Sättigungsdruck und Sättigungstemperatur

h': Eintrittsenthalpie der gesättigten Flüssigkeit

h_E: Eintrittsenthalpie der Flüssigkeit bei Eintrittstemperatur

L: Länge der Testsektion

D: Innendurchmesser der Testsektion

Die Kurvenverlauf $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} kann sowohl durch eine variierte Rohrlänge als auch durch eine variierte Unterkühlung dargestellt werden. In dieser Arbeit erfolgt die Darstellung des Kurvenverlaufs $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} bei fester Rohrlänge. Der variierte Parameter ist die Eintrittsunterkühlung. Die Abbildung 5-2 zeigt den typischen Kurvenverlauf für die drei unterschiedlichen Strömungsregime scheinbares DNB, Grenzdampfgebiet und Microfilm-Dryout bei variierter Eintrittsunterkühlung am Beispiel des glatten Rohrs. In den weiter folgenden Abbildungen werden zum Vergleich auch die Daten für die Rohre mit Beschichtung dargestellt. Hier wird die Variation der Eintrittsunterkühlung von Werten kleiner ΔT_{sub} zu Werten großer ΔT_{sub} zur besseren Übersicht nur mit einem Pfeil gekennzeichnet (Abbildung 5-3 bis Abbildung 5-15).

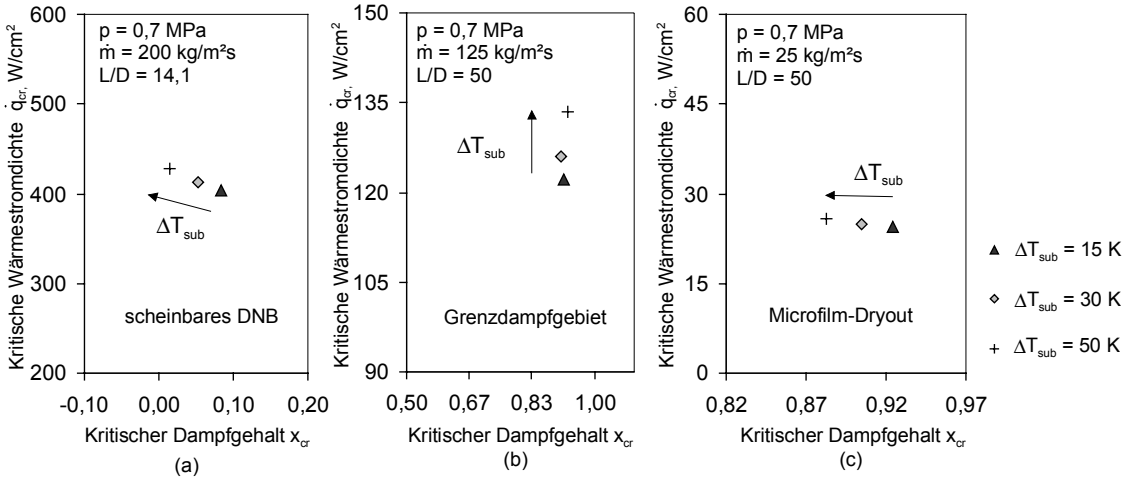


Abbildung 5-2: Typischer Verlauf der CHF-Daten bei variierter Eintrittsunterkühlung bei unterschiedlichen Strömungsregimen: scheinbares DNB (a), Grenzdampfgebiet (b) und Microfilm-Dryout (c) (glattes Rohr)

In den folgenden $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr}-Diagrammen (Abbildung 5-3 bis Abbildung 5-15) werden die Messungen der kritischen Wärmestromdichte für Rohre mit und ohne poröser Beschichtung in den für diese Arbeit interessanten Parameterpaaren ($p, \dot{m}$) dargestellt. Die Darstellung aller Parameterbereiche ($p, \dot{m}$) erfolgt im Anhang.

5.1.1 Erkennen der Strömungsform für die Rohre mit der Geometrie *L/D* = 50

In diesem Kapitel erfolgt die Zuordnung der Strömungsform für die Rohre glatt und beschichtet für die Geometrie *L/D* = 50. Die Darstellung erfolgt für die Drücke von 0,1 MPa und 0,7 MPa bei ausgewählten Massenstromdichten.

Die Strömungsparameter für die Abbildung 5-3, Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5 lauten:

- Druck p = 0,7 MPa,
- Massenstromdichte $\dot{m}$ = 25, 75, und 150 kg/m²s,
- Eintrittsunterkühlung ΔT_{sub} = variiert (15, 30 und 50 K).

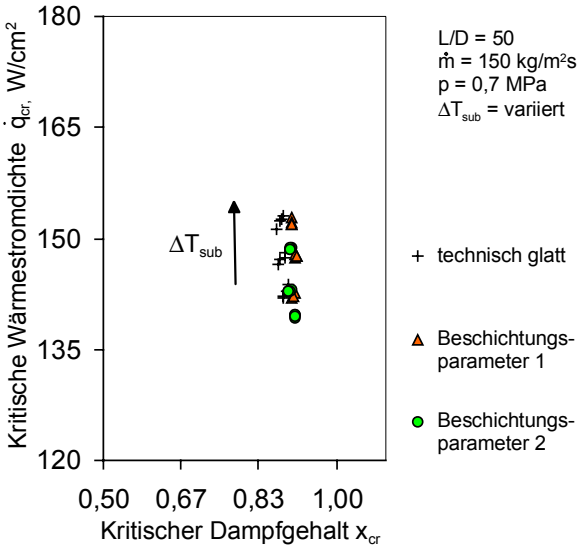


Abbildung 5-3: Verlauf der kritischen Wärmestromdichte in Abhängigkeit vom kritischen Dampfgehalt bei glattem und porös beschichteten Rohren und erhöhtem Druck (Grenzdampfgebiet, L/D = 50)

Die Meßergebnisse bei glattem und porös beschichteten Rohr zeigen einen nahezu vertikalen Anstieg im Verlauf $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} (Abbildung 5-3). Sie liegen im Bereich des

Grenzdampfphänomens, einem Bereich in dem Entrainment und Deposition vorliegen. Es kommt bei der Ausbildung der Ringströmung im unteren Bereich des Rohres zu einem Abriß von größeren Flüssigkeitstropfen, die sich am Rohrende teilweise wieder ablagern. Variiert man die Eintrittsunterkühlung, so macht sich dieser Effekt verstärkt bemerkbar. Bei großer Eintrittsunterkühlung wird die Heizfläche durch die Ablagerung kälterer Flüssigkeitstropfen stärker abgekühlt und die kritische Wärmestromdichte wird zu höheren Werten bei nahezu gleichbleibendem Dampfgehalt verschoben.

Die Ergebnisse für die beschichteten Rohre zeigen in Abbildung 5-3 verringerte Werte für die kritische Wärmestromdichte und eine größere Spreizung der Daten für unterschiedliche Unterkühlungen. Dies läßt sich durch die Zunahme des Entrainment bei poröser Beschichtung erklären. Hier zeigt sich der größte Einfluß bei der porösen Schicht mit den Beschichtungsparametern 2 (Abbildung 5-3).

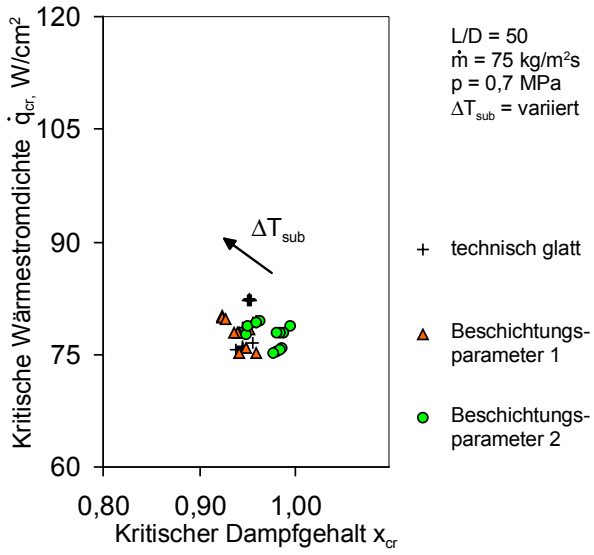


Abbildung 5-4: Verlauf der kritischen Wärmestromdichte in Abhängigkeit vom kritischen Dampfgehalt bei glattem und porös beschichteten Rohren und erhöhtem Druck (Übergang zum Microfilm-Dryout, $L/D = 50$)

Für eine Massenstromdichte von $\dot{m} = 75\ \mathrm{kg/m^2s}$ liegen alle Daten im Übergang vom Grenzdampfgebiet zum Microfilm-Dryout (siehe Abbildung 5-4). Es zeigt sich kein wesentlicher Unterschied der Daten zwischen den Rohren mit und ohne Beschichtung. Der Dampfvolumenanteil ist bei poröser Schicht leicht erhöht.

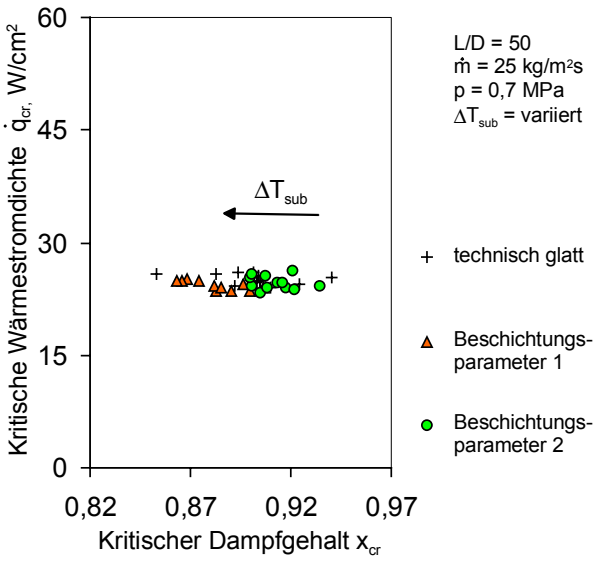


Abbildung 5-5: Verlauf der kritischen Wärmestromdichte in Abhängigkeit vom kritischen Dampfgehalt bei glattem und porös beschichteten Rohren und erhöhtem Druck (Microfilm-Dryout, $L/D = 50$)

In der Abbildung 5-5 haben die Kurvenverläufe für glatt und beschichtet einen nahezu horizontalen Verlauf. Sie sind dem Mechanismus des Microfilm-Dryout zuzuordnen. Die Ablagerung feinster Flüssigkeitstropfen an der Rohrwand verlagern den Kurvenverlauf bei niedriger kritischer Wärmestromdichte zu höherem Dampfvolumenanteil (Deposition Controlled Burnout).

Die porösen Schichten zeigen bei einer Massenstromdichte von $\dot{m} = 25$ kg/m²s keinen Einfluß auf die kritische Wärmestromdichte. Hier ergibt sich bei der porösen Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 2 eine Erhöhung des Dampfvolumenanteils gegenüber dem glatten Rohr. Die Verdampfung der Flüssigkeit erfolgt nicht nur auf der Oberfläche, sondern auch in der porösen Schicht. Die wärmeübertragende Oberfläche ist größer.

In den nachfolgenden Diagrammen (Abbildung 5-6 bis Abbildung 5-8) wird der Verlauf $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} für eine Rohrgeometrie von $L/D = 50$ und einen Druck von $p = 0{,}12$ MPa dargestellt.

Die Strömungsparameter für die Abbildung 5-6, Abbildung 5-7 und Abbildung 5-8 lauten:

- Druck $p = 0{,}12$ MPa,
- Massenstromdichte $\dot{m} = 25$, 75, und 150 kg/m²s,
- Eintrittsunterkühlung ΔT_{sub} = variiert (15, 30 und 50 K).

YILDIZ [68] berichtet bei Umgebungsdruck und erhöhter Massenstromdichte von einem Minimum im Kurvenverlauf $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} für das glatte Rohr bei einer Eintrittsunterkühlung von $\Delta T_{sub} = 40$ K. Die Autorin erklärt dieses Phänomen mit der Zunahme der mittleren Geschwindigkeit, bedingt durch die Erhöhung des Dampfvolumenanteils bei kleinerer Eintrittsunterkühlung. Bei poröser Beschichtung beobachtet YILDIZ [68] diesen Effekt nicht, bei kleiner Eintrittsunterkühlung ergibt sich hier eine kleinere kritische Wärmestromdichte.

In Abbildung 5-6 zeigen die Daten beim glatten Rohr bei kleiner Eintrittsunterkühlung eine höhere kritische Wärmestromdichte als bei großen Unterkühlungen, analog zu YILDIZ [68]. Die mittlere Geschwindigkeit im Rohrquerschnitt ist bei einer Eintrittsunterkühlung von $\Delta T_{sub} = 15$ K größer als bei einer Eintrittsunterkühlung von $\Delta T_{sub} = 50$ K, dies führt zu einer Erhöhung der kritischen Wärmestromdichte bei kleinerer Eintrittsunterkühlung. Aufgrund von Kondensationsschlägen in der Testsektion können bei Umgebungsdruck keine Versuche mit Unterkühlungen $\Delta T_{sub} > 50$ K durchgeführt werden, so daß ein Anstieg der kritischen Wärmestromdichte bei größeren Unterkühlungen nicht beobachtet werden kann.

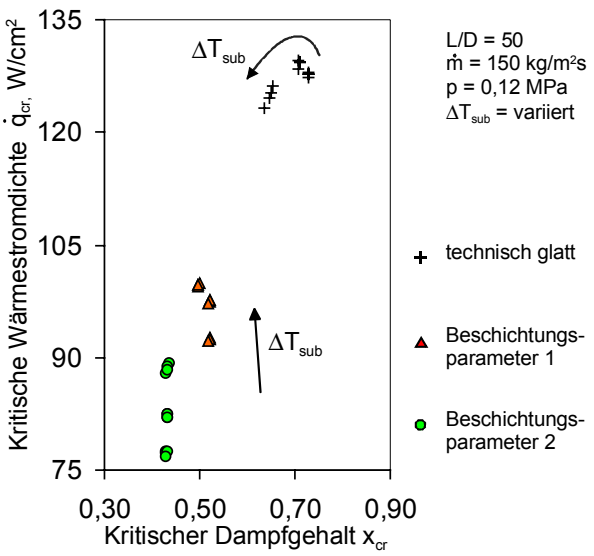


Abbildung 5-6: Verlauf der kritischen Wärmestromdichte in Abhängigkeit vom kritischen Dampfgehalt bei glattem und porös beschichteten Rohren und Umgebungsdruck (Grenzdampfgebiet, $L/D = 50$)

Die Regimeunterscheidung nach KATTO ET AL. [26] ergab, daß die Daten im Bereich des L-Regimes liegen, welches die Strömungsform des Dryout beschreibt. Die Daten werden dem Bereich des Grenzdampfgehaltes zugeordnet.

Die Meßergebnisse bei poröser Beschichtung Abbildung 5-6 zeigen einen nahezu senkrechten Verlauf. Im Gegensatz zum glatten Rohr ist die mittlere Geschwindigkeit bei kleinen Eintrittsunterkühlungen nicht größer, als bei großen Unterkühlungen. Durch die Verstärkung des Entrainment bei poröser Beschichtung kommt es zu einer Reduzierung der Filmdicke. Da die Filmdicke bei niedrigen Drücken dünner ist als bei höheren Drücken, führt ein zusätzlicher Austrag von Flüssigkeit zu einem früheren Eintritt der Siedekrise. Besonders deutlich wird dies bei der Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 2, hier zeigt sich der maximal vermindernde Einfluß auf die CHF von 40 % gegenüber glatt. Generell ergeben sich bei poröser Beschichtung stark verringerte Werte für die kritische Wärmestromdichte. Die Daten liegen im Bereich des Grenzdampfphänomens (Abbildung 5-6).

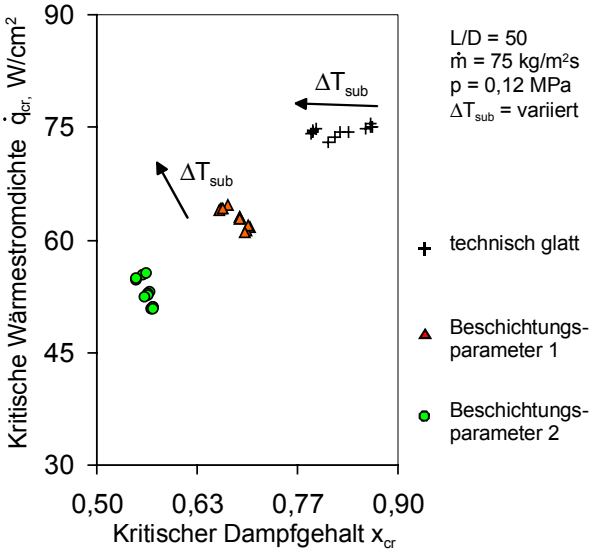


Abbildung 5-7: Verlauf der kritischen Wärmestromdichte in Abhängigkeit vom kritischen Dampfgehalt bei glattem und porös beschichteten Rohren und Umgebungsdruck (Übergang zum Microfilm-Dryout, $L/D = 50$)

In Abbildung 5-7 liegen die Daten für die Rohre mit poröser Beschichtung im Übergang vom Grenzdampfgebiet zum Microfilm-Dryout. Die Daten für poröse Beschichtung zeigen verringerte Werte für die kritische Wärmestromdichte. Man erkennt wieder den größeren Einfluß der porösen Schicht mit den Beschichtungsparametern 2, hier scheinen Entrainment und Deposition verstärkt aufzutreten.

Beim glatten Rohr haben die Daten bei einer Massenstromdichte von $\dot{m} = 75$ kg/m²s (Abbildung 5-7) einen nahezu horizontalen Verlauf, liegen aber dichter zusammen als bei kleinen Massenstromdichten (Abbildung 5-8). Sie werden dem Übergang vom Grenzdampfgebiet zum Microfilm-Dryout zugeordnet. Möglicherweise hat hier die mittlere Geschwindigkeit schon einen leichten Einfluß auf das Austrocknungsverhalten der Heizfläche. Hier sollten noch weitere Untersuchungen erfolgen.

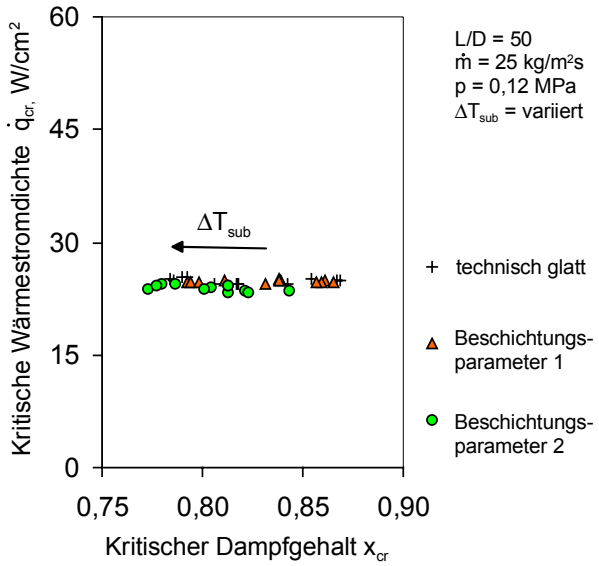


Abbildung 5-8: Verlauf der kritischen Wärmestromdichte in Abhängigkeit vom kritischen Dampfgehalt bei glattem und porös beschichteten Rohren und Umgebungsdruck (Microfilm-Dryout, $L/D = 50$)

Abbildung 5-8 liefert einen nahezu horizontalen Verlauf der Meßergebnisse für beschichtet und glatt. Sie werden dem Mechanismus des Microfilm-Dryout zugeordnet. Die Ablagerung feinster Flüssigkeitstropfen an der Rohrwand verlagern den Kurvenverlauf bei niedriger kritischer Wärmestromdichte zu höheren Dampfvolumenanteilen (Deposition Controlled Burnout).

Die porösen Schichten zeigen bei einer Massenstromdichte von $\dot{m} = 25$ kg/m²s keinen Einfluß auf die kritische Wärmestromdichte. Hier ergibt sich bei den porösen Schichten eine Erhöhung des Dampfvolumenanteils gegenüber dem glatten Rohr.

5.1.2 Erkennen der Strömungsform für die Rohre mit der Geometrie *L/D* = 14,1

In den weiteren Diagrammen (Abbildung 5-9 bis Abbildung 5-12) wird der Verlauf $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} für die Rohrgeometrie von L/D = 14,1 dargestellt. Auch hier erfolgt die Darstellung nur für die Drücke von 0,1 MPa und 0,7 MPa bei ausgewählten Massenstromdichten. Eine Darstellung aller Parameterbereiche (p , $\dot{m}$) erfolgt im Anhang.

Die Strömungsparameter für die Abbildung 5-9 bis Abbildung 5-12 lauten:

- Druck p = 0,7 MPa,
- Massenstromdichte $\dot{m}$ = 50, 100, 200 und 300 kg/m²s,
- Eintrittsunterkühlung ΔT_{sub} = variiert (15, 30 und 50 K).

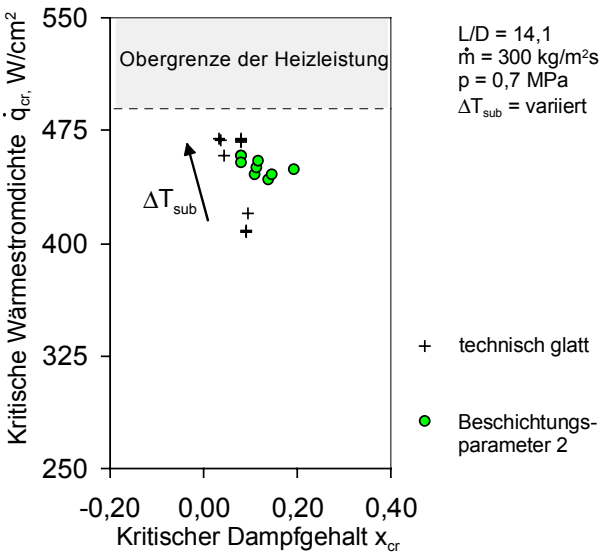


Abbildung 5-9: Verlauf der kritischen Wärmestromdichte in Abhängigkeit vom kritischen Dampfgehalt bei glattem und porös beschichteten Rohren und erhöhtem Druck (wahres DNB und scheinbares DNB, L/D = 14,1)

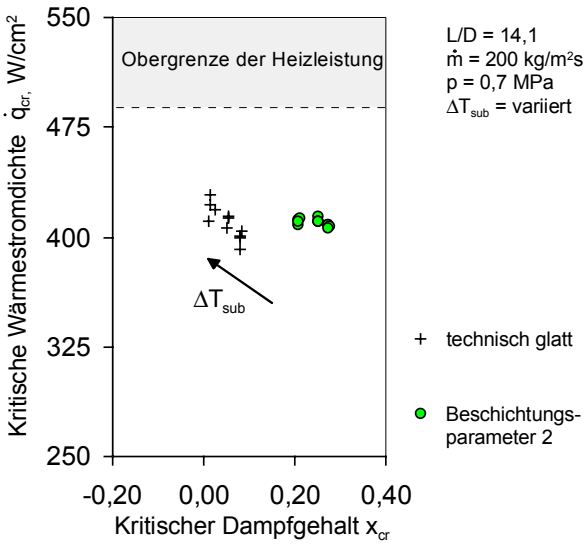


Abbildung 5-10: Verlauf der kritischen Wärmestromdichte in Abhängigkeit vom kritischen Dampfgehalt bei glattem und porös beschichteten Rohren und erhöhtem Druck (wahres DNB und scheinbares DNB, L/D = 14,1)

Die experimentell ermittelten CHF-Daten zeigen in Abbildung 5-9 und Abbildung 5-10 für das unbeschichtete Rohr einen steilen Anstieg im Verlauf $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} mit zunehmender Eintrittsunterkühlung. Für das porös beschichtete Rohr mit den Beschichtungsparametern 2 ist der Verlauf nahezu waagerecht. Die Siedekrise trat hier nicht mehr wie bei den Rohren mit der Rohrgeometrie $L/D = 50$ am Austritt der Testsektionen auf. Die Daten für das glatte Rohr werden dem wahren DNB zugeordnet. Die Daten für das Rohr mit den Beschichtungsparametern 2 werden dem scheinbaren DNB zugeordnet (siehe Abbildung 5-1). Die Siedekrise trat bei glatt und porös beschichtet im mittleren Bereich der Testsektionen auf. Der thermodynamische Dampfgehalt ist bei poröser Beschichtung zu leicht höheren Werten verschoben. Für das porös beschichtete Rohr mit den Beschichtungsparametern 1 konnte bei einer Massenstromdichte von 300 kg/m^{2}s und 200 kg/m^{2}s bei $p = 0{,}7$ MPa die kritische Wärmestromdichte nicht erreicht werden, sie lag oberhalb der maximal zur Verfügung stehenden Heizleistung. In Abbildung 5-9 und in Abbildung 5-10 fehlt daher die Darstellung der Daten.

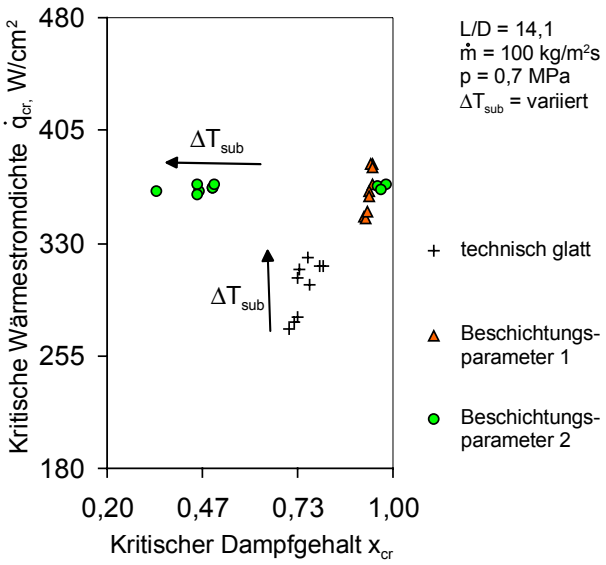


Abbildung 5-11: Verlauf der kritischen Wärmestromdichte in Abhängigkeit vom kritischen Dampfgehalt bei glattem und porös beschichteten Rohren und erhöhtem Druck (scheinbares DNB und Grenzdampfgebiet, L/D = 14,1)

In Abbildung 5-11 haben die Daten für das glatte Rohr und das porös beschichtete Rohr mit den Beschichtungsparametern 1 einen senkrechten Anstieg im Kurvenverlauf $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr}. Die Siedekrise trat am Austritt der Testsektionen auf. Die Daten werden dem Grenzdampfgebiet zugeordnet. Bei den Daten für das Rohr mit den Beschichtungsparametern 2 trat die Siedekrise bis zu einer Eintrittsunterkühlung von 30 K in der Mitte der Teststrecke und bei einer Unterkühlung von 50 K am Austritt der Testsektion auf. Die Einteilung der Daten erfolgt für eine Unterkühlung bis 30 K in scheinbares DNB und bei einer Unterkühlung von 50 K in Dryout (Grenzdampfgehalt). Unter sonst gleichen Versuchsbedingungen erfolgt allein durch die Variation der Eintrittsunterkühlung ein Wechsel des Strömungsregimes von DNB zu Dryout. Die Werte für die CHF liegen bei poröser Beschichtung höher, für die Daten bei poröser Beschichtung im Grenzdampfgehalt ist auch der kritische Dampfgehalt zu größeren Werten verschoben.

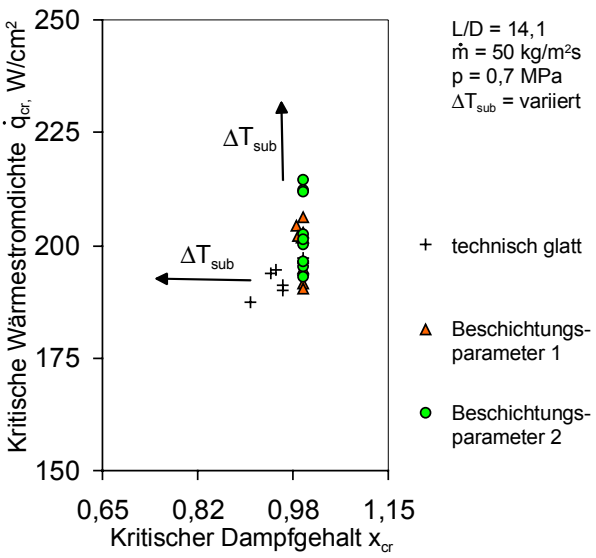


Abbildung 5-12: Verlauf der kritischen Wärmestromdichte in Abhängigkeit vom kritischen Dampfgehalt bei glattem und porös beschichteten Rohren und erhöhtem Druck (Grenzdampfgebiet und Microfilm-Dryout, $L/D = 14{,}1$)

In Abbildung 5-12 haben die Meßergebnisse für porös einen senkrechten Verlauf. Hier ergibt sich eine Verbesserung der kritischen Wärmestromdichte und des kritischen Dampfgehaltes infolge poröser Beschichtung. Die Daten für das Rohr mit den Beschichtungsparametern 2 haben die höheren Werte. Die Daten für die Rohre mit poröser Beschichtung liegen im Grenzdampfgebiet, die Daten für das unbeschichtete Rohr liegen dagegen noch im Microfilm-Dryout (waagerechter Verlauf), d.h. es erfolgt eine Intensivierung der CHF durch einen Wechsel des Strömungsregimes infolge poröser Beschichtung bei sonst gleichen Strömungsbedingungen (analog YILDIZ [68]).

Für die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 5-13 bis Abbildung 5-15) erfolgt die Darstellung der Verläufe $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} für die Rohrgeometrie L/D = 14,1 und einen Druck von p = 0,12 MPa.

Die Strömungsparameter für die Abbildung 5-13 bis Abbildung 5-15 lauten:

- Druck p = 0,12 MPa,
- Massenstromdichte $\dot{m}$ = 50, 200 und 300 kg/m²s,
- Eintrittsunterkühlung ΔT_{sub} = variiert (15, 30 und 50 K).

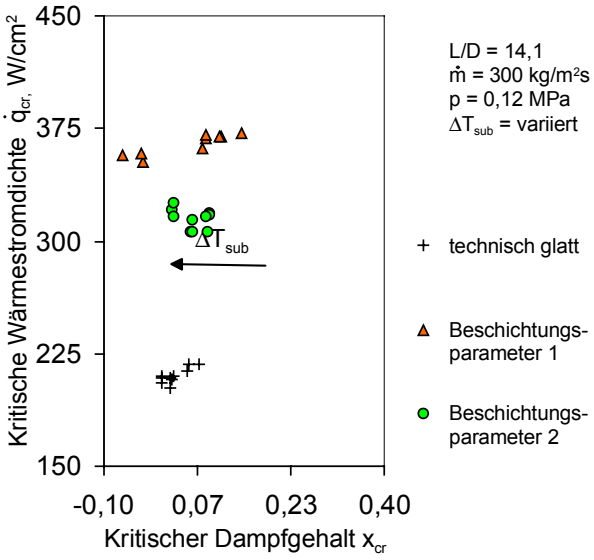


Abbildung 5-13: Verlauf der kritischen Wärmestromdichte in Abhängigkeit vom kritischen Dampfgehalt bei glattem und porös beschichteten Rohren und Umgebungsdruck (scheinbares DNB, L/D = 14,1)

Die Meßergebnisse für das glatte Rohr und den Rohren mit poröser Beschichtung (Beschichtungsparameter 1 und Beschichtungsparametern 2) zeigen einen flachen Anstieg im Kurvenverlauf $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} mit steigender Eintrittsunterkühlung. Die Siedekrise trat bei allen Teststrecken im mittleren Bereich der Testsektionen auf. Die Daten werden dem scheinbaren

DNB zugeordnet. Obwohl alle Daten im Bereich des scheinbaren DNB liegen, erfolgt eine Intensivierung der kritischen Wärmestromdichte infolge poröser Beschichtung. Die Testsektion mit den Beschichtungsparametern 1 zeigt die höchsten Werte für die CHF, die Verbesserung beträgt 72 %. Für die Testsektion mit den Beschichtungsparametern 2 beträgt die Verbesserung 55 % (Abbildung 5-13). YILDIZ [68] beobachtete eine Intensivierung nur in Zusammenhang mit einem Wechsel der Strömungsform vom Grenzdampfgebiet zum scheinbaren DNB infolge poröser Beschichtung.

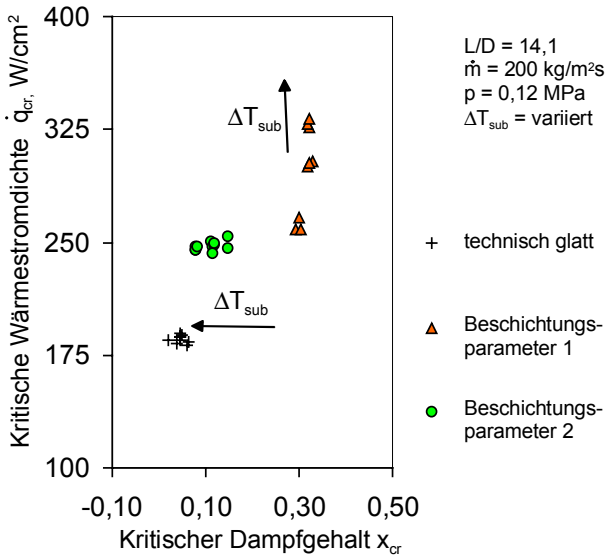


Abbildung 5-14: Verlauf der kritischen Wärmestromdichte in Abhängigkeit vom kritischen Dampfgehalt bei glattem und porös beschichteten Rohren und Umgebungsdruck (scheinbares DNB und Grenzdampfgebiet, L/D = 14,1)

Für das glatte und porös beschichte Rohr (Beschichtungsparameter 2) trat die Siedekrise im mittleren Bereich der Testsektion auf (Abbildung 5-14) und die Meßergebnisse zeigen einen waagerechten Verlauf. Sie werden dem scheinbaren DNB zugeordnet. Im Gegensatz dazu, trat bei der Teststrecke mit den Beschichtungsparametern 1 die Siedekrise am Austritt der Teststrecke auf. Die Daten zeigen hier einen senkrechten Anstieg im Verlauf für $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr}, zusätzlich sind die Werte für die kritische Wärmestromdichte höher als bei den anderen

Teststrecken. Es erfolgt also eine Intensivierung, obwohl hier anscheinend ein Wechseln der Strömungsform von Dryout (Grenzdampfgebiet) zu DNB infolge einer bestimmten porösen Beschichtung bei sonst gleichen Strömungsbedingungen verhindert wird (Beschichtungsparameter 1). In diesem Parameterbereich erfolgt die maximale Verbesserung der kritischen Wärmestromdichte für die Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 1 von 80 %. Die Verbesserung mit den Beschichtungsparametern 2 beträgt 35 %. YILDIZ [68] beobachtete das Gegenteilige, bei einer maximalen Verbesserung der CHF erfolgte ein Wechseln vom Grenzdampfgebiet zum DNB infolge poröser Beschichtung.

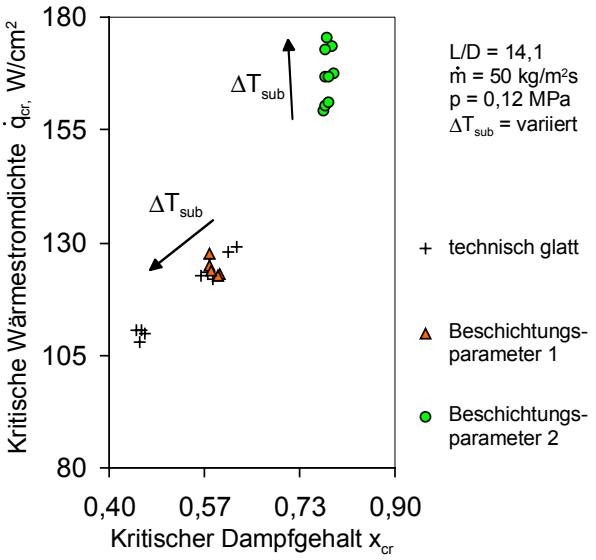


Abbildung 5-15: Verlauf der kritischen Wärmestromdichte in Abhängigkeit vom kritischen Dampfgehalt bei glattem und porös beschichteten Rohren und Umgebungsdruck (Grenzdampfgebiet und Übergang zum Microfilm-Dryout, $L/D = 14{,}1$)

In Abbildung 5-15 zeigen die Daten für das Rohr ohne Beschichtung ein Abnehmen der kritischen Wärmestromdichte mit zunehmenden ΔT_{sub} (analog Abbildung 5-6 beim glatten Rohr für $L/D = 50$ und $p = 0{,}12$ MPa sowie YILDIZ [68]). Die Daten für die beschichteten Rohre zeigen einen senkrechten Verlauf. In diesem Parameterbereich erfolgt die maximale

Intensivierung der CHF gegenüber glatt bei der Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 2 von 58 %. Bei allen in Abbildung 5-15 dargestellten Daten trat die Siedekrise am Austritt der Teststrecke auf, sie werden alle dem Grenzdampfgebiet zugeordnet.

5.1.3 Zusammenhang zwischen poröser Beschichtung und der Strömungsform

Zur Klärung der Fragestellung, ob ein signifikanter Einfluß poröser Beschichtungen auf die CHF mit einem Wechsel des Strömungsregimes bei sonst gleichen Bedingungen zusammenhängt (YILDIZ [68]), müssen die Ergebnisse der Messungen für hohe Dampfgehalte sowie die Messungen für niedrige Dampfgehalte in den Werten für $\dot{q}_{cr}$ und der dabei auftretenden Strömungsform miteinander verglichen werden.

Einen Überblick über den Zusammenhang zwischen Druck, Massenstromdichte und Strömungsform für alle gemessenen CHF-Daten bei den glatten Rohren und bei den Rohren mit poröser Beschichtung zeigen die Tabelle 5-1 bis Tabelle 5-3 für $L/D = 50$ sowie die Tabelle 5-4 bis Tabelle 5-6 für $L/D = 14{,}1$. Hierbei steht MFD für Microfilm-Dryout, GD für Grenzdampfgebiet und DNB für Departure from Nucleate Boiling. Zusätzlich ist der Einfluß der porösen Beschichtung auf die kritische Wärmestromdichte bei sonst gleichen Versuchsbedingungen (Abnahme oder Zunahme der CHF) farbig markiert. Hier wurde nur eine Veränderung $\dot{q}_{cr}$ bei poröser Beschichtung gegenüber glatt von > 10 % berücksichtigt. Dunkel markierte Bereiche in den Tabellen zeigen einen Einfluß poröser Beschichtung auf die CHF bei gleichzeitiger Veränderung der Strömungsform bei sonst gleichen Bedingungen. Je nach Massenstromdichte und Druck zeigt sich in den Tabellen sowohl der gleiche Mechanismus als auch ein Wechsel zu einer anderen Strömungsform infolge poröser Beschichtung in Abhängigkeit der Beschichtungsparameter.

Für das glatte Rohr mit der Länge von 450 mm wechselt bei einer Massenstromdichte von 100 kg/m^{2}s das Strömungsregime von Dryout (Grenzdampfgebiet) zu Microfilm-Dryout mit abnehmenden $\dot{m}$ unabhängig vom Druck (Tabelle 5-1). DNB wurde mit dieser Teststrecke nicht untersucht ($L/D = 50,\ x_b < x_{cr} < 1$).

Durch poröse Oberflächenbeschichtung (Beschichtungsparameter 1) wechselt die Strömungsform bereits bei $\dot{m} = 75$ kg/m^{2}s und den Drücken $p = 0{,}12$ MPa sowie $p = 0{,}4$ MPa in den Übergang von Grenzdampfgebiet zu Microfilm-Dryout (siehe Tabelle 5-2). Ein Einfluß auf die kritische Wärmestromdichte erfolgt ab einer Massenstromdichte von 75 kg/m^{2}s bis 175 kg/m^{2}s bei einem Druck von 0,12 MPa sowie bei einer Massenstromdichte von 175 kg/m^{2}s bei 0,4 MPa. Es zeigt sich eine Abnahme der kritischen Wärmestromdichte. Nur bei $\dot{m} = 75$ kg/m^{2}s und $p = 0{,}12$ MPa zeigt sich eine Veränderung der Strömungsform mit Einfluß poröser Beschichtung auf die CHF.

Für das Rohr mit den Beschichtungsparametern 2 zeigt sich schon bei kleinerer Massenstromdichte ($\dot{m} = 50$ kg/m^{2}s, $p = 0{,}12$ MPa) ein Wechsel in den Übergang von Grenzdampfgebiet zu Microfilm-Dryout. Eine signifikante Abnahme der kritischen Wärmestromdichte läßt sich hier ab $\dot{m} = 50$ kg/m^{2}s bei $p = 0{,}12$ MPa, ab $\dot{m} = 75$ kg/m^{2}s bei $p = 0{,}4$ MPa und ab $\dot{m} = 175$ kg/m^{2}s bei $p = 0{,}7$ MPa beobachten. Eine Veränderung der Strömungsform mit einem Einfluß auf die CHF zeigt sich bei dem Rohr mit den Beschichtungsparametern 2 in drei Fällen ($\dot{m} = 50, 75$ kg/m^{2}s und $p = 0{,}12$ MPa sowie $\dot{m} = 75$ kg/m^{2}s und $p = 0{,}4$ MPa).

Bei poröser Beschichtung verschiebt sich mit zunehmenden Druck das Strömungsregime vom Übergang Grenzdampfgebiet / Microfilm-Dryout zum Mechanismus des Microfilm-Dryout. Zusätzlich tritt der Bereich des Grenzdampfgebietes infolge poröser Beschichtung schon bei kleineren Massenstromdichten auf. Alle poröse Beschichtungen führen bei dieser Rohrgeometrie ($L/D = 50$) zu einer Abnahme der kritischen Wärmestromdichte.

Tabelle 5-1: Mechanismen der Siedekrise an der glatten Testsektion (L/D = 50)

$\dot{m}$, kg/m²s / p, MPa	25	50	75	100	125	150	175
0,12	MFD	MFD	MFD	GD	GD	GD	GD
0,4	MFD	MFD	MFD	GD	GD	GD	GD
0,7	MFD	MFD	MFD	GD	GD	GD	GD

Tabelle 5-2: Mechanismen der Siedekrise an der porös beschichteten Testsektion (Beschichtungsparameter 1, L/D = 50)

$\dot{m}$, kg/m²s / p, MPa	25	50	75	100	125	150	175
0,12	MFD	MFD	MFD/GD	GD	GD	GD	GD
0,4	MFD	MFD	MFD/GD	GD	GD	GD	GD
0,7	MFD	MFD	MFD	GD	GD	GD	GD

Bereich einer Verschlechterung von $\dot{q}_{cr}$ gegenüber glatt

Bereich einer Verschlechterung von $\dot{q}_{cr}$ gegenüber glatt mit Wechsel der Strömungsform

Tabelle 5-3: Mechanismen der Siedekrise an der porös beschichteten Testsektion (Beschichtungsparameter 2, L/D = 50)

$\dot{m}$, kg/m²s / p, MPa	25	50	75	100	125	150	175
0,12	MFD	MFD/GD	GD	GD	GD	GD	GD
0,4	MFD	MFD	MFD/GD	GD	GD	GD	GD
0,7	MFD	MFD	MFD	MFD/GD	GD	GD	GD

Bereich einer Verschlechterung von $\dot{q}_{cr}$ gegenüber glatt

Bereich einer Verschlechterung von $\dot{q}_{cr}$ gegenüber glatt mit Wechsel der Strömungsform

Tabelle 5-4: Mechanismen der Siedekrise an der glatten Testsektion (L/D = 14,1)

$\dot{m}$, kg/m²s / p , MPa	25	50	100	200	300
0,12	MFD	GD	DNB	DNB	DNB
0,4	MFD	MFD	GD	DNB	DNB
0,7	MFD	MFD	GD	DNB	DNB

Tabelle 5-5: Mechanismen der Siedekrise an der porös beschichteten Testsektion (Beschichtungsparameter 1, L/D = 14,1)

$\dot{m}$, kg/m²s / p , MPa	25	50	100	200	300
0,12	MFD	GD	GD	GD	DNB
0,4	MFD	GD	GD	GD	DNB
0,7	MFD	GD	GD	kein CHF	kein CHF

Bereich einer Verbesserung von $\dot{q}_{cr}$ gegenüber glatt

Bereich einer Verbesserung von $\dot{q}_{cr}$ gegenüber glatt mit Wechsel der Strömungsform

Tabelle 5-6: Mechanismen der Siedekrise an der porös beschichteten Testsektion (Beschichtungsparameter 2, L/D = 14,1)

$\dot{m}$, kg/m²s / p , MPa	25	50	100	200	300
0,12	MFD/GD	GD	DNB	DNB	DNB
0,4	MFD	GD	DNB	DNB	DNB
0,7	MFD	GD	GD/DNB	DNB	DNB

Bereich einer Verbesserung von $\dot{q}_{cr}$ gegenüber glatt

Bereich einer Verbesserung von $\dot{q}_{cr}$ gegenüber glatt mit Wechsel der Strömungsform

Für die kurzen Testsektionen (Länge 127 mm) ist der Zusammenhang zwischen Druck, Massenstromdichte und Strömungsform für alle gemessenen CHF-Daten in Tabelle 5-4 bis Tabelle 5-6 dargestellt (L/D = 14,1). Alle poröse Beschichtungen führen hier zu einer Erhöhung der CHF gegenüber glatt.

Für das glatte Rohr erfolgten Messungen für DNB, Grenzdampfgebiet und Microfilm-Dryout (L/D = 14,1, $0<x_{cr}<1$). Aus der Tabelle 5-4 läßt sich erkennen, daß der Mechanismus der Siedekrise mit zunehmenden Druck vom DNB zum Grenzdampfgebiet bei $\dot{m}$ = 100 kg/m^{2}s und vom Grenzdampfgebiet zum Microfilm-Dryout bei $\dot{m}$ = 50 kg/m^{2}s wechselt (ähnlich wie YILDIZ [68] bei glatt).

Die Tabelle 5-5 zeigt einen Wechsel der Strömungsform zum Grenzdampfgebiet infolge poröser Beschichtung (Beschichtungsparameter 1) bei einer Massenstromdichte von 100 und 200 kg/m^{2}s bei p = 0,12 MPa, einer Massenstromdichte von 50 und 200 kg/m^{2}s bei p = 0,4 MPa sowie einer Massenstromdichte von 50 kg/m^{2}s bei p = 0,7 MPa. Der Parameterbereich, bei dem das Phänomen des Grenzdampfgebietes auftritt, ist gegenüber glatt wesentlich vergrößert. Eine Verbesserung der kritischen Wärmestromdichte erfolgt ab $\dot{m}$ = 50 kg/m^{2}s für p = 0,12 MPa und ab $\dot{m}$ = 100 kg/m^{2}s für p = 0,4, und 0,7 MPa. Ein Wechsel der Strömungsform mit einer Verbesserung der kritischen Wärmestromdichte erfolgt nur bei einer Massenstromdichte von 100 und 200 kg/m^{2}s bei einem Druck von 0,12 MPa sowie bei einer Massenstromdichte von 200 kg/m^{2}s und einem Druck von 0,4 MPa. Für $\dot{m}$ = 200, 300 kg/m^{2}s kann bei einem Druck von 0,7 MPa keine Aussage über die Strömungsform gemacht werden. Obwohl bei diesen Strömungsparametern die CHF bei glatt erreicht wurde, konnte die kritische Wärmestromdichte beim Rohr mit den Beschichtungsparametern 1 wegen zu geringer zur Verfügung stehender Heizleistung nicht erreicht werden (Verbesserung gegenüber glatt).

Bei der Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 2 zeigt die Tabelle 5-6 einen Wechsel zum Übergang Grenzdampfgebiet / Microfilm-Dryout bei einer Massenstromdichte von 25 kg/m^{2}s und einem Druck von 0,12 MPa. Für $\dot{m}$ = 50 kg/m^{2}s wechselt bei einem Druck von 0,4 und 0,7 MPa das Strömungsregime von Microfilm-Dryout bei glattem Rohr zum Grenzdampfgebiet infolge poröser Beschichtung (Beschichtungsparametern 2). Bei 100 kg/m2s erfolgt ein Wechsel zu DNB bei p = 0,4 MPa sowie ein Wechsel zu DNB

(ΔT_{sub} = 15, 30 K) und Grenzdampfgehalt (ΔT_{sub} = 50K) bei p = 0,7 MPa. Eine Verbesserung von $\dot{q}_{cr}$ erfolgte ab einer Massenstromdichte von 25 kg/m^{2}s bei p = 0,12 MPa und für $\dot{m}$ = 50 kg/m^{2}s bei p = 0,4 MPa sowie für $\dot{m}$ = 100 kg/m^{2}s bei p = 0,7 MPa. Beim Rohr mit poröser Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 2 gibt es drei Parameterbereiche bei denen eine signifikante Verbesserung der CHF und ein Wechsel des Strömungsregimes auftreten.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß ein Einfluß poröser Beschichtungen auf die kritische Wärmestromdichte nicht zwingend mit einem Wechsel der Strömungsform gekoppelt ist. Bei den untersuchten Beschichtungen und Parametereinstellungen zeigte sich:

- In 36 Fällen kam es zu einem signifikanten Einfluß von > 10 % auf die CHF infolge poröser Beschichtung.
- Bei 10 Parametereinstellungen erfolgte neben einem Einfluß auf die CHF auch gleichzeitig ein Wechsel der Strömungsform.
- Ein Einfluß auf die CHF erfolgt in dieser Arbeit hauptsächlich im Bereich niedriger Drücke.
- Der Bereich maximalen Einflusses auf die CHF infolge poröser Beschichtung ist nur bei Beschichtung 1 mit einem Wechsel der Strömungsform gekoppelt.
- Poröse Beschichtungen führen zu einem früheren Wechsel in das Gebiet des Grenzdampfgehaltes gegenüber glatt.
- Der Bereich des Grenzdampfgebietes ist in Abhängigkeit von der porösen Schicht unterschiedlich groß ausgebildet (bei gleicher Rohrgeometrie).
- Jede poröse Schicht hat anscheinend ihren eigenen charakteristischen Verlauf im Diagramm $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr}

5.2 Vergleich der eigenen Ergebnisse mit denen anderer Autoren

In diesem Kapitel soll ein Vergleich der in dieser Arbeit experimentell gewonnenen Daten für die kritische Wärmestromdichte mit den CHF-Daten anderer Autoren stattfinden. Die einzigen CHF-Daten von porös beschichteten Rohren findet man in der Literatur bei YILDIZ [68]. Die von YILDIZ [68] verwendeten Beschichtungsparameter unterscheiden sich jedoch von denen in dieser Arbeit, somit erfolgt auch hier ein Vergleich der CHF-Daten nur für das glatte Rohr.

In der Abbildung 5-16 ist der Verlauf der kritischen Wärmestromdichte über der Massenstromdichte für die Daten verschiedener Autoren (YILDIZ [68], KUZMA-KICHTA ET AL. [34]) für das glatte Rohr mit unterschiedlichem L/D dargestellt.

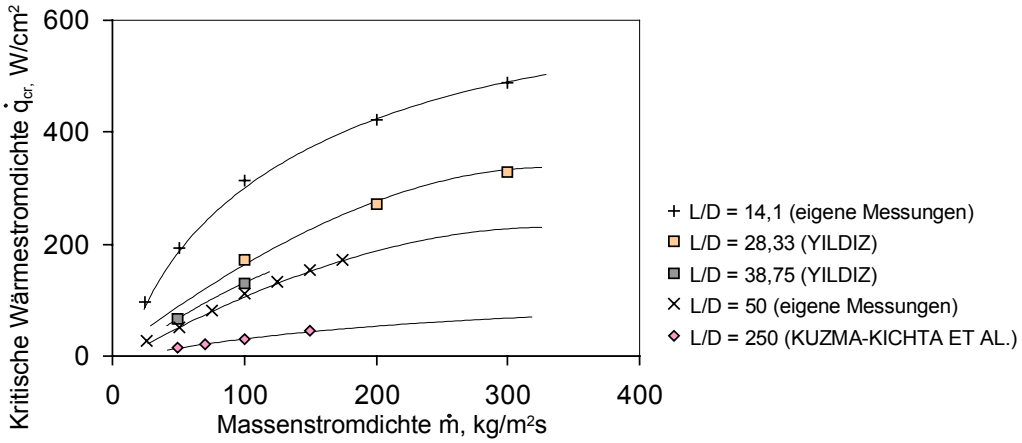


Abbildung 5-16: Vergleich des Einflusses von L/D auf die CHF beim glatten Rohr

Mit steigendem L/D fällt die kritische Wärmestromdichte bei konstantem Druck, konstanter Massenstromdichte und konstanter Eintrittsunterkühlung. Die Daten der eigenen CHF-Messungen fügen sich gut in die Verläufe der Daten der anderen Autoren ein und scheinen in der Tendenz plausibel.

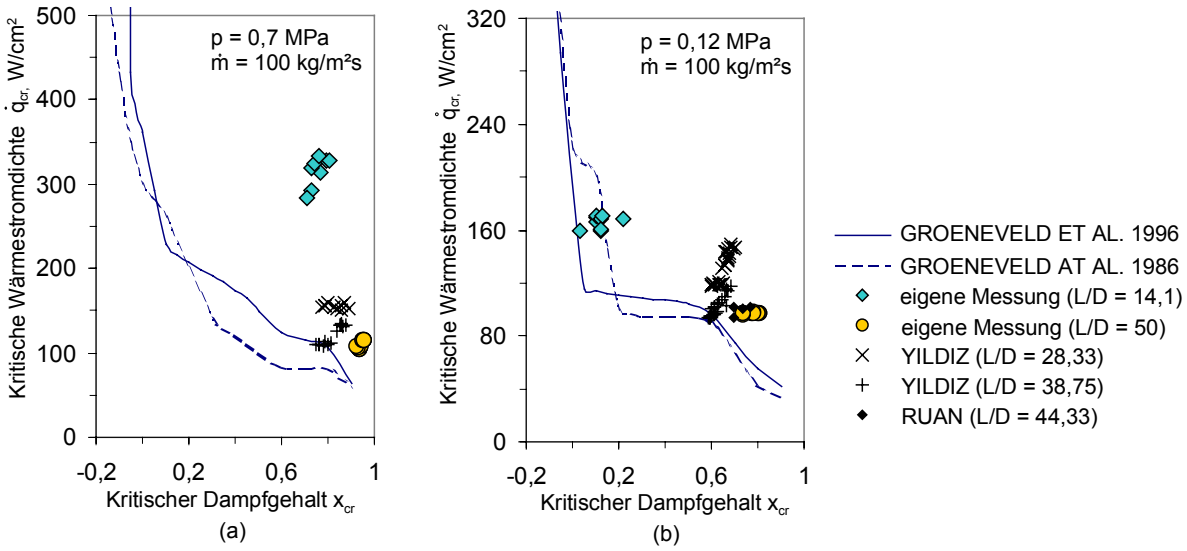


Abbildung 5-17: Kurvenverlauf von $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} nach GROENEVELD ET AL. [20], [21] mit eigenen Meßergebnissen und denen anderer Autoren für das glatte Rohr

Die 1986 und 1996 von GROENEVELD ET AL. [20], [21] erstellten Datenbanken liefern einen quantitativen Verlauf der Kurve $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr}. Die Abbildung 5-17 zieht einen Vergleich zwischen der alten und neu überarbeiteten Datenbank von GROENEVELD ET AL. [20], [21], den eigenen Meßdaten, sowie den Meßdaten von YILDIZ [68] und RUAN [52] bei einer Massenstromdichte von 100 kg/m^{2}s und einem Druck von 0,7 MPa sowie 0,12 MPa. Dabei mußten die eigenen Daten, die Daten von YILDIZ [68] und RUAN [52] auf einen Rohrinnendurchmesser von 8 mm umgerechnet werden, wie es GROENEVELD ET AL. [20], [21] vorschlagen. Einige Meßdaten für L/D = 14,1 (Abbildung 5-17 (b)) und von YILDIZ L/D = 38,75 (Abbildung 5-17 (a) und (b)) liegen auf den Kurven von GROENEVELD ET AL. [20], [21]. Sie zeigen aber eine unterschiedliche Tendenz gegenüber der Datenbank von GROENEVELD ET AL. [20], [21] (Abbildung 5-17 (a) und (b)).

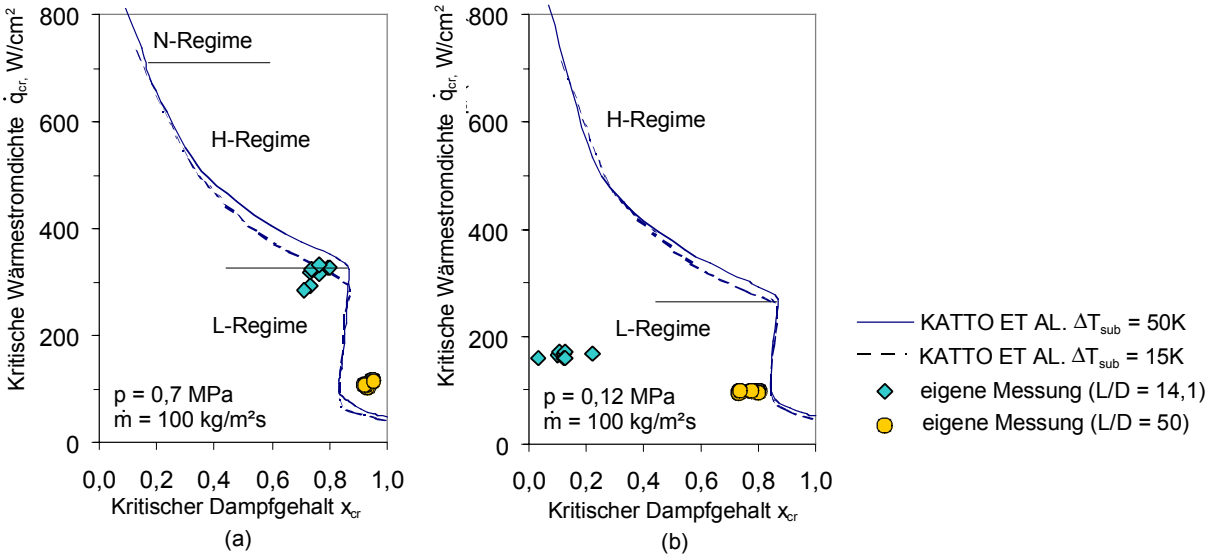


Abbildung 5-18: Vergleich berechneter Kurvenverlauf von $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} nach KATTO ET AL. [26] mit eigenen Meßergebnissen für das glatte Rohr

Die Abbildung 5-18 zeigt den berechneten Kurvenverlauf $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} nach der Korrelation von KATTO ET AL. [26] für eine Massenstromdichte von 100 kg/m^{2}s bei variierter Rohrlänge. Die Korrelation enthält eine Angabe über die Strömungsform, hierbei stehen das N-Regime und H-Regime für DNB und das L-Regime für Dryout (Grenzdampfgebiet und Microfilm-Dryout). Die Kurvenverläufe sind in Abbildung 5-18 für die Drücke p = 0,7 MPa und p = 0,12 MPa dargestellt. Zusätzlich wurden die Ergebnisse der eigenen CHF-Messungen eingetragen um Lage und Kurvenverlauf der Daten miteinander zu vergleichen. Für einen Druck von 0,7 MPa (Abbildung 5-18 (a)) erkennt man eine relativ gute Vorhersage der Lage der Daten sowie eine gute Vorhersage über das vorherrschende Strömungsregime, Grenzdampfgebiet und Microfilm-Dryout. Für einen niedrigeren Druck (Abbildung 5-18 (b)) trifft die Vorhersage von KATTO ET AL. [26] nicht mehr zu. Die Korrelation überschätzt die Werte der kritischen Wärmestromdichte um ein weites.

5.3 Bedeutung der Ergebnisse

Die Abhängigkeit der CHF von Strömungsparametern und Oberflächenbeschaffenheit wurde in dieser Arbeit erstmalig systematisch untersucht. Es erfolgten CHF-Untersuchungen für einen großen Bereich des Dampfgehaltes ($0 < x_{cr} < 1$) bei mäßig hohen Drücken und niedrigen Massenstromdichten. Die dabei zu erwartenden Strömungsbereiche wahres DNB, scheinbares DNB, Grenzdampfgebiet und Microfilm-Dryout wurden erreicht. Die Abbildung 5-19 gibt einen Überblick über die Anzahl der in dieser Arbeit erfolgten CHF-Messungen in den unterschiedlichen Bereichen der Strömungsregime.

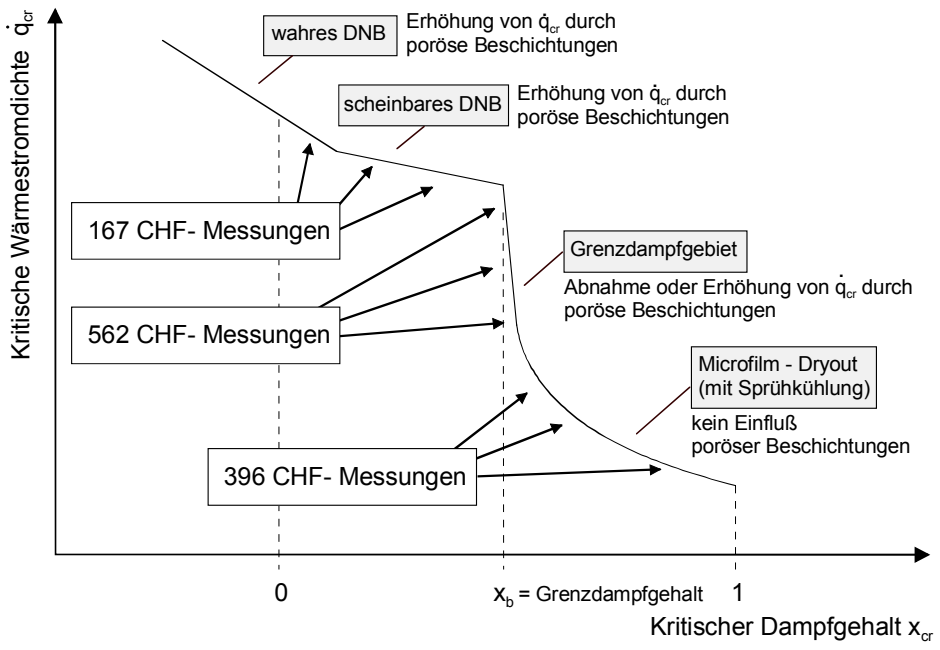


Abbildung 5-19: Einfluß poröser Beschichtungen gegenüber glatter Heizfläche

Der Einfluß poröser Beschichtungen gegenüber glatt auf die CHF kann positiv oder negativ sein in Abhängigkeit von Strömungsregime, Art der Beschichtung und Geometrie des Rohres.

Der maximale verringernde Einfluß poröser Beschichtungen trat für die Rohre mit der Geometrie $L/D = 50$ auf. Im Bereich des Grenzdampfgebietes erfolgte eine maximale Abnahme der kritischen Wärmestromdichte von 40 % bei den Beschichtungsparameter 2

(Abbildung 5-6 und Abbildung 5-21) sowie von 28 % bei den Beschichtungsparameter 1 (Abbildung 5-6 und Abbildung 5-20).

Bei den Teststrecken der Geometrie von $L/D = 14{,}1$ wurde die CHF infolge poröser Beschichtungen bei sonst gleichen Bedingungen erhöht. Erfolgten die CHF-Messungen für glatt und porös beschichtet im gleichen Strömungsregime des scheinbaren DNB, zeigte sich eine Verbesserung der kritischen Wärmestromdichte von 72 % bei der porösen Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 1 (Abbildung 5-13 sowie Abbildung 5-22) und von 55 % bei der porösen Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 2 (Abbildung 5-13 sowie Abbildung 5-23). Wurde ein Wechseln vom Strömungsregime des Grenzdampfgebietes in den DNB infolge der porösen Beschichtung verhindert, zeigte sich die maximale in dieser Arbeit gemessene Intensivierung der CHF von 80 % (Beschichtungsparameter 1, Abbildung 5-14 und Abbildung 5-22). Das größte Potential der Verbesserung für die Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 2 lag bei 58 %, die CHF-Messungen erfolgten im Grenzdampfgebiet für glatt und porös beschichtet ($L/D = 14{,}1$, Abbildung 5-15 sowie Abbildung 5-23).

Im Bereich des Microfilm-Dryout wurde in dieser Arbeit kein Effekt poröser Beschichtungen auf die kritische Wärmestromdichte beobachtet. Dies gilt für die Rohre der Geometrie $L/D = 50$ und $L/D = 14{,}1$ (Abbildung 5-5, Abbildung 5-8, sowie Abbildung 5-20 bis Abbildung 5-23).

Die Frage, ob eine signifikante Verbesserung der kritischen Wärmestromdichte bei poröser Beschichtung immer mit einem Wechsel der Strömungsform zusammen hängt (YILDIZ [68]), konnte in dieser Arbeit geklärt werden. Es zeigte sich, daß ein signifikanter Einfluß auf die CHF (Abnahme oder Zunahme) infolge poröser Beschichtung für die Bereiche hoher und niedriger Dampfgehalte nicht zwingend mit einem Wechsel des Strömungsregime zusammenhängt. Das gilt auch für die Bereiche mit maximalem Einfluß auf die CHF infolge poröser Beschichtung. Nur in einem Fall (von vier untersuchten Rohrstrecken) war die maximalem Erhöhung der kritischen Wärmestromdichte mit einem Wechsel des Strömungsregimes verknüpft.

In der vorliegenden Arbeit wurden poröse Oberflächenbeschichtungen mit nahezu gleicher Schichtdicke und Porosität bei verschiedenen Partikeldurchmessern verwendet. Es zeigte sich in dieser Arbeit, daß:

- der Bereich des Grenzdampfgebietes infolge poröser Beschichtung bei kleineren Massenstromdichten auftritt als beim glatten Rohr. Bei großen Korndurchmessern zeigt sich dieser Effekt früher als bei kleinen Korndurchmessern.
- poröse Beschichtungen mit großen Korndurchmessern den Bereich des Grenzdampfgebietes gegenüber glatt verkleinern und poröse Beschichtungen mit kleinen Korndurchmessern den Bereich des Grenzdampfgebietes zu höheren Massenstromdichten ausdehnen.
- poröse Beschichtungen in Abhängigkeit der Beschichtungsparameter ihren eigenen charakteristischen Kurvenverlauf im Diagramm $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} haben.

Die Abbildung 5-20 bis Abbildung 5-23 visualisieren den Einfluß poröser Beschichtungen auf die CHF in Abhängigkeit von den Beschichtungsparametern, dargestellt im Kurvenverlauf $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} und dem Druck. Die schematische Darstellung erfolgt für die Rohrgeometrien $L/D = 50$ (Abbildung 5-20 und Abbildung 5-21) und $L/D = 14{,}1$ (Abbildung 5-22 und Abbildung 5-23) mit und ohne poröser Beschichtung.

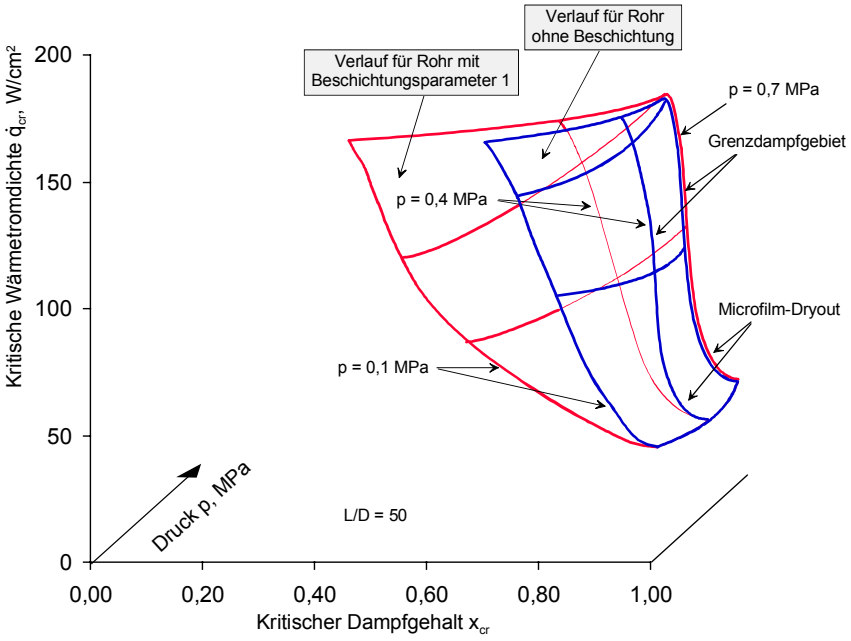


Abbildung 5-20: Einfluß poröser Beschichtung auf den Kurvenverlauf $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} in Abhängigkeit vom Druck (Beschichtungsparameter 1, Dryout, $L/D = 50$)

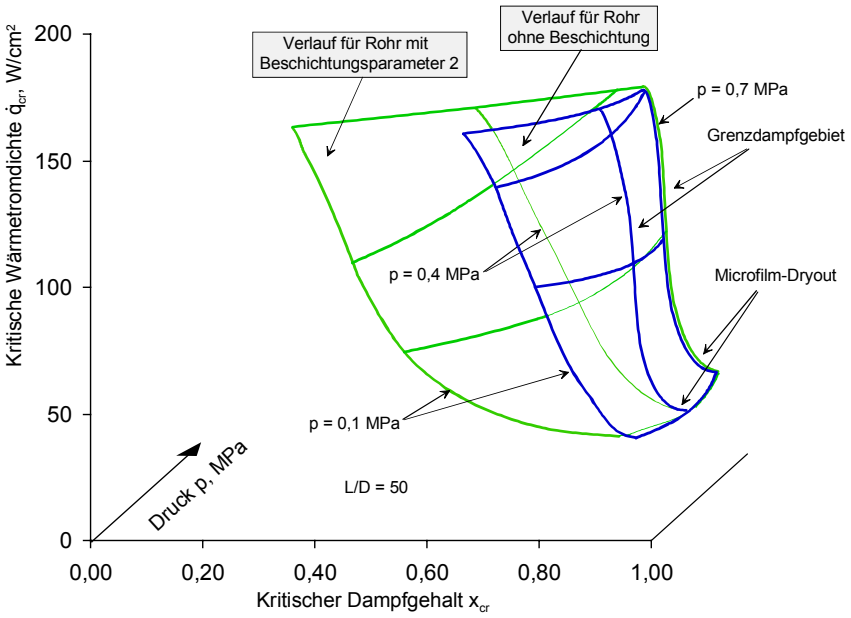


Abbildung 5-21: Einfluß poröser Beschichtung auf den Kurvenverlauf $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} in Abhängigkeit vom Druck (Beschichtungsparameter 2, Dryout, $L/D = 50$)

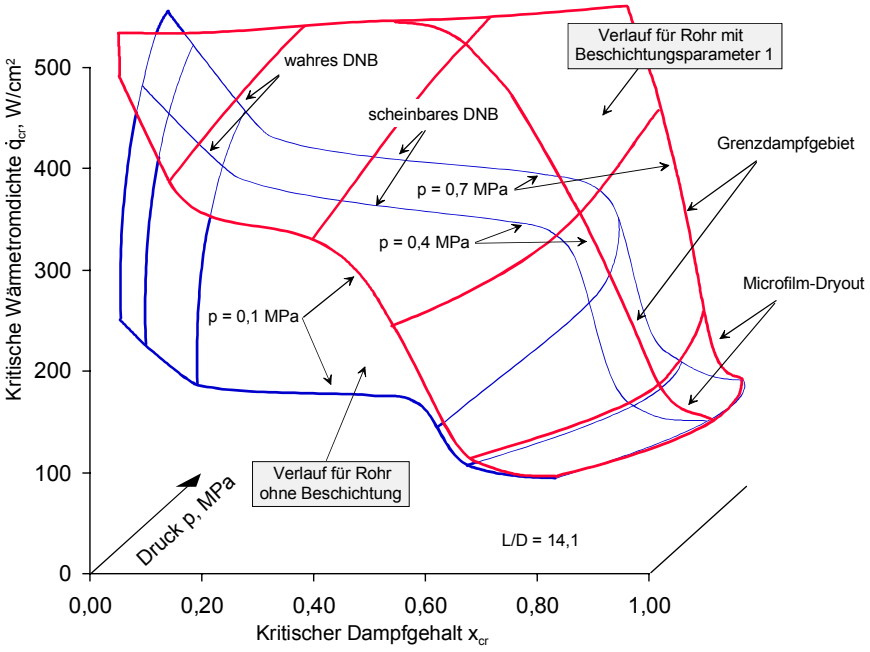


Abbildung 5-22: Einfluß poröser Beschichtung auf den Kurvenverlauf $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} in Abhängigkeit vom Druck (Beschichtungsparameter 1, DNB und Dryout, $L/D = 14{,}1$)

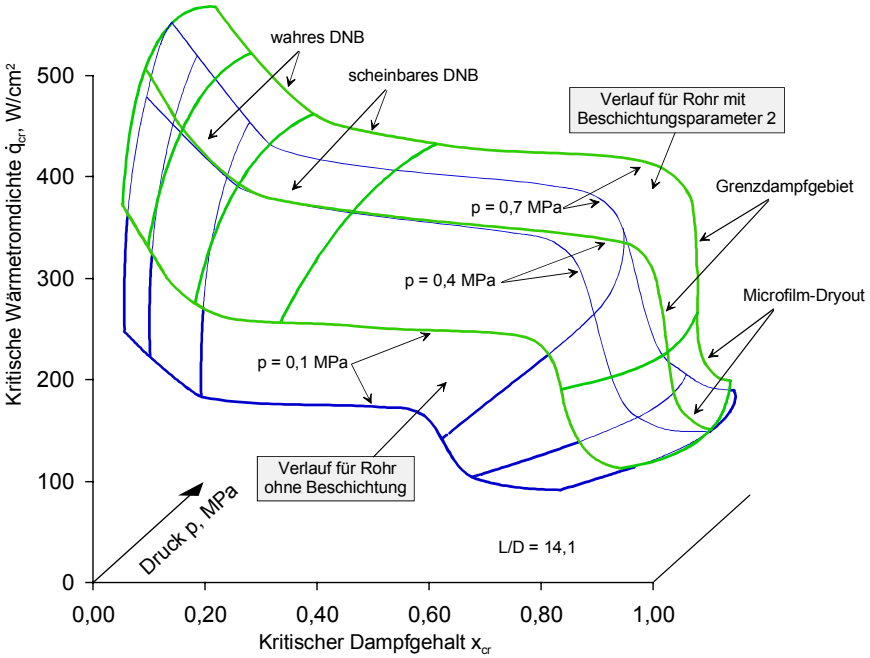


Abbildung 5-23: Einfluß poröser Beschichtung auf den Kurvenverlauf $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} in Abhängigkeit vom Druck (Beschichtungsparameter 2, DNB und Dryout, $L/D = 14{,}1$)

Für einen ersten Ansatz physikalischer Erklärungen, die den Einfluß poröser Beschichtungen auf die Siedekrise und den dabei auftretenden Strömungsregimen beschreiben, muß ein direkter Vergleich der CHF-Messungen zwischen glatt und poröser Beschichtung bei gleichen Strömungszuständen erfolgen. Zur Klärung des Einflusses poröser Beschichtung auf die kritischen Wärmestromdichten werden daher im folgenden nur Daten aus gleichen Strömungsregimen (DNB, Grenzdampfgebiet oder Microfilm-Dryout) miteinander verglichen. Die Abbildung 5-24 zeigt den schematischen Verlauf der kritischen Wärmestromdichte in Abhängigkeit vom thermodynamischen Dampfgehalt mit Zuordnung der Strömungsform.

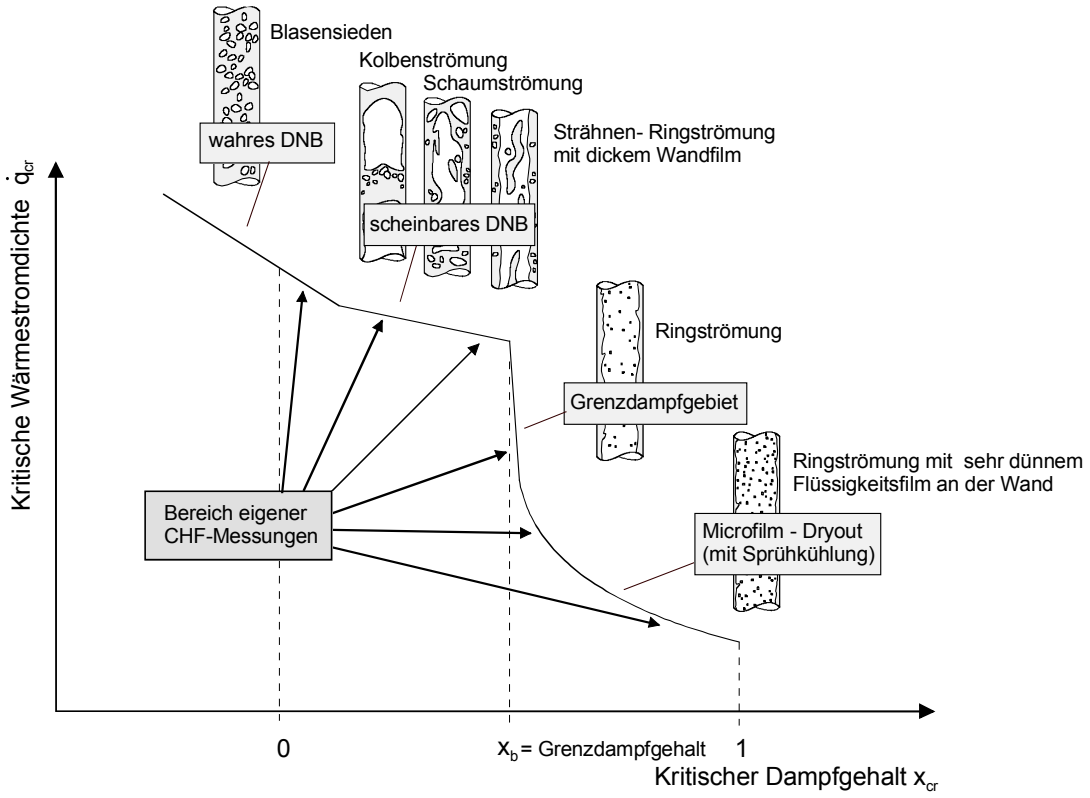


Abbildung 5-24: Prinzipieller Verlauf der kritischen Wärmestromdichte in Abhängigkeit vom thermodynamischen Dampfgehalt mit Strömungsform

5.3.1 Einfluß poröser Beschichtungen bei DNB

In diesem Strömungsregime (wahres und scheinbares DNB) entsteht die Siedekrise direkt aus der Strömungsform des Blasensiedens bei hohen Massenstromdichten und kleinen Dampfgehalten, d.h. Austrocknung der Heizfläche z.B. unter einer wachsenden Blase, bei der Austrocknung der dünnen Flüssigkeitsschicht zwischen der Heizfläche und einer Kolbenblase oder bei der Behinderung von sich ablösenden Blasen bei zu großer Blasendichte.

In dem Bereich des wahren und scheinbaren DNB führen in dieser Arbeit poröse Beschichtungen zu einer Verbesserung der kritischen Wärmestromdichte oder haben, in Abhängigkeit von den Strömungsparametern, keinen Effekt.

Die Verbesserung infolge poröser Beschichtung in diesem Strömungsregime ist wahrscheinlich auf die Erhöhung der Keimstellendichte bei poröser Schicht sowie auf die gute Versorgung der Heizfläche mit Flüssigkeit in der porösen Schicht durch Kapillarkräfte zurückzuführen. Durch die vermehrte Anzahl der Keimstellen erfolgt eine Erhöhung der Blasenanzahl pro Oberfläche (Dampfbildung auch in der porösen Schicht). Zusätzlich ist der Blasendurchmesser sich ablösender Blasen bei poröser Beschichtung im Gegensatz zu glatter Heizfläche bei sonst gleichen Bedingungen kleiner. Anscheinend führt dies zu einer Erhöhung der Blasenfrequenz und somit zu einer Steigerung der Turbulenz in der Strömung. Die Effekte begünstigen dann den schnelleren Abtransport der Wärme von der Oberfläche der porösen Schicht und führen zu einem Verschieben der CHF zu höheren Werten bei DNB gegenüber glatt.

Diese Effekte sind bei Beschichtungen mit kleinen Korngrößen (Beschichtungsparameter 1) verstärkt. Die Anzahl der Keimstellen und der Poren ist größer (siehe Oberflächenaufnahmen der Beschichtungsparameter 1 und 2, Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5). Dies führt durch vermehrte Blasenbildung bei kleineren Blasen zu größerer Turbulenz in der Strömung und somit so höheren Wärmestromdichten. Auch können sich kleinere Körner in der porösen Schicht dichter anordnen und es bilden sich Porenkanäle mit kleinerem Durchmesser (siehe Schliffbilder der porösen Beschichtung 1 und 2, Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5). Mit abnehmenden Porendurchmesser steigt wiederum die Kapillarkraft und führt somit zu einer besseren Versorgung der Heizfläche am Fuße der porösen Schicht mit Flüssigkeit.

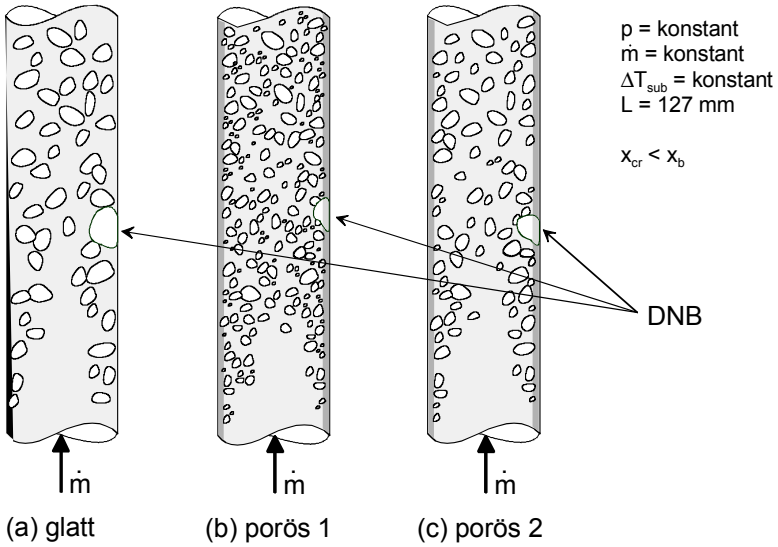


Abbildung 5-25: Mögliches Bild der Strömungsform im Rohr bei DNB mit und ohne poröser Beschichtung (hohe Massenstromdichte und kleiner Dampfgehalt; $\dot{q}_{cr,glatt} < \dot{q}_{cr,porös2} < \dot{q}_{cr,porös1}$)

Bei niedrigen Drücken sind diese Effekte stärker ausgeprägt. Mit zunehmenden Druck nimmt die Oberflächenspannung ab. Der Blasendurchmesser bei glatter Heizfläche ist somit kleiner und die Kapillarkraft in der porösen Schicht verkleinert sich. Der Effekt poröser Beschichtungen nimmt ab.

5.3.2 Einfluß poröser Beschichtungen im Grenzdampfgebiet

Im Bereich des Grenzdampfgebietes tritt die Siedekrise in Form von Dryout (Austrocknung) auf. Dieser Mechanismus erfolgt bei niedriger Massenstromdichte und hohen Dampfgehalten. Das Strömungsbild im Rohr wechselt vom Blasensieden zur Ringströmung. An der Rohrwand bildet sich ein Flüssigkeitsfilm mit Dampf als kontinuierlicher Phase im Strömungskern aus. Der Dampfgehalt steigt kontinuierlich in Strömungsrichtung an. Bei Ausbildung der Ringströmung kommt es im unteren Bereich des Rohres zu einem Abriß von größeren Flüssigkeitstropfen (Entrainment), die sich am Rohrende teilweise wieder ablagern (Deposition). Dabei kommt es bei großer Eintrittsunterkühlung durch die Ablagerung kälterer Flüssigkeitstropfen an der Heizfläche zu einer stärkeren Abkühlung und die kritische

Wärmestromdichte wird zu höheren Werten bei nahezu gleichbleibendem Dampfgehalt verschoben (nahezu senkrechter Verlauf im $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} Diagramm). Die Siedekrise tritt am Austritt der Teststrecken auf, der Flüssigkeitsfilm trocknet hier aus.

Der Einfluß poröser Schichten auf die CHF in diesem Regime ist abhängig von den Strömungsparametern und der Länge der Testsektionen.

Es scheint hier zwei Effekte der poröser Beschichtungen auf die kritische Wärmestromdichte gegenüber glatt zu geben. Zum einen den positiven Effekt, wie er bei reiner Blasenströmung beobachtet wurde (vor der Ausbildung der Ringströmung herrscht Blasensieden im Rohr) und zum anderen den negativen Effekt einer Verstärkung des Entrainment bei poröser Oberflächenbeschichtung. Je nach Länge des Rohres verschiebt sich das Gleichgewicht dieser beiden Einflüsse und der Effekt poröser Beschichtungen auf die CHF kann positiv oder negativ oder auch ohne Einfluß sein.

Bei den Teststrecken der Geometrie $L/D = 50$ wurde in dieser Arbeit eine Abnahme der CHF infolge poröser Beschichtung beobachtet. Es wird angenommen, daß bei dieser Rohrlänge (L = 450 mm) der Einfluß des Entrainment überwiegt. Die Zunahme des Entrainment infolge poröser Beschichtung, begünstigt durch die höhere Oberflächenrauhigkeit, führt zu einer Abnahme des Flüssigkeitsfilms an der Wand (Abbildung 5-26) und damit zu einem früheren Austrocknen der Heizfläche. Die kritische Wärmestromdichte gegenüber glatt verschiebt sich zu kleineren Werten bei sonst gleichen Bedingungen. Die Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 2 hat bedingt durch den größeren Partikeldurchmesser in der porösen Schicht eine erhöhte Oberflächenrauhigkeit. Wahrscheinlich ist hier das Entrainment größer als bei den Beschichtungsparametern 1, mit der Folge der niedrigeren Werte für die kritische Wärmestromdichte.

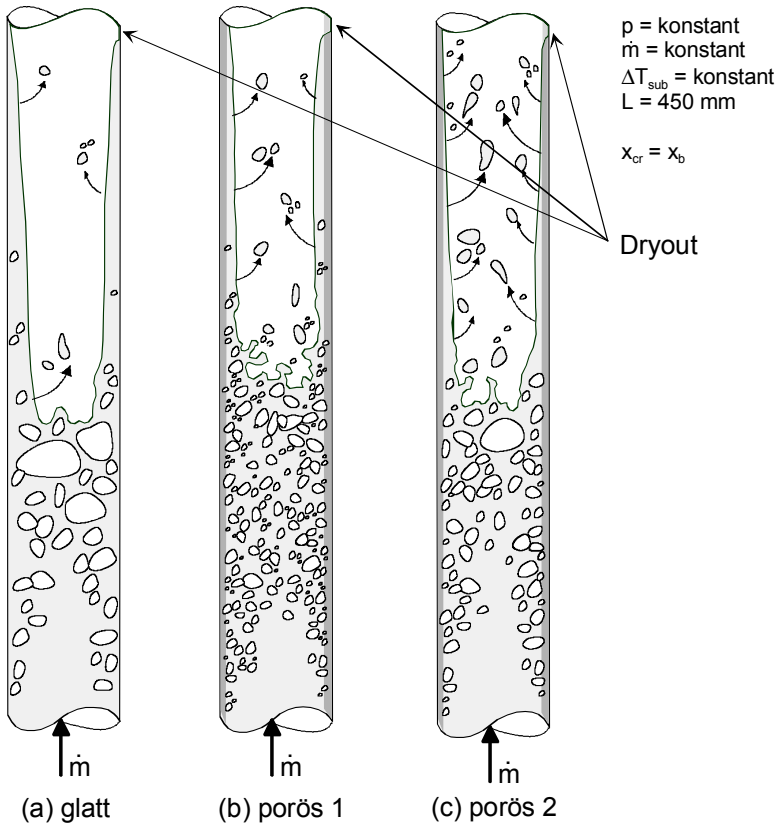


Abbildung 5-26: Mögliches Bild der Strömungsform im Rohr bei Grenzdampfgehalt mit und ohne poröser Beschichtung für L/D = 50 (kleine Massenstromdichte und hoher Dampfgehalt; $\dot{q}_{cr,glatt} > \dot{q}_{cr,porös1} > \dot{q}_{cr,porös2}$)

Bei einer Zunahme des Druckes wird der Flüssigkeitsfilm an der Rohrwand dicker, der Tropfeneintrag aus dem Flüssigkeitsfilm an der Wand nimmt ab und der Einfluß poröser Beschichtungen auf die CHF gegenüber glatt verliert an Wirkung.

Anders ist der Einfluß poröser Beschichtungen auf die CHF bei den Teststrecken der Länge von 127 mm (L/D = 14,1). Bei dieser Geometrie wurde eine eindeutige Verbesserung der CHF infolge poröser Beschichtung beobachtet. Hier ist der Flüssigkeitsfilm an der Rohrwand bei sonst gleichen Strömungsparametern gegenüber den langen Rohren dicker. Anscheinend spielt hier das Entrainment eine untergeordnete Rolle und der positive Einfluß poröser Beschichtungen läßt sich durch die Effekte, ähnlich wie bei DNB erklären (Abbildung 5-27).

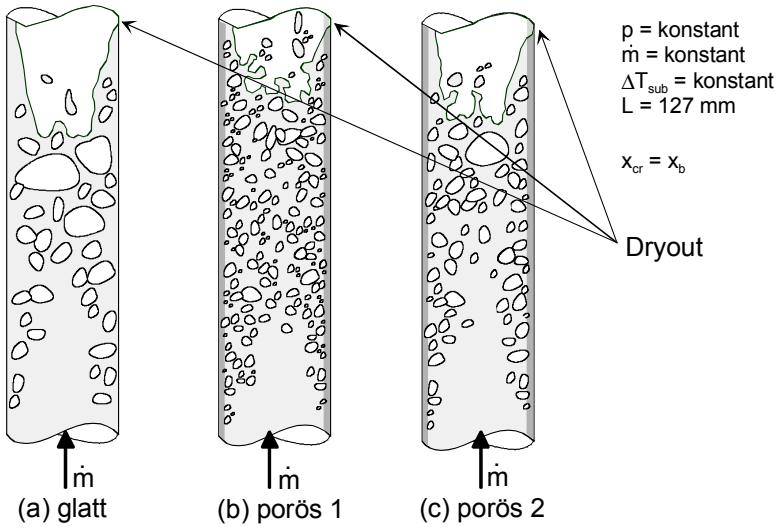


Abbildung 5-27: Mögliches Bild der Strömungsform im Rohr bei Grenzdampfgehalt mit und ohne poröser Beschichtung für L/D = 14,1 (mittlere Massenstromdichte und hoher Dampfgehalt; $\dot{q}_{cr,glatt} < \dot{q}_{cr,porös1} < \dot{q}_{cr,porös2}$)

Bei gleichen Bedingungen ist die kritische Wärmestromdichte bei der Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 1 kleiner als mit den Beschichtungsparametern 2. Anscheinend platzt der Flüssigkeitsfilm an der Wand bei kleinen Massenstromdichten (dünner Flüssigkeitsfilm an der Wand) durch vermehrte Blasenbildung und durch kleinere Blasen bei der Beschichtung 1 früher auf und es kommt dadurch zum Austrocknen der Heizfläche. Dieser Effekt nimmt mit Zunahme der Massenstromdichte sowie mit Zunahme des Druckes ab. Der Flüssigkeitsfilm an der Wand nimmt zu. Die Werte der kritischen Wärmestromdichte für das Rohr mit den Beschichtungsparametern 1 gleichen sich denen des Rohres mit den Beschichtungsparametern 2 an.

5.3.3 Einfluß poröser Beschichtungen bei Microfilm-Dryout

Der Bereich des Microfilm-Dryout ist ein Sonderfall des Dryout und tritt bei sehr kleiner Massenstromdichte und hohem Dampfgehalt in der Strömung auf. Unter diesen Strömungsbedingungen bildet sich eine Ringströmung mit sehr dünnem Flüssigkeitsfilm an der Rohrwand mit feinsten Tröpfchen im Dampfkern aus. Aufgrund von Ablagerung dieser Tröpfchen aus dem Dampfkern an der Heizfläche spricht man auch von sogenannter Sprühkühlung. Diese Art der Siedekrise wird daher auch Deposition Controlled Burnout genannt und tritt wie beim Dryout am Rohrende der Teststrecke durch Austrocknen des Flüssigkeitsfilms an der Wand auf.

Wie die Untersuchungen dieser Arbeit belegen, haben poröse Beschichtungen im Strömungsregime des Microfilm-Dryouts keinen Einfluß auf die kritische Wärmestromdichte. Diese Beobachtung gilt für die Rohre beider Geometrien (L/D = 50 und L/D = 14,1) und ist unabhängig von der Art der porösen Beschichtung.

Sollten poröse Beschichtungen bei der Ausbildung dieser Strömungsform zu einem vermehrten Tropfeneintrag in den Dampfkern führen, was anzunehmen ist, so lagern sich diese aufgrund der niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten wieder vermehrt ab, so daß in der Summe der Flüssigkeitsfilm nicht ausdünnt und hier kein Einfluß poröser Beschichtungen auf die CHF besteht.

5.3.4 Weiterführende Erklärungen zum Einfluß poröser Beschichtungen

Die folgenden Abbildungen geben eine Übersicht über die in dieser Arbeit identifizierten Strömungsformen. Analog zu YILDIZ [68] werden die experimentell gewonnenen Ergebnisse dieser Arbeit in neuen Strömungskarten festgehalten. Die Abbildung 5-28 und Abbildung 5-29 zeigen den Wechsel der Strömungsregime sowohl durch Änderung des Druckes als auch infolge poröser Beschichtung. Die in den Kapiteln 5.3.1 bis 5.3.3 gemachten Annahmen helfen, den Wechsel von Strömungsregimen bei bestimmten Parametereinstellungen infolge poröser Beschichtung zu erklären.

Wie die Strömungskarten für die Rohre der Geometrie L/D = 50 zeigen, konnten in dieser Arbeit ausreichend viele Punkte im Bereich des Grenzdampfgebietes und Microfilm-Dryout (Abbildung 5-28) erfaßt werden. Die Bereiche des DNB, Grenzdampfgebietes und Microfilm-Dryout wurden mit den Rohren der Geometrie L/D = 14,1 abgedeckt (Abbildung 5-29).

Bei den Teststrecken der Geometrie *L/D* = 50 sowie der Geometrie *L/D* = 14,1 wurde ein Wechseln des Strömungsregimes vom Microfilm-Dryout zum Grenzdampfgebiet infolge poröser Beschichtung bei kleineren Massenstromdichten als bei glatt beobachtet (Abbildung 5-28 und Abbildung 5-29). Allgemein gilt, daß durch eine Erhöhung der Massenstromdichte eine Erhöhung des Entrainment erfolgt, hervorgerufen durch die höheren Strömungsgeschwindigkeiten im Rohr. Das Regime des Microfilm-Dryout wechselt zum Grenzdampfgebiet. Rauhe Oberflächen führen ebenfalls zu einer Erhöhung des Entrainment. Somit kann sich auf Grund der Zunahme des Entrainment bei poröser Beschichtung gegenüber glatt schon bei kleineren Massenstromdichten der Bereich des Grenzdampfgebietes ausbilden. Die Oberflächenrauhigkeit bei der porösen Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 2 ist größer als bei der Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 1. Bei allen Teststrecken mit poröser Beschichtung 2 tritt das Phänomen des Grenzdampfgebietes früher auf als bei Beschichtung 1 und glatt (Abbildung 5-28 (c) und Abbildung 5-29 (c)).

Wie in Kapitel 5.3.1 angenommen, führen poröse Beschichtungen bei den Rohren der Geometrie *L/D* = 14,1 in Abhängigkeit von den Beschichtungsparametern zu einer Erhöhung der Blasenanzahl und Blasenfrequenz bei kleinerem Blasendurchmesser und zu einer besseren Versorgung der Heizfläche mit Flüssigkeit in der porösen Schicht durch Kapillarkräfte. Bei den Beschichtungsparametern 1 sind diese Effekte am stärksten ausgeprägt. Die wahrscheinlich größere Kapillarkraft in der porösen Schicht 1 verhindert bei sonst gleichen Bedingungen ein Austrocknen der Heizfläche in der Beschichtung und erlaubt somit bei Zunahme des Dampfgehaltes den Zusammenschluß der einzelnen Blasen im Strömungskern. Anscheinend führt dies zu der Ausbildung einer Ringströmung mit dickem Wandfilm bei hohen Wärmestromdichten mit der Folge des Grenzdampfphänomens als Strömungsregime (Abbildung 5-29 (b)), während die Daten für die Beschichtung 2 und das glatte Rohr im Regime des DNB liegen (Abbildung 5-29 (a) und (b)).

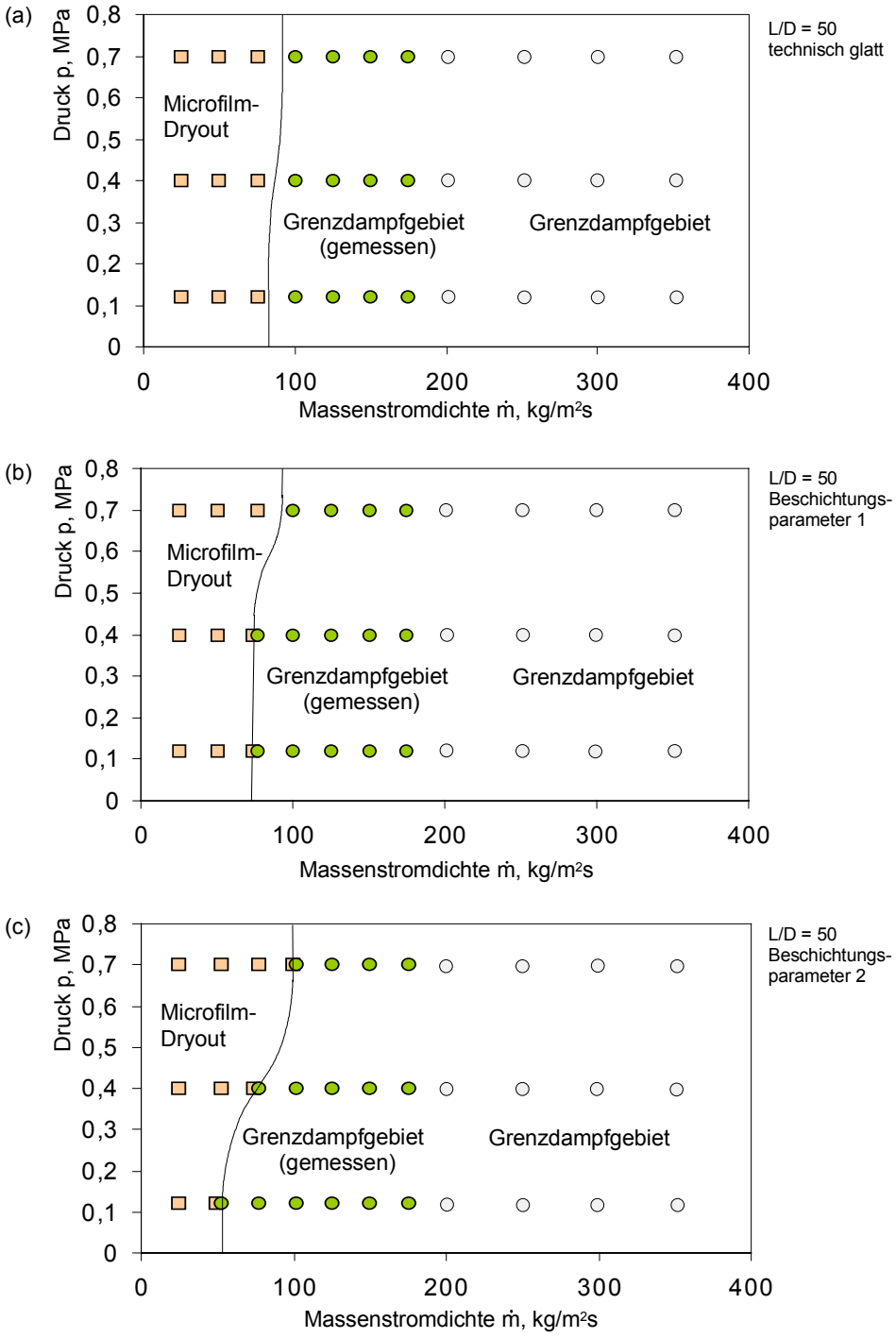


Abbildung 5-28: Strömungskarten für die Rohrgeometrie $L/D = 50$ mit qualitativer Übergangsgrenze zwischen den Strömungsformen Microfilm-Dryout und Grenzdampfgebiet für glatt, Beschichtungsparameter 1 und 2

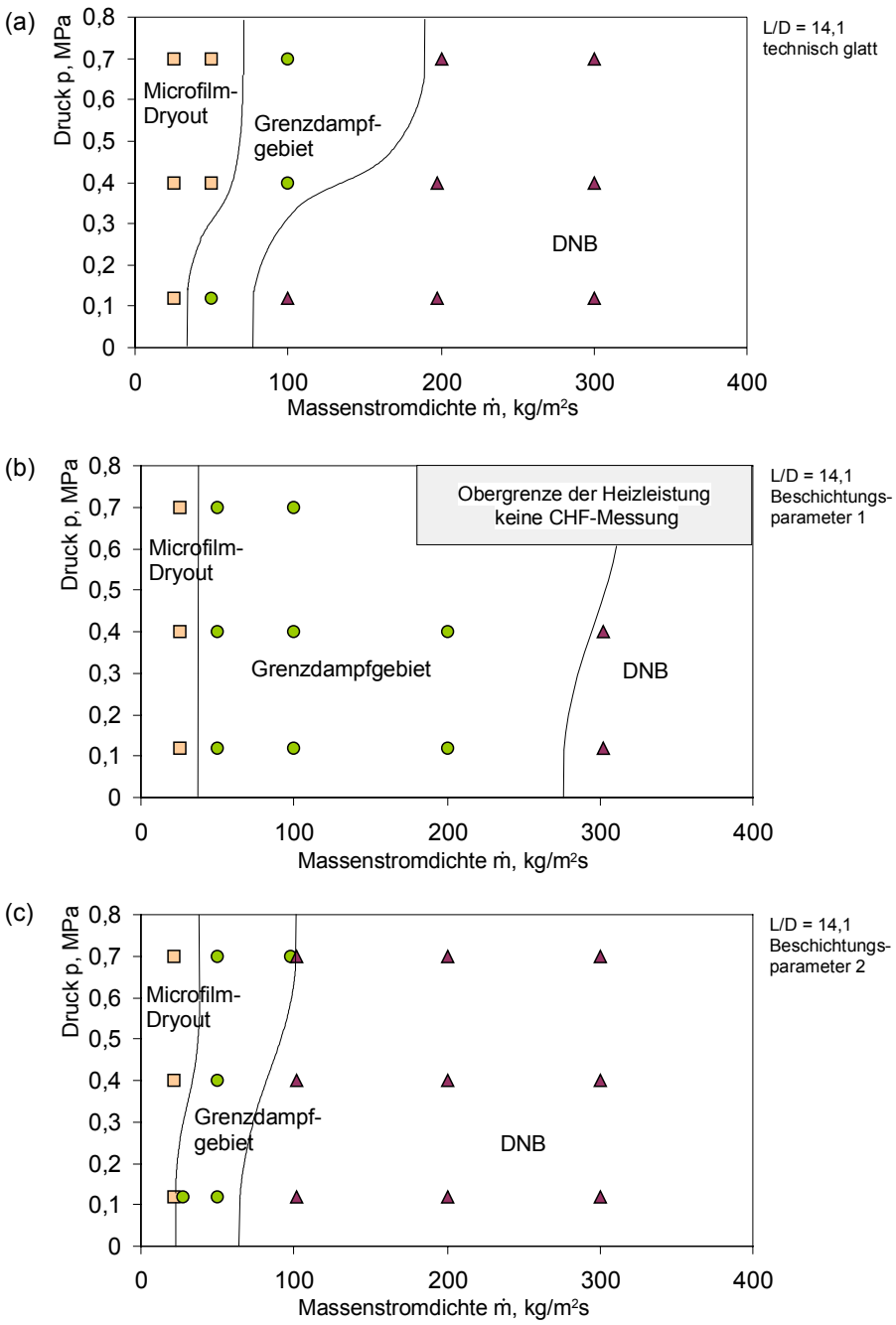


Abbildung 5-29: Strömungskarten für die Rohrgeometrie $L/D = 14{,}1$ mit qualitativer Übergangsgrenze zwischen den Strömungsformen Microfilm-Dryout, Grenzdampfgebiet und DNB für glatt, Beschichtungsparameter 1 und 2

Die Beobachtung des DNB-Verhaltens bei dem Rohr mit der Beschichtung 2 bei mäßig hohem Druck (L/D = 14,1, Abbildung 5-29 (c)) läßt sich durch die Annahme der Ausbildung einer geschlossenen Dampfschicht in der porösen Schicht erklären. Die Daten für die Beschichtung 1 und glatt liegen hier im Grenzdampfgebiet ((Abbildung 5-29 (a) und (b)). Anscheinend kann bei der porösen Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 2 der Dampf ab einer gewissen Dampfproduktionsrate nicht mehr schnell genug abgeführt werden. Eine Versorgung der Heizfläche mit Flüssigkeit an dieser Stelle ist nicht mehr gewährleistet und die Heizfläche trocknet vollständig aus. Es kommt für die poröse Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 2 zum DNB bei Werten höherer kritischer Wärmestromdichte gegenüber glatt.

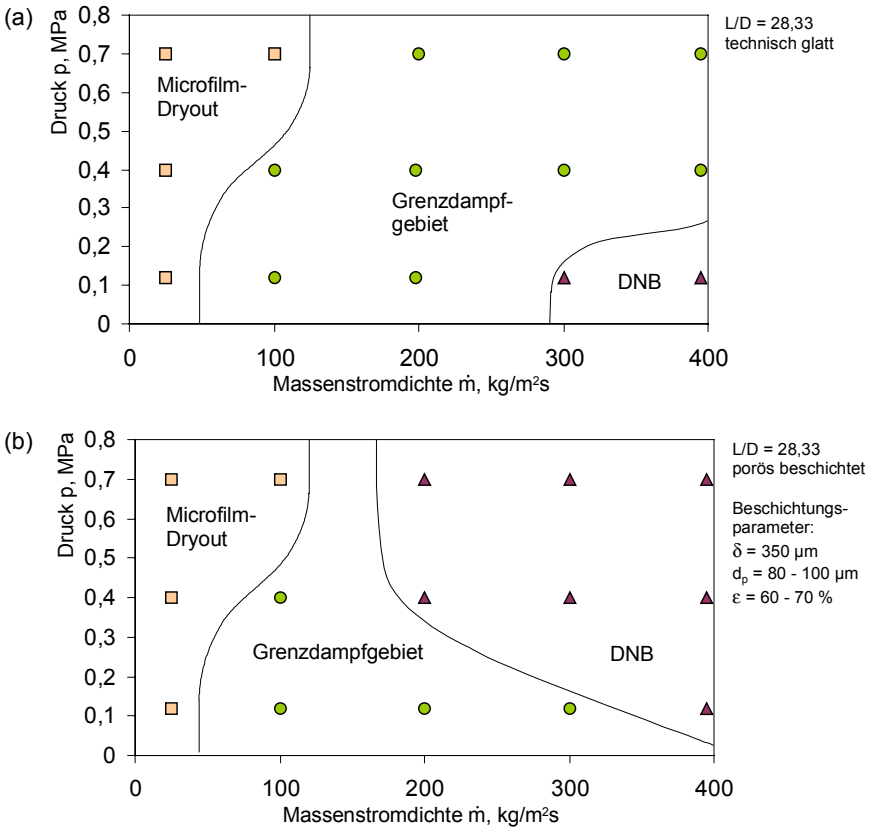


Abbildung 5-30: Strömungskarten nach YILDIZ [68] für die Rohrgeometrie L/D = 28,33 mit qualitativer Übergangsgrenze zwischen den Strömungsformen Microfilm-Dryout, Grenzdampfgebiet und DNB für glatt und porös beschichtet

YILDIZ [68] entwickelte Strömungskarten für eine Rohrgeometrie von $L/D = 28{,}33$ ($D = 6$ mm, $L = 170$ mm). Die Strömungskarten gelten für das unbeschichtete Rohr und für ein Rohr mit poröser Beschichtung (Schichtdicke $d_p = 350$ µm, Korndurchmesser $\delta = 80$-100 µm, Porosität $\varepsilon = 60$-70 %), siehe Abbildung 5-30 (a) und (b).

Zieht man die Strömungskarten von YILDIZ [68] zu einem Vergleich heran, dann läßt sich ein ähnlicher Verlauf der qualitativen Grenzen der Strömungsregime beim glatten Rohr erkennen. Für den Microfilm-Dryout gibt es im Bereich hoher Drücke und kleiner Massenstromdichten eine Ausbuchtung im qualitativen Grenzverlauf (Abbildung 5-30 (a)). Diese zeigt sich auch bei den Strömungskarten für die Geometrien $L/D = 50$ und $L/D = 14{,}1$. Auch für den Bereich des DNB lassen sich analoge Zusammenhänge für das glatte Rohr erkennen. Die qualitative Übergangsgrenze zwischen Grenzdampfgebiet und DNB bei YILDIZ [68] zeigt im Vergleich mit dieser Arbeit einen ähnlichen Verlauf (niedriger Druck, hohe Massenstromdichte, $L/D = 14{,}1$).

Anders sind die Tendenzen bei der von YILDIZ [68] entwickelten Strömungskarte für das porös beschichtete Rohr (Abbildung 5-30 (b)). Der qualitative Grenzverlauf zwischen Grenzdampfgebiet und DNB unterscheidet sich von denen bei glatt und porös in dieser Arbeit sowie bei glatt in der Arbeit von YILDIZ [68]. Im Gegensatz zu den anderen untersuchten Rohren tritt hier das Regime des DNB vornehmlich im Bereich erhöhter Drücke auf, was in dieser Arbeit bei keiner der porös beschichteten Testsektionen beobachtet wurde.

6 KORRELATION DER ERGEBNISSE

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln der Einfluß poröser Beschichtungen auf die kritische Wärmestromdichte und deren Entstehungsmechanismus analysiert wurde sowie eine Analyse des zugehörigen Strömungszustandes erfolgte, werden in diesem Kapitel die experimentell ermittelten Daten für die kritische Wärmestromdichte in Abhängigkeit von Strömungsmechanismus und Oberflächenbeschaffenheit (beschichtet oder unbeschichtet) korreliert. Eine Aufteilung der Korrelation in die unterschiedlichen Entstehungsmechanismen der Siedekrise (DNB und Dryout) ist notwendig, da es sich hier um unterschiedliche physikalische Phänomene handelt.

Zuerst erfolgt ein Vergleich der ermittelten CHF-Daten mit den in der Literatur vorhandenen Korrelationen anderer Autoren. Danach werden die Daten mit der vom Autor dieser Arbeit entwickelten Korrelationen verglichen. Der Vergleich erfolgt für lotrechte, direkt beheizte Kreisrohre mit und ohne poröser Innenrohrbeschichtung.

6.1 Vergleich der Ergebnisse mit der Korrelation anderer Autoren

6.1.1 Korrelation anderer Autoren für glatte Rohre

Die Korrelation von MACBETH [42] zeigt im gültigen Parameterbereich (siehe Tabelle 2-2) eine gute Übereinstimmung mit den eigenen ermittelten CHF-Daten (Abbildung 6-1). Abweichungen in der Vorhersage der CHF treten im Bereich des Grenzdampfphänomen auf. Hier werden die CHF-Daten nach MACBETH [42] unterschätzt. Für die kurze Testsektion ergeben sich größere Abweichungen. Die Testsektion mit der Rohrgeometrie von $L/D = 14{,}1$ liegt außerhalb des Gültigkeitsbereiches der Korrelation.

KATTO ET AL. [26] sind die ersten Autoren, die bei ihrer Korrelation der CHF die Strömungsform bei der Entstehung der Siedekrise berücksichtigen. Obwohl die verglichenen Daten für das glatte Rohr im Anwendungsbereich der Korrelation liegen, ist sie für einige Parameterbereiche der eigenen Untersuchung dennoch nicht plausibel. Aus der Abbildung 6-2 läßt sich eine große Abweichung von den eigenen gemessenen Daten erkennen. Für die kurze

Testsektion (L/D = 14,1) bei einem Druck von $p = 0{,}12$ MPa werden die Meßdaten überschätzt.

Obwohl die Korrelation von WEBER [65] nur eine Gleichung beinhaltet und die einzelnen Strömungsregime nicht berücksichtigt werden, zeigt sie die beste Übereinstimmung mit allen in dieser Arbeit experimentell ermittelten CHF-Daten (siehe Abbildung 6-3). Die Korrelation wurde für Dryout entwickelt. Für dieses Strömungsregime liegen alle Werte im Fehlerband von $\pm 20\%$, nur für DNB gibt es größere Abweichungen.

Eine gute Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Daten für die kritische Wärmestromdichte beim glatten Rohr der Rohrgeometrie von $L/D = 50$ zeigt die Korrelation von RUAN [52]. Der Anwendungsbereich dieser Korrelation gilt nur für eine Rohrgeometrie von $L/D = 44{,}33$. Wie die Abbildung 6-4 zeigt, werden die eigenen CHF-Daten für die kurzen Rohre von L/D = 14,1 von der RUAN-Korrelation [52] unterschätzt.

KUZMA-KICHTA ET AL. [36], [37] berücksichtigen in ihrer Korrelation die unterschiedlichen Strömungsregime Dryout und DNB. Ein Vergleich der Korrelation mit den eigenen CHF-Daten ist in Abbildung 6-5 dargestellt. Für das Strömungsregime Dryout ist die Korrelation im Gültigkeitsbereich stark eingeschränkt. Sie gilt nur für eine Rohrgeometrie von $L/D = 250$. Bei einem Vergleich mit den experimentell gewonnen CHF-Daten zeigte sich trotzdem eine gute Vorhersage für das glatte Rohr der Länge von 127 mm. Die Vorhersage der Daten für DNB bewegt sich im Fehlerband von $\pm 20\%$. Für die Daten der kritischen Wärmestromdichte für das Rohr der Geometrie $L/D = 50$ trifft die Korrelation von KUZMA-KICHTA ET AL. [36], [37] nicht zu. Die Daten werden grob überschätzt und erscheinen in Abbildung 6-5 nicht.

Auch bei der Korrelation von YILDIZ [68] wird das Strömungsregime bei der Entstehung der Siedekrise berücksichtigt. Allerdings ist der Anwendungsbereich der Korrelation von YILDIZ [68] für das Strömungsregime des DNB auf eine Rohrgeometrie von $L/D = 28{,}33$ begrenzt und für den Bereich des Microfilm-Dryout wurde auf Grund einer zu geringen Datenbasis keine Korrelation entwickelt. Hier kann ein Vergleich der experimentell ermittelten Daten beim glatten Rohr nur für das Regime des Grenzdampfgebietes erfolgen. Man erkennt, daß ein Großteil der eigenen Daten im Fehlerband von $\pm 20\%$ liegt (Abbildung 6-6). Für DNB gibt es keine Übereinstimmung.

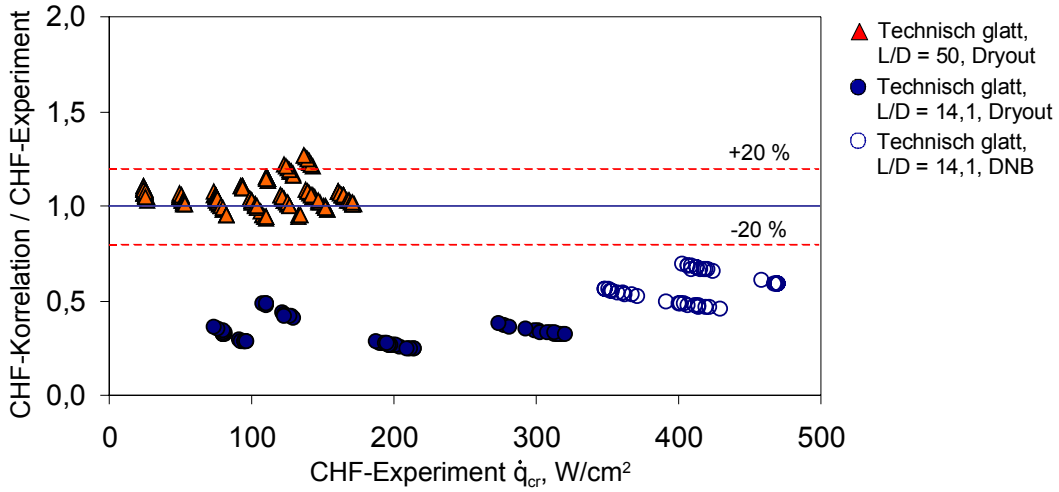


Abbildung 6-1: Vergleich der CHF-Daten mit der Korrelation von MACBETH [42] (glatte Rohre)

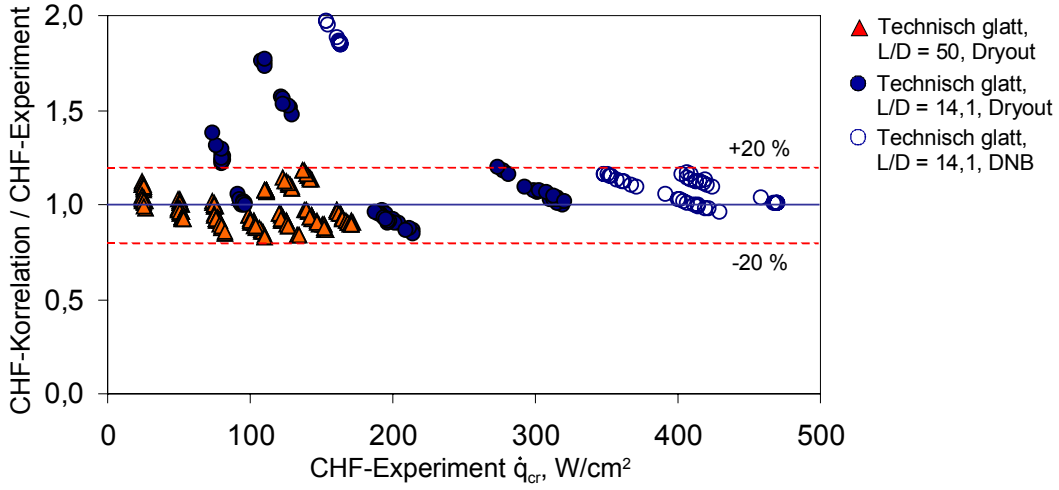


Abbildung 6-2: Vergleich der eigenen CHF-Daten mit der Korrelation von KATTO ET AL. [26] (glatte Rohre)

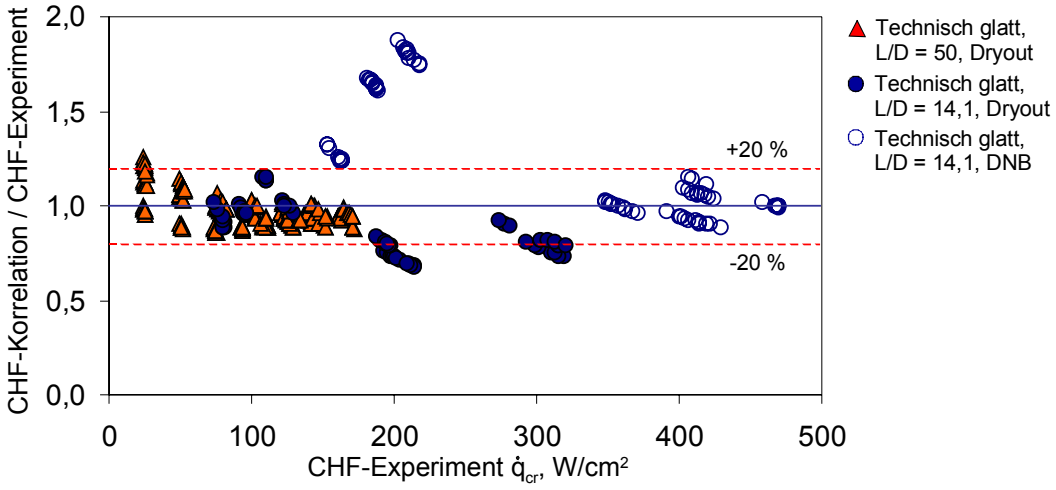


Abbildung 6-3: Vergleich der eigenen CHF-Daten mit der Korrelation von WEBER [65] (glatte Rohre)

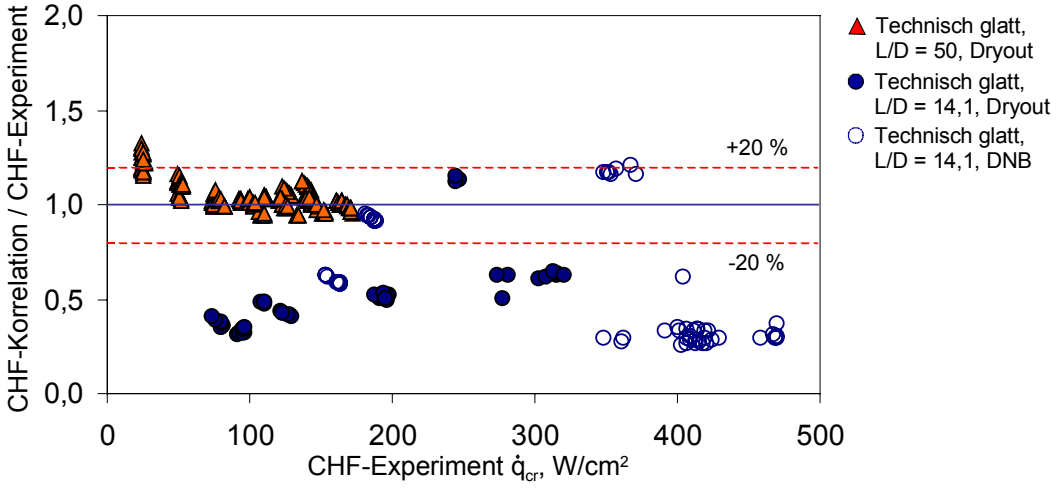


Abbildung 6-4: Vergleich der eigenen CHF-Daten mit der Korrelation von RUAN [52] (glatte Rohre)

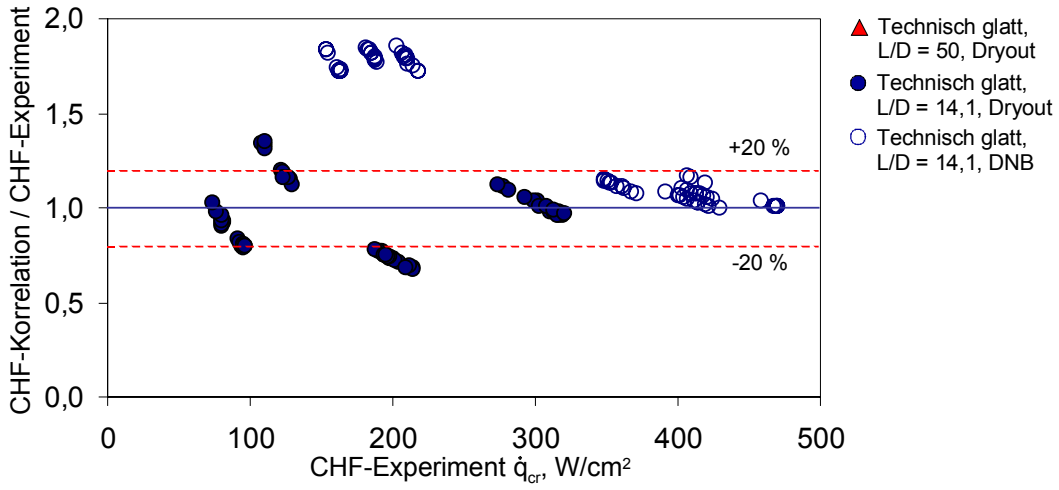


Abbildung 6-5: Vergleich der eigenen CHF-Daten mit der Korrelation von KUZMA-KICHTA ET AL. [36], [37] (glatte Rohre)

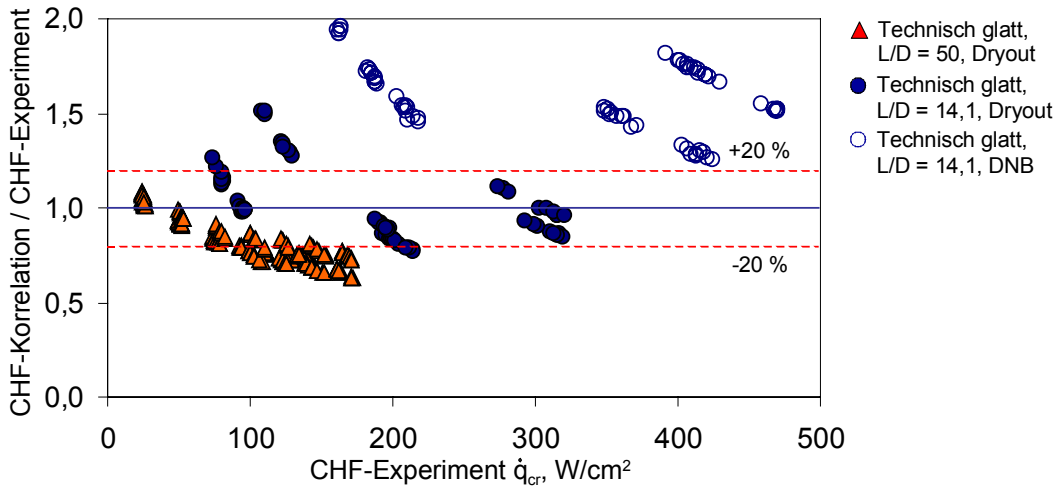


Abbildung 6-6: Vergleich der CHF-Daten mit der Korrelation von YILDIZ [68] (glatte Rohre)

6.1.2 Korrelation anderer Autoren für porös beschichtete Rohre

Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, gibt es nur zwei dem Autor zum jetzigen Zeitpunkt bekannte Korrelationen für Rohre mit poröser Innenbeschichtung. Die experimentell ermittelten CHF-Daten für die Rohre mit den Beschichtungsparametern 1 und 2 werden im folgenden mit den Vorhersagewerten dieser beiden Korrelationen verglichen.

Wie bei der Korrelation für glatte Rohre unterscheiden die Autoren KUZMA-KICHTA ET AL. [36], [37] für Rohre mit poröser Beschichtung die einzelnen Entstehungsmechanismen der Siedekrise. Für den Mechanismus des Dryout (Bereich des Grenzdampfphänomens sowie des Microfilm-Dryout) erfolgt die Verwendung der gleichen Gleichung wie beim glatten Rohr. Nur für das Regime des DNB erfolgt eine Unterscheidung von glatt. Die eigenen CHF-Daten für porös beschichtete Rohre mit einer Rohrgeometrie von $L/D = 50$ liegen nicht im Gültigkeitsbereich der Korrelation. Die Abweichungen sind hier sehr groß und es erfolgt keine Darstellung in Abbildung 6-7. Obwohl auch die Rohre der Länge $L = 127$ mm nicht im Anwendungsbereich der Korrelation liegen, werden sie dargestellt. Die Daten liegen teilweise im Fehlerband von $\pm 20\%$, werden aber größtenteils überschätzt. Auch für DNB überschätzt die Korrelation die eigenen Meßdaten. Allerdings zeigt sich hier eine Tendenz der Zunahme der Genauigkeit der Vorhersage der CHF mit steigender Massenstromdichte (Abbildung 6-7).

Eine höhere Genauigkeit in der Vorhersage der kritischen Wärmestromdichte bei porös beschichteten Rohren zeigt die Korrelation von YILDIZ [68]. Es erfolgt eine Aufteilung in die unterschiedlichen Strömungsregime DNB, Grenzdampfgebiet und Microfilm-Dryout. Für die Bereiche des Grenzdampfgebietes und Microfilm-Dryout verwendet YILDIZ [68] bei der Vorhersage der CHF für porös beschichtete Rohre die gleiche Korrelation wie für glatt. Die Autorin beobachtete anscheinend keinen Einfluß poröser Beschichtungen in diesem Bereich. Wie in Abbildung 6-8 ersichtlich, liegen die eigenen CHF-Daten für porös beschichtete Rohre im Bereich des Dryout größtenteils im Fehlerband von $\pm 20\%$. Die von YILDIZ [68] für Rohre mit poröser Beschichtung entwickelte Korrelation für das Strömungsregime DNB gilt nur für eine feste Beschichtung ($\delta = 350$ µm, $d_p = 80\text{-}100$ µm, $\varepsilon = 60\text{-}70$ %) die nicht mit denen in dieser Arbeit übereinstimmt. Die Korrelation unterschätzt die in dieser Arbeit ermittelten Meßdaten für die CHF bei DNB. Die Abweichungen sind größer als 20% (siehe Abbildung 6-8).

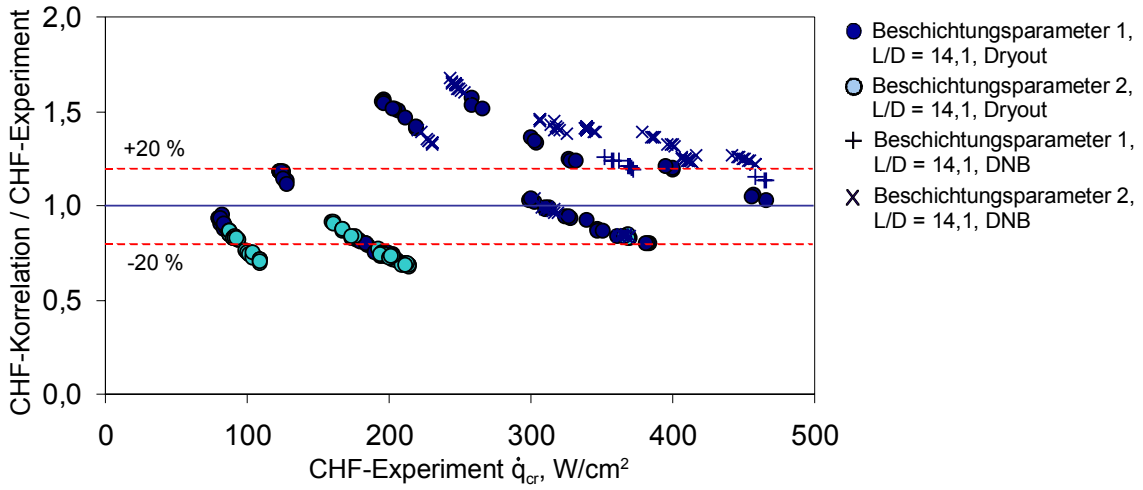


Abbildung 6-7: Vergleich der eigenen CHF-Daten mit der Korrelation von KUZMA-KICHTA ET AL. [36], [37] (porös beschichtete Rohre)

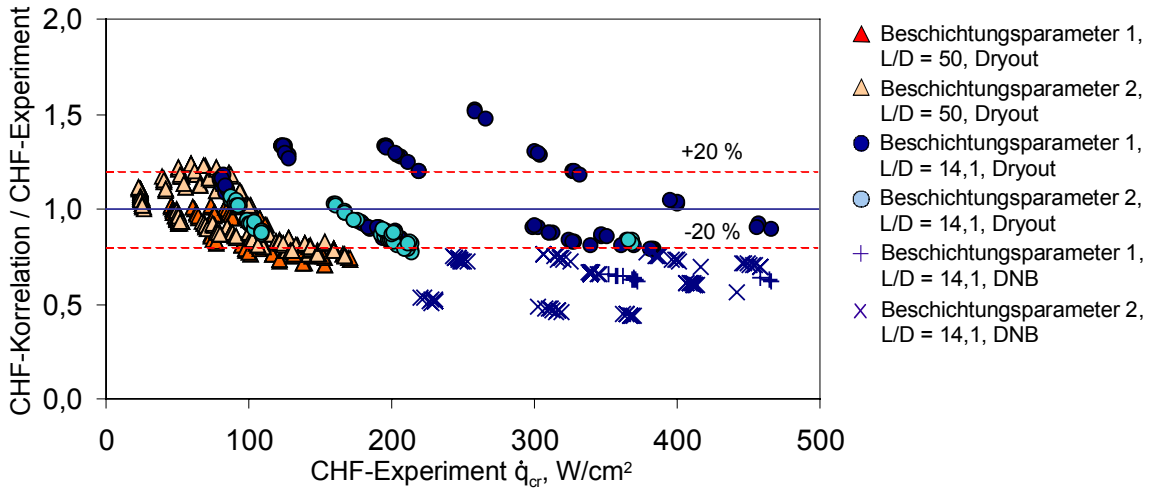


Abbildung 6-8: Vergleich der CHF-Daten mit der Korrelation von YILDIZ [68] (porös beschichtete Rohre)

6.2 Vergleich der Ergebnisse mit der eigenen Korrelation

Wie der Vergleich mit den in der Literatur vorhandenen Korrelationen anderer Autoren zeigt, werden die in dieser Arbeit durch eine systematische Untersuchung ermittelten Werte für die kritische Wärmestromdichte sowohl für glatte, als auch für porös beschichtete Rohre nur mit größeren Abweichungen wiedergegeben. Die meisten vorhandenen Korrelationen berücksichtigen nicht die Strömungszustände bei der Siedekrise. Das hat zur Folge, daß Korrelationen mit einer guten Genauigkeit bei der Vorhersage der CHF in einem Strömungsregime keine gute Vorhersage der CHF in einem anderen Strömungsregime treffen können.

Wie die Untersuchungen in dieser Arbeit zeigen, verändern poröse Beschichtungen das Strömungsbild beim Auftreten der Siedekrise. So ist der Bereich des Grenzdampfgebietes bei gleicher Rohrgeometrie in Abhängigkeit von den Parametern der porösen Schicht unterschiedlich groß ausgebildet. Jede poröse Schicht hat somit ihren eigenen charakteristischen Verlauf im Diagramm $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr}. Die Strömungsmechanismen bei glatten und porös beschichteten Rohren können bei sonst gleichen Versuchsbedingungen unterschiedlich sein. Es liegen nicht immer vergleichbare Strömungszustände vor. In dieser Arbeit wird daher eine eigenständige Korrelation für Rohre mit poröser Beschichtung entwickelt. Der Einfluß poröser Beschichtungen in Abhängigkeit von den Beschichtungsparametern wird durch die Einführung einer neuen dimensionslosen Kennzahl Schichtdicke / Partikeldurchmesser, δ/d_p beschrieben.

Wie die Meßergebnisse belegen, ist die kritische Wärmestromdichte nicht direkt vom lokalen Dampfgehalt abhängig, sondern es zeigt sich eine Abhängigkeit von den Eintrittsparametern, wie z.B. der Eintrittsunterkühlung. Es wird konsequent nach der globalen Hypothese korreliert; $\dot{q}_{cr} = f\left(p, \dot{m}, \Delta h_{sub}, L, D\right)$.

6.2.1 Eigene Korrelation für glatte Rohre bei DNB

Zur genauen Vorhersage der kritischen Wärmestromdichte für glatte Rohre bei DNB fand sich in der Literatur keine passende Korrelation anderer Autoren. Eine Einteilung der Parameterbereiche bei denen DNB als Entstehungsmechanismus der Siedekrise vorlag erfolgte in Tabelle 5-1 und Tabelle 5-4. Bei den eigenen Messungen wurde ein flacher sowie ein steiler Anstieg von $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} beobachtet, es wurden die Bereiche des wahren und des scheinbaren DNB erreicht.

Der Vorschlag von YILDIZ [68] den Korrelationsansatz von THOM ET AL. [61] unter Verwendung des Modells zur Bestimmung der Heizflächentemperatur von SCHROEDER-RICHTER ET AL. [56], [55] zu verwenden, wurde in dieser Arbeit nicht übernommen. Ziel ist es, die Beschreibung der kritischen Wärmestromdichte mit globalen Parametern vorzunehmen. Es wurde daher der Ansatz von WEBER [65] übernommen und angepaßt. Für eine breitere Datenbasis wurden die Daten von YILDIZ [68] für scheinbares DNB mit berücksichtigt.

Für die kritische Wärmestromdichte bei wahrem DNB und bei scheinbarem DNB ergibt sich die Gleichung (6-1):

$$\dot{q}_{cr} = \dot{q}_{c1}\left(1 + 0{,}7\frac{\Delta h_{sub}}{\Delta h_v}\right) \tag{6-1}$$

mit $$\frac{\dot{q}_{c1}}{\dot{m}\Delta h_v} = c_1 \frac{\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0,6}\left(\frac{\sigma\rho_l}{\dot{m}^2 L}\right)^{0,515}}{1 + 0{,}6\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0,165}\left(\frac{\sigma\rho_l}{\dot{m}^2 L}\right)^{0,499}\left(1 + 1{,}65\frac{L}{D}\right)}$$

und $c_1 = 3{,}54 + 0{,}1(L/D)$.

Die eigene Korrelation der kritischen Wärmestromdichte nach Gleichung (6-1) liefert eine gute Übereinstimmung mit den CHF-Daten. Insgesamt wurden 68 Daten aus den eigenen Messungen und 20 Daten aus den Messungen von YILDIZ [68] zur Erstellung einer Gleichung für DNB verwendet. Die Daten liegen im Fehlerband von ± 10% (siehe Abbildung 6-9). Der relative RMS beträgt 7,25 %. Der mittlere Fehler liegt bei 6,31 %.

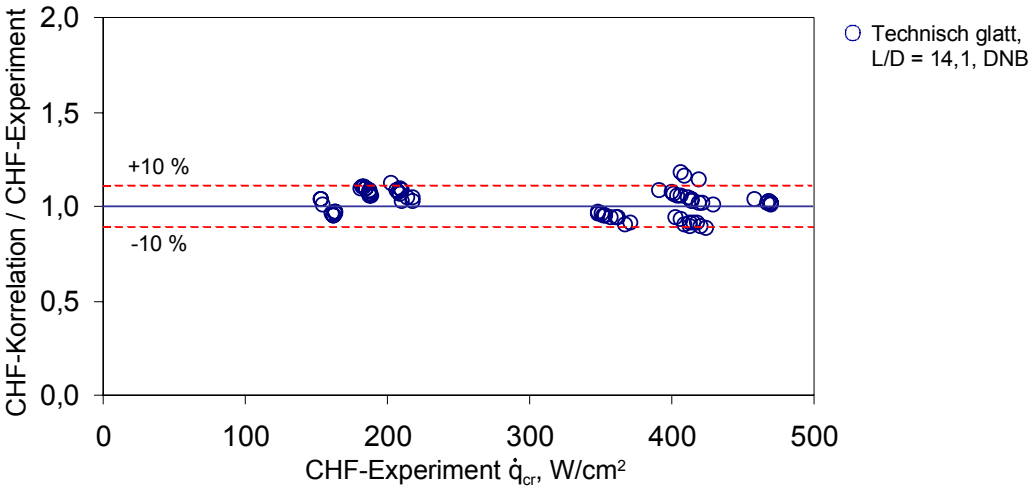


Abbildung 6-9: Vergleich der CHF-Daten mit der eigenen Korrelation nach Gleichung (6-1) (DNB, glatte Rohre)

Auch aus Abbildung 6-10 als Funktion über der Massenstromdichte und aus Abbildung 6-11 als Funktion über dem Eintrittsdruck läßt sich wiederum eine gute Wiedergabe der Daten erkennen. Leichte Abweichungen vom Fehlerband ± 10% zeigen sich für DNB bei einer Massenstromdichte von 300 kg/m^{2}s (Abbildung 6-10) und einem Eintrittsdruck von 0,7 MPa (Abbildung 6-11).

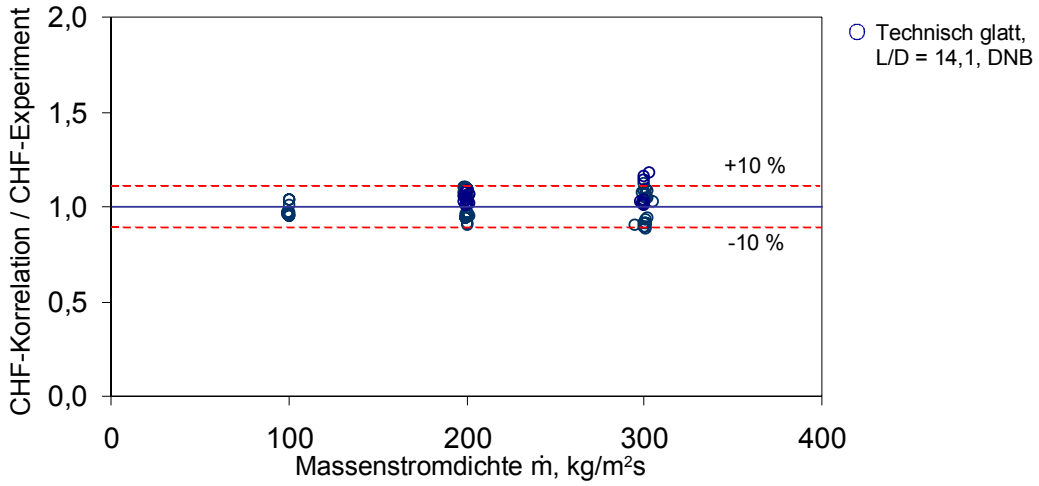


Abbildung 6-10: Vergleich der CHF-Daten mit der eigenen Korrelation nach Gleichung (6-1) über Massenstromdichte (DNB, glatte Rohre)

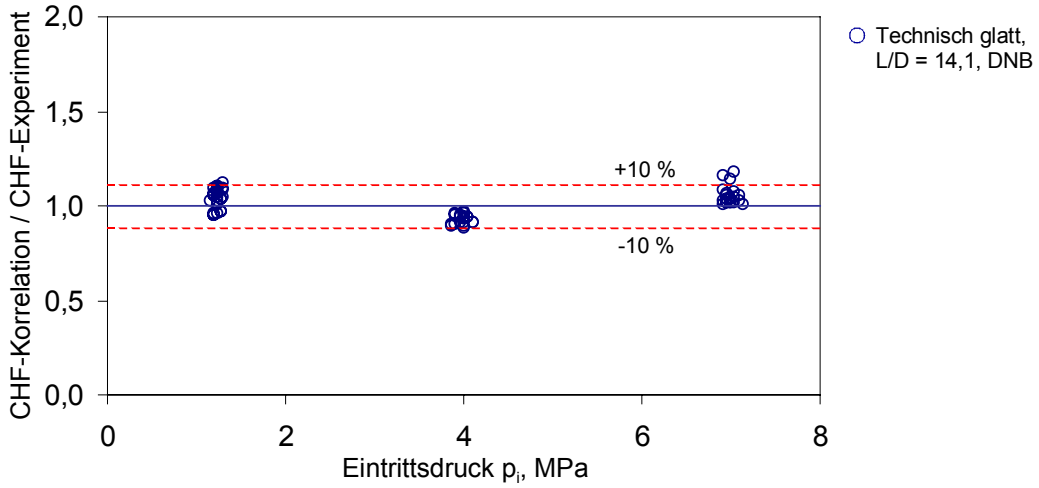


Abbildung 6-11: Vergleich der CHF-Daten mit der eigenen Korrelation nach Gleichung (6-1) über Eintrittsdruck (DNB, glatte Rohre)

6.2.2 Eigene Korrelation für glatte Rohre bei Dryout

Für das Strömungsregime Dryout beim glatten Rohr zeigt der Korrelationsansatz von WEBER [65], der ausschließlich für Dryout entwickelt wurde, eine gute Wiedergabe der 312 CHF-Daten für Rohre ohne Beschichtung. Für eine höhere Genauigkeit wurde der Ansatz von WEBER [65] auf die eigenen Daten angepaßt. Die Korrelation gilt für den Bereich des Grenzdampfphänomens und für Microfilm-Dryout. Die Datenbasis wurde mit CHF-Daten von RUAN [52] und YILDIZ [68] erweitert. Das Ergebnis ist die folgende Gleichung.

$$\dot{q}_{cr} = \dot{q}_{c2}\left(1 + 0{,}7\,\frac{\Delta h_{sub}}{\Delta h_v}\right) \tag{6-2}$$

mit $$\frac{\dot{q}_{c2}}{\dot{m}\Delta h_v} = c_2 \frac{\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0{,}199}\left(\frac{\sigma\rho_l}{\dot{m}^2 L}\right)^{0{,}291}}{0{,}96 + 0{,}163\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0{,}065}\left(\frac{\sigma\rho_l}{\dot{m}^2 L}\right)^{0{,}377}\left(1 + 1{,}65\,\frac{L}{D}\right)}$$

und $c_2 = 0{,}258 - 0{,}00565(L/D) + 0{,}00007(L/D)^2$.

Wie die Abbildung 6-12 belegt, liegen die Daten nahezu ausschließlich im Fehlerband von ± 10%. Der relative RMS beträgt 7,93 %. Der mittlere Fehler liegt bei 5,86 %.

Für eine Massenstromdichte von 50 kg/m^{2}s (siehe Abbildung 6-13) und einen Eintrittsdruck von 0,4 MPa (siehe auch Abbildung 6-14) gibt es geringe Abweichungen. Ansonsten beschreibt die Gleichung (6-2) die Daten für den Bereich des Dryout (Grenzdampfgebiet und Microfilm-Dryout) bei glatten Rohren sehr gut (siehe Abbildung 6-13 und Abbildung 6-14).

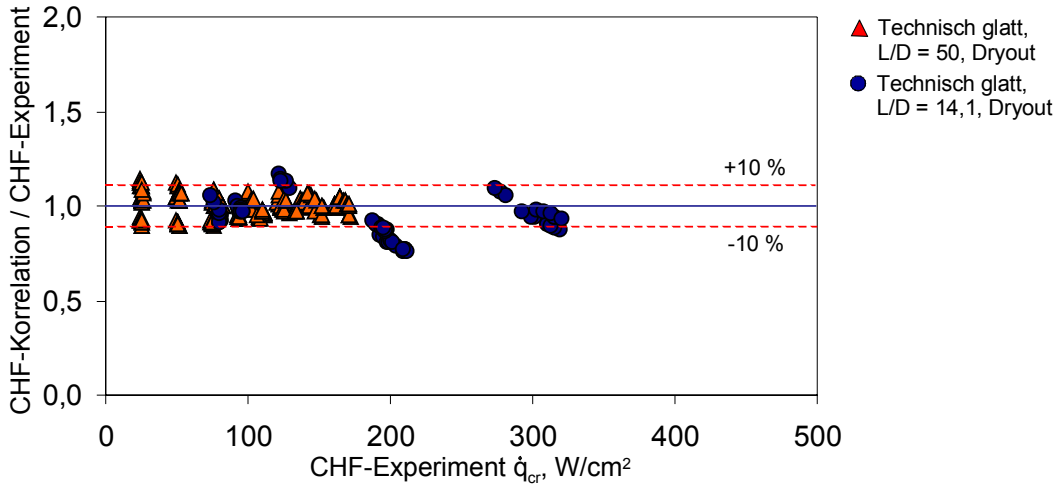


Abbildung 6-12: Vergleich der CHF-Daten mit der eigenen Korrelation nach Gleichung (6-2) (Dryout, glatte Rohre)

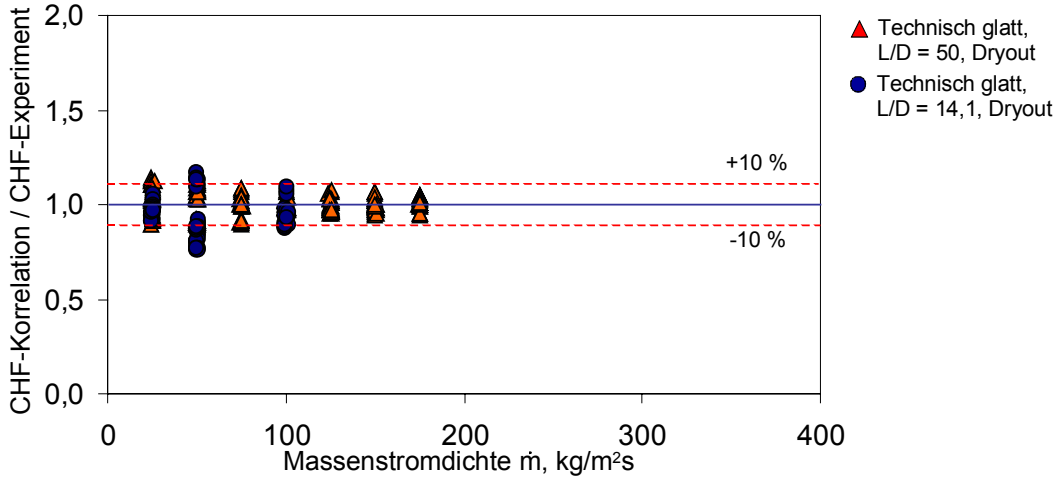


Abbildung 6-13: Vergleich der CHF-Daten mit der eigenen Korrelation nach Gleichung (6-2) über Massenstromdichte (Dryout, glatte Rohre)

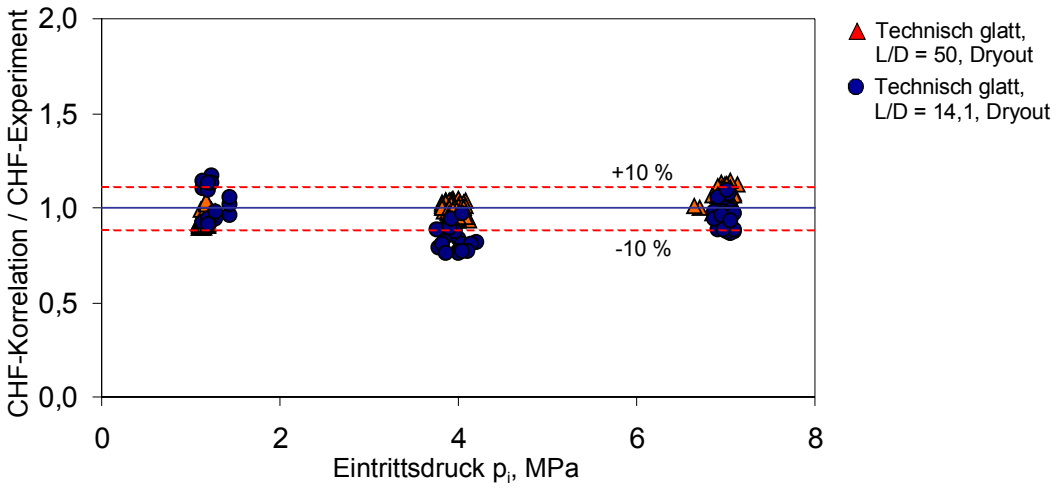


Abbildung 6-14: Vergleich der CHF-Daten mit der eigenen Korrelation nach Gleichung (6-2) über Eintrittsdruck (Dryout, glatte Rohre)

Zur Berechnung des Grenzdampfgehaltes kann die Energiebilanz im Kreisrohr herangezogen werden (Gleichung (5-1)). Für $\dot{q}_{cr}$ werden die Werte aus der eigenen Korrelation für Dryout (Gleichung 6-2) eingesetzt. Wie der direkte Vergleich in den Abbildung 6-15 zeigt, werden auch die Werte für den Grenzdampfgehalt x_b sehr gut wiedergegeben (siehe auch Abbildung 6-16 und Abbildung 6-17).

$$x_b = \frac{4\,\dot{q}_{cr}\,L}{\dot{m}\,\Delta h_V\,D} - \frac{h' - h_E}{\Delta h_V} \tag{6-3}$$

mit $\dot{q}_{cr}$ aus Gleichung (6-2).

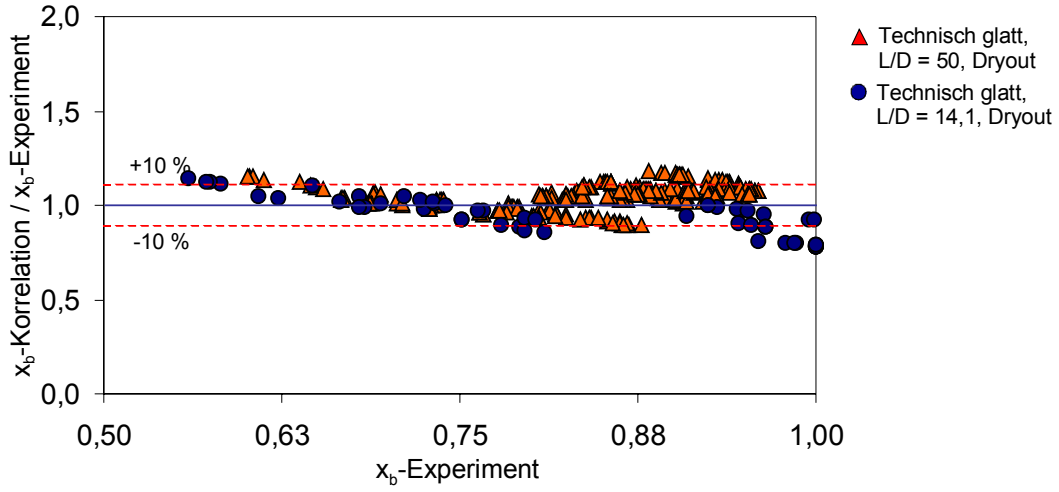


Abbildung 6-15: Vergleich der x_b-Daten mit der eigenen Korrelation nach Gleichung (6-3) (Dryout, glatte Rohre)

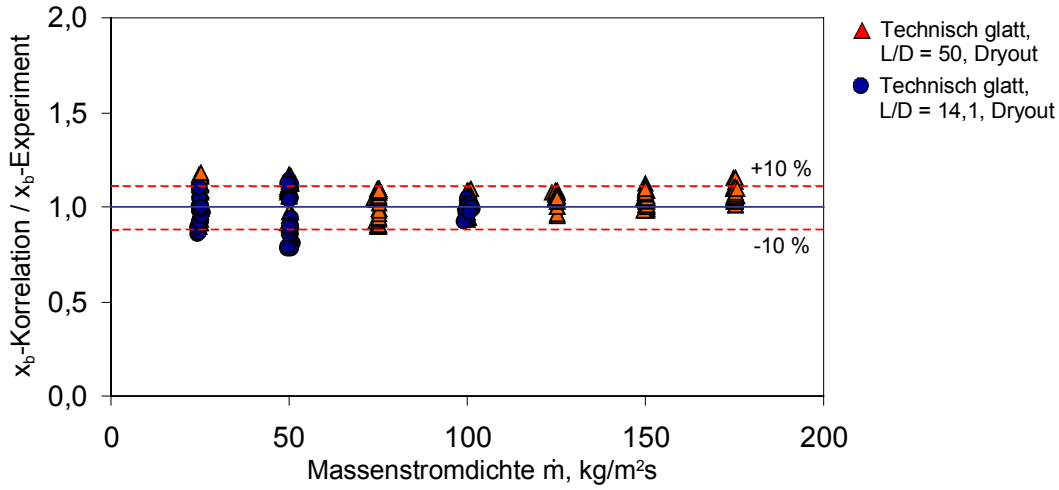


Abbildung 6-16: Vergleich der x_b-Daten mit der eigenen Korrelation nach Gleichung (6-3) über Massenstromdichte (Dryout, glatte Rohre)

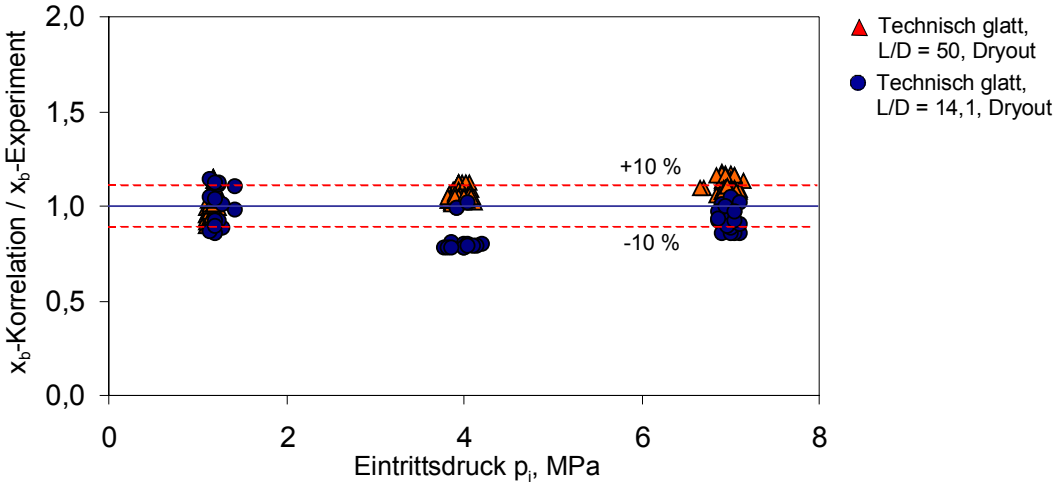


Abbildung 6-17: Vergleich der x_b-Daten mit der eigenen Korrelation nach Gleichung (6-3) über Eintrittsdruck (Dryout, glatte Rohre)

6.2.3 Eigene Korrelation für porös beschichtete Rohre bei DNB

Poröse Beschichtungen führen im Bereich des scheinbaren DNB zu einer Intensivierung der kritischen Wärmestromdichte gegenüber glatt. Im angewendeten Parameterbereich zeigen die in der Literatur vorhandenen Korrelationen keine Übereinstimmung mit den eigenen Meßergebnissen. Die Korrelationen von KUZMA-KICHTA ET AL. [36], [37] und von YILDIZ [68] überschätzten die eigenen CHF-Daten. Die Korrektur der Korrelation für glatt um einen multiplikativen oder additiven Faktor, der den Einfluß poröser Beschichtung beschreibt, wird vom Autor abgelehnt. Poröse Beschichtungen verändern das Strömungsbild im Rohr, somit sollte hier eine eigenständige Korrelation entwickelt werden. Auch hier wird der Ansatz von WEBER [65] verwendet und modifiziert. Der Einfluß der Abhängigkeit poröser Beschichtungen von den Beschichtungsparametern wird durch eine neue dimensionslose Kennzahl beschrieben. Der Faktor heißt Schichtdicke / Partikeldurchmesser (δ/d_p).

$$\dot{q}_{cr} = \dot{q}_{c3}\left(1 + 0{,}7\frac{\Delta h_{sub}}{\Delta h_v}\right) \tag{6-4}$$

mit $$\frac{\dot{q}_{c3}}{\dot{m}\Delta h_v} = c_3 \frac{\left(\frac{\delta}{d_p}\right)^{0{,}315}\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0{,}425}\left(\frac{\sigma\rho_l}{\dot{m}^2 L}\right)^{0{,}55}}{1 + 0{,}6\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0{,}165}\left(\frac{\sigma\rho_l}{\dot{m}^2 L}\right)^{0{,}499}\left(1 + 1{,}65\frac{L}{D}\right)}$$

und $c_3 = 1{,}224 + 0{,}0125(L/D)$.

Für die Entwicklung der Gleichung für porös beschichtete Rohre bei DNB standen 99 Meßwerte zur Verfügung. Die Datenbasis wurde mit Hilfe der Meßwerte von YILDIZ [68] erweitert. Der relative RMS liegt bei 6,09 %, der mittlere Fehler bei 5,17 %. sämtliche Meßdaten liegen im Fehlerband von ± 10% (Abbildung 6-18 bis Abbildung 6-20).

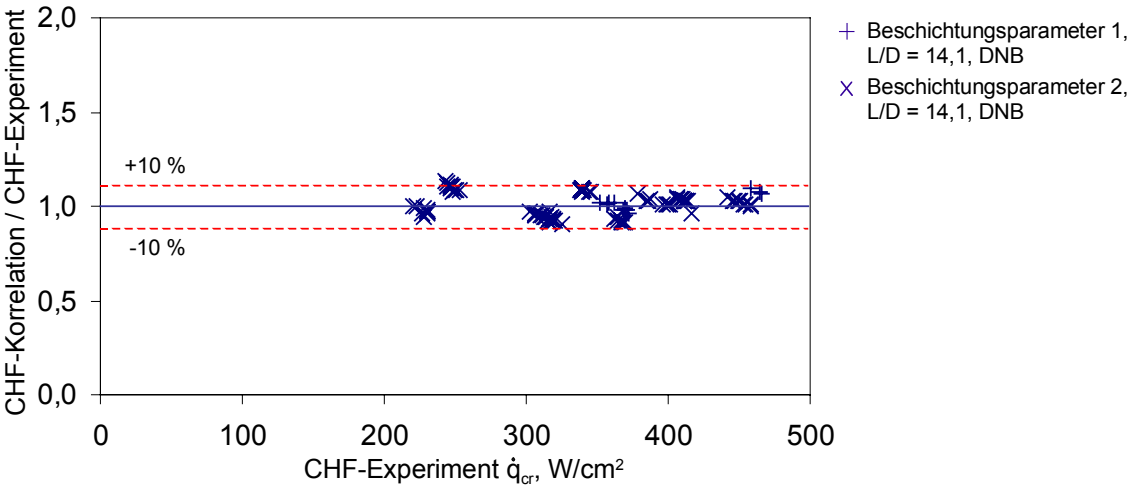


Abbildung 6-18: Vergleich der CHF-Daten mit der eigenen Korrelation nach Gleichung (6-4) (DNB, porös beschichtete Rohre)

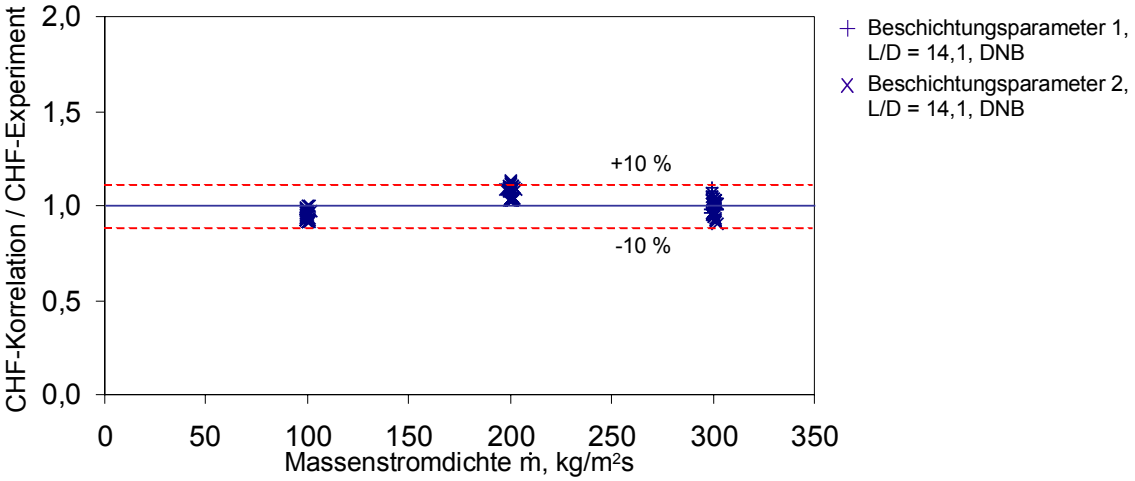


Abbildung 6-19: Vergleich der CHF-Daten mit der eigenen Korrelation nach Gleichung (6-4) über Massenstromdichte (DNB, porös beschichtete Rohre)

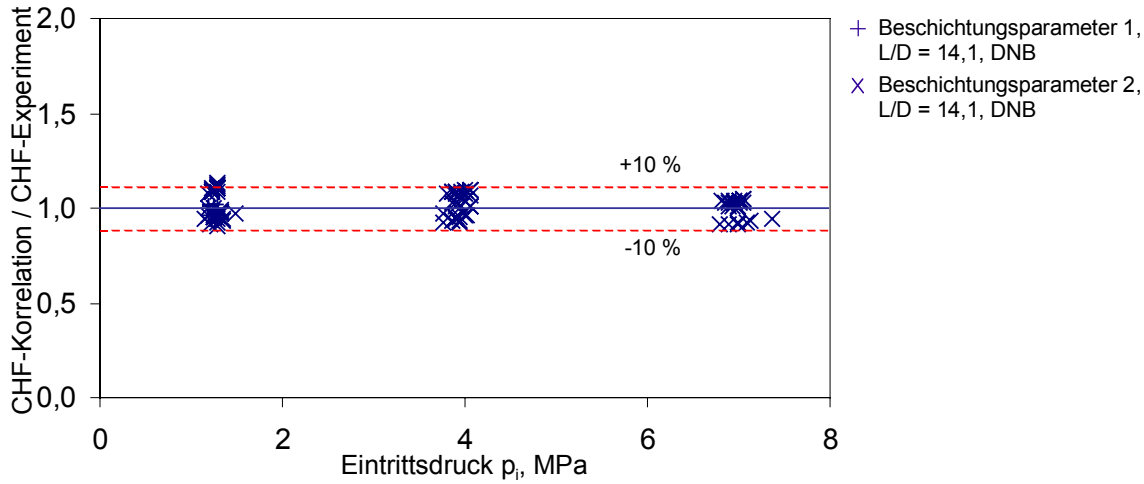


Abbildung 6-20: Vergleich der CHF-Daten mit der eigenen Korrelation nach Gleichung (6-4) über Eintrittsdruck (DNB, porös beschichtete Rohre)

6.2.4 Eigene Korrelation für porös beschichtete Rohre bei Dryout

Wie die Untersuchungen in dieser Arbeit belegen, gibt es im Bereich des Grenzdampfgebietes einen positiven oder negativen Einfluß poröser Beschichtungen auf die CHF. Der Bereich des Grenzdampfgebietes ist gegenüber glatt in Abhängigkeit von den Parametern der porösen Schicht bei gleicher Rohrgeometrie unterschiedlich groß ausgebildet. Für diesen Bereich gibt es zum jetzigen Zeitpunkt noch keine Korrelation anderer Autoren für porös beschichtete Rohre. Zur Entwicklung einer Korrelation im Regime des Grenzdampfgebietes wird wiederum der Ansatz von WEBER [65] verwendet. Die Berücksichtigung der Eigenschaften der Beschichtungsparameter erfolgt über die Einführung einer neuen dimensionslosen Kenngröße δ/d_p (Schichtdicke / Partikeldurchmesser).

$$\dot{q}_{cr} = \dot{q}_{c4}\left(1 + 0{,}7\frac{\Delta h_{sub}}{\Delta h_v}\right) \tag{6-5}$$

mit $$\frac{\dot{q}_{c4}}{\dot{m}\Delta h_v} = c_4 \frac{\left(\frac{\delta}{d_p}\right)^{0,095}\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0,405}\left(\frac{\sigma\rho_l}{\dot{m}^2 L}\right)^{0,295}}{0{,}6 + 0{,}16\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0,255}\left(\frac{\sigma\rho_l}{\dot{m}^2 L}\right)^{0,377}\left(1 + 1{,}95\frac{L}{D}\right)}$$

und $$c_4 = 0{,}315 + 0{,}463\left(\delta/d_p\right)^{-0,475} - \left[\left(0{,}0113 + 0{,}00925\left(\delta/d_p\right)^{-0,475}\right)\left(L/D\right)\right] + 0{,}000176\left(L/D\right)^2 .$$

Für den Bereich des Microfilm-Dryout zeigt sich kein Einfluß poröser Beschichtungen auf die kritische Wärmestromdichte gegenüber dem unbeschichteten Rohr bei sonst gleichen Versuchsparametern. Hier wird die eigene Korrelation für das glatte Rohr verwendet (siehe Gleichung (6-2)).

Für die Entwicklung der Korrelation der CHF standen insgesamt 643 eigene Meßdaten für Rohre mit poröser Beschichtung bei Dryout zur Verfügung. Auch wurden für eine noch breitere Datenbasis teilweise Daten von YILDIZ [68] berücksichtigt. Wie die Abbildung 6-21 bis Abbildung 6-23 belegen, liegen auch hier nahezu alle in dieser Arbeit ermittelten Daten im Fehlerband von ± 10%. Der mittlere relative Fehler liegt bei 5,94 % und der RMS beträgt für diese Korrelation 7,35 %.

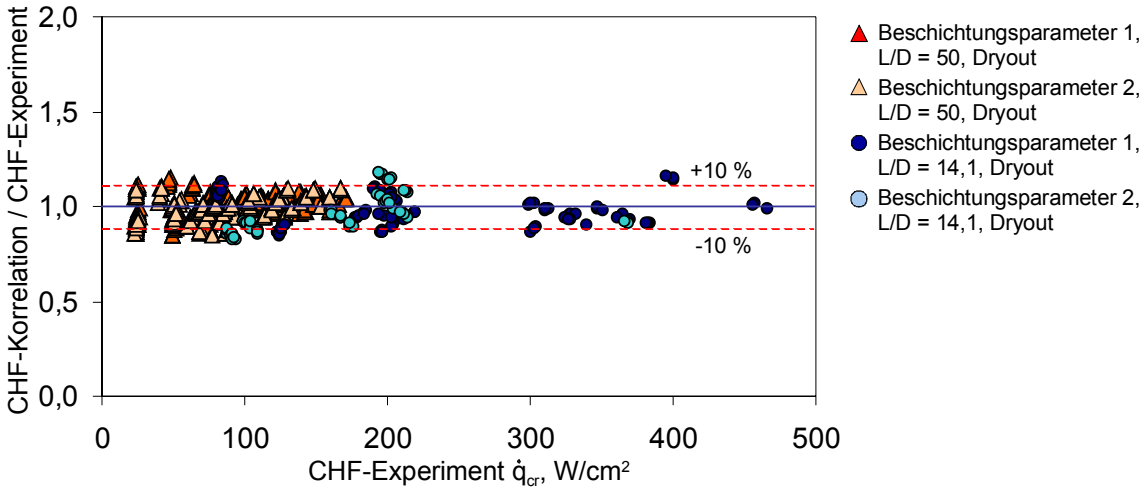


Abbildung 6-21: Vergleich der CHF-Daten mit der eigenen Korrelation nach Gleichung (6-5) (Dryout, porös beschichtete Rohre)

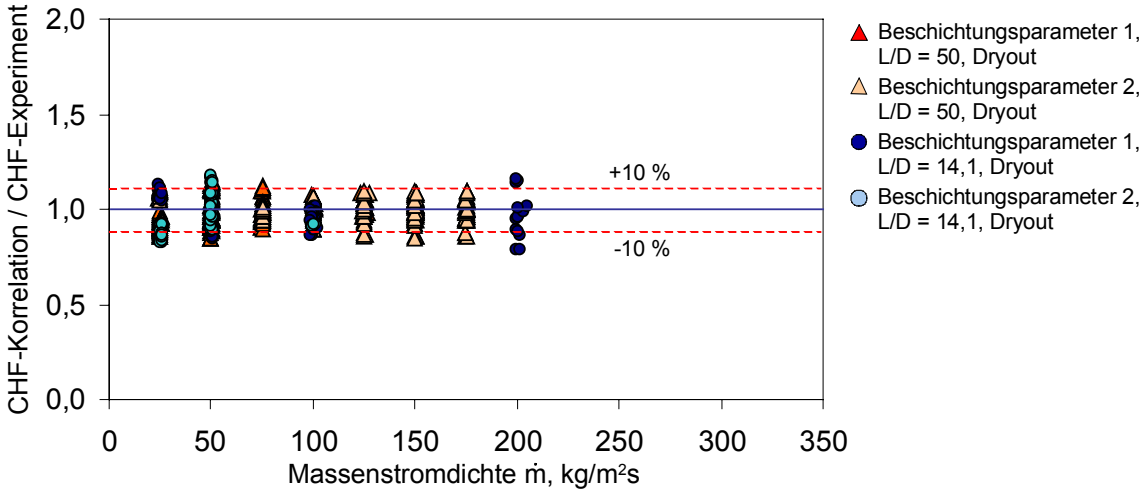


Abbildung 6-22: Vergleich der CHF-Daten mit der eigenen Korrelation nach Gleichung (6-5) über Massenstromdichte (Dryout, porös beschichtete Rohre)

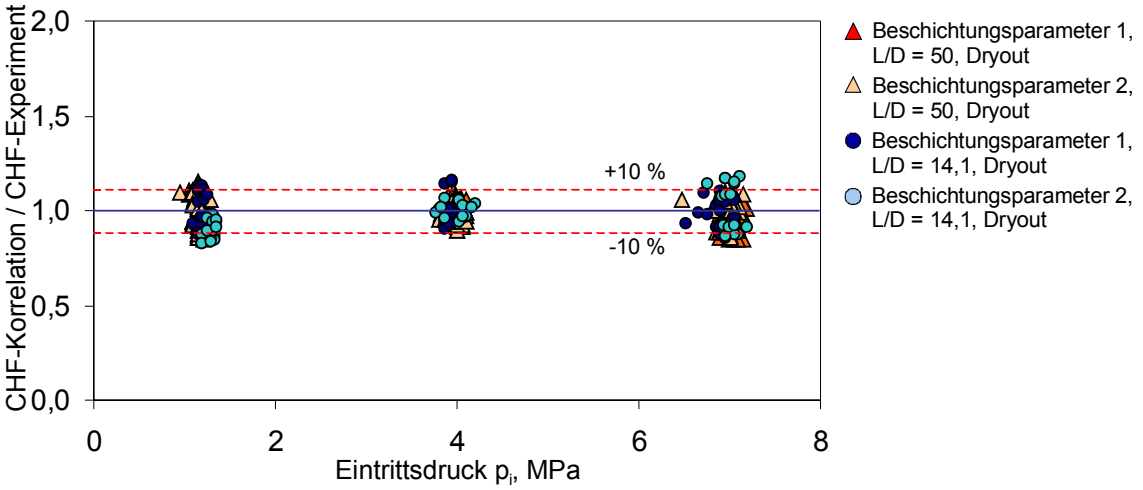


Abbildung 6-23: Vergleich der CHF-Daten mit der eigenen Korrelation nach Gleichung (6-5) über Eintrittsunterkühlung (Dryout, porös beschichtete Rohre)

6.3 Zusammenfassung der eigenen Korrelation

Die systematische und umfangreiche experimentelle Untersuchung in dieser Arbeit hat gezeigt, daß Rohre mit poröser Beschichtung die Bereiche der Strömungsregime in Abhängigkeit von den Beschichtungsparametern der porösen Schicht verschieben. Dieser eigene charakteristische Verlauf einer jeden porösen Schicht führt somit zu einer mehr oder minder ausgeprägten Veränderung (Vergrößerung oder Verkleinerung) der kritischen Wärmestromdichte gegenüber dem glatten Rohr.

Für eine gezielte Vorhersage der kritischen Wärmestromdichte ist die Kenntnis der Strömungsform von hoher Wichtigkeit. Für jede Strömungsform gilt eine speziell entwickelte Berechnungsgleichung zur Vorhersage der CHF. Um die Anwendung zu vereinfachen, wurde eine Ablauflogik entwickelt, die es ermöglicht ohne Kenntnis des Verlaufs im Diagramm $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} die richtige Korrelation zu finden und anzuwenden. Die Anwendung dieser Logik ermöglicht gleichzeitig die Bestimmung des Strömungszustandes.

Tabelle 6-1: Eigene Korrelation für glatte Rohre

Autor:	Eigene Korrelation für glatte Rohre:
STEIN Gültigkeitsbereich: p = 0,1–0,75 MPa ΔT_{sub} = 10–60 K $\dot{m}$ = 20–400 kg/m²s D = 0,009 m L/D = 14-50	Für die kritische Wärmestromdichte gilt: $\dot{q}_{cr} = \dot{q}_{c0}\left(1 + 0{,}7\frac{\Delta h_{sub}}{\Delta h_v}\right)$ (6-6) Für DNB gilt: $\frac{\dot{q}_{c1}}{\dot{m}\Delta h_v} = c_1 \frac{\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0,6}\left(\frac{\sigma\rho_l}{\dot{m}^2 L}\right)^{0,515}}{1 + 0{,}6\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0,165}\left(\frac{\sigma\rho_l}{\dot{m}^2 L}\right)^{0,499}\left(1 + 1{,}65\frac{L}{D}\right)}$ Für Dryout (Grenzdampfgebiet und Microfilm-Dryout) gilt: $\frac{\dot{q}_{c2}}{\dot{m}\Delta h_v} = c_2 \frac{\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0,199}\left(\frac{\sigma\rho_l}{\dot{m}^2 L}\right)^{0,291}}{0{,}96 + 0{,}163\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0,065}\left(\frac{\sigma\rho_l}{\dot{m}^2 L}\right)^{0,377}\left(1 + 1{,}65\frac{L}{D}\right)}$ $c_1 = 3{,}54 + 0{,}1(L/D)$ $c_2 = 0{,}258 - 0{,}00565(L/D) + 0{,}00007(L/D)^2$ $\dot{q}_{c1} + 500 \le \dot{q}_{c2} \rightarrow \dot{q}_{c0} = \dot{q}_{c1}$ (DNB) $\dot{q}_{c1} + 500 > \dot{q}_{c2} \rightarrow \dot{q}_{c0} = \dot{q}_{c2}$ (Dryout)
	Für den Grenzdampfgehalt gilt: $x_b = \frac{4\,\dot{q}_{cr}\,L}{\dot{m}\,\Delta h_V D} - \frac{h' - h_E}{\Delta h_V}$ mit: $\dot{q}_{cr} = \dot{q}_{c2}\left(1 + 0{,}7\frac{\Delta h_{sub}}{\Delta h_v}\right)$ (6-2)

Tabelle 6-2: Eigene Korrelation für porös beschichtete Rohre

Autor:	Eigene Korrelation für porös beschichtete Rohre:
STEIN Gültigkeitsbereich: p = 0,1 – 0,75 MPa ΔT_{sub} = 10 – 60 K $\dot{m}$ = 20 – 400 kg/m^{2}s D = 0,009 m L/D = 14 - 50 δ / d_P = 3,8 – 8,6 $\varepsilon \approx$ = 60 – 70 %	Für die kritische Wärmestromdichte gilt: $\dot{q}_{cr} = \dot{q}_{c0}\left(1 + 0{,}7\frac{\Delta h_{sub}}{\Delta h_v}\right)$ (6-7) Für DNB gilt: $\frac{\dot{q}_{c3}}{\dot{m}\Delta h_v} = c_3 \frac{\left(\frac{\delta}{d_p}\right)^{0,315}\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0,425}\left(\frac{\sigma\rho_l}{\dot{m}^2 L}\right)^{0,55}}{1 + 0{,}6\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0,165}\left(\frac{\sigma\rho_l}{\dot{m}^2 L}\right)^{0,499}\left(1 + 1{,}65\frac{L}{D}\right)}$ Für das Grenzdampfgebiet gilt: $\frac{\dot{q}_{c4}}{\dot{m}\Delta h_v} = c_4 \frac{\left(\frac{\delta}{d_p}\right)^{0,095}\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0,405}\left(\frac{\sigma\rho_l}{\dot{m}^2 L}\right)^{0,295}}{0{,}6 + 0{,}163\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0,255}\left(\frac{\sigma\rho_l}{\dot{m}^2 L}\right)^{0,377}\left(1 + 1{,}95\frac{L}{D}\right)}$ $c_3 = 1{,}224 + 0{,}0125(L/D)$ $c_4 = 0{,}315 + 0{,}463(\delta/d_p)^{-0,475} - \left[\left(0{,}0113 + 0{,}00925(\delta/d_p)^{-0,475}\right)(L/D)\right] + 0{,}000176(L/D)^2$ $\dot{q}_{c3} \le \dot{q}_{c4} \rightarrow \dot{q}_{c0} = \dot{q}_{c3}$ (DNB) $\dot{q}_{c3} > \dot{q}_{c4} \rightarrow \dot{q}_{c0} = \dot{q}_{c4}$ (Grenzdampfgebiet) $\dot{q}_{c3} > \dot{q}_{c4}$ und $\dot{m} < 30\,\frac{kg}{m^2 s} \rightarrow \dot{q}_{c0} = \dot{q}_{c2}$ (Microfilm-Dryout)
	Für den Grenzdampfgehalt gilt: $x_b = \frac{4\,\dot{q}_{cr}\,L}{\dot{m}\,\Delta h_V\,D} - \frac{h' - h_E}{\Delta h_V}$ mit: $\dot{q}_{cr} = \dot{q}_{c4}\left(1 + 0{,}7\frac{\Delta h_{sub}}{\Delta h_v}\right)$ (6-5)

6.3.1 Anwendung der eigenen Korrelation für glatte Rohre

Wie die Tabelle 6-1 zeigt, wurde eine neue Korrelation entwickelt, die sich über den gesamten Bereich $0 < x_{cr} < 1$ erstreckt. Die unterschiedlichen Strömungsformen beim Auftreten der Siedekrise (DNB und Dryout) wurden dabei berücksichtigt. Eine neu entwickelte Rechenlogik erlaubt die Erkennung der vorherrschenden Strömungsform und somit die Anwendung der richtigen Korrelation für DNB oder Dryout. Die Abbildung 6-24 zeigt das Ablaufdiagramm zur Anwendung der eigenen Korrelation bei glatten Rohren.

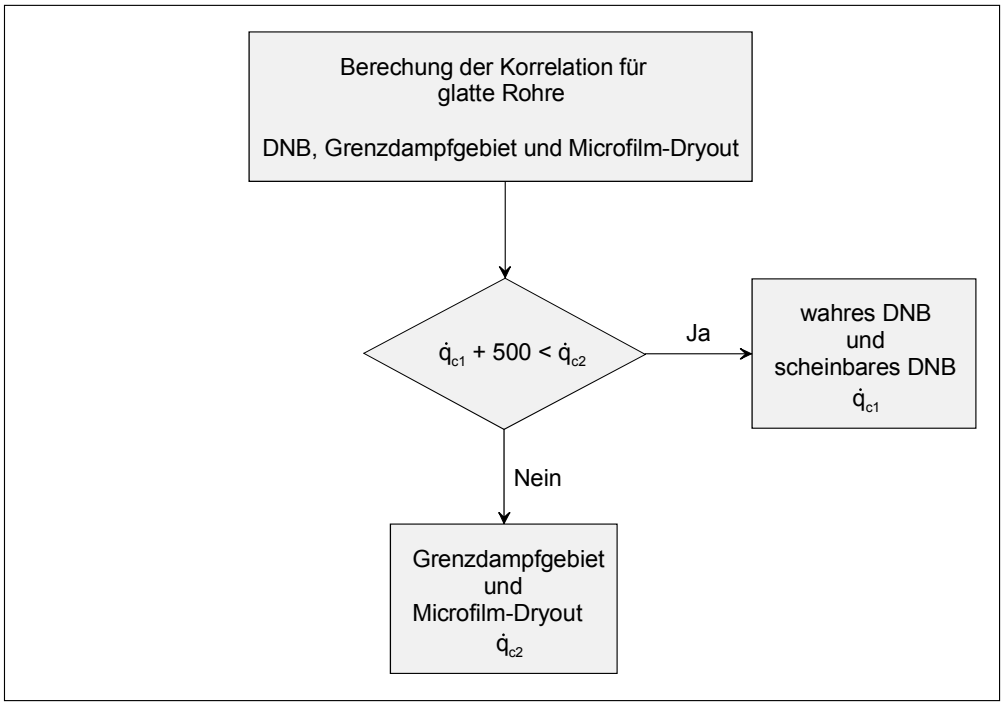


Abbildung 6-24: Ablaufdiagramm zur Anwendung der eigenen Korrelation bei glatten Rohren

Die Abbildung 6-25 bis Abbildung 6-27 zeigen das Ergebnis nach Anwendung der Logik auf die gesamten in dieser Arbeit ermittelten CHF-Daten in den unterschiedlichen Strömungsbereichen des wahren DNB, scheinbaren DNB, Grenzdampfgebietes und des Microfilm-Dryout.

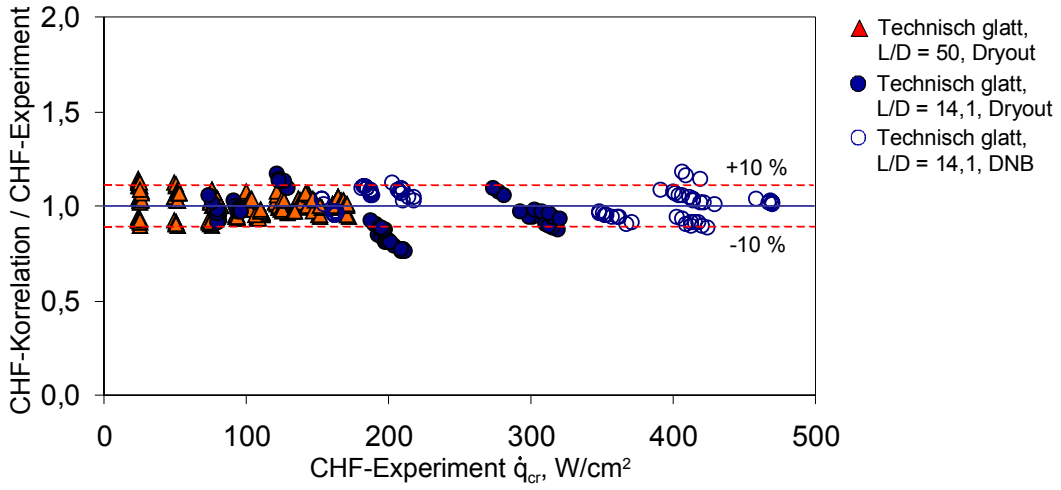


Abbildung 6-25: Vergleich der CHF-Daten mit der eigenen Korrelation alle Strömungsformen (glatte Rohre)

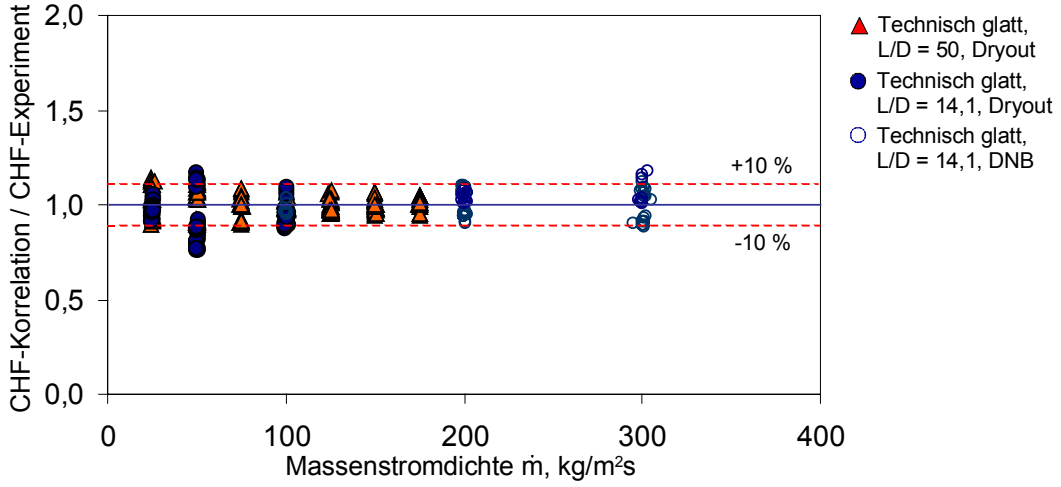


Abbildung 6-26: Vergleich der CHF-Daten mit der eigenen Korrelation alle Strömungsformen über Massenstromdichte (glatte Rohre)

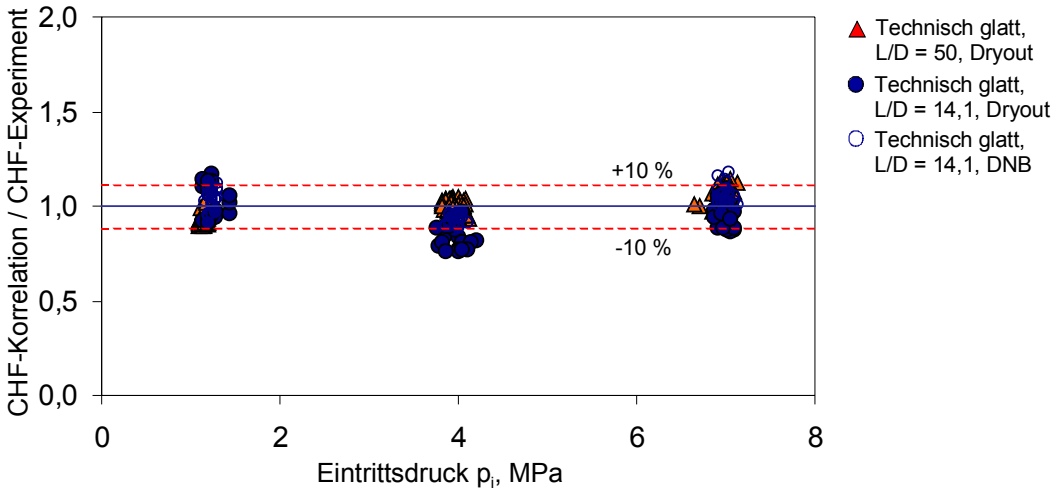


Abbildung 6-27: Vergleich der CHF-Daten mit der eigenen Korrelation alle Strömungsformen über Eintrittsdruck (glatte Rohre)

6.3.2 Anwendung der eigenen Korrelation für porös beschichtete Rohre

Im Gegensatz zu den Korrelationen von KUZMA-KICHTA ET AL. [36], [37] und YILDIZ [68] zeigte sich in dieser Arbeit auch ein Einfluß poröser Beschichtungen auf die kritische Wärmestromdichte im Bereich des Grenzdampfgebietes. Die Autoren schlagen bei poröser Beschichtung die Anwendung der Korrelation in diesem Bereich wie für das glatte Rohr vor. Wie diese Arbeit zeigt ist dies nicht zulässig. Es wurde eine Korrelation entwickelt, die den Einfluß poröser Beschichtungen auf die CHF in den Strömungsbereichen des wahren und scheinbaren DNB sowie des Grenzdampfgebietes beschreibt. Für den Bereich des Microfilm-Dryout zeigen poröse Beschichtungen keinen Einfluß. Hier erfolgt die Berechnung der CHF nach der Korrelation, wie sie für glatt entwickelt wurde. Für die Anwendung wurde wie beim glatten Rohr eine Logik entwickelt, die es erlaubt, ohne Kenntnis des Verlaufes der Daten im $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} - Diagramm die richtige Korrelation anzuwenden. Die Logik für Rohre mit poröser Beschichtung ist in Form eines Ablaufdiagramms in Abbildung 6-28 dargestellt.

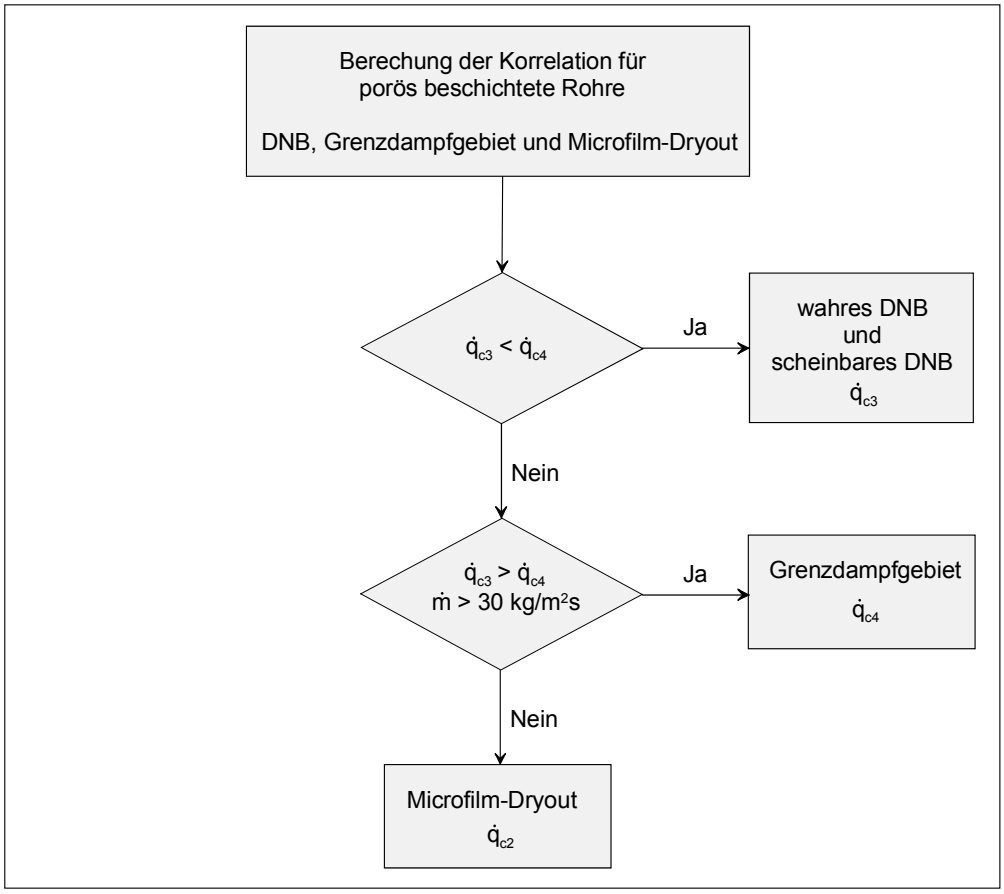


Abbildung 6-28: Ablaufdiagramm zur Anwendung der eigenen Korrelation bei porös beschichten Rohren

Die Darstellung der Ergebnisse nach Anwendung dieser neuen Berechnungslogik den gesamten in dieser Arbeit untersuchten Parameterbereich zeigen die Abbildung 6-29 bis Abbildung 6-31.

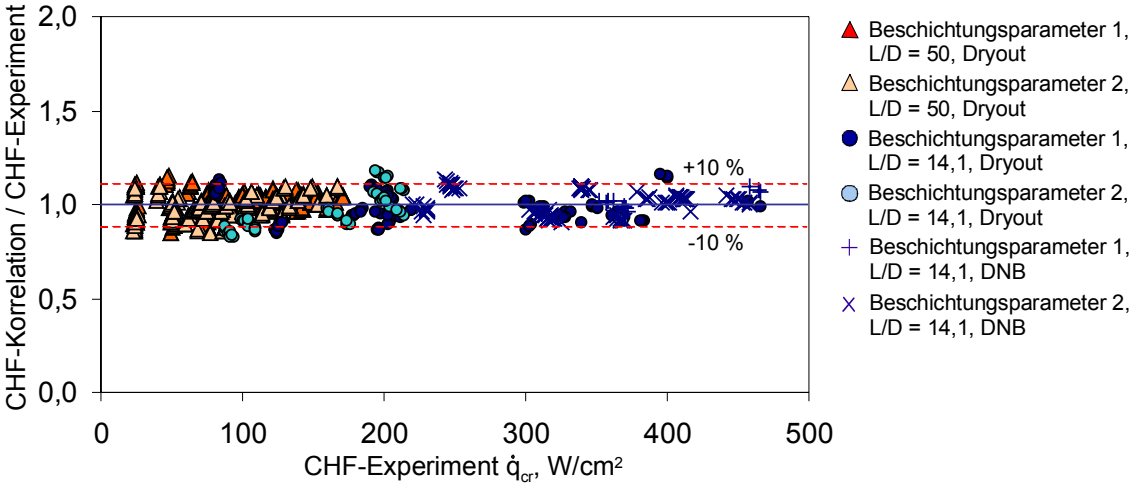


Abbildung 6-29: Vergleich der CHF-Daten mit der eigenen Korrelation alle Strömungsformen (porös beschichtete Rohre)

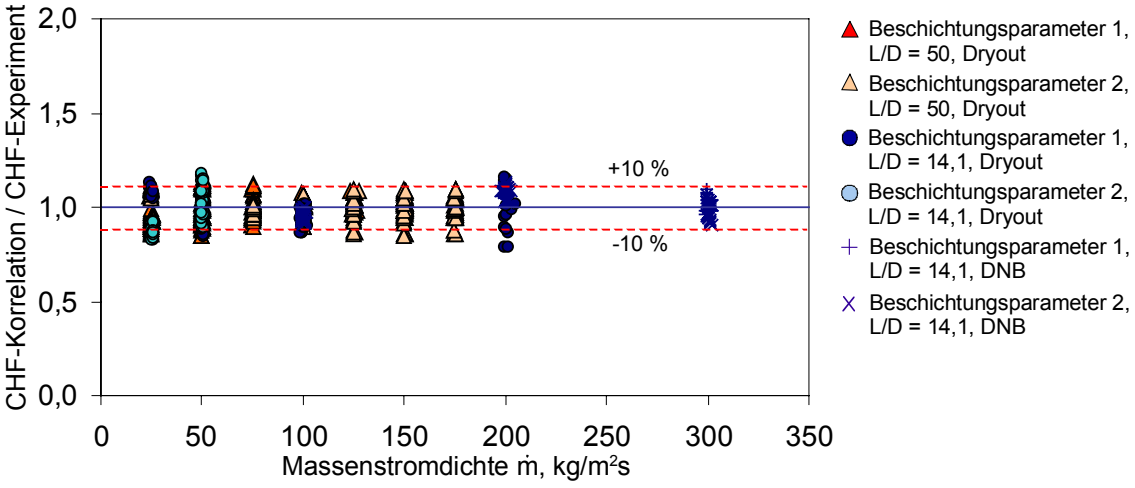


Abbildung 6-30: Vergleich der CHF-Daten mit der eigenen Korrelation alle Strömungsformen über Massenstromdichte (porös beschichtete Rohre)

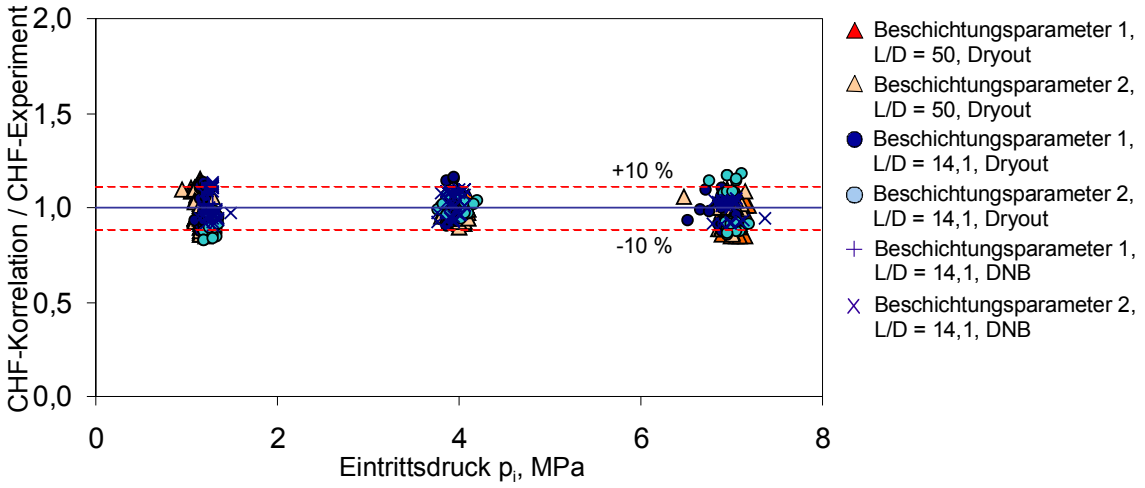


Abbildung 6-31: Vergleich der CHF-Daten mit der eigenen Korrelation alle Strömungsformen über Eintrittsdruck (porös beschichtete Rohre)

7 ZUSAMMENFASSUNG

Diese Arbeit basiert auf der seit 1988 existierenden Zusammenarbeit des Instituts für Energietechnik der TU Berlin mit dem Moscow Power Engineering Institute (MEI). Die Zusammenarbeit wurde 1994 durch einen Kooperationsvertrag zwischen der TU Berlin und dem MEI vertieft. Sie führte zu gemeinsamen Veröffentlichungen [33], [67] sowie zu mehreren Diplomarbeiten und Workshops vor und während der Durchführung dieses Projekts. Einige Ergebnisse wurden bereits auf der European Heat Transfer Conference 2000 in Heidelberg präsentiert [34].

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einfluß von gesinterten, porösen Beschichtungen der Heizfläche auf die kritische Wärmestromdichte beim Sieden von Wasser bei erzwungener Konvektion untersucht. Bisher veröffentlichte Ergebnisse zu diesem Thema zeigen, daß sich der Wärmeübergang durch bestimmte Beschichtungen zwar entscheidend intensivieren läßt, jedoch liegen bisher zu ungenaue Angaben über den Einfluß ausgewählter Beschichtungsparameter (Korngröße, Schichtdicke) bei gleichen Strömungszuständen vor. Anwendungen dieser Technologie sind von großem Interesse für die Einsparung von Wärmeübertragungsflächen wie z.B. bei Verdampfern oder bei Kühlkreisläufen an elektronischen Bauteilen, die durch das Auftreten von hohen Wärmestromdichten gekennzeichnet sind.

Erstmalig wurde in dieser Arbeit die Abhängigkeit der kritischen Wärmestromdichte von Strömungsparametern und Oberflächenbeschaffenheit der Heizfläche systematisch untersucht. Es erfolgten experimentelle Untersuchungen der kritischen Wärmestromdichte für einen großen Bereich des kritischen thermodynamischen Dampfgehaltes ($0 < x_{cr} < 1$) bei mäßig hohen Drücken und niedrigen Massenstromdichten. Die zu erwartenden Strömungsbereiche des wahren DNB, scheinbaren DNB, Grenzdampfgebietes und Microfilm-Dryout wurden dabei erreicht.

In der vorliegenden Arbeit wurden poröse Oberflächenbeschichtungen mit nahezu gleicher Schichtdicke und Porosität bei verschiedenen Partikeldurchmessern verwendet. Bei jeder Variation der Versuchsparameter wurden Messungen der kritischen Wärmestromdichte für das glatte und porös beschichtete Rohr durchgeführt. Es zeigte sich, daß der Einfluß poröser

Beschichtungen auf die CHF positiv als auch negativ in Abhängigkeit von Strömungszustand und Art der Beschichtung sein kann. Weiter können poröse Beschichtungen den Strömungszustand beim Auftreten der Siedekrise gegenüber glatt bei sonst gleichen Bedingungen verändern.

Im Bereich des scheinbaren DNB zeigt sich in dieser Arbeit eine Erhöhung der kritischen Wärmestromdichte infolge poröser Beschichtung von 72 % bei der porösen Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 1 und von 55 % bei der porösen Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 2 (Abbildung 5-13).

Das größte Potential einer Verbesserung der kritischen Wärmestromdichte zeigte sich bei der Teststrecke mit den Beschichtungsparametern 1. Hier erfolgte ein Wechsel des Strömungsregimes vom DNB bei glatten Rohren in den Bereich des Grenzdampfgebietes infolge der porösen Beschichtung mit einer Erhöhung der kritischen Wärmestromdichte bei sonst gleichen Strömungsbedingungen (siehe Abbildung 5-14). Die Intensivierung der CHF gegenüber glatt betrug 80 %. Bei der Beschichtung mit den Beschichtungsparametern 2 konnte dieses Phänomen nicht beobachtet werden.

Für das Strömungsregime des Grenzdampfgebietes führen poröse Beschichtungen in Abhängigkeit des Verhältnisses von L/D zu einer Erhöhung (kleine Verhältnisse von L/D) oder zu einer Abnahme (große Verhältnisse von L/D) der kritischen Wärmestromdichte. So wurde bei der Testsektion mit den Beschichtungsparametern 2 eine maximale Verbesserung der kritischen Wärmestromdichte von 58 % ($L/D = 14{,}1$, Abbildung 5-15) und eine maximale Abnahme von 40 % ($L/D = 50$, Abbildung 5-6) gemessen. Der maximal verringernde Einfluß poröser Beschichtungen auf die CHF für die Beschichtung mit den Beschichtungsparameter 1 lag bei 28 %.

Im Bereich des Microfilm-Dryout wurde in dieser Arbeit kein signifikanter Effekt poröser Beschichtungen auf die kritische Wärmestromdichte beobachtet.

Erstmalig werden weiterführende physikalische Erklärungen zum Einfluß poröser Beschichtungen auf die CHF gegenüber glatt beim Strömungssieden gegeben. Infolge poröser Beschichtung kommt es offenbar zu einer Erhöhung der Blasenanzahl bei kleinerem Blasendurchmesser aufgrund vermehrter Blasenkeimstellen gegenüber glatt. Zusätzlich

erfolgt eine verbesserte Versorgung der Heizfläche mit Flüssigkeit innerhalb der porösen Schicht durch Kapillarkräfte. Beides führt zu einer Erhöhung der kritischen Wärmestromdichte gegenüber glatt. Dieser Effekt ist stärker ausgeprägt bei Beschichtungen mit kleinen Korngrößen bei einer Schichtdicke von 5-7 Kornschichten und einer Porosität von 60-70%. Im Bereich des Grenzdampfgebietes (Ringströmung) kommt es anscheinend bei großen Verhältnissen von L/D zu einer Überlagerung des oben genannten positiven Effektes durch einen zweiten, negativen Effekt. Die erhöhte Wandrauhigkeit infolge poröser Beschichtung führt anscheinend bei der Ausbildung der Ringströmung zu einem vermehrten Tropfenaustrag aus dem Flüssigkeitsfilm, die Filmdicke nimmt ab und die Siedekrise tritt früher auf als beim glatten Rohr. Diese Tendenz ist bei Beschichtungen mit größeren Partikel stärker ausgeprägt.

Diese Eigenschaften poröser Beschichtungen führen zu einer Beeinflussung des Strömungszustandes im Rohr gegenüber glatt bei sonst gleichen Bedingungen. Der Bereich des Grenzdampfgebietes ist in Abhängigkeit von der Art der porösen Beschichtung unterschiedlich stark ausgeprägt. Jede poröse Beschichtung hat somit ihren eigenen charakteristischen Kurvenverlauf im Diagramm $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr}. Der Parameterbereich in dem das Phänomen des Grenzdampfgebietes auftritt, wird in dieser Arbeit durch poröse Beschichtungen vergrößert. Diese Effekt zeigt sich verstärkt bei Beschichtungen mit kleinen Korngrößen. Poröse Beschichtungen führen zu einem früheren Wechsel vom Microfilm-Dryout in das Regime des Grenzdampfgebietes gegenüber glatt. Sie verschieben den Bereich des Grenzdampfgebietes zu kleineren Massenstromdichten. Diese Tendenz ist bei Beschichtungen mit größeren Korndurchmessern aufgrund des verstärkten Entrainment stärker ausgeprägt. Bei den Rohren mit poröser Beschichtung zeigen sich nach ca. 350 Betriebsstunden keine Ablagerungen in oder an der Oberfläche der porösen Beschichtung.

Weiterhin wurde in dieser Arbeit die Frage geklärt, ob der maximale Einfluß poröser Beschichtungen auf die CHF immer mit einem Wechsel der Strömungsform infolge poröser Beschichtung gekoppelt ist (YILDIZ [68]). Es stellte sich heraus, daß ein signifikanter Einfluß auf die CHF (Abnahme oder Zunahme) infolge poröser Beschichtung für die Bereiche hoher und niedriger Dampfgehalte nicht zwingend mit einem Wechsel des Strömungsregime verknüpft ist. Das gilt auch für die Bereiche mit maximalem Einfluß auf die CHF infolge poröser Beschichtung.

Für die zuverlässige Vorhersage der CHF wurde in der Literatur keine Korrelation für unbeschichtete Rohre und für porös beschichtete Rohre gefunden. In dieser Arbeit erfolgte die Korrelation der CHF-Daten unter Berücksichtigung der Strömungsform. Eine neue Berechnungslogik erlaubt das Erkennen der vorliegenden Strömungsform ohne die Kenntnis des Kurvenverlaufes im $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} - Diagramm. Die entwickelte Korrelation erlaubt eine sicherere Vorhersage der kritischen Wärmestromdichte in den Bereichen des wahren DNB, des scheinbaren DNB, des Grenzdampfgebietes und des Microfilm-Dryout innerhalb des Geltungsbereichs der zugrunde liegenden Korrelation. Aufgrund der Tatsache der Abhängigkeit der in dieser Arbeit gewonnenen CHF-Daten von den Eintrittsbedingungen ($\dot{m}$, p, ΔT_{sub}, L, D) und der sich damit einstellenden Strömungsform wurde nach der globalen Hypothese korreliert. Mit Einführung einer neuen dimensionslosen Kenngröße δ/d_p (Schichtdicke / Partikeldurchmesser) wurde der Einfluß der Beschichtungsparameter bei der Korrelation für poröse Beschichtungen berücksichtigt.

Weiterhin wurden die neuen Erkenntnisse für das glatte und porös beschichtete Rohr in sechs neuen Strömungskarten festgehalten. Sie erlauben die Bestimmung der Strömungsform auf einen Blick und ermöglichen in Verbindung mit den auch in dieser Arbeit dargestellten Strömungskarten von YILDIZ [68] eine Abschätzung des Strömungszustandes beim Auftreten der Siedekrise für Rohre mit anderen Geometrien und Beschichtungen.

8 DISKUSSION UND AUSBLICK

In dieser Arbeit geht es um die Klärung des Einflusses poröser Beschichtungen auf die kritische Wärmestromdichte. Wie die systematischen Untersuchungen in dieser Arbeit belegen, haben poröse Beschichtungen in Abhängigkeit von ihren Beschichtungsparametern einen mehr oder minder großen Einfluß auf die kritische Wärmestromdichte gegenüber dem glatten Rohr. Diese Arbeit zeigt auf, in welchen Strömungsbereichen sich ein Einfluß poröser Beschichtungen auf die CHF ergibt. Auch zeigt sich, daß der Einfluß positiv oder negativ sein kann.

Der Autor dieser Arbeit gibt weiterführende Ansätze einer physikalischen Erklärung zum Einfluß poröser Beschichtungen auf die Siedephänomene in den unterschiedlichen Strömungszuständen. Allerdings können aufgrund der Vielzahl der Einflußparameter und des Umfanges einer detaillierten Untersuchung des Einflusses der einzelnen Abhängigkeiten (z.B. Einfluß der Korngröße oder Geometrie auf das Strömungsbild im durchströmten Rohr) nur Tendenzen angegeben werden. Auf Grund der Besonderheiten des verwendeten Versuchstandes können vermutete Veränderungen des Strömungsbildes durch poröse Beschichtungen nicht visuell belegt werden. Hier kann nur durch logische Verknüpfung der eigenen Erkenntnisse und Beobachtungen mit den Untersuchungen anderer Autoren eine plausible Erklärung der Ergebnisse gegeben werden.

Für eine eindeutige und fundierte physikalische Erklärung des Einflusses poröser Beschichtungen auf das Strömungssieden müssen weitere systematische Untersuchungen erfolgen. Diese Untersuchungen sollten sich speziell auf die folgenden noch offenen Fragen beziehen:

Eine wichtige Erkenntnis wäre die Klärung des Zusammenhangs zwischen Blasengröße der entstehenden Blasen und den Beschichtungsparametern der Beschichtung wie z.B. Korngröße bzw. Porengröße der porösen Schicht. In dieser Arbeit wird behauptet, daß bestimmte Beschichtungen die Blasengröße verkleinern und die Blasenanzahl, bzw. Blasenfrequenz erhöhen. Die Frage, ob es z.B. eine minimale Blasengröße in Abhängigkeit von den Beschichtungsparametern gibt und ob damit auch eine maximale Erhöhung der Blasenfrequenz erfolgt, und ob diese dann auch eine maximale Verbesserung der kritischen Wärmestromdichte ergeben ist nicht geklärt. Auch ist die Frage offen, ob eine Beschichtung

die eine minimale Blasengröße bewirkt, auch die beste Versorgung der Heizfläche mit Flüssigkeit durch Kapillarkräfte in der porösen Schicht gewährleistet. Hier könnte eine Kombination zwischen visuellen Untersuchungen der Blasengröße bei variierten Beschichtungen (durch Variation von jeweils nur einem Beschichtungsparameter Korngröße, Schichtdicke oder Porosität) und gleichzeitige Untersuchungen der CHF Aufschluß geben. Für eine maximale Verbesserung wird die Verwendung folgender Beschichtungsparameter vom Autor vorgeschlagen:

Korngröße ca. 30µm, Schichtdicke ca. 5-7 Kornlagen, bei einer hohen Porosität von 60-70%.

Interessant wäre weiter, inwieweit dieses veränderte Blasenbild infolge poröser Beschichtung auch eine Veränderung der Strömungsform (wie in dieser Arbeit behauptet) bewirkt. Mit diesen neu gewonnenen Erkenntnissen können dann die in dieser Arbeit beobachtete Veränderung des Bereiches des Grenzdampfgehaltes bei poröser Beschichtung in Abhängigkeit von den Beschichtungsparametern noch fundierter beschrieben und zur Erhöhung der kritischen Wärmestromdichte genutzt werden.

Weiterhin empfiehlt der Autor eine Untersuchung des positiven bzw. negativen Effektes poröser Beschichtungen auf die CHF gegenüber glatt in Abhängigkeit von dem Verhältnis L/D sowie den Beschichtungsparametern im Bereich des Grenzdampfgebietes. Der Autor vermutet hier zwei Phänomene poröser Beschichtungen. Erstens den positiven Effekt einer Erhöhung der Blasenkeimstellendichte infolge poröser Beschichtungen sowie eine verbesserte Versorgung der Heizfläche mit Flüssigkeit durch Kapillarkräfte in der porösen Schicht. Und zweitens die Überlagerung des positiven Effektes durch den negativen Effekt der Erhöhung des Entrainment in Abhängigkeit von den Beschichtungsparametern und der Länge des Rohres. Die Klärung, ab welcher Rohrgeometrie (L/D) welcher Effekt überwiegt und ob es ein L/D gibt, bei dem sich beide Effekte ausgleichen, d.h. kein Effekt poröser Beschichtungen zu beobachten ist, wäre hier von Bedeutung. Der Autor dieser Arbeit schätzt diesen Umschlagpunkt auf ein L/D von ca. 20. Systematische Untersuchungen, z.B. Variation der Rohrlänge bei gleichbleibenden Rohrdurchmesser für glatte und porös beschichtete Rohre sollten dies in Zukunft belegen.

All diese Untersuchungen zielen darauf ab, die physikalischen Vorgänge in Rohren mit poröser Oberflächenbeschichtung beim Strömungssieden zu verstehen und erklären zu können. Diese Kenntnis erlaubt eine bestmögliche Kombination von Beschichtungsparametern zu finden, die durch gezielte Beeinflussung der physikalischen Vorgänge in und an der porösen Schicht eine maximale Erhöhung der kritischen Wärmestromdichte in dem jeweils angewandten Strömungsparameterbereich bewirkt. Für die industrielle Anwendung bedeutet diese Erhöhung der kritischen Wärmestromdichte eine Verkleinerung der Wärmeübertragungsfläche und somit eine Reduzierung der Kosten.

ANHANG

A1: Thermische Eigenschaften von Inconel 600

Die thermischen Eigenschaften vom Werkstoff Inconel 600 lassen sich mit Hilfe von Herstellerangaben der Fa. Ethen nach folgenden Polynomen approximieren.

Thermische Leitfähigkeit nach Herstellerangaben Fa. Ethen, W/mK:

$$\lambda_{Inconel} = 14{,}9 + 0{,}01T + 0{,}0000078T^2$$

Elektrischer Widerstand nach Herstellerangaben Fa. Ethen, Ωmm^2/m

$$\omega_{Inconel} = 1{,}025 + 0{,}00026T - 0{,}00000017T^2$$

Tabelle A1.1: Chemische Zusammensetzung nach Herstellerangaben Fa. Ethen, %

Ni	Co	Cr	Fe	Cn	Mn	Si	C	P	S	Ti	Al	Rest
74,5	0,09	15,9	8,35	0,07	0,23	0,29	0,064	0,006	0,002	0,26	0,16	0,078

A2: Verlauf der kritischen Wärmestromdichte in Abhängigkeit vom kritischen Dampfgehalt bei glattem und porös beschichteten Rohren (*L/D* = 50, alle Drücke und Massenstromdichten)

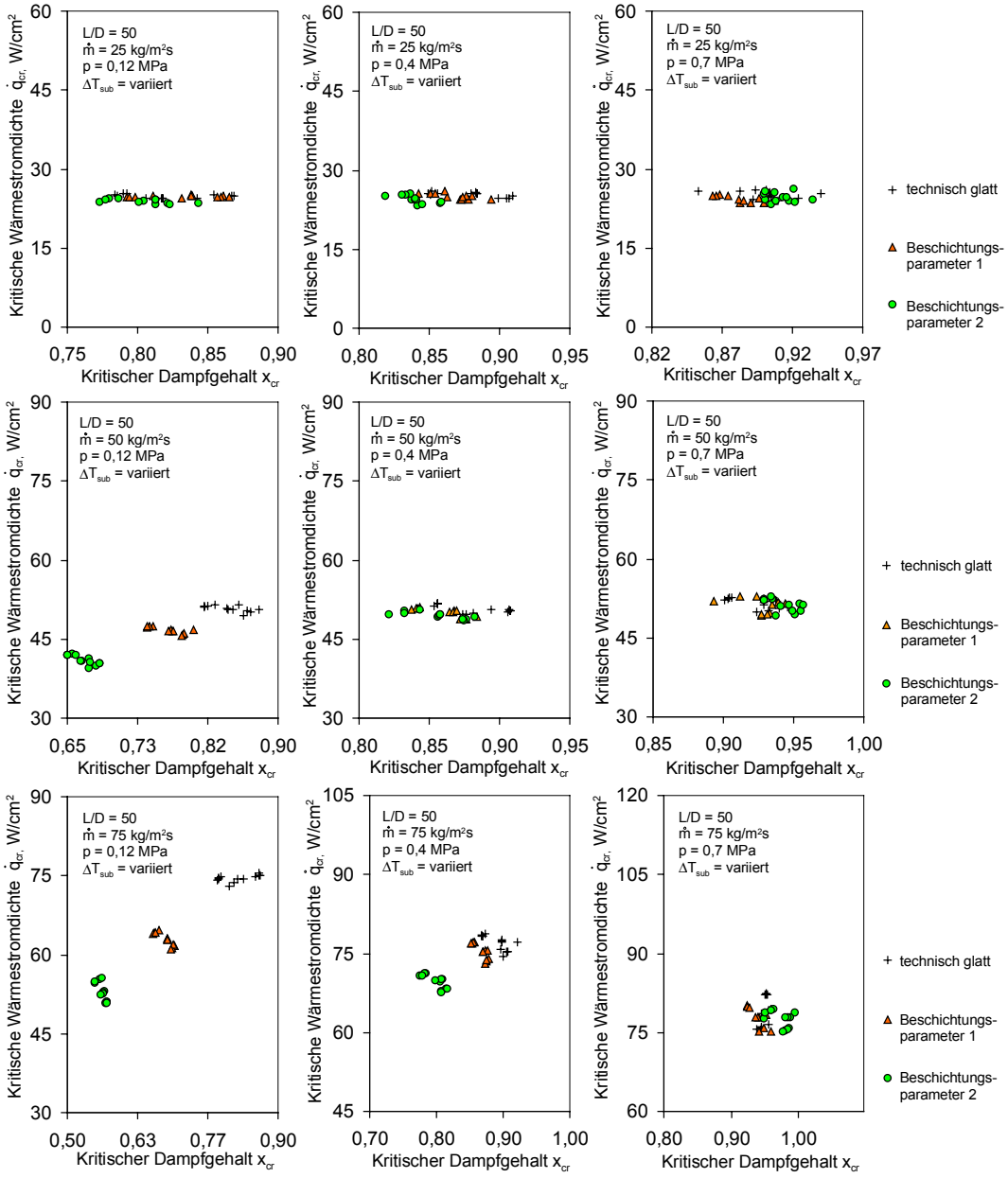


Abbildung A2.1: Kurvenverlauf $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} bei glattem und porös beschichteten Rohren (*L/D* = 50, alle Drücke und Massenstromdichten von 25, 50 und 75 kg/m^{2}s)

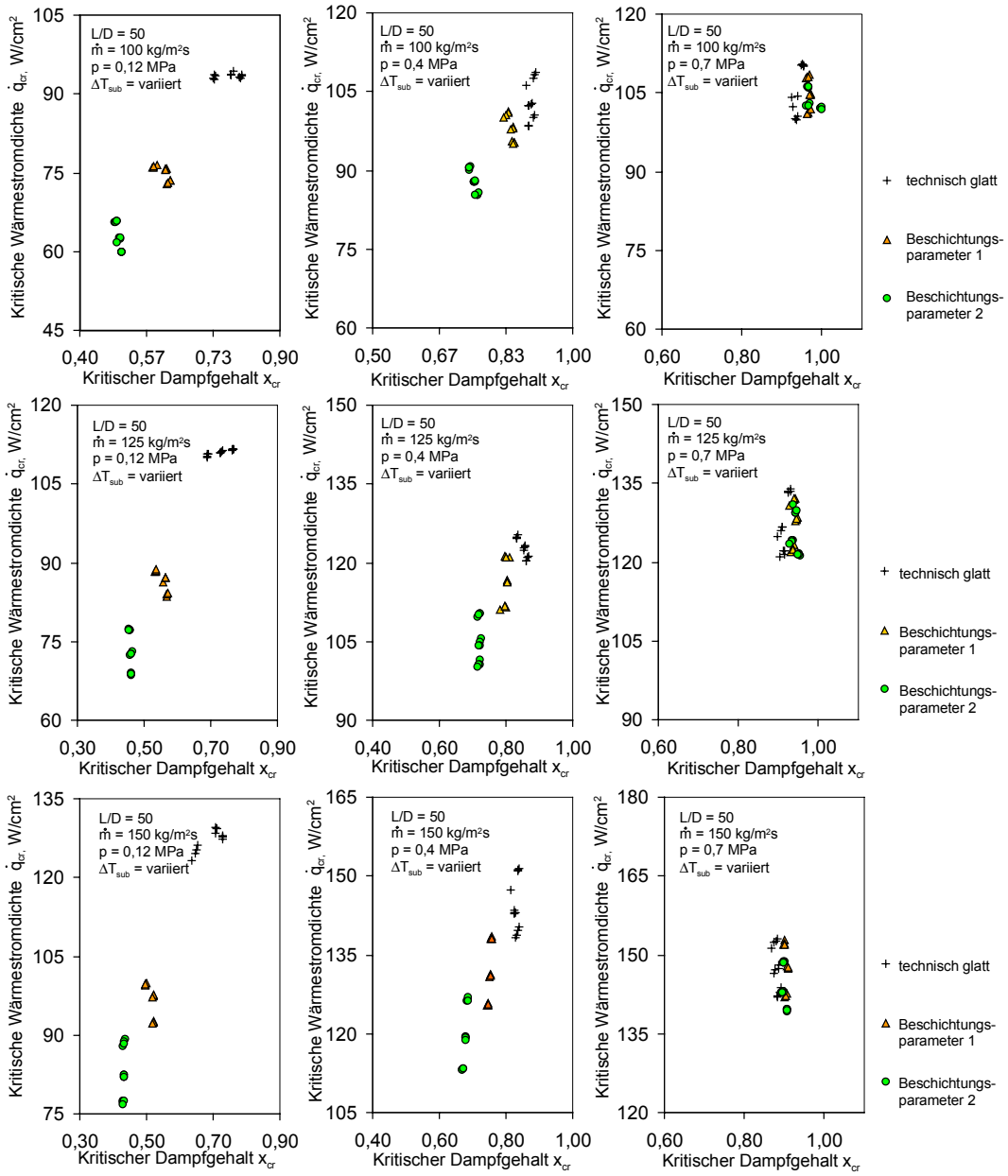


Abbildung A2.2: Kurvenverlauf $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} bei glattem und porös beschichteten Rohren (L/D = 50, alle Drücke und Massenstromdichten von 100, 125 und 150 kg/m^{2}s)

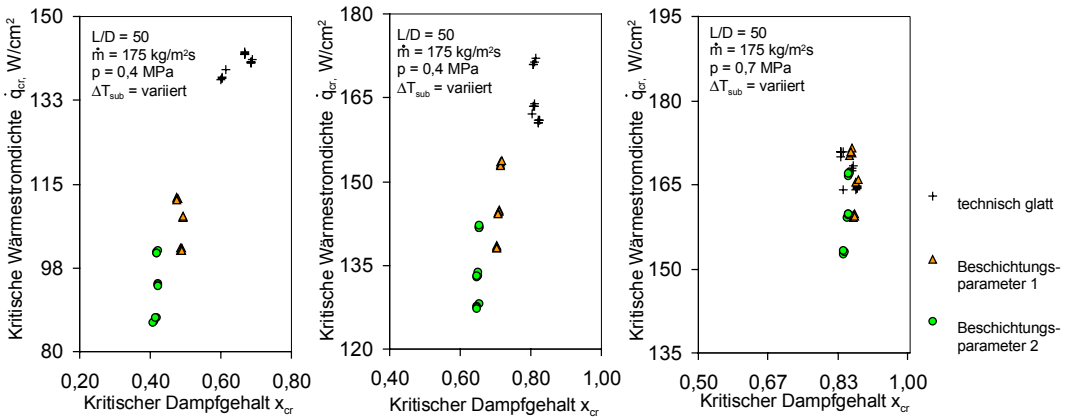


Abbildung A2.2: Kurvenverlauf $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} bei glattem und porös beschichteten Rohren (L/D = 50, alle Drücke und einer Massenstromdichte von 175 kg/m^{2}s)

A3: Verlauf der kritischen Wärmestromdichte in Abhängigkeit vom kritischen Dampfgehalt bei glattem und porös beschichteten Rohren (*L/D* = 14,1, alle Drücke und Massenstromdichten)

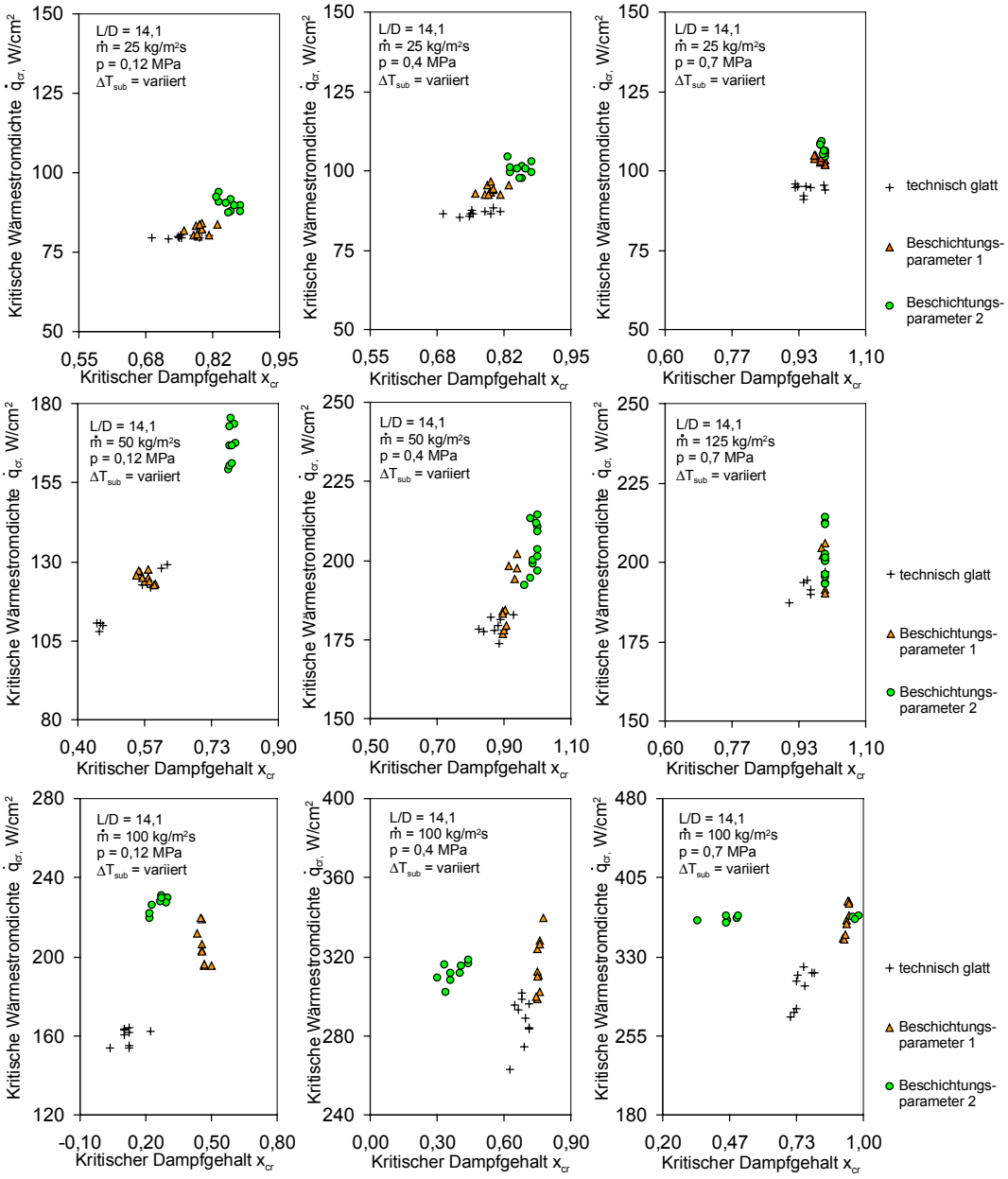


Abbildung A3.1: Kurvenverlauf $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} bei glattem und porös beschichteten Rohren (*L/D* = 14,1, alle Drücke und Massenstromdichten von 25, 50 und 100 kg/m^{2}s)

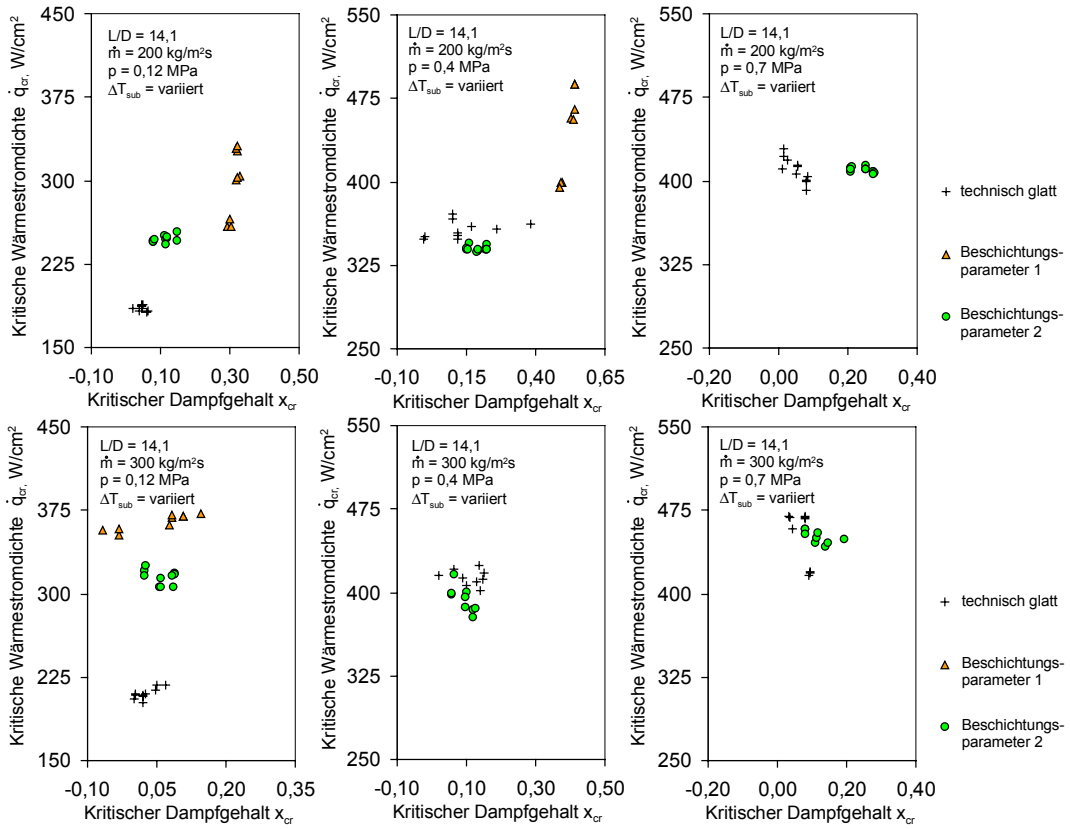


Abbildung A3.2: Kurvenverlauf $\dot{q}_{cr}$ über x_{cr} bei glattem und porös beschichteten Rohren (L/D = 14,1, alle Drücke und Massenstromdichten von 200 und 300 kg/m^{2}s)

A4: Experimentelle Daten der kritischen Wärmestromdichte bei Aufwärtsströmung (*L/D* = 50, gleichförmige Beheizung)

Tabelle A4-1: CHF-Daten an der glatten Testsektion *L/D* = 50

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
1,15	25,07	15,50	-0,029	0,842	24,53
1,10	24,81	15,00	-0,028	0,867	25,00
1,10	24,69	15,00	-0,028	0,869	24,93
1,10	25,36	15,00	-0,028	0,854	25,19
1,09	24,92	30,10	-0,056	0,817	24,49
1,09	24,84	29,70	-0,055	0,818	24,44
1,14	25,13	30,20	-0,057	0,806	24,36
1,14	24,99	30,20	-0,057	0,818	24,56
1,10	25,23	49,70	-0,093	0,786	24,95
1,15	25,44	49,90	-0,093	0,792	25,33
1,19	25,58	50,70	-0,095	0,784	25,23
1,15	25,45	49,60	-0,093	0,790	25,26
1,14	50,17	15,00	-0,028	0,863	50,27
1,14	49,76	15,00	-0,028	0,877	50,61
1,14	49,84	15,00	-0,028	0,868	50,21
1,14	49,57	15,00	-0,028	0,859	49,41
1,09	50,49	29,60	-0,055	0,839	50,80
1,14	50,37	30,20	-0,057	0,853	51,51
1,14	50,13	29,90	-0,056	0,841	50,54
1,14	49,76	30,20	-0,057	0,847	50,53
1,15	50,34	50,00	-0,093	0,812	51,24
1,15	50,00	49,70	-0,093	0,825	51,55
1,15	50,12	49,70	-0,093	0,813	51,01

Tabelle A4-1: CHF-Daten an der glatten Testsektion *L/D* = 50

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
1,14	75,24	14,70	-0,028	0,864	75,45
1,19	74,99	15,50	-0,029	0,863	75,13
1,19	74,73	15,20	-0,029	0,865	74,97
1,19	75,29	15,20	-0,029	0,857	74,80
1,14	74,36	29,60	-0,055	0,834	74,36
1,14	75,14	29,90	-0,056	0,824	74,34
1,14	75,02	30,20	-0,057	0,817	73,66
1,14	75,24	29,90	-0,056	0,807	72,98
1,20	75,31	50,20	-0,094	0,787	74,43
1,20	75,36	49,80	-0,094	0,788	74,52
1,15	75,22	49,10	-0,092	0,784	74,06
1,20	75,31	50,50	-0,095	0,791	74,88
1,15	99,91	14,80	-0,028	0,806	93,62
1,15	99,88	14,80	-0,028	0,806	93,54
1,15	100,37	14,50	-0,027	0,800	93,30
1,19	99,80	15,20	-0,029	0,802	93,02
1,14	99,92	30,00	-0,056	0,777	93,57
1,14	100,03	29,70	-0,056	0,783	94,26
1,14	99,95	30,30	-0,057	0,777	93,66
1,14	100,01	29,70	-0,056	0,778	93,75
1,20	100,43	50,50	-0,095	0,737	93,67
1,20	99,83	49,50	-0,093	0,736	92,83
1,20	100,24	49,80	-0,094	0,734	93,07
1,20	100,07	50,20	-0,094	0,739	93,51
1,15	125,00	14,80	-0,028	0,767	111,60
1,19	125,40	14,90	-0,028	0,764	111,49

Tabelle A4-1: CHF-Daten an der glatten Testsektion *L/D* = 50

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
1,15	125,08	14,80	-0,028	0,767	111,69
1,19	125,19	15,50	-0,029	0,764	111,53
1,14	125,44	30,30	-0,057	0,730	110,94
1,14	125,47	30,30	-0,057	0,731	111,08
1,14	125,47	30,00	-0,056	0,734	111,44
1,14	125,44	30,30	-0,057	0,730	110,94
1,19	124,87	50,10	-0,094	0,690	110,10
1,19	125,46	50,40	-0,094	0,691	110,64
1,15	125,28	49,90	-0,093	0,690	110,35
1,15	125,20	49,90	-0,093	0,694	110,75
1,19	150,39	15,20	-0,029	0,729	127,95
1,19	150,23	15,20	-0,029	0,728	127,66
1,24	150,33	15,40	-0,029	0,728	127,65
1,19	149,58	15,20	-0,029	0,729	127,21
1,14	150,33	30,30	-0,057	0,709	129,35
1,14	150,12	29,70	-0,056	0,706	128,51
1,28	150,39	33,30	-0,063	0,706	129,51
1,19	150,46	30,50	-0,057	0,709	129,41
1,15	150,11	49,60	-0,093	0,649	125,21
1,19	150,19	50,10	-0,094	0,637	123,17
1,15	150,25	49,90	-0,093	0,654	126,27
1,19	150,13	50,40	-0,094	0,645	124,63
1,18	175,28	15,00	-0,028	0,688	140,93
1,18	175,27	15,30	-0,029	0,685	140,38
1,18	175,03	15,30	-0,029	0,685	140,32
1,18	175,03	15,30	-0,029	0,687	140,60

Tabelle A4-1: CHF-Daten an der glatten Testsektion *L/D* = 50

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
1,17	175,12	29,80	-0,056	0,669	142,51
1,17	174,95	29,80	-0,056	0,667	142,00
1,12	174,80	30,00	-0,056	0,667	142,16
1,17	174,80	30,10	-0,057	0,668	142,22
1,18	175,24	50,30	-0,094	0,602	136,95
1,18	174,85	50,30	-0,094	0,605	137,38
1,18	175,01	50,00	-0,094	0,613	138,83
1,18	175,01	50,30	-0,094	0,601	136,68
3,91	24,50	14,90	-0,026	0,907	24,72
3,91	24,51	15,40	-0,027	0,905	24,68
3,91	24,77	15,40	-0,027	0,909	25,07
3,91	24,57	14,80	-0,026	0,899	24,61
3,90	25,25	29,50	-0,055	0,884	25,62
3,90	25,38	29,90	-0,055	0,880	25,67
3,99	25,17	30,00	-0,055	0,884	25,48
4,09	25,47	30,00	-0,055	0,883	25,77
3,98	24,72	50,50	-0,095	0,851	25,28
3,93	25,08	50,10	-0,095	0,849	25,54
3,93	24,93	50,10	-0,095	0,856	25,59
4,07	25,43	50,30	-0,095	0,852	26,00
3,86	49,77	15,20	-0,027	0,906	50,19
3,91	49,89	15,00	-0,026	0,908	50,38
3,86	49,89	14,60	-0,025	0,908	50,39
3,91	50,13	14,70	-0,026	0,907	50,55
3,99	49,40	30,20	-0,056	0,894	50,63
3,90	49,42	29,70	-0,055	0,881	49,94

Tabelle A4-1: CHF-Daten an der glatten Testsektion *L/D* = 50

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
3,94	49,43	29,60	-0,055	0,876	49,68
3,99	49,48	29,70	-0,055	0,874	49,65
3,93	50,50	49,90	-0,094	0,856	51,82
3,93	50,18	49,90	-0,094	0,853	51,32
4,03	50,46	50,10	-0,095	0,856	51,74
3,93	50,53	49,50	-0,094	0,856	51,84
3,86	74,65	15,20	-0,027	0,906	75,27
3,81	74,36	14,80	-0,026	0,900	74,49
3,86	74,61	14,80	-0,026	0,907	75,31
3,86	75,39	14,90	-0,026	0,921	77,24
3,89	73,71	30,00	-0,056	0,896	75,75
3,99	75,39	30,20	-0,056	0,898	77,53
3,99	74,94	29,70	-0,055	0,898	77,08
4,08	75,10	30,50	-0,056	0,898	77,29
3,88	75,32	49,80	-0,094	0,873	78,73
3,93	75,48	49,90	-0,094	0,867	78,40
3,88	75,16	49,80	-0,094	0,868	78,17
3,98	75,32	50,20	-0,095	0,870	78,37
3,86	99,57	15,00	-0,026	0,890	98,57
3,86	99,57	15,00	-0,026	0,890	98,57
3,86	99,73	15,00	-0,026	0,902	100,08
3,86	99,78	15,00	-0,026	0,906	100,59
3,95	99,65	30,50	-0,057	0,896	102,59
4,00	100,27	30,40	-0,056	0,889	102,32
3,95	100,33	30,10	-0,056	0,890	102,45
4,00	99,60	30,00	-0,055	0,900	102,82

Tabelle A4-1: CHF-Daten an der glatten Testsektion *L/D* = 50

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
3,99	100,05	49,90	-0,094	0,906	108,17
4,04	100,09	50,00	-0,094	0,901	107,60
4,13	99,99	51,80	-0,098	0,909	108,63
4,04	100,11	51,60	-0,098	0,884	106,13
3,91	125,16	15,20	-0,027	0,862	120,28
3,86	125,43	14,90	-0,026	0,868	121,29
3,81	125,44	15,20	-0,027	0,865	121,01
3,86	125,48	15,10	-0,026	0,862	120,39
3,86	125,08	29,90	-0,055	0,856	123,19
3,95	124,88	29,90	-0,055	0,856	123,06
3,86	124,91	30,20	-0,056	0,854	122,92
4,00	124,61	30,00	-0,056	0,854	122,42
4,07	125,17	50,40	-0,096	0,835	125,35
3,83	124,63	49,40	-0,093	0,831	124,61
3,88	124,51	50,00	-0,095	0,833	124,90
3,88	124,54	49,60	-0,094	0,832	124,70
3,86	149,71	14,70	-0,026	0,830	138,39
3,91	149,60	14,90	-0,026	0,833	138,64
3,81	150,07	14,10	-0,024	0,839	140,32
3,91	150,01	15,30	-0,027	0,835	139,58
3,81	149,85	30,40	-0,056	0,826	143,00
3,90	149,97	30,90	-0,057	0,824	142,80
3,95	149,93	30,30	-0,056	0,828	143,12
3,95	150,45	30,00	-0,055	0,825	143,39
4,10	150,21	50,20	-0,095	0,836	150,99
3,99	150,33	49,90	-0,094	0,838	151,49

Tabelle A4-1: CHF-Daten an der glatten Testsektion L/D = 50

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
3,89	150,03	48,70	-0,092	0,815	147,28
4,04	150,50	50,00	-0,094	0,836	151,27
3,99	175,08	15,30	-0,027	0,823	160,90
3,99	175,15	15,00	-0,026	0,822	160,63
3,99	175,03	15,00	-0,026	0,823	160,61
4,04	175,00	15,40	-0,027	0,824	160,87
3,98	175,35	29,80	-0,055	0,810	163,92
4,07	174,80	30,00	-0,055	0,811	163,44
3,93	175,00	30,00	-0,056	0,808	163,54
4,07	174,58	30,00	-0,055	0,805	162,19
3,99	175,07	50,20	-0,095	0,815	172,13
4,08	175,29	50,40	-0,095	0,810	171,32
3,89	175,13	50,00	-0,094	0,808	171,01
3,99	175,29	50,20	-0,095	0,807	170,94
7,14	24,76	15,10	-0,030	0,924	24,47
7,05	25,16	15,50	-0,030	0,940	25,34
6,95	24,59	15,60	-0,030	0,910	24,02
7,05	24,50	15,20	-0,030	0,905	23,75
6,95	24,66	30,60	-0,061	0,903	24,68
7,00	24,51	30,60	-0,061	0,892	24,25
7,05	24,77	30,20	-0,060	0,905	24,82
7,05	25,49	30,50	-0,061	0,904	25,52
6,94	25,11	50,30	-0,101	0,894	25,96
6,90	25,08	50,70	-0,102	0,901	26,13
6,99	26,13	50,30	-0,101	0,853	25,89
6,90	25,31	50,70	-0,102	0,883	25,91

Tabelle A4-1: CHF-Daten an der glatten Testsektion *L/D* = 50

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
7,05	50,16	15,50	-0,030	0,946	50,80
6,90	50,12	15,30	-0,030	0,940	50,52
7,00	50,31	15,90	-0,031	0,924	49,90
6,90	50,14	15,30	-0,030	0,932	50,13
7,00	50,01	29,90	-0,060	0,929	51,33
7,05	50,47	29,90	-0,060	0,934	52,04
7,00	50,19	29,90	-0,060	0,938	51,98
7,05	50,37	30,20	-0,060	0,937	52,10
6,90	50,06	50,40	-0,101	0,901	52,15
6,85	50,09	50,40	-0,101	0,903	52,31
7,04	50,32	50,90	-0,103	0,906	52,65
6,94	50,40	50,30	-0,101	0,904	52,61
6,95	75,06	15,00	-0,029	0,947	76,10
6,91	74,74	15,00	-0,029	0,957	76,55
7,00	74,90	15,60	-0,030	0,946	75,90
6,95	75,09	15,30	-0,030	0,940	75,65
7,00	75,11	30,30	-0,060	0,947	78,55
6,91	74,99	29,70	-0,059	0,960	79,38
7,00	74,90	29,90	-0,060	0,960	79,30
6,95	75,09	29,70	-0,059	0,957	79,21
6,94	75,18	50,30	-0,101	0,953	82,29
6,99	74,93	50,30	-0,101	0,955	82,18
6,94	75,21	50,30	-0,101	0,953	82,38
7,04	75,31	50,30	-0,101	0,951	82,22
7,05	100,00	14,90	-0,029	0,935	99,95
6,95	100,00	15,30	-0,030	0,938	100,48

Tabelle A4-1: CHF-Daten an der glatten Testsektion *L/D* = 50

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
7,10	100,32	15,10	-0,030	0,932	100,05
7,00	100,63	29,90	-0,060	0,940	104,38
6,91	99,77	30,30	-0,060	0,926	102,27
7,05	100,95	35,10	-0,070	0,923	104,04
6,90	101,14	50,40	-0,101	0,948	110,24
6,95	100,53	50,40	-0,101	0,953	110,07
6,85	100,85	50,80	-0,102	0,952	110,52
7,00	100,96	49,70	-0,100	0,953	110,32
7,00	125,09	14,90	-0,029	0,913	122,26
7,00	124,87	14,90	-0,029	0,914	122,17
7,00	123,97	15,30	-0,030	0,914	121,48
7,00	125,15	14,60	-0,028	0,903	120,96
6,90	124,68	32,60	-0,065	0,908	126,10
7,00	125,18	32,50	-0,065	0,909	126,58
6,95	124,84	32,50	-0,065	0,898	124,83
6,95	125,01	32,50	-0,065	0,910	126,64
7,04	125,31	50,90	-0,103	0,925	133,56
6,90	125,09	50,10	-0,101	0,924	133,18
6,95	124,68	50,40	-0,101	0,930	133,50
6,95	125,15	50,10	-0,101	0,929	133,88
6,95	150,20	15,30	-0,030	0,892	143,71
6,91	150,05	14,70	-0,028	0,883	142,08
7,05	150,20	14,50	-0,028	0,888	142,82
7,10	150,04	15,10	-0,030	0,883	141,90
7,00	150,16	30,70	-0,062	0,887	148,16
7,00	150,15	33,50	-0,067	0,873	146,55

Tabelle A4-1: CHF-Daten an der glatten Testsektion *L/D* = 50

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
7,00	150,41	49,70	-0,100	0,875	152,27
7,05	150,05	50,30	-0,102	0,879	152,55
6,95	149,89	50,40	-0,101	0,882	153,14
6,95	150,25	50,40	-0,101	0,868	151,32
6,98	175,51	14,80	-0,029	0,876	164,78
6,93	175,40	14,80	-0,029	0,875	164,59
7,03	175,16	14,80	-0,029	0,875	164,22
7,03	175,42	14,80	-0,029	0,872	163,99
6,92	174,98	30,50	-0,061	0,842	164,19
6,92	175,01	29,80	-0,059	0,862	167,50
7,07	175,10	30,30	-0,061	0,866	168,37
7,07	175,26	30,30	-0,061	0,863	167,94
6,70	174,84	49,90	-0,100	0,841	170,95
6,97	174,82	49,60	-0,100	0,837	169,96
6,97	175,28	50,20	-0,101	0,837	170,78
6,65	175,66	49,90	-0,100	0,836	170,88

Tabelle A4-2: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 50 mit poröser Beschichtung 1

(d_p = 30-40 µm, δ = 300 µm, ε = 60-75 %)

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
1,15	24,86	14,90	-0,028	0,861	24,84
1,15	24,82	15,30	-0,028	0,861	24,77
1,10	24,60	15,40	-0,029	0,865	24,75

Tabelle A4-2: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 50 mit poröser Beschichtung 1

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
1,10	24,73	15,10	-0,028	0,857	24,63
1,14	24,57	30,10	-0,056	0,831	24,51
1,19	25,00	30,20	-0,057	0,838	25,10
1,14	24,69	29,80	-0,056	0,839	24,84
1,14	24,71	29,80	-0,056	0,839	24,84
1,14	24,72	49,80	-0,093	0,793	24,61
1,14	24,71	50,10	-0,094	0,794	24,65
1,14	24,57	50,10	-0,094	0,798	24,63
1,14	24,56	50,10	-0,094	0,811	24,98
1,15	50,06	14,90	-0,028	0,786	45,81
1,15	50,09	14,90	-0,028	0,789	45,97
1,20	50,35	15,40	-0,029	0,800	46,82
1,15	49,82	14,90	-0,028	0,786	45,55
1,19	49,76	30,30	-0,057	0,775	46,45
1,14	50,10	30,10	-0,056	0,773	46,71
1,14	49,73	29,80	-0,056	0,775	46,46
1,14	50,18	30,40	-0,057	0,770	46,63
1,14	50,07	50,10	-0,094	0,751	47,54
1,14	50,17	50,10	-0,094	0,744	47,24
1,14	50,15	49,80	-0,093	0,748	47,40
1,14	50,28	50,10	-0,094	0,745	47,37
1,15	75,09	14,80	-0,028	0,703	61,67
1,15	74,94	14,80	-0,028	0,700	61,25
1,15	75,62	14,50	-0,027	0,700	61,84
1,15	75,03	14,50	-0,027	0,697	61,06

Tabelle A4-2: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 50 mit poröser Beschichtung 1

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
1,14	75,15	30,40	-0,057	0,690	63,09
1,14	75,00	30,10	-0,056	0,691	62,98
1,14	74,82	30,10	-0,056	0,690	62,75
1,10	74,99	28,90	-0,054	0,691	62,86
1,14	74,89	50,10	-0,094	0,675	64,70
1,14	75,34	50,40	-0,094	0,665	64,27
1,14	75,16	50,10	-0,094	0,663	63,89
1,14	75,04	49,50	-0,092	0,668	64,12
1,15	100,06	15,10	-0,028	0,625	73,45
1,15	100,10	14,80	-0,028	0,625	73,44
1,15	100,35	14,80	-0,028	0,618	72,81
1,15	100,17	14,80	-0,028	0,621	73,00
1,14	100,25	30,10	-0,056	0,616	75,75
1,19	100,26	30,20	-0,057	0,616	75,66
1,14	100,27	30,10	-0,056	0,615	75,68
1,14	100,29	29,80	-0,056	0,615	75,62
1,14	100,37	49,80	-0,093	0,581	76,00
1,14	98,88	50,10	-0,094	0,595	76,49
1,14	99,94	49,80	-0,093	0,584	76,11
1,19	100,30	50,30	-0,094	0,584	76,32
1,15	125,27	15,10	-0,028	0,569	84,09
1,15	124,99	14,80	-0,028	0,567	83,58
1,15	125,30	14,80	-0,028	0,569	84,01
1,15	125,15	14,80	-0,028	0,571	84,22
1,19	125,20	30,20	-0,057	0,557	86,26

Tabelle A4-2: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 50 mit poröser Beschichtung 1

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
1,19	125,33	30,20	-0,057	0,563	87,14
1,14	125,32	29,70	-0,056	0,563	87,08
1,14	125,10	29,70	-0,056	0,564	87,14
1,19	125,44	50,30	-0,094	0,533	88,30
1,14	125,03	49,80	-0,093	0,536	88,38
1,14	125,30	49,80	-0,093	0,535	88,48
1,14	125,39	50,10	-0,094	0,535	88,66
1,15	150,06	15,10	-0,028	0,520	92,48
1,15	150,22	14,80	-0,028	0,522	92,75
1,15	149,97	14,80	-0,028	0,521	92,43
1,19	150,01	15,20	-0,029	0,519	92,19
1,20	150,43	30,40	-0,057	0,520	97,44
1,15	150,39	30,00	-0,056	0,521	97,59
1,20	150,34	30,40	-0,057	0,521	97,53
1,15	150,21	30,00	-0,056	0,519	97,08
1,19	150,17	50,30	-0,094	0,497	99,62
1,14	149,79	49,90	-0,093	0,500	99,85
1,14	149,84	50,20	-0,094	0,497	99,48
1,14	149,92	50,20	-0,094	0,497	99,57
1,15	175,43	14,80	-0,028	0,488	101,59
1,19	175,37	15,90	-0,030	0,486	101,61
1,19	174,98	15,20	-0,029	0,486	101,04
1,19	174,75	14,90	-0,028	0,488	101,14
1,15	175,22	30,30	-0,057	0,493	108,16
1,20	175,11	30,40	-0,057	0,492	107,87

Tabelle A4-2: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 50 mit poröser Beschichtung 1

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
1,20	175,46	30,40	-0,057	0,491	108,01
1,20	175,43	30,10	-0,057	0,493	108,16
1,19	175,04	50,40	-0,094	0,476	112,16
1,15	174,50	49,90	-0,093	0,477	111,91
1,15	175,33	50,20	-0,094	0,474	111,92
1,15	175,35	50,20	-0,094	0,473	111,76
3,96	24,60	15,40	-0,027	0,894	24,51
3,91	24,89	15,30	-0,027	0,878	24,37
3,91	25,03	15,30	-0,027	0,872	24,35
3,91	25,12	15,30	-0,027	0,873	24,45
3,95	25,02	29,90	-0,055	0,876	25,21
4,00	25,02	30,00	-0,055	0,863	24,83
4,00	24,79	30,60	-0,057	0,874	24,94
4,05	24,86	30,40	-0,056	0,881	25,16
4,00	25,25	49,70	-0,094	0,842	25,55
4,10	24,98	50,20	-0,095	0,851	25,49
4,00	25,00	50,00	-0,094	0,854	25,63
4,00	25,15	49,70	-0,094	0,861	25,96
3,96	50,11	15,40	-0,027	0,875	48,89
3,96	50,03	15,40	-0,027	0,876	48,87
4,01	50,02	15,50	-0,027	0,884	49,23
4,01	50,37	15,20	-0,026	0,872	48,89
4,00	50,49	30,00	-0,055	0,867	50,37
3,90	50,44	29,50	-0,054	0,864	50,18
4,00	50,19	30,00	-0,055	0,867	50,05

Tabelle A4-2: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 50 mit poröser Beschichtung 1

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
4,00	50,37	30,30	-0,056	0,869	50,38
4,05	50,35	50,10	-0,095	0,843	51,01
4,00	50,29	49,70	-0,094	0,842	50,87
4,05	50,32	49,80	-0,094	0,841	50,81
4,10	50,24	49,90	-0,094	0,837	50,50
3,86	75,51	15,40	-0,027	0,878	74,00
3,90	75,24	15,50	-0,027	0,876	73,53
3,86	75,03	15,40	-0,027	0,873	73,15
3,86	75,40	15,40	-0,027	0,875	73,65
3,95	75,32	30,20	-0,056	0,870	75,42
4,00	75,13	30,60	-0,057	0,874	75,55
3,95	75,06	30,20	-0,056	0,876	75,66
3,95	75,13	30,20	-0,056	0,870	75,25
4,05	75,03	50,10	-0,095	0,854	76,85
4,05	74,94	50,40	-0,095	0,857	77,11
4,00	75,14	49,70	-0,094	0,855	77,08
4,00	75,18	49,70	-0,094	0,852	76,85
4,00	100,82	15,40	-0,027	0,849	95,48
3,95	100,26	15,00	-0,026	0,854	95,41
4,05	100,23	15,20	-0,026	0,855	95,38
4,00	100,13	15,10	-0,026	0,852	95,03
3,95	100,07	29,90	-0,055	0,853	98,27
4,00	100,08	30,30	-0,056	0,850	98,03
4,00	100,06	30,00	-0,055	0,850	97,94
4,00	100,28	30,30	-0,056	0,847	97,84

Tabelle A4-2: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 50 mit poröser Beschichtung 1

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
4,04	100,28	50,40	-0,095	0,839	101,25
4,00	100,21	50,30	-0,095	0,838	101,05
4,00	100,51	49,60	-0,094	0,832	100,58
4,09	100,44	50,10	-0,095	0,829	100,10
3,85	125,29	15,70	-0,028	0,796	111,77
3,85	124,55	15,40	-0,027	0,799	111,41
3,90	126,64	15,50	-0,027	0,784	111,15
3,90	125,14	15,50	-0,027	0,797	111,65
3,95	125,25	30,20	-0,056	0,805	116,57
3,95	125,31	30,20	-0,056	0,805	116,70
3,95	125,16	30,20	-0,056	0,804	116,45
4,00	125,17	30,00	-0,055	0,804	116,34
3,99	125,48	50,60	-0,096	0,798	121,18
3,99	123,50	50,60	-0,096	0,810	120,97
3,95	124,93	49,80	-0,094	0,801	121,01
3,99	124,98	50,20	-0,095	0,801	121,01
3,90	149,92	15,50	-0,027	0,745	125,33
3,85	149,75	15,70	-0,028	0,748	125,75
3,90	150,46	15,50	-0,027	0,743	125,49
3,90	150,10	15,50	-0,027	0,746	125,59
4,00	150,32	30,30	-0,056	0,752	131,34
3,95	150,10	30,50	-0,057	0,752	131,28
3,95	150,19	29,90	-0,055	0,750	130,84
4,05	150,08	30,40	-0,056	0,753	131,12
3,90	150,56	49,70	-0,094	0,757	138,62

Tabelle A4-2: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 50 mit poröser Beschichtung 1

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
4,04	150,05	50,00	-0,095	0,757	138,10
3,90	150,11	50,00	-0,095	0,755	138,04
3,95	149,88	50,10	-0,095	0,757	138,14
3,95	175,31	14,90	-0,026	0,705	138,64
3,99	175,01	15,00	-0,026	0,703	138,02
3,95	175,16	15,30	-0,027	0,703	138,31
3,95	175,35	15,30	-0,027	0,702	138,18
4,05	175,20	30,10	-0,056	0,710	144,85
4,05	175,08	30,10	-0,056	0,709	144,68
4,05	175,22	29,80	-0,055	0,708	144,34
4,00	175,08	30,30	-0,056	0,706	144,26
4,04	175,35	50,00	-0,095	0,716	153,49
4,09	175,02	50,10	-0,095	0,715	152,96
4,04	174,69	50,00	-0,095	0,715	152,72
3,99	175,50	49,60	-0,094	0,716	153,66
6,99	24,60	15,50	-0,030	0,906	23,91
6,90	24,75	15,30	-0,030	0,883	23,47
7,04	24,50	15,20	-0,030	0,900	23,63
7,04	24,55	15,50	-0,030	0,890	23,44
6,94	24,84	29,90	-0,060	0,882	24,30
7,09	24,67	30,10	-0,060	0,896	24,47
7,04	24,51	29,50	-0,059	0,886	24,02
7,09	24,73	50,20	-0,101	0,874	25,01
7,00	25,07	49,70	-0,100	0,869	25,21
6,95	24,86	49,40	-0,099	0,866	24,93

Tabelle A4-2: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 50 mit poröser Beschichtung 1

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
7,04	24,97	50,00	-0,101	0,863	24,97
7,14	49,80	15,40	-0,030	0,933	49,71
6,99	49,57	15,20	-0,030	0,927	49,21
7,04	49,84	14,80	-0,029	0,927	49,41
7,09	49,56	15,40	-0,030	0,931	49,41
6,99	49,76	30,20	-0,060	0,939	51,64
6,99	49,64	29,90	-0,060	0,935	51,24
6,90	49,54	49,80	-0,100	0,929	52,40
6,95	50,38	50,10	-0,101	0,893	52,02
7,09	49,85	49,90	-0,101	0,924	52,96
7,00	50,27	50,00	-0,101	0,912	52,82
6,99	74,56	15,20	-0,030	0,949	75,76
6,95	74,51	15,30	-0,030	0,942	75,23
7,09	74,99	15,10	-0,030	0,961	75,28
6,99	74,66	30,50	-0,061	0,954	78,24
6,94	74,90	29,90	-0,060	0,942	77,93
6,94	74,87	30,20	-0,060	0,940	77,82
7,09	75,19	30,10	-0,060	0,937	77,78
7,04	75,27	50,00	-0,101	0,926	80,15
7,00	75,12	50,00	-0,101	0,925	79,97
6,95	75,00	50,10	-0,101	0,926	79,96
7,04	74,48	50,30	-0,101	0,929	79,63
6,95	100,10	15,30	-0,030	0,966	101,21
6,95	100,33	14,90	-0,029	0,963	101,03
7,04	100,21	15,20	-0,030	0,963	100,89

Tabelle A4-2: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 50 mit poröser Beschichtung 1

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
6,95	100,38	14,90	-0,029	0,971	101,89
6,99	100,09	30,20	-0,060	0,972	104,85
7,09	100,11	30,10	-0,060	0,971	104,65
6,99	100,02	29,90	-0,060	0,970	104,56
7,05	100,20	50,00	-0,101	0,962	108,05
7,14	99,98	50,50	-0,102	0,968	108,38
6,95	100,14	49,70	-0,100	0,960	107,80
6,95	99,87	49,70	-0,100	0,965	108,05
6,99	125,43	15,20	-0,030	0,939	123,27
6,99	125,11	15,20	-0,030	0,936	122,58
6,90	124,97	15,00	-0,029	0,932	122,00
6,95	124,90	15,30	-0,030	0,935	122,42
6,99	125,44	30,20	-0,060	0,945	128,03
6,90	125,32	30,30	-0,060	0,943	127,74
7,04	125,51	30,50	-0,061	0,948	128,45
6,90	125,62	30,00	-0,060	0,945	128,29
6,95	125,26	49,40	-0,099	0,928	130,68
7,05	124,92	49,70	-0,100	0,942	132,09
7,05	124,96	49,70	-0,100	0,941	131,93
6,95	125,05	49,80	-0,100	0,940	132,09
7,14	150,15	15,40	-0,030	0,908	142,71
6,90	150,24	14,30	-0,028	0,902	141,85
6,90	149,97	14,70	-0,028	0,905	142,20
7,14	150,28	30,10	-0,060	0,908	147,47
7,14	150,16	30,40	-0,061	0,909	147,64

Tabelle A4-2: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 50 mit poröser Beschichtung 1

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
6,99	150,38	30,20	-0,060	0,908	147,79
7,04	150,21	29,80	-0,060	0,909	147,59
6,95	150,32	49,80	-0,100	0,901	152,85
7,00	149,66	50,40	-0,102	0,900	152,15
6,95	149,98	49,40	-0,099	0,899	152,03
7,05	149,79	49,30	-0,099	0,901	151,95
7,00	175,13	14,90	-0,029	0,867	159,17
7,09	175,10	15,10	-0,030	0,870	159,70
7,09	175,37	15,40	-0,030	0,867	159,58
6,95	175,09	14,90	-0,029	0,868	159,46
7,04	175,39	29,50	-0,059	0,871	165,49
7,18	174,75	29,70	-0,060	0,877	165,85
7,05	175,38	50,00	-0,101	0,856	170,17
6,95	174,69	49,40	-0,099	0,863	170,66
6,95	175,22	49,40	-0,099	0,864	171,47
7,14	175,31	49,90	-0,101	0,862	170,97

Tabelle A4-3: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 50 mit poröser Beschichtung 2

(d_p = 60-80 µm, δ = 300 µm, ε = 60-75 %)

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
1,10	24,72	15,00	-0,028	0,821	23,62
1,10	24,68	15,00	-0,028	0,813	23,35
1,29	24,14	15,20	-0,029	0,843	23,57

Tabelle A4-3: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 50 mit poröser Beschichtung 2

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
1,15	24,48	15,20	-0,029	0,823	23,42
1,15	24,85	30,20	-0,057	0,813	24,28
1,15	24,68	30,20	-0,057	0,813	24,12
1,10	24,72	29,70	-0,056	0,804	23,91
1,15	24,75	30,60	-0,057	0,801	23,87
1,04	24,78	50,20	-0,093	0,780	24,39
1,04	24,47	49,90	-0,093	0,773	23,88
1,04	24,54	50,20	-0,093	0,787	24,34
1,04	24,79	49,90	-0,093	0,777	24,31
1,15	50,11	15,20	-0,029	0,688	40,34
1,15	49,95	15,20	-0,029	0,684	40,01
1,15	50,18	15,20	-0,029	0,688	40,43
1,15	50,01	15,20	-0,029	0,675	39,55
1,15	50,36	30,20	-0,057	0,675	41,39
1,15	50,39	30,20	-0,057	0,667	40,98
1,10	50,40	29,70	-0,056	0,666	40,93
0,96	49,72	25,80	-0,047	0,676	40,68
1,09	50,12	50,20	-0,094	0,651	41,98
1,09	50,14	50,20	-0,094	0,656	42,28
1,09	49,54	50,20	-0,094	0,660	42,02
1,09	50,20	50,50	-0,094	0,651	42,08
1,15	75,41	15,20	-0,029	0,574	51,09
1,15	75,16	15,50	-0,029	0,573	50,87
1,15	75,26	15,50	-0,029	0,575	51,13
1,15	75,08	15,20	-0,029	0,574	50,85

Tabelle A4-3: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 50 mit poröser Beschichtung 2

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
1,14	75,33	30,10	-0,056	0,570	53,00
1,14	75,33	29,80	-0,056	0,569	52,89
1,14	74,93	30,10	-0,056	0,567	52,53
1,14	75,23	30,10	-0,056	0,563	52,41
1,14	75,33	50,40	-0,094	0,561	55,44
1,14	75,47	50,00	-0,094	0,552	54,72
1,09	75,23	49,50	-0,092	0,565	55,62
1,09	75,46	49,90	-0,093	0,552	54,82
1,15	99,98	15,20	-0,029	0,504	59,85
1,15	100,03	15,20	-0,029	0,504	59,85
1,15	99,98	15,20	-0,029	0,504	59,85
1,15	100,15	15,20	-0,029	0,504	59,94
1,09	99,84	29,80	-0,056	0,500	62,45
1,09	100,01	30,10	-0,056	0,500	62,56
1,09	100,05	30,10	-0,056	0,500	62,68
1,14	100,18	30,30	-0,057	0,492	61,76
1,14	99,83	50,10	-0,094	0,493	65,85
1,19	100,36	50,60	-0,095	0,487	65,56
1,19	99,98	50,30	-0,094	0,490	65,61
1,19	100,01	50,30	-0,094	0,491	65,72
1,15	125,30	15,50	-0,029	0,462	69,15
1,15	125,48	15,20	-0,029	0,460	68,92
1,20	124,82	15,30	-0,029	0,460	68,51
1,15	125,31	14,90	-0,028	0,461	68,84
1,09	124,90	29,50	-0,055	0,465	73,14

Tabelle A4-3: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 50 mit poröser Beschichtung 2

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
1,09	125,00	29,80	-0,056	0,460	72,57
1,09	125,20	29,80	-0,056	0,459	72,48
1,14	125,08	30,00	-0,056	0,461	72,69
1,14	125,03	50,40	-0,094	0,456	77,31
1,14	125,25	50,40	-0,094	0,455	77,34
1,14	124,62	49,80	-0,093	0,458	77,14
1,14	125,22	50,10	-0,094	0,455	77,20
1,15	150,46	14,90	-0,028	0,430	77,47
1,15	150,43	15,20	-0,029	0,429	77,36
1,15	150,15	14,90	-0,028	0,431	77,41
1,20	149,82	15,30	-0,029	0,428	76,80
1,14	149,75	30,30	-0,057	0,434	82,55
1,09	150,02	29,50	-0,055	0,431	82,03
1,14	149,95	30,30	-0,057	0,432	82,43
1,14	149,99	30,00	-0,056	0,431	82,07
1,14	149,97	50,10	-0,094	0,435	89,16
1,14	150,42	50,40	-0,094	0,431	88,80
1,14	150,03	50,10	-0,094	0,427	87,80
1,14	150,26	49,50	-0,092	0,431	88,41
1,15	174,68	14,90	-0,028	0,416	87,21
1,20	174,88	15,30	-0,029	0,411	86,25
1,20	175,04	15,30	-0,029	0,409	85,96
1,15	174,94	14,90	-0,028	0,415	87,11
1,14	175,04	30,30	-0,057	0,420	93,88
1,14	174,96	30,30	-0,057	0,423	94,36

Tabelle A4-3: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 50 mit poröser Beschichtung 2

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
1,14	175,04	30,30	-0,057	0,421	93,95
1,14	175,01	30,00	-0,056	0,421	93,85
1,14	175,33	49,80	-0,093	0,419	100,86
1,19	175,35	49,90	-0,094	0,421	101,21
1,19	175,09	50,20	-0,094	0,418	100,67
1,19	175,07	50,20	-0,094	0,417	100,49
4,00	24,94	15,10	-0,026	0,858	23,83
4,00	24,96	15,10	-0,026	0,841	23,41
4,05	25,02	14,90	-0,026	0,859	23,90
4,00	25,09	14,80	-0,026	0,845	23,60
4,05	25,27	30,50	-0,056	0,838	24,40
4,05	25,34	30,10	-0,056	0,840	24,51
4,00	25,15	30,00	-0,056	0,840	24,35
4,00	25,46	29,70	-0,055	0,840	24,63
4,04	25,32	50,30	-0,095	0,837	25,49
3,99	25,29	49,90	-0,094	0,833	25,36
4,04	25,41	50,00	-0,095	0,830	25,39
3,99	25,41	50,20	-0,095	0,819	25,10
4,00	50,08	15,50	-0,027	0,882	49,20
4,05	50,13	15,20	-0,026	0,877	48,90
3,96	49,96	15,00	-0,026	0,875	48,67
3,91	50,03	14,90	-0,026	0,874	48,74
4,00	50,00	29,70	-0,055	0,856	49,24
4,05	50,17	30,10	-0,056	0,857	49,44
4,00	50,31	30,00	-0,056	0,858	49,67

Tabelle A4-3: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 50 mit poröser Beschichtung 2

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
4,05	50,30	30,10	-0,056	0,857	49,61
4,04	50,00	50,30	-0,095	0,843	50,69
4,08	50,26	50,40	-0,095	0,832	50,31
3,99	50,37	49,50	-0,094	0,821	49,81
4,08	49,94	50,40	-0,095	0,832	50,00
3,82	74,97	15,40	-0,027	0,814	68,32
3,86	75,10	15,50	-0,028	0,808	67,93
3,82	74,56	16,00	-0,028	0,808	67,55
3,96	75,07	15,00	-0,026	0,816	68,40
4,00	75,09	29,70	-0,055	0,809	70,10
4,10	75,13	30,20	-0,056	0,805	69,79
4,10	75,45	30,20	-0,056	0,807	70,23
4,05	75,74	30,10	-0,056	0,799	69,91
4,04	74,98	50,30	-0,095	0,784	71,22
3,94	75,12	49,80	-0,094	0,782	71,18
3,99	75,21	49,90	-0,094	0,775	70,70
3,99	74,89	49,90	-0,094	0,779	70,73
4,01	100,16	15,10	-0,026	0,762	85,33
4,01	100,31	15,10	-0,026	0,761	85,33
3,96	100,23	15,40	-0,027	0,764	85,78
3,86	100,49	15,10	-0,026	0,757	85,30
3,99	100,30	30,50	-0,056	0,754	87,90
3,94	100,33	30,10	-0,056	0,754	87,92
3,94	100,11	30,40	-0,056	0,755	87,83
3,99	100,11	30,20	-0,056	0,757	88,01

Tabelle A4-3: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 50 mit poröser Beschichtung 2

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
4,04	100,23	50,30	-0,095	0,744	90,84
4,04	99,86	50,00	-0,094	0,740	90,03
4,08	100,57	50,10	-0,095	0,740	90,66
4,08	100,46	50,10	-0,095	0,740	90,52
3,91	125,13	15,30	-0,027	0,722	101,44
3,91	124,32	15,30	-0,027	0,721	100,68
3,86	124,79	15,10	-0,026	0,717	100,53
3,86	124,96	15,10	-0,026	0,714	100,25
3,99	125,16	30,50	-0,056	0,724	105,57
4,03	124,78	30,60	-0,057	0,721	104,84
3,99	124,20	30,50	-0,056	0,720	104,29
3,89	124,50	29,70	-0,055	0,718	104,25
3,94	125,13	50,40	-0,095	0,720	110,42
3,94	125,16	49,80	-0,094	0,721	110,32
3,99	125,23	50,50	-0,095	0,715	109,69
3,89	125,43	50,00	-0,094	0,716	110,13
3,91	150,10	15,20	-0,027	0,669	113,05
3,91	150,19	15,20	-0,027	0,670	113,30
3,91	150,10	15,60	-0,027	0,669	113,19
3,81	150,08	15,30	-0,027	0,670	113,34
3,94	150,41	30,40	-0,056	0,678	119,46
3,89	150,27	30,00	-0,055	0,678	119,37
3,89	150,26	30,30	-0,056	0,677	119,25
4,04	150,01	30,60	-0,057	0,677	118,90
3,99	150,14	50,20	-0,095	0,684	126,39

Tabelle A4-3: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 50 mit poröser Beschichtung 2

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
3,99	150,27	49,90	-0,094	0,684	126,45
4,04	150,40	50,30	-0,095	0,687	127,04
3,94	150,15	49,80	-0,094	0,684	126,39
4,10	174,24	15,30	-0,027	0,654	128,06
3,86	175,53	15,40	-0,027	0,645	127,73
3,91	174,99	14,90	-0,026	0,647	127,37
3,96	175,39	14,70	-0,025	0,645	127,24
3,99	174,94	30,20	-0,056	0,649	133,24
4,04	174,77	30,30	-0,056	0,648	132,86
3,99	175,16	30,50	-0,057	0,650	133,73
3,89	174,81	30,00	-0,056	0,648	133,12
4,03	175,20	50,00	-0,094	0,654	141,63
3,99	175,36	49,90	-0,094	0,654	141,85
4,03	174,92	50,00	-0,094	0,655	141,63
4,03	175,45	50,30	-0,095	0,655	142,19
6,86	24,57	15,70	-0,030	0,918	23,95
7,00	24,43	14,90	-0,029	0,934	24,16
7,00	24,53	14,90	-0,029	0,922	23,67
7,00	24,49	15,30	-0,030	0,904	23,22
6,90	24,63	30,00	-0,060	0,901	24,31
6,95	24,77	30,30	-0,060	0,914	24,78
6,90	24,45	30,30	-0,060	0,908	24,05
7,00	24,64	30,20	-0,060	0,915	24,68
6,96	25,00	50,40	-0,101	0,921	26,24
7,00	24,73	50,00	-0,101	0,900	25,40

Tabelle A4-3: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 50 mit poröser Beschichtung 2

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
7,05	24,80	50,30	-0,102	0,908	25,67
7,05	25,03	50,60	-0,102	0,900	25,74
7,00	49,59	15,30	-0,030	0,937	49,21
6,96	49,61	15,30	-0,030	0,951	49,40
6,96	49,50	15,30	-0,030	0,955	50,06
6,96	49,87	15,60	-0,030	0,949	50,15
7,04	49,43	30,20	-0,060	0,954	51,45
7,00	49,57	30,20	-0,060	0,947	51,23
6,95	49,62	30,00	-0,060	0,957	51,23
7,00	49,60	30,60	-0,061	0,941	51,02
7,00	49,57	49,70	-0,100	0,929	52,34
6,91	49,34	49,50	-0,099	0,935	52,45
7,05	49,75	49,70	-0,100	0,934	52,80
7,05	49,43	50,30	-0,102	0,929	52,24
6,91	75,03	15,00	-0,029	0,982	75,29
7,00	75,03	15,30	-0,030	0,988	75,74
7,00	75,10	15,30	-0,030	0,986	75,69
6,96	75,15	15,00	-0,029	0,978	75,14
7,10	75,11	30,10	-0,060	0,997	78,68
7,00	74,94	29,90	-0,060	0,989	77,92
7,10	75,29	29,80	-0,060	0,985	77,92
6,95	75,26	29,60	-0,059	0,982	77,78
6,90	74,48	50,10	-0,101	0,951	77,77
6,90	75,10	50,40	-0,101	0,964	79,43
6,90	75,41	50,40	-0,101	0,952	78,87

Tabelle A4-3: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 50 mit poröser Beschichtung 2

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
6,86	75,17	50,20	-0,101	0,962	79,34
6,98	100,38	14,80	-0,029	0,996	102,09
7,03	100,31	15,10	-0,029	0,997	102,10
7,03	100,23	15,10	-0,029	0,999	102,25
7,03	99,99	14,80	-0,029	0,999	101,87
6,96	100,33	32,60	-0,065	0,969	102,98
7,00	100,57	33,50	-0,067	0,961	102,53
6,96	100,27	32,60	-0,065	0,966	102,57
6,95	100,39	50,10	-0,101	0,964	106,13
6,90	100,28	49,80	-0,100	0,965	106,07
6,90	100,29	50,10	-0,101	0,965	106,13
6,90	100,30	50,10	-0,101	0,965	106,11
6,95	124,93	15,60	-0,030	0,952	121,78
7,10	124,61	14,80	-0,029	0,953	121,20
6,95	124,96	14,60	-0,028	0,951	121,45
6,96	125,29	15,00	-0,029	0,948	121,47
7,00	125,02	33,20	-0,066	0,935	124,19
7,05	125,43	33,10	-0,066	0,933	124,23
6,91	125,18	32,30	-0,064	0,933	124,01
6,96	125,34	32,60	-0,065	0,927	123,44
7,00	127,25	50,70	-0,102	0,935	130,91
7,00	125,34	50,00	-0,101	0,941	129,50
7,05	125,07	50,00	-0,101	0,943	129,44
7,00	125,14	50,40	-0,101	0,944	129,76
6,95	150,31	15,30	-0,030	0,907	139,66

Tabelle A4-3: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 50 mit poröser Beschichtung 2

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
6,95	150,00	15,30	-0,030	0,908	139,59
6,95	150,02	15,00	-0,029	0,906	139,16
6,95	150,00	15,30	-0,030	0,907	139,41
6,48	150,75	29,40	-0,058	0,892	142,86
6,91	149,89	31,30	-0,062	0,899	143,03
6,96	149,83	32,30	-0,064	0,896	142,86
7,00	149,91	33,20	-0,066	0,894	142,78
7,05	150,16	50,30	-0,101	0,896	148,51
6,95	149,75	50,10	-0,101	0,900	148,75
7,14	150,35	49,90	-0,101	0,898	148,68
6,95	150,39	49,40	-0,099	0,896	148,62
7,00	175,14	19,50	-0,038	0,842	152,98
6,81	175,03	18,10	-0,035	0,842	152,63
7,00	175,10	18,50	-0,036	0,845	153,11
7,05	175,27	19,40	-0,038	0,844	153,22
7,00	175,14	32,80	-0,066	0,850	159,06
6,86	175,14	32,30	-0,064	0,853	159,60
6,95	174,84	33,20	-0,066	0,854	159,77
6,95	174,84	33,20	-0,066	0,855	159,89
6,95	175,32	52,30	-0,105	0,856	167,24
7,05	175,29	52,30	-0,105	0,854	166,67
6,91	175,04	52,40	-0,105	0,856	167,03
6,95	175,27	52,30	-0,105	0,854	166,92

A5: Experimentelle Daten der kritischen Wärmestromdichte bei Aufwärtsströmung (*L/D* = 14,1, gleichförmige Beheizung)

Tabelle A5-1: CHF-Daten an der glatten Testsektion *L/D* = 14,1

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
1,28	24,36	17,20	-0,033	0,792	79,65
1,19	24,05	15,10	-0,029	0,809	80,13
1,14	24,87	14,00	-0,026	0,795	81,40
1,23	25,00	30,90	-0,058	0,752	80,44
1,19	24,73	30,10	-0,057	0,751	79,41
1,19	24,14	29,80	-0,056	0,779	80,13
1,43	24,53	49,90	-0,095	0,725	79,42
1,28	25,50	48,20	-0,091	0,694	79,40
1,43	24,93	49,90	-0,095	0,680	79,27
1,43	24,89	49,90	-0,095	0,647	78,90
1,14	50,49	14,40	-0,027	0,609	127,82
1,24	50,02	16,00	-0,030	0,583	121,76
1,19	49,83	14,90	-0,028	0,622	128,93
1,14	49,98	29,80	-0,056	0,560	122,55
1,24	50,39	30,40	-0,057	0,574	126,41
1,19	49,37	29,90	-0,056	0,571	123,25
1,19	49,77	49,70	-0,093	0,453	108,06
1,14	50,58	49,20	-0,092	0,456	110,47
1,19	49,73	50,00	-0,094	0,462	109,83
1,19	51,29	50,30	-0,094	0,448	110,57
1,24	99,22	15,45	-0,029	0,104	162,94
1,19	99,92	14,96	-0,028	0,102	160,30

Tabelle A5-1: CHF-Daten an der glatten Testsektion *L/D* = 14,1

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
1,28	100,67	15,48	-0,029	0,103	163,71
1,19	100,38	30,50	-0,057	0,121	161,76
1,28	99,46	30,10	-0,057	0,126	163,80
1,19	100,16	29,50	-0,056	0,220	162,21
1,28	100,35	49,50	-0,093	0,123	153,73
1,24	99,97	49,40	-0,093	0,125	154,83
1,28	99,95	48,50	-0,091	0,034	153,61
1,20	201,82	15,20	-0,029	0,047	187,58
1,20	200,18	15,80	-0,030	0,047	189,00
1,24	200,38	16,15	-0,030	0,045	187,21
1,20	199,40	30,40	-0,057	0,047	187,71
1,24	199,13	30,10	-0,057	0,019	185,03
1,24	200,44	30,50	-0,058	0,045	185,39
1,24	198,93	30,50	-0,058	0,047	187,95
1,24	199,54	50,20	-0,094	0,062	183,22
1,19	200,29	50,10	-0,094	0,060	181,30
1,24	198,01	49,60	-0,093	0,036	182,38
1,24	304,48	15,40	-0,029	0,050	217,67
1,29	300,55	16,80	-0,032	0,070	218,19
1,24	301,36	16,40	-0,031	0,047	213,36
1,29	300,58	30,80	-0,058	0,019	208,33
1,15	299,98	27,60	-0,052	0,026	209,61
1,24	298,29	29,80	-0,056	0,021	207,30
1,29	299,76	50,90	-0,096	0,019	202,23
1,29	299,87	50,60	-0,095	0,003	209,74

Tabelle A5-1: CHF-Daten an der glatten Testsektion *L/D* = 14,1

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
1,24	301,56	49,60	-0,093	0,002	206,03
1,24	300,60	49,90	-0,094	0,004	208,72
3,86	50,78	15,97	-0,028	0,959	192,42
3,77	49,97	14,90	-0,026	1,000	203,41
4,01	50,51	15,50	-0,027	0,978	194,42
3,82	49,62	15,70	-0,028	1,000	196,97
4,05	49,96	29,80	-0,055	0,986	199,03
4,20	50,42	29,80	-0,055	0,985	200,31
4,15	49,94	29,70	-0,055	1,000	201,25
4,10	49,80	29,90	-0,055	1,000	210,57
4,01	50,44	51,94	-0,099	1,000	210,52
4,01	49,43	50,54	-0,094	1,000	209,30
3,86	50,34	50,47	-0,094	1,000	211,78
4,05	49,53	50,60	-0,094	1,000	209,10
3,95	99,46	15,60	-0,027	0,437	316,75
3,86	100,87	14,80	-0,026	0,334	316,26
3,95	99,48	15,60	-0,027	0,440	318,70
3,90	99,37	31,70	-0,059	0,299	309,71
3,76	99,37	30,70	-0,057	0,405	315,34
3,90	99,67	30,80	-0,057	0,399	312,06
3,91	101,34	49,73	-0,092	0,683	301,78
3,91	100,71	49,33	-0,092	0,680	298,57
4,05	100,53	51,00	-0,095	0,665	293,02
3,90	199,20	15,64	-0,025	0,120	348,13
3,95	201,99	16,10	-0,026	0,119	353,69

Tabelle A5-1: CHF-Daten an der glatten Testsektion *L/D* = 14,1

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
3,90	200,15	16,04	-0,026	0,120	352,11
3,86	200,41	29,70	-0,055	0,099	367,16
4,00	200,52	30,30	-0,056	0,100	370,73
3,95	199,93	30,50	-0,057	0,259	357,00
4,00	201,00	49,70	-0,094	-0,001	350,99
4,00	200,87	50,30	-0,095	-0,002	348,53
4,00	199,23	49,70	-0,094	0,170	360,21
4,05	199,40	50,10	-0,095	0,380	361,89
3,90	294,81	17,34	-0,028	0,129	409,15
3,86	299,29	14,97	-0,024	0,090	412,68
4,00	300,39	15,65	-0,025	0,135	423,94
4,10	299,82	30,20	-0,056	0,018	414,93
4,00	301,08	29,70	-0,055	0,100	406,30
4,00	301,18	29,70	-0,055	0,063	420,57
4,05	301,97	50,10	-0,095	0,141	402,19
3,95	300,77	49,50	-0,094	0,149	412,40
4,10	300,56	50,20	-0,095	0,151	417,82
6,86	25,34	15,20	-0,029	0,995	95,59
7,00	24,90	15,00	-0,029	0,999	94,14
7,00	25,40	14,60	-0,028	0,947	91,07
7,00	24,94	29,30	-0,058	0,944	91,99
7,05	25,56	29,60	-0,059	0,952	95,00
6,96	25,13	29,70	-0,059	0,964	94,57
6,91	25,07	50,10	-0,101	0,930	95,17
6,91	25,08	50,10	-0,101	0,924	94,65

Tabelle A5-1: CHF-Daten an der glatten Testsektion *L/D* = 14,1

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
7,00	25,40	50,00	-0,101	0,925	95,78
7,10	50,43	15,50	-0,030	1,000	197,08
7,05	49,79	14,90	-0,029	1,000	196,46
6,90	50,16	15,30	-0,030	1,000	193,36
7,00	50,70	30,60	-0,061	0,965	191,26
7,00	49,96	30,30	-0,060	1,000	196,22
7,00	50,43	30,30	-0,060	0,964	190,03
7,00	50,48	49,40	-0,100	0,910	187,35
7,10	50,30	50,85	-0,100	0,946	193,78
6,96	50,10	50,15	-0,100	0,954	194,53
7,04	100,12	15,61	-0,030	0,722	276,91
6,90	100,11	15,30	-0,030	0,732	280,68
7,00	100,25	15,20	-0,030	0,711	273,13
6,86	99,30	30,10	-0,060	0,767	302,37
6,86	99,89	30,40	-0,060	0,796	315,00
7,05	99,08	30,80	-0,062	0,803	315,01
7,10	100,38	50,30	-0,102	0,731	307,16
6,95	100,81	50,70	-0,102	0,739	312,18
7,05	100,75	50,60	-0,102	0,763	320,39
6,94	199,92	14,60	-0,028	0,084	403,65
6,94	201,21	15,90	-0,031	0,080	401,02
6,90	200,74	15,30	-0,030	0,079	391,58
7,04	199,28	15,50	-0,030	0,081	399,54
6,90	198,72	30,00	-0,060	0,056	414,41
6,99	200,88	30,80	-0,062	0,053	413,50

Tabelle A5-1: CHF-Daten an der glatten Testsektion *L/D* = 14,1

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
7,09	198,33	31,29	-0,062	0,052	406,74
6,94	200,14	45,50	-0,091	0,025	418,92
6,99	201,39	50,30	-0,101	0,015	421,75
7,04	199,62	52,20	-0,105	0,009	410,80
7,13	199,95	52,10	-0,105	0,014	428,62
6,99	299,77	14,50	-0,028	0,095	419,29
7,04	302,73	14,50	-0,028	0,090	406,81
6,90	299,97	14,00	-0,027	0,092	408,26
7,09	298,11	29,10	-0,058	0,080	468,13
6,90	299,90	28,70	-0,057	0,080	470,05
6,94	299,10	29,30	-0,058	0,079	467,16
6,94	299,77	45,50	-0,091	0,043	458,13
6,99	299,97	50,30	-0,101	0,036	469,05
7,04	299,90	52,20	-0,105	0,032	469,07

Tabelle A5-2: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 14,1 mit poröser Beschichtung 1 (d_p = 30-40 µm, δ = 300 µm, ε = 60-75 %)

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
1,14	24,10	15,10	-0,028	0,810	80,49
1,19	24,67	15,50	-0,029	0,787	80,08
1,19	25,03	15,50	-0,029	0,778	80,33
1,19	25,15	30,50	-0,057	0,760	81,79
1,14	25,01	29,70	-0,056	0,783	83,50

Tabelle A5-2: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 14,1 mit poröser Beschichtung 1

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
1,14	24,72	29,70	-0,056	0,790	83,26
1,19	24,28	30,80	-0,058	0,827	83,58
1,15	26,02	49,70	-0,093	0,700	82,11
1,20	25,09	50,10	-0,094	0,715	80,65
1,20	24,86	49,50	-0,093	0,759	84,24
1,24	25,27	50,90	-0,096	0,739	83,76
1,19	49,75	15,20	-0,029	0,592	122,73
1,19	49,65	15,20	-0,029	0,593	122,84
1,19	49,75	15,20	-0,029	0,592	122,73
1,29	50,09	30,40	-0,058	0,565	123,74
1,24	49,75	30,00	-0,057	0,575	124,74
1,14	50,75	29,40	-0,055	0,562	124,73
1,24	50,24	29,40	-0,055	0,578	123,64
1,15	49,24	50,00	-0,093	0,554	126,85
1,15	49,69	49,60	-0,093	0,550	127,26
1,24	49,32	51,20	-0,096	0,545	125,64
1,20	48,81	50,70	-0,095	0,576	127,36
1,19	99,44	14,60	-0,028	0,468	196,10
1,24	98,86	15,40	-0,029	0,468	195,34
1,24	99,23	15,40	-0,029	0,469	196,35
1,24	98,10	15,70	-0,030	0,498	195,59
1,09	101,03	30,80	-0,057	0,454	206,29
1,19	99,92	30,20	-0,057	0,455	203,34
1,24	99,98	29,70	-0,056	0,454	202,57
1,19	100,94	50,40	-0,094	0,433	211,75

Tabelle A5-2: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 14,1 mit poröser Beschichtung 1

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
1,19	100,20	49,40	-0,093	0,457	219,01
1,19	100,96	51,00	-0,096	0,451	219,35
1,29	201,10	16,00	-0,031	0,294	258,84
1,10	199,63	11,40	-0,021	0,304	258,70
1,19	201,39	16,20	-0,031	0,301	265,98
1,24	199,23	28,80	-0,054	0,329	303,56
1,33	201,15	31,80	-0,060	0,317	300,59
1,29	200,19	30,80	-0,058	0,323	303,10
1,29	199,15	49,30	-0,093	0,320	326,21
1,29	200,50	49,90	-0,094	0,319	328,32
1,33	200,53	50,00	-0,094	0,323	331,58
1,24	301,77	14,85	-0,028	0,108	369,32
1,29	300,93	16,00	-0,030	0,106	370,16
1,19	298,45	14,96	-0,028	0,147	371,71
1,24	298,60	28,80	-0,054	0,082	368,04
1,24	299,35	29,10	-0,055	0,083	371,32
1,29	300,95	30,50	-0,058	0,076	361,85
1,19	300,42	49,10	-0,092	-0,032	352,51
1,19	300,94	49,10	-0,092	-0,066	356,92
1,24	299,95	49,80	-0,094	-0,032	357,76
3,86	49,95	15,70	-0,028	0,896	176,97
3,90	50,13	15,28	-0,027	0,899	178,06
3,95	50,05	16,25	-0,029	0,906	179,29
3,90	50,33	30,84	-0,057	0,896	183,99
3,86	50,08	30,47	-0,056	0,903	184,41

Tabelle A5-2: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 14,1 mit poröser Beschichtung 1

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
4,05	50,06	31,60	-0,058	0,897	183,16
4,00	51,20	50,85	-0,098	0,916	198,44
4,00	49,83	50,75	-0,096	0,939	197,43
3,95	50,94	50,70	-0,096	0,940	202,21
4,00	49,18	51,45	-0,098	0,933	194,13
3,81	99,43	16,30	-0,029	0,752	298,27
4,10	99,94	17,90	-0,032	0,758	302,01
3,90	101,17	16,80	-0,030	0,743	299,98
4,00	99,31	31,90	-0,059	0,757	310,50
4,00	100,84	31,90	-0,059	0,750	312,56
3,95	100,10	30,90	-0,057	0,750	309,86
3,86	101,69	49,60	-0,094	0,777	339,79
3,95	100,06	50,20	-0,095	0,760	327,98
3,90	99,65	50,40	-0,095	0,752	323,95
3,90	99,70	49,80	-0,094	0,759	326,05
3,86	199,04	16,40	-0,029	0,495	399,92
3,95	200,63	16,30	-0,029	0,491	399,38
3,95	199,20	16,60	-0,029	0,487	394,37
3,95	203,33	31,70	-0,059	0,539	465,60
4,10	204,55	31,54	-0,059	0,526	457,16
3,90	200,03	30,54	-0,056	0,537	455,66
3,95	299,81	17,20	-0,031	0,005	465,48
4,00	299,73	16,70	-0,029	0,005	457,76
4,00	299,59	16,40	-0,029	0,006	464,71
6,86	25,42	15,76	-0,030	1,000	102,38

Tabelle A5-2: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 14,1 mit poröser Beschichtung 1

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
6,95	25,43	16,60	-0,032	1,000	103,37
6,90	25,66	15,70	-0,030	0,999	102,01
6,90	25,04	32,00	-0,064	0,987	102,46
6,95	25,55	30,30	-0,060	0,988	103,19
7,00	25,78	30,20	-0,060	0,991	104,20
6,90	25,95	51,10	-0,103	0,971	103,83
7,09	25,65	51,20	-0,103	0,975	104,78
6,95	25,68	51,40	-0,103	0,973	104,71
6,95	51,83	13,30	-0,026	1,000	202,71
6,90	49,68	16,30	-0,032	1,000	191,36
6,71	49,33	15,20	-0,029	1,000	190,37
6,95	49,25	29,00	-0,058	1,000	194,74
7,05	50,04	30,80	-0,062	0,999	201,82
6,90	50,48	31,60	-0,063	1,000	201,68
6,86	50,16	51,10	-0,103	1,000	206,18
6,90	49,96	50,40	-0,101	0,990	204,50
6,95	49,80	50,10	-0,101	0,992	202,20
6,66	98,88	16,20	-0,031	0,920	347,15
6,90	98,41	16,60	-0,032	0,924	346,48
6,76	99,30	15,50	-0,030	0,928	350,85
6,52	100,09	29,00	-0,057	0,941	369,43
7,05	99,44	32,50	-0,065	0,931	364,27
6,38	98,21	30,40	-0,059	0,932	360,85
6,95	99,57	51,00	-0,103	0,943	383,03
6,90	99,84	50,80	-0,102	0,938	382,33

Tabelle A5-2: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 14,1 mit poröser Beschichtung 1

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
6,95	99,24	50,70	-0,102	0,941	380,76

Tabelle A5-3: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 14,1 mit poröser Beschichtung 2
(d_p = 60-80 µm, δ = 300 µm, ε = 60-75 %)

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
1,28	25,11	15,30	-0,029	0,872	89,76
1,28	24,64	14,70	-0,028	0,871	87,86
1,19	25,20	12,30	-0,023	0,853	87,77
1,33	25,18	15,70	-0,030	0,848	87,60
1,28	25,38	30,40	-0,058	0,853	91,62
1,33	24,68	30,80	-0,058	0,860	89,75
1,28	25,44	29,80	-0,056	0,842	90,69
1,19	25,60	49,30	-0,092	0,829	93,80
1,19	24,90	48,70	-0,091	0,828	91,02
1,28	25,35	50,20	-0,095	0,824	92,35
1,30	50,01	15,00	-0,029	0,774	159,18
1,30	50,24	15,00	-0,029	0,777	160,56
1,25	49,99	14,30	-0,027	0,785	161,23
1,35	49,84	30,10	-0,057	0,792	167,67
1,30	50,35	29,80	-0,056	0,779	166,84
1,35	50,06	30,40	-0,058	0,783	166,71
1,30	49,59	49,80	-0,094	0,789	173,58
1,25	50,51	49,40	-0,093	0,782	175,50

Tabelle A5-3: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 14,1 mit poröser Beschichtung 2

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
1,35	49,87	50,90	-0,096	0,779	172,87
1,24	99,86	14,60	-0,028	0,296	229,99
1,33	99,12	14,80	-0,028	0,299	229,99
1,33	99,50	14,80	-0,028	0,294	227,37
1,33	100,01	30,10	-0,057	0,269	231,00
1,14	99,82	28,10	-0,053	0,268	228,07
1,33	99,60	29,50	-0,056	0,270	230,12
1,19	99,82	49,60	-0,093	0,226	226,43
1,19	100,32	49,60	-0,093	0,215	219,65
1,24	100,74	49,40	-0,093	0,218	222,20
1,23	199,03	14,70	-0,028	0,146	246,43
1,28	201,39	15,10	-0,029	0,149	253,75
1,23	199,96	15,10	-0,029	0,110	250,44
1,28	201,01	30,50	-0,058	0,116	247,39
1,18	200,53	30,00	-0,056	0,118	248,40
1,28	200,52	30,50	-0,058	0,113	242,56
1,23	199,92	31,40	-0,059	0,116	249,55
1,28	200,56	50,28	-0,094	0,077	244,72
1,28	200,51	50,28	-0,094	0,079	246,71
1,23	200,79	50,42	-0,094	0,077	244,82
1,28	199,61	49,68	-0,093	0,081	247,73
1,34	301,06	15,30	-0,029	0,089	318,72
1,25	299,30	15,30	-0,029	0,085	306,50
1,34	300,03	15,00	-0,029	0,089	317,24
1,49	300,60	18,20	-0,035	0,083	316,28

Tabelle A5-3: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 14,1 mit poröser Beschichtung 2

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
1,24	300,18	30,80	-0,058	0,055	305,84
1,29	299,79	29,90	-0,057	0,057	306,19
1,29	300,62	31,20	-0,059	0,057	314,21
1,29	301,51	51,10	-0,096	0,022	320,62
1,20	301,13	49,70	-0,093	0,023	316,38
1,29	301,87	50,50	-0,095	0,025	325,35
3,86	50,78	15,97	-0,028	0,959	192,42
3,77	49,97	14,90	-0,026	1,000	203,41
4,01	50,51	15,50	-0,027	0,978	194,42
3,82	49,62	15,70	-0,028	1,000	196,97
4,05	49,96	29,80	-0,055	0,986	199,03
4,20	50,42	29,80	-0,055	0,985	200,31
4,15	49,94	29,70	-0,055	1,000	201,25
4,10	49,80	29,90	-0,055	1,000	210,57
4,01	50,44	51,94	-0,099	1,000	214,52
4,01	49,43	50,54	-0,094	1,000	213,30
3,86	50,34	50,47	-0,094	1,000	211,78
4,05	49,53	50,60	-0,094	1,000	209,10
3,95	99,46	15,60	-0,027	0,437	316,75
3,86	100,87	14,80	-0,026	0,334	316,26
3,95	99,48	15,60	-0,027	0,440	318,70
3,90	99,37	31,70	-0,059	0,299	309,71
3,76	99,37	30,70	-0,057	0,405	315,34
3,90	99,67	30,80	-0,057	0,399	312,06
3,76	101,63	51,30	-0,097	0,335	302,08

Tabelle A5-3: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 14,1 mit poröser Beschichtung 2

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
4,00	99,09	50,90	-0,096	0,358	308,06
3,95	100,13	50,20	-0,095	0,359	311,63
4,00	201,68	15,80	-0,028	0,218	338,96
3,91	200,53	15,90	-0,028	0,222	343,83
3,96	197,53	16,00	-0,028	0,223	339,80
4,05	200,06	15,20	-0,026	0,221	339,29
4,05	199,92	30,50	-0,056	0,191	338,80
3,91	198,36	30,50	-0,056	0,192	338,64
3,86	200,73	31,60	-0,059	0,186	337,62
3,81	199,88	30,60	-0,057	0,190	338,94
4,00	199,28	50,00	-0,095	0,158	345,18
3,86	199,64	51,30	-0,097	0,150	338,96
3,91	202,85	51,10	-0,097	0,148	340,63
4,05	299,25	15,20	-0,026	0,119	378,21
3,86	299,25	16,40	-0,029	0,119	384,98
3,90	299,18	14,20	-0,025	0,124	386,23
4,00	300,13	29,00	-0,054	0,095	387,10
4,05	301,03	29,80	-0,055	0,098	400,85
3,90	301,01	30,10	-0,056	0,096	395,93
3,96	301,28	50,30	-0,095	0,057	398,85
4,06	301,80	51,40	-0,097	0,055	399,71
4,01	300,12	50,40	-0,095	0,064	416,10
6,99	24,77	14,60	-0,028	1,000	104,58
6,99	24,93	14,20	-0,028	1,000	105,86
7,04	25,04	14,50	-0,028	1,000	105,49

Tabelle A5-3: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 14,1 mit poröser Beschichtung 2

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
7,18	25,19	14,70	-0,029	1,000	106,48
6,95	25,10	31,20	-0,062	0,996	106,31
7,04	24,84	31,10	-0,062	0,994	105,22
7,04	25,91	30,50	-0,061	0,995	106,24
7,09	25,94	49,20	-0,099	0,986	108,75
7,04	25,86	49,00	-0,099	0,990	109,02
6,95	25,44	49,70	-0,100	0,991	109,31
6,95	25,58	50,40	-0,101	0,987	108,38
6,95	49,61	15,60	-0,030	1,000	195,46
6,95	49,99	15,00	-0,029	1,000	196,33
7,10	49,52	14,50	-0,028	1,000	193,18
7,05	49,63	29,20	-0,058	1,000	200,20
7,05	50,74	31,50	-0,063	1,000	202,64
6,76	50,56	30,20	-0,060	1,000	201,34
6,91	50,17	50,10	-0,101	1,000	214,36
6,96	50,52	50,40	-0,101	1,000	212,24
7,00	49,84	50,70	-0,102	1,000	211,94
6,94	101,38	14,60	-0,028	0,959	368,38
6,99	98,95	15,20	-0,030	0,983	368,54
7,04	99,75	14,80	-0,029	0,967	365,23
6,80	100,12	30,70	-0,061	0,495	366,79
6,99	100,84	30,20	-0,060	0,493	367,13
6,99	99,84	29,90	-0,060	0,502	368,71
7,08	99,50	48,60	-0,098	0,459	364,53
6,89	100,92	51,40	-0,103	0,453	369,60

Tabelle A5-3: CHF-Daten an der Testsektion *L/D* = 14,1 mit poröser Beschichtung 2

p , MPa	$\dot{m}$, kg/m^{2}s	ΔT_{Sub} , K	x_i	x_{cr}	$\dot{q}_{cr}$, W/cm^2
7,13	99,19	50,80	-0,103	0,453	362,10
7,37	100,15	49,50	-0,101	0,337	364,20
6,95	200,95	17,90	-0,035	0,274	408,69
6,90	201,94	17,30	-0,034	0,273	408,51
6,81	201,43	15,70	-0,030	0,276	406,82
7,04	200,76	17,80	-0,035	0,273	406,13
6,95	201,25	31,30	-0,062	0,250	413,85
7,00	200,00	31,50	-0,063	0,249	410,70
6,85	200,07	31,00	-0,062	0,250	410,90
6,90	199,45	30,70	-0,061	0,252	410,88
7,00	200,19	52,30	-0,105	0,208	412,17
6,95	199,83	51,70	-0,104	0,210	412,55
7,00	200,64	51,00	-0,103	0,207	408,85
6,95	200,71	51,70	-0,104	0,207	410,88
7,04	299,62	19,40	-0,038	0,139	442,24
6,95	301,42	17,90	-0,035	0,191	448,76
6,95	299,70	17,60	-0,034	0,144	446,29
6,95	301,58	34,39	-0,068	0,108	445,51
7,04	301,41	32,91	-0,065	0,113	450,84
6,90	302,35	32,51	-0,065	0,115	454,36
6,99	299,98	51,42	-0,103	0,080	458,30
6,99	300,06	50,82	-0,102	0,081	458,49
6,94	299,86	51,13	-0,103	0,078	453,69

A6: Fotos

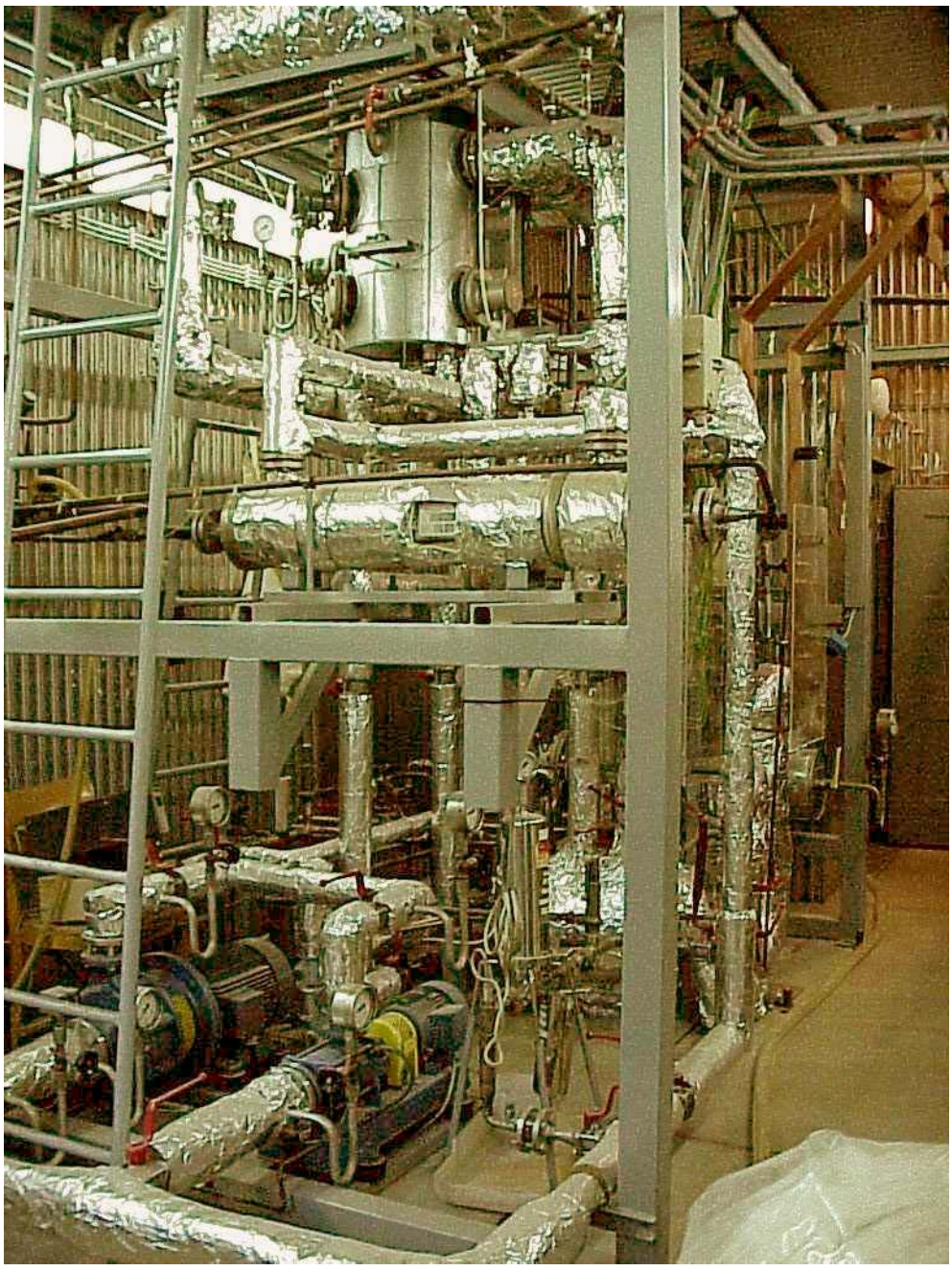


Abbildung A6.1: Versuchsanlage

Abbildung A6.2: Glatte Teststrecke L/D = 14,1

Abbildung A6.3: Teststrecke nach Burnout

LITERATURVERZEICHNIS

[1] AFGAN, N.H., JOVIC, L.A., KOVALEV, S.A., LENYKOV, V.A.: Boiling Heat Transfer from Surfaces with Porous Layers, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 28. No. 2, 415-422, 1985.

[2] ALAD'YEV, I.G., GORLOV, L.D., DODONOV, L.D. AND FEDYNSKIY, O.S.: Heat Transfer to Boiling Potassium in Uniformly Heated Tubes. Heat Transfer-Soviet Research, Vol. 1, No. 4, 14-26, 1969.

[3] ANDRIANOV, A.B., BORZENKO, V.I., MALYSHENKO, S.P.: Elementary Processes at Boiling on the Surfaces with Porous Coatings, Russ. J. Eng. Thermophys., Vol. 9, No. 1-2, 51-67, 1999.

[4] ANDRIANOV, V.V., BAEV, V.P., MALYSHENKO, S.P., MUCHNIK,R.G., PARIZH, M.B.: Composed Superconductors with Porous Coating, Institute of High Temperatures, Academy of Sciences of the USSR, Cryogenics, Vol 29, Moscow, 1989.

[5] BABARIN, V.P., SEVAST'YANOV, R.I. AND ALAD'YEV, I.T.: A Special Hydrodynamic Effect on the Boiling Crisis in Tubes, Heat Transfer-Soviet Research 1 (4), 34-41, 1969.

[6] BAEHR, H.D., STEPHAN, K.: Wärme- und Stoffübertragung, Springer-Verlag, 2004.

[7] BECKER, K.M., HERNBORG, G., BODE, M. AND ERIKSSON, O.: Burnout Data for Flow of Boiling Water in Vertical Round Ducts, Annuli and Rod Clusters, Aktiebolaget Atomenergi, AE-177, Stockholm, Sweden, 1965.

[8] BERGLES, A.E.: Enhancement of Pool Boiling, Int. J. Refrig., Vol. 20, No. 8, 545-551, 1997.

[9] BERGLES, A.E.: Heat Transfer Enhancement – the Encouragement and Accommodation of High Heat Fluxes, ASME J. of Heat Transfer, Vol. 119, 8-19, 1997.

[10] BERGLES, A.E.: Subcooled Burnout in Tubes of Small Diameter, 63-WA-182, ASME Paper, 1-9, 1963.

[11] BOYD, R.D.: Subcooled Flow Boiling Critical Heat Flux (CHF) and its Application to Fusion Energy Components, Part 1: A Review of Fundamentals of CHF and Related Database, Fusion Technology 7, 7-30, 1985.

[12] BUTTERWORTH, D., HEWITT, G.F.: Two Phase Flow and Heat Transfer, Oxford University Press, 1977.

[13] CAREY, V.: Liquid-Vapour Phase-Change Phenomena, Hemisphere, 1992.

[14] CHANG, S.H., BAEK, W.-P., BAE, T.M.: A Study of Critical Heat Flux for Low Flow of Water in Vertical Round Tubes under Low Pressure, Nuclear Engineering and Design, 132, 225-237, 1991.

[15] CLARK, J.A., ROHSENOW, W.M.: Local Boiling Heat Transfer to Water at Low Reynolds Numbers and High Pressures, NP-4112, US Atomic Energy Commission, 1952.

[16] COLLIER, J.G., THOME, J.R.: Convective Boiling and Condensation, Third Edition, Oxford University Press, 1994.

[17] DOROSCHUK, V.E., LEVITAN, L.L. AND LANTZMAN, F.P., NIGMATULIN, R.I., BOREVSKY, L.Y.: Investigations into Burnout Mechanismen in Steam-Generating Tubes, Proceedings of the 6th International Heat Transfer Conference, Hemisphere Publishing Company, New York, Vol. 1, Paper F8-21, 393-398, 1978.

[18] DOROSCHUK, V.E., LEVITAN, L.L. AND LANTZMAN, F.P.: Investigations into Burnout in Uniformly Heated Tubes, ASME-Paper, 75-WA/HT-22, 1975.

[19] DOROSCHUK, V.E.: On the Burnout Mechanism in Two-Phase Annular Flow, ASME-Paper, 73-HAT-37, 1973.

[20] GROENEVELD, D.C., CHENG, S.C., DOAN, T.: 1986 AECL-UO Critical Heat Flux Lookup Table, Heat Transfer Engineering, Vol. 7, Nos. 1-2, 46-62, 1986.

[21] GROENEVELD, D.C., LEUNG, L.K.H., KIRILLOV, P.L., BOBKOV, V.P., SMOGALEV, I.P., VINOGRADOV, V.N., HUANG, X.C., ROYER, E.: The 1995 Lookup Table for Critical Heat Flux in Tubes, Nuclear Engineering and Design 163, 1-23, 1996.

[22] HALL, D.D., MUDAWAR, I.: Critical Heat Flux (CHF) for Water Flow in Tubes-I. Compilation and Assessment of World CHF Data, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 43, 2573-2604, 2000.

[23] HEWITT, G.F., HALL-TAYLOR, N.S.: Annular Two-Phase Flow, Pergamon, 1970.

[24] HEWITT, G.F., KEARSEY, H.A., LACEY, P.M.C., PULLING, D.J.: Burnout and Film Flow in the Evaporation of Water in Tubes, AERE-R 4864, United Kingdom Atomic Energy Authority, Harwell, UK, 1965.

[25] KANDLIKAR, S.G., SHOJI, M., DHIR, V.K.: Handbook of Phase Change: Boiling and Condensation, Taylor & Francis, 1999.

[26] KATTO, Y., OHNO, H.: An Improved Version of the Generalized Correlation of Critical Heat Flux for the Forced Convective Boiling in Uniformly Heated Vertical Tubes, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 27, 1641-1648, 1984.

[27] KATTO, Y.: A Generalized Correaltion of Critical Heat Flux for the Forced Convection Boiling in Vertical Uniformly Heated Round Tubes, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 21, 1527-1542, 1978.

[28] KITTO, J.B.J.: Critical Heat Flux and the Limiting Quality Phenomenom, AIChE Symp. Ser., Heat Transfer-Orlando,Vol. 76, No. 199, 57-78, 1980.

[29] KOMENDANTOV, A.S., KUZMA-KICHTA, Y.A., VASIL'EVA, L.T., OVODKOV, A.A.: Experimental Investigation of Heat Transfer and Burnout in Conductions of Nonuniform Megawatt Heat Fluxes, Experimental Heat Transfer, Vol. 4, 281-288, 1991.

[30] KOTOV, S.A., LATOKHIN, V.Y., POLONSKII, V.S., SHISHKOV, E.V.: Burnout in Steam-Generating Channels with Porous Coatings, High Temperature, Vol. 30, 640-645, 1992.

[31] KOVALEV, S.A., SHKLOVER, E.G.: Heat Transfer in the Boiling of Water on a Porous Surface in an Annular Channel, High Temperature, Vol. 26 , 712-717, 1988.

[32] KOVALEV, S.A., SOLOV'YEV, S.L., OVODKOV, O.A.: Liquid Boiling on Porous Surfaces, Heat Transfer-Soviet Research, Vol. 19, No. 3, 1987.

[33] KUZMA-KICHTA, Y.A., BARTSCH, G., SERBINA (SCHLAPKO), O.K., SERBIN, P.V., BORISOV, S.L.: Einfluß der porösen Beschichtung auf den Wärmeübergang bei verschiedenen Siedevorgängen im senkrechten Kanal, 2. Russische Wärmeübergangs-Konferenz, Moskau, 1998.

[34] KUZMA-KICHTA, Y.A., KOMENDANTOV, A.S., BAKUNIN, V.G., BARTSCH, G., GOLDSCHMIDT, R., STEIN, M.: Enhancement of Heat Transfer at Boiling with Porous Coated Surfaces, Proceedings of the 3rd European Thermal Sciences Conference 2000, Volume 2, Heidelberg, 809-814, 2000.

[35] KUZMA-KICHTA, Y.A., KOMENDANTOV, A.S., OVODKOV, A.A., VASIL'EVA, L.T., SUKHOV, B.Y.: Effects of Flow Spiralling and a Porous Coating on Heat-Transfer Caracteristics at the Heat-Transfer Crisis in an Unevenly Heated Channel, High Temperature,Vol. 30, 635-639, 1993.

[36] KUZMA-KICHTA, Y.A., KOVALEV, S.A.: The Effect of a Porous Coating on the Characteristics of Burnout in Tubes, Thermal Engineering, Vol. 44, No. 6, 487-491, 1997.

[37] KUZMA-KICHTA, Y.A., SEDLOV, A.S., ABRAMOV, A.I., SHKONDIN, Y.A., BUYAKOV, D.V., SERBIN, P.K.: Experimental Investigation of the Heat Transfer Crisis at Low Mass Velocities and Pressures, Moscow Power Engineering Institut, Russia, 285-287, 1998.

[38] LEONT'EV, A.I., MOSTINSKII, I.L., POLONSKII, V.S., STYRIKOVICH, M.A. AND CHERNIKA, I.M.: Experimemtal Study of Heat-Transfer Burnout in Horizontal Steam-Generating Channels with a Porous Inner Lining and Circumferentially Nonuniform Heating, High Temperature, Vol. 20, 897-901, 1982.

[39] LEVITAN, L.L., LANTSMAN, F.P., DEDNEVA, E.I.: Investigation of the Influence of Tube Diameter on Burnout of the Second Kind, Thermal Engineering, Vol. 28, No. 7, 398-402, 1981.

[40] LEVITAN, L.L., LANTSMAN, F.P.: Investigating Burnout with Flow of a Steam-Water Mixture in a Round Tube, Teploenergetika, Vol. 22, No.1, 80-83, 1975.

[41] LOWDERMILK, W.H., LANZO, C.D., SIEGEL, B.L.: Investigation of Boiling Burnout and Flow Stability for Water Flowing in Tubes, Cleveland, Ohio, Lewis Flight Propulsion Lab., NASA Technical Note 4382, 1958.

[42] MACBETH, R.V.: Burnout Analysis, Part 4: Application of a Local Conditions Hypothesis to World Data for Uniformly Heated Round Tubes and Rectangular Channels, AEEW-R 267.

[43] MALYSHENKO, S.P.: Features of Heat Transfer with Boiling on Surfaces with Porous Coatings, Thermal Engineering, Vol. 38, 81-88, 1991.

[44] MALYSHENKO, S.P.: Percolation Transitions at Boiling on Porous Coated Surfaces, The Physics of Heat Transfer in Boiling and Condensation, 11-th Int. School-Seminar, Moscow, 319-333, 1997.

[45] MALYSHENKO, S.P.: The Peculiarities of Heat Transfer Crisis at Two-Phase Flows in Steam Generating Channels with Inside Porous Coatings, Russ. J. Eng. Thermophys., Vol. 9, No. 1-2, 33-50, 1999.

[46] MAYINGER, F.: Strömung und Wärmeübergang in Gas-Flüssigkeits-Gemischen, Springer-Verlag, 1982.

[47] MEL'NIKOV, V.N., BALABANOV, YE.D., KRIVOV, I.V. AND GINEV, N.N.: Experimental Study of the Effect of Ferric-Oxide Scale on the Critical Heat Flux in Forced-Convection Boiling of Water, Heat Transfer-Soviet Research, Vol. 11, No. 3, 36-39, 1979.

[48] MISHIMA, K., ISHII, M.: Flow Regime Transition Criteria for Upward Two-Phase Flow in Vertical Tubes, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 27, No. 5, 723-737, 1984.

[49] MISHIMA, K.: Boiling Burnout at Low Flow Rate and Low Pressure Conditions, Ph.D. thesis, Kyoto University, Osaka, Japan, 1984.

[50] MISHIMA, K.: Boiling Burnout at Low Flow Rate and Low Pressures Conditions, Ph. D. Thesis, Kyoto University, Japan, 1984.

[51] NUKIYAMA, S.: The Maximum and Minimum Values of the Heat Q Transmitted from Metal to Boiling Water under Atmospheric Pressure, Translation by C. J. Lee, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 9, 1419-1433, 1966, Originalarbeit von 1934.

[52] RUAN, S.: Experimentelle Untersuchung der kritischen Wärmestromdichte von aufwärts strömendem Wasser in einem senkrechten Kreisrohr bei niedrigen Drucken und niedrigen Massenstromdichten, VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 3, Nr. 351, 1994.

[53] SAVKIN, N.N., KOMANDANTOV, A.S., KUZMA-KICHTA, Y.A., BURDUNIN, M.N.: Effects of a Porous Coating on Boiling Onset in a Tube, Journal of Engineering Physics, Vol. 58, No. 5, 626-630, 1990.

[54] SAVKIN, N.N., KUZMA-KICHTA, Y.A., KOMANDANTOV, A.S.: Investigating Enhancement of Heat Transfer with Water Boiling under Conditions of Forced Flow in a Tube with a Porous Coating, Thermal Engineering, Vol. 35, No. 5, 295-296, 1988.

[55] SCHROEDER-RICHTER, D. AND BARTSCH, G.: Analytical Calculation of DNB-Superheating by a Postulated Thermo-Mechanical Effect of Nucleate Boiling, Int. J. Multiphase Flow, 20, 1143, 1994.

[56] SCHROEDER-RICHTER, D.: Ein analytischer Beitrag zur Anwendung der Thermodynamik irreversibler Prozesse auf Siedephänomene, VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 3, Nr. 251, 1991.

[57] SMIRNOV, H.F.: Heat and Mass Transfer when Boiling on Coated Surfaces an in Porous Structures, Proceedings of the 3rd European Thermal Sciences Conference 2000, Volume 2, Heidelberg, 803-808, 2000.

[58] STEPHAN, K.: Wärmeübergang beim Kondensieren und beim Sieden, Springer-Verlag, 1988.

[59] SUGIYAMA, D.C., MARTO, P.J.: Nucleate Pool Boiling of R-114 and R-114-Oil Mixtures from Smooth and Enhanced Surfaces – I. Single Tubes, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 38, No.8, 1347-1361, 1995.

[60] SUGIYAMA, D.C., MARTO, P.J.: Nucleate Pool Boiling of R-114 and R-114-Oil Mixtures from Smooth and Enhanced Surfaces – II. Tube Bundles, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 38, No.8, 1363-1376, 1995.

[61] THOM, J.R.S., WALKER, M.W., FALLON, T.A., REISING, G.F.S.: Boiling in Subcooled Water during Flow and Annuli, Proc. Inst. Mech. Engrs. C180, Nr.3, 226-246, 1965.

[62] THOME, J.R.: Enhanced Boiling Heat Transfer, Hemisphere Publishing Corporation, 1990.

[63] THOME, J.R.: Heat Transfer Augmentation of Shell-and-Tube Heat Exchangers for the Chemical Processing Industry, Editions ETS (Pisa, Italy), 2nd European Thermal-Sciences and 14th UIT National Heat Transfer Conference, Rome, May 29-31, 1996.

[64] VDI-WARMEATLAS, 9. Auflage, Abschnitt Hbc, Düsseldorf, VDI-Verlag, 2002.

[65] WEBER, P.: Experimentelle Untersuchungen zur Siedekrise und zum Übergangssieden von strömendem Wasser unter erhöhtem Druck, VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 3, Nr. 226, 1990.

[66] WILMS, B.: Analytische und numerische Lösung des 2-dimensional inversen Wärmeleitproblems zur Berechnung der örtlichen Wärmestromdichte für den speziellen Fall eines Hohlzylinders, Studienarbeit, TU-Berlin, 2001.

[67] YILDIZ S., BARTSCH G., SCHROEDER-RICHTER D.: Effect of Flow Pattern on Critical Heat Flux at Porous Coated Tubes, The Physics of Heat Transfer in Boiling and Condensation, 11-th Int. School-Seminar, Moskau Printing House „Shanse“, 357-362

[68] YILDIZ, S.: Experimentelle Untersuchung der kritischen Wärmestromdichte im Übergang von DNB- zum Dryout-Mechanismus in glatten und porös beschichteten Rohren bei niedrigen Drücken und Massenstromdichten, Köster, Wissenschaftliche Schriftenreihe Verfahrenstechnik, Band 5, 1998.

[69] YILMAZ, S., WESTWATER, J.W.: Effect of Commerical Enhanced Surfaces on The Boiling Heat Transfer Curve, Advenced in Enhanced Heat Transfer ASME HTD, Vol. 18, 73-91, 1981.

[70] ZUEV, A.V., MALYSHENKO, S.P.: Dry-Out Phenomena at Two-Phase Flows in Tubes with Porous Coatings, 10th International Heat Transfer Conference, Brighton UK, Vol. 6, 147-150, 1994.

LEBENSLAUF

Michael Stein, geboren am 10.05.1969 in Berlin / Deutschland als Sohn von Peter Stein und Sabine Stein.

Werdegang:

1975 - 1988	Besuch der Walter- Gropius- Gesamtschule
1988 - 1996	Studium für Energie- und Verfahrenstechnik an der Technischen Universität Berlin in Berlin
1996 - 1997	Ingenieur für Verfahrenstechnik bei der Kraftwerks- und Anlagenbau AG in Berlin
1997 - 2000	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energietechnik der Technischen Universität Berlin in Berlin und Beginn der Promotion am Institut für Energietechnik der Technischen Universität Berlin unter Betreuung von Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. G. Bartsch
2001 bis jetzt	Ingenieur für Applikation und Entwicklung bei der Robert Bosch GmbH in Schwieberdingen (bei Stuttgart)