

## Verbundprojekt CPC-HD

### CHF und Post-CHF- Wärmeübergang unter sehr hohen Drücken

Teilprojekt D  
Modell-Verbesserung für  
CHF und Dry-Out bei  
hohen Drücken

Gefördert durch:



## Verbundprojekt CPC-HD

### CHF und Post-CHF- Wärmeübergang unter sehr hohen Drücken

#### Teilprojekt D Modell-Verbesserung für CHF und Dry-Out bei hohen Drücken

Fabian Weyermann  
Daniel von der Cron

März 2026

#### **Anmerkung:**

Das diesem Bericht zugrunde liegende Eigenforschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) unter dem Förderkennzeichen 02NUK062D durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung des BMFTR übereinstimmen.

**Deskriptoren**

ATHLET, CHF, Dry-out, CO<sub>2</sub>, Critical Heat Flux, post-Dryout, R134a

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurzdarstellung des Vorhabens</b> .....	<b>1</b>
1.1	Aufgabenstellung.....	1
1.2	Voraussetzungen .....	1
1.3	Planung und Verlauf.....	2
1.4	Stand von Wissenschaft und Technik.....	3
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	5
<b>2</b>	<b>Ausführliche Darstellung der Projektergebnisse</b> .....	<b>7</b>
2.1	AP3 - ATHLET Weiterentwicklung .....	7
2.1.1	AP3.1 - Aktualisierung der ATHLET-Modelle für CHF, Post-CHF- Wärmeübergang und Arbeitsfluide .....	7
2.1.2	AP3.2 – Unterstützung der Projektpartner bei der Modellentwicklung und Implementierung der neuen Korrelationen in ATHLET .....	12
2.1.3	AP3.3 Finale Implementierung, Validierung und Qualitätssicherung .	12
2.2	AP4 - Management/Koordination .....	21
2.2.1	AP4.1: Koordination des Verbundprojekts.....	21
2.2.2	AP4.2: Organisation der Ausbildungsaktivitäten .....	21
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>27</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>29</b>

# 1 Kurzdarstellung des Vorhabens

## 1.1 Aufgabenstellung

In zukünftigen nuklearen Systemen können überkritische Fluide (z.B. Wasser oder CO<sub>2</sub>) zum Einsatz kommen. Für die Sicherheitsbewertung eines thermohydraulischen Systems mit überkritischem Fluid sind die genauen Kenntnisse des Wärmeübergangs in einem breiten Druckbereich (überkritisch und unterkritisch) unentbehrlich. Im unterkritischen Bereich spielt der Post-CHF-Wärmeübergang eine wichtige Rolle für die Systemsicherheit. Im Druckbereich bis zum reduzierten Druck von  $p_r = 0.70$  (Verhältnis des aktuellen Druckes zum kritischen Wert  $p_{crit}$ ) wurde der Post-CHF-Wärmeübergang bereits intensiv untersucht, während die Kenntnisse für reduzierte Drücke über 0.70 sehr limitiert sind.

Das übergeordnete Ziel dieses Teilprojekts D des Verbundprojekts CPC-HD war die optimale Implementierung der in den anderen Teilprojekten des Verbundvorhabens entwickelten Korrelation in den Thermohydraulik-Systemcode ATHLET. Konkret wurden im Teilprojekt D des Verbundprojektes CPC-HD die folgenden wissenschaftlichen und technischen Ziele angestrebt:

- Bereitstellung einer Referenzversion von ATHLET mit erweiterten Fähigkeiten für R134a, CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O
- Bereitstellung einer Entwicklerversion von ATHLET mit ggf. zusätzlichen Modellen für den kritischen Wärmestrom (critical heat flux, CHF), post-dryout (PDO)-Wärmeübergang und modifizierter Auswahllogik zur Unterstützung der Modellentwicklung bei den Projektpartnern
- Beratung der Projektpartner hinsichtlich der Entwicklung von für Systemcodes geeigneten Korrelationen zur Berechnung von CHF und PDO-Wärmeübergang
- Schulung der Projektpartner in der Anwendung und Programmierung von ATHLET

## 1.2 Voraussetzungen

Das Projekt hatte eine reguläre Laufzeit von drei Jahren (01.06.2021 bis 31.05.2025) und wurde dann kostenneutral bis zum 30.11.2025 verlängert. Die beim BMBFTR beantragte Finanzierung enthielt:

- Personalkosten
- Reisemittel

Mit Datum vom 10.06.2021 wurde die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mittels Zuwendungsbescheid über die Annahme des Antrags vom 16.09.2020 und über die Höhe der Zuwendung aus dem Bundeshaushalt informiert. Das Förderkennzeichen lautete: 02NUK062D.

Das Projekt konnte unter sehr guten Voraussetzungen gestartet werden. Bedingt durch die infolge der Corona Pandemie entstandenen Lieferengpässe verzögerte sich der Aufbau der Teststände bei den Projektpartnern. Da die Aufgaben der GRS in AP3 des Verbundvorhabens größtenteils die Ergebnisse der Verbundpartner aus AP1 und vor allem AP2 als Voraussetzungen benötigten, wurde eine kostenneutrale Verlängerung des Projektes um sechs Monate notwendig.

### **1.3 Planung und Verlauf**

Das Verbundprojekt CPC-HD wurde von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH gemeinsam mit den Projektpartnern

- Institut für Angewandte Thermofluidik, Karlsruher Institut für Technologie (IATF/KIT),
- Institut für Kernenergetik und Energiesysteme, Universität Stuttgart (IKE),
- Lehrstuhl für Energiesysteme, Technische Universität München (LES/TUM),

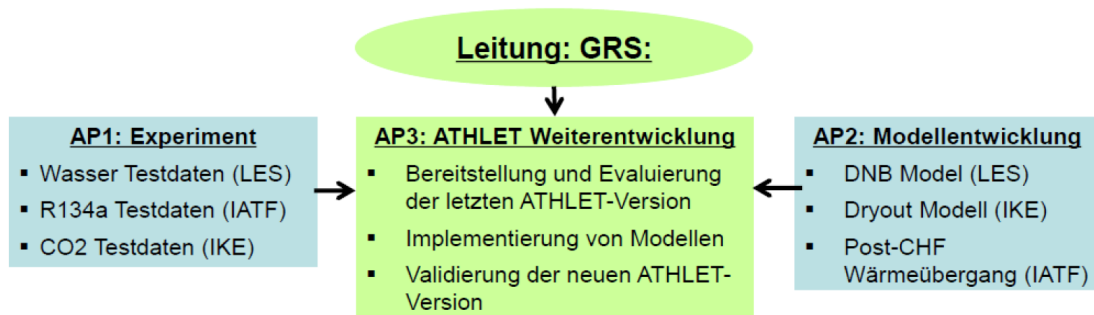
bearbeitet. Die Koordination des Verbundvorhabens übernahm IATF/KIT.

Das Verbundprojekt gliedert sich in die folgenden Arbeitspakete:

- AP1 - Experimentelle Untersuchungen
- AP2 - Modellentwicklung
- AP3 - ATHLET Weiterentwicklung
- AP4 - Management/Koordination

Die Arbeitspakete AP1 (Experimente) und AP2 (Modellentwicklung) wurden von den universitären Partnern ohne direkte Beteiligung der GRS bearbeitet. Die GRS hatte hier nur eine beratende Funktion. Im Arbeitspaket AP3, das unter der Koordination der GRS durchgeführt wurde, wurden von allen Partnern die in AP2 entwickelten Modelle

in ATHLET implementiert. Das erforderte eine enge Zusammenarbeit zwischen den Partnern, siehe Abb. 1.1. Im Rahmen von AP4 wurde die Zusammenarbeit koordiniert.



**Abb. 1.1** Aufgaben des AP3 und das enge Zusammenspiel zwischen den APs und den Verbundpartnern/Teilprojekten

Halbjährliche Projektgespräche wurden in Präsenz durchgeführt, was zu einem sehr guten Austausch zwischen den Partnern führte.

Das Vorhaben wurde kostenneutral verlängert, da bei den Projektpartnern die notwendigen Umbaumaßnahmen der Testanlagen in AP1 aufgrund von Lieferschwierigkeiten erheblich verzögert wurden.

#### 1.4 Stand von Wissenschaft und Technik

In vielen transienten Vorgängen eines Systems mit überkritischen Fluiden unter normalen oder anormalen Betriebsbedingungen ändert sich der Druck, passiert den kritischen Punkt und führt somit zu einem Übergang zwischen dem überkritischen und dem unterkritischen Druckzustand. Für die Sicherheitsauslegung und Sicherheitsanalyse spielen zuverlässige Modelle für den Wärmeübergang in beiden Druckbereichen eine wichtige Rolle.

Erhöht man bei einem Heizstab im unterkritischen Druckbereich langsam die Leistung, tritt ab einem bestimmten Wert Blasensieden an der Wand auf. Steigt die Leistung und damit die Wärmestromdichte weiter an, geht ab einer bestimmten Wärmestromdichte der direkte Kontakt zwischen der Flüssigkeit und der beheizten Wand durch Bildung eines Dampfpolsters verloren. Der Wärmeübergang geht vom Blasensieden in das Filmsieden über und die Wandtemperatur steigt infolgedessen deutlich an. Der Punkt wird als Siedekrise, die entsprechende Wärmestromdichte als kritische Wärmestromdichte (critical heat flux, CHF) und der Zustand nach dem Auftritt der

Siedekrise als Post-CHF bezeichnet. Der daraus resultierende schnelle und hohe Anstieg der Hüllrohr-Temperatur – und in der Folge auch der Brennstofftemperatur – kann zum Verlust der Hüllrohr- und Brennstoffintegrität inklusive Spaltproduktfreisetzung führen.

Im überkritischen Druckbereich gibt es keinen Phasenübergang im eigentlichen Sinne, daher ist der CHF-Mechanismus dort nicht relevant; es gibt jedoch in der Nähe des kritischen Punkts ebenfalls Verschlechterungen des Wärmeübergangs. Für diese sind in ATHLET schon Modelle vorhanden, und dieser Aspekt war nicht Gegenstand des aktuellen Vorhabens. Der Wärmeübergang im unterkritischen Druckbereich, inklusive des Post-CHF Wärmeübergangs, wurde in der Vergangenheit für den reduzierten Druck bis 0.70 sehr intensiv untersucht, auch wegen seiner Bedeutung in Leichtwasserreaktoren (Yu et al. 2018). Es existiert eine große Anzahl von Modellen oder Korrelationen, die für diesen Druckbereich entwickelt wurden.

Untersuchungen zum Wärmeübergang unter unterkritischen Druckbedingungen, aber im (sehr) hohen Druckbereich (reduzierter Druck  $0.7 < p_r < 1.0$ ) gab es vor dem Verbundprojekt CPC-HD kaum. Ein Vergleich eines Experiments an einem 4-Stabbündel mit Wasserkühlung mit Simulationsergebnissen des Thermohydraulikcodes AC<sup>2</sup>/ATHLET zeigte, dass das AC<sup>2</sup>/ATHLET den Wärmeübergang im hohen Druckbereich nicht zufriedenstellend vorhersagen konnte (Song et al. 2019). Das Experiment zeigte, dass während des transienten Vorgangs mit einem sinkenden Druck von 25 MPa auf 17 MPa ein starker Anstieg der Wandtemperatur bei einem Druck von etwa 21 MPa auftritt. Dies entspricht dem Auftritt der Siedekrise, die jedoch von ATHLET nicht erkannt wurde. Wenn in der Simulation der Eintritt der Siedekrise erzwungen wurde, stieg die Wandtemperatur zwar sprunghaft an, wich jedoch stark von den experimentellen Werten ab. Die deutlich höhere Wandtemperatur zeigte, dass die in ATHLET benutzte Korrelation zur Berechnung des Post-CHF-Wärmeübergangs den Wärmeübergangskoeffizienten erheblich unterschätzt.

Im Verbundvorhaben CPC-HD wurden durch die Versuche an drei Testanlagen mit drei unterschiedlichen Fluiden die Datenbasis für CHF und den Post-CHF Wärmeübergang erheblich vergrößert. Aufbauend auf diesen Experimenten konnten zum einen geeignete existierende Korrelationen für die Vorhersage von CHF und Post-CHF Wärmeübergang identifiziert werden. Zum anderen wurden auf Basis der

neuen Experimentaldaten neue Korrelationen für CHF, Dry-out (CHF bei hohem Anfangsdampfgehalt, bei dem der Wandtemperaturanstieg weniger stark ausfällt) und post-CHF Wärmeübergang erarbeitet werden. Diese Korrelationen wurden anschließend in ATHLET implementiert, so dass nun genauere Analysen von Störfällen im hohen Druckbereich möglich sind.

## **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die GRS arbeitete in diesem Vorhaben intensiv mit den Partnern IKE/Universität Stuttgart, ES/TU München, und IATF/KIT des Verbundvorhabens zusammen. Zur Koordination der Zusammenarbeit und zur Diskussion von Ergebnissen und geplanten Arbeiten fanden regelmäßige Treffen statt:

- Projektstart-Treffen (06.10.2021, Aufgrund von Corona nicht in Präsenz)
- Halbjahrestreffen 01/2022 (Stuttgart/IKE)
- Halbjahrestreffen 02/2022 (Garching/ES)
- Halbjahrestreffen 01/2023 (Karlsruhe/IATF)
- Halbjahrestreffen 02/2023 (Garching/GRS)
- Halbjahrestreffen 01/2024 (Stuttgart/IKE)
- Halbjahrestreffen 02/2024 (Garching/ES)
- Halbjahrestreffen 01/2025 (Karlsruhe/IATF)
- Abschlusstreffen (Karlsruhe/IATF)

Daneben wurden die Projektpartner im Rahmen von zwei ATHLET-Kursen und einem speziellen ATHLET-Training von der GRS geschult. In teilweise regelmäßigen Videokonferenzen unterstützte die GRS die Verbundpartner bei ihren Arbeiten mit ATHLET.



## 2 Ausführliche Darstellung der Projektergebnisse

### 2.1 AP3 - ATHLET Weiterentwicklung

Das Thermohydraulik-Simulationsprogramm ATHLET (Analyse der Thermohydraulik von Leckagen und Transienten) wird von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) zur Analyse von Betriebszuständen, anormalen Transienten und Leckagen aller Art in Kernkraftwerken entwickelt. Ziel von AP3 war die Erweiterung der Berechnung von kritischen Wärmestrom und Post-CHF-Wärmeübergang in ATHLET durch die im Verbundprojekt neu entwickelten Korrelationen. Die durchgeführten Arbeiten sind im folgenden beschrieben.

#### 2.1.1 AP3.1 - Aktualisierung der ATHLET-Modelle für CHF, Post-CHF-Wärmeübergang und Arbeitsfluide

Die von den universitären Verbundpartnern durchgeführten Experimente benutzten als Fluide neben Wasser auch  $\text{CO}_2$  und das Kühlmittel R134a ("Freon"), die ATHLET direkt bislang nicht unterstützt hat. Daher waren einige vorbereitende Erweiterungen von ATHLET notwendig.

##### Stoffwertberechnung für R134a und $\text{CO}_2$

ATHLET kann neben Wasser (Leicht- und Schwerwasser) noch andere in der Reaktortechnik verwendete Fluide wie Helium oder flüssiges Natrium simulieren. Das Kältemittel R134a und  $\text{CO}_2$  allerdings nicht. ATHLET verfügt allerdings über eine Schnittstelle zu der Stoffwertbibliothek *Coolprop* /BEL 14/, über die diese beiden Fluide prinzipiell in einer ATHLET-Simulation verwendbar sind. Allerdings befand sich diese Schnittstelle vor dem Projektstart erst in einem beta-Stadium und vor allem zweiphasige Simulationen liefen instabil. Daher waren einige Verbesserungen und anschließende Test notwendig.

Bei ersten Tests mit R134a zeigte sich, dass die Stoffwertberechnung über *Coolprop* im einphasig flüssigen Bereich grundsätzlich funktionierte. Problematisch aber war die Simulation von Verdampfung. Das Verdampfungsmodell von ATHLET benötigt eine Überhitzung des flüssigen Wassers über die Siedetemperatur hinaus, auf deren Basis die Verdampfungsrate bestimmt wird. Es zeigte sich, dass *Coolprop* die für überhitztes Wasser notwendigen metastabilen Fluidzustände teilweise nicht be-

rechnen kann, was zu Abbrüchen in den Simulationen führte. Eine erste Abhilfe war, die Stoffwerte mit dem kommerziellen Stoffwertprogramm Refprop /HUB 18/ zu berechnen, was über die Coolprop-Schnittstelle von ATHLET relativ einfach zu bewerkstelligen war. Allerdings traten auch hier Probleme in Simulationen auf, bei denen eine starke Überhitzung des Fluids auftrat, da auch REFPROP nur eine gewisse Überhitzung unterstützte. Nachdem in der Schnittstelle die Überhitzung auf die Grenzwerte von REFPROP begrenzt wurde, konnten mit der Refprop Version 10.0 erste komplett erfolgreiche Testrechnungen zum Verdampfen von R134a durchgeführt werden. Simulationen beim Projektpartner IATF/KIT, die lediglich über die alte Version Reprop 9.0 verfügten, funktionierten nicht. Der Grund war ein Softwarefehler in dieser Refprop-Version, der aber mittels einer Änderung in der ATHLET-Schnittstelle abgefangen werden konnte. Mit dieser Änderung funktionierten die Simulationen der KIMOF Versuchsanlage des IATF/KIT zuverlässig. Testrechnungen der GRS für CO<sub>2</sub> zeigten auch die prinzipielle Eignung für dieses Fluid.

Um die Simulation von R134a und CO<sub>2</sub> auch ohne das kommerzielle Refprop mit dem freien Coolprop zu ermöglichen wurde die Schnittstelle um Routinen für die eigenständige Bestimmung von metastabilen Stoffwerten (auf Basis der von Coolprop/Refprop berechneten stabilen Stoffwerte) erweitert. Diese Version konnte später bei den Projektpartnern erfolgreich zur Simulation ihrer Teststände angewendet werden.

### **Erweiterung CHF-Berechnung**

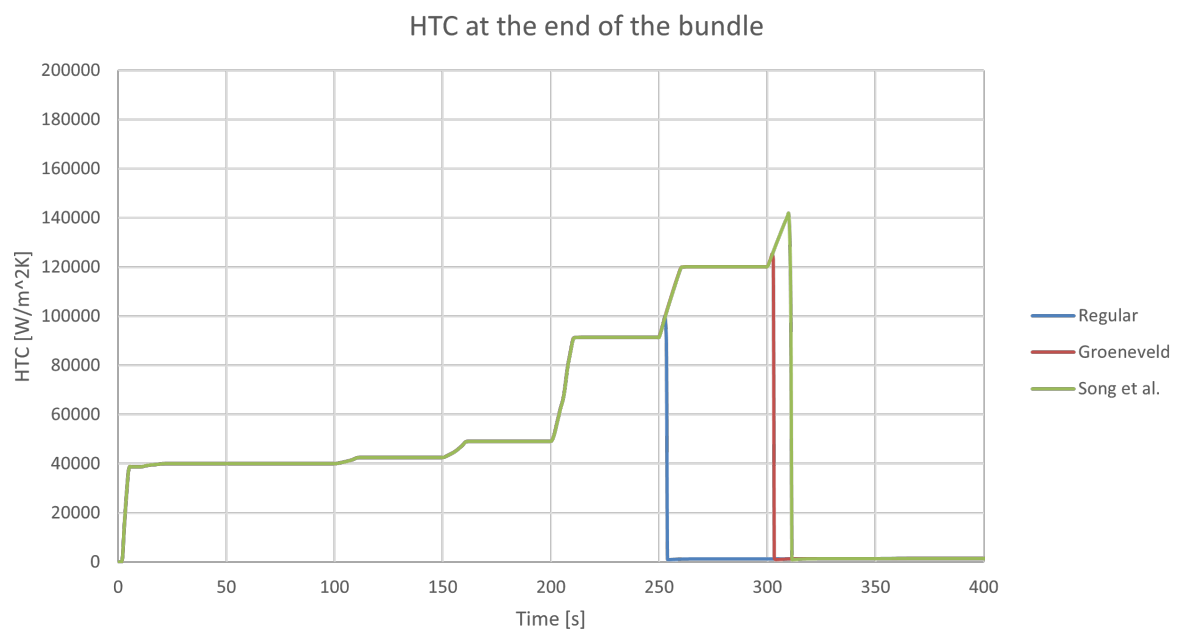
ATHLET unterstützte ursprünglich das Auftreten eines kritischen Wärmestroms nur für Wasser (Leicht- und Schwerwasser). Bei allen anderen Medien wurde das Auftreten eines kritischen Wärmestromes und der dadurch ausgelöste Übergang zum Filmsieden programmtechnisch verhindert. Um die in dem Verbundprojekt notwendigen Simulationen von CHF bei R134a und CO<sub>2</sub> zu ermöglichen, wurde diese Beschränkung aufgehoben, so dass in ATHLET für alle zweiphasigen Fluide (eingebaute und Fluide über die Coolprop-Schnittstelle) CHF simuliert werden kann. Zusätzlich wurde im Code die Möglichkeit geschaffen, auch für Fluide, deren Stoffdaten über die CoolProp-Schnittstelle berechnet werden, CHF-Korrelationen über ein eigenes Plugin vorzugeben. Ein entsprechendes Beispiel-Plugin wurde ebenfalls entwickelt und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Die Erweiterungen wurden mit der offiziellen AC<sup>2</sup> Release veröffentlicht, so dass sie von allen Anwendern genutzt

werden können.

## Verbesserte CHF-Berechnung bei hohen Drücken

Die von ATHLET als Standardverfahren verwendeten CHF-Korrelation (Minimum der Korrelationen Westinghouse W-3, Hench-Levy, Israel-Casterline-Matzner und Biasi) sind nicht für Drücke oberhalb von  $p_{\text{red}} > 0.7$  und nur für Wasser geeignet.

Die Projektpartner haben auf Basis einer großen Experimentaldatenbasis die Korrelation von Song /SON 21b/, /SON 21a/ als die geeignetste für diesen hohen Druckbereich für die Fluide Wasser, R134a und CO<sub>2</sub> identifiziert. Diese wurde in ATHLET implementiert, die Implementierung verifiziert und diese Version den Projektpartnern unmittelbar zur Verfügung gestellt. Die Verifizierung erfolgte anhand der Simulation eines Brennstabbündels umströmt mit Wasser bei 18 MPa. Die von ATHLET berechneten Werte der Song-Korrelation wurden mit den analytisch bestimmten Werten verglichen. Zusätzlich erfolgte ein Vergleich mit den CHF-Werten bestimmt von ATHLET mittels Groeneveld-Tabellen und dem ATHLET-Standardverfahren, siehe Abb. 2.1. Eine detaillierte Validierung erfolgte durch die Projektpartner anhand deren Nachrechnungen ihrer Experimente.



**Abb. 2.1** Verifizierung der Implementierung der Song-Korrelation

Im Rahmen des Releases des Softwarepaketes AC<sup>2</sup> 2023 wurde die erweiterte ATHLET-Version veröffentlicht und damit allen ATHLET-Anwendern zur Verfügung

gestellt. Die Korrelation ist in der zur Release gehörigen Software-Beschreibung detailliert dokumentiert, siehe *ATHLET 3.4, Modells and Methods /SCH 23/*

### Erweiterung der Groeneveld LUT auf allgemeine Fluide

Die Groeneveld-Tabellen für die Bestimmung der kritischen Wärmestromdichte (CHF) (/GRO 07/) sind ein etabliertes Verfahren, dass in verschiedenen Thermohydraulic-codes verwendet wird. Die Anwendung ist allerdings auf Wasser beschränkt. Will man auf ihrer Basis den CHF für ein anderes Fluid bestimmen, benötigt man eine Skalierung von Wasser zu dem jeweiligen Fluid. Eine solche wurde in diesem Projekt in ATHLET implementiert.

### Fluid Skalierung

Ausgangspunkt für die jetzt in ATHLET implementierte Methode ist die von Katto vorgeschlagene Fluid zu Fluid-Skalierung, die fünf Ähnlichkeiten fordert, siehe /GUO 22/ oder /PIO 02/:

Geometrische Ähnlichkeit:

$$\left. \frac{L}{D} \right|_{\text{Fluid}} = \left. \frac{L}{D} \right|_{\text{H}_2\text{O}} \quad (2.1)$$

Hydrodynamische Ähnlichkeit:

$$\left. \frac{\rho_l}{\rho_g} \right|_{\text{Fluid}} = \left. \frac{\rho_l}{\rho_g} \right|_{\text{H}_2\text{O}} \quad (2.2)$$

Thermodynamische Ähnlichkeit:

$$\left. \frac{\Delta h_{in}}{h_{evap}} \right|_{\text{Fluid}} = \left. \frac{\Delta h_{in}}{h_{evap}} \right|_{\text{H}_2\text{O}} \quad (2.3)$$

Massenstrom-Ähnlichkeit (Weber-Zahl):

$$\left. \frac{G\sqrt{D}}{\sqrt{\rho_l\sigma}} \right|_{\text{Fluid}} = \left. \frac{G \cdot \sqrt{D}}{\sqrt{\rho_l \cdot \sigma}} \right|_{\text{H}_2\text{O}} \quad (2.4)$$

Entdimensionierter Wärmestrom (Siedezahl, Boiling number)

$$\left. \frac{q_{CHF}}{G h_{evap}} \right|_{\text{Fluid}} = \left. \frac{q_{CHF}}{G \cdot h_{evap}} \right|_{\text{H}_2\text{O}} \quad (2.5)$$

### In ATHLET implementiertes Skalierungsverfahren

Die Größen Massenstrom  $G$ , Temperatur  $T$ , Druck  $p$ , Oberflächenspannung  $\sigma$  und

Dichte  $\rho$  sind in einer ATHLET-Simulation für das aktuelle Fluid, z. B. R134a (Freon) bekannt. Um die kritische Wärmestromdichte für das Fluid auf Basis der Groeneveld-Tabellen zu bestimmen, wird das von Guo et al. entwickelte Verfahren /GUO 22/ genutzt:

1. Bestimmung des äquivalenten Wasserdrucks  $p_{\text{H}_2\text{O}}$ , so dass die hydrodynamische Ähnlichkeit (2.2) erfüllt ist. In der ATHLET-Implementierung wird das in der Routine `mhqchf_groeneveld_scaled.F90` durch Lösen der Gleichung

$$\left. \frac{\Delta h_{\text{in}}}{h_{\text{evap}}} \right|_{\text{Fluid}} - \left. \frac{\Delta h_{\text{in}}}{h_{\text{evap}}} \right|_{\text{H}_2\text{O}} = 0 \quad (2.6)$$

mittels Newton-Verfahren erreicht.

2. Bestimmung des äquivalenten Wasser-Massenstroms  $G_{\text{water}}$  über die Massenstrom-Ähnlichkeit (2.4):

$$G_{\text{H}_2\text{O}} = \left. \frac{G\sqrt{D}}{\sqrt{\rho_l \cdot \sigma}} \right|_{\text{Fluid}} \left. \frac{\sqrt{\rho_l \cdot \sigma}}{\sqrt{D}} \right|_{\text{H}_2\text{O}} = \left. \frac{G}{\sqrt{\rho_l \cdot \sigma}} \right|_{\text{Fluid}} \left. \sqrt{\rho_l \cdot \sigma} \right|_{\text{H}_2\text{O}} \quad (2.7)$$

3. Bestimmung der Unterkühlung am Eintritt mittels der thermodynamischen Ähnlichkeit (2.3):

$$\Delta h_{\text{in,H}_2\text{O}} = \Delta h_{\text{in,Fluid}} \frac{h_{\text{evap,H}_2\text{O}}}{h_{\text{evap,Fluid}}} \quad (2.8)$$

4. Bestimmung der äquivalenten Enthalpie-Qualität für Wasser:

$$x_{h,\text{H}_2\text{O}} = \left. \frac{\Delta h_{\text{in}}}{h_{\text{evap}}} \right|_{\text{H}_2\text{O}} \quad (2.9)$$

5. Bestimmung des CHF's für Wasser  $q_{\text{crit,H}_2\text{O}}$  aus den Groeneveld-Tabellen mit den ermittelten Werte ( $x_{h,\text{H}_2\text{O}}$ ,  $G_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $p_{\text{H}_2\text{O}}$ ) für Wasser.

6. Berechnung der kritischen Wärmestromdichte für das aktuelle Fluid über die Siede-Zahl (2.5):

$$q_{\text{crit,Fluid}} = q_{\text{crit,H}_2\text{O}} \frac{G \cdot h_{\text{evap,Fluid}}}{G \cdot h_{\text{evap,H}_2\text{O}}} \quad (2.10)$$

### Plugin zur Bestimmung von Post-CHF Wärmeübergangskoeffizienten

Um die Entwicklungsarbeiten bei IATF/KIT zu unterstützen, wurde für das vereinfachte Implementieren und Testen von Wärmeübergangskorrelationen im post-CHF/post-dryout Regime (Filmsieden) ein entsprechendes Plugin entwickelt. Zur Dokumentation des Plugins wurde eine Technische Notiz geschrieben /WEY 23/. Dort finden sich alle Details zur Implementierung und Verwendung des Plugins.

### **2.1.2 AP3.2 – Unterstützung der Projektpartner bei der Modellentwicklung und Implementierung der neuen Korrelationen in ATHLET**

Die Projektpartner simulierten in ihren Teilprojekten ihre jeweiligen Testanlagen und Versuche mit ATHLET, um die entwickelten Korrelationen in der Anwendung zu testen. Hier unterstützte die GRS die Partner bei der jeweiligen Entwicklung der Anlagenmodelle unter ATHLET. Dies erfolgte zum einen durch Beratung in einer Vielzahl von Videokonferenz. Zum anderen überprüfte die GRS die Datensätze der Partner, suchte und identifizierte Fehler, gab Anleitung zur Verbesserung oder führte die Verbesserung selber aus. Weiter wurden die Ergebnisse analysiert und Empfehlungen zur Modellverbesserung gegeben.

### **2.1.3 AP3.3 Finale Implementierung, Validierung und Qualitätssicherung**

Die finale Umsetzung der Modellverbesserungen ist in der ATHLET-Programmdokumentation beschrieben /SCH 25/.

#### **CHF-Korrelation**

Die von ES/TUM auf Basis der im Projekt neu gewonnenen Experimentaldaten entwickelte CHF-Korrelation zeigte im Vergleich zur bereits in diesem Projekt implementierten Song-Korrelation (siehe Kap. 2.1.1) keine besseren Ergebnisse. Daher wurde gemeinsam mit ES/TUM entschlossen, diese Korrelation nicht in ATHLET zu implementieren.

#### **Dry-out Korrelation**

Der Projektpartner IKE Stuttgart entwickelte in AP2 eine neue empirische Korrelation zur Berechnung des Dryout-Wärmestroms /LEO 25/. Der Ansatz für die Korrelation basierte unter anderem auf der Massenqualität  $x_{in}$  am Eintritt der beheizten Zone und der beheizten Länge  $L$ . Beides sind globale Parameter, die in ATHLET direkt nicht zugänglich waren. Direkt zugänglich sind lediglich lokale (auf dem jeweiligen Kontrollvolumen existierende) Variablen, wie Druck, Temperatur, Dichte oder auch die Länge des Kontrollvolumens. Die Bestimmung z. B. von  $x_{t,extrmin}$  ist schwieriger, da das Kontrollvolumen, das vor der beheizten Zone liegt und den Wert liefern kann, stark von der jeweiligen Modellierung im Datensatz abhängt und im Falle einer Umkehrung der Strömungsrichtung während der Simulation sich sogar ändern kann. Ähnlich verhält es sich mit der beheizten Länge  $L$ . Damit die Korrelation in ATHLET

verwendet werden kann, waren daher einige Erweiterungen notwendig, um diese Größen automatisch zu bestimmen. Zusätzlich mussten die Plugin-Schnittstellen und die Plugin-Vorlagen (siehe Kap. 2.1.1) um die beiden Größen erweitert werden.

Die finale Korrelation basiert auf der Datenbasis aus den Experimenten mit Wasser, R134a und CO<sub>2</sub> für reduzierte Drücke zwischen 0.7 und 0.99. Sie lautet:

$$Bo = \frac{q_c}{\Delta h_{\text{evap}} G} = 0.672 We_L^{-0.0339} \cdot Re_g^{-0.143} \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{-0.149} x_{\text{diff}}^{0.777} \left( \frac{L}{D} \right)^{-0.820} \quad (2.11)$$

wobei

$$x_{\text{diff}} = x_{\text{trans}} - x_{\text{in}} \quad (2.12)$$

Dabei bezeichnet  $x_{\text{in}}$  die Massenqualität am Eintritt der beheizten Zone und  $x_{\text{trans}}$  die sogenannte *“transition quality”* die den Umschlag von Schwallströmung (Slug-Flow) zu Ringströmung markiert. Hierfür wurde vom IKE eine Korrelation von Weber verwendet:

$$x_{\text{trans}} = \frac{0.6 + \frac{0.4 \sqrt{g \cdot D (\rho_l - \rho_g) \cdot \rho_l}}{G}}{0.6 + \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}}} \quad (2.13)$$

Diese Korrelation ist aktuell als Plugin für die Bestimmung des Dryout-Punktes in ATHLET verfügbar.

### Post-CHF Wärmeübergangskorrelation

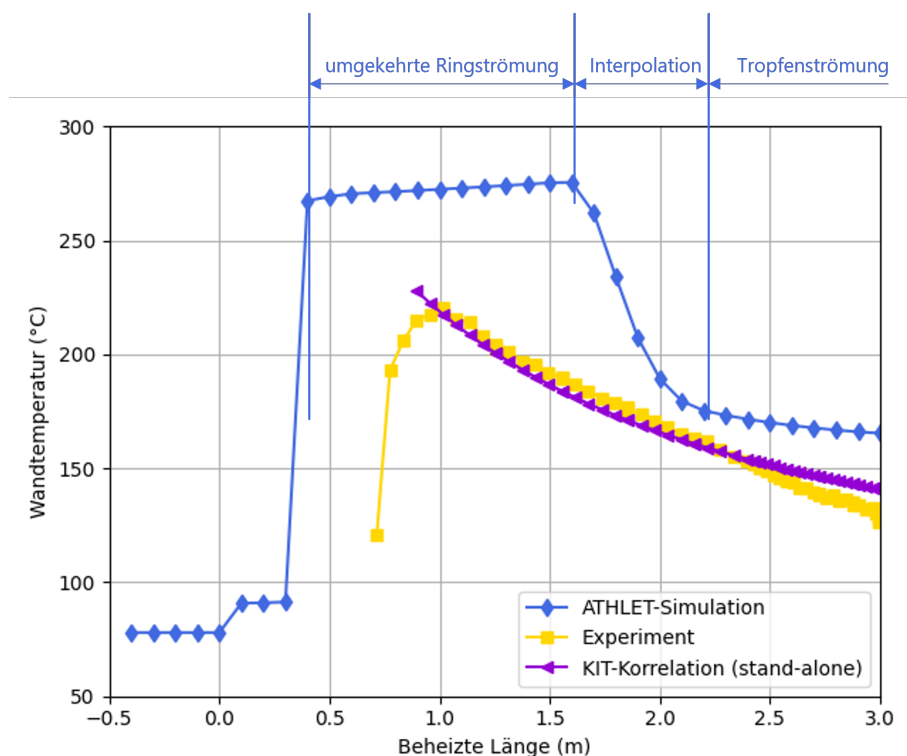
Der Projektpartner IATF/KIT entwickelte in AP2 eine Korrelation für den post-Dryout-Wärmeübergang /REN 25/, der auftritt wenn nach erfolgtem Dry-out nur noch eine Tropfenströmung im Rohr vorliegt und die Wand nicht mehr benetzt ist:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} = 0.014 Re_{\text{TP},F}^{0.7} \cdot Pr^{1.2} (1 + We_{\text{TP}}^{0.12}) \quad (2.14)$$

Die Korrelation ist nach den Autoren nur für Tropfenströmung anwendbar, also nicht für eine umgekehrte Ringströmung, die nach dem Auftreten von DNB bei niedrigem Dampfgehalt auftritt. Als Kriterium zur Unterscheidung zwischen Tropfenströmung und umgekehrter Ringströmung wird die Korrelation von Levitan und Borevskiy (siehe Lee et al. /LEE 08/, oder auch /INT 01/) verwendet:

$$x_{\text{ad}} = (2.7 + 0.3) \left( \frac{\rho_l \cdot \sigma}{G^2 \cdot d} \right)^{1/3} \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{1/3} \quad (2.15)$$

Die Korrelation für den Wärmeübergang Gl. (2.14) wurde von der GRS in ATHLET implementiert und anhand der Nachrechnung von vier Versuchsläufen der KIMOF-Anlage des IATF/KIT überprüft. Bei allen zeigte sich keine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Rechnung, siehe beispielhaft den Versuchslauf IATF Fall 4 in Abb. 2.2.



**Abb. 2.2** Anfangs von ATHLET berechnete Wandtemperatur im Vergleich zu Messwert und reinem Wert der Korrelation

Die ATHLET-Simulation (blau) zeigt den CHF und den damit verbundenen Temperaturanstieg deutlich zu früh (bei ca. 0.4 m). Das ist hier aber nebensächlich, da nicht der CHF sondern die Berechnung des nachfolgende Wärmeübergang validiert werden soll. Allerdings liegt die Wandtemperatur deutlich über der gemessenen (gelb), was bedeutet, dass ATHLET für den Wärmeübergang einen zu niedrigen Wert berechnet hat. Erst ab einer Position von 2.0 m erreicht die Wandtemperatur (und damit auch der Wärmeübergang) einen mit der Messung vergleichbaren Wert. Die Ursache konnte in der in ATHLET implementierten Logik zur Berechnung des post-CHF-Wärmeübergangs gefunden werden. Im post-CHF-Regime liegt je nach Dampfgehalt entweder eine umgekehrte Ringströmung oder eine disperse Tropfenströmung vor, siehe Abb. 2.3. Bei einem Dryout liegt sofort die Tropfenströmung vor, bei einem DNB zunächst eine umgekehrte Ringströmung die dann in die Tropfenströmung

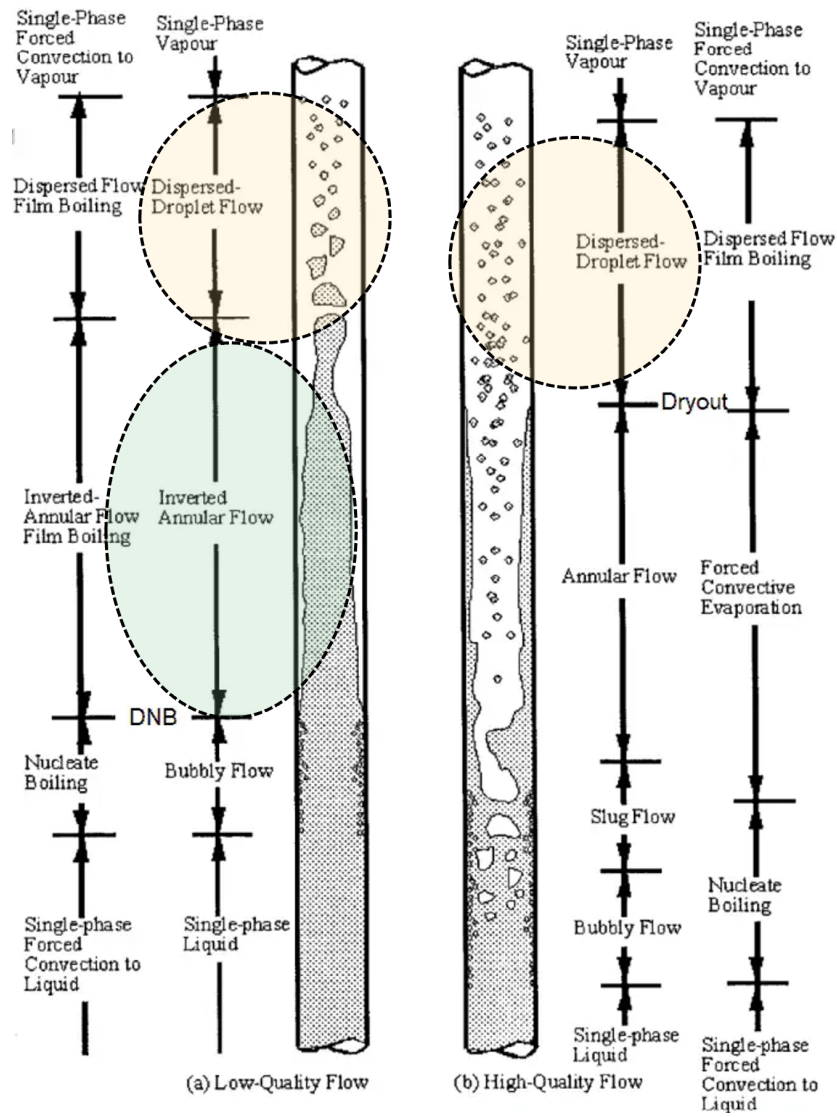
übergeht. ATHLET verwendet zur Unterscheidung von umgekehrter Ringströmung und Tropfenströmung lediglich ein einfaches Kriterium für den Dampfgehalt  $\beta$ :

$\beta < 0.7$  : umgek. Ringströmung

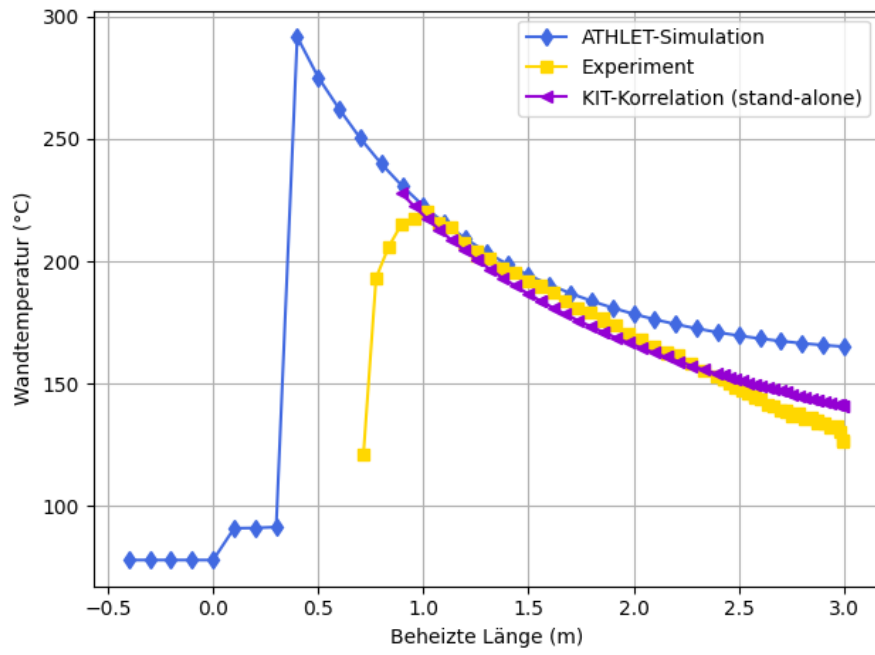
$0.7 \leq \beta \leq 0.85$  : Interpolation

$\beta > 0.85$  : Tropfenströmung

Aufgrund des von ATHLET berechneten Dampfgehaltes (Void) nimmt ATHLET im vorderen Bereich (bis ca. 1.6 m) eine umgekehrte Ringströmung an. Der Wärmeübergang bei umgekehrter Ringströmung wird in ATHLET standardmäßig mit den Korrelationen von Berenson (optional) oder Bromley (standard) berechnet, die in diesem Fall offensichtlich einen deutlich zu niedrigen Wärmeübergang berechnen. Ab 1.6 m wird der Übergangsbereich zur Tropfenströmung erreicht, so dass zwischen den jeweiligen Korrelationen interpoliert wird, bis bei ca. 2.1 m das Tropfenströmungsregime erreicht wird, in dem die neue Korrelation Gl. (2.14) verwendet wird. In diesem Regime wird die gemessene Wandtemperatur einigermaßen gut nachgebildet. Ändert man in ATHLET die Auswahllogik ab und verwendet die entwickelte Korrelation (2.14) bereits bei Dampfanteilen unter 0.7, erhält man ein Ergebnis, das eine deutlich bessere Übereinstimmung mit der Messung zeigt, siehe Abb. 2.4.

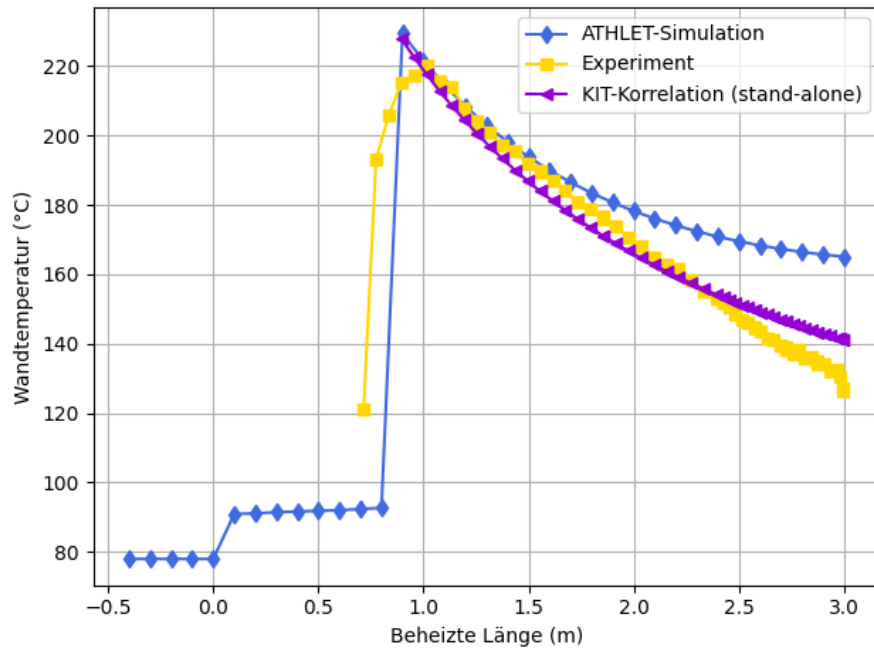


**Abb. 2.3** Im Rechenfall aufgetretene Strömungsregime



**Abb. 2.4** Von ATHLET berechnete Wandtemperatur nach Änderung des Unterscheidungs der Implementierung

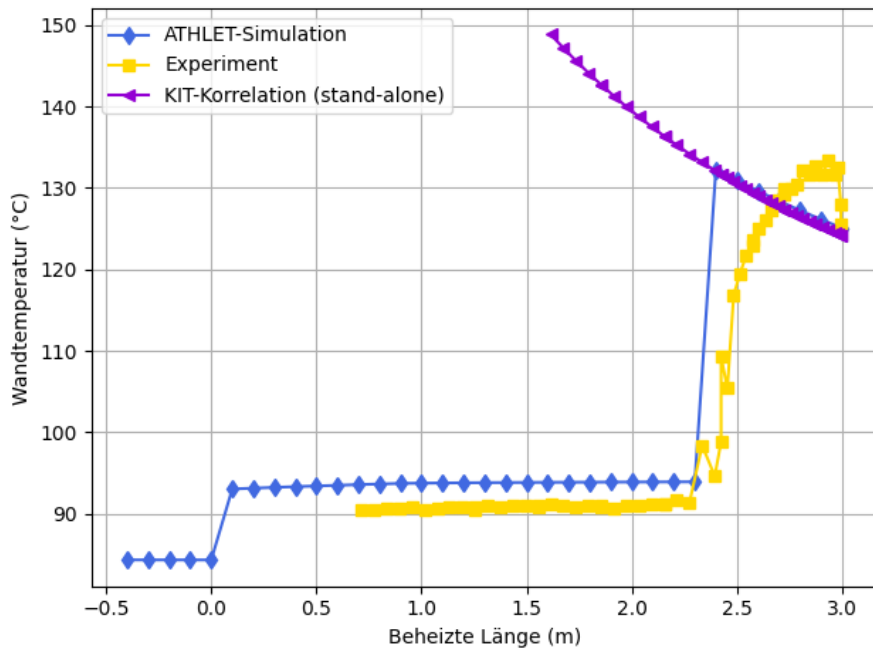
Um die Simulationsergebnisse weiter zu verbessern, wurde das Kriterium von Levitan und Borevskiy aus Gleichung (2.15) zur Unterscheidung von Ring- und Tropfenströmung implementiert. Damit wird die entwickelte Korrelation Gl. (2.14) in einem deutlich größeren Bereich verwendet. Zusätzlich wurde statt der Groeneveld-Tabellen der kritische Wärmestrom mittels der Song-Korrelation bestimmt. Die Song-Korrelation liefert wie erwartet einen deutlich genauere Vorhersage des Temperatursprungs, siehe Abb. 2.5.



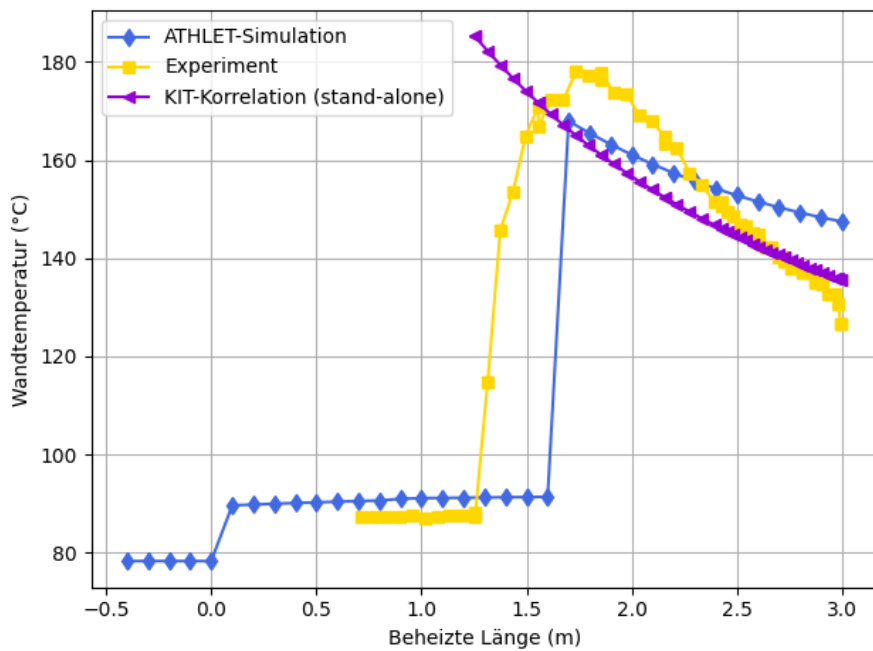
**Abb. 2.5** Mit der überarbeiteten ATHLET Version berechnete Wandtemperatur (KIMOF Fall 4)

Die Übereinstimmung von Experiment und ATHLET-Rechnung ist mit der weiterentwickelten ATHLET-Version sehr gut. Lediglich im hinteren Teil der Messstrecke ergibt sich eine signifikante Abweichung zwischen Rechnung und Messung.

Mit der überarbeiteten ATHLET-Version wurden weitere Versuchsläufe (IATF 1 und 2) simuliert. Auch hier zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen ATHLET-Rechnung und Messung, siehe Abb. 2.6 und Abb. 2.7.

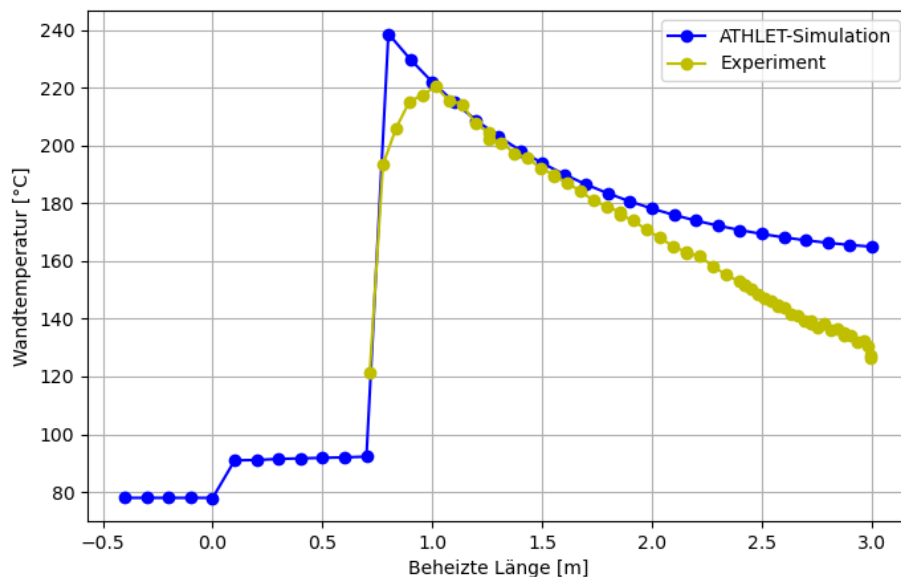


**Abb. 2.6** Mit der überarbeiteten ATHLET Version berechnete Wandtemperatur (KIMOF Fall 1)



**Abb. 2.7** Mit der überarbeiteten ATHLET Version berechnete Wandtemperatur (KIMOF Fall 2)

Der KIMOF Test 4 wurde ein weiteres Mal nachgerechnet, wobei anstatt der Song-Korrelation die vom Projektpartner IKE entwickelte Dryout-Korrelation Gl. (2.13) verwendet wurde. Das Ergebnis ist im Vergleich mit der Messung in Abb. 2.8 gezeigt. An dem gleichzeitigen Temperaturanstieg in Simulation und Rechnung sieht man, dass die entwickelte Korrelation die Position des Dryouts sehr gut wiedergibt.



**Abb. 2.8** Von ATHLET berechnete Wandtemperatur mit den Korrelationen von IATF und IKE

### Übernahme in die GRS-Entwicklungs- und Testumgebung

ATHLET-Datensätze zur Simulation von Versuchen der KIMOF und SCARLETT Testanlagen wurden in die ATHLET Entwicklungsumgebung (Gitlab-Server) eingepflegt. Weiter wurde sie in den regelmäßigen Testprozess mittels (Gitlab-CI) aufgenommen. Damit wird sichergestellt, dass bei der Weiterentwicklung des Quellcodes keine unerwünschten Seiteneffekte auf die in diesem Projekt entwickelten Modelle (Ablauffähigkeit oder auch Ergebnisverschlechterung) auftreten.

## **2.2 AP4 - Management/Koordination**

### **2.2.1 AP4.1: Koordination des Verbundprojekts**

Eine Herausforderung des Verbundprojektes war die starke gegenseitige Abhängigkeit und Verzahnung der einzelnen Teilprojekte und auch der einzelnen Arbeitspakete. So wurden für die jeweilige Modellentwicklung experimentelle Daten von den Testständen aller drei Universitäten benötigt. Weiterhin musste darauf geachtet werden, dass die neuen Modelle in ATHLET implementierbar sind, die Konsistenz mit den vorhandenen Modellen gewährleistet ist und die numerische Stabilität der modifizierten ATHLET-Version nicht beeinträchtigt wird. Daher war eine enge Zusammenarbeit aller Verbundpartner und ein enger Austausch der jeweiligen Projektergebnisse unentbehrlich. Die Koordination dazu erfolgte über regelmäßige zweitägige Präsenztreffen, die abwechselnd bei den vier Verbundpartnern abgehalten wurden. Auf diesen Treffen wurden die jeweiligen Ergebnisse präsentiert und vor allem diskutiert. Weiter wurde das jeweilige weitere Vorgehen abgestimmt und Daten und Wissen ausgetauscht. Neben diesen Präsenztreffen wurden arbeitspaketspezifische regelmäßige Videokonferenzen zum Austausch und zur Abstimmung abgehalten.

### **2.2.2 AP4.2: Organisation der Ausbildungsaktivitäten**

Die wesentlich Aufgabe der GRS in AP4.2 war die Ausbildung der insgesamt sechs Doktoranden der Verbundprojektpartner in der Anwendung des Thermohydraulikcodes ATHLET. In Absprache mit den Projektpartnern wurden die folgenden ATHLET-Kurse organisiert und durchgeführt:

- ATHLET-Basiskurs
- ATHLET-Fortschrittsskurs
- Spezielles ATHLET-Training

#### **ATHLET Basiskurs**

Der ATHLET-Basiskurs wurde vom 21.03. bis 21.3.2022 als Onlinekurs abgehalten. Details können der Agenda in Abb. 2.9 entnommen werden.

UTC+1	Monday, 21 Mar.	Tuesday, 22 Mar.	Wednesday, 23 Mar.	Thursday, 24 Mar.	Friday, 25 Mar.
8:00 – 9:00	Welcome ATHLET Overview		General Control Simulation Module GCSM I		
9:15 – 10:00	TFD Objects and their Linkage	Heat Conduction Objects & Heat Transfer Models	General Control Simulation Module GCSM II	<b>Start Time: 9:00</b> Simulation of Components - Fill, P-h Boundary - Valve - CDR1D - Pump	<b>Start Time: 9:00</b> Steady State Calculation I
10:15 – 11:00	Input Data Characteristics	Exercise 5 D (HCO)  Group B	Exercise GCSM I	Exercise 5 E (GCSM, TDV, Fill)  Group A	Macro Components I - Fuel Rod - Heat Exchanger - Separator
11:15 – 12:00			Group A&B parallel		
12:00 – 13:00	Break				
13:00 – 14:00	Introduction to Postprocessing with ATLAS and AIG	Exercise 5 D (HCO)  Group A	Exercise GCSM II	Exercise 5 E (GCSM, TDV, Fill)  Group B	Exercise 5 F, G (SSC, Rod)  Group A&B parallel
14:00 – 15:00	Exercise 5 A-C (TFO)		Group A&B parallel		
15:00 – 16:00	Group A&B parallel				

UTC+2	Monday, 28 Mar.	Tuesday, 29 Mar.	Wednesday, 30 Mar.	Thursday, 31 Mar.
8:00 – 9:00				Point Kinetics Model
				FEBE Time Integration Scheme
9:15 – 10:00	Steady State Calculation II	Momentum Flux Term	<b>Start Time: 9:00</b>  Exercise „Blowdown Test“  Group B	Primary System Simulation
10:15 – 11:00	Special models: - Boron Model - NC Gas Model - Injection Models	Exercise “Closed Loop”  Group A		3D Multi-Channel RPV
11:15 – 12:00	Macro Components II - Steam Generator - Pressurizer - Accumulator			Q & A Final Discussion
12:00 – 13:00	Break			
13:00 – 14:00		Exercise “Closed Loop”  Group B	Exercise „Blowdown Test“  Group A	
14:00 – 15:00				
15:00 – 16:00				

**Abb. 2.9** Agenda des Basiskurses

## **ATHLET Fortschrittskurs**

Da die Aufgaben der Doktoranden im Verbundprojekt auch eine Implementierung der neuentwickelten Korrelation umfasste, war das Ziel des ATHLET Fortschrittskurses, die dafür notwendigen Kenntnisse zu vermitteln. Daher standen die Themen ATHLET-Quellcode, Programmierung und der zugehörige Buildprozess im Mittelpunkt des Kurses. Daneben wurden mit Git und Gitlab noch wichtige Werkzeuge in der modereren Softwareentwicklung angesprochen. Einen genauen Überblick über die Inhalte des Kurses gibt die Agenda in Abb. 2.10. Der Kurs fand am 30.11. und 1.12.2023 in der GRS Garching statt.

1 <sup>st</sup> Day (Thursday, November 30th, 2023) Meeting place: GRS Garching, N001		
9:00 – 9:10	Welcome / Overview	Fabian Weyermann
9:10 – 10:30	Repetition of ATHLET	Philipp Schöffel
10:30 – 10:45	ATHLET Source Code	Philipp Schöffel
11:00 – 12:00	ATHLET programming standards	Philipp Schöffel
12:00 – 13:00	<b>Lunch Break</b>	
13:00 – 14:00	Heat Transfer Calculation	Daniel von der Cron
14:00 – 15:30	Heat Transfer Calculation	Daniel von der Cron
15:30 – 16:15	Introduction to Git	Fabian Weyermann
16:15 – 17:00	HDF5 Format and Data Post Processing	Markus Junk
2 <sup>nd</sup> Day (Friday, December 1st, 2023) Meeting place: GRS Garching, N001		
09:00 – 10:00	Introduction to Gitlab	Fabian Weyermann
10:00 – 11:00	ATHLET Build Process	Fabian Weyermann
11:00 – 12:00	ATHLET Plugin Technique, ATHLET Controller	Fabian Weyermann
12:00 – 13:00	<b>Lunch Break</b>	
13:00 – 14:00	ATHLET Plugin Technique, ATHLET Controller (Excercise)	Fabian Weyermann
14:00 – 15:00	Gitlab-CI	Anthony di Nora
15:00 – 15:30	Verification, Validation and Documentation	Fabian Weyermann

**Abb. 2.10** Agenda des Fortschrittskurses

## ATHLET Praxistraining

Um die Kenntnisse der Doktoranden zu vertiefen und zu festigen wurde als Abschluss der ATHLET-Ausbildung ein Praxistraining durchgeführt. Die Doktoranden bekamen eine konkrete Aufgabe gestellt, die sie bearbeiten mussten. Die GRS unterstützte die Doktoranden bei Fragen und Probleme per Videokonferenzen oder E-Mail. Am 4.11.2024 wurde in der GRS in Garching eine Abschlussbesprechung durchgeführt, siehe Abb. 2.11.

1 <sup>st</sup> Day (Monday, November 4th, 2024) Meeting place: GRS Garching, D112a		
13:00 – 13:10	Welcome / Overview	Fabian Weyermann
13:10 – 14:30	ATHLET hands-on training, part 1	Fabian Weyermann
14:30 – 14:45	<b>Break</b>	
14:45 – 16:00	ATHLET hands-on training, part 2	Fabian Weyermann
16:00 – 16:10	<b>Break</b>	
16:10 – 17:00	ATHLET hands-on training, part 3	Fabian Weyermann
17:00	Questions/Discussion	Fabian Weyermann

**Abb. 2.11** Agenda der Abschlussbesprechung des Praxistrainings



## Literaturverzeichnis

- /BEL 14/ Bell, I. H., Wronski, J., Quoilin, S., Lemort, V.: Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp, in: Industrial & Engineering Chemistry Research 53.6 (2014), URL: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie4033999>.
- /GRO 07/ Groeneveld, D. C., u. a.: The 2006 CHF Look-up Table, in: Nuclear Engineering and Design 237.15-17 (2007), S. 1909–1922, DOI: 10.1016/j.nucengdes.2007.02.014.
- /GUO 22/ Guo, J., Kong, H., Shan, J., Gui, M., Liu, Y.: “Assessment of LUT-2006 subcooled CHF prediction with R-134a CHF data”, in: The 19th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-19), 2022.
- /HUB 18/ Huber, M., u. a.: NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP) Version 10 - SRD 23, 2018, DOI: 10.18434/T4/1502528, URL: <https://www.nist.gov/srd/refprop>.
- /INT 01/ International Atomic Energy Agency, Vienna: Thermohydraulic relationships for advanced water cooled reactors, in: 1011-4289 (2001).
- /LEE 08/ Lee, S. K., Chang, S. H.: Experimental study of post-dryout with R-134a upward flow in smooth tube and rifled tubes, in: International Journal of Heat and Mass Transfer 51.11-12 (2008), S. 3153–3163.
- /LEO 25/ Leopoldus, S., Buck, M., Starflinger, J.: “Development and Validation of a New Correlation for the Prediction of High-Pressure Dryout-Type CHF”, in: Proceedings of the Intern. Conference for New Europe, 2025.
- /PIO 02/ Piroo, I., u. a.: Comparison of CHF measurements in horizontal and vertical tubes cooled with R-134a, in: International Journal of Heat and Mass Transfer - INT J HEAT MASS TRANSFER 45 (Okt. 2002), S. 4435–4450, DOI: 10.1016/S0017-9310(02)00149-7.

- /REN 25/ Rensch, N.: Experimentelle Untersuchungen zur kritischen Wärmestromdichte und zum Post-Dryout-Wärmeübergang mit R-134a unter hohen Drücken, Dissertation, Karlsruhe: Karlsruhe Institute of Technology, 25.11.2025.
- /SCH 23/ Schöffel, P. J., u. a.: ATHLET 3.4.0 Models and Methods, Nov. 2023.
- /SCH 25/ Schöffel, P. J., u. a.: ATHLET 3.5.0 User's Manual, Dez. 2025.
- /SON 21a/ Song, M., Liu, X.: Assessment of CHF and Post-CHF Heat Transfer Models for High-Pressure Condition, in: Frontiers in Energy Research 9 (2021).
- /SON 21b/ Song, M., Liu, X., Cheng, X.: Prediction of critical heat flux (CHF) for the high-pressure region in uniformly heated vertical round tubes, in: Annals of Nuclear Energy 158 (2021), S. 108303, DOI: 10.1016/j.anucene.2021.108303.
- /WEY 23/ Weyermann, F. C.: Plugin for providing post dry out heat transfer correlations to ATHLET, 2023.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Aufgaben des AP3 und das enge Zusammenspiel zwischen den APs und den Verbundpartnern/Teilprojekten .....	3
Abb. 2.1	Verifizierung der Implementierung der Song-Korrelation .....	9
Abb. 2.2	Anfangs von ATHLET berechnete Wandtemperatur im Vergleich zu Messwert und reinem Wert der Korrelation .....	14
Abb. 2.3	Im Rechenfall aufgetretene Strömungsregime .....	16
Abb. 2.4	Von ATHLET berechnete Wandtemperatur nach Änderung des Unterscheidungs der Implementierung .....	17
Abb. 2.5	Mit der überarbeiteten ATHLET Version berechnete Wandtemperatur (KIMOF Fall 4) .....	18
Abb. 2.6	Mit der überarbeiteten ATHLET Version berechnete Wandtemperatur (KIMOF Fall 1) .....	19
Abb. 2.7	Mit der überarbeiteten ATHLET Version berechnete Wandtemperatur (KIMOF Fall 2) .....	19
Abb. 2.8	Von ATHLET berechnete Wandtemperatur mit den Korrelationen von IATF und IKE .....	20
Abb. 2.9	Agenda des Basiskurses .....	22
Abb. 2.10	Agenda des Fortschrittskurses .....	24
Abb. 2.11	Agenda der Abschlussbesprechung des Praxistrainings .....	25

**Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1  
**50667 Köln**

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

**85748 Garching b. München**

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

**10719 Berlin**

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

**38122 Braunschweig**

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

[www.grs.de](http://www.grs.de)