

Schlussbericht

Final Report

gemäß Anlage 2 zu Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98

Reaktorsicherheitsforschung – Vorhaben-Nr.: 1501646

Reactor Safety Research – Project No.: 1501646

Messung und Modellierung der Siedekrise in einem Stabbündel an Accident Tolerant Fuel (ATF) Hüllrohrmaterialien

Measurement and modeling of the boiling crisis in a rod bundle on Accident Tolerant Fuel (ATF) cladding materials

Zuwendungsempfänger: Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Ausführende Stelle: Institut für Thermische Energietechnik und Sicherheit (ITES)
Vorhaben-Nr.: 1501646
Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. habil Andreas Class
Autorinnen/Autoren: Nicolas Wefers, Dr. Stephan Gabriel
Berichtsdatum: August 2026

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz
und nukleare Sicherheit

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Fördergeber: Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Projektträger: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH – Projektträger

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit unter dem Förderkennzeichen 1501646 gefördert.

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts wurde der Einfluss von Accident-Tolerant-Fuel-(ATF)-Hüllrohrkonzepten auf das Strömungssieden und insbesondere auf die kritische Wärmestromdichte (CHF) unter kontrollierten Niederdruckbedingungen untersucht. Hierzu wurde an der COSMOS-L-Anlage eine vertikale Fünfstabbbündel-Teststrecke entwickelt, die einen direkten Vergleich verschiedener Hüllrohrmaterialien bei weitgehend identischen thermohydraulischen Randbedingungen ermöglicht. Eine wesentliche technische Entwicklung war die magnetische Kompensation der direkt elektrisch beheizten Hüllrohre durch eine koaxiale Stromführung. Dadurch konnten elektromagnetisch verursachte Verformungen des Bündels unterdrückt und wiederholte CHF-Messungen über vollständige Parameterstudien hinweg mit denselben Prüflingen durchgeführt werden. Die Kombination aus thermischer und optischer CHF-Erkennung sowie einer schnellen automatisierten Abschaltung begrenzte die lokale Überhitzung nach Eintritt der Siedekrise und ermöglichte einen reproduzierbaren Versuchsbetrieb ohne systematischen Austausch der Hüllrohrproben. Die statistische Reproduzierbarkeit wurde anhand von 50 wiederholten CHF-Messungen unter identischen Bedingungen mit einer 3σ -Streuung von etwa $\pm 3,5\%$ quantifiziert.

Die CHF-Untersuchungen an Zr-4, CrN-beschichtetem Zr-4 und FeCrAl zeigen, dass Massenstromdichte, Druck und Eintrittsunterkühlung die Siedegrenze grundsätzlich dominieren. Dennoch konnten materialspezifische Unterschiede aufgelöst werden. Für CrN-beschichtetes Zr-4 wurde eine signifikante CHF-Verringerung von bis zu etwa 8,8% gegenüber der unbeschichteten Referenz festgestellt, die mittlere Abweichung vom Referenzfall lag mit FeCrAl bei etwa 3,2% und damit innerhalb der experimentellen Streuung. Zur Interpretation wurde ein mechanistisches CHF-Vorhersagemodell auf Basis eines Mikroschicht-Dryout-Ansatzes weiterentwickelt und um material- und oberflächensensitive Größen ergänzt. Mit mittleren absoluten Fehlern von 6,8%, 10,2% und 8,8% für Zr-4, CrN-Zr-4 und FeCrAl erreicht der Ansatz insgesamt eine mit der korrigierten Groeneveld-Look-Up-Table vergleichbare Vorhersagegüte. Sein wesentlicher Vorteil liegt jedoch im direkten ATF-Vergleich: Während die empirische LUT bei identischen thermohydraulischen Randbedingungen keine explizite Materialsensitivität besitzt, bildet das entwickelte Modell die beobachteten materialabhängigen CHF-Trends und Verschiebungen durch die Einbeziehung von Benetzbarkeit, thermodynamischem Zustand und thermischen Materialeigenschaften explizit ab.

Ergänzend wurde eine bildbasierte Auswertemethodik für Hochgeschwindigkeitsaufnahmen entwickelt, mit der oberflächenabhängige Siedeparameter quantitativ bestimmt werden können. Aus zeitaufgelösten Bildsequenzen werden aktive Siedekeimstellen und charakteristische Blasenfrequenzen extrahiert, sodass insbesondere Siedekeimstellendichte (NSD) und Blasenablösefrequenz (BDF) räumlich und zeitlich ausgewertet werden können. Die Untersuchungen zeigten, dass Oberflächenmodifikationen die Aktivierung und Verteilung von Siedekeimen deutlicher beeinflussen als die BDF und dass lokale Oberflächenzustände durch globale Kennwerte wie mittlere Rauheit oder Kontaktwinkel allein nicht vollständig beschrieben werden.

Die wesentlichen experimentellen, methodischen und wissenschaftlichen Projektziele wurden erreicht und teilweise erweitert. Neben den ursprünglich vorgesehenen Hüllrohrkonzepten wurde zusätzlich CrN-beschichtetes FeCrAl in das Versuchsprogramm aufgenommen. Die entstandene reproduzierbare CHF-Datenbasis, die Hochgeschwindigkeits-Auswertemethodik und die entwickelte Stabbbündel-Teststrecke stehen für weiterführende Untersuchungen und Modellvalidierungen zur Verfügung. Die Projektergebnisse wurden auf mehreren Fachkonferenzen sowie in einem peer-reviewten Journal veröffentlicht und bilden zugleich die Grundlage für weiterführende Arbeiten zu oberflächensensitiven Siedemodellen und zum Post-CHF-Verhalten von ATF-Hüllrohren.

Abstract

The project investigated the influence of Accident Tolerant Fuel (ATF) cladding concepts on flow boiling and, in particular, on critical heat flux (CHF) under controlled low-pressure conditions. For this purpose, a vertical five-rod bundle test section was developed and implemented in the COSMOS-L facility, enabling direct comparison of different cladding materials under closely matched thermal-hydraulic boundary conditions. A key technical achievement was the magnetic compensation of the directly electrically heated rods by means of a coaxial current-return configuration. This suppressed electromagnetically induced bundle deformation and enabled repeated CHF measurements and complete parametric studies to be performed using the same specimens. Combined thermal and optical CHF detection together with a rapid automated shutdown limited the local temperature excursion after boiling crisis and allowed reproducible testing without systematic replacement of the cladding samples. Statistical reproducibility was quantified by 50 repeated CHF measurements under identical conditions, yielding a 3σ scatter of approximately $\pm 3.5\%$.

The CHF experiments with Zr-4, CrN-coated Zr-4, and FeCrAl confirmed that mass flux, pressure, and inlet subcooling remain the dominant parameters governing the boiling limit. Nevertheless, material-specific effects could be resolved. CrN-coated Zr-4 exhibited a statistically significant CHF reduction of up to approximately 8.8% relative to the uncoated reference, whereas the approximately 3.2% mean deviation observed for FeCrAl remained within the experimental scatter. For interpretation and prediction, a mechanistic CHF model based on a microlayer-dryout concept was further developed by introducing material- and surface-sensitive parameters. Mean absolute errors of 6.8%, 10.2%, and 8.8% were obtained for Zr-4, CrN-coated Zr-4, and FeCrAl, respectively, placing its overall absolute predictive performance in the same range as the corrected Groeneveld CHF Look-Up Table. Its principal advantage becomes apparent in the direct assessment of ATF performance: whereas the empirical LUT contains no explicit material dependence and therefore cannot represent systematic CHF shifts between cladding concepts at identical thermal-hydraulic conditions, the developed model reproduces the observed material-dependent trends by explicitly accounting for wettability, thermodynamic state, and thermal material properties.

In parallel, an image-based evaluation method for high-speed boiling recordings was developed to quantify surface-sensitive boiling parameters. Time-resolved image sequences are processed to identify active nucleation sites and characteristic bubble frequencies, enabling spatially and temporally resolved evaluation of nucleation site density (NSD) and bubble departure frequency (BDF). The measurements showed that surface modifications affect the activation and spatial distribution of nucleation sites more distinctly than the BDF and demonstrated that local boiling behavior cannot be represented adequately by global surface descriptors such as mean roughness or contact angle alone.

The principal experimental, methodological, and scientific project objectives were achieved and, in several aspects, extended. In addition to the originally planned cladding concepts, CrN-coated FeCrAl was incorporated into the final experimental program. The resulting reproducible CHF database, the high-speed image-analysis methodology, and the magnetically compensated rod-bundle test section provide a basis for further experimental studies and model validation. Project results were disseminated through several international conference contributions and a peer-reviewed journal publication and provide a foundation for subsequent work on surface-sensitive boiling models and the post-CHF behavior of advanced cladding materials.

Inhaltsverzeichnis

List of Symbols and Abbreviations	7
1 Hintergrund, Ziele & Umfang	1
1.1 Hintergrund und Motivation	1
1.2 Wissenschaftlicher & technischer Kontext	2
1.3 Ziele & Umfang des Projekts	3
2 Grundlagen	6
2.1 Strömungssieden & die kritische Wärmestromdichte	6
2.2 Einfluss thermohydraulischer Randbedingungen	6
2.3 Oberflächen & Materialeinfluss	8
2.4 ATF - Hüllrohrkonzepte	9
2.5 Siedekeime und Blasen-Dynamik	11
3 Projektrahmen und Arbeitsprogramm	12
3.1 Ausgangsbedingungen und Projektrahmen	12
3.2 Arbeitsprogramm	12
3.3 Entwicklung des Arbeitsprogramms	13
4 Experimentelle und numerische Methodik	16
4.1 Versuchsanlage und Stabbündel-Teststrecke	16
4.2 Hüllrohrmaterialien und Oberflächencharakterisierung	19
4.3 Instrumentierung & numerischen Vorauslegung	21
4.4 Versuchsverfahren	24
4.5 Messunsicherheit und Reproduzierbarkeit	28
5 Experimental Results	31
5.1 Thermal-Hydraulic Dependence of Critical Heat Flux	31
5.2 CHF-Einfluss der Hüllrohrkonzepte	31
5.3 Oberflächenabhängiges Siedeverhalten vor dem CHF	33
6 Auswertung und Modellierung der Ergebnisse	36
6.1 Vergleich prediktiver CHF-Modelle	36
6.2 Materialabhängige mechanistische Interpretation	36
6.3 Bewertung von Material- und Oberflächeneffekten	37
6.4 Einschränkungen und Übertragbarkeit	39
7 Projektdurchführung und Erreichung der Ziele	41
7.1 Projektentwicklung	41
7.2 Umsetzung der einzelnen Arbeitspakete	42
7.3 Projektziele	42
8 Verwertung der wissenschaftliche Ergebnisse & Ausblick	45
8.1 wissenschaftliche Ergebnisse	45
8.2 Verwertung	46
8.3 Ausblick	47
Literatur	48

Abbildungsverzeichnis

1	Illustration eines CHF mit einer Fotocollage eines Stabbündels aus dem Projekt. Zu ist das glühenden mittleren Hüllrohrs zu drei verschiedenen Zeitpunkten des CHF, welches von vier äußeren Hüllrohren umgeben ist. Aufgrund der lokalen Austrocknung erreichte das mittlere Hüllrohr eine Spitztemperatur von 1050°C bevor die Heizleistung abgeschaltet wurde.	2
2	Abbildung einiger ATF-Hüllrohre, welche im Projekt untersucht worden sind. Zu sehen sind Interferenzfarben infolge semi-transparenter Oxidschichten und Oberflächenschäden, welche während der Temperaturexkursion eines DNB entstanden sind.	4
3	Qualitatives Nukiyama-Diagramm zur Veranschaulichung der Wärmeübertragung verschiedener Siederegime. Angelehnt an [VILK15]	7
4	COSMOS-L Versuchsanlage mit integrierter Teststrecke zur Untersuchung von Stabbündelproben am ITES, KIT. T: Temperatursensoren, P: Drucksensoren.	17
5	Abgebildet ist die Anordnung der Hüllrohre in einem Stabbündel, dass aus fünf identischen Hüllrohrproben besteht, jeweils als Konzeptphase, der CAD-Phase, der Versuchsphase und der Nachbereitungsphase illustriert.	18
6	Koaxiales Heizkonzept in den Hüllrohren zur Eliminierung magnetischer Kräfte im Stabbündel während des Experiments. Die magnetische Flussdichte B ist als violette Kurve entlang der Normalen zum Hüllrohr dargestellt.	20
7	Es wurden ATF-Hüllrohre auf Basis von Cr-Beschichtungen und eines puren FeCrAl-Konzepts untersucht, wobei herkömmliches Zr-4 als Referenzfall diente. Die Abbildung zeigt die zentralen Hauptversuchsrohre der jeweiligen Stabbündel nach den Versuchen. Als repräsentatives Beispiel für das mit 16 µm CrN beschichtete FeCrAl wird eine Zr-4-Probe aus derselben BeschichtungschARGE gezeigt, um einen besseren Kontrast des REM-Bildes zu erzielen.	22
8	Vorstudie unter Verwendung von einphasiger LES (linkes Bild: Strömungskanal im Stabbündelbereich in einem ausgewählten Zeitschritt der Simulation) und RANS (rechte Bilder: detaillierte Analyse des Strömungsgleichrichters unter stationären Bedingungen).	23
9	Vorstudie unter Verwendung eines RPI-MUSIG-Modells für das Strömungssieden in FLUENT. Dabei wurde ein 1/8-Querschnitt der abgebildeten Geometrie eines vernetzten Rohrbündels verwendet.	24
10	Darstellung des CHF-Versuchsablaufs anhand der Hüllrohr-Temperatur, mit einer Sequenz einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme im Übergang zum Filmsieden. . .	25
11	Illustration der entwickelten Auswertemethodik für aktive Siedekeime auf der Hüllrohroberfläche des Referenzfalls: blankes Zr-4.	27
12	Ein veranschaulichendes Modell zur Charakterisierung der real-lokalen Zweiphasen-Wärmeübertragung an der Oberfläche der Hüllrohre. Die Abbildung zeigt die Siedefrequenz bis zu 1,1 kHz als Indikator für die Siedeaktivität eines ATF-Hüllrohrs und klassischen Zr-4.	29
13	Entnommene Grafik aus [WVHG ⁺ 26] über eine CHF-Reproduktionsstudie, bestehend aus 50 sequenziell durchgeführten CHF-Experimenten mit konstanten Testbedingungen.	30
14	Übersicht über die Schwellenwerte die Transition zum Filmsieden der ATF-Proben der Hauptmessreihe.	32
15	Bisherige Bewertung der NSD unter Verwendung der vorgestellten Auswertemethodik 4 und Vergleich mit in der Literatur weit üblichen empirischen Modellen.	34
16	Bisherige Bewertung der BDF unter Verwendung der vorgestellten Auswertemethodik 4 und Vergleich mit in der Literatur weit üblichen empirischen Modellen.	35

17	Vergleich der CHF-Vorhersagen des eigenen Modells und der LUT als Referenzfall aus der Literatur für die untersuchten ATFs.	38
----	--	----

Tabellenverzeichnis

3	Zeitplanung und Arbeitspakete des Vorhabens.	15
4	Geometrische, oberflächenbezogene und thermophysikalische Eigenschaften der Hüllmaterialien der CHF-Hauptuntersuchungsreihe. Die Oberflächenrauheit und die Kontaktwinkel wurden experimentell bestimmt, die thermophysikalischen Eigenschaften wurden der Literatur entnommen.	21
5	Thermohydraulische Testmatrix für die wichtigsten vergleichenden CHF-Messungen.	26
6	Repräsentative Messunsicherheiten für die CHF-Experimente mit Stabbündeln auf der Grundlage von [WVHG ⁺ 26].	28
7	Lineare Regression des gemessenen CHF in Abhängigkeit von der Einlassenthalpie für die drei Hüllmaterialien der Hauptmessreihe, basierend auf [WVHG ⁺ 26]. . . .	31
8	Festgestellte CHF-Unterschiede der untersuchten ATF-Hüllrohre im Vergleich zur unbeschichteten Zr-4-Referenz, basierend auf [WVHG ⁺ 26].	33
9	Mittler absoluter prozentualer Fehler der korrigierten Groeneveld-LUT und des werkstoffabhängigen mechanistischen Modells für die behandelten ATF-Hüllrohrkonzept, basierend auf [WVHG ⁺ 26].	37
10	Vergleich der ursprünglich geplanten Arbeitspakete mit dem aktuellen Projektstand.	43
11	Wichtigste wissenschaftliche Ergebnisse des Projekts.	45

Symbol und Abkürzungsverzeichnis

Symbole

Symbol	Description	Unit
C	Empirische Konstante der Korrelation zur Mikroschichtdicke	–
c_p	Spezifische Wärmekapazität	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$c_{p,w}$	Spezifische Wärmekapazität des Wand- oder Beschichtungsmaterials	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
D_c	Kritischer Hohlraumdurchmesser	m
G	Massenstrom	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
g	Erdbeschleunigung	m s^{-2}
$\dot{H}_{\text{in}}$	Enthalpie des Einstroms relativ zur Sättigung	W
Δh_{lv}	Latente Verdampfungswärme	J kg^{-1}
K_{bundle}	Stabbündel-Korrekturfaktor für die CHF-Vorhersage	–
L_B	Charakteristische Länge der Dampfstruktur	m
$\dot{m}$	Massenstrom	kg s^{-1}
p	Druck	Pa
Pr	Prandtl-Zahl	–
$\dot{q}_{\text{CHF}}$	Kritischer Wärmefluss	W m^{-2}
R_a	Arithmetischer Mittelwert der Oberflächenrauheit	μm
R_z	Mittlere Rauhtiefe	μm
Re	Reynolds-Zahl	–
T_{in}	Eintrittstemperatur des Kühlmittels	K
T_{sat}	Sättigungstemperatur	K
T_w	Wandtemperatur	K
ΔT_{sub}	Unterkühlung des Kühlmittels	K
U_B	Charakteristische Geschwindigkeit der Blasen- oder Dampfstruktur	m s^{-1}
We_ℓ	Flüssigkeits-Weber-Zahl	–
X_{th}	Thermodynamische Dampfqualität	–
X_{ref}	Thermodynamische Dampfqualität unter den Modell-Referenzbedingungen	–
β_{wet}	Statischer Kontaktwinkel / Benetzungswinkel	°
δ	Charakteristische Dicke der Flüssigkeitsmikroschicht	m
$\lambda_{\text{KH,crit}}$	Kritische Kelvin-Helmholtz-Wellenlänge	m
ρ_ℓ	Flüssigkeitsdichte	kg m^{-3}
ρ_v	Dampfdichte	kg m^{-3}
σ	Oberflächenspannung	N m^{-1}
τ_B	Charakteristische Verweil- oder Wachstumszeit der Blase	s

Abkürzungen

Abbreviation	Meaning
AC	Wechselstrom
AFM	Rasterkraftmikroskopie
ATF	unfalltolerantes Brennelementkonzept, im Rahmen dieser Arbeit sind ausschließlich ATF-Hüllrohre gemeint
BDF	Blasenabhebefrequenz
BWR	Siedewasserreaktor
CFD	Computational Fluid Dynamics
CHF	Critical Heat Flux
DNB	Departure from Nucleate Boiling
FEM	Finite-Elemente-Methode
LES	Large-Eddy-Simulation
LUT	Nachschlage-/ Interpolationstabelle
LWR	Leichtwasserreaktor
MAPE	Mittlerer absoluter prozentualer Fehler
MUSIG	Mehrphasen-Submodell für CFD mit mehreren Größen/ Geschwindigkeitsklassen für Blasen
NSD	Siedekeimstellendichte
ONB	Einsetzen des nukleierten Siedens
POD	Proper Orthogonal Decomposition
PVD	Physikalische Gasphasenabscheidung
PWR	Druckwasserreaktor
RANS	Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen
RMSE	Quadratischer Mittelwertfehler
ROI	Region von Interesse
RPI	Wand-Siedemodell des Rensselaer Polytechnic Institute
SEM	Rasterelektronenmikroskopie

1 Hintergrund, Ziele & Umfang

1.1 Hintergrund und Motivation

Die kritische Wärmeflussdichte (CHF) stellt eine wichtige thermohydraulische Grenze in wassergekühlten Reaktorsystemen dar. Während des Nukleationssiedens können große Wärmeflüsse effizient übertragen werden, während die erwärmte Oberfläche überwiegend von der flüssigen Phase benetzt bleibt. Mit steigender thermischer Belastung kann jedoch ein Zustand erreicht werden, bei dem die etablierten Mechanismen der Flüssigkeitszufuhr und der Wiederbenetzung nicht mehr ausreichen, um eine effektive Oberflächenkühlung aufrechtzuerhalten. Unter unterkühlten Strömungssiedebedingungen wird dieser Vorgang üblicherweise mit der Transition vom Nukleationssiedens (DNB) zum Filmsieden oder auch Siedekrise genannt, in Verbindung gebracht. Die Bildung von anhaftenden Dampfstrukturen oder lokalen Trockenbereichen kann dann zu einer raschen Verschlechterung der Wärmeübertragung und einem zugehörigen Anstieg der Hüllrohrtemperatur führen [ToWe96, GSVL⁺07]. Eine zuverlässige Charakterisierung des CHF ist daher für die Bewertung der thermischen Betriebs- und Sicherheitsreserven von Brennelementen in Leichtwasserreaktoren erforderlich.

Das Auftreten eines CHF wird in erster Linie durch den thermohydraulischen Zustand des Kühlmittels bestimmt. Massenstrom, Druck, Einlasstemperatur und Unterkühlung bestimmen die Entwicklung der Zweiphasenströmung und die thermische Reserve bis zur Siedekrise. Gleichzeitig haben experimentelle Untersuchungen gezeigt, dass die beheizte Oberfläche selbst sowohl das Nukleationssieden als auch den CHF beeinflussen kann. Oberflächenmorphologie, Benetzbarkeit, das Vorhandensein aktiver Keimbildungshohlräume sowie die thermophysikalischen Eigenschaften der Wand beeinflussen die Blasenbildung, den transienten Wärmetransport und die lokale Wiederbenetzung [HKS^W18, AKHB⁺20, LJAC⁺18, Kim09]. Folglich können Modifikationen des Hüllrohrmaterials oder der Oberfläche das Siedeverhalten verändern, selbst wenn die makroskopische Geometrie und die äußeren thermohydraulischen Randbedingungen unverändert bleiben.

Das Phänomen des CHF gewinnt insbesondere bei neuen Hüllrohrkonzepten für unfalltoleranten Brennelemente (Accident Tolerant Fuel, ATF) an Bedeutung. Herkömmliche Legierungen auf Zirkoniumbasis vereinen zwar günstige neutronische und fertigungstechnische Eigenschaften, weisen jedoch in Heizedampfkonditionen eine begrenzte Oxidationsbeständigkeit auf. Daher wurden ATF-Konzepte entwickelt, um das Verhalten des Brennstoffsystems unter Unfallbedingungen zu verbessern. Zu den untersuchten Strategien zählen schützende Beschichtungen auf Chrombasis für etablierte Zirkoniumlegierungen sowie alternative Hüllrohrmaterialien wie FeCrAl-Legierungen [Terr18, BLSLCo16, ŠGSC⁺18, Kim⁺22]. Obwohl diese Konzepte in erster Linie durch ihr Verhalten unter Unfallbedingungen motiviert sind, erfordert ihre Umsetzung auch eine Bewertung ihres thermohydraulischen Verhaltens im Normalbetrieb bis zum CHF.

Die für das vorliegende Projekt relevante Frage war daher, ob sich durch ATF-Hüllrohrkonzepte eingeführte Modifikationen auf die Entwicklung des Strömungssiedens und insbesondere auf den erreichbaren CHF auswirken. Diese Frage lässt sich nicht allein durch den Vergleich isolierter CHF-Werte beantworten. Unterschiede, die durch das Hüllrohrmaterial oder den Oberflächenzustand verursacht werden, müssen von dem wesentlich größeren Einfluss der umgebenden thermohydraulischen Bedingungen und von der intrinsischen statistischen Variation der Siedekrise unterschieden werden. Frühere Untersuchungen an der COSMOS-L-Anlage hatten bereits gezeigt, dass Modifikationen an Zircaloy-Oberflächen sowohl das Siedeverhalten als auch den CHF beeinflussen können [HKS^W18]. Das Projekt wurde daher auf einen vergleichenden experimentellen Ansatz ausgerichtet, bei dem verschiedene Hüllrohrkonzepte unter ansonsten gleichbleibenden und reproduzierbaren Stabbündelbedingungen untersucht werden konnten.

Etablierte CHF-Vorhersagemethoden bieten eine wichtige Referenz für solche Messungen, sind jedoch nur bedingt geeignet, um materialspezifische Effekte zu erfassen. Empirische Ansätze

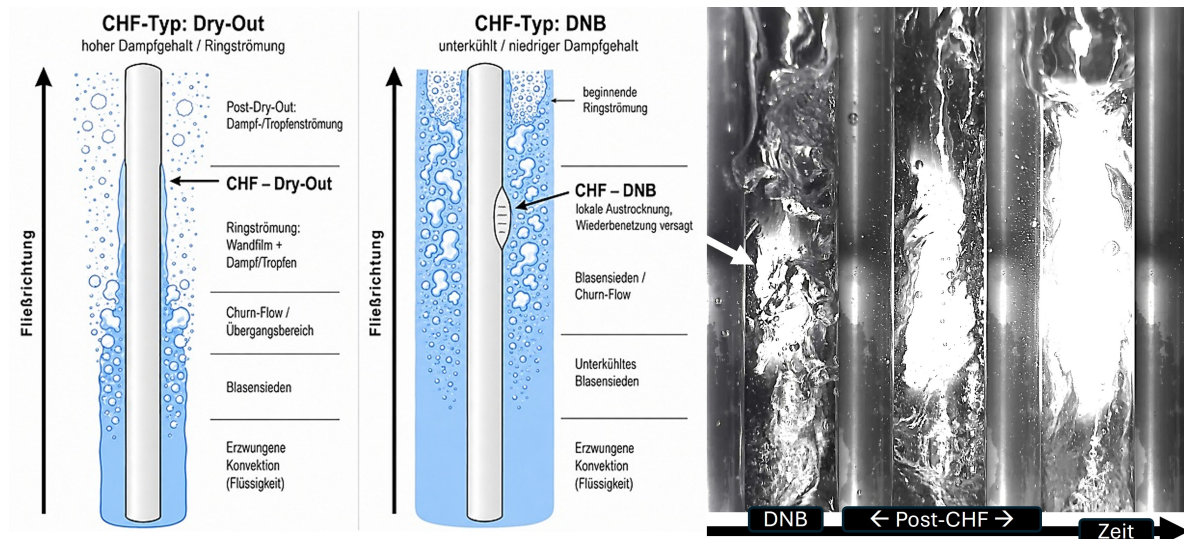


Abbildung 1: Illustration eines CHF mit einer Fotocollage eines Stabbündels aus dem Projekt. Zu ist das glühenden mittleren Hüllrohrs zu drei verschiedenen Zeitpunkten des CHF, welches von vier äußeren Hüllrohren umgeben ist. Aufgrund der lokalen Austrocknung erreichte das mittlere Hüllrohr eine Spitzentemperatur von 1050°C bevor die Heizleistung abgeschaltet wurde.

wie die CHF-Nachschlagetabelle von Groeneveld basieren auf umfangreichen experimentellen Datenbanken und berücksichtigen die wichtigsten thermohydraulischen Abhängigkeiten über Druck, Massenstrom und thermodynamischen Zustand [GSVL⁺07]. Oberflächenmorphologie, Benetzbarkeit oder thermophysikalische Eigenschaften der Hüllrohre werden jedoch nicht explizit berücksichtigt. Mechanistische Beschreibungen stellen einen engeren Bezug zu lokalen Prozessen wie dem Abbau der Flüssigkeitsschicht, der Dampfansammlung und der Wiederbenetzung her, hängen jedoch von Parametern ab, die experimentell schwer zu bestimmen sind und deren Übertragbarkeit auf modifizierte Hüllrohrmaterialien ungewiss bleibt [Katt90, CCMS⁺94, LCYA10].

Eine weitere Einschränkung der verfügbaren experimentellen Datenbasis ist die Versuchsgeometrie. Ein wesentlicher Teil der verfügbaren Informationen zu Oberflächen- und Materialeffekten stammt aus Pool-Boiling-, Einzelrohr- oder Ringraumversuchen. Solche Versuche liefern wertvolle Erkenntnisse zum grundlegenden Siedeverhalten, bilden jedoch die Strömungsumverteilung, die Wechselwirkung zwischen den Teilkanälen und den Dampftransport in einem Stabbündel nicht nach. Ein kontrollierter Vergleich verschiedener Hüllrohrkonzepte bei ansonsten unveränderter Bündelgeometrie bietet daher eine direktere Grundlage für die Beurteilung, ob materialbezogene Effekte unter Bedingungen, die einer reaktorrelevanten Konfiguration nahekommen, weiterhin messbar sind.

1.2 Wissenschaftlicher & technischer Kontext

Für die in diesem Projekt untersuchten Niederdruckbedingungen, bei denen überwiegend Unterkühlung vorliegt, wird die Siedekrise in erster Linie als ein Phänomen vom DNB-Typ betrachtet. Vor dem Eintritt in den CHF-Zustand ist das Nukleationssieden durch die wiederholte Aktivierung von Siedekernen an geeigneten Oberflächenvertiefungen gekennzeichnet, gefolgt von Blasenwachstum, Ablösung und erneuter Benetzung der erwärmten Wand. Mit steigendem Wärmefluss nehmen die Wechselwirkung und die Koaleszenz der Blasen zu, und die lokale Verfügbarkeit von Flüssigkeit an der Wand nimmt ab. Es kann sich schließlich ein anhaltender Trockenbereich entwickeln, der den mit CHF verbundenen raschen Temperaturanstieg auslöst.

Der Übergang lässt sich im Allgemeinen nicht auf einen einzigen universellen Mechanismus zurückführen. Je nach lokalem thermodynamischem Zustand und Strömungsregime wurden

Beschreibungen vorgeschlagen, die auf dem Abbau der Flüssigkeitsschicht, der Dampfansammlung, hydrodynamischen Instabilitäten oder Einschränkungen der Wiederbenetzung basieren [Katt90, CCMS⁺94, LCYA10]. Für die Zwecke des vorliegenden Projekts war daher die exakte mechanistische Klassifizierung jedes einzelnen CHF-Ereignisses weniger wichtig als die Festlegung eines reproduzierbaren experimentellen Kriteriums für dessen Auftreten und die Bestimmung, wie sich diese Grenze in Abhängigkeit von den thermohydraulischen Bedingungen und dem Hüllrohrkonzept verändert.

Materialeffekte sollten in diesem Zusammenhang als kombinierte Reaktion eines Oberflächen-Substrat-Systems betrachtet werden. Die Oberflächentopografie bestimmt die Anzahl und Geometrie der Vertiefungen, in denen die Siedekeimbildung stattfinden kann, während die Benetzbarkeit die Anhaftung von Blasen und die Wiederbenetzung durch Flüssigkeit beeinflusst. Die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität der Ummantelung beeinflussen die transiente Umverteilung und Speicherung von Wärme in der Nähe lokal variierender Siedebedingungen [Kim09]. Bei beschichteten Werkstoffen können diese Effekte zusätzlich von der Beschichtungsstärke, der Zusammensetzung und den Substrateigenschaften abhängen. Dementsprechend lässt sich ein gemessener Unterschied im CHF im Allgemeinen nicht eindeutig einem einzelnen Parameter wie der durchschnittlichen Rauheit oder dem Kontaktwinkel zuordnen.

Die beiden im Projekt betrachteten Hauptstrategien der ATF bieten komplementäre Fälle zur Untersuchung dieser Kopplung. CrN-beschichtetes Zircaloy-4 behält das herkömmliche Substrat im Volumen bei, während hauptsächlich die Oberfläche und der oberflächennahe Bereich modifiziert werden. FeCrAl hingegen stellt einen Ersatz des gesamten Hüllrohrmaterials dar und führt daher zu Veränderungen sowohl der Oberflächenbeschaffenheit als auch der thermophysikalischen Eigenschaften des Volumens. Der Vergleich dieser Konzepte mit unbeschichtetem Zircaloy-4 innerhalb einer unveränderten Stabbündelgeometrie bietet eine Möglichkeit, das Ausmaß materialsensitiver Siedeeffekte im Verhältnis zu den dominierenden thermohydraulischen Abhängigkeiten zu bewerten.

Neben integralen CHF-Messungen können lokale Siedeparameter ergänzende Informationen zu den Prozessen liefern, die der Siedekrise vorausgehen. Die Dichte der aktiven Siedekeimstellen (NSD) charakterisiert die Anzahl der aktiven Siedestellen auf der beheizten Oberfläche, während die Blasenabhebefrequenz (BDF) das wiederholte Ablösen von Blasen von solchen Stellen beschreibt. Beide Größen hängen von der Wandüberhitzung, den Strömungsbedingungen und dem Oberflächenzustand ab und sind zudem als Abschlussparameter in Wandverdampfungsmodellen relevant [LJAC⁺18, RZYS⁺19, ZhHo20]. Ihre Bestimmung stellt für sich genommen zwar keinen mechanistischen Zusammenhang mit dem CHF her, bietet jedoch eine zusätzliche experimentelle Ebene, um festzustellen, ob modifizierte Manteloberflächen bereits im Bereich der keimbildenden Verdampfung messbare Veränderungen hervorrufen.

1.3 Ziele & Umfang des Projekts

Das Hauptziel des Projekts war die experimentelle Untersuchung von ATF-Hüllrohrmaterialien hinsichtlich ihres thermohydraulischen Verhaltens im Normalbetrieb bis zum CHF. Ein besonderer Schwerpunkt lag dabei auf dem Strömungssieden und dem kritischen Wärmefluss unter kontrollierten Niederdruckbedingungen. Als Referenzmaterial wurde herkömmliches Zircaloy-4 ausgewählt, anhand dessen oberflächenmodifizierte und alternative Hüllrohrkonzepte bewertet werden konnten.

Eine zentrale Anforderung war die Sicherstellung ausreichend reproduzierbarer Versuchsbedingungen, um materialbedingte Unterschiede vom Einfluss von Druck, Massenstrom, Einlassunterkühlung und Messunsicherheit unterscheiden zu können. Zu diesem Zweck wurde ein spezieller, elektrisch beheizter Testabschnitt mit einem Stabbündel aus fünf Hüllrohrproben entwickelt und in der COSMOS-L-Anlage integriert. Das Projekt umfasste die Auslegung und den Bau der Bündelkonfiguration, unterstützende numerische Vorversuchsanalysen, die Inbetriebnahme

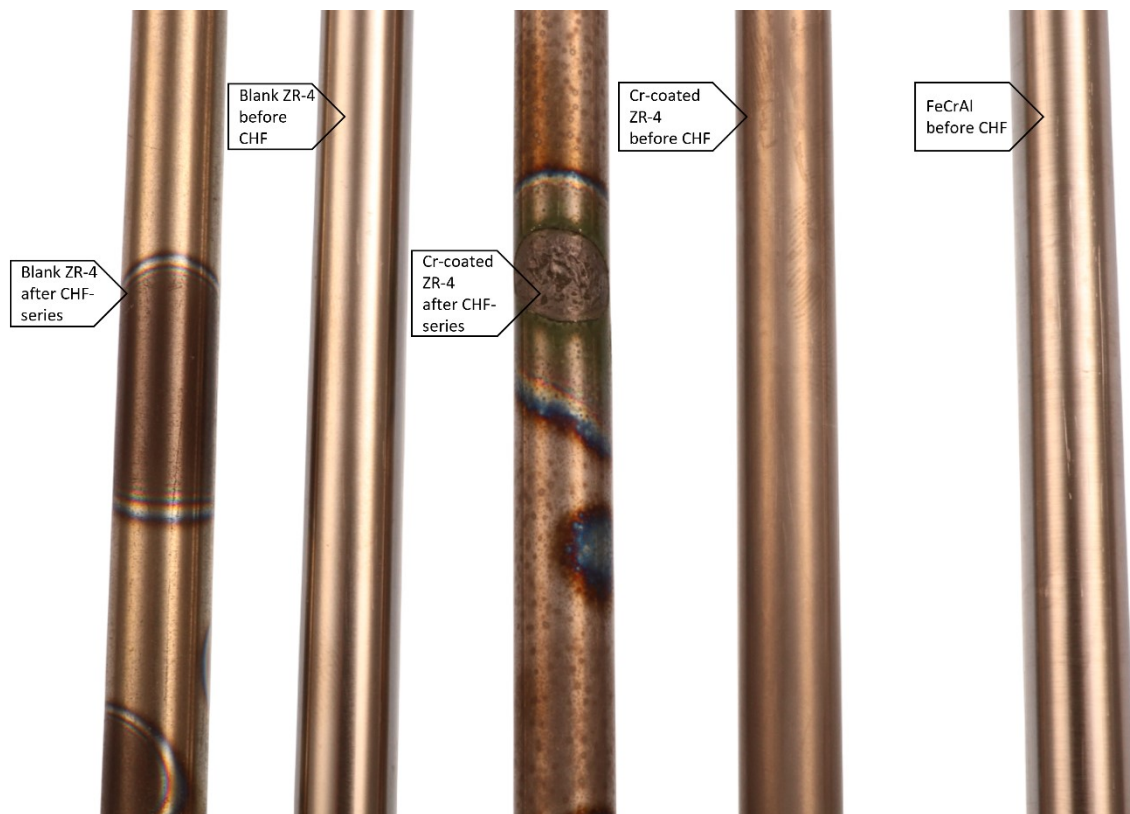


Abbildung 2: Abbildung einiger ATF-Hüllrohre, welche im Projekt untersucht worden sind. Zu sehen sind Interferenzfarben infolge semi-transparenter Oxidschichten und Oberflächenschäden, welche während der Temperaturexkursion eines DNB entstanden sind.

und Charakterisierung des Versuchsaufbaus sowie systematische Siedeveruche bis hin zum CHF. Besonderes Augenmerk wurde auf reproduzierbare Einlassbedingungen, räumlich aufgelöste Messungen der Hüllrohrtemperatur, die zuverlässige Erkennung der Siedekrise und die Möglichkeit gelegt, wiederholte CHF-Messungen am selben Testbündel durchzuführen.

Die wichtigsten vergleichenden CHF-Untersuchungen umfassten unbeschichtetes Zr-4, CrN-beschichtetes Zr-4 und FeCrAl. Die thermohydraulischen Randbedingungen wurden gemäß einer einheitlichen Versuchsstrategie variiert, um einen direkten Vergleich der verschiedenen Hüllrohrkonzepte zu ermöglichen. Wiederholte Messungen und eine begleitende Unsicherheitsbewertung wurden einbezogen, um die experimentelle Streuung zu quantifizieren. Festzustellen war, ob die beobachteten materialbedingten Unterschiede die Reproduzierbarkeitsgrenzen des Versuchsaufbaus überschreiten könnten [WVHG⁺26]. Im Rahmen des erweiterten Versuchsprogramms wurden zusätzlich Messungen mit CrN-beschichtetem FeCrAl durchgeführt, um die verfügbare Datenbank mit kombinierter Beschichtungs- und Substrateffekte zu erweitern.

Numerische Analysen begleiteten die experimentellen Arbeiten in erster Linie zur Unterstützung der Auslegung und Charakterisierung des Testabschnitts. CFD-Berechnungen wurden zur Bewertung der Strömungsverteilung und zur Unterstützung der Entwicklung der Einlasskonfiguration herangezogen, während thermisch-elektrische Analysen zur Auslegung des direkt beheizten Stabbündels beitrugen. Siedesimulationen und etablierte CHF-Vorhersagemethoden lieferten Referenzinformationen für die Interpretation der Versuchsbedingungen. Die Rolle und die Grenzen dieser numerischen Ansätze, einschließlich der Weiterentwicklung im Vergleich zur ursprünglich vorgeschlagenen Modellierungsstrategie, werden in den folgenden Abschnitten gesondert erörtert.

Der experimentelle Umfang wurde im Laufe des Projekts weiter auf die Charakterisierung des Siedeverhaltens vor dem CHF ausgeweitet. In ergänzenden Messungen wurde Hochgeschwindig-

keitsbildgebung eingesetzt, um die Aktivierung und räumliche Verteilung von Siedekeimstellen sowie die entsprechenden Blasenablösungsfrequenzen an ausgewählten unbeschichteten und chrombeschichteten Hüllrohr-Oberflächen zu bewerten [WVHG25]. Diese Messungen waren nicht darauf ausgerichtet, eine direkt übertragbare Vorhersage des CHF im Stabbündel zu liefern. Stattdessen schufen sie eine zusätzliche experimentelle Grundlage für die Bewertung oberflächenabhängiger Siedeeigenschaften und für die Ermittlung von Größen, die für die Weiterentwicklung und Validierung von Modellen zum Wand-Sieden und zum CHF relevant sind.

Der endgültige Umfang des Projekts umfasste daher drei eng miteinander verbundene Elemente: die Entwicklung einer reproduzierbaren experimentellen Methodik für CHF-Messungen an Stabbündeln, die vergleichende Bewertung herkömmlicher und ATF-Hüllrohrkonzepte unter äquivalenten thermohydraulischen Bedingungen sowie die ergänzende Untersuchung oberflächenabhängiger Siedevorgänge vor dem CHF. Zusammen bilden diese Aktivitäten die experimentelle Grundlage für die Bewertung des thermohydraulischen Verhaltens der untersuchten ATF-Konzepte sowie für die anschließende wissenschaftliche Analyse und Modellentwicklung.

2 Grundlagen

2.1 Strömungssieden & die kritische Wärmestromdichte

Beim Strömungssieden verbindet sich die Wärmeübertragung durch erzwungene Konvektion mit einem Phasenwechsel an einer erwärmten Oberfläche. Sobald die Wandtemperatur die lokale Sättigungstemperatur überschreitet, kann an aktiven Oberflächenvertiefungen eine Dampfbildung einsetzen und sich zu einem keimbildenden Sieden entwickeln. In diesem Bereich ermöglichen der Transport latenter Wärme sowie das wiederholte Entstehen, Ablösen und Ersetzen von Dampfblasen hohe Wärmeübertragungsraten, während die erwärmte Oberfläche überwiegend von der flüssigen Phase benetzt bleibt.

Mit zunehmender thermischer Belastung nähert sich der Siedevorgang einem Grenzwärmefluss, bei dem die etablierten Mechanismen der Flüssigkeitszufuhr und der Wiederbenetzung keine effektive Oberflächenkühlung mehr aufrechterhalten können. Diese Grenze wird als kritischer Wärmeffluss (CHF) bezeichnet. Unter unterkühlten Strömungssiedebedingungen wird der damit verbundene Übergang üblicherweise als Abgang vom keimbildenden Sieden (DNB) beschrieben. Sobald DNB eintritt, können lokal persistierende Dampfstrukturen oder trockene Stellen die beheizte Wand vom flüssigen Kühlmittel trennen, was zu einer raschen Verringerung des Wärmeübergangskoeffizienten und einem entsprechenden Anstieg der Wandtemperatur führt [ToWe96, GSVL⁺07]. Der CHF stellt daher eine zentrale thermohydraulische Auslegungs- und Sicherheitsgrenze für wassergekühlte Reaktor- Brennelementhüllen dar.

Das Auftreten von CHF lässt sich im Allgemeinen nicht auf einen einzigen physikalischen Mechanismus zurückführen. Je nach Druck, Massenstrom, Unterkühlung, Dampfgehalt und Strömungsregime wurden verschiedene begrenzende Prozesse vorgeschlagen. Zu den mechanistischen Beschreibungen zählen der Abbau einer dünnen Flüssigkeitsschicht unterhalb oder neben Dampfstrukturen, die Ansammlung und das Wachstum von Dampfdecken, Grenzflächeninstabilitäten sowie Einschränkungen der Flüssigkeitsbenetzung [Katt90, CCMS⁺94, LCYA10]. Für das unterkühlte Strömungssieden unterscheiden Le Corre et al. verschiedene CHF-Regime entsprechend der thermodynamischen Qualität und den hydrodynamischen Bedingungen und betonen damit, dass sich der dominierende Auslösemechanismus innerhalb des Betriebsbereichs ändern kann [LCYA10].

Für die im vorliegenden Projekt untersuchten Niederdruck- und unterkühlten Bedingungen wird die Siedekrise in erster Linie als ein Phänomen vom DNB-Typ behandelt. Das Versuchsverfahren konzentriert sich daher auf den Nachweis lokaler Temperaturschwankungen und visuell beobachtbarer Trockenstellen an der Hüllrohr-Oberfläche. Gleichzeitig bleibt die Entwicklung des Siedevorgangs vor dem CHF relevant, da Siedekeimbildung, Blasenwachstum, Koaleszenz, Dampftransport und Wiederbenetzung die lokalen Bedingungen bestimmen, aus denen ein anhaltender Trockenbereich entstehen kann. Eine aussagekräftige Bewertung von ATF-Hüllrohrkonzepten erfordert folglich sowohl die quantitative Bestimmung des CHF als auch die Charakterisierung des vorangehenden Siedeverhaltens.

2.2 Einfluss thermohydraulischer Randbedingungen

Der kritische Wärmeffluss hängt stark vom thermohydraulischen Zustand des Kühlmittels ab. Beim Sieden mit erzwungener Aufwärtsströmung stellen Massenstrom, Druck und Einlassunterkühlung wesentliche Randbedingungen dar, die die Entwicklung der Zweiphasenströmung und die thermische Sicherheitsmarge bis zum Einsetzen der Siedekrise bestimmen. Ihr Einfluss ist über den lokalen thermodynamischen Zustand gekoppelt und kann im Allgemeinen nicht unabhängig voneinander interpretiert werden.

Eine Erhöhung des Massenstroms verbessert im Allgemeinen den Transport von Flüssigkeit zur beheizten Oberfläche und steigert den konvektiven Energieabtransport. Experimentelle

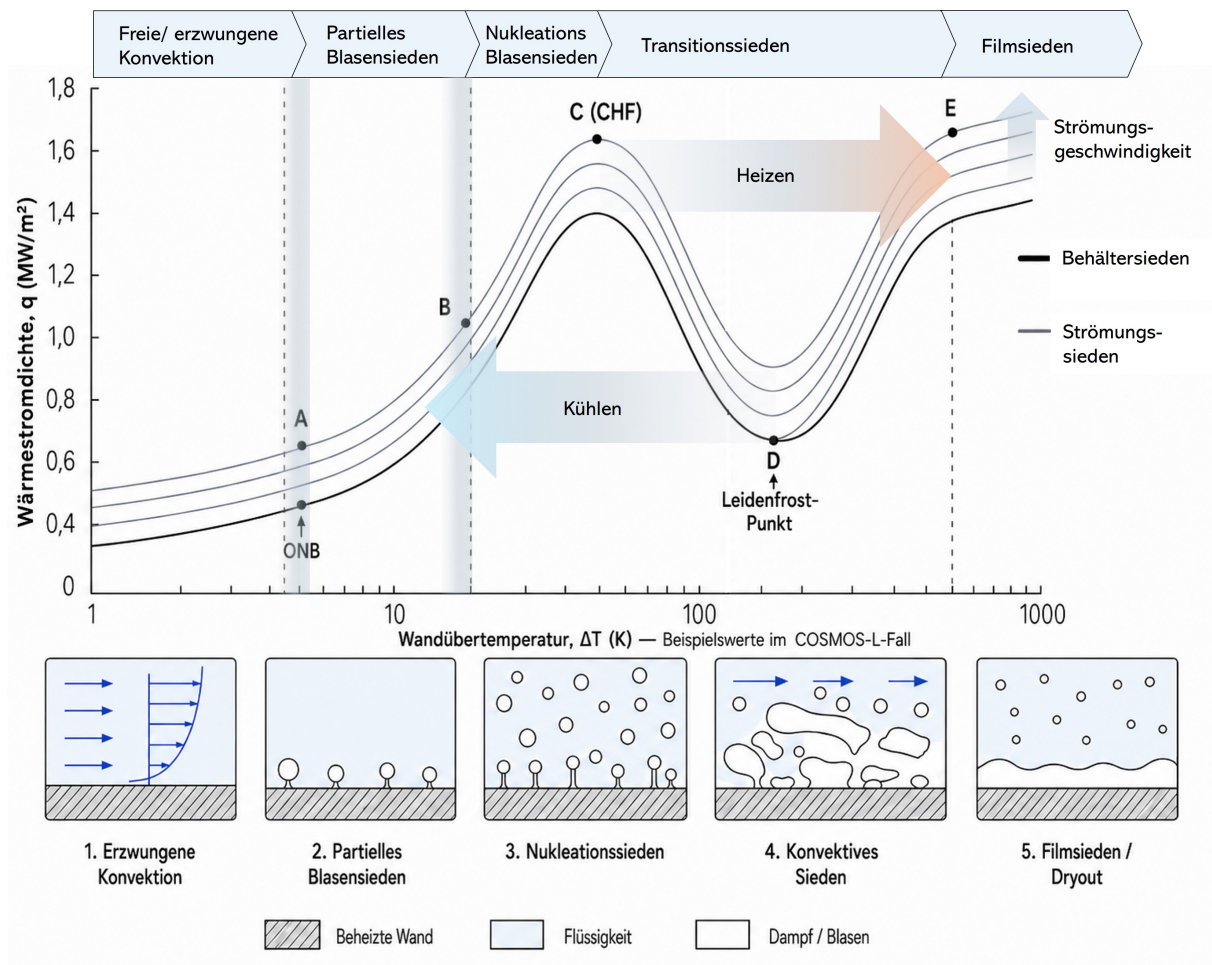


Abbildung 3: Qualitatives Nukiyama-Diagramm zur Veranschaulichung der Wärmeübertragung verschiedener Siederegime. Angelehnt an [VILK15]

Untersuchungen an Stabbündeln zeigen folglich einen Anstieg des kritischen Wärmeflusses (CHF) mit zunehmendem Massenstrom [DZWX24, CSL⁺24]. Eine höhere Einlassunterkühlung erhöht in ähnlicher Weise die Energiemenge, die benötigt wird, bevor das Kühlmittel die Sättigung erreicht, und führt daher tendenziell zu einem Anstieg des erreichbaren Wärmeflusses vor dem CHF. Entsprechend wurde beobachtet, dass ein Anstieg der Einlasstemperatur bei ansonsten vergleichbaren Bedingungen den CHF verringert [DZWX24, CSL⁺24].

Der Einfluss des Drucks ist weniger einheitlich, wenn er isoliert betrachtet wird. Der Druck verändert sowohl die Sättigungstemperatur als auch das Dichteverhältnis, die Latentwärme, die Oberflächenspannung und andere thermophysikalische Eigenschaften, die für das Blasenwachstum und den Zweiphasentransport relevant sind. Duan et al. beobachteten nur eine geringe Druckabhängigkeit, wenn die Einlasstemperatur als unabhängige Randbedingung beibehalten wurde, während Chen et al. einen Anstieg des CHF mit steigendem Druck in einem Niederdruck-Siebenstab-Bündel berichteten [DZWX24, CSL⁺24]. Folglich müssen Druckeffekte im Zusammenhang mit der entsprechenden Unterkühlung und dem thermodynamischen Zustand interpretiert werden und nicht als isolierter Parameter.

Diese Kopplung spricht auch für die Verwendung von enthalpiebasierten Größen zum Vergleich der CHF-Bedingungen. Im vorliegenden Projekt wird der thermische Zustand am Einlass des Testabschnitts zusätzlich durch ein Enthalpie-Fluss-Differential dargestellt

$$\dot{H}_{\text{in}} = \dot{m} c_p (T_{\text{in}} - T_{\text{sat}}(p)), \quad (1)$$

wobei G den Massenstrom, c_p die spezifische Wärmekapazität der Flüssigkeit, T_{in} die Einlasstemperatur und $T_{\text{sat}}(p)$ die Sättigungstemperatur bei dem entsprechenden Druck bezeichnet. Bei unterkühlten Einlassbedingungen ist die in Gleichung 1 definierte Größe negativ und ihr Betrag stellt das Enthalpiedefizit des einströmenden Kühlmittels im Verhältnis zur Sättigung dar.

Die Formulierung fasst die Auswirkungen von Massenstrom, Einlasstemperatur und druckabhängigen Sättigungsbedingungen in einem einzigen thermohydraulischen Deskriptor zusammen. Innerhalb des in diesem Projekt untersuchten Parameterbereichs zeigen die CHF-Daten für alle untersuchten Hüllrohrkonzepte eine annähernd lineare Abhängigkeit von dieser Enthalpie-Strom-Differenz [WVHG⁺26]. Der Parameter eignet sich daher zur Trennung der dominanten CHF-Einflüsse, die durch externe thermohydraulische Bedingungen verursacht werden, von den vergleichsweise geringeren material- und oberflächenabhängigen Unterschieden. Die in den Experimenten beobachteten quantitativen Zusammenhänge werden in Abschnitt 5.1 erörtert.

2.3 Oberflächen & Materialeinfluss

Neben den thermohydraulischen Randbedingungen hängt die Wärmeübertragung beim Sieden maßgeblich vom physikalischen und chemischen Zustand der beheizten Oberfläche ab. Oberflächenmorphologie, Benetzbarkeit und thermophysikalische Materialeigenschaften beeinflussen die Bildung und das Wachstum von Dampfblasen sowie den transienten Wärmeaustausch zwischen der Wand und der Flüssigkeit. Diese Effekte sind besonders relevant, wenn herkömmliche Brennstoffhüllrohre durch eine alternative Legierung ersetzt oder durch eine Oberflächenbeschichtung modifiziert werden, da die äußere Geometrie zwar unverändert bleiben kann, während sich die Bedingungen für die lokale Siedekeimbildung und das Wiederbenetzen ändern.

Die Oberflächentopographie beeinflusst das Keimsieden in erster Linie durch die Verfügbarkeit und Geometrie von Vertiefungen, in denen Dampfkeime zurückgehalten werden können. Mit zunehmender Wandüberhitzung kann eine steigende Anzahl geeigneter Vertiefungen aktiv werden, wodurch sich die Dichte der Siedekeimbildungsstellen erhöht. Folglich kann die Rauheit sowohl den Beginn als auch die Intensität des Siedekeims beeinflussen. Allerdings liefern häufig verwendete integrale Rauheitsparameter wie die arithmetische Mittelrauigkeit R_a oder die Spitzen-Tal-Rauheit R_z , liefern jedoch nur begrenzte Informationen über Größe, Form und

räumliche Verteilung einzelner Hohlräume. Experimente an glatten und mikrostrukturierten Zircaloy-Oberflächen haben gezeigt, dass Modifikationen der Oberfläche zu deutlichen Veränderungen sowohl im Siedeverhalten als auch im CHF führen können [HKS^W18]. Der Zusammenhang zwischen Oberflächenmorphologie und Siedeverhalten lässt sich daher nicht pauschal auf eine monotone Abhängigkeit von einem einzigen Rauheitsparameter reduzieren.

Die Benetzbarkeit liefert eine ergänzende Beschreibung der Wechselwirkung zwischen der Flüssigkeit und der erwärmten Oberfläche. Sie wird üblicherweise durch den Kontaktwinkel charakterisiert, obwohl sich vorlaufende und zurücklaufende Kontaktwinkel aufgrund der Kontaktwinkelhysterese unterscheiden können. Die Benetzbarkeit beeinflusst das Ausbreiten und die Wiederbenetzung der Flüssigkeit an der Wand sowie die Geometrie und die Anhaftung wachsender Blasen. Dementsprechend können Veränderungen der Oberflächenchemie das Siedeverhalten auch ohne wesentliche geometrische Veränderungen beeinflussen. Bei Cr-beschichtetem Zircaloy-4 wurden beispielsweise strahlungsinduzierte Veränderungen der Oberflächenbenetzbarkeit mit entsprechenden Veränderungen des CHF beim Pool-Sieden in Verbindung gebracht [AKHB⁺20]. Die Benetzbarkeit wird zudem explizit oder indirekt in mehrere mechanistische Sied- und Keimbildungsmodelle einbezogen, einschließlich Korrelationen für die Bildung aktiver Siedekeimstellen [LJAC⁺18].

Die thermischen Eigenschaften des Festkörpers führen zu einem zusätzlichen materialspezifischen Einfluss. Die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität in Form der Wärmediffusivität beschreibt das transiente Verhalten bei lokal variierenden Wärmeübertragungsbedingungen bestimmen. Diese Eigenschaften spielen auf den charakteristischen Längen- und Zeitskalen des Blasenwachstums, der Verdampfung von Mikroschichten, der Wandabkühlung und des beginnenden Austrocknens eine Rolle. Eine stark lokalisierte Verringerung der Wärmeübertragung kann daher je nach den thermischen Eigenschaften des Substrats und der Beschichtung zu unterschiedlichen Wandtemperaturverläufen führen. Solche transienten Wandeffekte sind besonders relevant in der Nähe eines CHF, bei dem der Übergang von einer benetzten zu einer lokal trockenen Oberfläche innerhalb kurzer Zeitskalen erfolgen kann [Kim09].

Bei beschichteten Oberflächen wird das resultierende Siedeverhalten durch das Zusammenspiel der Eigenschaften von Beschichtung und Substrat bestimmt. Selbst eine vergleichsweise dünne Schicht kann die Oberflächenchemie, die Benetzbarkeit, die Rauheit und den wandnahen Wärmetransport verändern, ohne die makroskopische Geometrie der Ummantelung wesentlich zu beeinflussen. Die Bedeutung der einzelnen Einflussfaktoren hängt von der Beschichtungsdicke, der Wärmeleitfähigkeit, der Haftung, der Oberflächenvorbereitung und der charakteristischen Längenskala des Siedevorgangs ab. Folglich lässt sich eine Beschichtung im Allgemeinen nicht allein durch die Volumeneigenschaften der Beschichtung oder des Substrats beschreiben.

Diese Kopplung schränkt zudem die Interpretation experimentell beobachteter Materialeffekte ein. Ein Unterschied im CHF oder im Siedekeimbildungsverhalten zwischen zwei Oberflächen lässt allein noch nicht den verantwortlichen Materialparameter erkennen. Korrelationen auf der Grundlage globaler Oberflächendeskriptoren können allgemeine Siedeverläufe reproduzieren, sind jedoch unempfindlich gegenüber lokalen Oberflächenmerkmalen oder materialspezifischen Wechselwirkungen. Eine physikalisch aussagekräftige Bewertung erfordert daher die kombinierte Charakterisierung von Oberflächenmorphologie, Benetzbarkeit, thermischen Eigenschaften und der daraus resultierenden Blasen-Dynamik. Diese Überlegung bildet die Grundlage für die Oberflächencharakterisierung und die optischen Hochgeschwindigkeitsmessungen, die im Rahmen des vorliegenden Projekts durchgeführt werden.

2.4 ATF - Hüllrohrkonzepte

Konzepte für Accident Tolerant Fuel (ATF) Hüllrohre wurden in erster Linie entwickelt, um das Verhalten von Kernbrennstoffelemente unter Unfallbedingungen zu verbessern und gleichzeitig eine akzeptable Leistung während des normalen Reaktorbetriebs aufrechtzuerhalten. Ein zen-

traler Beweggrund ist das Oxidationsverhalten herkömmlicher Hüllrohre auf Zirkoniumbasis in Heißdampfbedingungen. Eine rasche Oxidation kann zu einer erheblichen Wärmefreisetzung und Wasserstoffbildung führen, was zum Fortschreiten schwerer Unfälle beitragen kann. Die ATF-Entwicklung zielt daher auf Hüllrohrkonzepte mit verbesserter Oxidationsbeständigkeit und erhöhter struktureller und chemischer Stabilität bei erhöhten Temperaturen ab [Terr18, BLSLCo16]. Im Rahmen des vorliegenden Projekts ist jedoch nicht das Unfallverhalten selbst die relevante Frage, sondern ob sich solche Modifikationen auch auf das thermohydraulische Verhalten während des normalen Siedevorgangs bis zum CHF auswirken.

Unter den verschiedenen ATF-Strategien stellen chromhaltige Oberflächenmodifikationen von Zirkoniumlegierungen einen evolutionären Ansatz dar, bei dem das bewährte Zr-basierte Substrat beibehalten wird, während dessen Oberfläche durch eine oxidationsbeständige Beschichtung geschützt wird. Chrombeschichtungen haben daher als Mittel zur Verbesserung der Hochtemperatur-Dampfoxidationsbeständigkeit herkömmlicher Brennstabbeschichtungen [BLSLCo16, ŠGSC⁺18] große Beachtung gefunden. Je nach Abscheidungsverfahren und Beschichtungszusammensetzung kann dieser Ansatz nicht nur das Oxidationsverhalten verändern, sondern auch Oberflächeneigenschaften, die für den Wärmeübergang im Siedebereich relevant sind, darunter Benetzbarkeit, Rauheit, Oberflächenchemie und den Wärmeübergang in Wandnähe.

Das vorliegende Projekt befasst sich in erster Linie mit Chromnitrid (CrN) als Konzept zur Oberflächenmodifizierung von ATF. Die untersuchte CrN-Schicht ist so dünn, dass die makroskopischen Abmessungen der Hüllrohrmantel im Wesentlichen unverändert bleiben, während sich die Eigenschaften der Oberfläche und der oberflächennahen Schichten von denen des zugrundeliegenden Zircaloy-4 unterscheiden. Diese Unterscheidung ist wichtig für die Interpretation von Siedeversuchen: Beobachtete Unterschiede zwischen beschichteten und unbeschichteten Hüllrohren unter ansonsten gleichwertigen Strömungsbedingungen lassen sich überwiegend auf das modifizierte Oberflächensystem zurückführen und nicht auf Änderungen der Stabbündelgeometrie. Die in der Fachzeitschrift veröffentlichte Studie verwendet daher ein unbeschichtetes Zr-4-Bündel als Referenz und vergleicht es direkt mit einem ansonsten geometrisch gleichwertigen CrN-beschichteten Zr-4-Bündel [WVHG⁺26].

Eine zweite ATF-Strategie besteht im Ersatz der Hüllrohrmaterialien auf Zirkoniumbasis durch eine alternative Massivlegierung. FeCrAl-Legierungen sind dabei vielversprechende Kandidaten, da ihr Chrom- und Aluminiumgehalt im Vergleich zu herkömmlichen Zirkoniumlegierungen eine verbesserte Oxidationsbeständigkeit in Hochtemperaturdampf bietet [Kim⁺22]. Im Gegensatz zu einer dünnen Beschichtung verändert der Austausch des gesamten Hüllmaterials sowohl die Oberflächeneigenschaften als auch die thermophysikalischen Eigenschaften des Volumens. Folglich können Unterschiede im Siedeverhalten aus einer Kombination von Benetzbarkeit, Oberflächenmorphologie, Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und transienten Wärmespeichereigenschaften resultieren. Dies macht FeCrAl zu einem besonders relevanten Vergleichsfall für die Beurteilung, ob die bei CHF beobachteten Materialeffekte überwiegend oberflächenbedingt sind oder ob auch Volumeneigenschaften dazu beitragen.

Die beiden im Rahmen des Projekts untersuchten Konzepte stellen daher grundlegend unterschiedliche Modifikationsstrategien dar: CrN-beschichtetes Zr-4 behält das herkömmliche Substrat bei und modifiziert hauptsächlich die Oberfläche und den oberflächennahen Bereich, während FeCrAl das Mantelmaterial selbst ersetzt. Der experimentelle Vergleich dieser Konzepte mit unbeschichtetem Zr-4 ermöglicht es, den Einfluss des Einsatzes von ATF auf das Siedeverhalten und die CHF-Leistung innerhalb eines gemeinsamen thermohydraulischen Rahmens zu bewerten. Zusätzliche Versuche mit beschichtetem FeCrAl erweitern diesen Ansatz weiter, indem sie die Untersuchung von Beschichtungs- und Substrateffekten in Kombination ermöglichen.

2.5 Siedekeime und Blasen-Dynamik

Das Nukleationssieden wird durch die wiederholte Aktivierung von Siedekeimen an geeigneten Oberflächenvertiefungen bestimmt, gefolgt von Blasenwachstum, Blasenablösung und Wiederbenetzung der Wand. Zwei Parameter, die häufig zur Charakterisierung dieser Prozesse herangezogen werden, sind die Dichte der aktiven Siedekeimstelle (NSD) und die Blasenabhebefrequenz (BDF). Zusammen liefern beide Größen eine lokalere Beschreibung des Siedeverhaltens als integrale Größen wie der Wandwärmefluss oder der Wärmeübergangskoeffizient.

Die Aktivierung von Siedekeimstellen hängt stark von der Wandüberhitzung ab. Frühe fotografische Siedeveruche zeigten, dass eine zunehmende thermische Belastung zusätzliche Oberflächenvertiefungen aktiviert und folglich die Anzahl der aktiven Siedekeimstellen erhöht [GaWe60, Gaer65]. Dieser Zusammenhang wird zusätzlich durch die Morphologie der beheizten Oberfläche beeinflusst. Oberflächenhöhlräume können Dampf-/ Gasreste zurückhalten und dadurch eine wiederholte Siedekeimbildung begünstigen, sodass Änderungen der Oberflächenvorbereitung und -rauheit zu erheblichen Unterschieden im NSD führen können [CoBr78]. Integrale Rauheitsparameter allein beschreiben jedoch die zugrunde liegende Hohlraumpopulation nicht vollständig, da die Siedekeimbildung von den lokalen Hohlraumabmessungen, der Geometrie und den Benetzungsbedingungen abhängt.

Auch die Strömungsbedingungen beeinflussen die Blasenbildung und das Ablösen der Blasen. Änderungen der Flüssigkeitsgeschwindigkeit verändern die thermische Grenzschicht und die Wechselwirkung zwischen wachsenden Blasen und der Hauptströmung. Lemmert und Chawla brachten eine erhöhte Strömungsgeschwindigkeit mit einer verstärkten Wärmeübertragung und entsprechenden Änderungen im Ablösungsverhalten der Blasen in Verbindung und integrierten diese Effekte in eine empirische NSD- Korrelation [LeCh77]. Neuere Studien mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zum unterkühlten Strömungssieden zeigen ebenfalls, dass die Wandüberhitzung die Siedekeimstellenbildung fördert, während eine zunehmende Unterkühlung und Durchflussrate die Aktivierung und Persistenz von Dampfstrukturen unterdrücken können [RZYS⁺19]. Messungen, die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit Blasenverfolgungsmethoden kombinieren, deuten ferner darauf hin, dass sowohl NSD als auch BDF systematisch mit Betriebsbedingungen wie Wandüberhitzung und Druck variieren [ZhHo20].

Die Bedeutung dieser Größen geht über die phänomenologische Charakterisierung hinaus. Die Dichte der aktiven Siedekeimbildungsstellen, der Durchmesser der ablösenden Blasen sowie die Ablösefrequenz bilden wichtige Schließungsparameter in Wandsiedemodelle, die für die Mehrphasen-CFD verwendet werden. Entsprechende Korrelationen versuchen daher, die nicht aufgelösten mikroskopischen Siedeprozessen mit messbaren Wand- und Flüssigkeitsbedingungen in Beziehung zu setzen. Modelle wie das von Li et al. vorgeschlagene berücksichtigen explizit die Wandüberhitzung und die Benetzbarkeit bei der Vorhersage der Dichte aktiver Siedekeimbildungsstellen [LJAC⁺18]. Ihre Vorhersagefähigkeit hängt jedoch weiterhin davon ab, wie gut die gewählten globalen Parameter den tatsächlichen Oberflächenzustand abbilden.

Diese Einschränkung ist insbesondere bei ATF-Beschichtungen von Bedeutung. Eine modifizierte Oberfläche kann die Hohlraumaktivierung, die Blasenhaftung, die Wiederbenetzung und die lokale Koaleszenz verändern, ohne dass sich der Gesamtwärmefluss entsprechend stark ändert. Folglich liefern NSD und BDF ergänzende Informationen für die Interpretation des materialabhängigen Siedeverhaltens vor dem CHF. Die im Rahmen des vorliegenden Projekts durchgeführten Hochgeschwindigkeitsmessungen wurden daher genutzt, um die räumliche Verteilung und Aktivierung von Siedekeimbildungsstellen sowie die damit verbundenen Blasenabhebefrequenzen auf unbeschichteten und mit einer Chrombeschichtung versehenen Zr-4-Oberflächen zu quantifizieren. Die daraus resultierende Methodik und die experimentellen Beobachtungen werden im Abschnitt 4.4.2 beschrieben.

3 Projektrahmen und Arbeitsprogramm

3.1 Ausgangsbedingungen und Projektrahmen

Das Projekt wurde unter Nutzung der am Institut für Thermische Energietechnik und Sicherheit (ITES) vorhandenen experimentellen und numerischen Infrastruktur durchgeführt. Die COSMOS-L-Anlage bildete die wesentliche experimentelle Grundlage und war zuvor bereits für Untersuchungen zur Siedewärmeübertragung und zur CHF an Hüllrohr-Heizflächen genutzt worden. Ihr Wasserkreislauf, die Druck- und Temperaturregelung, die Stromversorgung, die Prozessinstrumentierung sowie der optische Zugang stellten die allgemeine Infrastruktur bereit, die für die geplanten Niederdruck-Siedeversuche erforderlich war. Das Projekt erforderte daher nicht die Entwicklung einer völlig neuen Versuchsanlage. Allerdings mussten für die vergleichende Untersuchung verschiedener ATF-Hüllrohrmaterialien ein spezieller Stabbündel-Versuchsabschnitt, ein elektrisches Heizkonzept, eine Messanordnung sowie eine entsprechende Messmethodik entwickelt werden.

Zu Beginn des Projekts basierte das geplante Versuchskonzept auf drei austauschbaren Fünf-Stab-Bündeln. Herkömmliches Zr-4 wurde als Referenzmaterial definiert, während eine chromhaltige Oberflächenmodifikation von Zr-4 und FeCrAl die beiden wichtigsten ATF-Konzepte darstellten. Die umgebende Druckhülle, der optische Zugang und die wichtigsten Anlagensensorik sollten zwischen den einzelnen Bündelversuchsreihen unverändert bleiben. Dieser Ansatz wurde gewählt, um systematische Unterschiede zwischen den materialspezifischen Experimenten zu minimieren und eine gemeinsame Grundlage für den Vergleich der gemessenen CHF-Werte zu schaffen.

Die bestehende COSMOS-L-Infrastruktur bot zudem Zugang zu optischen Hochgeschwindigkeitsdiagnosegeräten und numerischen Werkzeugen zur Unterstützung der experimentellen Entwicklung. CFD-Berechnungen wurden von Beginn an als begleitender Bestandteil des Projekts einbezogen. Ihre Aufgabe bestand darin, die Hydraulik des Testabschnitts zu charakterisieren, die Festlegung der Sensorpositionen und der experimentellen Randbedingungen zu unterstützen und anschließend zur Interpretation der Siedemessungen beizutragen. Die numerischen Aktivitäten wurden durch CAD- und Finite-Elemente-Werkzeuge für die mechanische, elektrische und thermische Entwicklung der Stabbündelkonfiguration ergänzt.

Das Projekt war formal nicht mit einem anderen geförderten Forschungsprojekt verknüpft. Die Arbeit baute jedoch direkt auf den zuvor bei COSMOS-L gewonnenen experimentellen Erfahrungen auf, insbesondere in Bezug auf Niederdruck-Siedeversuche, CHF-Erkennung, optische Diagnostik und den Einfluss modifizierter Hüllrohr-Oberflächen. Diese vorhandene Infrastruktur und Erfahrung reduzierten den Aufwand für den grundlegenden Ausbau der Anlage, während die Anpassung an eine austauschbare ATF-Stabbündelkonfiguration eine wesentliche projektspezifische Entwicklungsaufgabe darstellte.

3.2 Arbeitsprogramm

Das ursprüngliche Arbeitsprogramm war in sieben miteinander verbundene Arbeitspakete gegliedert. Das erste Arbeitspaket (A1) umfasste die Einarbeitung in die wissenschaftlichen und technischen Hintergründe sowie eine Literaturrecherche zu ATF-Hüllrohrkonzepten, Strömungsieden und CHF, Zweiphasen-Messverfahren und numerischen Ansätzen zur Analyse von Siedeströmungen. Diese Aktivität sollte die wissenschaftliche Grundlage für die anschließende Versuchsplanung liefern und wurde während des gesamten Projekts fortgesetzt, wann immer zusätzliche Informationen benötigt wurden.

Das Arbeitspaket A2 befasste sich mit der Auslegung und der Simulation vor dem Test des Testabschnitts. Ausgehend von der vorgesehenen Stabbündelgeometrie wurden numerische Berechnungen geplant, um die Strömungsverteilung zu charakterisieren, die Auslegung des Einlassbereichs zu unterstützen und bei der Auswahl geeigneter Sensorpositionen zu helfen. Das numerische Mo-

dell sollte zunächst von Einphasenberechnungen zu Zweiphasensimulationen übergehen, die Modelle für Wandverdampfung und Blasenpopulation einbeziehen. Die Simulationen waren daher sowohl als Auslegungswerkzeug als auch als Grundlage für die spätere Interpretation der Versuchsergebnisse konzipiert.

Der Aufbau und die Integration des Versuchssystems bildeten das Arbeitspaket A3. Dazu gehörten die detaillierte Auslegung und Fertigung der Stabbündelkomponenten, die Anpassung der elektrischen Beheizung und der Messtechnik an die verschiedenen Hüllrohrmaterialien sowie die Implementierung des fertigen Versuchsabschnitts bei COSMOS-L. Eine zentrale Anforderung an die Auslegung war, dass die äußere Bündelgeometrie und die umgebende Versuchskonfiguration für die verschiedenen Materialien so ähnlich wie möglich bleiben sollten.

Das Arbeitspaket A4 umfasste die vor den systematischen Messkampagnen erforderlichen Vorversuche. Zu diesen Aktivitäten gehörten die technische Qualifizierung einzelner Konstruktionskonzepte, die Inbetriebnahme der angepassten Versuchsanlage, die Bewertung der Messqualität sowie die Bestimmung der Unsicherheit der wichtigsten Versuchsgrößen. Die Voruntersuchungen sollten zudem klären, ob für einen aussagekräftigen Materialvergleich ausreichend reproduzierbare Betriebsbedingungen erreicht werden konnten.

Das zentrale Versuchsprogramm wurde dem Arbeitspaket A5 zugeordnet. Für das Zr-4 Referenzbündel und die beiden ATF-Bündelkonzepte waren Flow-Boiling-Versuche bis hin zum CHF geplant. Die wichtigsten thermohydraulischen Parameter sollten systematisch variiert werden, wobei für die einzelnen Werkstoffe gleichwertige Messverfahren beibehalten wurden. Wiederholte Messungen bildeten einen wesentlichen Bestandteil des Programms, um systematische werkstoffabhängige Unterschiede von der experimentellen Unsicherheit und der intrinsischen statistischen Schwankung des CHF zu unterscheiden.

Das Arbeitspaket A6 umfasste die Nachversuchsanalyse und die gemeinsame Auswertung der experimentellen und numerischen Ergebnisse. Das ursprüngliche Programm sah eine detaillierte Bewertung der wichtigsten Parameter vor, die das CHF beeinflussen, sowie den Einsatz von Nachversuchssimulationen zur Unterstützung der Interpretation der Messungen. Materialbezogene Größen wie Benetzbarkeit, Oberflächenbeschaffenheit, Siedekeimbildungsverhalten und thermophysikalische Eigenschaften wurden als potenzielle Parameter für eine detailliertere Analyse identifiziert. Die daraus resultierende experimentelle Datenbank sollte zudem die anschließende Entwicklung und Validierung von Siedungs- und CHF-Modellen unterstützen.

Schließlich umfasste das Arbeitspaket A7 die Dokumentation und Verbreitung der Ergebnisse. Experimentelle und numerische Daten sollten fortlaufend dokumentiert werden, während wissenschaftlich relevante Zwischen- und Endergebnisse für die Präsentation auf Konferenzen und die Veröffentlichung in Fachzeitschriften mit Peer-Review vorgesehen waren. Dementsprechend wurden die Datenauswertung und die wissenschaftliche Verbreitung nicht ausschließlich als Aktivitäten am Ende des Projekts betrachtet, sondern überschneiden sich zunehmend mit den späteren Versuchsphasen.

3.3 Entwicklung des Arbeitsprogramms

Das Projekt verlief iterativ und nicht als streng sequenzielle Abfolge der einzelnen Arbeitspakete. Die Ergebnisse aus Vorversuchen und numerischen Analysen flossen wiederholt in die mechanische und elektrische Auslegung des Testabschnitts ein, während die bei der Inbetriebnahme gewonnenen Erfahrungen zu weiteren Anpassungen vor den eigentlichen Messkampagnen führten. Dieses iterative Vorgehen war notwendig, um die beabsichtigte Bündelgeometrie und Messqualität unter den vergleichsweise hohen elektrischen Strömen aufrechtzuerhalten, die für die direkte ohmsche Erwärmung der Hüllrohre erforderlich waren.

In der frühen Entwicklungsphase erwies sich das elektrische Heizkonzept als eine der größten technischen Herausforderungen. Elektromagnetische Wechselwirkungen zwischen den direkt be-

heizten Stäben führten zu einer mechanischen Durchbiegung des Bündels bereits bei elektrischen Belastungen, die unter den für die CHF-Experimente letztendlich erforderlichen Werten lagen. Die Konstruktion der Testanlage wurde daher um eine magnetisch kompensierte Stromversorgungsanordnung für die äußeren Stäbe erweitert. Parallel dazu wurden numerische Analysen genutzt, um die Einlassströmungsverteilung zu verbessern und die Entwicklung eines speziellen Strömungsgleichrichters zu unterstützen. Diese Anpassungen behielten das ursprüngliche Ziel bei, reproduzierbare und vergleichbare Stabbündelbedingungen zu schaffen, erforderten jedoch eine umfangreichere Entwicklung der Testanlage, als dies in der Antragsphase im Detail festgelegt werden konnte.

Nach der Inbetriebnahme wurde das Versuchsprogramm vom Zr-4-Referenzbündel auf die CrN-beschichtete Zr-4-Konfiguration ausgeweitet. Diese Messkampagnen legten das grundlegende Versuchsverfahren fest und lieferten die erste vergleichende CHF-Datenbank. Parallel dazu wurden unterstützende Analysen durchgeführt, und Zwischenergebnisse aus der entwickelten Stabbündel-Methodik sowie aus dem Vergleich zwischen unbeschichtetem und beschichtetem Zr-4 wurden im Laufe des Projekts veröffentlicht [WHHG⁺24, WHGC24].

Die anschließende Implementierung des FeCrAl-Bündels erforderte zusätzliche materialspezifische Anpassungen. Insbesondere unterschieden sich die Anforderungen an die Fertigung und die thermische Verbindung von denen der Zr-4-basierten Konfigurationen und wurden daher durch zusätzliche Voruntersuchungen und Modifikationen der Stabbaugruppe berücksichtigt. Die FeCrAl-Messreihe schloss sich somit an die ersten beiden Bündelserien an und erweiterte den experimentellen Vergleich von einem vorwiegend oberflächenmodifizierten System hin zu einem alternativen Mantelmaterial.

Die ursprüngliche Projektlaufzeit wurde kostenneutral um ein viertes Projektjahr verlängert. Die Verlängerung wurde in erster Linie dazu genutzt, das Versuchsprogramm hinsichtlich Fe-CrAl und der Wechselwirkung zwischen Beschichtungs- und Substrateigenschaften zu erweitern. Zusätzlich zu den Hauptkonfigurationen Zr-4, CrN-beschichtetes Zr-4 und FeCrAl wurde eine CrN-beschichtete FeCrAl-Hüllrohrmaterialie in das abschließende Stabbündelprogramm aufgenommen. Diese zusätzliche Konfiguration lieferte eine weitere experimentelle Grundlage, um Effekte, die mit einer Oberflächenbeschichtung zusammenhängen, von denen zu unterscheiden, die auf das darunterliegende Mantelmaterial zurückzuführen sind. Die abschließenden Projektstatusdokumente dokumentierten die abgeschlossenen CHF-Mess- und Auswertungsaktivitäten für Zr-4, CrN-beschichtetes Zr-4, FeCrAl und CrN-beschichtetes FeCrAl.

Der Umfang der experimentellen Analyse wurde zudem über den integralen CHF-Vergleich hinaus erweitert. Hochgeschwindigkeitsmessungen des Siedeverhaltens wurden zunehmend eingesetzt, um das lokale Keimbildungsverhalten und die Blasenabtrenncharakteristika an ausgewählten Hüllrohr-Oberflächen zu untersuchen. Die entsprechende Bildverarbeitungsmethodik ermöglichte die Bestimmung der Dichte aktiver Keimbildungsstellen und der Blasenabtrennfrequenz anhand vollständiger Hochgeschwindigkeitssequenzen und bildete anschließend die Grundlage für einen speziellen Konferenzbeitrag [WVHG25]. Diese Messungen ergänzten das ursprüngliche CHF-orientierte Programm, indem sie zusätzliche Informationen zum oberflächenabhängigen Siedeverhalten vor der Siedekrise lieferten.

Gleichzeitig gewann die numerische Arbeit im Vergleich zum ursprünglichen Arbeitsprogramm zunehmend an Bedeutung. CFD- und Finite-Elemente-Berechnungen erwiesen sich als besonders nützlich für die hydraulische Optimierung, die thermische und elektrische Auslegung, die Sensorpositionierung sowie die Charakterisierung der quasi-stationären Zustände vor dem CHF. Die transiente Entstehung und Ausbreitung des lokalen Trockenbereichs während der Siedekrise selbst konnte jedoch mit dem angewandten CFD-Ansatz nicht mit ausreichender Robustheit abgebildet werden, um als Vorhersagegrundlage für die experimentellen CHF-Werte zu dienen. Die numerischen Arbeiten wurden daher zunehmend als unterstützendes Auslegungs- und Auswertungswerkzeug und weniger als direkter Prädiktor für den CHF-Übergang genutzt. Die

Auswirkungen dieser methodischen Weiterentwicklung auf die Erreichung der ursprünglichen Projektziele werden separat in Abschnitt 7 bewertet.

Insgesamt wurde im Verlauf des Arbeitsprogramms das ursprüngliche experimentelle Ziel beibehalten, während einzelne Methoden angepasst und die verfügbare Datenbank entsprechend den im Projekt gewonnenen Erkenntnissen erweitert wurden. Die Hauptversuchsreihe reichte von der Entwicklung und Qualifizierung des Stabbündel-Versuchsabschnitts über die Versuchsreihen mit Referenz- und beschichtetem Zr-4 bis hin zu FeCrAl und der zusätzlich beschichteten FeCrAl-Konfiguration. Numerische Analysen, Oberflächencharakterisierung, optische Messungen und Datenauswertung begleiteten diese Aktivitäten während des gesamten Projekts, anstatt streng voneinander getrennte aufeinanderfolgende Phasen zu bilden.

Tabelle 3: Zeitplanung und Arbeitspakete des Vorhabens.

	1. Jahr				2. Jahr				3. Jahr				4. Jahr			
Arbeitspakete	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
A1: Einarbeitung und Recherche	■															
A2: Pretest-Simulation		■	■	■	■											
A3: Design, Herstellung der Teststrecken			■	■	■	■							■			
A4: Vorversuche			■	■	■	■										
A5: Experimente					■	■	■	■	■	■	■	■				
A6: Posttest-Analysen									■	■	■			■	■	
A7: Dokumentation, Publikation										■	■	■			■	■
Meilensteine					M1	M2	M3					M4	M5	M4		M5

4 Experimentelle und numerische Methodik

4.1 Versuchsanlage und Stabbündel-Teststrecke

Die experimentellen Untersuchungen wurden in der COSMOS-L-Anlage (Critical Heat Flux On Smooth and Modified Surfaces – Low Pressure) am Karlsruher Institut für Technologie durchgeführt. COSMOS-L ist eine Wasserkreislaufanlage, die für experimentelle Untersuchungen zur Siedewärmeübertragung und zum kritischen Wärmefluss unter kontrollierten Niederdruckbedingungen konzipiert wurde. Die Anlage wurde zuvor für Untersuchungen mit ummantelten Heizflächen genutzt und im Rahmen des vorliegenden Projekts für Vergleichsmessungen in einer Konfiguration mit fünf Stabbündeln angepasst [KaSG24, WVHG⁺26].

Entionisiertes Wasser wird durch eine Zahnradpumpe im Primärkreislauf umgewälzt. Der Massenstrom wird durch die Pumpe und ein Bypass-System geregelt und mit einem Coriolis-Durchflussmesser gemessen. Der Systemdruck wird mithilfe eines unter Druck stehenden Gasbalgbehälters in Kombination mit einer elektrischen Heizung eingestellt, während die Kühlmitteltemperatur durch einen externen Wärmetauscher und einen elektrisch gesteuerten Vorwärmer vor der Teststrecke geregelt wird. Für die Hauptmessungen am Stabbündel standen Absolutdrücke von etwa 1–3 bar zur Verfügung. Diese Konfiguration ermöglichte es, Druck, Massenstrom und Einlassunterkühlung über den für die vergleichenden CHF-Experimente relevanten Parameterbereich einzustellen [WVHG⁺26].

Die Stromversorgung erfolgte über einen Niederspannungs-Hochstrom-Wechselstromtransformator. Für die Stabbündelkonfiguration standen Ströme von bis zu etwa 1,6 kA zur Verfügung. Vor den Siedemessungen wurde das zirkulierende Wasser erwärmt und entgast. Für die wichtigsten CHF-Messkampagnen wurde die Konzentration an gelöstem Sauerstoff vor Beginn der einzelnen Messsequenzen auf etwa 0,6–1,2 mg l⁻¹ reduziert. Die Aufrechterhaltung vergleichbarer Wasserbedingungen in Verbindung mit kontrollierten thermohydraulischen Randbedingungen bildete eine wichtige Voraussetzung für den Vergleich zwischen den verschiedenen Hüllrohrmaterialien [WVHG⁺26].

Für das Projekt wurde ein spezielles, vertikal ausgerichtetes Stabbündel aus fünf Hüllrohrproben entwickelt. Die Stäbe waren in einer Kreuzanordnung angeordnet, die aus einem zentralen und vier umgebenden Hüllrohren bestand. Das Bündel wurde in einen quadratischen Strömungskanal aus Edelstahl eingebaut, der entlang des beheizten Bereichs optisch einsehbar war. Der innere Querschnitt des Kanals betrug $43,7 \times 43,7 \text{ mm}^2$. Der Mittenabstand zwischen dem zentralen Stab und jedem umgebenden Stab betrug 14,5 mm, während benachbarte äußere Stäbe einen Abstand von 20,5 mm zueinander hatten. Die untersuchten Hüllrohre hatten einen Nennaußendurchmesser von 9,5 mm, einen Innendurchmesser von 8,36 mm und eine elektrisch beheizte Länge von 300 mm [WVHG⁺26].

Die Druckhülle, die optischen Schaugläser und die Hauptmesstechnik wurden beim Austausch der materialspezifischen Stabbündel beibehalten. Folglich blieb die äußere Versuchsgeometrie zwischen den Hauptmesskampagnen unverändert. Dies war unerlässlich, um systematische materialabhängige Effekte von Veränderungen zu trennen, die durch die Versuchskonfiguration selbst verursacht wurden.

Die Hüllrohre wurden direkt ohmsch beheizt, für eine volumetrische Wärmefreisetzung innerhalb der Prüflinge. Während der Entwicklungsphase führten die hohen elektrischen Ströme jedoch zu einer ausgeprägten elektromagnetischen Wechselwirkung zwischen den parallelen Stäben. Vorversuche zeigten bereits bei Heizleistungen, die deutlich unter den für die geplanten CHF-Messungen erforderlichen Werten lagen, eine nach innen gerichtete oszillierende Durchbiegung der äußeren Stäbe.

Daher wurde für die vier äußeren Stäbe eine magnetisch kompensierte elektrische Konfiguration entwickelt. Der Rückleiter wurde koaxial innerhalb des entsprechenden Hüllrohrs positioniert,

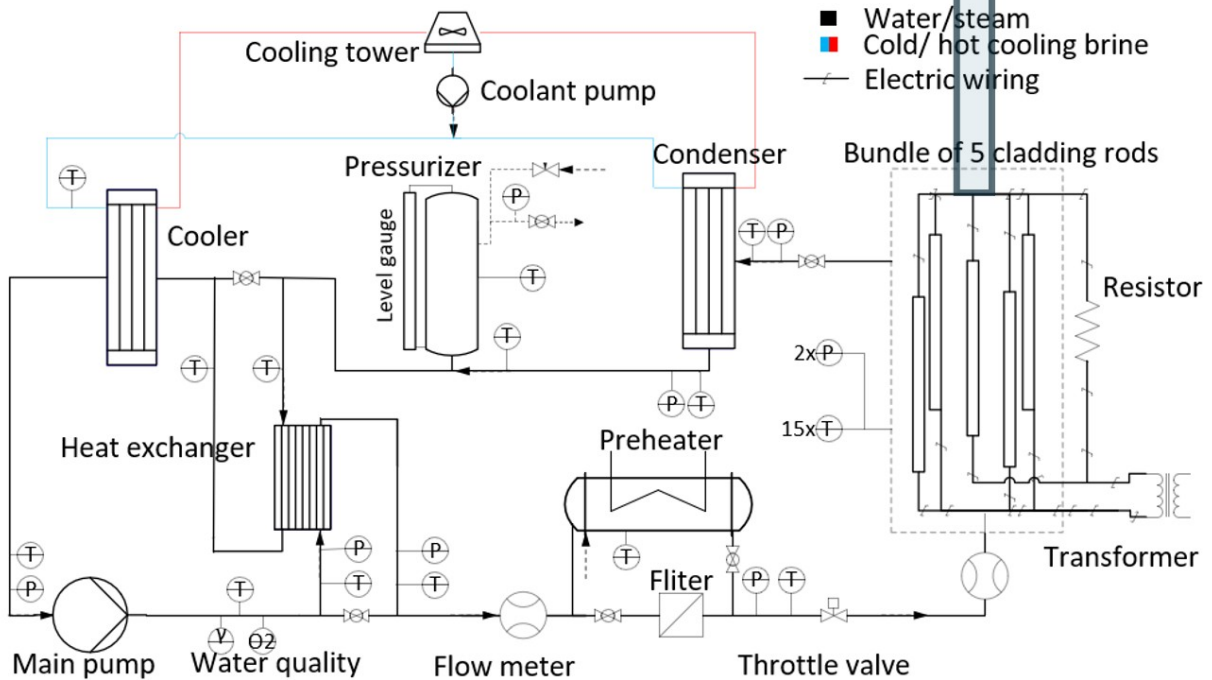


Abbildung 4: COSMOS-L Versuchsanlage mit integrierter Teststrecke zur Untersuchung von Stabbündelproben am ITES, KIT.

T: Temperatursensoren, P: Drucksensoren.

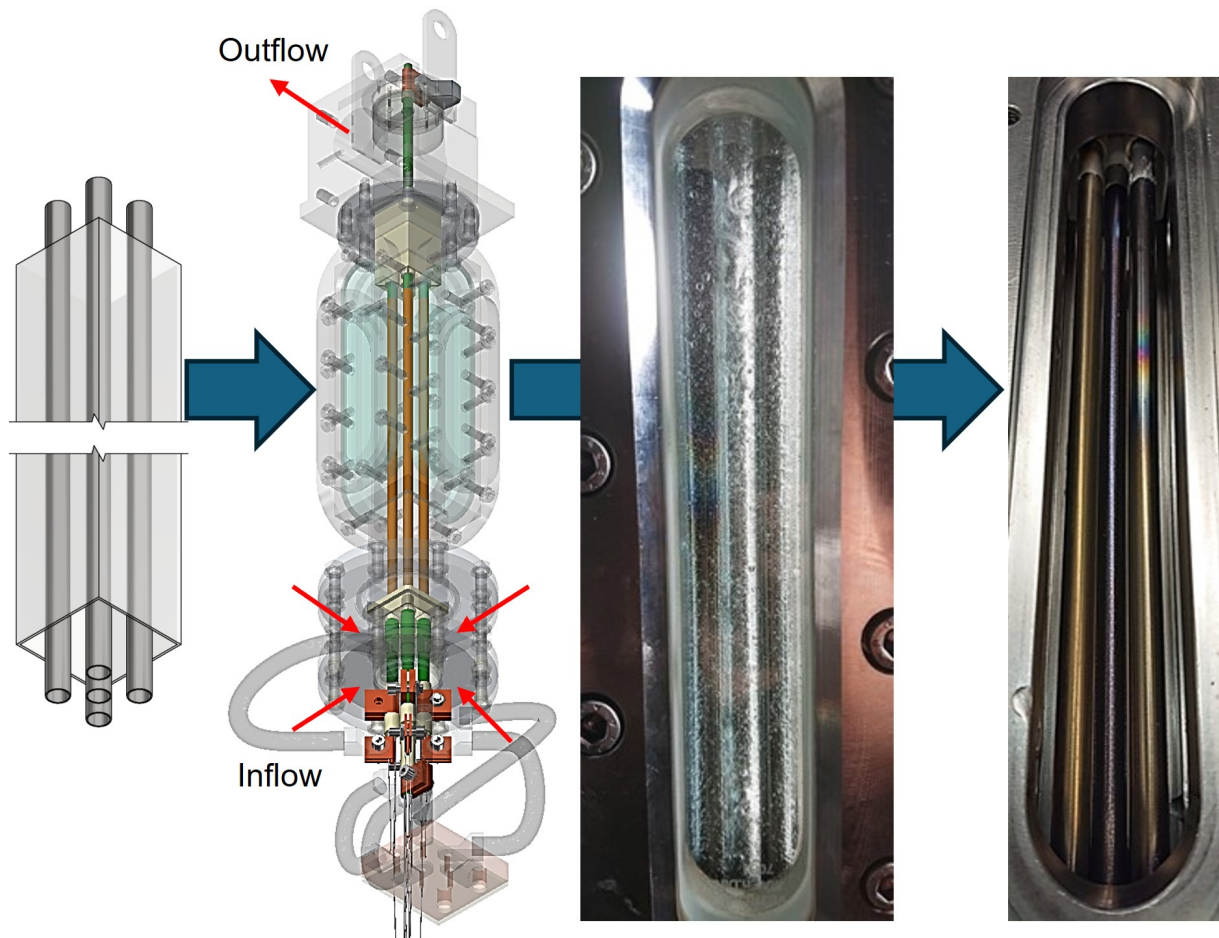


Abbildung 5: Abgebildet ist die Anordnung der Hüllrohre in einem Stabbündel, dass aus fünf identischen Hüllrohrproben besteht, jeweils als Konzeptphase, der CAD-Phase, der Versuchsphase und der Nachbereitungsphase illustriert.

wobei entgegengesetzte Stromrichtungen das effektive Magnetfeld außerhalb des Leiterpaares reduzierten. Die Beheizung des zentralen Stabs als Hauptmesszone wurde nicht-koaxial ausgelegt, um eine möglichst hohe Messstellendichte im Hüllrohrinneren zu erreichen. Diese Anordnung reduzierte die elektromagnetische Wechselwirkung innerhalb des Bündels genügend, sodass keine Durchbiegungen im Experiment nachgewiesen werden konnten.

Ein zweiter Entwicklungsschwerpunkt betraf die Verteilung des Einlassstroms des Kühlmittels. Die ursprüngliche Einlassgeometrie führte zu einer räumlich ungleichmäßigen Geschwindigkeitsverteilung, bevor das flüssige Wasser in das beheizte Bündel eintrat. Daher wurde mit Hilfe numerischer Berechnungen ein zur Teststrecke passender Strömungsgleichrichter entwickelt. Dieses Bauteil verstärkte die Durchmischung im Einlassbereich und reduzierte die für die ursprüngliche Konfiguration vorhergesagte ausgeprägte zentrale Strahlstruktur. Strömungsgleichrichter und obere Stabbündellager in der Druckhülle wurden mittels additiver Fertigung hergestellt, was eine schnelle geometrische Anpassung während der Entwicklungsphase ermöglichte.

Die elektrische und thermische Konfiguration wurde während der Inbetriebnahme weiter angepasst. In den koaxial gespeisten Außenstäben wurde ein wärmeleitendes keramisches Füllmaterial zwischen dem Innenleiter und der umgebenden Ummantelung eingebracht, um den radialen Wärmeübergang zu verbessern und Umfangstemperaturungleichmäßigkeiten zu verringern. Für die spätere FeCrAl-Konfiguration waren zusätzlich materialspezifische Anpassungen erforderlich, insbesondere hinsichtlich der Fertigung sowie der thermischen und elektrischen Anbindung der Hüllrohre.

4.2 Hüllrohrmaterialien und Oberflächencharakterisierung

Die wichtigsten Vergleichsversuche mit Stabbündeln wurden unter Verwendung von unbeschichtetem Zircaloy-4 (Zr-4) als Referenzmaterial, von CrN-beschichtetem Zr-4 als oberflächenmodifiziertem ATF-Konzept und von FeCrAl (Kanthal APM) als alternativem Grundmaterial eines Hüllrohrs durchgeführt. Die Außenabmessungen der Stäbe wurden zwischen den einzelnen Konfigurationen so weit wie möglich gleich gehalten, um die hydraulische Geometrie des Testabschnitts beizubehalten [WVHG⁺26].

Die CrN-beschichtete Ummantelung bestand aus einem Zr-4-Substrat mit einer etwa $8\text{ }\mu\text{m}$ dicken CrN-Schicht und einer 100 nm dicken Ti-Zwischenschicht, die mittels physikalischer Gasphasenabscheidung (PVD) aufgebracht wurde. Die Ti-Zwischenschicht diente dazu, die Haftung zwischen der Beschichtung und dem Substrat zu verbessern. Im Gegensatz dazu wurden die FeCrAl-Stäbe vollständig aus Kanthal APM gefertigt und stellten somit eine gleichzeitige Änderung sowohl der Oberflächenbeschaffenheit als auch des Grundmaterials der Ummantelung dar.

Tabelle 4 fasst die wichtigsten geometrischen und oberflächenbezogenen Eigenschaften zusammen, die für die vergleichende Bewertung herangezogen wurden. Die thermophysikalischen Werte entsprechen Werten nahe der Raumtemperatur und wurden aus den verfügbaren Referenzen zu Materialeigenschaften [ORN16, Chas98, Kant24, MAT01] entnommen.

Die Oberflächenrauheit wurde mittels Kontaktprofilometrie bestimmt. Messungen an verschiedenen axialen und Umfangspositionen ergaben Mittelwerte von $R_a = 0,13\text{ }\mu\text{m}$ für Zr-4, $0,15\text{ }\mu\text{m}$ für CrN-beschichtetes Zr-4 und $0,25\text{ }\mu\text{m}$ für FeCrAl. Die entsprechenden Standardabweichungen betrugen etwa $0,025\text{ }\mu\text{m}$, $0,018\text{ }\mu\text{m}$ bzw. $0,045\text{ }\mu\text{m}$ [WVHG⁺26]. Die FeCrAl-Oberfläche wies somit im Rahmen des Vergleichs der Hauptwerkstoffe die höchste integrale Rauheit auf.

Die Benetzbarkeit wurde in entionisiertem Wasser bei $25\text{ }^\circ\text{C}$ unter Verwendung eines Tensiometers nach der Wilhelmy-Methode charakterisiert. Für jedes untersuchte Hüllrohr wurden fünf Eintauch- und Rückzugszyklen durchgeführt. Die für die vergleichende Auswertung herangezogenen mittleren Kontaktwinkel betrugen etwa 85° für Zr-4, 73° für CrN-beschichtetes Zr-4 und 50° für FeCrAl [WVHG⁺26]. Diese Messungen beschreiben den Oberflächenzustand

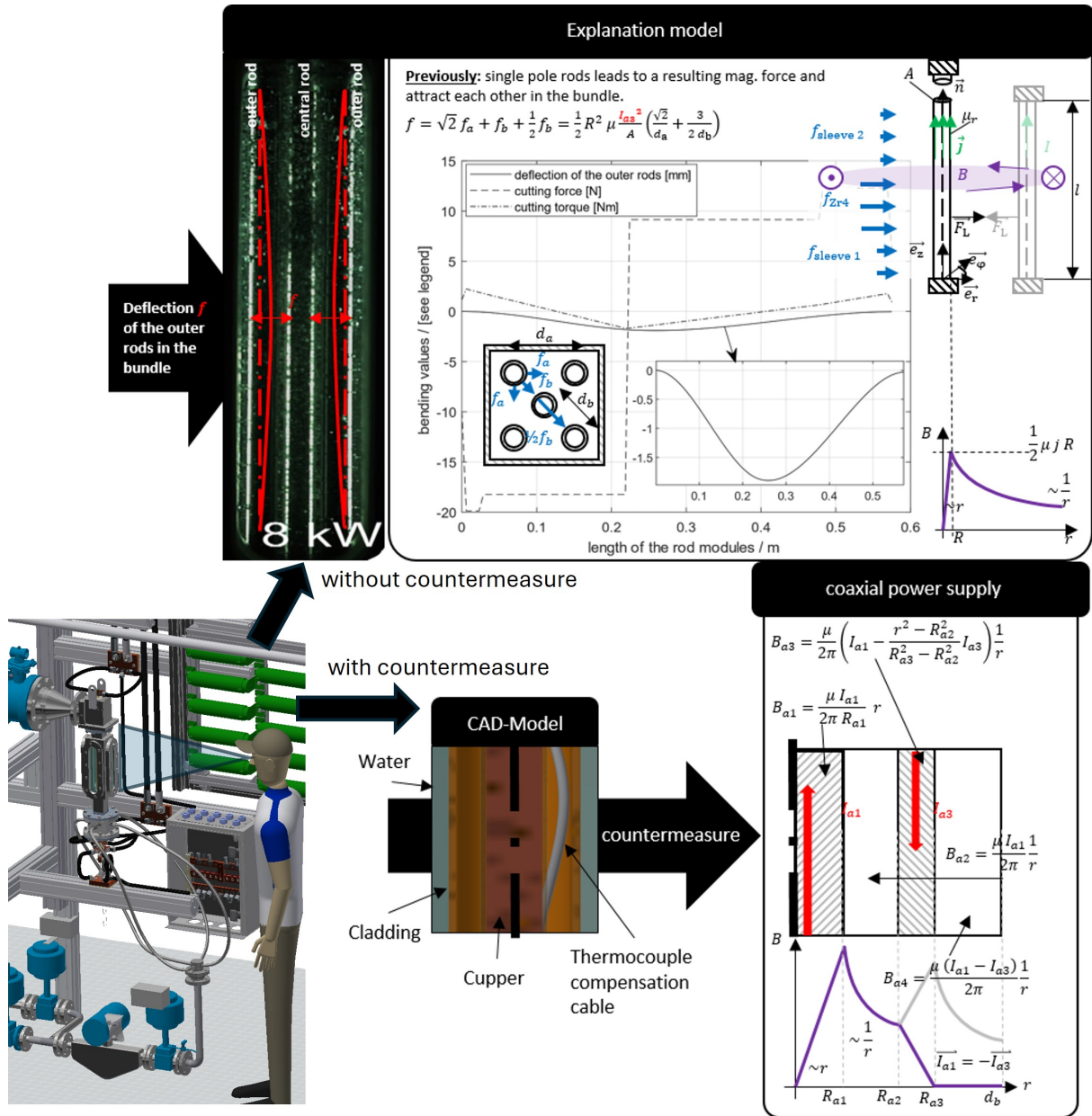


Abbildung 6: Koaxiales Heizkonzept in den Hüllrohren zur Eliminierung magnetischer Kräfte im Stabbündel während des Experiments. Die magnetische Flussdichte B ist als violette Kurve entlang der Normalen zum Hüllrohr dargestellt.

Tabelle 4: Geometrische, oberflächenbezogene und thermophysikalische Eigenschaften der Hüllmaterialien der CHF-Hauptuntersuchungsreihe. Die Oberflächenrauheit und die Kontaktwinkel wurden experimentell bestimmt, die thermophysikalischen Eigenschaften wurden der Literatur entnommen.

Eigenschaft	Zr-4	CrN-beschichtetes Zr-4	FeCrAl
Außendurchmesser / mm	9.50	9.516	9.50
Innendurchmesser / mm	8.36	8.36	8.36
Wandstärke / mm	0.57	0.578	0.57
Beheizte Länge / mm	300	300	300
R_a / μm	0.13	0.15	0.25
R_z / μm	1.34	1.67	3.01
Mittlerer Kontaktwinkel / $^\circ$	85	73	50
Thermische Leitfähigkeit / $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	13.4	2.0	11.0
Spezifische Wärmekapazität / $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	281	460	460
Beschichtungsdicke / μm	–	8	–

bei Raumtemperatur und wurden als vergleichende Materialkennwerte und nicht als isolierte Prädiktoren für das Siedeverhalten herangezogen.

In ergänzenden Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Siedeströmung wurden blankes Zr-4, eine CrN-Beschichtung von nominal $8 \mu\text{m}$ auf Zr-4 sowie ein zusätzliches Zr-4-Prüfstück mit einer $30 \mu\text{m}$ dicken Cr-Beschichtung verwendet [WVHG25]. Diese Proben wurden speziell zur Untersuchung der Aktivierung von Siedekeimstellen und des Blasenabhebefrequenz verwendet und werden daher getrennt vom Hauptvergleich der drei Werkstoffe im Stabbündel behandelt.

Im Rahmen des erweiterten Projektprogramms wurden zusätzliche CHF-Messungen mit CrN-beschichtetem FeCrAl durchgeführt. Diese Konfiguration erweiterte die experimentelle Datenbank um eine kombinierte Variation von Beschichtung und Substrat. Da die entsprechenden Messungen nicht in den in [WVHG⁺26] veröffentlichten Datensatz einbezogen wurden, werden sie als Erweiterung der primären Versuchsmatrix behandelt und nicht nachträglich in diesen veröffentlichten Vergleich integriert.

4.3 Instrumentierung & numerischen Vorauslegung

Das Messsystem kombinierte herkömmliche thermohydraulische Messtechnik mit elektrischen Leistungsmessungen und synchronisierter Hochgeschwindigkeitsaufnahme. Der Kühlmittelmassenstrom wurde mit einem Coriolis-Durchflussmesser gemessen, während Druck- und Temperatursensoren an relevanten Stellen der Anlage und des Testabschnitts installiert wurden. Die elektrische Leitfähigkeit und der Gehalt an gelöstem Sauerstoff wurden überwacht, um den Zustand des zirkulierenden Wassers zu charakterisieren, insbesondere in Hinblick abgelöster Beschichtungspartikel und parasitärer Siedekeime.

Die Hüllrohrtemperaturen wurden mit Thermoelementen vom Typ K mit einem Drahtdurchmesser von etwa $0,34 \text{ mm}$ gemessen. Während der Entwicklung des Testabschnitts wurde die Anordnung der Thermoelemente im Inneren des Zentralstabs verfeinert, um die für die CHF-Erkennung verfügbare räumliche Auflösung zu verbessern. Die Messtechnik konzentrierte sich auf den Zentralstab, während die elektrische Konfiguration des Bündels so ausgelegt wurde, dass das Auftreten und die Erkennung von CHF in diesem fein instrumentierten Bereich begünstigt wurden.

Die elektrische Heizleistung wurde aus synchronisierten Spannungs- und Strommessungen ermittelt. Zur Überwachung der Hochstrom-Wechselstromversorgung wurden Präzisionsstromwandler

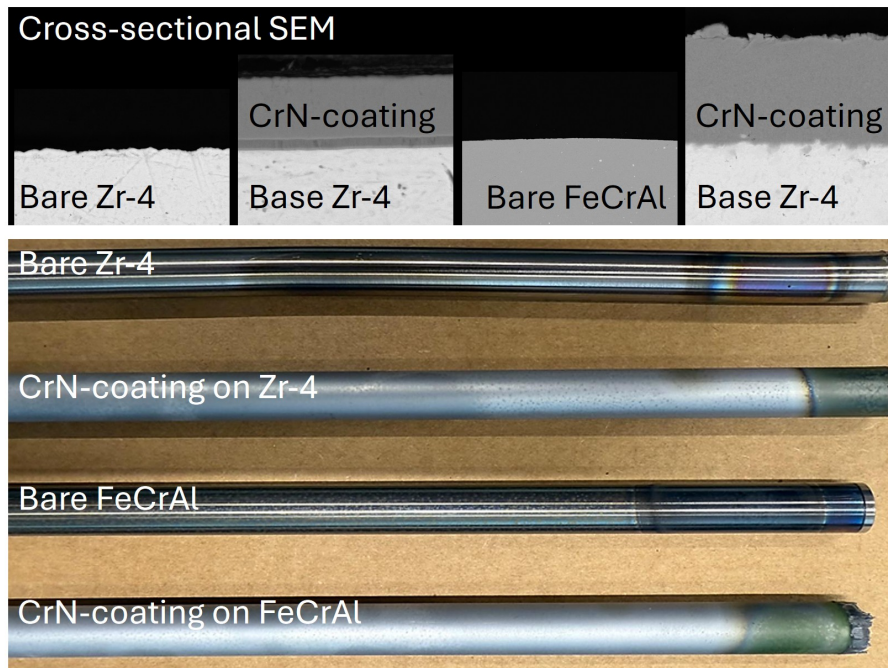


Abbildung 7: Es wurden ATF-Hüllrohre auf Basis von Cr-Beschichtungen und eines puren FeCrAl-Konzepts untersucht, wobei herkömmliches Zr-4 als Referenzfall diente. Die Abbildung zeigt die zentralen Hauptversuchsrohre der jeweiligen Stabbündel nach den Versuchen. Als repräsentatives Beispiel für das mit $16\text{ }\mu\text{m}$ CrN beschichtete FeCrAl wird eine Zr-4-Probe aus derselben Beschichtungscharge gezeigt, um einen besseren Kontrast des REM-Bildes zu erzielen.

und ein Vierquadranten-Wattmeter verwendet. Aus der elektrischen Leistung und der bekannten beheizten Oberfläche ergab sich der angewandte Wandwärmefluss. Mögliche elektromagnetische Störungen durch den Transformator und die Hochstromleiter wurden bei der Inbetriebnahme berücksichtigt und anschließend in die Bewertung der experimentellen Unsicherheit einbezogen.

Die Hochgeschwindigkeitsaufnahme wurde mit der Erfassung der thermodynamischen Daten synchronisiert. Während der CHF-Messungen am Stabbündel dienten die Aufzeichnungen in erster Linie dazu, die lokale Dampfansammlung und den Trockenbereich auf dem Hüllrohr zu verifizieren, die mit einem schnellen Temperaturanstieg der Oberfläche einhergingen. Die kombinierten thermischen und optischen Informationen halfen bei der Identifizierung der Siedekrise noch während eines Experiments und ermöglichten wiederholte CHF-Messungen an den selben Hüllrohrproben. Alternativ hätten sich die Validierung eines CHF auf Post-Testanalysen wie bspw. die Suche nach Oberflächenschäden infolge des CHF stützen müssen.

Das Datenerfassungs- und Schutzsystem nutzte ein Ringpuffer-Konzept, um den transienten Verlauf rund um ein CHF-Ereignis zu erfassen. Für die Hauptmessungen am Stabbündel wurden typischerweise 2 s vor und 0,5 s nach dem Auslöseereignis erfasst. Nach der CHF-Erkennung reduzierte eine automatisierte Schutzsequenz die Transformatorleistung und begrenzte dadurch die Dauer der Temperaturanstiegs und damit die Transition zum Filmsieden selbst.

Die Entwicklung des Versuchssystems wurde durch numerische Analysen begleitet. Ihr Hauptzweck bestand darin, vor den Hauptmesskampagnen hydraulische und thermische Ungleichmäßigkeiten zu identifizieren und die Auslegung einer Testkonfiguration mit ausreichend reproduzierbaren Randbedingungen zu unterstützen. Für die CFD-Untersuchungen wurde ANSYS Fluent verwendet, einschließlich eines auf dem RPI-Wandkochmodell basierenden Rahmens und einer MUSIG-Beschreibung (Multiple Size Group) der dispergierten Dampfphase [ANSY22].

Aus der CAD-Geometrie des Einlassbereichs und des beheizten Stabbündelabschnitts wurde ein CFD-Modell abgeleitet. Zunächst wurden Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Berechnungen

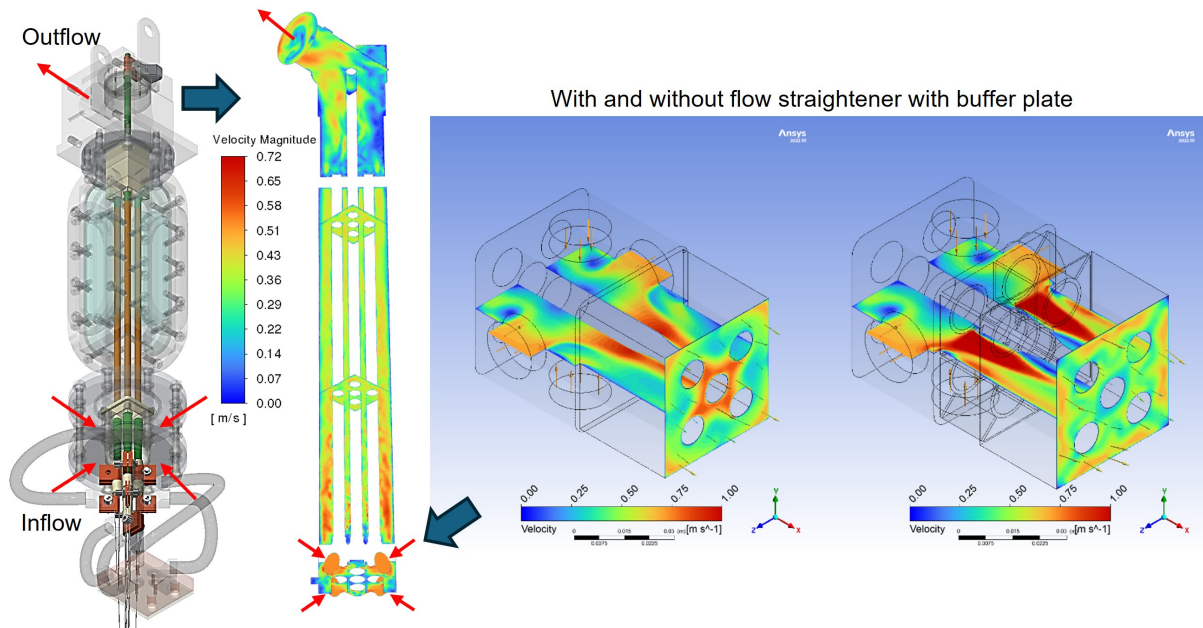


Abbildung 8: Vorstudie unter Verwendung von einphasiger LES (linkes Bild: Strömungskanal im Stabbündelbereich in einem ausgewählten Zeitschritt der Simulation) und RANS (rechte Bilder: detaillierte Analyse des Strömungsgleichrichters unter stationären Bedingungen).

(RANS) durchgeführt, um die Strömungsverteilung am Einlass zu bewerten und Konfigurationen mit und ohne den entwickelten Strömungsgleichrichter zu vergleichen. Die Berechnungen zeigten, dass die Strömungskonditionierungsvorrichtung die ausgeprägte zentrale Geschwindigkeitsungleichmäßigkeit reduzierte und eine homogenere Einlassbedingung für das beheizte Stabbündel erzeugte.

Anschließend wurde der gesamte Strömungsweg mittels einer zeitaufgelösten einphasigen Large-Eddy-Simulation (LES) untersucht. Diese Berechnungen dienten der Untersuchung zeitlicher Schwankungen von Geschwindigkeit und Druck und stützten die Schlussfolgerung, dass der beheizte Bündelbereich nach dem Einbau des Strömungsgleichrichters vergleichsweise stabile Strömungsbedingungen aufwies. Die berechnete Druckverteilung sprach zudem dafür, die Hauptdruckmessung vom Auslassbereich zum unteren Ende des beheizten Abschnitts zu verlegen, wo der Einfluss von Auslassstörungen geringer war.

Für die koaxial beheizten Außenstäbe wurden zusätzlich thermisch-elektrische Finite-Elemente-Berechnungen durchgeführt. Diese Berechnungen dienten der Bewertung der radialen Temperaturverteilung zwischen dem inneren Rückleiter und der umgebenden Hülle, sowie den Stabbündellagerung innerhalb der Drückhülle. Hierraus ergab sich die Notwendigkeit für den Einsatz eines wärmeleitenden keramischen Füllmaterials der koaxialen Anordnung.

In der späteren Projektphase wurden stationäre Siedesimulationen für Betriebspunkte der Versuchsanordnung durchgeführt. Diese Simulationen dienten dazu, den quasi-stationären thermohydraulischen Zustand und die Wandtemperatur vor dem experimentell beobachteten CHF abzuschätzen. Bei den vergleichsweise hohen Wärmeflüssen und Dampfanteilen, die sich dem unter CHF nahen Bedingungen ergaben, wurde für diese Berechnungen eine numerisch stabilere, auf dem Phasengemisch basierende Formulierung gegenüber dem inhomogenen Ansatz bevorzugt, die während der früheren Modellentwicklung untersucht worden war.

Die numerischen Analysen dienten in erster Linie als Werkzeuge für die Auslegung und Charakterisierung der Experimente. Sie unterstützten die Optimierung des Einlassstroms, die Sensorpositionierung, die thermische Auslegung der Koaxialheizungen sowie die Abschätzung der Betriebsbedingungen vor dem Eintritt in den CHF-Bereich. Die transiente Entstehung und

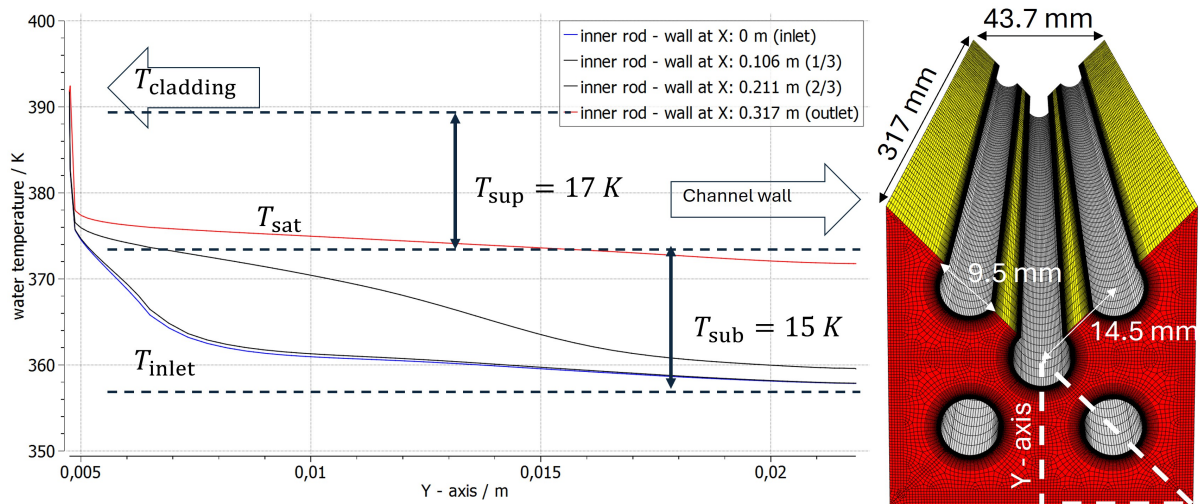


Abbildung 9: Vorstudie unter Verwendung eines RPI-MUSIG-Modells für das Strömungssieden in FLUENT. Dabei wurde ein 1/8-Querschnitt der abgebildeten Geometrie eines vernetzten Rohrbündels verwendet.

Ausbreitung des lokalen Trockenbereichs, der für DNB verantwortlich ist, konnte mit der angewandten CFD-Methodik nicht direkt erfasst werden. Folglich blieben experimentelle Messungen die primäre Grundlage für die Bestimmung des CHF-Bereichs und den Materialvergleich.

4.4 Versuchsverfahren

4.4.1 CHF-Messungen an Stabbündeln

Die CHF wurde mithilfe eines quasi-stationären Verfahrens ermittelt, das auf einer schrittweisen elektrischen Erwärmung des Stabbündels basierte. Für jeden Betriebspunkt wurden der Massenstrom, der Systemdruck und die Einlasstemperatur auf die vorgegebenen Werte eingestellt und so lange aufrechterhalten, bis stabile Bedingungen erreicht waren. Anschließend wurde die Heizleistung in diskreten Schritten erhöht, die einem Wandwärmefluss von etwa $5,6 \text{ kW m}^{-2}$ entsprachen. Jede Stufe wurde mindestens 30 s lang beibehalten, bevor die nächste Stufe angewendet wurde [WVHG⁺26].

Die Sequenz wurde über dem Siedebeginn, bis zur Siedekrise fortgesetzt. Die Identifizierung des CHF basierte auf einem kombinierten thermischen und optischen Kriterium. Eine Messung wurde als CHF klassifiziert, wenn ein lokaler Anstieg der Hüllrohrtemperatur um mindestens etwa 20 K innerhalb von 0,1–0,2 s mit einer visuell in Zeitlupe feststellbaren anhaltenden Dampfstruktur oder einem lokalen Trockenbereich an der entsprechenden Position zusammenfiel [WVHG⁺26]. Die synchronisierte Aufzeichnung wurde anschließend überprüft, um sicherzustellen, dass die Temperaturexkursion mit einer lokalen Austrocknung in Zusammenhang stand und nicht auf eine isolierte Signalstörung zurückzuführen war.

Nach der Erkennung wurde die Heizleistung automatisch abgeschaltet. Die schnelle Schutzsequenz begrenzte die Dauer und die räumliche Ausdehnung der Überhitzung und ermöglichte die Durchführung mehrerer CHF-Messungen mit demselben Stabbündel. Dies war wichtig, um die statistische Reproduzierbarkeit der Siedekrise zu bestimmen, ohne bei jedem einzelnen Versuch einen neuen Oberflächenzustand einzuführen.

n

Die Hauptmessmatrix wurde auf einen Referenzzustand von etwa

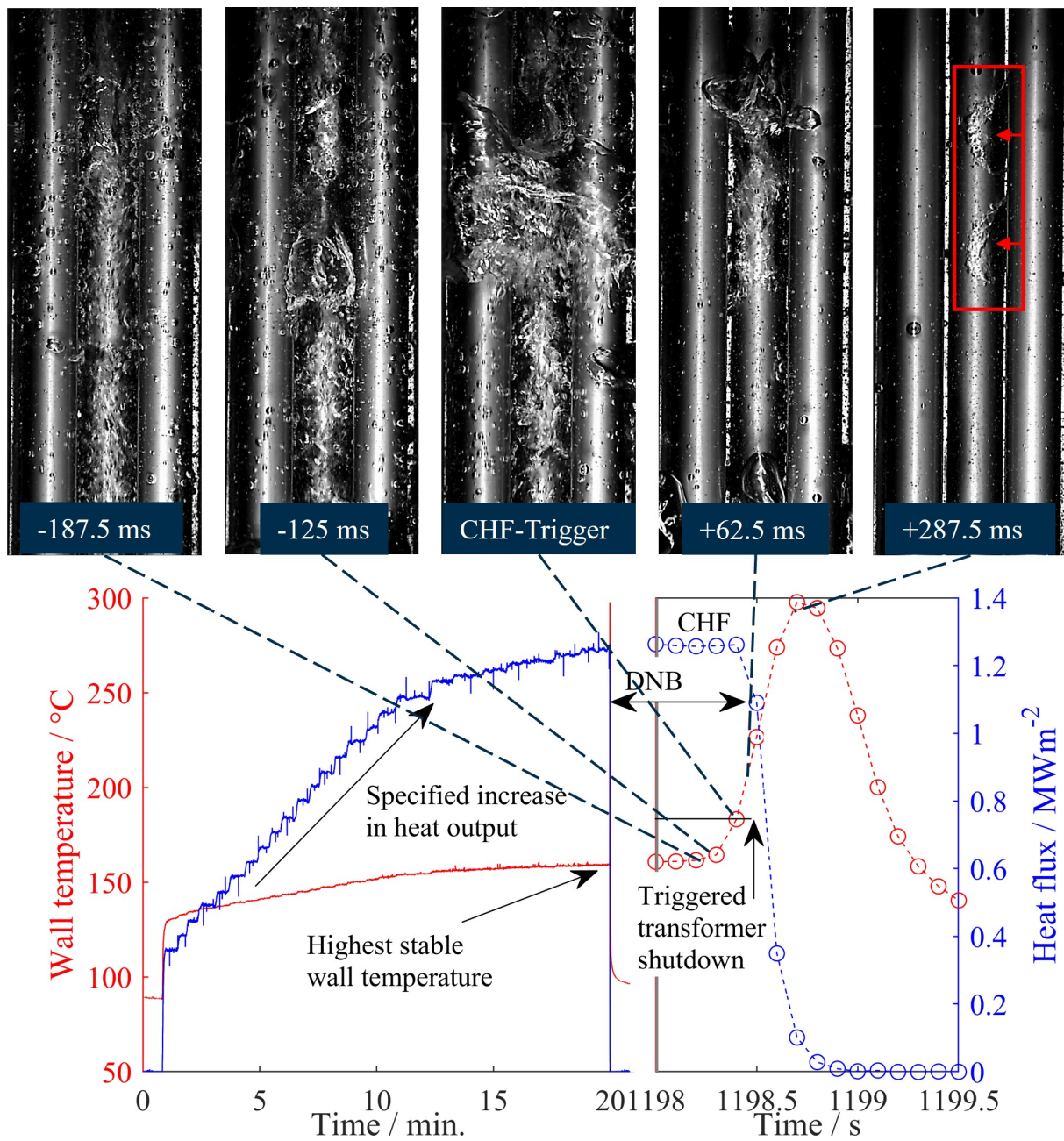


Abbildung 10: Darstellung des CHF-Versuchsablaufs anhand der Hüllrohr-Temperatur, mit einer Sequenz einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme im Übergang zum Filmsieden.

$$G = 200 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}, \quad p = 1,4 \text{ bar(a)}, \quad \Delta T_{\text{sub}} = 18 \text{ K}. \quad (2)$$

Der Massenstrom, der Druck und die Unterkühlung am Einlass wurden einzeln um diesen Referenzzustand herum variiert, während die anderen Parameter konstant gehalten wurden. Die daraus resultierende Messmatrix ist in Tabelle 5 [WVHG⁺26] zusammengefasst.

Tabelle 5: Thermohydraulische Testmatrix für die wichtigsten vergleichenden CHF-Messungen.

Test condition	$G / \text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$p / \text{bar(a)}$	$\Delta T_{\text{sub}} / \text{K}$
Kleinerer Massenstrom	100	1.4	18
Referenz	200	1.4	18
Größere Massenstrom	400	1.4	18
Kleinerer Druck	200	1.2	18
Größere Druck	200	1.8	18
Kleinere Unterkühlung	200	1.4	9
Größere Unterkühlung	200	1.4	36

Jede Versuchsbedingung des Materialvergleichs wurde wiederholt gemessen. Darüber hinaus wurde eine Zr-4 Reproduzierbarkeitstudie bei etwa

$$G = 400 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}, \quad p = 1,2 \text{ bar(a)}, \quad \Delta T_{\text{sub}} = 25 \text{ K} \quad (3)$$

50 Mal wiederholt, um die intrinsische Streuung des CHF unter nominell identischen Randbedingungen zu quantifizieren [WVHG⁺26]. Das entsprechende statistische Ergebnis wird in Abschnitt 4.5 erörtert.

4.4.2 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen

Ergänzende Messungen wurden durchgeführt, um das oberflächenabhängige Siedekeimbildungs- und Blasenabhebeverhalten vor dem CHF zu charakterisieren. Im Gegensatz zu den Hauptversuchen mit Stabbündeln wurde bei diesen Untersuchungen eine Ringspalt-Teststrecke verwendet, um einen besseren optischen Zugang zur Hüllrohroberfläche zu ermöglichen [WVHG25].

Die beheizte Probe hatte einen Nenndurchmesser von 9,5 mm, einen Innendurchmesser von 8,36 mm und eine beheizte Länge von etwa 330 mm. Sehr ähnlich zur Stabbündelkonfiguration. Die Hüllrohre waren konzentrisch von einem Glasrohr mit einem Innendurchmesser von etwa 18 mm umgeben. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen wurden in einem 25 mm langen Bereich nahe dem Auslass des beheizten Abschnitts aufgenommen.

Für die Vergleichsmessungen betrug der Systemdruck etwa 3 bar(a), die Massenstromdichte $500 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ und die Einlasstemperatur etwa 85°C . Der Wandwärmefluss wurde schrittweise erhöht, und nach Erreichen des stationären Zustands wurden Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit 5000 fps aufgezeichnet. Jede ausgewertete Sequenz umfasste 2000 Einzelbilder, was einer Aufzeichnungsdauer des Siedeverhaltens von 0,4 s entspricht [WVHG25].

Die Bildauswertung basierte auf vollständigen Zeitverläufen und nicht auf einzelnen Momentaufnahmen. Dies war notwendig, da aktive Siedekeimstellen nicht zwingend in jedem Einzelbild sichtbar sind und vorübergehend durch abgelöste oder zusammenwachsende Blasen verdeckt werden können. Die Aufnahmen wurden daher vorverarbeitet, um stationäre Hintergrundstrukturen, Unebenheiten in der Beleuchtung und optische Störungen zu unterdrücken. Für nähere Informationen zur entwickelten Post-Processmethodik wird auf [WVHG25] verwiesen.

Highspeed Video with 5 kHz

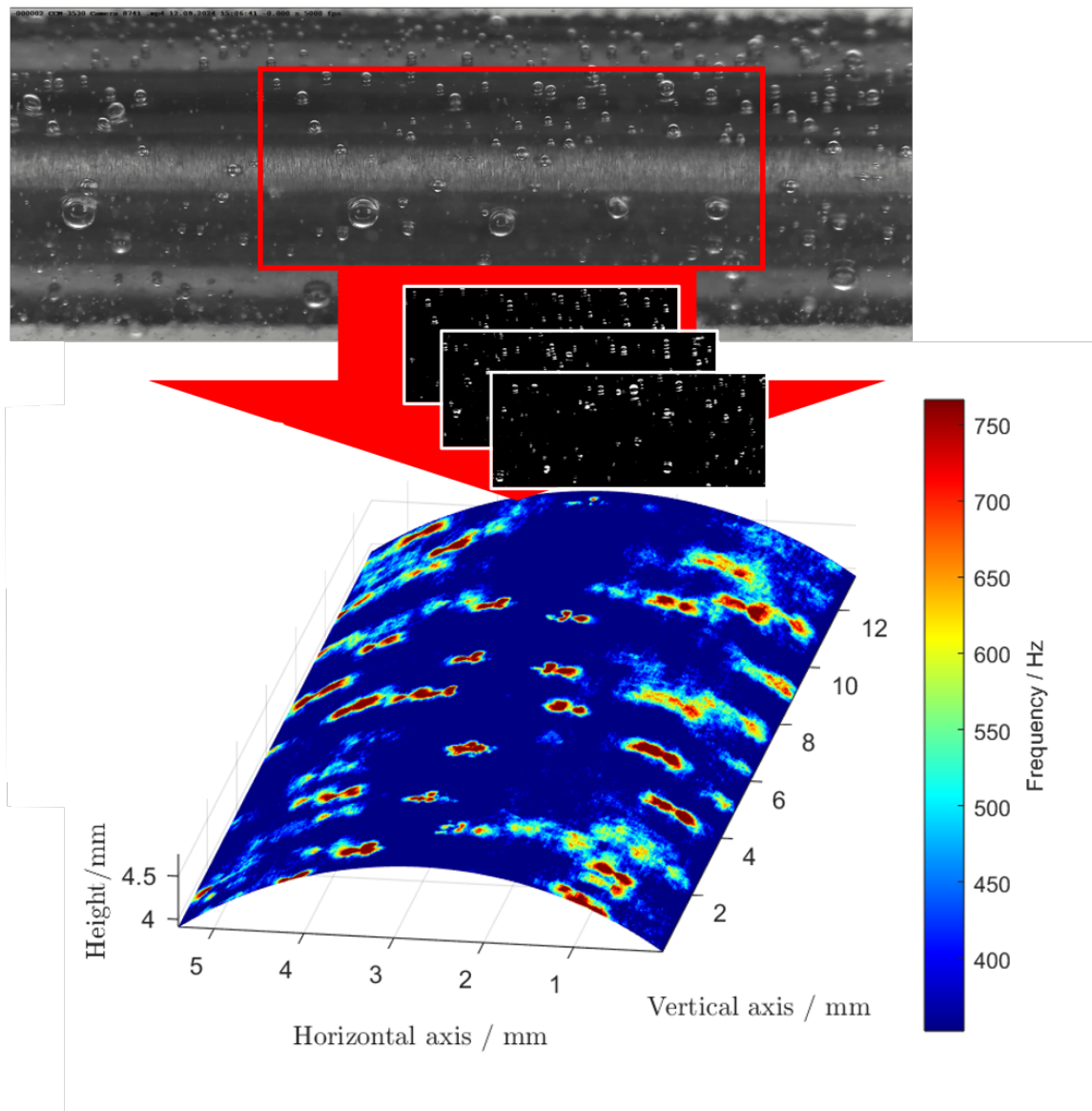


Abbildung 11: Illustration der entwickelten Auswertemethodik für aktive Siedekeime auf der Hüllrohroberfläche des Referenzfalls: blankes Zr-4.

Mit der gekrümmte Mantelfläche des Hüllrohrs, die auf den ausgewerteten optischen Bereich sichtbar ist wird mit

$$N_{\text{NSD}} = \frac{N_{\text{sites}}}{A_{\text{ROI}}}, \quad (4)$$

die Siedekeimstellendichte N_{sites} aus der Anzahl der identifizierten aktiven Siedekeimstellen bestimmt. Der untersuchte Bereich entsprach etwa $3,1 \times 25 \text{ mm}^2$ auf der sichtbaren Mantelfläche [WVHG25].

Die Auswertungsmethode ist am zuverlässigsten, solange einzelne Keimbildungsstellen und absteigende Blasen optisch unterscheidbar bleiben. Bei höheren Wärmeflüssen beeinträchtigen zunehmende Blasenwechselwirkungen, Koaleszenz und eine teilweise Verdeckung der beheizten Oberfläche die Fähigkeit, einzelne aktive Stellen voneinander zu unterscheiden. Die entsprechende Empfindlichkeit der abgeleiteten Größen wurde daher separat bewertet.

4.5 Messunsicherheit und Reproduzierbarkeit

Beim Vergleich der verschiedenen Hüllrohrkonzepte müssen sowohl die herkömmliche Messunsicherheit als auch die intrinsische statistische Schwankung von CHF berücksichtigt werden. Die Unsicherheiten der wichtigsten abgeleiteten Größen in den Stabbündel-Experimenten wurden durch die Ausbreitung erster Ordnung der zugrunde liegenden sensorischen, geometrischen und signalbezogenen Beiträge bestimmt [WVHG⁺26].

Repräsentative kombinierte Unsicherheiten sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Repräsentative Messunsicherheiten für die CHF-Experimente mit Stabbündeln auf der Grundlage von [WVHG⁺26].

Kombinierte Unsicherheit	
Massenstromdichte	$\pm (1.9 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1} + 0.38 \%)$
Druck	$\pm (45 \text{ mbar} + 0.4 \%)$
Temperatur	$\pm (0.5 + 0.15) \text{ K}$
Wandwärmestrom	$\pm (0.01 \text{ MW m}^{-2} + 0.56 \%)$

Die Unsicherheit des Massenflusses umfasst die angegebene Genauigkeit des Durchflussmessers sowie signal- und geometriebedingte Beiträge. Die Druckmessung wurde zusätzlich durch elektrisches Rauschen beeinflusst, das mit dem Hochstrom-Heizsystem zusammenhing. Die Unsicherheit des Wandwärmeflusses wurde in erster Linie durch Unsicherheiten bei der Messung der elektrischen Leistung und der Geometrie der beheizten Oberfläche bestimmt. Sofern nicht anders angegeben, wurden die kombinierten Unsicherheiten der wichtigsten CHF-Messungen mit einem Abdeckungsfaktor von $k = 3$ bewertet [WVHG⁺26].

Die Messgeräteunsicherheit allein beschreibt nicht die Reproduzierbarkeit des CHF. Selbst unter nominell identischen Randbedingungen weist der Übergang vom Keimsieden zu einem anhaltenden lokalen Trockenbereich statistische Schwankungen auf. Dieser Beitrag wurde anhand einer Serie von 50 Wiederholungsmessungen mit der Zr-4-Referenzhülle quantifiziert. Die resultierende CHF-Verteilung war annähernd gaußförmig und ergab ein 3σ -Intervall von etwa $\pm 3,5 \%$ um den Mittelwert [WVHG⁺26]. Dieser Wert wurde anschließend als wichtige Referenz herangezogen, um zu beurteilen, ob materialabhängige CHF-Unterschiede von der inhärenten experimentellen Streuung unterscheidbar waren.

Die bildbasierte Auswertung von NSD und BDF erforderte eine separate Sensitivitätsanalyse, da die resultierenden Größen nicht direkt von einem einzelnen Sensor, sondern aus der Nachbearbeitung stammen. Der Einfluss der Sequenzlänge wurde daher durch Variation der Anzahl der in

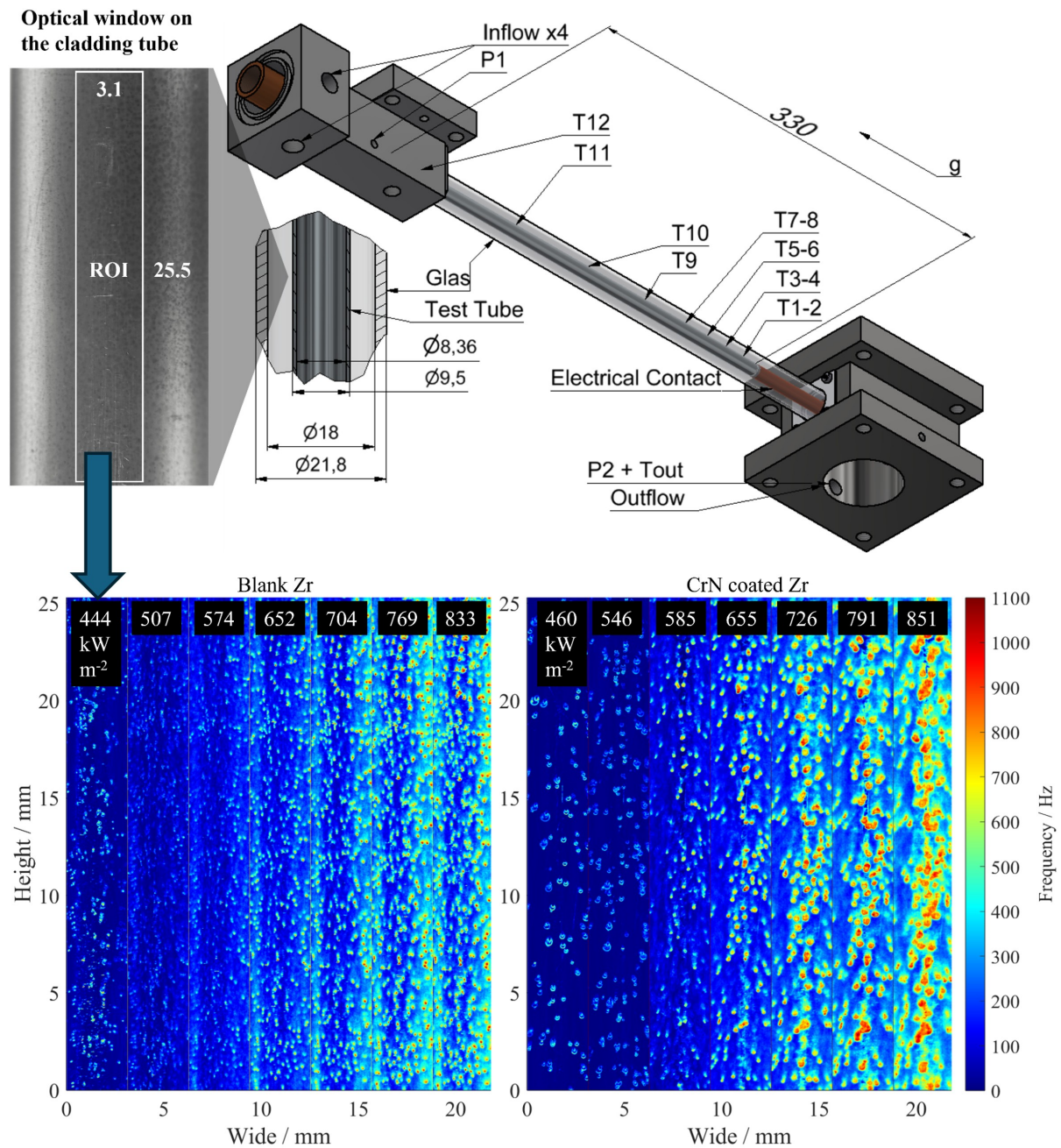


Abbildung 12: Ein veranschaulichendes Modell zur Charakterisierung der real-lokalen Zweiphasen-Wärmeübertragung an der Oberfläche der Hüllrohre. Die Abbildung zeigt die Siedefrequenz bis zu 1,1 kHz als Indikator für die Siedeaktivität eines ATF-Hüllrohrs und klassischen Zr-4.

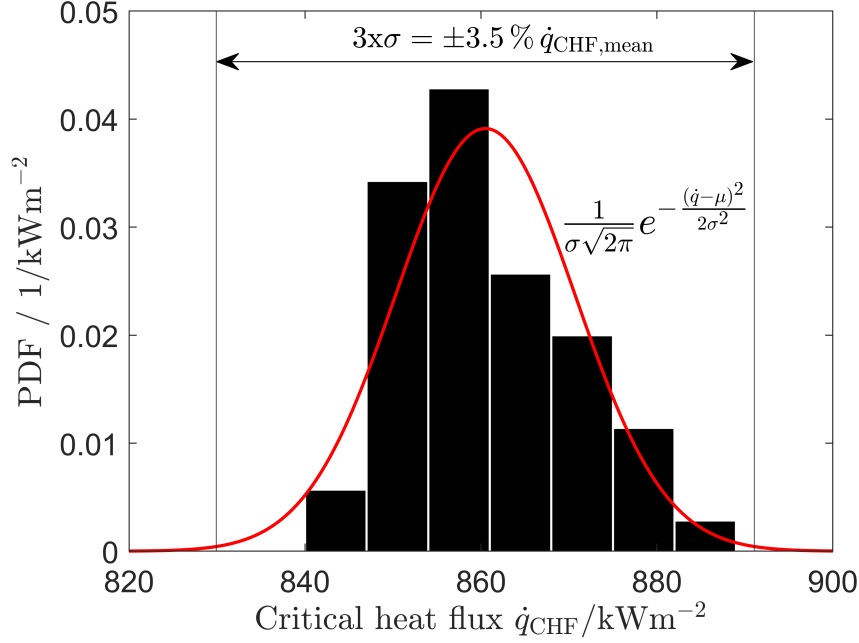


Abbildung 13: Entnommene Grafik aus [WVHG⁺26] über eine CHF-Reproduktionsstudie, bestehend aus 50 sequenziell durchgeführten CHF-Experimenten mit konstanten Testbedingungen.

die Analyse einbezogenen Bilder untersucht [WVHG25]. Die Blasenabgangsfrequenz zeigte eine vergleichsweise schnelle Konvergenz; eine Erhöhung der ausgewerteten Sequenz von 1500 auf 2000 Bilder führte zu durchschnittlichen Änderungen von weniger als etwa 0,8 %. Die NSD-Auswertung war empfindlicher, da sie zusätzlich von der räumlichen Identifizierung und Trennung einzelner aktiver Stellen abhängt.

Für die ausgewählte Auswertung mit 2000 Frames lagen die geschätzten mittleren NSD-Unsicherheiten bei etwa 12,8 % für unbeschichtetes Zr-4, bei 11,3 % für CrN-beschichtetes Zr-4 und bei 17,5 % für die Cr-beschichtete Zr-4-Probe [WVHG25]. Diese Werte spiegeln die Einschränkungen wider, die mit optischen Störungen, der Überlappung von Blasen und der bei hohem Wärmefluss zunehmend eingeschränkten Sichtbarkeit einzelner Keimbildungsstellen verbunden sind.

Die beiden Unsicherheitsbewertungen beziehen sich daher auf unterschiedliche Ebenen des Versuchsprogramms. Die Stabbündelanalyse ermittelt die Auflösung, mit der systematische CHF-Unterschiede zwischen den untersuchten Hüllrohrkonzepten unterschieden werden können, während die Hochgeschwindigkeitsanalyse die Unsicherheit lokaler, oberflächenabhängiger Siedeparameter charakterisiert. Beide werden bei der Interpretation der im folgenden Kapitel vorgestellten Versuchsergebnisse berücksichtigt.

5 Experimental Results

5.1 Thermal-Hydraulic Dependence of Critical Heat Flux

Die systematische Variation der thermohydraulischen Randbedingungen führte bei allen untersuchten Hüllrohrkonzepten zu einer deutlichen Veränderung des gemessenen kritischen Wärmeflussdichte (CHF). Eine Erhöhung des Massenstroms führte zu einem erheblichen Anstieg des CHF, während ein geringerer Massenstrom die Siedekrise in Richtung niedrigerer Wandwärmeflüsse verschob. Ein entsprechender Anstieg des CHF wurde bei zunehmender Einlassunterkühlung beobachtet. Schwankungen des Systemdrucks wirkten sich ebenfalls auf den gemessenen CHF aus, wobei die Druckabhängigkeit weiterhin mit der entsprechenden Änderung der Sättigungstemperatur und der thermophysikalischen Eigenschaften des Kühlmittels gekoppelt blieb [WVHG⁺26].

Die daraus resultierenden Messungen zeigten daher, dass der thermohydraulische Zustand des Kühlmittels den dominierenden Einfluss auf das absolute CHF-Niveau innerhalb des untersuchten Niederdruck-Parameterbereichs darstellt. Um eine kompakte Darstellung des kombinierten Effekts von Massenstrom, Einlasstemperatur und druckabhängigen Sättigungsbedingungen zu erhalten, wurde der Einlasszustand durch den Enthalpie-Fluss relativ zur Sättigung ausgedrückt,

$$\dot{H}_{\text{in}} = \dot{m} c_p (T_{\text{in}} - T_{\text{sat}}(p)), \quad (5)$$

wobei $\dot{m}$ den Massenstrom des Kühlmittels, c_p die spezifische Wärmekapazität der Flüssigkeit, T_{in} die Einlasstemperatur und $T_{\text{sat}}(p)$ die Sättigungstemperatur bei dem entsprechenden Systemdruck. Für die hier untersuchten unterkühlten Einlassbedingungen ist $\dot{H}_{\text{in}}$ negativ, wobei zunehmend negativere Werte ein größeres Einlassenthalpiedefizit relativ zur Sättigung darstellen.

Wurden die gemessenen CHF-Werte als Funktion von $\dot{H}_{\text{in}}$ dargestellt, glichen sich die individuellen Variationen von Massenstrom, Druck und Einlassunterkühlung über den untersuchten Parameterbereich hinweg zu einer annähernd linearen Beziehung an. Dieses Verhalten wurde bei allen drei Hüllrohrmaterialien der Hauptmessreihe beobachtet [WVHG⁺26].

Die lineare Regression der gemessenen CHF-Daten ergab die in Tabelle 7 zusammengestellte Korrelationen. Dabei wird $\dot{H}_{\text{in}}$ in kW und $\dot{q}_{\text{CHF}}$ in kW m⁻² angegeben.

Tabelle 7: Lineare Regression des gemessenen CHF in Abhängigkeit von der Einlassenthalpie für die drei Hüllmaterialien der Hauptmessreihe, basierend auf [WVHG⁺26].

Hüllrohrmaterial	Regression	R^2	RMSE / kW m ⁻²
Zr-4	$\dot{q}_{\text{CHF}} = -12.886 \dot{H}_{\text{in}} + 853.55$	0.981	22.2
CrN-beschichtetes Zr-4	$\dot{q}_{\text{CHF}} = -12.730 \dot{H}_{\text{in}} + 778.32$	0.950	32.0
FeCrAl	$\dot{q}_{\text{CHF}} = -12.004 \dot{H}_{\text{in}} + 826.10$	0.925	48.9

Die Messungen für Zr-4 und das mit CrN beschichtete Zr-4 wiesen nahezu parallele Regressionsgeraden auf, während die FeCrAl-Daten eine etwas geringere Regressionssteigung und eine größere Streuung um die lineare Anpassung herum zeigten. Die vergleichsweise hohen Bestimmtheitsmaße zeigen, dass die Einlassenthalpie einen großen Teil der durch die thermohydraulische Testmatrix verursachten CHF-Schwankungen ausmacht. Die materialbedingten Unterschiede waren deutlich geringer als die gesamte CHF-Schwankung, die durch die äußeren Betriebsbedingungen verursacht wurde [WVHG⁺26].

5.2 CHF-Einfluss der Hüllrohrkonzepte

Da die verschiedenen Hüllrohrkonzepte unter Verwendung einer äquivalenten Stabbündelgeometrie und derselben systematischen Variation der thermohydraulischen Randbedingungen untersucht

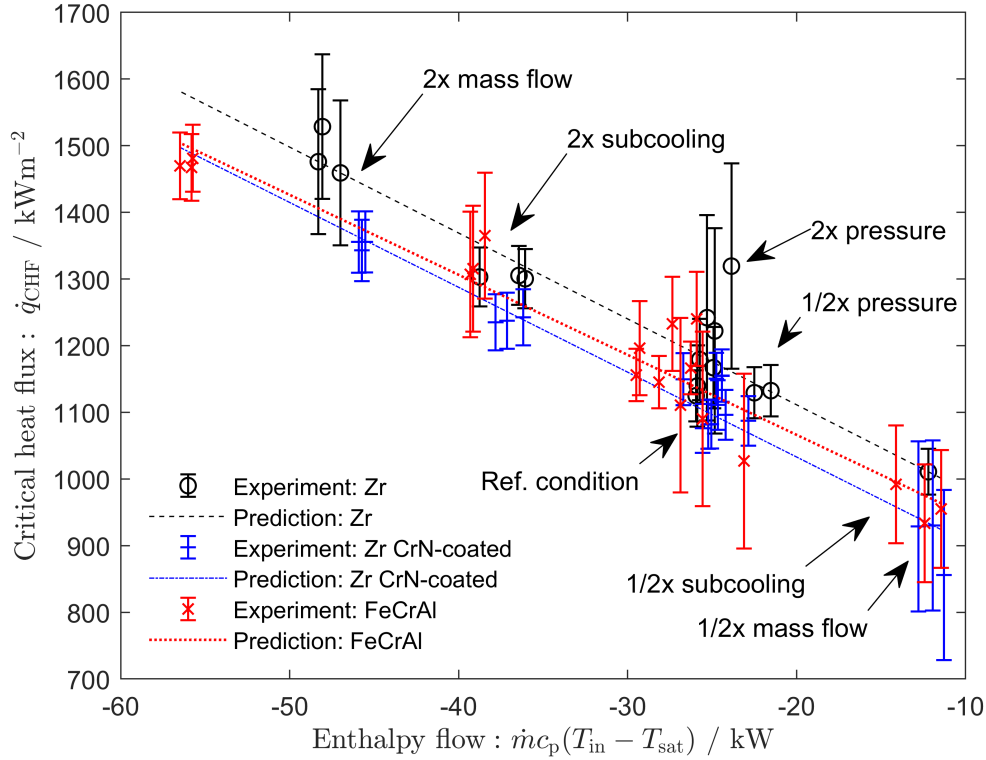


Abbildung 14: Übersicht über die Schwellenwerte die Transition zum Filmsieden der ATF-Proben der Hauptmessreihe.

wurden, konnten ihre gemessenen CHF-Werte direkt miteinander verglichen werden. Zusätzlich zu der oben beschriebenen dominanten thermohydraulischen Abhängigkeit wurden systematische Unterschiede zwischen den wichtigsten Hüllrohrkonzepten beobachtet [WVHG⁺26].

Das CrN-beschichtete Zr-4-Stabbündel wies über den gesamten untersuchten Operationsbereich hinweg niedrigere CHF-Werte auf als die unbeschichtete Zr-4-Referenz. Die maximal gemessene Differenz betrug etwa 8,8 %. Diese Differenz überschritt den aus den wiederholten Zr-4-Referenzmessungen ermittelten 3σ -Reproduzierbarkeitsbereich von etwa $\pm 3,5$ % und wurde daher als statistisch signifikant eingestuft [WVHG⁺26]. Frühere Projektauswertungen auf der Grundlage der ersten beiden Brennelementkampagnen hatten bereits eine CHF-Reduzierung von etwa 6–10 % für die beschichtete Konfiguration angezeigt [WHGC24].

Die annähernd parallelen Regressionsgeraden von unbeschichtetem und CrN-beschichtetem Zr-4 deuten darauf hin, dass die Hauptreaktion des CHF auf die untersuchte Variation der thermohydraulischen Bedingungen nach dem Aufbringen der $8\mu\text{m}$ dicken CrN-Beschichtung ähnlich blieb. Der experimentell beobachtete Unterschied drückte sich daher vorwiegend als Verschiebung hin zu niedrigeren CHF-Werten aus und nicht als wesentlich unterschiedliche thermohydraulische Empfindlichkeit.

Das FeCrAl-Bündel wies im Vergleich zur unbeschichteten Zr-4-Referenz einen insgesamt geringeren Unterschied auf. Die durchschnittliche Abweichung betrug etwa 3,2 % und wurde im Hinblick auf die experimentell ermittelte CHF-Reproduzierbarkeit [WVHG⁺26] als statistisch nicht signifikant eingestuft. Die FeCrAl-Daten zeigten dennoch eine etwas flachere Regressionssteigung und eine größere Streuung als die beiden auf Zr-4 basierenden Konfigurationen.

Die wichtigsten quantitativen Unterschiede sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Innerhalb der untersuchten Niederdruckbedingungen blieben die gemessenen materialbedingten

Tabelle 8: Festgestellte CHF-Unterschiede der untersuchten ATF-Hüllrohre im Vergleich zur unbeschichteten Zr-4-Referenz, basierend auf [WVHG⁺26].

Hüllrohrkonzept	Beobachtete Abweichung von Zr-4	Statistische Auswertung
CrN-beschichtetes Zr-4	bis zu 8.8 % niedrigerer CHF	signifikant
FeCrAl	ca. 3.2 %	nicht signifikant

CHF-Verschiebungen im Vergleich zu den durch Massenstrom, Druck und Einlassunterkühlung verursachten CHF-Einflüssen moderat. Gleichzeitig zeigen die Messungen an CrN-beschichtetem Zr-4, dass eine Oberflächenmodifikation einen systematischen CHF-Unterschied hervorrufen kann, der signifikant gegenüber statistischen CHF-Steuerungen ist.

Die Messungen allein lassen keine eindeutige Zuordnung der beobachteten Unterschiede zu einer einzigen Material- oder Oberflächeneigenschaft zu. Die untersuchten Hüllrohrkonzepte unterscheiden sich, wenn auch moderat, hinsichtlich Oberflächenbeschaffenheit, Benetzbarkeit, Rauheit und thermophysikalischer Eigenschaften. Die entsprechende Interpretation und der Vergleich mit Ansätzen zur CHF-Vorhersage werden daher separat in Abschnitt 6 behandelt.

5.3 Oberflächenabhängiges Siedeverhalten vor dem CHF

Anhand der ergänzenden Hochgeschwindigkeitsaufnahmen sollte ermittelt werden, ob Modifikationen der Hüllrohroberfläche bereits im Bereich des Nukleationssiedens nachweisbare Unterschiede hervorrufen. Diese Messungen wurden in der Ringspaltkonfiguration durchgeführt und umfassten unbeschichtetes Zr-4, mit einer 8 μm dicken CrN-Schicht beschichtetes Zr-4 sowie eine zusätzliche Probe aus mit einer 30 μm dicken Cr-Schicht beschichtetem Zr-4 [WVHG25]. Die Ergebnisse werden somit als ergänzender oberflächensensitiver Datensatz betrachtet und nicht als direkte Erweiterung des CHF-Vergleichs mit Stabbindeln.

Siedekeimstellendichte NSD. Bei den untersuchten Oberflächen trat das nachweisbare Nukleationssieden innerhalb eines Bereichs des Wandwärmestroms von etwa 450–550 kW m^{-2} auf. Bis zu etwa 590 kW m^{-2} blieb die Anzahl der nachgewiesenen aktiven Siedekeimstellen bei unbeschichtetem Zr-4, CrN-beschichtetem Zr-4 und Cr-beschichtetem Zr-4 weitgehend vergleichbar [WVHG25].

Bei höheren Wärmeflüssen traten die Unterschiede zwischen den untersuchten Oberflächen deutlicher auf. Die mit einer 30 μm dicken Cr-Schicht beschichtete Zr-4-Probe zeigte im Vergleich zu den unbeschichteten und den mit CrN beschichteten Oberflächen einen verzögerten Anstieg der Dichte aktiver Siedekeimstellendichte. Die beiden letztgenannten ATF-Hüllrohre zeigten im mittleren Wärmeflussbereich einen ähnlicheren Verlauf. Unter Bedingungen, unter denen einzelne Siedekeimstellen durch die optische Auswertung noch zuverlässig voneinander getrennt werden konnten, blieben die ermittelten NSD-Werte im Bereich von etwa 0–350 cm^{-2} [WVHG25].

Die räumliche Auswertung zeigte zudem, dass die Siedekeimbildungsaktivität nicht gleichmäßig über die untersuchten Oberflächen verteilt war. Insbesondere wiesen lokal beeinträchtigte oder leicht zerkratzte Bereiche der Cr-beschichteten Probe im Vergleich zu benachbarten Bereichen derselben Oberfläche eine erhöhte Siedekeimbildungsaktivität auf. Die räumlich aufgelösten Ergebnisse enthielten daher Unterschiede, die durch den integralen NSD-Wert allein nicht wiedergegeben wurden.

Blasenabhebefrequenz BDF. Die BDF zeigte eine weniger ausgeprägte Abhängigkeit von der untersuchten Oberfläche als die NSD. Die charakteristischen Frequenzbereiche der verschiedenen Oberflächen überlappten sich über wesentliche Teile des untersuchten Wärmeflussbereichs [WVHG25].

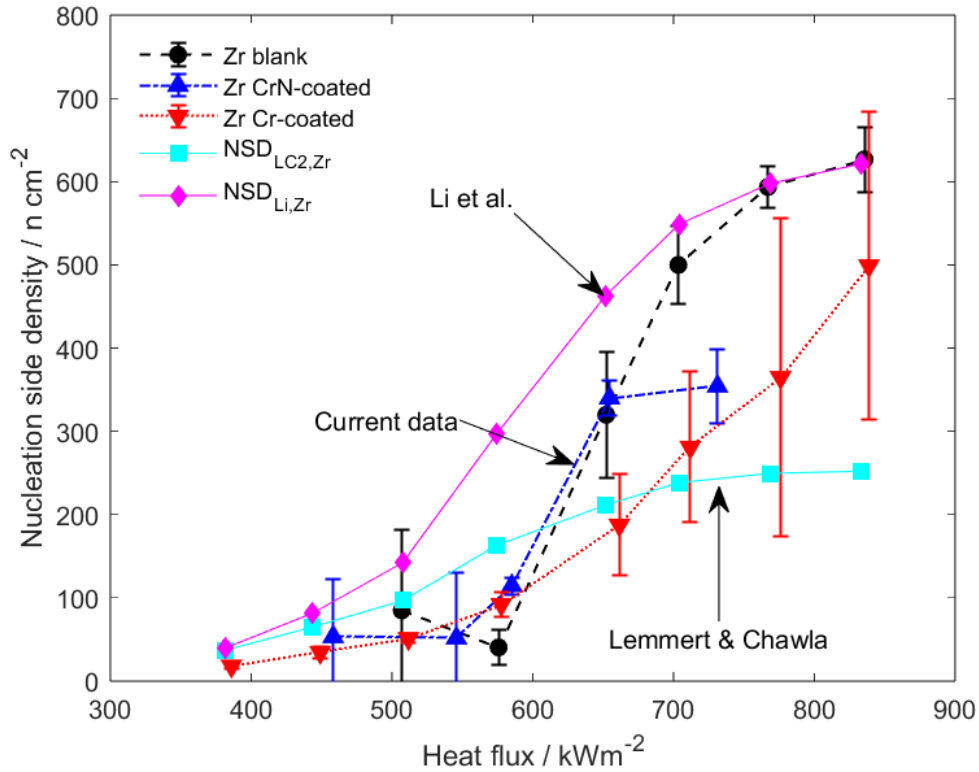


Abbildung 15: Bisherige Bewertung der NSD unter Verwendung der vorgestellten Auswertemethodik 4 und Vergleich mit in der Literatur weit üblichen empirischen Modellen.

Die Cr-beschichtete ATF-Probe wies dennoch Unterschiede in der räumlich gemittelten Blasenaktivität auf. Über einen Teil des untersuchten Bereichs lag ihre durchschnittliche BDF um etwa 100–150 Hz höher als bei den anderen untersuchten Oberflächen und zeigte eine vergleichsweise geringe Variabilität. Gleichzeitig zeigten Hochgeschwindigkeitsaufnahmen eine zunehmende Blaseninteraktion und -koaleszenz auf den beschichteten Oberflächen, insbesondere auf dem Cr-beschichteten ATF-Probe [WVHG25]. Folglich spiegelt die räumlich gemittelte Frequenz keinen einheitlichen Anstieg der Siedefrequenz an jeder einzelnen Siedekeimstelle wieder.

Insgesamt zeigten die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen deutlichere oberflächenabhängige Unterschiede bei der Aktivierung und räumlichen Verteilung der NSD als bei den charakteristischen BDF. Die optischen Messungen belegen somit, dass die untersuchten Oberflächenmodifikationen das Siedeverhalten vor dem CHF beeinflussen, wobei die Stärke und die räumliche Verteilung dieses Effekts vom lokalen Zustand der Hüllrohroberfläche abhängen.

Ein direkter quantitativer Zusammenhang zwischen diesen Messungen und den CHF-Ergebnissen für Stabbündel sollte nicht abgeleitet werden. Die detaillierten NSD/BDF-Messungen wurden in einer anderen Teststreckengeometrie durchgeführt und umfassten teilweise andere Beschichtungsvarianten als die Hauptversuche mit Stabbündeln. Ihr Zusammenhang mit den integralen CHF-Messungen wird daher in Abschnitt 6 qualitativ betrachtet.

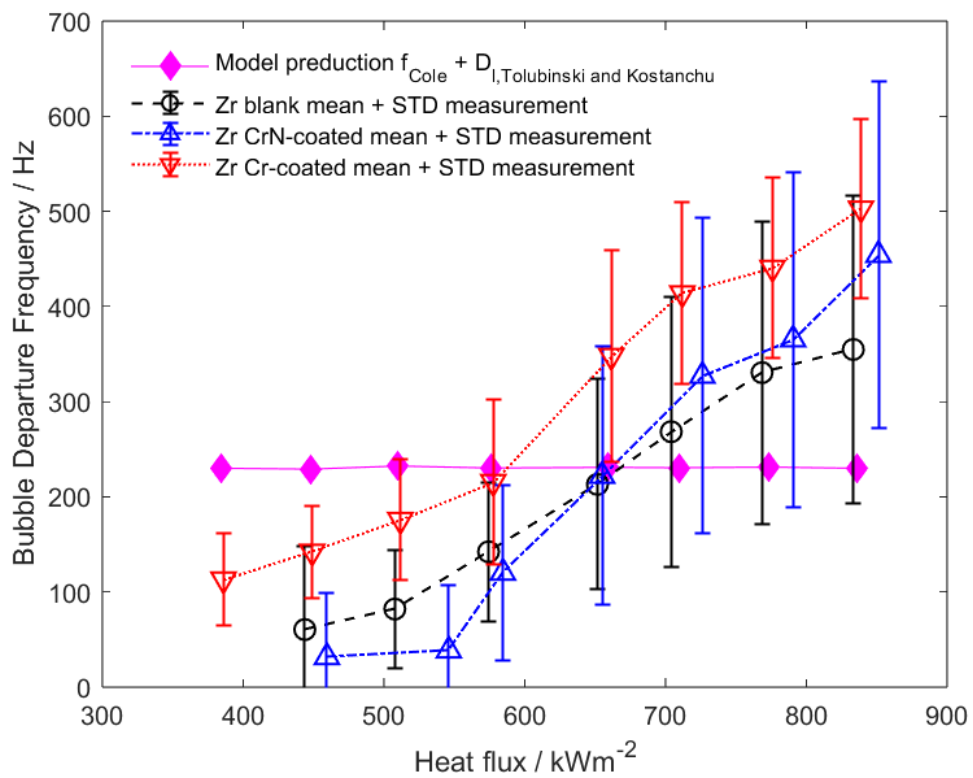


Abbildung 16: Bisherige Bewertung der BDF unter Verwendung der vorgestellten Auswertemethodik 4 und Vergleich mit in der Literatur weit üblichen empirischen Modellen.

6 Auswertung und Modellierung der Ergebnisse

6.1 Vergleich prediktiver CHF-Modelle

Die gemessenen CHF-Daten wurden mit dem Nachschlagewerk von Groeneveld (LUT) als Interpolationstabelle mit Wärmebilanz als etablierte empirische Referenz für wassergekühlte Systeme verglichen [GSVL⁺07]. Die LUT basiert auf einer umfangreichen experimentellen Datenbank und beschreibt den CHF in erster Linie als Funktion von Druck, Massenstrom und thermodynamischem Zustand. Sie bietet daher einen geeigneten Maßstab zur Beurteilung, ob die im Rahmen des vorliegenden Projekts gemessenen absoluten CHF-Werte mit etablierten thermohydraulischen Trends übereinstimmen.

Da sich die ursprüngliche LUT-Formulierung auf gleichmäßig beheizte vertikale durchflossene Rohre bezieht, muss bei ihrer direkten Anwendung auf das vorliegende Fünf-Stab-Bündel die unterschiedliche Geometrie berücksichtigt werden. Daher wurden Standardkorrekturfaktoren für Stabbündelbedingungen gemäß den entsprechenden IAEA-Empfehlungen [Inte01] angewendet. Die daraus resultierende Vorhersage lässt sich in vereinfachter Form wie folgt ausdrücken:

$$\dot{q}_{\text{CHF,bundle}} = K_{\text{bundle}} \dot{q}_{\text{CHF,tube}}, \quad (6)$$

wobei $\dot{q}_{\text{CHF,tube}}$ den aus der Nachschlagetabelle interpolierten CHF bezeichnet und K_{bundle} die geometrische Korrektur für die Stabbündelkonfiguration darstellt.

Über den untersuchten Betriebsbereich hinweg gaben die korrigierten LUT-Vorhersagen die allgemeine Größenordnung und die dominierenden thermohydraulischen Schwankungen der gemessenen CHF-Werte wieder. Die mittleren absoluten prozentualen Fehler (MAPE) betrugen etwa 10,3 % für Zr-4, 8,9 % für CrN-beschichtetes Zr-4 und 12,0 % für FeCrAl [WVHG⁺26]. Die LUT kann daher als nützliche technische Referenz für die in diesem Projekt untersuchten Versuchsbedingungen angesehen werden.

Ihre wesentliche Einschränkung für den vorliegenden Materialvergleich ergibt sich direkt aus dem Aufbau der Methode. Oberflächenchemie, Beschichtungsdicke, Benetzbarkeit, Rauheit und thermophysikalische Eigenschaften der Hüllschicht fließen nicht explizit in die LUT ein. Folglich führen identische thermohydraulische Eingangsbedingungen unabhängig vom untersuchten Hüllschichtkonzept zu im Wesentlichen derselben zugrunde liegenden CHF-Vorhersage. Die Methode kann die dominierende Reaktion auf Druck, Massenstrom und thermodynamischen Zustand reproduzieren, ist jedoch nicht in der Lage, eine systematische Verschiebung des CHF im Zusammenhang mit einer modifizierten Oberfläche abzubilden.

Diese Unterscheidung zeigt sich besonders deutlich bei den unbeschichteten und den CrN-beschichteten Zr-4-Konfigurationen. Beide Werkstoffe wiesen eine ähnliche thermohydraulische Abhängigkeit auf, während die beschichtete Hüllrohrschicht eine systematische Verschiebung hin zu einem niedrigeren CHF zeigte. Die LUT gab den gesamten Messbereich wieder, konnte diese Verschiebung jedoch nicht mit der modifizierten Hüllrohr-Oberfläche in Verbindung bringen. Sie wird daher in der vorliegenden Arbeit in erster Linie als materialunabhängige Referenz verwendet, anhand derer die Größenordnung der experimentell beobachteten Materialeffekte bewertet werden kann.

6.2 Materialabhängige mechanistische Interpretation

Zusätzlich zum empirischen LUT-Vergleich wurde ein materialabhängiger mechanistischer Ansatz untersucht, um zu prüfen, ob die beobachteten CHF-Trends dargestellt werden können, wenn Oberflächen- und Wandeigenschaften explizit berücksichtigt werden. Die Modellentwicklung basierte auf Flüssigkeitsschicht- und Austrocknungskonzepten, die üblicherweise bei unterkühltem Strömungssieden angewendet werden [CCMS⁺94, LCYA10].

Eine zentrale Größe in der angewandten Formulierung ist die charakteristische Flüssigkeitsschicht, die vor dem lokalen Austrocknen zwischen der beheizten Oberfläche und anhaftenden Dampfstruktur verbleibt. Die anfängliche Anwendung einer etablierten Unterschichtformulierung (eng. *Sublayer-Model*) führte in Teilen des in diesem Projekt untersuchten Niederdruck- und stark unterkühlten Parameterbereichs zu unphysikalischem Verhalten. Daher wurde eine modifizierte Skalierung der charakteristischen Mikroschichtdicke eingeführt [WVHG⁺26].

Anstatt den CHF direkt mit einem einzelnen Oberflächenparameter zu korrelieren, kombiniert die modifizierte Formulierung Größen, die den thermodynamischen Zustand beschreiben, mit materialabhängigen Deskriptoren. Insbesondere umfasst die angewandte Skalierung die gemessene Benetzbarkeit, die thermodynamische Qualität, Flüssigkeitseigenschaften sowie das thermische Ansprechverhalten der Hüllrohrwand. Die Formulierung wurde anhand einer Zr-4 Referenzbedingung kalibriert. Anschließend wurden dieselben Modellparameter für die übrigen Messpunkte und Hüllrohrkonzepte beibehalten [WVHG⁺26]. Die daraus resultierenden Schätzungen der Mikroschichtdicke wurden zusätzlich mit experimentellen Mikroschichtbeziehungen aus der Literatur verglichen [UtKO13].

Die daraus resultierenden CHF-Vorhersagen wiesen mittlere absolute prozentuale Fehler von etwa 6,8 % für Zr-4, 10,2 % für CrN-beschichtetes Zr-4 und 8,8 % für FeCrAl auf [WVHG⁺26]. Tabelle 9 fasst die Vorhersagefehler im Vergleich zur korrigierten Groeneveld-LUT zusammen.

Tabelle 9: Mittler absoluter prozentualer Fehler der korrigierten Groeneveld-LUT und des werkstoffabhängigen mechanistischen Modells für die behandelten ATF-Hüllrohrkonzept, basierend auf [WVHG⁺26].

Hüllrohrmaterial	Groeneveld LUT / %	Materialabhängiges Modell / %
Zr-4	10.3	6.8
CrN-beschichtetes Zr-4	8.9	10.2
FeCrAl	12.0	8.8

Die Vorhersagegenauigkeit beider Ansätze liegt daher in einer vergleichbaren Größenordnung. Der wesentliche Unterschied besteht nicht in einem durchweg geringeren Vorhersagefehler des mechanistischen Ansatzes, sondern in dessen Fähigkeit, die Materialempfindlichkeit durch die explizite Einbeziehung von oberflächen- und wandbezogenen Größen zu bewahren. In dieser Hinsicht liefert das Modell eine physikalisch begründete Interpretation der gemessenen Materialtrends und nicht lediglich eine alternative empirische Anpassung.

Das Modell sollte nicht als allgemein validierte CHF-Korrelation interpretiert werden. Seine Formulierung wurde für die in den vorliegenden Experimenten dargestellten Bedingungen vom DNB-Typ, mit Unterkühlung und geringer Qualität, entwickelt und ausschließlich innerhalb des entsprechenden thermohydraulischen und geometrischen Bereichs evaluiert. Es ist nicht dazu gedacht, andere CHF-Regime wie ringförmiges Austrocknen oder transientes Wiederbenetzen zu beschreiben. Vor einer allgemeineren Anwendung zur Vorhersage wäre daher eine weitere Validierung mit unabhängigen Daten und über einen erweiterten Parameterbereich erforderlich.

6.3 Bewertung von Material- und Oberflächeneffekten

Die zusammengefassten Versuchsergebnisse zeigen, dass der Einfluss der untersuchten Hüllrohrkonzepte auf den CHF zwar messbar ist, jedoch gegenüber den thermohydraulischen Randbedingungen zweitrangig ist. Schwankungen des Massenstroms, des Drucks und der Einlassunterkühlung führten zu wesentlich größeren Änderungen des CHF als die zwischen den Hüllrohrmaterialien beobachteten Unterschiede. Innerhalb dieser vorherrschenden Trends konnten die Versuche jedoch ein systematisches, materialbezogenes Verhalten feststellen.

Die CrN-beschichtete Zr-4-Hüllrohrkonstruktion wies im Vergleich zur unbeschichteten Referenz

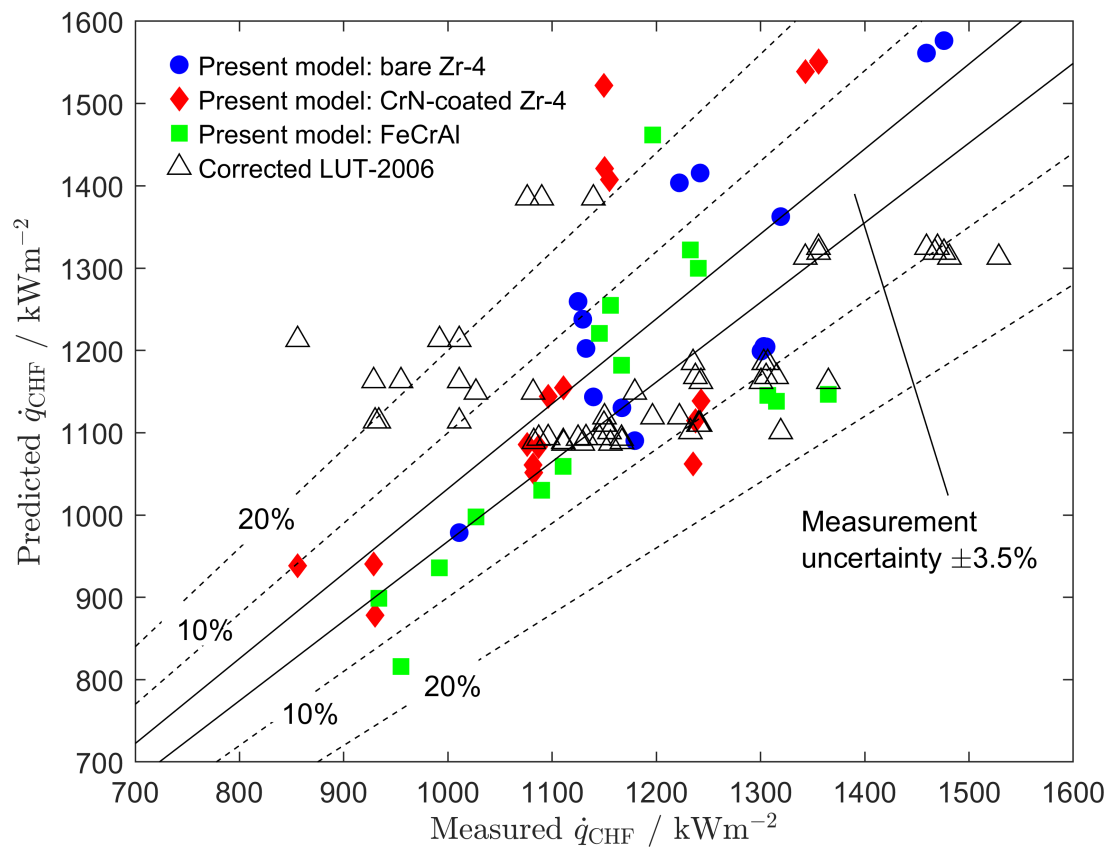


Abbildung 17: Vergleich der CHF-Vorhersagen des eigenen Modells und der LUT als Referenzfall aus der Literatur für die untersuchten ATFs.

eine reproduzierbare Verringerung des CHF auf. Da beide Konfigurationen im Wesentlichen identische makroskopische Geometrien aufwiesen und eine ähnliche Abhängigkeit von der Einlassenthalpie zeigten, ist die beobachtete Verschiebung eher auf das modifizierte Beschichtungs-Substrat-System zurückzuführen als auf ein grundlegend anderes thermohydraulisches Verhalten [WVHG⁺26]. Die experimentellen Daten stützen jedoch nicht die Zuordnung dieses Unterschieds zu einem einzelnen Parameter.

Insbesondere konnten weder die gemessene durchschnittliche Rauheit noch der mittlere Kontaktwinkel allein die CHF-Unterschiede der untersuchten Hüllrohre ganzheitlich beschreiben. Die CrN-Beschichtung verändert gleichzeitig die Oberflächenchemie, die Benetzbarkeit, die oberflächennahe Morphologie und das thermische Verhalten. Auch ihre Wärmeleitfähigkeit unterscheidet sich erheblich von der des darunterliegenden Zr-4-Substrats. Das resultierende CHF-Verhalten sollte daher als Reaktion des gesamten Oberflächen-Substrat-Systems interpretiert werden und nicht als isolierter Effekt von Rauheit, Benetzbarkeit oder einer einzelnen thermophysikalischen Eigenschaft.

FeCrAl stellt einen komplementären Fall dar, da sich sowohl die Oberfläche als auch das Grundmaterial der Ummantelung von herkömmlichem Zr-4 unterscheiden. Trotz dieser Unterschiede blieb die gemessene durchschnittliche CHF-Abweichung innerhalb des experimentell ermittelten Reproduzierbarkeitsbereichs. Unter den untersuchten Bedingungen zeigte FeCrAl daher ein CHF-Verhalten, das insgesamt mit dem der Zr-4-Referenz vergleichbar war [WVHG⁺26]. Die etwas andere Abhängigkeit der FeCrAl-Messungen von der Einlassenthalpie deutet jedoch darauf hin, dass das relative Materialverhalten über den thermohydraulischen Bereich hinweg variieren kann. Die vorliegenden Daten reichen nicht aus, um zu unterscheiden, ob dieses Verhalten überwiegend auf Oberflächeneigenschaften oder auf thermophysikalische Eigenschaften des Grundmaterials zurückzuführen ist.

Die ergänzenden Hochgeschwindigkeitsaufnahmen stützen die Schlussfolgerung, dass globale Oberflächenparameter allein keine vollständige Beschreibung des Siedeverhaltens liefern. Oberflächenmodifikationen führten zu deutlicheren Unterschieden bei der Aktivierung und räumlichen Verteilung der Siedekeimstellen als bei der Blasenabhebefrequenz [WVHG25]. Lokal modifizierte oder beschädigte Bereiche könnten eine andere Aktivität der Siedekeimstellen als die umgebende Oberfläche aufweisen, welche durch integrale Maße wie z.B. die gemittelte Rauheit nicht ausreichend dargestellt werden kann.

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass oberflächenabhängige Siedevorgänge sich messbar verändern können, bevor ausgeprägte Unterschiede im integralen CHF sichtbar werden. Parameter wie die Dichte der Siedekeimstellen, die Blaseninteraktion, die lokale Koaleszenz und die Wiederbenetzung könnten daher zusätzliche Informationen für die mechanistische Interpretation des materialabhängigen CHF-Verhaltens liefern. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt bleibt dieser Zusammenhang jedoch qualitativ.

Die detaillierten NSD/BDF-Messungen und die CHF-Experimente an Stabbündeln wurden in unterschiedlichen Testabschnittsgeometrien durchgeführt und umfassten teilweise unterschiedliche Beschichtungsvarianten. Eine direkte quantitative Zuordnung einer gemessenen Veränderung des Siedekeimerhaltens zu einer spezifischen CHF-Verschiebung würde über die verfügbaren Daten gestützten Informationen hinausgehen. Die optischen Messungen sollten stattdessen als ergänzender Beleg dafür angesehen werden, dass oberflächenabhängige Effekte bereits im Bereich des Nukleationssiedens vorhanden sind.

6.4 Einschränkungen und Übertragbarkeit

Der Versuchsrahmen wurde in erster Linie für einen kontrollierten Vergleich verschiedener Hüllrohrkonzepte entwickelt und nicht zur direkten Nachbildung der Betriebsbedingungen eines Kernreaktors in Originalgröße. Die wichtigsten CHF-Messungen wurden in einem kurzen Stabbündel

aus fünf Stäben unter Niederdruckbedingungen und vorwiegend unterkühlten Strömungssiedebedingungen durchgeführt. Folglich bieten die Ergebnisse eine reproduzierbare Grundlage für die Ermittlung relativer Werkstoffeffekte innerhalb des untersuchten Bereichs, stellen jedoch keine quantitativen CHF-Korrekturfaktoren für Reaktorbrennelemente dar.

Insbesondere kann sich die relative Bedeutung von material- und oberflächenabhängigen Effekten in Abhängigkeit von Druck, Massenstrom, Dampfqualität, beheizter Länge, Bündelgeometrie und Wechselwirkung zwischen den Teilkanälen (eng. *Subchannels*) ändern. Die vorliegenden Ergebnisse sollten daher eher als Bewertung der Materialempfindlichkeit unter kontrollierten Niederdruckbedingungen interpretiert werden und nicht als direkte Eignungsprüfung der untersuchten ATF-Konzepte für den Reaktoreinsatz.

Eine weitere Einschränkung ergibt sich aus der gleichzeitigen Variation mehrerer Werkstoffeigenschaften. Die untersuchten Hüllrohre unterscheiden sich hinsichtlich Oberflächenmorphologie, Benetzbarkeit, Oberflächenchemie, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität. Die Experimente stellen folglich keine kontrollierte Ein-Parameter-Variation dar und können den Beitrag jeder einzelnen Eigenschaft zu den beobachteten CHF-Unterschieden nicht eindeutig identifizieren.

Die angewandte Oberflächencharakterisierung liefert zudem nur integrale Deskriptoren des für das Sieden relevanten Oberflächenzustands. Rauheitswerte wurden aus einer endlichen Anzahl von Profilometermessungen gewonnen, während Kontaktwinkel in entionisiertem Wasser bei Raumtemperatur bestimmt wurden. Diese Größen ermöglichen einen reproduzierbaren Vergleich zwischen den Proben, geben aber keinen Aufschluss über die vollständige lokale Hohlraumstruktur der Oberfläche, die chemische Heterogenität oder das temperaturabhängige Benetzungsverhalten während des Siedens.

Die Hochgeschwindigkeits-Bildauswertung unterliegt bei hohen Blasendichten zusätzlichen Einschränkungen. Zunehmende Blasenwechselwirkungen und -koaleszenz verdecken die beheizte Oberfläche zunehmend und verringern die Fähigkeit, einzelne aktive Keimbildungsstellen zu unterscheiden. Die resultierenden NSD-Werte werden daher am oberen Ende des untersuchten Wärmeflussbereichs weniger sicher [WVHG25].

Schließlich stellt das werkstoffabhängige CHF-Modell eine Interpretation des untersuchten DNB-Regimes dar und wurde anhand der vorliegenden experimentellen Datenbank kalibriert und bewertet [WVHG⁺26]. Seine Übereinstimmung mit den gemessenen Trends untermauert die Relevanz der Einbeziehung werkstoffabhängiger Größen in mechanistische CHF-Beschreibungen, begründet jedoch keine allgemeine Vorhersagegültigkeit. Eine unabhängige Validierung unter breiteren thermohydraulischen Bedingungen und für weitere Hüllrohrsysteme bleibt erforderlich.

Innerhalb dieser Einschränkungen zeigen die kombinierten experimentellen und Modellierungsergebnisse durchgängig, dass der externe thermohydraulische Zustand die dominierende CHF-Variation bestimmt, während eine Modifikation der Hüllrohroberfläche oder des Materials kleinere, aber experimentell unterscheidbare Veränderungen bewirken kann. Diese Unterscheidung bildet die Grundlage für die anschließende Bewertung der Projektumsetzung und der Erreichung der ursprünglichen Ziele.

7 Projektdurchführung und Erreichung der Ziele

7.1 Projektentwicklung

Das ursprüngliche Projektprogramm war in sieben Arbeitspakete gegliedert, die die Literaturrecherche und Einarbeitung, die numerische Vorbereitung, die Entwicklung des Versuchssystems, Vorversuche, die Hauptmesskampagnen, die Nachanalyse sowie die Dokumentation und Verbreitung umfassten. Das übergeordnete Ziel bestand darin, eine reproduzierbare experimentelle Grundlage für die Bewertung des Einflusses von ATF-Hüllrohrkonzepten auf das Strömungssieden und die CHF unter ansonsten vergleichbaren Stabbündelbedingungen zu schaffen.

Das grundlegende experimentelle Ziel blieb während des gesamten Projekts unverändert. Die technische Umsetzung entwickelte sich jedoch iterativ als Reaktion auf Erkenntnisse, die während der Auslegung des Testabschnitts, der Inbetriebnahme und der ersten Messkampagnen gewonnen wurden. Insbesondere erforderte die elektromagnetische Wechselwirkung zwischen den direkt beheizten Stäben die Entwicklung des Konzepts einer koaxial entmagnetisierende Stromversorgung, während CFD-gestützte Modifikationen des Einlassbereichs eingeführt wurden, um die Reproduzierbarkeit der Bündelströmung zu verbessern. Für die FeCrAl-Konfiguration waren anschließend materialspezifische Anpassungen erforderlich.

Die Projektlaufzeit wurde kostenneutral um ein viertes Jahr verlängert, vor allem um das Versuchsprogramm hinsichtlich FeCrAl und der Unterscheidung zwischen Beschichtungs- und Substrateffekten zu erweitern. Das abschließende Versuchsprogramm umfasste daher Zr-4, CrN-beschichtetes Zr-4, FeCrAl und CrN-beschichtetes FeCrAl. Gemäß dem abschließenden Projektstand wurden die geplanten CHF-Messreihen und die entsprechenden Auswertungen für alle vier Konfigurationen abgeschlossen.

Das Versuchsprogramm entwickelte sich zudem über den ursprünglichen Schwerpunkt auf dem integralen CHF-Wert hinaus. Ergänzende Hochgeschwindigkeitsmessungen wurden eingeführt, um die oberflächenabhängige Aktivierung von Siedekeimstellen und das Blasenabhebeverhalten zu charakterisieren. Diese Untersuchungen lieferten zusätzliche Informationen zu den dem CHF vorausgehenden Siedevorgängen und erzeugten experimentell erfassbare Größen, die für die anschließende Modellentwicklung relevant sind [WVHG25].

Die bedeutendste methodische Anpassung betraf die numerische Arbeit. Das ursprüngliche Programm sah die schrittweise Entwicklung eines Zweiphasen-CFD-Modells vor, einschließlich MUSIG-basierter Berechnungen und anschließender Post-Test-Simulationen zur Interpretation der CHF-Messungen. Im Laufe des Projekts erwies sich die CFD als besonders wertvoll für die hydraulische Optimierung, die Sensorpositionierung, die Charakterisierung der Strömung im Testabschnitt und die Abschätzung quasi-stationärer Bedingungen vor dem CHF. Die thermoelektrische FEM unterstützte zusätzlich die Auslegung der direkt beheizten Stäbe. Die transiente Entstehung und Ausbreitung des lokalen Trockenbereichs bei CHF konnte jedoch durch den angewandten CFD-Rahmen nicht mit ausreichender Robustheit dargestellt werden, um eine vorausschauende Bestimmung des gemessenen CHF zu ermöglichen.

Die numerischen Aktivitäten wurden daher auf jene Aspekte umgelenkt, für die eine ausreichend zuverlässige Anwendung etabliert werden konnte. Die Analyse der experimentellen CHF-Daten selbst stützte sich zunehmend auf die gemessenen thermohydraulischen Abhängigkeiten, die Bewertung der Reproduzierbarkeit, die Oberflächencharakterisierung, den Vergleich mit etablierten empirischen Vorhersagemethoden sowie die Entwicklung einer materialabhängigen mechanistischen Interpretation [WVHG⁺26]. Dies stellt eher eine Anpassung der ursprünglich vorgesehenen Methodik dar als eine Änderung des zugrunde liegenden wissenschaftlichen Ziels.

7.2 Umsetzung der einzelnen Arbeitspakete

Der aktuelle Stand der einzelnen Arbeitspakete ist in Tabelle 10 zusammengefasst. Bei der Bewertung wird zwischen der Erreichung des zugrunde liegenden Ziels und der exakten Umsetzung der ursprünglich im Antrag vorgesehenen Methodik unterschieden.

7.3 Projektziele

Das Hauptziel des Projekts wurde erreicht. Es wurde eine spezielle Versuchsmethodik entwickelt, die es ermöglicht, verschiedene konventionelle und ATF-Hüllrohrkonzepte in einer gemeinsamen Stabbündelgeometrie unter reproduzierbaren Niederdruck-Strömungssiedebedingungen zu untersuchen. Der Versuchsaufbau ermöglichte wiederholte CHF-Messungen unter Beibehaltung der grundlegenden Bündelgeometrie und des thermohydraulischen Messverfahrens zwischen den materialspezifischen Messreihen.

Eine zentrale Anforderung des Projekts war die Unterscheidung zwischen materialbedingten CHF-Unterschieden und den durch die externen thermohydraulischen Randbedingungen verursachten Schwankungen. Dieses Ziel wurde durch eine gemeinsame Testmatrix, wiederholte Messungen und eine spezielle Reproduzierbarkeitsanalyse erreicht. Die daraus resultierende Datenbank zeigte, dass Druck, Massenstrom und thermodynamischer Zustand am Einlass die dominierenden Einfluss am CHF darstellen. Es konnte dennoch der ein statistisch signifikanter ATF-materialabhängiger Einfluss am CHF gezeigt werden, welcher größer ist als stochastische Schwankungen der Randbedingungen im Versuchsbetrieb [WVHG⁺26].

Der Vergleich zwischen den Hüllrohrkonzepten zeigte eine statistisch signifikant nachweisbare Verringerung des CHF bei CrN-beschichtetem Zr-4 im Vergleich zur unbeschichteten Referenz, während die durchschnittliche Abweichung von FeCrAl innerhalb des experimentell ermittelten Reproduzierbarkeitsbereichs blieb. Diese Ergebnisse belegen, dass eine Modifikation der Hüllrohr-Oberfläche den CHF unter ansonsten vergleichbaren Stabbündelbedingungen beeinflussen kann, zeigen aber auch, dass das Ausmaß des Werkstoffeffekts erheblich geringer ist als die mit den wichtigsten thermohydraulischen Parametern verbundenen Schwankungen [WVHG⁺26].

Das Projekt ergab zudem, dass eine solche Materialempfindlichkeit nicht angemessen durch einen einzigen globalen Oberflächenparameter beschrieben werden kann. Rauheit, Benetzbarkeit, Oberflächenchemie und thermophysikalische Eigenschaften variieren gleichzeitig zwischen den untersuchten Materialsystemen. Ergänzende Hochgeschwindigkeitsmessungen zeigten ferner, dass modifizierte Oberflächen nachweisbare Unterschiede bei der Aktivierung von Siedekeimstellen und im räumlichen Siedeverhalten hervorrufen können, bevor entsprechende Veränderungen im integralen CHF gleichermaßen erkennbar werden [WVHG25].

Die Modellierungsarbeiten erfüllten eine wichtige unterstützende Rolle, identifizierten jedoch auch eine relevante Einschränkung des ursprünglich vorgesehenen Ansatzes. Numerische Methoden wurden erfolgreich zur Entwicklung von Teststrecken und zur Charakterisierung der thermohydraulischen Bedingungen vor dem CHF eingesetzt. Eine direkte Vorhersagesimulation ohne Submodellunterstützung des transienten CHF-Ereignisses, konnte mit dem angewandten CFD-Rahmenwerk jedoch nicht etabliert werden. Das Projekt verlagerte daher die detaillierte CHF-Interpretation hin zur experimentellen Parameteranalyse und zum Vergleich mit empirischen und mechanistischen Vorhersagemethoden. Innerhalb des untersuchten Bereichs konnte eine werkstoffabhängige mechanistische Formulierung die wesentlichen Werkstofftrends mit einer Genauigkeit reproduzieren, die mit etablierten ingenieurwissenschaftlichen Vorhersagemethoden vergleichbar ist [WVHG⁺26].

Das abschließende Versuchsprogramm ging über den ursprünglich geplanten Vergleich von drei Werkstoffen hinaus, indem CrN-beschichtetes FeCrAl als zusätzliche Konfiguration einbezogen wurde. Gleichzeitig erweiterten die Untersuchungen zum Hochgeschwindigkeitssieden die verfügbare Datenbank über integrale CHF-Werte hinaus auf lokale Siedeparameter. Diese Erweiterungen

Tabelle 10: Vergleich der ursprünglich geplanten Arbeitspakete mit dem aktuellen Projektstand.

Geplanter Status	Finaler Status
A1 - Literaturrecherche und Einarbeitung	Abgeschlossen. Die wissenschaftliche und technische Literaturgrundlage wurde im Laufe des Projekts kontinuierlich erweitert und in die Versuchsplanung, Datenauswertung, Modellierungsaktivitäten sowie wissenschaftliche Veröffentlichungen einbezogen.
A2 - Auslegung und Simulation vor dem Test	Abgeschlossen mit angepasstem Umfang. RANS- und LES-Berechnungen wurden zur Optimierung der Einströmung, zur hydraulischen Charakterisierung und zur Unterstützung der Sensorpositionierung verwendet. Thermisch-elektrische FEM-Berechnungen unterstützten die Auslegung der direkt beheizten Stäbe, während Mehrphasenberechnungen auf quasi-stationäre Vor-CHF-Bedingungen angewendet wurden. Das transiente CHF-Ereignis selbst konnte mit der angewandten CFD-Methodik nicht vorhersagbar aufgelöst werden.
A3 - Auslegung und Bau des Testabschnitts	Abgeschlossen. Der Testabschnitt mit fünf Stabbündeln, die Instrumentierung, das elektrische Heizkonzept, die Strömungsaufbereitung und die werkstoffspezifischen Stabkonfigurationen wurden bei COSMOS-L entwickelt und umgesetzt. Der endgültige Aufbau umfasste Konfigurationen aus Zr-4, CrN-beschichtetem Zr-4, FeCrAl und CrN-beschichtetem FeCrAl.
A4 - Vorversuche und Qualifizierung	Abgeschlossen. Die erforderlichen Inbetriebnahmen und projektspezifischen Vorversuche wurden durchgeführt. Diese Aktivitäten umfassten die Qualifizierung der Bau- und Beheizungskonzepte, die Bewertung der Messqualität und Reproduzierbarkeit sowie die Vorbereitung der nachfolgenden CHF-Messkampagnen.
A5 - Hauptversuchs- programm	Abgeschlossen und erweitert. Für die untersuchten Stabbündelkonfigurationen wurden systematische CHF-Messungen unter Verwendung vergleichbarer thermohydraulischer Verfahren durchgeführt. Zur Quantifizierung der CHF-Reproduzierbarkeit wurden Wiederholungsmessungen einbezogen. Das endgültige Programm wurde auf CrN-beschichtetes FeCrAl ausgeweitet und durch Hochgeschwindigkeitsuntersuchungen des Siedekeim- und Blasenabhebeverhaltens ergänzt.
A6 - Datenanalyse und Nachuntersuchung	Abgeschlossen mit methodischer Anpassung. Die experimentellen CHF-Daten wurden im Hinblick auf thermohydraulische und materialabhängige Effekte ausgewertet und mit etablierten sowie mechanistischen Vorhersageansätzen verglichen. Die ursprünglich geplante direkte CFD-Vorhersage des transienten CHF-Ereignisses wurde durch ein hüllrohrsensitives CHF-Submodell ergänzt; Rein numerische Analysen wurden vorrangig zur Konstruktionsunterstützung und zur Charakterisierung der Pre-CHF Bedingungen genutzt.
A7 - Dokumentation und Veröffentlichung	Abgeschlossen mit der vorliegenden abschließenden Dokumentation. Die Projektergebnisse wurden durch Konferenzbeiträge und eine in einer Fachzeitschrift mit Peer-Review veröffentlichte Arbeit verbreitet. Die experimentelle Methodik, der CHF-Vergleich und die ergänzende Analyse der Hochgeschwindigkeitsmessungen wurden dadurch der wissenschaftlichen Gemeinschaft zugänglich gemacht [WHHG ⁺ 24, WHGC24, WVHG25, WVHG ⁺ 26].

stärken die experimentelle Grundlage für nachfolgende Analysen von Beschichtungs-, Substrat- und Oberflächeneffekten.

Insgesamt hat das Projekt die angestrebte experimentelle Grundlage für die Bewertung des Siedeverhaltens fortschrittlicher Hüllrohrkonzepte geschaffen und einen dokumentierten Datensatz generiert, der sich für weitere wissenschaftliche Analysen und die Modellentwicklung eignet. Die technische Umsetzung und die numerische Methodik wurden im Laufe des Projekts dort angepasst, wo dies aufgrund der experimentellen Ergebnisse erforderlich war, während das wissenschaftliche Hauptziel eines reproduzierbaren Materialvergleichs beibehalten und erreicht wurde. Neben den bereits veröffentlichten Daten brachte das Projekt eine umfangreiche Ausgangsbasis für weiterführende Forschungsarbeiten hervor. Insbesondere in Richtung der Grundlagenforschung des Nukleations und Austrocknungsprozesses rund um den DNB und der Post-CHF Phase.

8 Verwertung der wissenschaftliche Ergebnisse & Ausblick

8.1 wissenschaftliche Ergebnisse

Die wissenschaftliche Veröffentlichung begleitete das Versuchsprogramm während der gesamten späteren Projektphasen. Erste Ergebnisse zur entwickelten Stabbündel-Methodik und zur experimentellen Bestimmung des CHF unter Niederdruck-Strömungssiedebedingungen wurden auf dem SWINTH-Workshop im Jahr 2024 vorgestellt [WHHG⁺24]. Ein nachfolgender Beitrag auf der NUTHOS-14 konzentrierte sich speziell auf den Vergleich zwischen unbeschichtetem und mit einer CrN-basierter Beschichtung auf Zr-4 sowie den entsprechenden Einfluss auf den gemessenen CHF [WHGC24].

Da die experimentelle Analyse über den integralen CHF-Wert hinaus erweitert wurde, wurden die entwickelte Hochgeschwindigkeits-Bildgebungsmethode und ihre Anwendung zur Bestimmung der Bildung von Siedekeimstellendichten und des Blasenabhebeverhaltens auf der NURETH-21 vorgestellt [WVHG25]. Die wichtigsten CHF-Ergebnisse für Stabbündel wurden anschließend in einem Zeitschriftenartikel in *Nuclear Technology* veröffentlicht. Diese Veröffentlichung umfasst den systematischen Vergleich von Zr-4, CrN-beschichtetem Zr-4 und FeCrAl, die Bewertung der experimentellen Reproduzierbarkeit sowie den Vergleich mit empirischen und werkstoffabhängigen Ansätzen zur CHF-Vorhersage [WVHG⁺26].

Die wichtigsten wissenschaftlichen Veröffentlichungen, die aus dem Projekt hervorgegangen sind, sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11: Wichtigste wissenschaftliche Ergebnisse des Projekts.

Year / Venue	Focus	Contribution
2024 / SWINTH	CHF-Methode für Stabbündel	Experimentelle Untersuchung des Strömungssiedens bei niedrigem Druck und des CHF unter Verwendung der entwickelten vertikalen Teststrecke mit fünf Hüllrohren [WHHG ⁺ 24].
2024 / NUTHOS-14	CHF Verhalten von Cr-basierten ATF's	Vergleichende CHF-Bewertung von unbeschichtetem und Cr-beschichteten Zr-4 unter variierten thermohydraulischen Bedingungen [WHGC24].
2025 / NURETH-21	Siedeverhalten von ATF Hüllrohren	Hochgeschwindigkeits-aufnahmen und quantitative Auswertung des Siedeverhaltens von ATF-Materialien [WVHG25].
2025 / Nuclear Technology	CHF Verhalten von ATFs	Vergleich von Zr-4, CrN-beschichtetem Zr-4 und FeCrAl in Stabbündel und einer materialabhängigen CHF-Modellierung [WVHG ⁺ 26].
2026 / NUTHOS-15	Untersuchung im Pilotmaßstab zum Post-CHF	Vergleich verschiedener ATF-Hüllrohre unter Post-CHF Bedingungen, außerhalb des regulären Projektrahmens [TBA].

Die Veröffentlichungen spiegeln verschiedene Phasen und Aspekte des Projekts mit wachsendem Datensatz wieder. Die Konferenzbeiträge dokumentieren die schrittweise Entwicklung der experimentellen Methodik und einzelner Analyse Themen, während die Fachzeitschriftenveröffentlichung

die umfassendste, Auswertung der wichtigsten CHF-Messungen an Stabbündeln liefert, die zum Abschluss des Projekts vorlagen.

8.2 Verwertung

Über die einzelnen Veröffentlichungen hinaus ist ein wesentliches Ergebnis des Projekts die unter kontrollierten und reproduzierbaren Bedingungen erstellte Versuchsdatenbank. Das abschließende Versuchsprogramm umfasste CHF-Messreihen und anschließende Auswertungen für Zr-4, CrN-beschichtetes Zr-4, FeCrAl und CrN-beschichtetes FeCrAl. Die veröffentlichte Zeitschriftenanalyse behandelt die ersten drei Konfigurationen im Detail [WVHG⁺26], während die zusätzlichen Messungen an CrN-beschichtetem FeCrAl die verfügbare Projektdatenbank hinsichtlich kombinierter Beschichtungs- und Substrateffekte erweitern.

Die Aussagekraft des CHF-Datensatzes wird durch die einheitliche Versuchsgeometrie, die systematische Variation der thermohydraulischen Randbedingungen, Wiederholungsmessungen sowie die gezielte Bewertung der experimentellen Unsicherheit und der CHF-Reproduzierbarkeit untermauert. Diese Merkmale ermöglichen es, materialbezogene Unterschiede deutlicher von Schwankungen zu unterscheiden, die mit den äußeren Randbedingungen und dem inhärenten statistischen Charakter der Siedekrise zusammenhängen.

Die daraus resultierenden Daten können daher nicht nur zum Vergleich der untersuchten Hüllrohrkonzepte verwendet werden, sondern auch als Grundlage für die weitere Bewertung und Entwicklung empirischer und mechanistischer CHF-Vorhersageansätze dienen. Das im Rahmen des vorliegenden Projekts untersuchte materialempfindliche Modell stellt eine Anwendung dieser Datenbank dar [WVHG⁺26]. Die experimentellen Ergebnisse können zudem nachfolgende Validierungsmaßnahmen unterstützen, bei denen material- oder oberflächenabhängige Siedeeffekte von den dominierenden thermohydraulischen Abhängigkeiten unterschieden werden sollen.

Durch die Hochgeschwindigkeits-Siedemessungen wurde ein ergänzender Datensatz generiert. Zusätzlich zu den ursprünglichen Bildsequenzen liefert die entwickelte Auswertungsmethodik räumlich aufgelöste Informationen über die Aktivierung und Dynamik von Siedeparametern direkt auf der beheizten Oberfläche [WVHG25]. Diese Größen sind für die Weiterentwicklung und Bewertung von Wandverdampfungsmodellen wie bspw. RPI-ähnliche Modelle relevant, für die Siedekeimbildung und die Blasen-Dynamik wichtige Schließungsinformationen darstellen.

Die kombinierte Projektdatenbank deckt somit verschiedene Ebenen des Verdampfungsprozesses ab. Die Stabbündel-Messungen charakterisieren die durch CHF repräsentierte integrale thermische Grenze, während die Hochgeschwindigkeitsuntersuchungen Informationen zum lokalen Siedeverhalten vor der Siedekrise liefern. Die Oberflächencharakterisierung und die damit verbundenen Werkstoffeigenschaften bieten eine zusätzliche Ebene zur Interpretation der Unterschiede zwischen den untersuchten Hüllrohrsystemen. Diese Kombination ermöglicht es, bei zukünftigen Analysen das makroskopische CHF-Verhalten zusammen mit lokalen, oberflächenabhängigen Siedeparametern zu berücksichtigen, anstatt sich ausschließlich auf globale thermohydraulische Größen zu stützen.

Die entwickelte experimentelle Methodik stellt ein weiteres wiederverwendbares Projektergebnis dar. Die Konfiguration mit fünf Stabbündeln, das elektrische Heizkonzept, die magnetische Kompensation, die Instrumentierung, die CHF-Erkennung und der optische Zugang wurden im Laufe des Projekts etabliert und qualifiziert. Am Ende des Projekts stand der Versuchsaufbau für nachfolgende Post-CHF Untersuchungen zur Verfügung, und die Temperaturmessfähigkeit des zentralen Stabs wurde auf höhere Hüllrohrtemperaturen ausgeweitet. Die daraus resultierende Infrastruktur bildet somit eine Grundlage für experimentelle Fragestellungen, die über den ursprünglichen CHF-Vergleich hinausgehen.

8.3 Ausblick

Das vorliegende Projekt schafft eine kontrollierte experimentelle Grundlage für die Untersuchung materialabhängiger Siedevorgänge, schöpft jedoch das wissenschaftliche Potenzial der gewonnenen Daten nicht vollständig aus. Insbesondere bieten die abgeschlossenen Messreihen Möglichkeiten zur weiteren Analyse von Wechselwirkungen zwischen Beschichtung und Substrat, lokalen Oberflächeneffekten sowie des Zusammenhangs zwischen den Eigenschaften des Nukleationsiedens und dem anschließenden Übergang zum CHF. Solche Analysen können unter Verwendung der vorhandenen Datenbank durchgeführt werden, ohne dass eine vollständige Wiederholung des ursprünglichen Versuchsprogramms erforderlich ist.

Eine mögliche Erweiterung stellt die Weiterentwicklung der optischen Auswertungsmethodik dar. Der derzeitige Hochgeschwindigkeitsansatz liefert quantitative Informationen zur Dichte der Keimbildungsstellen und zum Ablösungsverhalten der Blasen, doch zunehmende Blasenwechselwirkungen und optische Behinderungen schränken die Identifizierung einzelner Stellen bei hohem Wärmefluss ein. Fortgeschrittenere Bildanalysemethoden könnten daher den erfassbaren Bereich erweitern und zusätzliche lokale Siedeparameter liefern.

Die experimentelle Infrastruktur ermöglicht zudem eine Ausweitung des untersuchten thermischen Bereichs über den Beginn des CHF hinaus. Mögliche Folgeaktivitäten umfassen die Charakterisierung der Wärmeübertragung nach dem CHF, die Entstehung und Ausbreitung von Trockenbereichen, das Erholungs- oder Wiederbenetzungsverhalten sowie den Zustand der Hüllrohrmaterialien nach einer Exposition bei erhöhten Temperaturen. Insbesondere Post-CHF Experimente, welche ATF-Hüllrohrproben für die Materialforschung, in Hinblick auf *Coping-Time/ Time X in CHF* Strategien bereitstellen kann. Die gegen Ende des Projekts entwickelte erweiterte Temperaturmesstechnik bildet die technische Grundlage für solche Untersuchungen.

Eine umfassendere Validierung materialabhängiger CHF-Modelle würde Messungen jenseits des derzeitigen Niederdruck-Parameterbereichs und gegebenenfalls zusätzliche Hüllrohr- und Oberflächensysteme erfordern. Die im vorliegenden Projekt erzielten Ergebnisse bieten dennoch eine nützliche Referenz für die Beurteilung, welche materialabhängigen Effekte experimentell noch unterscheidbar sind, sobald der dominierende Einfluss der thermohydraulischen Randbedingungen und die intrinsische Reproduzierbarkeit von CHF berücksichtigt werden.

Zukünftige wissenschaftliche Arbeiten können daher sowohl auf der etablierten experimentellen Plattform als auch auf dem generierten Datensatz aufbauen. Detailliertere Analysen einzelner Teilthemen können unabhängig voneinander verfolgt werden, sofern die verfügbaren Messungen eine entsprechende wissenschaftliche Fragestellung stützen. Solche Arbeiten können die Interpretation der vorliegenden Ergebnisse erweitern, ohne die grundlegende Schlussfolgerung des Projekts zu ändern: Material- und Oberflächenmodifikationen können das Siedeverhalten und das CHF-Verhalten beeinflussen, wobei ihre Wirkung im Rahmen der wesentlich stärkeren Abhängigkeit von den umgebenden thermohydraulischen Bedingungen bewertet werden muss.

Literatur

- [AKHB⁺20] A. Ali, H.-G. Kim, K. Hattar, S. Briggs, D.-J. Park und Y. Lee. Ion Irradiation Effects on Cr-Coated Zircaloy-4 Surface Wettability and Pool Boiling Critical Heat Flux. *Nuclear Engineering and Design* Band 362, 2020, S. 110581.
- [ANSY22] ANSYS, Inc. *ANSYS Fluent Theory Guide*. ANSYS, Inc., 2022. Release 2022 R2.
- [BLSLCo16] J.-C. Brachet, M. Le Saux, V. Lezaud-Chaillieux und andere. Behavior Under LOCA Conditions of Enhanced Accident Tolerant Chromium Coated Zircaloy-4 Claddings. In *Proceedings of TopFuel 2016: Light Water Reactor Fuel Performance Meeting*, Boise, Idaho, USA, 2016. September 11–15, 2016.
- [CCMS⁺94] G. P. Celata, M. Cumo, A. Mariani, M. Simoncini und G. Zummo. Rationalization of Existing Mechanistic Models for the Prediction of Water Subcooled Flow Boiling Critical Heat Flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 37(Supplement 1), 1994, S. 347–360.
- [Chas98] J. Chase, Malcolm W. *NIST-JANAF Thermochemical Tables*. Nr. 9 der Journal of Physical and Chemical Reference Data Monograph. American Institute of Physics. 4. Auflage, 1998.
- [CoBr78] K. Cornwell und R. D. Brown. Boiling Surface Topography. In *Proceedings of the 6th International Heat Transfer Conference*, Band 1, Toronto, Canada, 1978. S. 157–161.
- [CSLL⁺24] S. Chen, L. Shi, H. Li, D. Li, L. Chen und andere. An Experimental Study on Critical Heat Flux for Low Flow and Low Pressure of Water in a Hexagonal 7-Rod Bundle Channel. *Progress in Nuclear Energy* Band 171, 2024, S. 105154.
- [DZWX24] M. Duan, M. Zhao, J. Wei und Y. Xu. An Experimental Research of the Influence on Critical Heat Flux of a Rod Bundle Under Certain Inlet Temperatures. *Frontiers in Energy Research* Band 12, 2024, S. 1340675.
- [Gaer65] R. F. Gaertner. Photographic Study of Nucleate Pool Boiling on a Horizontal Surface. *Journal of Heat Transfer* 87(1), 1965, S. 17–27.
- [GaWe60] R. F. Gaertner und J. W. Westwater. Population of Active Sites in Nucleate Boiling Heat Transfer. *Chemical Engineering Progress Symposium Series* 56(30), 1960, S. 39–48.
- [GSVL⁺07] D. C. Groeneveld, J. Q. Shan, A. Z. Vasić, L. K. H. Leung, A. Durmayaz, J. Yang, S. C. Cheng und A. Tanase. The 2006 CHF Look-Up Table. *Nuclear Engineering and Design* 237(15–17), 2007, S. 1909–1922.
- [HKS18] C. Haas, F. Kaiser, T. Schulenberg und T. Wetzel. Critical Heat Flux for Flow Boiling of Water on Micro-Structured Zircaloy Tube Surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer* Band 120, 2018, S. 793–806.
- [Inte01] International Atomic Energy Agency. Thermohydraulic Relationships for Advanced Water Cooled Reactors. Technischer Bericht IAEA-TECDOC-1203, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2001.
- [Kant24] Kanthal. Kanthal® APM: Resistance Heating Wire and Resistance Wire. Datasheet, 2024.

- [KaSG24] F. Kaiser, Y. Sato und S. Gabriel. Subcooled Forced Convection Boiling Flow Measured Using High-Resolution Techniques at the COSMOS-L Facility and Accompanying CFD Simulation Employing an Interface-Tracking Scheme. *International Journal of Multiphase Flow* Band 174, 2024, S. 104772.
- [Katt90] Y. Katto. A Physical Approach to Critical Heat Flux of Subcooled Flow Boiling in Round Tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 33(4), 1990, S. 611–620.
- [Kim09] J. Kim. Review of Nucleate Pool Boiling Bubble Heat Transfer Mechanisms. *International Journal of Multiphase Flow* 35(12), 2009, S. 1067–1076.
- [Kim⁺22] C. Kim und andere. Oxidation Mechanism and Kinetics of Nuclear-Grade FeCrAl Alloys in the Temperature Range of 500–1500 °C in Steam. *Journal of Nuclear Materials* Band 564, 2022, S. 153696.
- [LCYA10] J.-M. Le Corre, S.-C. Yao und C. H. Amon. Two-Phase Flow Regimes and Mechanisms of Critical Heat Flux Under Subcooled Flow Boiling Conditions. *Nuclear Engineering and Design* 240(2), 2010, S. 245–251.
- [LeCh77] M. Lemmert und J. M. Chawla. Influence of Flow Velocity on Surface Boiling Heat Transfer Coefficient. In E. Hahne und U. Grigull (Hrsg.), *Heat Transfer in Boiling*, S. 237–247. Hemisphere Publishing Corporation, Washington, DC, 1977.
- [LJAC⁺18] Q. Li, Y. Jiao, M. Avramova, P. Chen, J. Yu, J. Chen und J. Hou. Development, Verification and Application of a New Model for Active Nucleation Site Density in Boiling Systems. *Nuclear Engineering and Design* Band 328, 2018, S. 1–9.
- [MAT01] MATPRO—A Library of Materials Properties for Light-Water-Reactor Accident Analysis. Technischer Bericht NUREG/CR-6150, Rev. 2, Vol. 4, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2001.
- [MRMD⁺17] M. A. Mendez, M. Raiola, A. Masullo, S. Discetti, A. Ianaro, R. Theunissen und J.-M. Buchlin. POD-Based Background Removal for Particle Image Velocimetry. *Experimental Thermal and Fluid Science* Band 80, 2017, S. 181–192.
- [ORN16] Thermal Conductivity and Electrical Resistivity of Zircaloy-4 Tubes and Plates. Technischer Bericht Pub176826, Oak Ridge National Laboratory, 2016.
- [RZYS⁺19] T. Ren, Z. Zhu, M. Yan, J. Shi und C. Yan. Experimental Study on Bubble Nucleation and Departure for Subcooled Flow Boiling in a Narrow Rectangular Channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer* Band 144, 2019, S. 118670.
- [ŠGSC⁺18] M. Ševeček, A. Gurgen, A. Seshadri, Y. Che, M. Wagih, B. Phillips, V. Champagne und K. Shirvan. Development of Cr Cold Spray-Coated Fuel Cladding with Enhanced Accident Tolerance. *Nuclear Engineering and Technology* 50(2), 2018, S. 229–236.
- [Terr18] K. A. Terrani. Accident Tolerant Fuel Cladding Development: Promise, Status, and Challenges. *Journal of Nuclear Materials* Band 501, 2018, S. 13–30.
- [ToWe96] L. S. Tong und J. Weisman. *Thermal Analysis of Pressurized Water Reactors*. American Nuclear Society, La Grange Park, IL. 3. Auflage, 1996.
- [UtKO13] Y. Utaka, Y. Kashiwabara und M. Ozaki. Microlayer Structure in Nucleate Boiling of Water and Ethanol at Atmospheric Pressure. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 57(1), 2013, S. 222–230.

- [VILK15] M. C. Vlachou, J. S. Lioumbas und T. D. Karapantsios. Heat Transfer Enhancement in Boiling over Modified Surfaces: A Critical Review. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer* 3(4), 2015, S. 341–367.
- [WHGC24] N. Wefers, W. Heiler, S. Gabriel und A. Class. Influence of ATF Coatings on the Critical Heat Flux in a Vertical Rod Bundle During Flow Boiling of Water at Low Pressure. In *Proceedings of the 14th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Operation, and Safety (NUTHOS-14)*, Vancouver, British Columbia, Canada, 2024. S. 1669–1680. August 25–28, 2024.
- [WHHG⁺24] N. Wefers, W. Heiler, F. Heineken, S. Gabriel und A. G. Class. Critical Heat Flux for Flow Boiling of Water in a Vertical Rod Bundle at Low Pressure. In *Specialist Workshop on Advanced Instrumentation and Measurement Techniques for Nuclear Reactor Thermal Hydraulics and Severe Accidents (SWINTH-2024)*, Dresden, Germany, 2024. Article 052; June 17–20, 2024.
- [WVHG25] N. Wefers, D. Vlček, W. Heiler und S. Gabriel. High-Speed Imaging and Analysis of Nucleation Site Density on Nuclear Fuel Claddings. In *E-Proceedings of the 21st International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-21)*, Busan, South Korea, 2025. August 31–September 5, 2025.
- [WVHG⁺26] N. Wefers, D. Vlček, W. Heiler, S. Gabriel und A. Class. Influence of ATF Cladding Tube Candidates on the Critical Heat Flux in a Vertical Rod Bundle During Flow Boiling of Water at Low Pressure. *Nuclear Technology*, 2026.
- [ZhHo20] P. Zhou, R. Huang und andere. Experimental Investigation on Active Nucleation Site Density and Bubble Departure Frequency in Subcooled Flow Boiling by Using Bubble Tracking Algorithm. *International Journal of Heat and Mass Transfer* Band 148, 2020, S. 119081.