

Abbildung 5.19: Aufheizung infolge sinusförmiger Wärmezufuhr unter Verwendung der Volumenkräfte.

Gemäß Abb. 5.19 ergibt sich für die Fall "3" genannte Aufprägung des im vorangegangenen Kapitel 5.3.1 vorgestellten, sinusförmigen Leistungsprofils in axialer Richtung ein unterschiedlicher Temperaturverlauf in dem untersuchten Geometrieausschnitt im Vergleich zu der konstanten Leistungszufuhr. Wiederum weist die geringe Abweichung unter den vier Zellsäulen aus Abb. 5.15 auf eine gute Quervermischung aufgrund der durch die Drahtwendeln induzierten Volumenkräfte hin. Wegen der integral gleichen Leistungseinspeisung in die Zellen und des erhöhten Queraustauschs werden nahezu identische Endtemperaturen zu dem in Abb. 5.18 gezeigten Fall "2" erreicht. Die größte Abweichung tritt auch hier in der magentafarbenen Zellsäule auf und entspricht der aus Fall "2". Analoges Verhalten ist für den aus den vier Zellsäulen gebildeten Mittelwert der Fluidtemperatur zu beobachten.

Generell lässt sich eine sehr gute Übereinstimmung der vorgestellten Temperaturverläufe mit den Daten aus COBRA IIIC [124] feststellen. Für alle in diesem Kapitel aufgeführten Rechnungen kann ein Residuum von $Res \approx 10^{-14}$ erreicht werden, was auf ein sehr robustes, numerisches Verfahren auch bei der Präsenz starker Gradienten hinweist.

5.3.3 Auswertung der allgemeinen Strömungsstruktur

Die Temperaturverteilungen in Abb. 5.20 stimmen ohne die Einbindung der in Kapitel 5.2.2 ermittelten Volumenkräfte qualitativ überein. Im Falle der konstanten Wärmezufuhr über der Höhe steigen die Unterkanaltemperaturen jedoch schneller an, wie schon in Abb. 5.18 und Abb. 5.19 zu erkennen ist. Wie bei den Analysen von Waata et al. [149] heizen sich auch in Abb. 5.20 die vier Eckkanäle aus Abb. 5.15 deutlich schneller auf als die übrigen Unterkanäle und erreichen demzufolge höhere Endtemperaturen. Diese Beobachtung lässt sich unabhängig von der Art der Wärmezufuhr anstellen. Weiterhin ist zu erkennen, dass sich die Zentralkanäle bei fehlender Mischung generell erheblich stärker aufheizen als die Randkanäle, was die Notwendigkeit eines guten Mischungskonzepts, wie bereits in Kapitel 2.2 untersucht, unterstreicht.

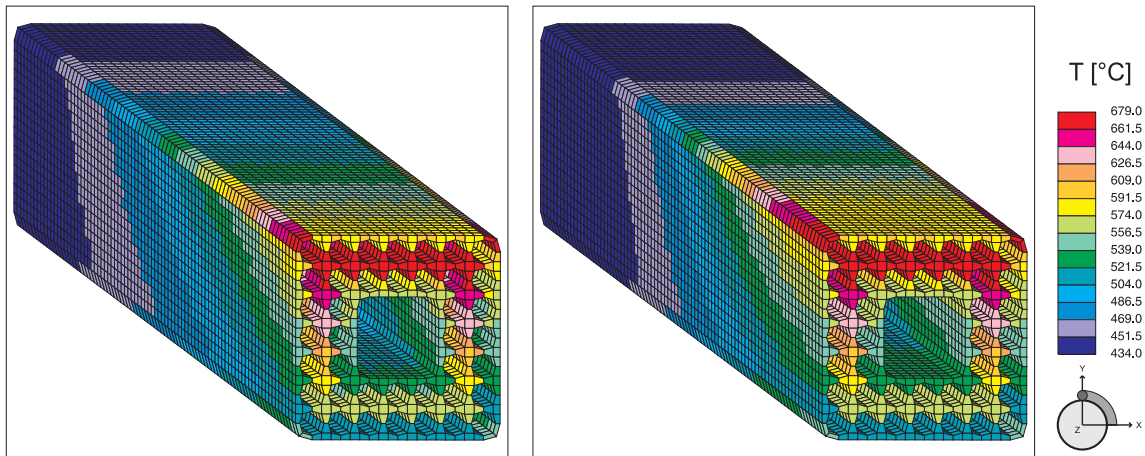


Abbildung 5.20: Unterkanaltemperaturen ohne Volumenkräfte: Links: Konstante Wärmezufuhr; Rechts: Sinusförmiges Leistungsprofil.

Unter Berücksichtigung der Volumenkräfte stellt sich bei den beiden verschiedenen Aufheizprofilen eine deutliche Absenkung der maximalen Fluidtemperaturen am Auslass ein, was in Abb. 5.21 dargestellt ist. In beiden Fällen sind die höchsten Kühlmitteltemperaturen in dem oberen, linken Viertel zu finden, was sich mit den Analysen von Heinecke [131] deckt. Diese Lage der heißesten Stelle lässt sich mit der Richtung des lateralen Leistungsgradienten aus Abb. 5.15 sowie der Wicklungsrichtung der Drahtwendeln im Gegenuhrzeigersinn erklären. Beim sinusförmigen Leistungsprofil steigen die Temperaturen in Abb. 5.21 rechts entsprechend früher auf einen höheren Wert an, was mit dem Graph aus Abb. 5.19 korrespondiert.

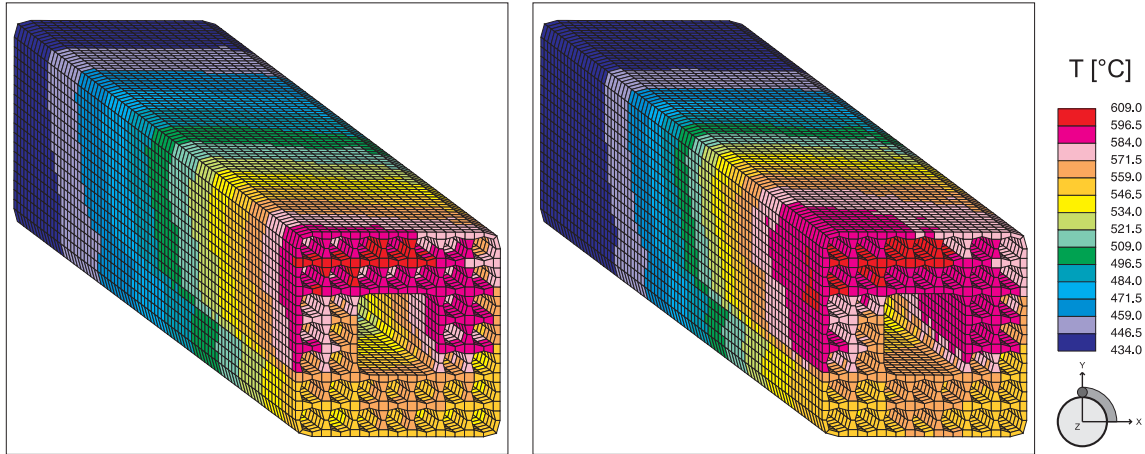


Abbildung 5.21: Unterkanaltemperaturen mit Volumenkräften: Links: Konstante Wärmezufuhr; Rechts: Sinusförmiges Leistungsprofil.

Die Güte der Fluidvermischung innerhalb eines Brennelements wird in der Regel an der Differenz zwischen maximaler und minimaler Austrittstemperatur gemessen. Dies ist auch aus strukturmechanischer Sicht von Bedeutung, da große Gradienten hohe Spannungen in den Bauteilen verursachen. Den mittleren Austrittstemperaturen wird in Bezug auf den thermodynamischen Wirkungsgrad besondere Bedeutung beigemessen. Als limitierender Wert hinsichtlich eines Versagens des Werkstoffs ist die im gesamten Brennelement auftretende Maximaltemperatur. In Tabelle 5.3 sind besagte Temperaturen für die drei untersuchten Fälle und der Referenzrechnung mit COBRA IIIC vergleichend gegenübergestellt. Für Fall "1" lassen sich trotz einer moderaten, mittleren Austrittstemperatur große Abweichungen in beiden Richtungen um diesen Mittelwert beobachten, was in einer enormen Temperaturdifferenz von über 170°C in der Auslassebene resultiert. Für die Fälle "2" und "3" ist eine beträchtliche Homogenisierung festzustellen, was sich in einer Annäherung der beiden Extremwerte zeigt und zu einem flacheren Temperaturgradienten führt. Die Maximaltemperaturen in den beiden angesprochenen Fällen finden sich in den cyanfarbenen hervorgehobenen Spaltregionen zwischen Unterkanal "4" und "12" bzw. "5" und "13" in Abb. 5.15. Das Auftreten in gerade dieser Region liegt wahrscheinlich an der in Kapitel 5.2.4 diskutierten, zu geringen Berechnung der Quergeschwindigkeit zwischen einem Zentralkanal und seinen benachbarten Randkanälen. Weiterhin bleibt anzumerken, dass in Fall "3" die maximal im Brennelement vorkommende Temperatur in etwa vier Ebenen unterhalb des Auslasses auftritt. Die Ursache hierfür liegt in der sinusförmigen Wärmeeinspeisung. Da zum Auslass hin der Leistungseintrag gegen null geht, die Quervermischung aber aufrecht erhalten bleibt, kann es zu einer leichten Absenkung der Temperaturen kommen.

Im Vergleich zu Heinecke ergeben sich etwas höhere Temperaturdifferenzen, wodurch mit der hier vorgestellten Methode eine konservativere Abschätzung der Temperaturen für die Auslegung eines Brennelements erfolgt.

	T_{\max}^{BE}	$T_{\max}^{\text{Auslass}}$	$T_{\min}^{\text{Auslass}}$	$\Delta T^{\text{Auslass}}$	$T_{\text{gem.}}^{\text{Auslass}}$
Heinecke [131]		598	558	40	
Fall 1		683	509	174	583
Fall 2		607	549	58	576
Fall 3	608	605	549	56	576

Tabelle 5.3: Signifikante Temperaturen im HPLWR-Brennelement in [°C].

Alle in den nachfolgenden Abbildungen gezeigten Größen basieren auf der Rechnung unter Verwendung der Volumenkräfte und eines sinusförmigen Leistungsprofils.

Die in Abb. 5.22 links zu sehende Verteilung der Fluiddichte ist direkt von der lokalen Fluidtemperatur abhängig. So sind auch hier die zu einer hohen Temperatur korrespondierenden, niedrigen Dichtewerte im oberen, linken Viertel zu finden. Die genannte Stoffgröße ist ein Maß für die Geschwindigkeiten, da diese stark an diesen Stoffwert gekoppelt sind. Aus diesem Grund wird auf eine gesonderte Darstellung der Axialgeschwindigkeiten verzichtet.

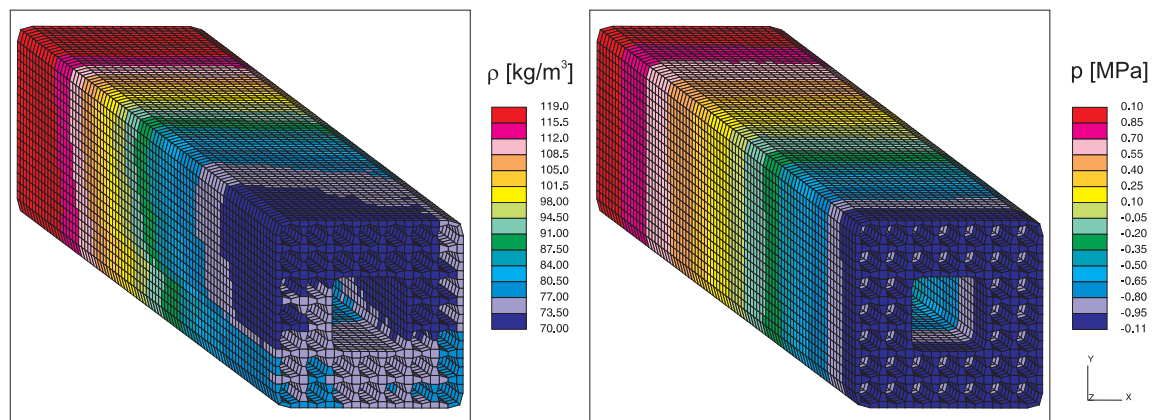


Abbildung 5.22: Links: Verlauf der Fluiddichte; Rechts: Axiale Entwicklung des Druckes.

Rechts in Abb. 5.22 ist der axiale Verlauf des Druckes wiedergegeben. Er ist in einer axialen Ebene nahezu konstant, wodurch eben diese in Kapitel 2.2 für die Berechnung der Zirkulationskonzepte getroffene Annahme untermauert wird.

In Tabelle 5.4 sind die Axialdruckverluste für die Fälle "2" und "3" aufgeführt. Sie sind nahezu unabhängig von der gewählten Wärmezufuhr. Zum Vergleich ist der axiale Druckverlust nach Rehme gemäß Gl. (4.52) unter Vernachlässigung des letzten Terms aufgeführt. Dieses zusätzliche Verhältnis von benetzten Umfängen darf weggelassen werden, da in den groben CFD-Rechnungen weder Wandreibung noch die Drahtoberflächen Berücksichtigung finden. Alle verwendeten Strömungsgrößen und Stoffwerte sind über das gesamte Volumen des Fluidraums gemittelt. Die direkte Gegenüberstellung der berechneten und der durch die Korrelation vorhergesagten Druckverluste zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der Werte. Die Abweichungen der Differenzen der paarweise verglichenen Druckverluste vom zu erwartenden Gesamtdruckverlust betragen in beiden Fällen nur wenige Prozent.

	Δp^{BE} [MPa]	$\Delta p_{\text{Rehme}}^{\text{BE}}$ [MPa]	$\Delta p^{\text{BE}} - \Delta p_{\text{Rehme}}^{\text{BE}}$ [kPa]
Fall 2	0,2053	0,2006	4,7
Fall 3	0,2055	0,2022	3,3

Tabelle 5.4: Vergleich der Axialdruckverluste im HPLWR-Brennelement.

Abb. 5.23 zeigt links die u-Geschwindigkeitsvektoren in x-Richtung und rechts die v-Geschwindigkeitsvektoren in y-Richtung. Es ist zu beobachten, dass sich entlang des Außenkastens eine im Gegenuhrzeigersinn rotierende Strömung einstellt. Diese Zirkulation entspricht somit der Wicklungsrichtung der Drahtwendeln um die Brennstabhüllrohre. Um den Moderatorkasten fließt das Fluid dagegen im Uhrzeigersinn. Die hier zu sehenden, gegenläufig rotierenden Strömungen parallel zu den beiden Kastenwänden wurden ebenfalls von Heinecke [131] festgestellt.

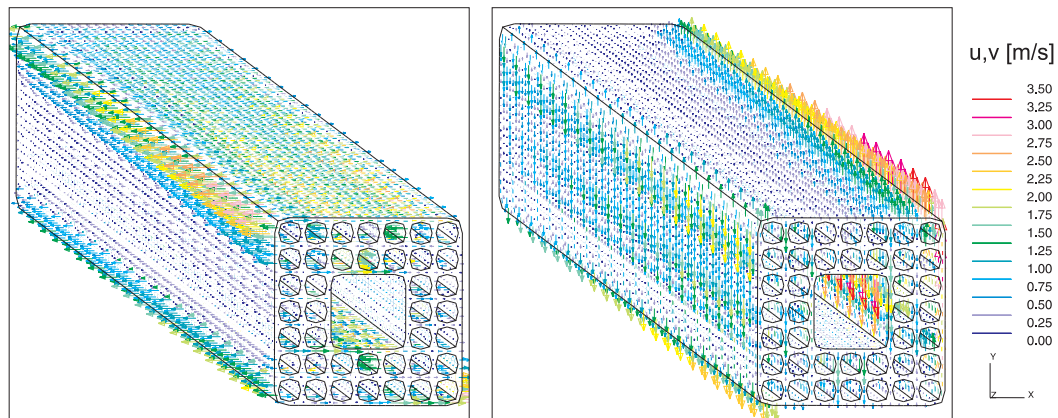


Abbildung 5.23: Quergeschwindigkeitskomponenten in die beiden lateralen Richtungen.

Generell besteht eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen des etablierten Unterkanalprogramms COBRA IIC [124] und experimentellen Korrelationen.

Die Anwendbarkeit eines kommerziellen CFD-Softwarepakets zur Analyse der Strömungsverhältnisse unter Beeinflussung von Drahtwendelabstandshaltern in den Unterkanälen eines gesamten Brennelements konnte somit im Rahmen dieser Arbeit gezeigt werden.

5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Unterkanalberechnungen

Nachdem alle notwendigen Voruntersuchungen abgeschlossen waren sowie die benötigten Informationen ermittelt werden konnten, wurde das entwickelte Verfahren ausführlich beschrieben und verifiziert.

Die einzelnen Schritte hin zur Unterkanalanalyse mittels grober CFD sind nachfolgend zusammengefasst:

- Die für Unterkanalanalysen mit CFD zu lösenden Erhaltungsgleichungen und Diskretisierungsverfahren werden ermittelt. Der Vektor der auf ein Kontrollvolumen wirkenden, äußeren Kräfte in den Impulserhaltungsgleichungen wird als Schnittstelle für die Berücksichtigung der durch die Drahtwendeln hervorgerufenen Effekte auf die Unterkanalströmung identifiziert.
- Verschiedene Arten der Bestimmung der drahtwendelinduzierten Kräfte werden vorgestellt. Durch eine vergleichende Gegenüberstellung der auf die Struktur wirkenden Kräfte und den sich aus den Flüssen über die Grenzen eines Kontrollraums ergebenden Volumenkräfte wird eine konsistente Berechnung erreicht. Für letztgenannte Methode werden die durch die Volumenmittelung bei der Datenextraktion hinzugekommenen, räumlichen Schwankungsgrößen ähnlich der Favre-Mittelung der zeitlichen Schwankungsgrößen in der Turbulenzmodellierung berücksichtigt.
- Es wird eine Netztopologie erarbeitet, mit welcher sich der Fluidraum des HPLWR-Brennelements mit seiner quadratischen Stabanordnung durch Hexaederzellen grob diskretisieren lässt.
- Eine Berechnung der repräsentativen Unterkanäle mit zuvor in geeigneter Weise parametrisierten Kraftkomponenten ergibt mit wenigen Ausnahmen eine gute Übereinstimmung der Strömungsgrößen bzw. der auf die Wände wirkenden Kräfte mit den RANS-Ergebnissen. Der Queraustausch zwischen den verschiedenen Unterkanaltypen wird deutlich unterschätzt, was wahrscheinlich an der sehr groben, axialen Diskretisierung bei den vorherrschenden, komplexen Strömungsverhältnissen liegt. Es lassen sich kaum Unterschiede zwischen den untersuchten Diskretisierungsverfahren erkennen.

- Zur Berechnung des gesamten HPLWR-Brennelements wird ein Schema der für die repräsentativen Unterkanäle ermittelten Daten auf die nicht untersuchten Unterkanäle entwickelt.
- Zur vergleichenden Anwendung des neu entwickelten Verfahrens werden mit dem Unterkanalprogramm COBRA IIIC durchgeführte Unterkanalrechnungen herangezogen. Eine Analyse des dort gefundenen, heißesten Unterkanals ergibt eine sehr gute Übereinstimmung der Fluidtemperaturen. Der sich einstellende Axialdruckverlust stimmt ebenfalls sehr gut mit einer empirischen Korrelation überein. Die für das HPLWR-Brennelement charakteristischen, gegenläufig rotierenden Strömungszirkulationen in den Randkanälen bilden sich aus.
- Die Temperaturunterschiede des Kühlmittels am Austritt der zweiten Überhitzerstufe betragen bei Leistungsgradienten von $\pm 21\%$ über eine Brennelementbreite lediglich rund 55°C , sofern Drahtwendeln berücksichtigt werden. Ohne Vermischung zwischen den Unterkanälen kann diese Temperaturdifferenz bis zu 175°C betragen. Die Drahtwendeln tragen also ganz erheblich zur Kühlmittelvermischung bei.

Aufgrund der guten Übereinstimmung der im Rahmen dieses Kapitels erzielten Ergebnisse mit belastbaren Daten einer Unterkanalanalyse gilt die hier vorgestellte, neue Methode als verifiziert.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Auf der Suche nach einem Abstandshalterkonzept für das HPLWR-Brennelement wurden Drähte, welche helixförmig in gleichsinniger Weise um alle Brennstabhüllrohre gewickelt sind, als praktikable und effektive Ausführung identifiziert. Dazu wurden verschiedene Mischungskonzepte auf ihre Güte bzgl. einer anzustrebenden Homogenisierung der Kühlmitteltemperaturen evaluiert. Dabei induzierte die aussichtsreichste Variante eine übergeordnete Strömungszirkulation im Brennelement und sorgte für einen guten Queraustausch zwischen den Zentralkanälen und den Randkanälen. Es wurde herausgefunden, dass Drahtwendelabstandshalter solch eine unilaterale Strömungsstruktur entlang der Kastenwände erzeugen, wodurch heiße Strahlen konvektiv herausgemischt werden. Diese Vorteile in Verbindung mit der einfachen Bauweise machen Drahtwendeln zu idealen Abstandshaltern für das HPLWR-Brennelement.

Es wurde gezeigt, dass ein kommerzielles CFD-Softwarepaket in der Lage ist, mit vertretbarem Aufwand die Strömungsverhältnisse in einem gesamten HPLWR-Brennelement mit Drahtwendelabstandshaltern zu berechnen.

Dazu war es im Zuge einer zuverlässigen Anwendung von CFD zwingend erforderlich, die in diesem Fall gewählten RANS-Methoden an ausgewählten, experimentellen Daten zu validieren. Nach einer genauen Selektion der zur Validierung von numerischen Rechnungen verwendbaren Experimenteserien wurde eine geeignete Versuchsreihe identifiziert. Dieses Experiment für hexagonale Stabanordnungen mit Drahtwendeln wurde in Ermangelung von Daten für die im HPLWR-Brennelement vorliegende, quadratische Konstellation gewählt. Für den aus zwei benachbarten Zentralkanälen bestehenden Geometrieausschnitt wurde zunächst ein numerisches Modell ausgearbeitet. Dies stellte eine besondere Herausforderung in Bezug auf die Geometrieerzeugung dar, da entsprechende Informationen aus der Literatur nicht verfügbar waren. Weiterhin wurde eine Methode zur Datenextraktion aus unstrukturiert vernetzten Fluidräumen mittels Gauß'scher Wichtung der in den

Zellvolumen gespeicherten Strömungsgrößen vorgestellt. Für den Quermassenstrom als dem wichtigsten Parameter und den Axialmassenstrom wurde die Abhängigkeit der Ergebnisse von der Geometrie, der Art der Diskretisierung und verschiedener Diskretisierungsverfahren untersucht. Die nach einer umfangreichen Literaturstudie zum Einsatz von Turbulenzmodellen in Stabbündelströmungen besten Ergebnisse bei einer Variation ausgewählter Turbulenzmodelle ergaben eine Abweichung zum experimentell bestimmten Druckverlust von 10% und wurden mit einem kubisch-nichtlinearen Turbulenzmodell erzielt. Damit konnte auch die Dicke der Grenzschicht im Axialgeschwindigkeitsverlauf hinreichend genau reproduziert werden. Die unterschiedlichen Verläufe der Quergeschwindigkeiten ließen sich mit den vielfach beschriebenen, stark instationären Strömungsbedingungen in einem Stabbündel mit Drahtwendelabstandshaltern erklären, welche allerdings in dem kleinen Geometrieausschnitt nicht reproduzierbar waren. Im Vergleich zu einer für eine analoge Geometrie durchgeführte LES ergab die in dieser Arbeit entwickelte Art der RANS-Modellierung die qualitativ gleichen Verläufe der Quergeschwindigkeiten durch die Spalte zwischen zwei Brennstäben. Das entwickelte, numerische Verfahren ist somit in der Lage, die individuellen Auswirkungen der Drahtwendeln auf die Strömungsverhältnisse in engen Stabbündeln zu erfassen.

Um die durch die Drahtwendeln induzierten Effekte auf den Fluidaustausch zwischen zwei benachbarten Unterkanälen in ihren Einzelheiten bestimmen zu können, wurden für einen repräsentativen Geometrieausschnitt des HPLWR-Brennelements von einer axialen Ganghöhe, bestehend aus einem von zwei Randkanälen eingebetteten Zentralkanal, RANS-Simulationen auf Basis der zuvor verifizierten Methode durchgeführt. Nach einer ausführlichen Beschreibung der unterschiedlichen Möglichkeiten der Modellierung des durch die Drahtwendeln hervorgerufenen Queraustauschs in den etablierten Unterkanalprogrammen wurden mehrere Parameterstudien durchgeführt. Zusätzlich zur Referenzgeometrie des HPLWR-Brennelements mit geraden Kastenwänden war eine Ausführung mit gewellten Kastenwänden Bestandteil der Untersuchungen. Dabei wurden die sich einstellenden Strömungsverhältnisse anhand von ausgewählten, in Unterkanalprogrammen verwendeten Mischungsparametern diskutiert. Eine Erhöhung der Ganghöhe führte zu geringeren Mischungsraten, jedoch zeigten sich diese als nahezu unabhängig von der Reynoldszahl. Laterale Druckgradienten hatten lediglich in den Randkanälen Einfluss auf die dortigen Fluidtransferraten. Das gewellte Design der Kastenwände wurde nicht weiter verfolgt, da es einen signifikant höheren Axialdruckverlust bei fast gleichen Mischungseigenschaften erzeugte. Weiterhin konnte durch Auswertung von Pécletzahlen nachgewiesen werden, dass der turbulente Queraustausch gegenüber dem konvektiven vernachlässigt werden kann.

Nachdem die Strömungsverhältnisse in einem für das HPLWR-Brennelement charakteristischen Ausschnitt der Geometrie genau bestimmt wurden, stehen diese Informationen für die Berechnung des gesamten Brennelements zur Verfügung. Ausgehend von einer Diskussion der bei Verwendung der Finite Volumen Methode gelösten Erhaltungsgleichungen wurde der in die Impulsbilanzgleichungen eingehende Vektor der auf ein Kontrollvolumen wirkenden, äußeren Kräfte als Schnittstelle für die einzubringenden, drahtwendelinduzierten Kräfte identifiziert. Mehrere Arten zur Ermittlung dieser resultierenden, auf die Strömung wirkenden Kräfte wurden vorgestellt. Eine vergleichende Gegenüberstellung zeigte die konsistente Bestimmung der gesuchten Volumenkräfte. In diesem Zusammenhang sind die sich durch die Volumenmittelung ergebenden, räumlichen Schwankungsgrößen berücksichtigt worden. Mit einer angepassten Diskretisierung der Geometrie und unter Verwendung der induzierten Kräfte in geeigneter Parametrisierung war es nun möglich, die Methode durch erneute Berechnung des bereits im Detail analysierten Geometrieausschnitts des Brennelements zu verifizieren. Die isothermen Strömungsverhältnisse konnten mit kleineren Abweichungen, welche auf die komplizierte, alternierende Strömungsstruktur in den Spaltregionen zwischen den zwei Unterkanaltypen in Verbindung mit der sehr groben, axialen Diskretisierung zurückgeführt werden, gut wiedergegeben werden.

Als nächsten Schritt galt es, die Methode zur Unterkanalberechnung mit grober CFD an einem konkreten Fall eines beheizten Brennelements zu verifizieren. Dazu wurde sie mit einer Analyse eines HPLWR-Brennelements aus der zweiten Überhitzerstufe unter Verwendung des weitverbreiteten Unterkanalprogramms COBRA IIIC verglichen. Dieses Brennelement war einer deutlich verstärkten Leistungszufuhr und einem starken, lateralen Leistungsgradienten ausgesetzt. Ein direkter Vergleich der Fluidtemperaturen des in diesen Rechnungen gefundenen, heißesten Unterkanals ergab eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Gleiches gilt für den mit einer empirischen Korrelation verglichenen Axialdruckverlust des Bündels in grober Diskretisierung. Die zu erwartenden, gegenläufigen Helixstrukturen der Strömung um die Kastenwände wurden in den CFD-Berechnungen nachgewiesen.

Eine graphische Darstellung der beschriebenen Vorgehensweise zur Strömungsberechnung unter Verwendung von CFD in grober Diskretisierung ist in Abb. 6.1 zusammenfassend wiedergegeben. Dabei sind die einzelnen Arbeitsschritte, die in der linken Spalte dargestellt sind, notwendige Bestandteile der in der mittleren Spalte aufgeführten Hauptarbeitsschritte. Diese sind exemplarisch in den Grafiken der rechten Spalte visualisiert. Auch bei einer Variation der Randbedingungen sind die in der linken Spalte farbig hinterlegten Arbeitsschritte nur einmalig durchzuführen. Im Gegensatz dazu stehen die farbig umrandeten Schritte. In einem solchen Fall müssen lediglich diese drei wiederholt werden. Somit kann der erforderliche Arbeitsaufwand erheblich reduziert werden.

Zusammenfassung

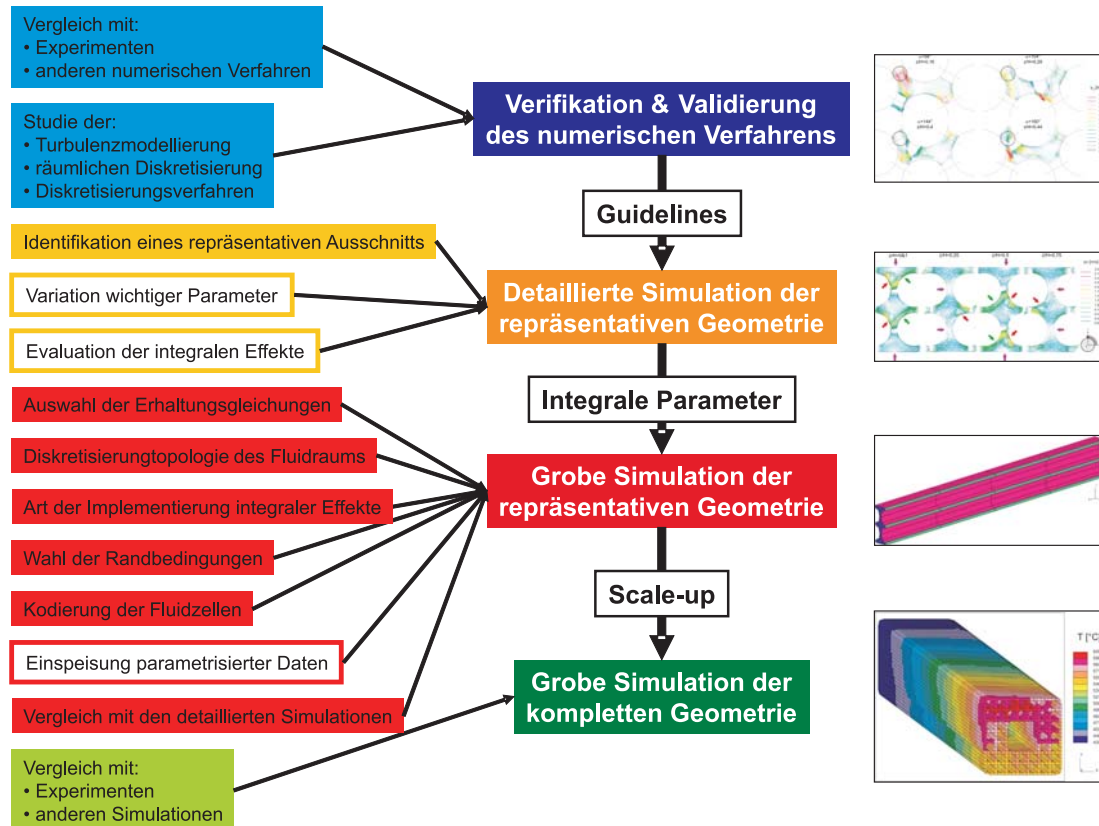


Abbildung 6.1: Flussdiagramm für die Modellierung des Strömungsverhaltens am Beispiel eines HPLWR-Brennelements mittels grober CFD.

Zum Schluss ist festzustellen, dass es durch das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren möglich ist, die Strömungen in beliebigen Brennelementgeometrien mit Abstandshaltern effizient und mit großer Genauigkeit zu simulieren. Die Herleitung der Methode sowie aller dafür notwendigen Zusatzinformationen wurden ausführlich diskutiert und deren Einsetzbarkeit durch eine erfolgreiche Anwendung untermauert.

Ausblick

Als Ausblick wird es vom festigkeitsmechanischen Standpunkt aus als notwendig erachtet, die aus den wandparallelen, unilateralen Strömungen resultierende Torsionsbeanspruchung der Kastenwände sowie die in einer Ebene inhomogene Abstützung der Brennstäbe untereinander bzw. der Brennstäbe gegen die Kastenwände näher zu untersuchen. Für eine genauere Berechnung des Stabbündels wird es nötig sein, das komplette HPLWR-Brennelement mit all seinen Unterkanälen detailliert zu untersuchen, um die Daten für die bisher nicht erfassten Unterkanäle zu erhalten. Ferner sollte die entwickelte Methode an anderen Anwendungen weiter getestet und gegebenenfalls kalibriert werden. Die Ursache für den als zu gering berechneten Queraustausch zwischen zwei Unterkanaltypen wird auf die falschen, lokalen Geschwindigkeiten aufgrund der fehlenden Drahtwendel zurückgeführt. Dies gilt es abschließend zu klären. Eine Verfeinerung der Diskretisierung ist ebenfalls als geeigneter Ansatz anzusehen.

Literaturverzeichnis

- [1] Army Gas-Cooled Reactor Systems Program: Semiannual Progress Report. 1961 (IDO-28567). – Forschungsbericht. page 98-129
- [2] AHMAD, I. ; KIM, K.-Y.: Three-Dimensional Analysis of Flow and Heat Transfer in a Wire-Wrapped Fuel Assembly. In: *Proc. of ICAPP'05*, 2005. – paper 5071
- [3] AHMAD, I. ; KIM, K.-Y.: Flow and Convective Heat Transfer Analysis Using RANS for a Wire-Wrapped Fuel Assembly. In: *Journal of Mechanical Science und Technology (KSME Int. J.)* 20 (2006), Nr. 9, S. 1514–1524
- [4] ARWIKAR, K. ; FENECH, H.: Heat Transfer, Momentum Losses and Flow Mixing in a 61-Tube Bundle with Wire-Wrap. In: *Nuclear Engineering and Design* 55 (1979), S. 403–417
- [5] ASSATO, M. ; LEMOS, M. J. S.: Sensitivity Analysis of Turbulent Flow Simulations in a Square Duct Using a Non-Linear Model with High and Low Reynolds Approximations. In: *Proc. of the 2nd COPPE/UFRJ*. Federal University of Rio de Janeiro, Brazil, October 2001
- [6] ASZODI, A. ; LEGRADI, G.: Detailed CFD Analysis of Coolant Mixing in VVER-440 Fuel Assemblies with Code CFX-5.5. In: *Proc. of Technical Meeting on Use of Computational Fluid Dynamics (CFD) Codes for Safety Analysis of Reactor Systems, including Containment*. Pisa, Italy, November 2002
- [7] ASZODI, A. ; LEGRADI, G.: Detailed CFD Analysis of Coolant Mixing in VVER-440 Fuel Assemblies with Code CFX-5.5. In: *Proc. of NURETH-10*. Seoul, Korea, October 2003, S. 1–7
- [8] BAGLIETTO, E.: RANS and URANS Simulations for Accurate Flow Predictions inside Fuel Rod Bundles. In: *Proc. of ICAPP'07*, 2007. – paper 7310
- [9] BAGLIETTO, E. ; NINOKATA, H.: Selection of an Appropriate Turbulence Modeling in a CFD Code for an Ultra-long Life Core for the "IRIS" Reactor. In: *Proc. of Global 2003*. New Orleans, LA, November 2003, S. 610–619

- [10] BAGLIETTO, E. ; NINOKATA, H.: Turbulence Models Evaluation for Heat Transfer Simulation in Tight Lattice Fuel Bundles. In: *Proc. of NURETH-10*. Seoul, Korea, October 2003, S. 1–18
- [11] BAGLIETTO, E. ; NINOKATA, H.: CFD Modeling of Flow in Geometrically Disturbed Rod Bundles. In: *Heat and Technology* 22 (2004), Nr. 2, S. 109–114
- [12] BAGLIETTO, E. ; NINOKATA, H.: CFD Modeling of Secondary Flows in Fuel Rod Bundles. In: *Proc. of NUTHOS-6*. Nara, Japan, October 2004. – paper ID. N6P343
- [13] BAGLIETTO, E. ; NINOKATA, H.: A Turbulence Model Study for Simulating Flow Inside Tight Lattice Rod Bundles. In: *Nuclear Engineering and Design* 235 (2005), S. 773–784
- [14] BAGLIETTO, E. ; NINOKATA, H.: Anisotropic Eddy Viscosity Modeling for Application to Industrial Engineering Internal Flows. In: *Int. J. Transport Phenomena* 8 (2006), Nr. 2
- [15] BARTHOLET, T. G. ; ROIDT, R. M. ; ROMANO, J. E.: Clinch River Breeder Reactor Plant Nuclear Island 11:1 Scale Wire-Wrapped Rod Bundle Air Flow Test, Corner Subchannels. 1977 (WARD-D-0154). – Forschungsbericht
- [16] BARTHOLET, T. G. ; ROIDT, R. M. ; ROMANO, J. E.: Clinch River Breeder Reactor Plant Nuclear Island 11:1 Scale Wire-Wrapped Rod Bundle Air Flow Test, Side Subchannels. 1977 (WARD-D-0129). – Forschungsbericht
- [17] BARTHOLET, T.G. ; ROIDT, R.M. ; HARPER, L.J.: 11:1 Scale Wire Wrapped Rod Bundle Air Flow Test (Interior Subchannels). 1977 (CRBRP-ARD-0108). – Forschungsbericht
- [18] BASEHORE, K. L. ; GEORGE, T. L.: COBRA-IV Comparison with the WARD 11:1 LMFBR Air Flow Tests. 1979 (PNL-2923, UC-79e). – Forschungsbericht
- [19] BASTRON, A. ; HOFMEISTER, J. ; MEYER, L. ; SCHULENBERG, T.: Enhancement of Heat Transfer in HPLWR Fuel Assemblies. In: *Proc. of GLOBAL 2005*. Tsukuba, Japan, October 2005
- [20] BAUMANN, W. ; HOFFMANN, H.: Coolant Cross-Mixing of Sodium Flowing in Line through Multi-Rod Bundles with Different Spacer Arrangements. In: *Proc. of International Seminar on Heat Transfer in Liquid Metals*. Trogir, Yugoslavia, 1971
- [21] BEHNKE, L. ; HOFMEISTER, J. ; LÖWENBERG, M. ; SCHULENBERG, T.: Was ist Generation IV? 2004 (FZKA 6967). – Forschungsbericht
- [22] BISHOP, A. A. ; TODREAS, N. E.: Hydraulic Characteristics of Wire-Wrapped Rod Bundles. In: *Nuclear Engineering and Design* 62 (1980), S. 271–293

- [23] BISHOP, A.A. ; SANDBERG, R.O. ; TONG, L.S.: Forced Convection Heat Transfer to Water Nearcritical Temperatures and Super-Critical Pressures. In: *A.I.Ch.E.-I.Chem.E. Symposium Series 2* (1965), S. 77–85
- [24] BITTERMANN, D. ; STARFLINGER, J. ; SCHULENBERG, T.: Turbine Technologies for High Performance Light Water Reactors. In: *Proc. of ICAPP'04*. Pittsburgh, USA, June 2004. – paper 4195
- [25] CAMPBELL, R. L.: Computational Fluid Dynamics Thermal-Hydraulic Performance with Comparison to Experimental Results. In: *Nuclear Technology* 149 (2005), January, S. 49–61
- [26] CARAGHIAUR, D. ; ANGLART, H.: CFD Modeling of Secondary Flows in Fuel Rod Bundles. In: *Proc. of Workshop on Modeling and Measurements of Two-Phase Flows and Heat Transfer in Nuclear Fuel Assemblies*. KTH, Stockholm, Sweden, October 2006, S. 1–10
- [27] CARAJILESCOV, P. ; FERNANDEZ, E. F.: Model for Subchannel Friction Factors and Flow Redistribution in Wire-Wrapped Rod Bundles. In: *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences* 21 (1999), Nr. 4
- [28] CARELLI, M. D. ; TALLON, P. F.: Evaluation of the Wire-Wrap Hot Spot Factor in CRBRP Core Assemblies. (1982), June. – Vol/Issue: 41
- [29] CD-ADAPCO: *STAR-CD Methodology*. – 2-1-2-29
- [30] CEVOLANI, S.: Thermo- und fluiddynamische Analyse von gasgekühlten Brennelementbündeln bei Berücksichtigung von Wärmeleitung und Wärmestrahlung (KFK 3148). – Forschungsbericht
- [31] CHEN, W. L. ; GROLMES, M. A. ; ISHII, M.: A Simple Forced Diversion Model for Study of Thermal-Hydraulic Transients in LMFBR Subassembly. In: *Nuclear Engineering and Design* 45 (1978), S. 53–66
- [32] CHEN, Y. B. ; IP, K. L. ; TODREAS, N. E.: Velocity Measurements in Edge Channels of Wire-Wrapped LMFBR Fuel Assemblies. 1974 (COO-2245-11 TR). – Forschungsbericht
- [33] CHEN, Y. B. ; IP, K. L. ; TODREAS, N. E.: Velocity Measurements in Edge-Channels of Wire-Wrapped LMFBR Fuel Subassemblies. In: *Trans. Am. Nucl. Soc.* 19 (1974), S. 323–324
- [34] CHENG, S. K. ; TODREAS, N. E.: Energy Transfer Mechanism under Mixed Convection Conditions in LMFBR Wire-Wrapped Bundles. In: *Proc. of 3rd Int. Topical Mtg. Reactor Thermal Hydraulics*. Newport, USA, 1985. – 16-E1

- [35] CHENG, S.-K. ; TODREAS, N. E.: Hydrodynamic Models and Correlations for Bare and Wire-Wrapped Hexagonal Rod Bundles - Bundle Friction Factors, Subchannel Friction Factors and Mixing Parameters. In: *Nuclear Engineering and Design* 92 (1986), S. 227–251
- [36] CHENG, S.K.: Constitutive Correlations for Wire-Wrapped Subchannel Analysis under Forced and Mixed Convection Conditions. 1984. – Ph.D. Thesis
- [37] CHENG, X. ; LAURIEN, E. ; YANG, Y.H.: CFD Analysis of Heat Transfer in Supercritical Water in Different Flow Channels. In: *Proc. of GLOBAL 2005*. Tsukuba, Japan, October 2005. – paper No. 369, S. 1–6
- [38] CHENG, X. ; SCHULENBERG, T. ; BITTERMANN, D. ; RAU, P.: Design Analysis of Core Assemblies for Supercritical Pressure Conditions. In: *Nuclear Engineering and Design* 223 (2003), S. 279–294
- [39] CHENG, X. ; TAK, N.I.: CFD Analysis of Heat Transfer to Heavy Liquid Metals in Bare Rod Bundles. In: *Proc. of NURETH-11*. Popes Palace Conference Center, Avignon, France, October 2005. – paper 030, S. 1–6
- [40] CHIU, C. ; TODREAS, N. E. ; ROHSENOW, W. M.: Turbulent Mixing Model and Supporting Experiments for LMFBR Wire-Wrapped Assemblies. 1979 (ASME). – Forschungsbericht
- [41] CHIU, C. ; TODREAS, N.E. ; ROHSENOW, W.M.: Turbulent Flow Split Model and Supporting Experiments for Wire-Wrapped Core Assemblies. In: *Nuclear Technology* 50 (1980), S. 40–52
- [42] CHOI, M.-H. ; KANG, H.-S. ; YOON, K.-H. ; SONG, K.-N. ; JUNG, Y.-H.: Vibration Analysis of a Dummy Fuel Rod Continuously Supported by Spacer Grids. In: *Proc. of SMiRT 17*. Prague, Czech Republic, August 2003. – paper C01-3
- [43] CHUN, M.-H. ; SEO, K.-W.: An Experimental Study and Assessment of Existing Friction Factor Correlations for Wire-Wrapped Fuel Assemblies. In: *Annals of Nuclear Energy* 28 (2001), S. 1683–1695
- [44] CUI, X. ; KIM, K.: Three-Dimensional Analysis of Turbulent Heat Transfer and Flow through Mixing Vane in a Subchannel of Nuclear Reactor. In: *Journal of Nuclear Science and Technology* 40 (2003), July, Nr. 10, S. 719–724
- [45] CUSHMAN, R. A.: Subchannel Coolant Mixing and Temperature Analysis in EBR-II Instrumented Subassembly XX01. In: *Trans. Am. Nucl. Soc.* 14 (1971), Nr. 1, S. 250

- [46] DEARING, J. F. ; NELSON, W. R. ; ROSE, S. D.: *A Comparison of COBRA III-C and SABRE-1 (Wire-Wrap Version) Computational Results with Steady-State Data from a 19-pin Internally Guard Heated Sodium-Cooled Bundle with a Six-Channel Central Blockage (Thors Bundle 3C)*
- [47] FENECH, H.: Local Heat Transfer and Hot-Spot Factors in Wire-Wrap Tube Bundle. In: *Nuclear Engineering and Design* 88 (1985), S. 357–365
- [48] FENECH, H. ; BENNETT, F. O.: Axial Static Pressure Variations in Inner and Side Subchannels of a 61-Tube Wire-Wrap Bundle. In: *Nuclear Engineering and Design* 104 (1987), S. 83–92
- [49] FERNANDEZ, E. ; CARAJILESCOV, P.: Static Pressure and Wall Shear Stress Distributions in Air Flow in a Seven Wire-Wrapped Rod Bundle. In: *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences* 22 (2000), Nr. 2
- [50] FISCHER, K.: Design of a Supercritical Water-Cooled Reactor-Pressure Vessel and Internals. 2008 (FZKA 7429). – Forschungsbericht
- [51] FISCHER, K. ; SCHNEIDER, T. ; REDON, T. ; SCHULENBERG, T. ; STARFLINGER, J.: Mechanical Design of Core Components for a High Performance Light Water Reactor with a Three Pass Core. In: *Proc. of GLOBAL 2007*. Boise, USA, September 2007
- [52] FISCHER, P. ; LOTTES, J. ; SIEGEL, A. ; PALMIOTTI, G.: Large Eddy Simulation of Wire-Wrapped Fuel Pins I: Hydrodynamics of a Single Pin. In: *Proc. of Joint International Topical Meeting on Mathematics and Computation and Supercomputing in Nuclear Applications (M&C + SNA)*, 2007
- [53] GAJAPATHY, R. ; VELUSAMY, K. ; SELVARAJ, P. ; CHELLAPANDI, P. ; CHETAL, S.C.: CFD Investigation of Helical Wire-Wrapped 7-Pin Fuel Bundle and the Challenges in Modeling Full Scale 217 Pin Bundle. In: *Nuclear Engineering and Design* 237 (2007), S. 2332–2342
- [54] GRAVES, A. W. ; GATTON, I.: A Numerical Model of Heat Transfer in a Rod Bundle with Helical Wire Wrap Spacers. 1972 (ASME 72-HT-55). – Forschungsbericht
- [55] GROTE, K.-H. ; FELDHUSEN, J.: *Doppel-Taschenbuch für den Maschinenbau*. 21. Auflage. Springer Verlag, 2005
- [56] GUNTER, A. Y. ; SHAW, W. A.: A General Correlation of Friction Factors of Various Types of Surfaces in Crossflow. In: *Trans. Am. Soc. Mech. Eng.* 57 (1945), S. 643–660
- [57] HAMMAN, K. D. ; BERRY, R. A.: CFD Modeling Process (19-Pin Fast Reactor Assembly). 2007 (INL/MIS-07-13499). – Forschungsbericht

- [58] HANSON, A. S. ; TODREAS, N. E.: Fluid Mixing Studies in a Hexagonal 61-Pin, Wire-Wrapped Rod Bundle. 1977 (C00-2245-51TR, M.I.T.). – Forschungsbericht
- [59] HAZI, G.: On Turbulence Models for Rod Bundle Flow Computations. In: *Annals of Nuclear Energy* 32 (2005), S. 755–761
- [60] HERBELL, H. ; HIMMEL, S.: Strukturmechanische Auslegung eines HPLWR Brennelementkastens in Leichtbauweise. 2008 (FZKA 7404). – Forschungsbericht
- [61] HIMMEL, S. ; CLASS, A. ; LAURIEN, E. ; SCHULENBERG, T.: Flow in a HPLWR Fuel Assembly with Wire Wrap Spacers. In: *Proc. of ANS/ENS Winter Meeting'07*, 2007
- [62] HIMMEL, S. ; CLASS, A. G. ; LAURIEN, E. ; SCHULENBERG, T.: Determination of Mixing Coefficients in a Wire-Wrapped HPLWR Fuel Assembly using CFD. In: *Proc. of ICAPP'08*. Anaheim/CA, USA, June 2008. – paper 8053
- [63] HIMMEL, S. ; CLASS, A. G. ; LAURIEN, E. ; SCHULENBERG, T.: Sub-channel Analysis of a HPLWR Fuel Assembly with STAR-CD. In: *Proc. of 16th PBNC*. Aomori, Japan, October 2008. – paper P16P1152
- [64] HIMMEL, S. ; HOFMEISTER, J. ; STARFLINGER, J. ; SCHULENBERG, T.: Mechanical Analysis of the Fuel Assembly Box of a HPLWR Fuel Assembly. In: *Proc. of ICAPP'06*. Reno/NV, USA, June 2006. – paper 6229
- [65] HISHIDA, H. ; SAKAI, K. ; OZAKI, S.: Three-Dimensional Local Coolant Flow Velocity Field under the Influence of Wire-Spacers in an FBR Fuel Subassembly. In: *Nuclear Engineering and Design* 68, S. 359–372
- [66] HOFFMANN, H. ; BAUMGÄRTNER, E.: Experimental Investigations of the Thermodynamic Behaviour of Fast Breeder Reactor Fuel Elements with Different Spacer Types. 1974 (IAEA-SM-173/20). – Forschungsbericht
- [67] HOFMEISTER, J. ; WAATA, C. ; STARFLINGER, J. ; SCHULENBERG, T. ; LAURIEN, E.: Fuel Assembly Design Study for a Reactor with Supercritical Water. In: *Nuclear Engineering and Design* 237 (2007), S. 1513–1521
- [68] HOMEISTER, O. ; MCDANIEL, W. ; YAGLE, R.: Characteristics of the Fuel Elements for the Enrico Fermi Reactor. In: *Proc. of Nuclear Engineering and Science Conference*, 1958
- [69] IKEDA, K. ; HOSHI, M.: Development of Mitsubishi High Thermal Performance Grid (CFD Applicability for Thermal Hydraulic Design). In: *JSME International Journal, Series B* 45 (2002), Nr. 3, S. 586–591

- [70] IKEDA, K. ; MAKINO, Y. ; HOSHI, M.: Single-Phase CFD Applicability for Estimating Fluid Hot-Spot Locations in a 5x5 Fuel Rod Bundle. In: *Nuclear Engineering and Design* 236 (2006), November, S. 1149–1154
- [71] IKENO, T. ; KAJISHIMA, T.: Large Eddy Simulation of Fully Developed Sub-channel Turbulence. In: *Proc. of NURETH-10*. Seoul, Korea, October 2003, S. 1–19
- [72] IKENO, T. ; KAJISHIMA, T.: Computational Model for Turbulent Flow around a Grid Spacer with Mixing Vane. In: *Proc. of NURETH-11*. Popes Palace Conference Center, Avignon, France, October 2005. – paper 357, S. 1–18
- [73] IN, W. ; OH, D. ; CHUN, T.: Simulation of Turbulent Flow in Rod Bundles using Eddy Viscosity and the Reynolds Stress Model. In: *Proc. of NURETH-10*. Seoul, Korea, October 2003, S. 1–14
- [74] IN, W. K. ; CHUN, T. H.: Assessment of the RANS Turbulence Models for Turbulent Flow and Heat Transfer in a Rod Bundle. In: *Nuclear Technology* 150 (2005), June, S. 231–250
- [75] IN, W. K. ; CHUN, T. H. ; MYONG, H. K.: CFD Simulation of Axial Turbulent Flow in a Triangular Rod Bundle. In: *Proc. of 5th Asian Computational Fluid Dynamics*. Busan, Korea, June -July 2003. – paper 68, S. 1–7
- [76] IN, W. K. ; CHUN, T. H. ; MYONG, H. K.: CFD Simulation of the Turbulent Flow and Heat Transfer in a Bare Rod Bundle. In: *Proc. of ICAPP'04*. Pittsburgh, PA USA, June 2004. – paper 4179, S. 1–7
- [77] IN, W. K. ; OH, D. S. ; CHUN, T. H.: Application of Non-linear Eddy Viscosity Models and Differential Reynolds Stress Model to Axial Turbulent Flow in a Bare Rod Bundle. In: *Proc. of NTHAS3*. Kyeongju, Korea, October 2002
- [78] IN, W. K. ; SHIN, C. H. ; OH, D. S. ; CHUN, T. H.: Numerical Analysis of the Turbulent Flow and Heat Transfer in a Heated Rod Bundle. In: *Journal of the Korean Nuclear Society* 36 (2004), April, Nr. 2, S. 153–164
- [79] KAISER, H.G. ; ZEGGEL, W.: Turbulent Flows in Complex Rod Bundle Geometries Numerically Predicted by the Use of FEM and a Basic Turbulence Model. In: *Nuclear Engineering and Design* 99 (1987), S. 351–363
- [80] KAROUTAS, Z. ; GU, C. Y. ; SCHOLIN, B.: 3-D Flow Analyses for Design of Nuclear Fuel Spacer. In: *Proc. of NURETH'95*. New York, USA, 1995
- [81] KIM, S. ; PARK, G. C.: Analysis of Turbulent Mixing in Rod Bundles with an Anisotropic Turbulent Diffusion Model based on the Flow Pulsation Phenomenon. In: *Nuclear Technology* 122 (1988), June, S. 284–294

- [82] KOREA ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE: Comparative Study of Turbulent Flows in the Subchannel of Rod Bundle with Flow Deflectors on the Grid Spacer. 2000 (KAERI/TR-1460/2000). – Forschungsbericht
- [83] KOREAN ATOMIC, Energy Research Institute (: Evaluation of RANS Turbulence Model for Optimal Computational Analysis of Reactor Turbulent Flow. 2003 (KAERI/TR 2373/2003). – Forschungsbericht
- [84] KOREAN ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE (KAERI): CFD Analysis of Turbulent Flow in Nuclear Fuel Bundle with Flow Mixing Device. 1999 (KAERI/TR 1296/1999). – Forschungsbericht
- [85] KRIVENTSEV, V. ; OSHIMA, H. ; YAMAGUCHI, A. ; NINOKATA, H.: Numerical Prediction of Secondary Flows in Complex Areas using Concept of Local Turbulent Reynolds Number. In: *Journal of Nuclear Science and Technology* 40 (2003), September, Nr. 9, S. 655–663
- [86] KUNIK, C. ; VOGT, B.: Berechnung der Mischkonvektion im Moderatorspalt eines Kernreaktors mit einem Ansatz für poröse Medien. 2007 (FZKA 7273). – Forschungsbericht
- [87] LAFAY, J. ; ET AL.: Local Pressure Measurements and Peripheral Flow Visualization in a Water 19-Rod Bundle Compared with FLICA II B Calculations: Influence of Helical Wire-Wrap Spacer System. 1975 (ASME paper 75-HT-22). – Forschungsbericht
- [88] LAUNDER, B.E. ; SPALDING, D.B: The Numerical Computation of Turbulent Flows. In: *Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng.* 3, Nr. 1974, S. 269–289
- [89] LAURIEN, E. ; WINTTERLE, T.: On the Numerical Simulation of Flow and Heat Transfer within the Fuel-Assembly of the High-Performance Light-Water Reactor. In: *Proc. of KTH-Workshop on Modeling and Measurements of Two-Phase Flows and Heat Transfer in Nuclear Fuel Assemblies*. Stockholm, Sweden, October 2006, S. 1–10
- [90] LEE, K. B. ; JANG, H. C.: A Numerical Prediction on the Turbulent Flow in Closely Spaced Bare Rod Arrays by a Nonlinear k- ϵ -Model. In: *Nuclear Engineering and Design* 172 (1997), September, S. 351–357
- [91] LEMOS, M. J. S.: Anisotropic Turbulent Transport Model for Rod-Bundle. In: *Nuclear Engineering and Design* 6 (1988), Nr. 1-2, S. 27–37
- [92] LEMOS, M. J. S. ; ASSATO, M.: Simulation of Axial Flow in a Bare Rod Bundle using a Non-Linear Turbulence Model with High and Low Reynolds Approximations. In: *Proc. of ICONE 10*. Arlington, USA, April 2002, S. 465–471

- [93] LESTINEN, V. ; GANGO, P.: Experimental and Numerical Studies of the Flow Field Characteristics of VVER-440 Fuel Assembly. In: *Proc. of NURETH-9*. San Francisco, USA, October 1999, S. 1–27
- [94] LIU, B. ; DZODZO, M. B. ; PARAMONOV, D. V. ; SMITH, L. D. ; CONNER, M. E. ; YOUNG, M. Y.: Application of CFD in the Design Process for PWR Spacer Grid Mixing Vanes. In: *Proc. of International Meeting on LWR Fuel Performance 2004*. Orlando, USA, September 2004. – paper 1065, S. 127–138
- [95] LORENZ, J. J. ; GINSBERG, T.: Coolant Mixing and Subchannel Velocities in an LMFBR Fuel Assembly. In: *Nuclear Engineering and Design* 40 (1977), Nr. 2, S. 315–326
- [96] MAGEE, P. M.: Modelling of Flow Sweeping Effect in Wire-Wrapped Rod Bundles. In: *Trans. ANS* 15 (1972), June, Nr. 1
- [97] MCCREERY, G. L. ; JR., H. M. M. ; HAMMAN, K. D. ; ZHANG, H.: Design of Wire-Wrapped Rod Bundle Matched Index-of-Refractive-Experiments. In: *Proc. of ICONE 16*. Orlando, Florida, USA, May 2008
- [98] MENTER, F. R.: Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. In: *AIAA J.* 32 (1994), Nr. 8, S. 1598–1605
- [99] MERZIGER, G. ; MÜHLBACH, G. ; WILLE, D. ; WIRTH, T.: *Formeln + Hilfen zur höheren Mathematik*. Binomi-Verlag, 1999
- [100] MEYER, L. ; REHME, K.: Periodic Vortices in Flow through Channels with Longitudinal Slots or Fins. In: *Proc. of Tenth Symposium on Turbulent Shear Flows*. The Pennsylvania State University, 1995. – paper 7310
- [101] MILLHOLLEN, M. K. ; SUTEY, A. M.: PNL-17.EBR-II Instrumented Subassembly Test Interim Report. 1970 (BNWL-1424). – Forschungsbericht
- [102] MONTI, L. ; STARFLINGER, J. ; SCHULENBERG, T.: Coupled Neutronic / Thermal-Hydraulic Analysis of the HPLWR Three Pass Core. In: *Proc. of 16th PBNC*. Aomori, Japan, October 2008. – paper P16P1149
- [103] MUR, J. ; LARRAURI, D. ; LEDUC, C.: Simulation of Single-Phase Rod Bundle Flow - Comparison between CFD-Code Estet, PWR core Code THYC and Experimental Results. In: *Proc. of ICONE 6*, 1998. – paper 6347, S. 1–11
- [104] NINOKATA, H. ; EFTHIMIADIS, A. ; TODREAS, N. E.: Distributed Resistance Modeling of Wire-Wrapped Rod Bundles. In: *Nuclear Engineering and Design* 104 (1987), S. 93–102

- [105] NISHIMURA, M. ; KAMIDE, H. ; HAYASHI, K. ; MOMOI, K.: Transient Experiments on Fast Reactor Core Thermal-Hydraulics and its Numerical Analysis Inter-Subassembly Heat Transfer and Inter-Wrapper Flow under Natural Circulation Conditions. In: *Nuclear Engineering and Design* 200 (2000), S. 157–175
- [106] NOVENDSTERN, E. H.: Turbulent Flow Pressure Drop Model for Fuel Rod Assemblies Utilizing a Helical Wire-Wrap Spacer System. In: *Nuclear Engineering and Design* 22 (1972), S. 19–27
- [107] OERTEL JR., H. ; LAURIEN, E.: *Numerische Strömungsmechanik*. Vieweg Verlag, Braunschweig, 2003
- [108] OHTAKE, T. ; URUWASHI, S. ; TAKAHASHI, K.: Velocity Measurements in the Subchannel of the Wire-Spaced Subassembly. In: *Nuclear Technology* 30 (1976)
- [109] OKA, Y. ; ISHIWATARI, Y. ; KOSHIZUKA, S.: Research and Development of Super LWR and Super Fast Reactor. In: *Proc. of 3rd Int. Symposium on SCWR - Design and Technology*. Shanghai, China,
- [110] PATANKAR, S.V. ; SPALDING, D.B.: A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows. In: *Int. J. Heat Mass Transfer* 15 (1972), S. 1787–1806
- [111] PATCH, L. ; ROIDT, R. M.: Experimental Studies of Flow Distribution in a Wire Wrapped LMFBR Blanket Assembly. Fluid Flow and Heat Transfer Over Rod or Tube Bundles (ASME) (1979), S. 55–65
- [112] POINTER, W. D. ; FISCHER, P. ; SIEGEL, A. ; SMITH, J.: RANS-based CFD Simulations of Wire-Wrapped Fast Reactor Fuel Assemblies. In: *Proc. of ICAPP'08*. Anaheim, California, USA, June 2008
- [113] RAPLEY, C.W. ; GOSMAN, A.D.: The Prediction of Fully Developed Axial Turbulent Flow in Rod Bundles. In: *Nuclear Engineering and Design* 97 (1986), May, S. 313–325
- [114] RAZA, W. ; KIM, K.-Y.: Shape Optimization of Wire-Wrapped Fuel Assembly using Kriging Metamodeling Technique. In: *Nuclear Engineering and Design* 238 (2007), S. 1332–1341
- [115] RAZA, W. ; KIM, K.-Y. ; LEE, K.-S.: Optimization of Wire-Wrapped Fuel Assembly of LMR Based on Three-Dimensional Analysis of Heat Transfer. In: *Proc. of ICONE 15*, 2007
- [116] REHME, K.: Pressure Drop Correlations For Fuel Element Spacers. In: *Nuclear Technology* 17 (1973)

- [117] REHME, K.: Simple method of Predicting Friction Factors of Turbulent Flow in Non-Circular Channels. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 16 (1973), S. 933–950
- [118] RENKSIZBULUT, M. ; HADALLER, G. I.: An Experimental Study of Turbulent Flow through a Square-Array Rod Bundle. In: *Nuclear Engineering and Design* 91 (1986), S. 41–55
- [119] RO, T. S. ; TODREAS, N. E.: Porous Body Analysis of Vertical Rod Bundles under Mixed Convection Conditions. 1983 (Ph. D. Thesis). – Forschungsbericht
- [120] ROCK, R. C. ; LIGHTSTONE, M. F.: A Numerical Investigation of Turbulent Interchange Mixing of Axial Coolant Flow in Rod Bundles Geometries. In: *Numerical Heat Transfer, Part A* 40 (2001), May, S. 221–237
- [121] ROGERS, J. T. ; TAHIR, A. E.: Turbulent Interchange Mixing in Rod Bundles and the Role of Secondary Flows. 1975 (ASME 75-HT-31). – Forschungsbericht
- [122] ROGERS, J. T. ; TARASUK, W. R.: Coolant Mixing in Reactor Fuel Bundles. Part II. Forced Mixing by Flow Sweeping. 1968 (R68-CAP32). – Forschungsbericht
- [123] ROIDT, R.M. ; CARELLI, M.D. ; MARKLEY, R.A.: Experimental Investigations of the Hydraulic Field in Wire-Wrapped LMFBR Core Assemblies. In: *Nuclear Engineering and Design* 62 (1980), S. 295–321
- [124] ROWE, D. S.: COBRA-IIIC: A Digital Computer Program for Steady-State and Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements. 1973 (BNWL-1695). – Forschungsbericht
- [125] ROWE, D. S. ; JOHNSON, B. M. ; KNUDSEN, J. G.: Implications Concerning Rod Bundle Crossflow Mixing Based on Measurements of Turbulent Flow Structure. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 17 (1974), Nr. 3, S. 407–419
- [126] SAKO, K.: Experimental Study about the Thermal Characteristics of the JOYO Core Fuel Subassembly. 1972 (JAERI-memo-4678). – Forschungsbericht
- [127] SARNO, A. ; ET AL.: Local Pressure and Velocity Measurements in a Water 19-Rod Using a Wire-Wrap Spacer System. In: *Proc. of IAEA Specialists' Meeting*. Karlsruhe, Germany, 1979
- [128] SCHLAGENHAUFER, M. ; VOGT, B. ; SCHULENBERG, T.: Reactivity Control Mechanisms for a HPLWR Fuel Assembly. In: *Proc. of GLOBAL 2007*. Boise, USA, September 2007

- [129] SCHLICHTING, H. ; GERSTEN, K.: *Grenzschicht-Theorie*. Springer Verlag, Berlin, 1997
- [130] SCHNEIDER, T.: Design Proposal for the HPLWR Three Pass Core - Fuel Assembly and Core Components. 2007 (FZKA). – Forschungsbericht
- [131] SCHULENBERG, T. ; HEINECKE, J. ; ANIEL, S. ; HIMMEL, S. ; KÖHLY, C. ; KUNIK, C. ; MONTI, L. ; GOMEZ, T. O. ; REDON, T. ; SCHLAGENHAUFER, M. ; SCHNEIDER, T. ; MARACZY, Cs. ; BERNNAT, W. ; CONTI, A. ; KEINERT, J. ; MATTES, M.: Thermal Core Design for the HPLWR Year 1. 2007 (Deliverable D2-01-Y1/ HPLWR - S/T - WP2 - 04). – Forschungsbericht
- [132] SCHULENBERG, T. ; STARFLINGER, J. ; HEINECKE, J.: Three Pass Core Design Proposal for a High Performance Light Water Reactor. In: *Proc. 2nd COE-INES-2*. Yokohama, Japan, 2006
- [133] SHIMIZU, T. ; NINOKATA, H. ; SHISHIDO, H.: Distributed Parameter Analysis for the Prediction of the Fine Structure of Flow and Temperature Fields in Wire-Wrapped Fuel Pin Bundle Geometries. In: *Nuclear Engineering and Design* 120 (1990), S. 369–383
- [134] SLAGTER, W.: Finite Element, Stream Function-Vorticity Solution of Secondary Flow in the Channels of a Rod Bundle. In: *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 8 (1988), S. 687–704
- [135] SMITH, J. G. ; BABIN, B. R. ; POINTER, W. D. ; FISCHER, P. F.: Effects of Mesh Density and Flow Conditioning in Simulating 7-Pin Wire-Wrapped Fuel Pins. In: *Proc. of ICONE 16*. Orlando, Florida, USA, May 2008
- [136] SMITH, L. D. ; LIU, B. ; DZODZO, M. B. ; BEASLEY, D. E. ; LANGFORD, H. M. ; CONNER, M. E. ; PARAMONOV, D. V. ; HOLLOWAY, M. V.: Benchmarking Computational Fluid Dynamics for Application to PWR Fuel. In: *Proc. of ICONE 10*. Arlington, USA, April 2002, S. 823–830
- [137] SOFU, T. ; WEBER, D. P. ; CHUN, T. H. ; JOO, H. G. ; THOMAS, J. W. ; ZHONG, Z. ; DOWN, T. J.: Development of a Comprehensive Modeling Capability Based on Rigorous Treatment of Multi-Physics Phenomena Influencing Reactor Core Design. In: *Proc. of ICAPP'04*. Pittsburgh, USA, June 2002. – paper 4218, S. 1353–1363
- [138] SONG, K.-N. ; YOON, K. H. ; KIM, D. H.: Shape Optimization of Spacer Grid Springs to Support Nuclear Fuel Rods. In: *Proc. of ICONE 11*. Tokyo, Japan, 2003. – paper 36500
- [139] SPECHT, B.: Modellierung von beheizten, laminaren und turbulenten Strömungen in Kanälen beliebigen Querschnitts. 2000. – Dissertation, Braunschweig, Deutschland

- [140] STARFLINGER, J. ; ET AL.: European Research Activities within the Project: High Performance Light Water Reactor Phase 2. In: *Proc. of ICAPP'07*. Nice, France, May 2007. – paper 7146
- [141] SUH, K. Y. ; TODREAS, N. E.: An Experimental Correlation of Cross-Flow Pressure Drop for Triangular Array Wire-Wrapped Rod Assemblies. In: *Nuclear Technology* 76 (1987), S. 229–240
- [142] SUH, Y. K. ; LIGHTSTONE, M. F.: Numerical Simulation of Turbulent Flow and Mixing in a Rod Bundle Geometry. In: *Nuclear Energy* 43 (2004), Nr. 3, S. 153–163
- [143] TODREAS, N. E. ; TURI, J. A.: Interchannel Mixing in Wire-Wrapped Liquid Metal Fast Reactor Fuel Assemblies. In: *Nuclear Technology* 13 (1972), S. 36–52
- [144] TZANOS, C. P.: Computational Fluid Dynamics for the Analysis of Light Water Reactor Flows. In: *Nuclear Technology* 147 (2004), August, S. 181–190
- [145] US DOE NUCLEAR ENERGY RESEARCH ADVISORY COMMITTEE AND THE GENERATION IV INTERNATIONAL FORUM. *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*. <http://gif.inel.gov/roadmap>. December 2002
- [146] VOGT, B.: Analyse eines Druckwasserreaktors mit überkritischem Wasser als Kühlmittel. 2008 (FZKA 7428). – Forschungsbericht
- [147] VOGT, B. ; LAURIEN, E. ; CLASS, A. G. ; SCHULENBERG, T.: Mixing Coefficients for Subchannel Analyses with Supercritical Water. In: *Proc. of Global 2007*, 2007
- [148] VONKA, V.: Measurement of Secondary Vortices in a Rod Bundle. In: *Nuclear Engineering and Design* 106 (1988), S. 191–207
- [149] WAATA, C. ; SCHULENBERG, T. ; CHENG, X. ; STARFLINGER, J.: Results of a Coupled Neutronics and Thermal-hydraulics Analysis of a HPLWR Fuel Assembly. In: *Proc. of ICAPP'05*. Seoul, Korea, 2005. – paper 5064
- [150] WAGNER, W. ; KRUSE, A.: *The Industrial Standard IAWPS-IF97 for the Thermodynamic Properties and Supplementary Equations for other Properties: Properties of Water and Steam*. Springer Verlag, Heidelberg, 1997
- [151] WANK, A. ; SCHULENBERG, T. ; CLASS, A. G.: Coolant Mixing in the Plenum of the HPLWR Three Pass Core. In: *Proc. of ICAPP'08*. Anaheim, USA, June 2008

- [152] WEI, J. P.: Thermal-Hydraulic Evaluation of Advanced Wire-wrap Assemblies. In: *Proc. of Solar and Nuclear Heat Transfer, AIChE Symposium Serie.* General Electric Company, Fast Breeder Reactor Department, July 1975
- [153] WHEELER, C. L. ; STEWART, C. W.: COBRA-IV-I: An Interim Version of COBRA for Thermal-Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements and Cores. 1976 (BNWL-1962). – Forschungsbericht
- [154] WHEELER, C.L. ; ROWE, D.S. ; SMITH, J.D.: An Experimental Study of Axial and Cross Flow Velocity in a 7-Pin Wire Wrapped Bundle. 1974 (BNWL-1804). – Forschungsbericht
- [155] WU, X.: Structures in Closely Spaced Rod Bundle Subchannels. In: *Numerical Heat Transfer, Part A* 25 (1994), S. 649–670
- [156] YANG, J. ; OKA, Y.: Numerical Investigation of Heat Transfer in Upward Flows of Supercritical Water in Circular Tubes and Tight Fuel Rod Bundles. In: *Nuclear Engineering and Design* 237 (2007), S. 420–430
- [157] YANG, J. ; OKA, Y. ; YISHIWATARI, Y. ; LIU, J. ; YOO, J.: Numerical Study of Heat Transfer in Supercritical Pressure Water in Tight Fuel Rod Channels. In: *Proc. of ICAPP'06.* Reno, NV, USA, June 2006. – paper 6334, S. 405–414
- [158] ZHUKOV, A. V. ; KAZACHKOVSKII, O. D. ; MATYUKHIN, N. M. ; RYMKEVICH, K. S. ; SOROKIN, A. P.: Accelerating Heat and Mass Transfer in Fast-Reactor Fuel-Pin Assemblies with Oppositely Wound Wire Windings. In: *Plenum Publishing Corporation, übersetzt aus Atomnaya Énergiya* 58 (1985), Nr. 5, S. 325–331

Nomenklaturverzeichnis

Lateinische SI-Symbole	SI-Einheit	Beschreibung
a	$[m^2/s]$	Thermische Diffusivität
a_{ij}	$[Ns/m]$	Gemittelte Kraft pro Axialgeschwindigkeit
a_t	$[m^2/s]$	Turbulente thermische Diffusivität
b	$[m]$	Wandstärke
c_p	$[kJ/kgK]$	Spezifische Wärmekapazität
d	$[m]$	Drahtdurchmesser
$d_{h,0}$	$[m]$	Hydraulischer Durchmesser im Unterkanal ohne Draht
$d_{h,B}$	$[m]$	Hydraulischer Durchmesser des Bündels
$d_{h,c}$	$[m]$	Hydraulischer Durchmesser im Unterkanal mit Draht
$d_{h,i}$	$[m]$	Hydraulischer Durchmesser des Unterkanals i
$d_{h,k}$	$[m]$	Hydraulischer Durchmesser des Unterkanaltyps k
$d_{h,tot}$	$[m]$	Hydraulischer Durchmesser der repräsentativen Unterkanäle
\vec{e}	$[-]$	Einheitsvektor
\vec{e}_A	$[-]$	Einheitsvektor in axialer Richtung
\vec{e}_L	$[-]$	Einheitsvektor in lateraler Richtung
\vec{e}_N	$[-]$	Einheitsvektor in normaler Richtung
\vec{e}_T	$[-]$	Einheitsvektor in tangentialer Richtung
f_B	$[-]$	Reibungsdruckverlustkoeffizient des Bündels
$f_{Blasius}$	$[-]$	Reibungsdruckverlustkoeffizient nach Blasius
f_i	$[-]$	Reibungsdruckverlustkoeffizient des Unterkanals i
f_k	$[-]$	Reibungsdruckverlustkoeffizient des Unterkanaltyps k
f_{GS}	$[-]$	Reibungsdruckverlustkoeffizient nach Gunter und Shaw
f_{Rehme}	$[-]$	Reibungsdruckverlustkoeffizient nach Rehme
g	$[m/s^2]$	Erdbeschleunigung
h	$[kJ/kg]$	Enthalpie

Nomenklaturverzeichnis

k	$[m^2/s^2]$	Turbulente kinetische Energie
k_i	$[W/m^2K]$	Wärmedurchgangskoeffizient von Unterkanal i
l	$[m]$	Länge
m	$[-]$	Exponent
m_i	$[kg/m^2s]$	Massenstromdichte von Unterkanal i
n	$[m]$	Abstand vom engsten Spaltquerschnitt
n_0	$[m]$	Abstand des Spaltes in lokalen n -Koordinaten zur senkrechten Achse
n_{Chiu}	$[-]$	Konstante
\vec{n}_O	$[-]$	Oberflächennormalenvektor
$\vec{n}_{Wand\perp}$	$[-]$	Normal von der Wandoberfläche weggerichteter Einheitsvektor
p	$[Pa]$	Druck
p_{System}	$[Pa]$	Systemdruck
p_{Wand}	$[Pa]$	Druck in einer Volumenzelle mit Wandkontakt
q	$[W/m^2]$	Wärmestromdichte
s	$[m]$	Spaltweite
t	$[s]$	Zeit
u, v, w	$[m/s]$	Geschwindigkeitskomponenten
v''	$[m/s]$	Turbulente Schwankungsgeschwindigkeit
\vec{v}	$[m/s]$	Geschwindigkeitsvektor
$v_{ax,0}$	$[m/s]$	Axialgeschwindigkeit im Unterkanal ohne Draht
$v_{ax,B}$	$[m/s]$	Mittlere Axialgeschwindigkeit im Bündel
$v_{ax,c}$	$[m/s]$	Axialgeschwindigkeit im Unterkanal ohne Draht
$v_{ax,i}$	$[m/s]$	Axialgeschwindigkeit im Unterkanal i
$v_{ax,k}$	$[m/s]$	Axialgeschwindigkeit im Unterkanaltyp k
$\overline{v_{eff}}$	$[m/s]$	Mittlere Effektivgeschwindigkeit im Bündel
$v_{i,AH}$	$[m/s]$	Axialgeschwindigkeit im Abstandshalter
v_n	$[m/s]$	Quergeschwindigkeit
v_N	$[m/s]$	Geschwindigkeit
$\overline{v_{quer}}$	$[m/s]$	Mittlere Quergeschwindigkeit
v'_{quer}	$[m/s]$	Turbulente Quergeschwindigkeit
$v_{quer,max}$	$[m/s]$	Maximale Quergeschwindigkeit
$v_{quer,Zentral}$	$[m/s]$	Quergeschwindigkeit zwischen zwei Zentralkanälen
$v_{quer,x}$	$[m/s]$	Quergeschwindigkeit in x-Richtung
$v_{quer,y}$	$[m/s]$	Quergeschwindigkeit in y-Richtung
v_{res}	$[m/s]$	Resultierende Geschwindigkeit
v_s	$[m/s]$	Durch Druckseite des Drahtes induzierte Quergeschwindigkeit
v_{Spalt}	$[m/s]$	Quergeschwindigkeit im engsten Spaltquerschnitt
$\vec{v}_{Wand }$	$[m/s]$	Geschwindigkeitsvektor parallel zur Wand im Zellmittelpunkt einer Fluidzelle mit Wandkontakt
w	$[-]$	Wichtungsfaktor

Nomenklaturverzeichnis

w_{ij}	$[kg/ms]$	Austauschmassenstrom pro axialer Länge
x, y, z	$[-]$	Koordinatenrichtungen
y^+	$[-]$	Dimensionsloser Wandabstand
y_{ij}	$[m]$	Abstand zwischen den Mittelpunkten zweier Unterkanäle
<hr/>		
A	$[m^2]$	Querschnittsfläche
$A_0 - A_3$	$[-]$	Konstanten von C_μ
$A_{ax,0}$	$[m^2]$	Querschnittsfläche im Unterkanal ohne Draht
$A_{ax,B}$	$[m^2]$	Querschnittsfläche des gesamten Bündels
$A_{ax,c}$	$[m^2]$	Querschnittsfläche im Unterkanal mit Draht
$A_{ax,i}$	$[m^2]$	Querschnittsfläche von Unterkanal i
$A_{ax,k}$	$[m^2]$	Querschnittsfläche von Unterkanaltyp k
$A_{ax,tot}$	$[m^2]$	Querschnittsfläche der repräsentativen Unterkanäle
A_{Draht}	$[m^2]$	Durch Draht versperrte Querschnittsfläche
$A_{Draht,ell.}$	$[m^2]$	Elliptische Drahtquerschnittsfläche bei horizontalem Schnitt
$A_{Draht\perp}$	$[m^2]$	Drahtquerschnittsfläche bei vertikalem Schnitt
A_{ff}	$[m^2]$	Austauschfläche für Fluid zwischen zwei Kontrollvolumen
An	$[m]$	Ankathete
A_{neu}	$[m^2]$	Äquivalente Querschnittsfläche
A_{Spalt}	$[m^2]$	Querschnittsfläche des Spaltes
$B_1 - B_5$	$[-]$	Konstanten
C	$[-]$	Transferrate
C_{Chiu}	$[-]$	Konstante
$C_{f,k}$	$[-]$	Konstante für Unterkanaltyp k
$C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}$	$[-]$	Konstanten aus ϵ -Gleichung
C_μ	$[-]$	Konstante oder Variable der turbulenten Viskosität
$C_1 - C_5$	$[-]$	Funktionen des kubisch-nichtlinearen Turbulenzmodells
C_{NL1}	$[-]$	Konstanten des Turbulenzmodells
C_{NL7}	$[-]$	Konstante
$C_{Ninokata}$	$[-]$	Konstante
D	$[m]$	Stabdurchmesser
\vec{F}	$[N]$	Kraftvektor
F_{Draht}	$[N]$	Vom Draht ausgeübte Kraft
F_{Draht}^N	$[N]$	Normalkomponente der vom Draht ausgeübten Kraft

Nomenklaturverzeichnis

F_{Draht}^T	[N]	Tangentialkomponente der vom Draht ausgeübten Kraft
\vec{F}_{Druck}	[N]	Vektor der Druckkräfte
F_{Feder}	[N]	Federkraft
F_{in}	[N]	Aufgeprägte Kraft
\vec{F}_{Reib}	[N]	Vektor der Reibungskräfte
F_{Rehme}	[–]	Geometriefaktor
F_{Stab}	[N]	Vom Stab ausgeübte Kraft
F_{Stab}^A	[N]	Axialkomponente der vom Stab ausgeübten Kraft
F_{Stab}^L	[N]	Lateralkomponente der vom Stab ausgeübten Kraft
$\vec{F}_{Struktur}$	[N]	Vektor der von der Struktur ausgeübten Kraft
F_{Wand}	[N]	Von der Geometrie auf das Fluid ausgeübte Kraft
G	[m]	Abstand zwischen dem Mittelpunkt eines Stabes und einem gegenüberliegenden, engsten Spaltquerschnitt
Geg	[m]	Gegenkathete
H	[m]	Ganghöhe
H_{ref}	[m]	Referenzganghöhe
Hyp	[m]	Hypotenuse
K_1, K_2	[–]	Konstanten
L	[m]	Beheizte Länge
L_{Pr}	[m]	Prandtl'scher Mischungsweg
M_{ax}	[kg/s]	Massenstrom in den Zentralkanälen des Experiments
M_i	[kg/s]	Massenstrom von Unterkanal i
$M_{i,quer}$	[kg/s]	Gerichteter Quermassenstrom von Unterkanal i
$M_{i,quer,ref}$	[kg/s]	Referenzwert für gerichteten Quermassenstrom von Unterkanal i
$M_{i,quer,max}$	[kg/s]	Maximal realisierbarer Quermassenstrom von Unterkanal i
$M_{ij,quer,turb}$	[kg/s]	Turbulenter Quermassenstrom von Unterkanal i nach Unterkanal j
M_{BE}	[kg/s]	Massenstrom eines Brennelements
$M_{\frac{1}{4}BE}$	[kg/s]	Massenstrom eines Viertel-Brennelements
$M_{\frac{1}{4}Mod}$	[kg/s]	Massenstrom eines Viertel-Moderatorkastens
$M_{\frac{1}{4}Spalt}$	[kg/s]	Massenstrom eines Viertel-Spalts
M_{tot}	[kg/s]	Massenstrom in den repräsentativen Unterkanälen
N_{Draht}	[–]	Drahtwendelmultiplikator
N_k	[–]	Anzahl der Unterkanäle vom Typ k
O	[m ²]	Oberfläche
O_{Draht}	[m ²]	Drahtoberfläche

Nomenklaturverzeichnis

O_{fs}	$[m^2]$	Kontaktfläche zwischen Fluid und Brennstab inklusive Drahtwendel
$O_{i,ab}$	$[m^2]$	Oberfläche zur Wärmeabfuhr von Unterkanal i
O_{Stab}	$[m^2]$	Staboberfläche
O_{Wand}	$[m^2]$	Oberfläche einer Fluidzelle in Kontakt mit einer Wand
P	$[m]$	Stabteilung
P_{el}	$[W]$	Elektrische Leistung
Pr_t	$[-]$	Turbulente Prandtlzahl
Q	$[W/m^3]$	Wärmequellterm
Q_{diff}	$[W]$	Diffusiver Wärmestrom
Q_{konv}	$[W]$	Konvektiver Wärmestrom
$Q_{i,ab}$	$[W]$	Abgeführter Wärmestrom
$Q_{i,aus}$	$[W]$	Ausgehender Wärmestrom
$Q_{i,ein}$	$[W]$	Eingehender Wärmestrom
$Q_{i,quer}$	$[W]$	Gerichteter Austauschwärmestrom
$Q_{i,quer,turb}$	$[W]$	Turbulenter Austauschwärmestrom
$Q_{i,zu}$	$[W]$	Zugeführter Wärmestrom
$Q_{i,\frac{1}{4}Stab}$	$[W]$	Pro Viertel-Brennstabmantelfläche zugeführter Wärmestrom
Q_{Stab}	$[W/m]$	Lineare Stableistung
$R(v_{res})$	$[N]$	Widerstandsfunktion nach Rehme
Res	$[-]$	Residuum
S_{ij}	$[1/s]$	Tensor der mittleren Scherung
S_k	$[-]$	Anteil der Querschnittsfläche von Unterkanaltyp k an der gesamten Querschnittsfläche
T_i	$[K]$	Temperatur in Unterkanal i
$T_{i,aus}$	$[K]$	Austrittstemperatur von Unterkanal i
$T_{i,ein}$	$[K]$	Eintrittstemperatur von Unterkanal i
$T_{i,Start}$	$[K]$	Starttemperatur von Unterkanal i
T_∞	$[K]$	Konstante Moderator- bzw. Spaltwassertemperatur
$U_{be,B}$	$[m]$	Benetzter Umfang des gesamten Bündels
$U_{be,i}$	$[m]$	Benetzter Umfang des Unterkanals i
$U_{be,Stab\&Draht}$	$[m]$	Benetzter Umfang der Stäbe und Drähte
V	$[m^3]$	Volumen
X_i	$[-]$	Massenstromverteilungsfaktor für Unterkanal i
X_k	$[-]$	Massenstromverteilungsfaktor für Unterkanaltyp k

Nomenklaturverzeichnis

Griechische Symbole	SI-Einheit	Beschreibung
α	[°]	Winkel
α_i	[W/m ² K]	Wärmeübergangskoeffizient auf Kühlmittel-seite
α_{Mod}	[W/m ² K]	Wärmeübergangskoeffizient auf Moderator-wasserseite
α_{Spalt}	[W/m ² K]	Wärmeübergangskoeffizient auf Spaltwasser-seite
β_{th}	[1/K]	Thermischer Ausdehnungskoeffizient
β_{turb}	[–]	Turbulenter Austauschkoefizient
β_{Draht}	[–]	Austauschkoefizient auf Basis des drahtwen-delinduzierten Queraustauschs
γ	[°]	Phasenwinkel
δ	[–]	Effektivität der Drahtwendeln
δ_{ij}	[–]	Kronecker-Delta
ϵ	[m ² /s ³]	Dissipation der Turbulenz
ϵ^*	[–]	Dimensionslose Wirbelviskosität
ϵ_h	[m ² /s]	kinematische Wirbelviskosität
ϵ_M	[m ² /s]	kinematische Wirbelviskosität
ϵ_M^*	[–]	Dimensionslose Wirbelviskosität
ζ_{ax}	[–]	Axialer Formdruckverlustkoeffizient
ζ_{lat}	[–]	Lateraler Formdruckverlustkoeffizient
η	[–]	Wirkungsgrad
η_{lat}	[m]	Lateraler Mischungsweg
κ	[–]	Formfaktor
λ	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit
λ_t	[W/mK]	Turbulente Wärmeleitfähigkeit
$\lambda_{Struktur}$	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit der Struktur
μ	[kg/ms]	Dynamische Viskosität
μ_t	[kg/ms]	Turbulente Viskosität
ν	[m ² /s]	Kinematische Viskosität
ξ	[–]	Faktor zur Strömungsumlenkung
π	[–]	Kreiszahl
ρ	[kg/m ³]	Dichte
$\rho_{Struktur}$	[kg/m ³]	Dichte der Struktur
σ	[N/m ²]	Spannungstensor
σ_k	[–]	Konstante aus <i>k</i> -Gleichung
σ_ϵ	[–]	Konstante aus ϵ -Gleichung
σ_t	[N/m ²]	Reynolds-Spannungstensor
τ_{Wand}	[N/m ²]	Tensor der Wandschubspannungen
φ	[°]	Strömungswinkel

Nomenklaturverzeichnis

ω	[1/s]	Frequenz
$\Delta p_{ax/H_{ref}}$	[Pa]	Mit der Referenzganghöhe normierter Druckverlust
Δp_B	[Pa]	Axialer Druckverlust im Bündel
Δp_i	[Pa]	Axialer Druckverlust im Unterkanal i
Δp_k	[Pa]	Axialer Druckverlust im Unterkanaltyp k
$\Delta p_{lateral}$	[Pa]	Lateraler Druckgradient
Δt	[s]	Zeitspanne
ΔT	[K]	Temperaturdifferenz
$\Delta T_B _0^L$	[K]	Axiale Temperaturdifferenz über das Bündel
Δz_{ax}	[m]	Axiale Höhe eines Kontrollvolumens
Θ	[°]	Anstellwinkel
Ξ_{AH}	[-]	Versperrungsverhältnis eines Abstandshalters
Υ_{ax}	[-]	Faktor zur Justierung der Wichtungsfunktion in axialer Richtung
Υ_{lat}	[-]	Faktor zur Justierung der Wichtungsfunktion in lateraler Richtung
Φ	[-]	Charakteristische Größe für Queraustausch
Ψ	[-]	Beliebige Strömungsgröße
$\overline{\Psi}$	[-]	Zeitlicher Mittelwert einer beliebigen Strömungsgröße
Ψ'	[-]	Zeitlicher Schwankungswert einer beliebigen Strömungsgröße
$\hat{\Psi}$	[-]	Räumlicher Mittelwert einer beliebigen Strömungsgröße
$\check{\Psi}$	[-]	Räumlicher Schwankungswert einer beliebigen Strömungsgröße
$\hat{\Psi}$	[-]	Räumlicher Mittelwert einer beliebigen Größe
$\check{\Psi}$	[-]	Räumlicher Schwankungswert einer beliebigen Größe
Ω_{ij}	[1/s]	Tensor der mittleren Wirbelstärke
∇	[-]	Nabla-Operator

Abkürzungsverzeichnis

Al_2O_3	Aluminiumoxid
$^{235}\text{UO}_2$	Urandoxid
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
CD	Central Differencing
CFD	Computational Fluid Dynamics
COBRA	Coolant Boiling in Rod Arrays
CRBRP	Clinch River Breeder Reactor Plant
DOE	Department of Energy
DWR	Druckwasserreaktor
EBR	Experimental Breeder Reactor
EPR	European Pressurized-Water Reactor
FDM	Finite Differenzen Methode
FEM	Finite Elemente Methode
FVM	Finite Volumen Methode
G	Generator
GIF	Generation IV. International Forum
HD	Hockdruckturbine
HKP	Hauptkühlmittelpumpe
HSP	Hauptspeisewasserpumpe
HPLWR	High Performance Light Water Reactor
K	Kondensator
LDA	Laser Doppler Anemometrie
LES	Large Eddy Simulation
LOCA	Loss of Coolant Accident
MARS	Monotone Advection and Reconstruction Scheme
MCNP	Monte Carlo N-Particle
MD	Mitteldruckturbine
ND	Niederdruckturbine
PFBR	Prototype Fast Breeder Reactor
QUICK	Quadratic Upstream Interpolation of Convective Kinematics
RDB	Reaktordruckbehälter

Abkürzungsverzeichnis

Resa	Reaktorschnellabschaltung
RANS	Reynolds-Averaged Navier Stokes
SIMPLE	Semi-Implicite Method for Pressure Linked Equations
SST	Shear Stress Transport
SWK	Speisewasserkessel
SWR	Siedewasserreaktor
UD	Upwind Differencing
URANS	Unsteady Reynolds-Averaged Navier Stokes
WARD	Westinghouse Advanced Reactors Division
ZÜ	Zwischenüberhitzer

Anhang A

Evaluation von Turbulenzmodellen für Stabbündelströmungen

Die nachfolgende Tabelle umfasst die im Rahmen einer Literaturstudie evaluierten Veröffentlichungen zur Identifikation vielversprechender Turbulenzmodelle für Stabbündelströmungen sowohl mit als auch ohne Abstandshalter. Da sich bisher noch kein Turbulenzmodell als am geeignetsten etabliert hat, soll diese Tabelle einen Teil der auf diesem speziellen Anwendungsgebiet durchgeführten Arbeiten auflisten und auf Trends hinweisen. Eine ausführliche Diskussion würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen und wird deshalb unterlassen. Die bei der Verwendung von Drahtwendelabstandshaltern eingesetzten Turbulenzmodelle sind Gegenstand der Recherche von Kapitel 3.1.1.

Autor:	Jahr:	Verglichene Turbulenzmodelle:	Empfehlung bzgl. Turbulenzmodell:	P/D	Code	Beheizt?	Spacer?
Assato	2001	NLEVM nach Speziale (1987), aber anderes C_{1NL} : - High-Re $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974) + SWF - Low-Re $k-\epsilon$ nach Abe & Nagano & Kondoh (1992)	Low-Re $k-\epsilon$ nach Abe & Nagano & Kondoh (1992) mit neuem Koeffizienten	Quadratischer Kanal (Re=42.000)	Keine Angabe	Nein	Nein
Aszodi	2002	Standard $k-\omega$ nach Wilcox (1998)	Kein Vergleich	hex 1,3	CFX 5.5	Ja (840 kW/m ²)	Ja
Aszodi	2003	Standard $k-\omega$ nach Wilcox (1998)	Kein Vergleich	hex 1,3	CFX 5.5	Ja (840 kW/m ²)	Ja

Anhang

Baglietto	2003	<ul style="list-style-type: none"> - Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974) (High-Re + SWF & Low-Re $y^+=1-2$) - Quad. NLEVM $k-\epsilon$ nach Craft, Launder & Suga (1996) (High-Re + SWF & Low-Re $y^+=1-2$) - Kub. NLEVM $k-\epsilon$ nach Craft, Launder & Suga (1996) (High-Re + Low-Re $y^+=1-2$) - Low-Re $k-\omega$ nach Wilcox (1998) ($y^+=1$) - Low-Re SST $k-\omega$ nach Menter (1993) ($y^+=1$) 	<ul style="list-style-type: none"> - kein Unterschied zwischen quad. und kub. NLEVM - Low-Re NLEVM zu aufwändig - High-Re NLEVM + SWF - Ausblick: v^2-f-Modell 	Reihe 1,147 (Natrium: $Re=60.100 + Re=61.300$)	STAR-CD 3.1	Ja (50 W/cm ²)	Nein
Baglietto	2003	<ul style="list-style-type: none"> - Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974) (High-Re + SWF & Low-Re $y^+=1$) - Quad. NLEVM $k-\epsilon$ nach Shih, Zhu & Lumley (1970) (High-Re + SWF & Low-Re $y^+=1$) - Kub. NLEVM $k-\epsilon$ nach Shih, Zhu & Lumley (1970) (High-Re + Low-Re $y^+=1$) - Low-Re $k-\omega$ nach Wilcox (1998) ($y^+=1$) - SST Low-Re $k-\omega$ nach Menter (1993) ($y^+=1$) 	<ul style="list-style-type: none"> - kein Unterschied zwischen quad. und kub. NLEVM - Low-Re NLEVM zu aufwändig - High-Re NLEVM + SWF - Ausblick: v^2-f-Modell 	hex 1,17 (Luft: $Re=64.300 + Reihe 1,147$ (Na: $Re=60.100$))	STAR-CD 3.15	Ja (50 W/cm ²)	Nein
Baglietto	2004	<ul style="list-style-type: none"> Zwei-Schichten-Modell: - Quadratic NLEVM $k-\epsilon$ nach Shih, Zhu & Lumley (1970) + Low-Re $k-\epsilon$ nach Lien (1996) basierend auf DNS-Daten von Iwamoto (2002) + Formulierung des Längenmaßstabs nach Norris & Reynolds (1975) ($y^+=1$) 	<ul style="list-style-type: none"> - zu aufwändig für große Geometrien - exakte Wiedergabe der Wand-Schubspannung und der Geschwindigkeit 	hex 1,3 ($Re=100.000 + Re=181.200$)	STAR-CD 3.15	Nein	Nein
Baglietto	2004	<ul style="list-style-type: none"> Kub. Low-Re NLEVM $k-\epsilon$ nach Shih, Zhu & Lumley (1970) ($y^+=1$) 	eigenes Modell	hex 1,17 bzw. 1,026 ($Re=151.660$)	Keine Angabe	Nein	Nein

Anhang

Baglietto	2005	<ul style="list-style-type: none"> - Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974) - Quad. Low-Re NLEVM $k-\epsilon$ nach Shih, Zhu & Lumley (1993) - einige Konstanten von Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974), f_1 & f_2 nach Lien (1996) und f_μ & A_1 nach Iwamoto (2002) ($y^+=1$) 	eigenes Modell	<ul style="list-style-type: none"> hex 1,12 (Re=75.000) + hex 1,17 (Re=181.900) + hex 1,3 (Re: keine Angabe) 	Keine Angabe	Ja (Keine Angabe)	Nein
Baglietto	2005	<ul style="list-style-type: none"> - Low-Re Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974) ($y^+=1$) - Low-Re NLEVM Realizable nach Shih, Zhu & Lumley (1993) ($y^+=1$) - Low-Re Standard $k-\omega$ nach Wilcox (1988) ($y^+=1$) - Low-Re SST $k-\omega$ nach Menter (1993) ($y^+=1$) - Low-Re NLEVM Realizable nach Shih, Zhu & Lumley (1993) ($y^+=1$) mit modifizierten Koeffizienten 	Low-Re NLEVM Realizable nach Shih, Zhu & Lumley (1993) ($y^+=1$) mit modifizierten Koeffizienten	<ul style="list-style-type: none"> hex 1,17 (Re=64.300 + Re=109.400) + hex 1,3 (Re=) + hex 1,2 (Re=23.760) 	Keine Angabe	Nein	Nein
Baglietto	2006	<ul style="list-style-type: none"> - Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974) - SST $k-\omega$ nach Menter (1993) - v^2-f nach Durbin (1995) - Quad. NLEVM Realizable nach Shih, Zhu & Lumley (1993) - Quad. Low-Re NLEVM $k-\epsilon$ nach Shih, Zhu & Lumley (1993), einige Konstanten von Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974), f_1 & f_2 nach Lien (1996), f_μ & A_1 nach Iwamoto (2002) - Quad. High-Re NLEVM $k-\epsilon$ nach Shih, Zhu & Lumley (1993), einige Konstanten von Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974), f_1 & f_2 nach Lien (1996), f_μ & A_1 nach Iwamoto (2002) + SWF 	eigenes Modell: sehr genau in Low-Re und praktikabel in High-Re	<ul style="list-style-type: none"> hex 1,3 (Re=60.000 + Re=175.000) + hex 1,17 (Re=64.300 + Re=109.400 + Re=181.200) + quad. 1,107 (Re=207.600) + hex 1,17 bzw. 1,026 (Re=151.660) + hex 1,12 (Re=66.500) 	STAR-CD 3.2	Ja (1,37 W/m ²)	Nein

Anhang

Baglietto	2006	- Linear Low-Re $k-\epsilon$ nach Lien (1996) - Kub. Low-Re NLEVM $k-\epsilon$ nach Shih, Zhu & Lumley (1993), einige Konstanten von Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974), f_1 & f_2 nach Lien (1996), f_μ & A_1 nach Iwamoto (2002), C_1-C_5 nach Shih, Zhu & Lumley (1993) mit angepassten $C_{NL1} - C_{NL9}$ ($y^+=1$)	eigenes Modell	- hex 1,3 - hex 1,17 ($Re=181.200$)	Keine Angabe	Nein	Nein
Campbell	2005	- High-Re Realizable $k-\epsilon$ nach Shih (1995)	ungeeignet bei niedrigen Re, angeblich bessere Funktionalität bei höheren Re	quad. 1,326 ($Re=4.750-26.800$ bzw. 5.290)	FLUENT 6.0	Ja (Wärmeleistung des Bündels: 252 kW)	Ja
Caraghiaur	2006	- Standard high-Re $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974) - SST nach Menter (1993) - Baseline $k-\omega$ nach Wilcox (1998) - SSG RSM nach Speziale, Sarkar & Gatski (1991)	RSM SSG		CFX 10.0		Ja
Cheng	2005	<u>Wärmeübertragung im Rohr:</u> - Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974) ($y^+=1$ & $y^+=40$) (isotrop) - RNG $k-\epsilon$ nach Yakhot & Orszag (1986) ($y^+=1$ & $y^+=40$) - RSM-SSG nach Speziale, Sarkar & Gatski (1991) ($y^+=1$ & $y^+=40$) (anisotrop) - RSM-LRR nach Launder, Reece & Rodi (1976) ($y^+=1$ & $y^+=40$) - SST $k-\omega$ nach Menter (1993) + automatische Wandbehandlung (isotrop) - RSM SSG $k-\omega$ nach Wilcox (2004) + AWT (anisotrop) <u>Wärmeübertragung in Unterkanälen:</u> - RSM-SSG nach Speziale, Sarkar & Gatski (1991) ($y^+=1$)	<u>Wärmeübertragung im Rohr:</u> - ω -Modelle völlig ungeeignet - alle ϵ -Modelle ähnlich, solange $y^+ < 40$ <u>Wärmeübertragung in Unterkanälen:</u> RSM-SSG ($y^+=1$)	- hex 1,1-1,3 ($Re=50.000-500.000$) - quad 1,1-1,3 ($Re=50.000-500.000$)	CFX 5.6	Ja (600-1400 kW/m ²)	Nein

Anhang

Cheng, Tak	2005	- Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974) ($y^+=1-90$) (isotrop) - RSM-SSG nach Speziale, Sarkar & Gatski (1991) ($y^+=1-90$) (anisotrop) - SST $k-\omega$ nach Menter (1993) + Automatische Wandbehandlung ($y^+=1-90$) (isotrop) - RSM SSG $k-\omega$ nach Wilcox (2004) + AWT ($y^+=1-90$) (anisotrop)	RSM-SSG ($y^+<15$)	- hex 1,1- 2,0 - quad. 1,1- 2,0	CFX 5.6	Ja	Nein
Chun	2000	- High-Re Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974)	kein Vergleich	Rohr	CFX-4	Ja (300 kW/m ²)	Ja
Conner	2002	- RNG $k-\epsilon$ nach Yakhot & Orszag (1992)	kein Vergleich	quad. 1,326	STAR-CD 3.15	Ja	Ja
Cui	2003	High-Re Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974)	kein Vergleich	quad. 1,34 (Re=80.000)	CFX-TASC flow	Nein	Ja
Grötzbach	2004	Kein Vergleich	Algebraische Spannungsmodelle oder RSM				
Hazi	2005	Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974) - RSM aus Fluent	RSM	hex 1,3	FLUENT 6.0	Nein	Nein
Hu	2005	SST $k-\omega$ nach Menter (1993)	kein Vergleich	Keine Angabe	Keine Angabe	Nein	Ja
Ikeda	1998	High-Re Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974)	kein Vergleich	Keine Angabe	STAR-CD	Nein	Ja
Ikeda	2002	High-Re Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974)	kein Vergleich	quad. 1,326 (Re>50.000)	STAR-CD	Ja	Ja
Ikeda	2003	High-Re Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974)	kein Vergleich	Re>20.000	STAR-CD 3.10	Ja	Ja
Ikeda	2006	High-Re Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974) + SWF ($y^+=30-100$)	kein Vergleich	quad. 1,326	STAR-CD 3.15	Ja	Ja
Ikeno	2003	SGS nach Smagorinsky	kein Vergleich	Reihe 1,67 + 1,43 + 1,25 (Re=10.000)	Keine Angabe	Nein	Nein
Ikeno	2005	Dynamisches Ein-Gleichungsmodell SGS nach Kajishima (2003)	kein Vergleich	quad. 1,43	Keine Angabe	Nein	Ja
Ikeno	2005	Dynamisches Ein-Gleichungsmodell SGS nach Kajishima (2003)	kein Vergleich	quad. 1,43	Keine Angabe	Nein	Ja

Anhang

In	2002	<p>Standard k-ε nach Launder & Spalding (1974) + SWF (y⁺=12-90)</p> <p>- Quad. NLEVM k-ε nach Speziale & Ngo (1988) + SWF (y⁺=12-90)</p> <p>- Quad. NLEVM k-ε nach Craft, Launder & Sugar (1996) + SWF (y⁺=12-90)</p> <p>- Kub. NLEVM k-ε nach Craft, Launder & Sugar (1996) + SWF (y⁺=12-90)</p> <p>- RSM LRR nach Launder, Reece & Rodi (1975) + SWF (y⁺=12-90)</p> <p>- RSM LRR nach Launder, Reece & Rodi (1975) mit Wand-Reflektions-Term + SWF (y⁺=12-90)</p>	RSM LRR nach Launder, Reece & Rodi (1975) mit Wand-Reflektions-Term + SWF (y ⁺ =12-90)	quad. 1,107 (Re=46.300 + Re=207.600)	CFX 4.4	Nein	Nein
In	2003	<p>- Standard k-ε nach Launder & Spalding (1974) + SWF</p> <p>- Quad. NLEVM k-ε nach Speziale (1987) + SWF</p> <p>- Quad. NLEVM k-ε nach Myong & Kasagi (1990) + SWF</p> <p>- Quad. NLEVM k-ε nach Shih, Zhu & Lumley (1993) + SWF</p> <p>- Kub. NLEVM nach Craft, Launder & Sugar (1996) + SWF</p> <p>- RSM-LRR nach Launder, Reece & Rodi (1975) + SWF</p>	<p>- RSM-LRR für Stabbündel ohne Abstandshalter (Überschätzung der Sekundärströmung)</p> <p>- Standard & Quad. NLEVM k-ε nach Speziale (1987) für Abstandshalter mit Drallfahne</p>	quad. 1,107 (y ⁺ =20-50) (Re=207.600) + quad. 1,33 (y ⁺ =20-35) (Re=65.000)	CFX 4.4	Nein	Ja
In	2003	<p>- Standard k-ε nach Launder & Spalding (1974) + SWF (y⁺=15-20)</p> <p>- Quad. NLEVM k-ε nach Speziale (1987) + SWF (y⁺=15-20)</p> <p>- Quad. NLEVM k-ε nach Myong & Kasagi (1990) + SWF (y⁺=15-20)</p> <p>- Quad. NLEVM k-ε nach Shih, Zhu & Lumley (1993) + SWF (y⁺=15-20)</p> <p>- Kub. NLEVM k-ε nach Craft, Launder & Sugar (1996) + SWF (y⁺=15-20)</p> <p>- RSM LRR nach Launder, Reece & Rodi (1974) mit Wand-Reflektions-Term (y⁺=15-20)</p>	<p>- Quad. NLEVM k-ε nach Speziale (1987) + SWF (y⁺=15-20)</p> <p>- Quad. NLEVM k-ε nach Myong & Kasagi (1990) + SWF (y⁺=15-20)</p>	hex 1,123 (Re=27.000)	CFX 4.4	Nein	Nein

Anhang

In	2004	- Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974) + SWF - Quad. NLEVM $k-\epsilon$ nach Speziale (1987) + SWF - RSM-SSG $k-\epsilon$ nach Speziale, Sarkar & Gatski (1991) + SWF - RSM-SMC- ω nach Wilcox (1986) + SWF	- große Diskrepanz bei $p/d=1,06$ - beide RSM am ehesten am Experiment	hex 1,06 ($y^+=35-70$) (Re=39.000) + hex 1,12 ($y^+=30-37$) (Re=65.000)	CFX 4.4 + CFX 5.6	Ja	Nein
In	2004	- Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974) + SWF - Quad. NLEVM $k-\epsilon$ nach Speziale (1987) + SWF - RSM SSG $k-\epsilon$ nach Speziale, Sarkar & Gatski (1991) + SWF - RSM LRR $k-\epsilon$ nach Launder, Reece & Rodi (1975) + SWF	RSM-SSG	hex 1,06 ($y^+=35-70$) (Re=39.000) + hex 1,12 ($y^+=30-37$) (Re=65.000)	CFX 4.4	Ja	Nein
In	2004	- Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974) +SWF ($y^+=35-70$ bzw. 30-37) - Quad. NLEVM $k-\epsilon$ nach Speziale (1987) + SWF ($y^+=35-70$ bzw. 30-37) - RSM SSG nach Speziale, Sarkar & Gatski (1991) + SWF ($y^+=35-70$ bzw. 30-37) - Low-Re RSM- ω nach Wilcox & Menter (2004) ($y^+=1-3$ bzw. 0,5-1)	RSM SSG nach Speziale, Sarkar & Gatski (1991) + SWF ($y^+=35-70$ bzw. 30-37)	hex 1,06 (Re=39.000) + hex 1,12 (Re=65.000)	CFX 4.4 + CFX 5.6	Ja	Nein
KAERI	1999	- Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974) - RNG $k-\epsilon$ nach Yakhot & Orszag (1992)	-beide nicht geeignet -Unterschiede vernachlässigbar	- quad. 1,33 (Re=65.000) + quad.1,375 (Re=14.200)	CFDS-FLOW3D + CFX 4.2	Nein	Ja
KAERI	2003	- Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974) - Quad. NLEVM $k-\epsilon$ nach Craft, Launder & Sugar (1996) - Kub. NLEVM $k-\epsilon$ nach Craft, Launder & Sugar (1996) - RSM LRR nach Launder, Reece & Rodi (1975)			CFX 4.4		
Kaiser	1987	eigenes empirisches ASM	kein Vergleich	hex 1,123 (Re=27000) + 1,148 (Re=123000) + 1,071 (Re=59700)	VELASCO	Nein	Nein

Anhang

Karoutas	1995	High-Re Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974) + SWF	kein Vergleich	quad. 1,33	CFDS-FLOW3D	Nein	Ja
Kim	1998	eigenes anistropes Wirbelviskositätsmodell: - <u>Turbulente Vermischung</u> : Low-Re $k-\epsilon$ nach Lam & Bremhorst (1981) ohne Wandfunktion - <u>Sekundärströme</u> : $k-\epsilon$ nach Launder & Ying (1973)	Kein Vergleich	hex 1,123 (Re=27.000) + hex 1,2 (Re=49.000) + quad. 1,25 (Re=100.000) + hex 1,3 (Re=100.000)	Eigener Code	Nein	Nein
Kiss	2006	$k-\omega$ SST nach Menter (1993)	$y^+ < 2$	quad. 1,15	CFX 10.0	Ja	Nein
Kriventsev	2003	- Multi-Skalen-Viskositätsmodell (integrales Null-Gleichungs-Modell) mit turbulenter Reynolds-Zahl als einzig experimentellem Wert für turbulente Viskosität: - Vereinfachtes MSV - Normales MSV	Vereinfachtes MSV	hex 1,17 (Re=8.170 + Re=160.100)	Eigener Code	Nein	Nein
Laurien, Wintterle	2006	- High-Re Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974) + SWF - RSM-LRR $k-\epsilon$ nach Launder, Reece & Rodi (1975) + SWF - RSM-SSG $k-\epsilon$ nach Speziale, Sarkar & Gatski (1991) + SWF - RSM-SSG $k-\omega$ nach Wilcox (2004) + SWF	- RSM-SSG $k-\epsilon$ nach Speziale, Sarkar & Gatski (1991) + SWF oder RSM-SSG $k-\omega$ nach Wilcox (2004) + SWF - modifiziertes RSM-LRR nach Demuren & Rodi (1984)	quad. 1,15	CFX-5.7	Ja	Nein
Lee	1997	Zwei-Schichten-Modell: - Kern: eigenes Modell in Anlehnung an Speziale (1987) - Wand: Low-Re $k-\epsilon$ nach Lam & Bremhorst (1981)	- $k-\epsilon$ nach Launder & Ying ungeeignet - Turbulente Spannungen in der Spaltregion unterschätzt - Hohe turbulente Spannungen in der Spaltregion nicht simulierbar mit Effekt der Sekundärströme	- hex 1,123 (Re=27.000) - quad. 1,107 (Re=48.400)	EL-2D (eigener Code)	Nein	Nein
de Lemos	1988	eigenes ASM	kein Vergleich	quad. 1,107 (Re=48.000) + quad. 1,194 (Re=48.000)	Eigener Code	Nein	Nein

Anhang

de Lemos	2002	- High-Re $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974) - Low-Re $k-\epsilon$ nach Abe (1992) - Untersuchung von NLEVM: Vergleich $C_{1NL}=0,1512$ nach Speziale (1987) mit eigenem Wert	High-Re mit $C_{1NL}=0,1512$ nach Speziale (1987)	hex 1,123 (Re=27.000)	Eigener Code	Nein	Nein
Lestinen	1999	-Bündel: Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974) + SWF - Abstandshalter: RSM aus Fluent	- Hybride Vernetzung vielversprechend - Probleme nahe dem Abstandshalter	hex 1,3 (Re=46.460)	FLUENT 4.0	Ja (548 kW/m ²)	Ja
Liu	2004	- High-Re Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974) + SWF ($y^+=20-100$) - RNG $k-\epsilon$ nach Yakhot & Orszag (1992) + SWF ($y^+=20-100$) - Quad. NLEVM $k-\epsilon$ nach () + SWF ($y^+=20-100$)	- Hydrodynamik: High-Re Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974) + SWF ($y^+=20-100$) - Wärmeübertragung: RNG $k-\epsilon$ nach Yakhot & Orszag (1992) + SWF ($y^+=20-100$)	Re=28.000	STAR-CD 3.15	Ja (80 kW/m ²)	Ja
Misawa	2003	Pseudo direkt	kein Vergleich	hex 1,2 (Re=9.090)	Keine Angabe	Nein	Nein
Mur	1998	RSM Rij- ϵ nach Launder (1989) + universales logarithmisches Wandgesetz	Kein Vergleich	quad.1,326 (Re: keine Angabe)	ESTET (eigener Code)	Nein	Ja
Rapley	1986	isotropes ASM $k-\epsilon$ nach Launder & Ying (1973)	vielversprechend	hex 1,2 (Re=49000 & 34800 & 35000) + 1,123 (Re=27000) + 1,1 (Re=42700) + 1,06 (Re=40000)	Keine Angabe	Nein	Nein
Rautaheimo	2006	Low-Re $k-\epsilon$ nach Chien (1982)	Kein Vergleich	hex 1,3 (Re=240.000)	FINFLO (eigener Code)	Ja (Profil: max: 900kW/m ²)	Ja
Rock	2001	Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974) + SWF	Neuentwicklung eines ASM notwendig	parallel 1,1 + 1,375 + 1,833 (Re<300.000)	TASC flow (eigener Code)	Ja	Nein
Slagter	1988	- ASM $k-\epsilon$ nach Launder & Ying (1973) - low-Re $k-\epsilon$ nach Hassid & Poreh (1975)	Kombination der Modelle liefert gute Resultate	hex 1,3 (Re=160000)	eigener Code	Nein	Nein
Smith	2002	- Standard High-Re $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974)+ SWF ($y^+=30-100$) - RNG $k-\epsilon$ Yakhot & Orszag (1992) + SWF ($y^+=30-100$) - Quad. NLEVM $k-\epsilon$ + SWF ($y^+=30-100$) - Zwei-Schichten- $k-\epsilon$	- RNG $k-\epsilon$ ($y^+=30-100$)	quad.1,326 (Re=28.000)	STAR-CD 3.15	Ja (80 kW/m ²)	Nein

Anhang

Sofu	2004	<ul style="list-style-type: none"> - High-Re Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974) - Quad. NLEVVM $k-\epsilon$ aus STAR-CD 3.15 - Kub. NLEVVM $k-\epsilon$ nach Craft, Launder & Suga (1996) - RSM LRR nach Launder, Reece & Rodi (1975) - RNG $k-\epsilon$ nach Yakhot & Orszag (1992) - Zwei-Schichten-Modell: <ul style="list-style-type: none"> •Kern: High-Re $k-\epsilon$ •Wand: Low-Re $k-\epsilon$ ($y^+=1$) 	- RSM LRR oder Quad. NLEVVM aus STAR-CD 3.15	Quad. 1,107 (Re=207.600 + Re=254.809)	STAR-CD 3.15	Ja (Bündelleistung: 1626 kW bzw. 660 kW/m ²)	Nein
Specht	2000	- sehr umfangreiche Studie exotischer Modelle	- nichtlineares explizites ASM $k-\epsilon$ nach Girmaji (1995) & Taulbee (1992) + Standard $k-\epsilon$ mit konstanten Koeffizienten nach Gatski & Speziale (1992) + Low-Re $k-\epsilon$ nach Lam & Bremhorst (1981)	Quad. 1,337 (Luft: Re=170.000)	Eigener Code	Ja	Nein
Suh	2004	<ul style="list-style-type: none"> - Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974) ($y^+=30-100$) + SWF - RSM-LRR $k-\epsilon$ nach Launder, Reece & Rodi (1975) ($y^+=30-100$) + SWF 	- Vorschlag: LES - beide Modelle mit Unter- oder Überschätzungen	<ul style="list-style-type: none"> - parallel 1,1 + 1,375 + 1,833 (Luft: Re=30.000-300.000) - quad. 1,036 + 1,4 (Re=60.000-200.000) 	Keine Angabe	Ja	Nein
Toth	2006	<ul style="list-style-type: none"> - $k-\omega$ nach Wilcox (1998) - SST mit AWT nach Menter (1993) - SSG RSM nach Speziale, Sarkar & Gatski (1991) 	$k-\omega$ & SST besser als SSG	hex 1,34	CFX 10.0	Ja (840 kW/m ²)	Nein
Tzanos	2001	<ul style="list-style-type: none"> Standard $k-\epsilon$ nach Launder & Spalding (1974) - Quad. High-Re $k-\epsilon$ nach Lien, Chen & Leschziner (1996) - Quad. Low-Re $k-\epsilon$ nach Lien, Chen & Leschziner (1996) ($y^+=1$) 	Alle 3 stark widersprüchlich	quad. 1,375 (Re=29.000)	Keine Angabe (STAR-CD?)	Nein	Nein
Tzanos	2002	<ul style="list-style-type: none"> - RNG $k-\epsilon$ nach Yakhot & Orszag (1992) ($y^+=12$) - Zwei-Schichten-Modell nach Norris & Reynolds (1975): ($y^+=1$) bis ($y^+=50$) 	Überschätzung der turbulenten Intensität in der Spalte von allen Modellen	quad. 1,375 (Re=29.000)	Keine Angabe (STAR-CD?)	Nein	Nein

Anhang

Tzanos	2004	- High-Re Standard k-ε nach Launder & Spalding (1974) + SWF ($y^+=30-100$) - High-Re quad. k-ε nach () + SWF ($y^+=1$) - Low-Re k-ε nach Lien, Chen & Leschziner (1996) ($y^+=1$) - RNG k-ε nach Yakhot & Orszag (1992) ($y^+=12$) - Zwei-Schichten-Modell Norris & Reynolds (1975) ($y^+=1$)	- High-Re k-ε oder RNG k-ε - Zwei-Schichten-Modell am schlechtesten	quad. 1,375 (Re=29.000)	STAR-CD 3.10	Nein	Nein
Wu	1994	- ASM nach Launder & Ying (1973) + SWF - Standard k-ε nach Launder & Spalding (1974) + SWF	eigenes Modell	hex 1,06 (Re=40.000) + hex 1,1 (Re=36.000) + hex 1,2 (Re=35.000)	Eigener Code	Nein	Nein
Yang	2006	High-Re Standard k-ε nach Launder & Spalding (1974) + SWF ($y^+=15-100$)	kein Vergleich	quad. 1,098 hex 1,14 quad. + hex 1,1-1,25	STAR-CD 3.24	Ja (560 kW/m ²)	Nein
Yang	2007	High-Re Standard k-ε nach Launder & Spalding (1974) + SWF ($y^+=15-100$)	kein Vergleich	- quad. 1,098 - hex 1,14 - quad + hex 1,1-1,25	STAR-CD 3.24	Ja (560 kW/m ²)	Nein

Anhang B

Unterkanalanalysen

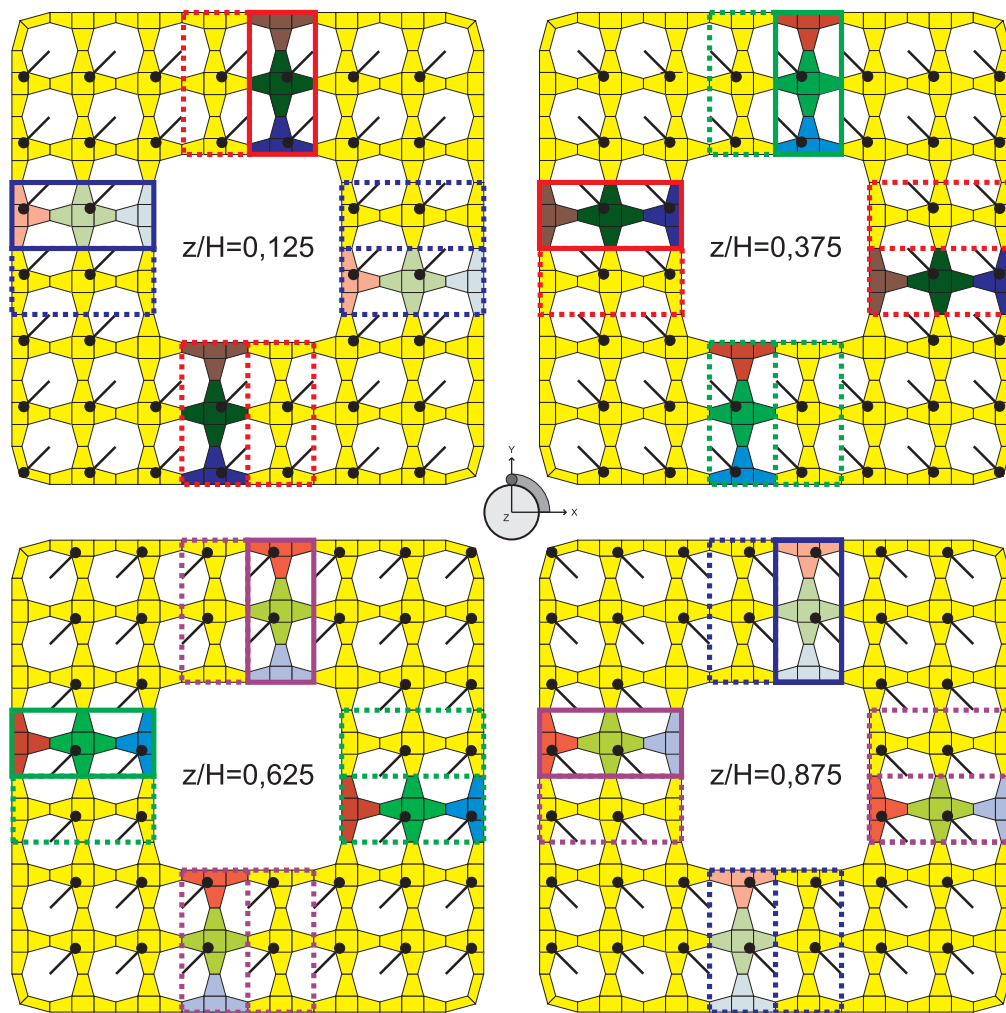


Abbildung B.1: Geometrische Analogien im HPLWR-Brennelement.

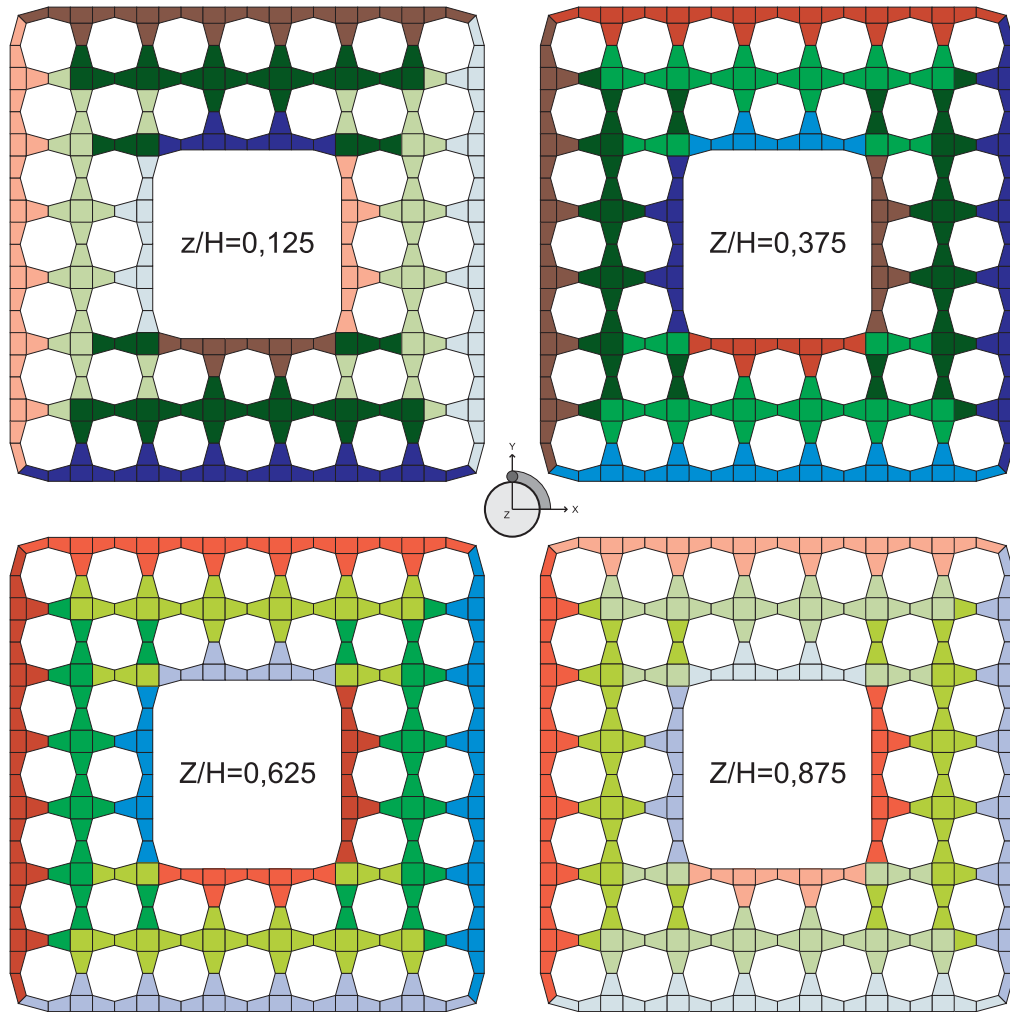


Abbildung B.2: Kodierung der individuellen Zellen im HPLWR-Brennelement.

Anhang C

Modellierung der Stoffeigenschaften von überkritischem Wasser

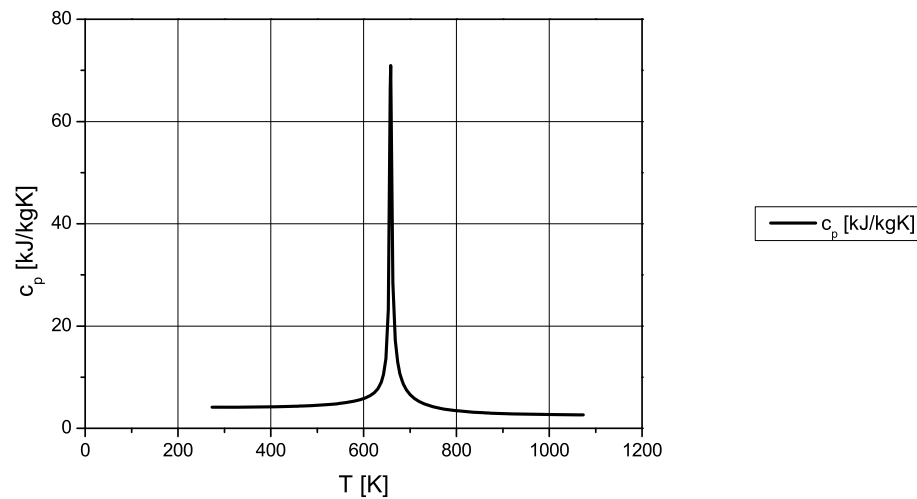


Abbildung C.1: Spezifische Wärmekapazität als Funktion der Temperatur bei 25MPa.

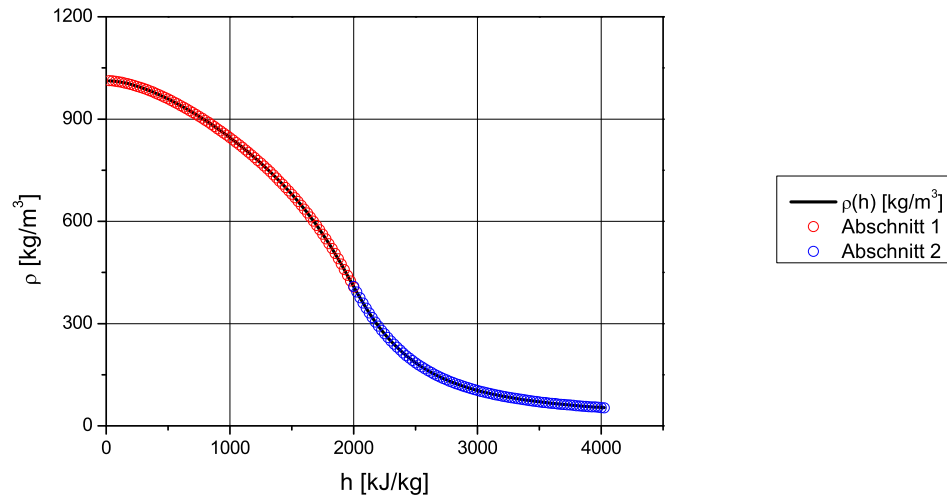


Abbildung C.2: Dichte als Funktion der Enthalpie bei 25MPa.

$\rho(h)$:

Abschnitt 1:

$$\begin{aligned}
 \rho_1(25\text{kJ/kg} \leq h \leq 2000\text{kJ/kg}) = & 1,013213864371110 \cdot 10^3 \\
 & -1,417624235598870 \cdot 10^{-2} \cdot h - 2,430971206074500 \cdot 10^{-4} \cdot h^2 \\
 & +1,316420741686870 \cdot 10^{-7} \cdot h^3 - 4,427539089369680 \cdot 10^{-11} \cdot h^4 \\
 & +2,750398881714410 \cdot 10^{-15} \cdot h^5 - 5,964121238264560 \cdot 10^{-19} \cdot h^6
 \end{aligned} \tag{C.1}$$

Abschnitt 2:

$$\begin{aligned}
 \rho_2(2000\text{kJ/kg} < h \leq 4025\text{kJ/kg}) = & 7,494265748483390 \cdot 10^3 \\
 & -7,834813416766480 \cdot h + 2,600004742099660 \cdot 10^{-3} \cdot h^2 \\
 & +5,104453257850380 \cdot 10^{-8} \cdot h^3 - 2,238948898704290 \cdot 10^{-10} \cdot h^4 \\
 & +4,941652932312460 \cdot 10^{-14} \cdot h^5 - 3,479873079706500 \cdot 10^{-18} \cdot h^6
 \end{aligned} \tag{C.2}$$

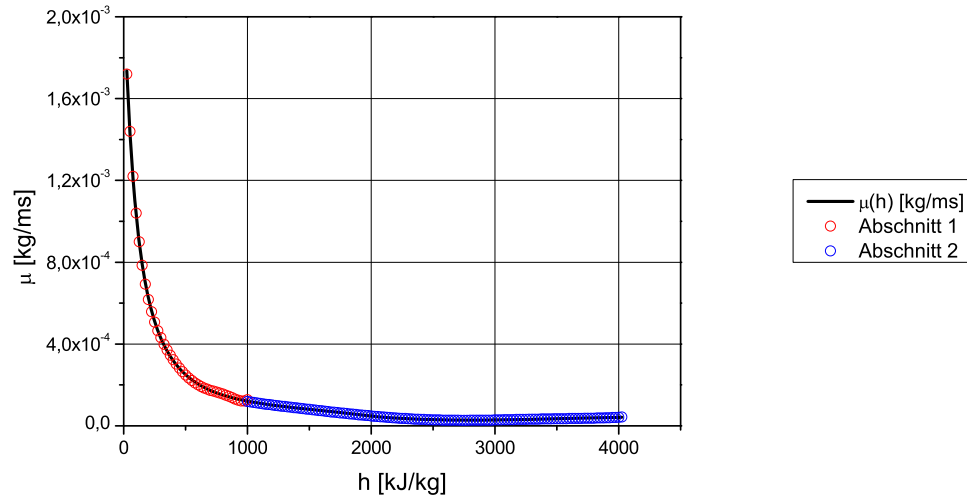


Abbildung C.3: Dynamische Viskosität als Funktion der Enthalpie bei 25MPa.

$\mu(h)$:

Abschnitt 1:

$$\begin{aligned}
 \mu_1(25 \text{ kJ/kg} \leq h < 1000 \text{ kJ/kg}) = & 2,062002274297360 \cdot 10^{-3} \\
 & -1,508669727117510 \cdot 10^{-5} \cdot h + 6,169610820265700 \cdot 10^{-8} \cdot h^2 \\
 & -1,452266644022530 \cdot 10^{-10} \cdot h^3 + 1,923654027180750 \cdot 10^{-13} \cdot h^4 \\
 & -1,323959609227680 \cdot 10^{-16} \cdot h^5 + 3,671355094073410 \cdot 10^{-20} \cdot h^6
 \end{aligned} \tag{C.3}$$

Abschnitt 2:

$$\begin{aligned}
 \mu_2(1000 \text{ kJ/kg} \leq h \leq 4025 \text{ kJ/kg}) = & 5,621462482040420 \cdot 10^{-4} \\
 & -1,195536212281610 \cdot 10^{-6} \cdot h + 1,368785071392200 \cdot 10^{-9} \cdot h^2 \\
 & -8,607281185261640 \cdot 10^{-13} \cdot h^3 + 2,917575200268330 \cdot 10^{-16} \cdot h^4 \\
 & -4,987833389736260 \cdot 10^{-20} \cdot h^5 + 3,377395648033300 \cdot 10^{-24} \cdot h^6
 \end{aligned} \tag{C.4}$$

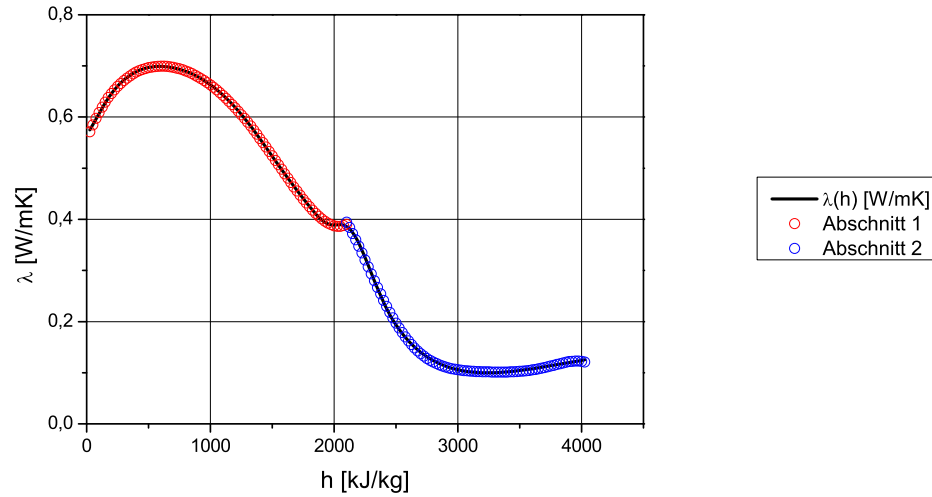


Abbildung C.4: Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Enthalpie bei 25MPa.

$\lambda(h)$:

Abschnitt 1:

$$\begin{aligned}
 \lambda_1(25\text{kJ/kg} \leq h \leq 2100\text{kJ/kg}) = & 5,564692735232980 \cdot 10^{-1} \\
 & + 6,139505024977470 \cdot 10^{-4} \cdot h - 9,757747625202190 \cdot 10^{-7} \cdot h^2 \\
 & + 8,182580039822050 \cdot 10^{-10} \cdot h^3 - 4,568815661172040 \cdot 10^{-13} \cdot h^4 \\
 & + 1,114824654501870 \cdot 10^{-16} \cdot h^5 - 4,642152735888360 \cdot 10^{-21} \cdot h^6
 \end{aligned} \tag{C.5}$$

Abschnitt 2:

$$\begin{aligned}
 \lambda_2(2100\text{kJ/kg} < h \leq 4025\text{kJ/kg}) = & -1,500942983538990 \cdot 10^2 \\
 & + 3,086262935074840 \cdot 10^{-1} \cdot h - 2,587071194695360 \cdot 10^{-4} \cdot h^2 \\
 & + 1,137713313362030 \cdot 10^{-7} \cdot h^3 - 2,776948775010820 \cdot 10^{-11} \cdot h^4 \\
 & + 3,574292811392010 \cdot 10^{-15} \cdot h^5 - 1,898013575118270 \cdot 10^{-19} \cdot h^6
 \end{aligned} \tag{C.6}$$

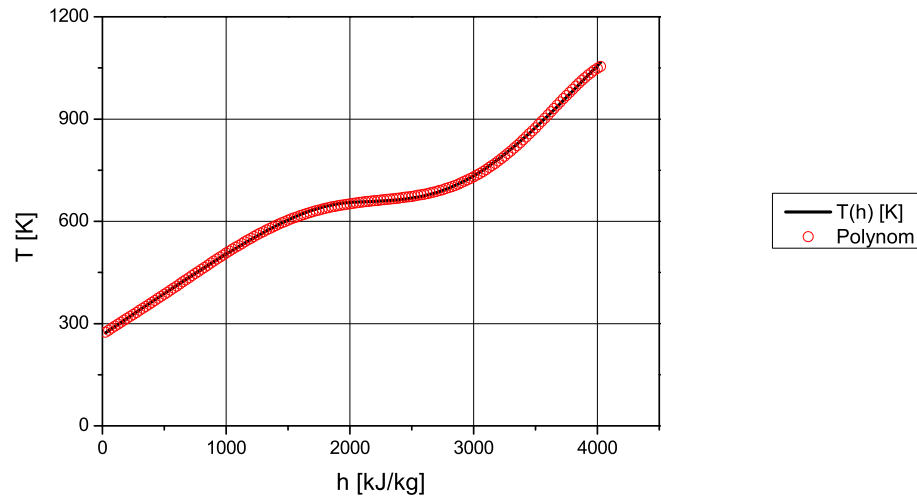


Abbildung C.5: Temperatur als Funktion der Enthalpie bei 25MPa.

$T(h)$:

$$\begin{aligned}
 T(25\text{kJ/kg} \leq h \leq 4025\text{kJ/kg}) = & 2,690708886807660 \cdot 10^2 \\
 & + 2,407635528363740 \cdot 10^{-1} \cdot h - 6,608612361022410 \cdot 10^{-5} \cdot h^2 \\
 & + 1,641150566193040 \cdot 10^{-7} \cdot h^3 - 1,385406874285900 \cdot 10^{-10} \cdot h^4 \\
 & + 4,158420951530710 \cdot 10^{-14} \cdot h^5 - 4,088115919609840 \cdot 10^{-18} \cdot h^6
 \end{aligned} \tag{C.7}$$

Anhang D

Dimensionslose Kennzahlen

- Grashof-Zahl Gr :

$$Gr = \frac{\text{Auftriebskraft}}{\text{Viskositätskraft}} = \frac{g \cdot \beta_{th} \cdot \Delta T \cdot l^3}{\nu^2} \quad (\text{D.1})$$

- Nusselt-Zahl Nu :

$$Nu = \frac{\text{Konvektiver Wärmetransport}}{\text{Diffusiver Wärmetransport}} = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (\text{D.2})$$

- Reynolds-Zahl Re :

$$Re = \frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{Reibungskräfte}} = \frac{\rho \cdot v \cdot d_h}{\mu} \quad (\text{D.3})$$

- Stanton-Zahl St :

$$St = \frac{\text{Dynamik eines Prozesses}}{\text{Fähigkeit, Energie zu speichern}} = \frac{w_{ij}}{s \cdot m_i} \quad (\text{D.4})$$

- Péclet-Zahl Pe :

$$Pe = \frac{\text{Konvektiver Wärmetransport}}{\text{Wärmetransport durch Wärmeleitung}} = \frac{\rho \cdot v \cdot c_p \cdot l}{\lambda} \quad (\text{D.5})$$

- Prandtl-Zahl Pr :

$$Pr = \frac{\text{Diffusiver Impulstransport}}{\text{Diffusiver Wärmetransport}} = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} \quad (\text{D.6})$$

Danksagung

Diese Dissertation entstand in der Zeit vom Dezember 2005 bis August 2008 am Institut für Kern- und Energietechnik (IKET) des Forschungszentrums Karlsruhe GmbH.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Eckart Laurien, Leiter des Instituts für Kernenergie- und Energiesysteme (IKE) der Universität Stuttgart, bedanke ich mich herzlich für das rege Interesse an dieser Arbeit und den damit einhergehenden, wertvollen Anregungen sowie für die Übernahme des Hauptreferates.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Schulenberg, Leiter des Instituts für Kern- und Energietechnik (IKET) des Forschungszentrums Karlsruhe GmbH, gilt mein besonderer Dank für die Themenstellung, sein stetes Interesse und Engagement bei der Durchführung dieser Arbeit sowie der Übernahme des Koreferates.

Meinem fachlichen Betreuer Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas G. Class sowie Dr.-Ing. Jörg Starflinger und Dr.-Ing. Günter Grötzbach danke ich aufrichtig für die Bereitschaft zur Hilfe und die persönliche Betreuung, was maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Der AREVA NP danke ich für die finanzielle Unterstützung und Herrn Jochen Heinecke für die hilfreichen Diskussionen.

Den Angestellten des IKET, insbesondere dem HPLWR-Team, sowie allen Doktoranden, Diplom- bzw. Studienarbeitern und Praktikanten danke ich für die heitere und angenehme Arbeitsatmosphäre.

Im Besonderen möchte ich meinen Eltern, meiner Schwester sowie meinen Großeltern für die uneingeschränkte und tatkräftige Unterstützung während meiner gesamten Ausbildung danken. Meiner Freundin Maria danke ich für ihr Interesse an meiner Arbeit und den nötigen Ausgleich neben der Arbeit.

Karlsruhe im August 2008

Steffen Roman Himmel