

**Jahrestreffen
der ProcessNet-Fachausschüsse
Computational Fluid Dynamics
und
Wärme- und Stoffübertragung**



8. - 10. März 2010

Kurzfassungen

www.processnet.org/cfd_wsue

Vortragsprogramm

Phasenwechselfvorgänge in latentem thermischen Speichern – Modellierung, numerische Simulation und Experiment

Nicole Vasold, Fabian Rösler und Dieter Brüggemann,

Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und Transportprozesse (LTTT),

Universität Bayreuth, Bayreuth/Deutschland

Mit steigender Nutzung regenerativer Energieformen wachsen das Interesse und der Bedarf an leistungsfähigen „Wärmespeichern“ zur vorübergehenden Speicherung thermischer Energie. Hierzu eignen sich latente thermische Speicher wegen ihrer volumenbezogen hohen Kapazität besonders.

Speicher mit direktem Kontakt zwischen Wärmeträger- und Wärmespeichermaterial schaffen eine große Wärmeübertragungsfläche und ermöglichen eine hohe Leistung bei Be- und Entladung. Speicher mit baulicher Trennung von Speichermaterial und Fluid sind einfacher anzuwenden, weisen jedoch vor allem durch die niedrige Wärmeleitfähigkeit der Phasenwechselmaterialien eine geringere Leistung auf.

Zur Untersuchung der thermischen Leistung von Speichern mit indirektem Kontakt wird in dem hier vorgestellten Ansatz ein Doppelrohr-Latentwärmespeicher in einem numerischen Euler-Modell abgebildet. Die durch Konvektion dominierte Wärmeübertragung im Phasenwechselmaterial wird über Masse, Impuls und Energie in inkompressibler Form bilanziert. Die sich bewegende Schmelzfront wird in einem ortsfesten Gitter durch eine weitere Gleichung abgebildet, welche den Verlauf der Phasen im betrachteten Bereich darstellt. Mittels eines Darcy-Quellterms in der Impulserhaltungsgleichung ist das poröse Verhalten der Phasengrenzschicht zwischen festem und flüssigem Speichermaterial in das Modell integriert. Der Phasenwechsel wird ebenfalls über einen Quellterm in der Energiebilanz berücksichtigt.

Mit Hilfe dieses Modells kann auch die thermische Leistung von Speichern mit makroverkapseltem Speichermaterial untersucht werden, welche auf Grund ihrer vergrößerten Wärmeübertragerfläche eine Verbesserung der Leistung versprechen. Gegenstand weiterer Untersuchungen sind Direktkontaktspeicher, welche über andere numerische Modelle abgebildet werden.

Für verschiedene Fälle werden exemplarische Rechnungen der zeitlichen Entwicklung der Phasengrenze und des Verlaufs der aufgenommenen bzw. abgegebenen Leistung dargestellt und mit experimentellen Ergebnissen verglichen.

Kontinuierliche Betriebsführung thermochemischer Wärmespeicher unter instationären Reaktionsbedingungen

*Dipl.-Ing. B. Mette, Dr.-Ing. H. Kerskes, Prof. Dr.-Ing. H. Müller-Steinhagen
Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)
Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart
Tel.: 0711/685-63499, Fax: 0711/685-63242
email: mette@itw.uni-stuttgart.de*

Ein vielversprechender Ansatz zur Realisierung verlustarmer Kurz- und Langzeitwärmespeicher mit hohen Energiespeicherdichten sind thermo-chemische Wärmespeicher, welche die Wärme durch endotherme Reaktionen speichern und durch exotherme Reaktionen abgeben. Am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart erfolgen derzeit detaillierte Untersuchungen an reversiblen Gas-Feststoffreaktionen zur chemischen Wärmespeicherung. Ein mögliches Verfahren stellt die Durchströmung von porösen Salzgranulaten mit einem feuchten Luftstrom dar. Durch die Anlagerung des Wassers an das Salzanhydrat (Hydratisierung) wird Wärme freigesetzt. Zur Regenerierung des Speichermaterials wird dem System Wärme zugeführt, um die Dehydratisierungsreaktion ablaufen zu lassen.

Die Anforderungen, die an ein solches Speichersystem gestellt werden, sind unter anderem, dem Speicher einen möglichst hohen und konstanten Wärmestrom zu entnehmen. In diesem Fall liegt die Herausforderung an die Prozessführung darin, dass die Hydratisierungsreaktion per se einen instationären Vorgang darstellt und darüber hinaus die ohnehin schon langsame Reaktionsgeschwindigkeit mit zunehmendem Hydratisierungsgrad des Speichermaterials abnimmt.

Ziel der vorgestellten Untersuchungen ist es, die im Material gespeicherte Energiemenge bei der Hydratisierungsreaktion optimal freizusetzen, um sie für nachfolgende Prozesse nutzbar zu machen.

Zur Überwindung der oben beschriebenen Beschränkungen wird eine Prozessführung untersucht, in dem die Gas- und die Feststoffphase im Gegenstrom geführt werden. Durch diese Prozessführung kann eine ortsfeste Reaktionszone realisiert werden, der eine durch die eingestellten Massenströme steuerbare, konstante Leistung entnommen werden kann. Das durchströmende Gas (feuchte Luft) dient gleichzeitig als Reaktionspartner und als Wärmeträgermedium, das die Reaktionswärme aufnimmt und zu dem nachfolgenden Prozess transportiert.

Es wurde ein numerisches Modell entwickelt, mit dem die Vorgänge in der Reaktionszone detailliert untersucht werden können, um die Prozessführung hinsichtlich Wärmeein- und -austragung zu optimieren. Für die Modellbildung wird der Reaktor zweidimensional dargestellt mit jeweils einer Energie- und Massenbilanz für die Gas- und Feststoffphase. Die erforderlichen Transport- und Kinetikparameter werden aus Korrelationen hergeleitet bzw. aus experimentellen Untersuchungen gewonnen. Das Modell erlaubt es, das dynamische Verhalten des Wärmespeichers unter transienten Randbedingungen zu analysieren. Erste Berechnungen zeigen, dass der Hydratisierungs- bzw. Dehydratisierungsprozess sowie das Temperaturprofil in der Reaktionszone sehr sensibel auf die Prozessbedingungen wie Relativgeschwindigkeit der beiden Phasen, Luftfeuchtigkeit und Eintrittstemperaturen reagieren.

In diesem Beitrag werden Ergebnisse der Simulationen präsentiert und diskutiert.

Instationär betriebener Festbettreaktor zur energieeffizienten Führung endothermer Hochtemperatursynthesen

*Dipl.-Ing. Bernd Glöckler, Evonik Degussa GmbH, Fluidverfahrenstechnik
(HPC: 1024-319),
Rodenbacher Chaussee 4, 63457 Hanau
Tel.: (0 61 81) 59-21 44; Fax.: (0 61 81) 59-721 44; Email:
bernd.gloeckler@evonik.com*

Am Anfang chemischer Syntheserouten stehen zumeist großskalige endotherme Prozesse (Refomierungen, Dehydrierungen, etc.), die nach dem Stand der Technik in direkt befeuerten katalytischen Festbetten durchgeführt werden. In diesen Apparaten wird nur ein geringer Anteil der eingebrachten Wärme zur Versorgung der Zielreaktion verwendet, der Rest dient der Aufheizung der Edukte und verlässt den Prozess als fühlbare Wärme im Produktgas und im Abgas. Zur Steigerung des energetischen Wirkungsgrads wird aus dieser Abwärme Dampf erzeugt und an andere Anlagenteile exportiert. Die Anlagen mit dem größten Energiebedarf stellen somit zugleich die größten Energiequellen an einem Chemiestandort dar und machen einen energetischen Verbund unverzichtbar.

Die Integration von Wärmeerzeugung, Wärmeübergang und Reaktion in einem Apparat bietet ein großes Potential zur Steigerung der thermischen Effizienz der Produktion ohne Zwangsanfall von Abwärme bzw. Dampf. Nutzt man beispielsweise die Randbereiche eines Festbetts durch einen periodischen Strömungsumkehrbetrieb als Regenerativ-Wärmetauscher, lässt sich die Wärme der Produktgase eines Prozessschritts für die Aufheizung der Feedgase des nachfolgenden Prozessschritts zurückgewinnen. Während instationär betriebene Festbettreaktoren für schwach exotherme Reaktionen, beispielsweise der Verbrennung von VOC-Spuren in Abluft, zum Stand der Technik gehören, besteht für die Versorgung endothermer Hochtemperaturreaktionen noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Bei dieser Anwendung dient der mittlere Bereich des Festbetts als regenerativer Wärmespeicher, der während der Produktion abkühlt und im zweiten Prozessschritt, der thermischen Regeneration, wieder aufgeheizt wird.

Die Integration von Wärmeversorgung und Reaktion in einem multifunktionalen Festbett erfordert einerseits das theoretische Verständnis von wandernden Reaktions-/ Wärmeübertragungszonen, die aus dem komplexen Zusammenwirken von Wärmeversorgung und Wärmeverbrauch resultieren, andererseits wird ein

skalierbares Konzept für die kontrollierte, homogene Aufheizung des Festbetts durch eine Verbrennungsreaktion benötigt.

Im Rahmen des Vortrags wird die Theorie zu wandernden endothermen Reaktionszonen eingeführt und anhand experimenteller Ergebnisse der Methan-Dampfreformierung belegt. Darüber hinaus wird ein Konzept zur kontrollierten Wiederaufheizung des Festbetts durch schüttungsfreie Bereiche, in denen die Verbrennung durch flammlose Oxidation realisiert wird, vorgestellt.

Elektroextraktion von DNA in wässrigen Zweiphasensystemen

T. Hahn, S. Hardt, Center of Smart Interfaces, TU Darmstadt

Da die Separation von DNA eine wichtige Rolle in vielen Prozessen der Bioanalytik spielt, liegt in der Weiterentwicklung und Verbesserung entsprechender Methoden im Hinblick auf Auflösung, Geschwindigkeit etc. eine hohe Anwendungsrelevanz. Wir präsentieren eine vollkommen neue Methode zur DNA-Trennung, die auf dem elektrophoretischen Transport von Molekülen über die Phasengrenze in wässrigen Zweiphasensystemen beruht.

Verwendet werden Polymerlösungen aus Polyethylenglykol (PEG) und Dextran, in denen eine Phasenseparation auftritt. Werden nun DNA-Moleküle in eine der Phasen eingebracht und mit geringen elektrischen Feldstärken zur Phasengrenze transportiert, kommt es dort zur Adsorption der Moleküle. Bei einer Erhöhung der Feldstärke desorbieren sie und treten in die zweite Phase über. Die Desorption findet bei einer kritischen Feldstärke statt, deren Wert monoton mit der Länge der verwendeten DNA-Stränge ansteigt. Wird die elektrische Feldstärke sukzessive erhöht, desorbieren die Moleküle sortiert nach ihrer Größe, wobei die kürzesten DNA-Stränge zuerst die Phasengrenze verlassen. Basierend auf diesem Prinzip konnten wir die Trennung einer DNA-Leiter im Größenbereich zwischen 67 und 501 Basenpaaren demonstrieren.

Im Rahmen einer detaillierten Analyse des Desorptionsprozesses wurde ein exponentieller Abfall der adsorbierten Stoffmenge als Funktion der Zeit abgeleitet, falls die kritische Feldstärke überschritten wird. Ein solches Verhalten kann im Rahmen der Reaktionsratentheorie erklärt werden. Dieses Erklärungsmodell beruht auf dem Einfangen von Molekülen in einem metastabilen Zustand, einem lokalen Minimum der freien Energie an der Phasengrenze. Die Desorption der Moleküle geschieht dabei durch thermische Fluktuationen, wobei die Tiefe des Potentialminimums durch das elektrische Feld verändert werden kann.

Der Transport von DNA-Molekülen in der Nähe der Phasengrenze von wässrigen Zweiphasensystemen wird darüber hinaus durch weitere Phänomene wie die Ausbildung von Marangoni-Konvektionszonen gekennzeichnet, deren Ursprung noch weitgehend ungeklärt ist. Eine weitere Erforschung dieses Systems verspricht sowohl neue Grundlagenkenntnisse im Bereich des Stofftransports über fluide Phasengrenzen als auch interessante Anwendungsperspektiven.

Kontaktwärmeübergang und Vermischung in der Schüttung einer indirekt beheizten Drehtrommel

Herz, F.; Sonavane, Y.; Specht, E.; Universität Magdeburg

Der gesamte Wärmeübergang in direkt beheizten Drehrohröfen und Drehtrommeln ist ein komplexer Mechanismus. Wärme wird von der Flamme direkt auf die freie Bettoberfläche und die freie Wand sowohl durch Konvektion als auch durch Strahlung übertragen. Die an die Wand übertragene Wärme wird gespeichert und durch die Drehung unter das Gut transportiert und dann durch Kontakt an die bedeckte Gutoberfläche abgegeben. Der regenerative Wärmetransport durch die Wand kann durch einen Transportwärmeübergangskoeffizienten beschrieben werden, der die Wurzel aus dem Produkt von dem Wärmeeindringkoeffizienten und der Drehzahl multipliziert mit Φ ist. Über den Kontaktwärmeübergangskoeffizienten herrscht noch eine gewisse Unsicherheit. So ist das Temperaturprofil in der Schüttung noch unbekannt. Folglich ist unsicher, auf welche Temperaturdifferenzen der Wärmeübergangskoeffizient bezogen werden soll.

Der Kontaktwärmeübergang wurde daher an einer speziellen Versuchsdrehtrommel mit einem Innendurchmesser von 600 mm ermittelt. Diese Trommel ist von außen elektrisch beheizt. Gemessen werden in Abhängigkeit der Zeit die Temperaturen in der Schüttung. Hierzu steckt eine Sonde fest in der Trommel. Die Partikel haben folglich eine Relativbewegung zu dem Fühler, der die Bewegung der Partikel stört. Eine zweite Sonde dreht sich mit Wand und überträgt die Messwerte per Funk. Hierbei besteht nur ein relativ kurzer Kontakt zu den Partikeln. Die Genauigkeit der verschiedenen Messmethoden wird diskutiert.

Der Wärmetransport innerhalb der Schüttung durch die Vermischung wird ebenfalls ermittelt. Hierzu wird die Trommel mit zwei Partikelschichten unterschiedlicher Temperatur befüllt und der Temperaturengleich in Abhängigkeit von der Drehzahl gemessen. Die Ergebnisse werden verglichen mit Versuchen, bei denen die Vermischung mit Partikeln unterschiedlicher Farbe gemessen wurde. Hierbei wurde die Partikelbewegung durch Messfühler nicht beeinflusst. Der Einfluss von Drehzahl, Partikelgröße, Füllungsgrad und Art der Partikel wird diskutiert.

Diskrete Beschreibung des thermischen Ausgleichs in Partikelsystemen

Dipl.-Ing. F. Weigler, Jun.-Prof. Dr.-Ing. M. Peglow, Prof. Dr.-Ing. E. Tsotsas

Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik,

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Pulverige oder granuliert Produkte werden häufig in Kontaktapparaten (z.B. Drehrohr- oder Trommelapparaten) thermisch behandelt, wobei Wärme von einer beheizten Oberfläche an das ruhende oder mechanisch durchmischte Partikelbett übertragen wird. Diese Wärme muss zwei in Reihe geschaltete Widerstände überwinden, einen Kontaktwiderstand zwischen Heizfläche und erster Partikellage sowie einen Penetrationswiderstand innerhalb der Schüttung. Möchte man den Prozess diskret untersuchen, so muss man die Anzahl der Partikel im System begrenzen und daher sich auf relativ große Partikel beziehen. Jedoch überwiegt für große Partikel der Kontaktwiderstand und überdeckt daher die Information zum Wärmeübergang im Inneren der Schüttung.

Um diese Problematik zu umgehen, wurde eine neue experimentelle Methode entwickelt, die unabhängig von den Wandkontakten nur den Wärmeübergang innerhalb der Schüttung betrachtet und daher zur Validierung und zum Vergleich vorhandener Modelle der Wärmeübertragung in Schüttungen auch im Falle großer Partikel geeignet ist. Zu diesem Zweck wird der Temperatursgleichgewicht zwischen zwei ursprünglich unterschiedlich temperierten, aufeinander geschichteten Partikelhaufen in einer Trommel ohne Einsätze betrachtet. Die Untersuchung des Wärmetransportes erfolgt sowohl für die ruhende als auch für die sich drehende Trommel. Die Messtechnik ermöglicht die diskrete Erfassung der Temperaturverteilung in der dispersen Phase, so dass der Wärmeübertragungsprozess auf der Ebene der einzelnen Partikel beschrieben werden kann. Die sich daraus ergebende Möglichkeit der experimentellen Validierung der Modelle zur Berechnung der Wärmeübertragung in Partikelschüttungen macht es einfacher, die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Modelle aufzuzeigen und diese miteinander vergleichen zu können. Im Rahmen dieser Arbeit werden experimentelle Ergebnisse und deren Vergleich mit den Simulationsdaten der thermischen DEM präsentiert. Außerdem werden Ergebnisse der thermischen DEM mit denen des kontinuierlichen Penetrationsmodells verglichen.

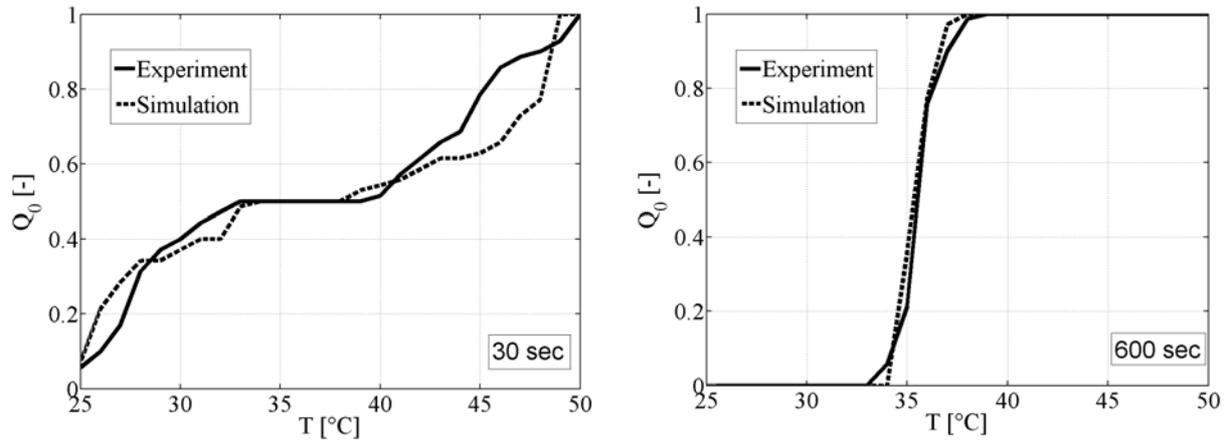


Abb. Vergleich von Messdaten mit den Simulationsergebnissen der thermischen DEM;
 Ausgangstemperatur der Kugelhaufen 25°C und 50°C , $\alpha_{pp} = 93 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$,
 $\vartheta_G = 35^{\circ}\text{C}$

Keramische Schwämme in verfahrenstechnischen Apparaten: thermische Auslegung

*Dipl.-Ing. B. Dietrich, Prof. Dr.-Ing. M. Kind, Prof. Dr.-Ing. H. Martin, Institut für
Thermische Verfahrenstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*

Als feste keramische Schwämme bezeichnet man hochporöse offenporige und damit allseitig fluiddurchlässige feste Schäume. Deren feste kontinuierliche Phase begünstigt beispielsweise gegenüber Kugelschüttungen den radialen Wärmetransport. Weiterhin besitzen sie aufgrund der hohen Porosität bei vergleichsweise hoher spezifischer Oberfläche einen niedrigen Druckverlust. In der Vergangenheit wurden Schwämme hauptsächlich als Metallschmelzenfilter eingesetzt. In Zukunft könnten sie in Solarreceivern, als Porenbrenner oder als Träger für katalytische Substanzen in chemischen Reaktoren Anwendung finden.

Zur wärmetechnischen Auslegung derartiger Apparate und Reaktoren ist der Wärmeübergangskoeffizient zwischen der fluiden und der festen Phase eine wichtige Kenngröße. Dieser wurde experimentell für verschiedene Schwammtypen ermittelt und mit Hilfe einer Potenzfunktion der Form $Nu = c \cdot Re^m \cdot Pr^{1/3}$ korreliert. Dabei ist es gelungen, die Anpassparameter c und m in Abhängigkeit der spezifischen Oberfläche darzustellen, so dass die Gleichung für alle untersuchten Schwammtypen gültig ist. Damit ist eine Vorausberechnung der Nusselt-Zahl für einen beliebigen Schwammtyp allein bei Kenntnis der spezifischen Oberfläche möglich. Weiterhin konnten die so bestimmten Nusselt-Zahlen mit dem Druckverlust in dimensionsloser Form (= Hagen-Zahl) mit Hilfe der Verallgemeinerten L ev eque-Analogie, welche z.B. für Kugelschuttungen etabliert ist, korreliert werden.

Weitere wichtige Kenngrößen sind die Zweiphasenw armeleitf ahigkeit im durchströmten Fall sowie bei stagnierender Fluidschicht. Letzterer Fall wurde experimentell mit einer Zweiplattenapparatur untersucht und die Ergebnisse mit Hilfe eines Ansatzes  ahlich dem Krischer-Modell korreliert: $\lambda_{2ph} = b \cdot \lambda_{serial} + (1 - b) \cdot \lambda_{parallel}$.

Dabei gilt: $\lambda_{serial} = \left(\frac{\psi}{\lambda_f} + \frac{(1-\psi)}{\lambda_s} \right)^{-1}$ und $\lambda_{parallel} = \psi \cdot \lambda_f + (1-\psi) \cdot \lambda_s$, wobei ψ die

Porosität ist. Der Variationsparameter b wurde mit Hilfe der Methode der Fehlerquadratminimierung über alle untersuchten Schwämme angepasst und mit einem mittleren Fehler von 12 % zu 0,52 bestimmt.

Über die Ursache von stabiler Tropfenkondensation an ionenimplantierten Metalloberflächen

*Michael Heinrich Rausch, Alfred Leipertz und Andreas Paul Fröba
Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT), Universität Erlangen-Nürnberg*

Bereits vor mehr als 20 Jahren wurde erstmals festgestellt, dass die Modifikation von Metalloberflächen mittels Ionenimplantation zur Einstellung stabiler Tropfenkondensation von Wasserdampf führen kann. Trotzdem konnte die genaue Ursache dieser hinsichtlich des Wärmeübergangs sehr leistungsfähigen Kondensationsform an derart behandelten Oberflächen bisher nicht nachgewiesen werden. Die in der Literatur verfügbaren Ansätze versuchen die Auswirkung der Ionenimplantation mit einer Reduzierung der Oberflächenenergie zu erklären. Unsere experimentellen Ergebnisse zeigen jedoch zum Teil starke Widersprüchlichkeiten zwischen der sich einstellenden Kondensationsform und gemessenen Oberflächenenergien und Kontaktwinkeln. Außerdem ist zu beobachten, dass sich an manchen Materialien durch selbständig ablaufende Prozesse auch ohne gezielt aufgebrauchte Oberflächenmodifikation nach und nach Tropfenkondensation einstellen kann.

Mit Hilfe von modernen Oberflächenanalysemethoden und Kondensationsexperimenten konnten wir zeigen, dass offenbar chemisch inhomogene Oberflächen mit mikroskopischen Rauigkeiten für die Einstellung von Tropfenkondensation verantwortlich sind. Solche Oberflächen können durch die Bildung von Ausscheidungen entstehen, die durch eine Übersättigung des Basismaterials mit den Implantationselementen induziert wird. Natürliche Oxidationsprozesse scheinen an hochlegierten Materialien wie Edelstahl in der Lage zu sein, spontan eine ähnliche Oberflächencharakteristik zu generieren. Unsere Experimente deuten darauf hin, dass an solchen Oberflächen Keimstellenprozesse stattfinden, die trotz einer anhand von Kontaktwinkelmessungen aufgezeigten Verbesserung der Benetzbarkeit zu Tropfenkondensation führen. Eine neue Modellvorstellung erklärt dieses Phänomen mit der Bildung von temporären Dampfeinschlüssen bei der sich ständig wiederholenden Tropfenvereinigung. Hierdurch resultiert ähnlich wie beim Lotus-Effekt eine deutliche Kontaktwinkelerhöhung während des Kondensationsprozesses, die auch an Materialien mit geringer Hydrophobizität stabile Tropfenkondensation zulässt.

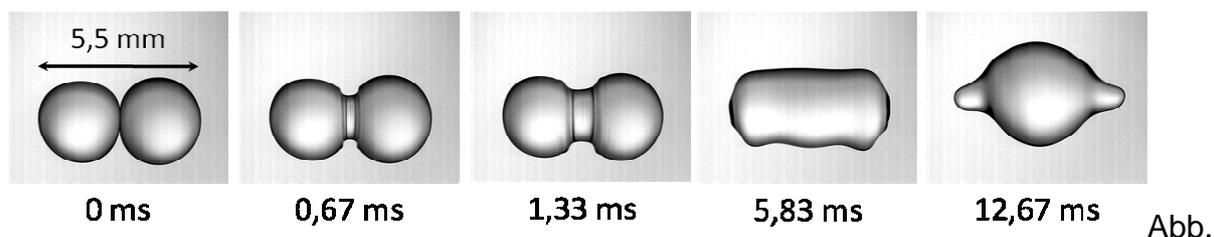
Visualisierung der Internen Strömungen und der Einfluss von Stoffaustausch auf die Koaleszenzwahrscheinlichkeit bei der binären Tropfenkoaleszenz

R.T.Eiswirth, H.-J. Bart

*Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik, Technische Universität Kaiserslautern,
Tel.: +49 (0)631/205-2414, E-mail: bart@mv.uni-kl.de, <http://www.uni-kl.de/LS-Bart>*

Die Grundlagenuntersuchungen zur binären Tropfenkoaleszenz wurden mit dem Standard EFCE Stoffsystem Toluol/Aceton/Wasser unter definierten Bedingungen, wie pH-Wert und definierten Mengen an Austauschkomponente durchgeführt. Es wurde besonderen Wert auf die Reinheit des verwendeten Equipments und Chemikalien gelegt um der Sensitivität des Prozesses gerecht zu werden.

Mit Hilfe von Makrolinsen und einer High-Speed-Kamera war es möglich die Vorgänge bei der binären Tropfenkoaleszenz, wie zum Beispiel der Filmriss, von frei aufsteigenden Tropfen detailliert abzubilden. Durch ein Einfärben der Tropfen war es möglich die Strömung in den Tropfen während und nach dem Koaleszenzereignis zu visualisieren. Somit was es möglich die Durchmischung der beiden Tropfen nach der Koaleszenz in Abhängigkeit der Tropfengröße zu beurteilen. Versuche unter Stoffaustauschbedingungen wurden in verschiedenen chemischen Systemen durchgeführt und werden diskutiert.



1: Koaleszenzereignis Toluol/Wasser, pH=3, 25°C

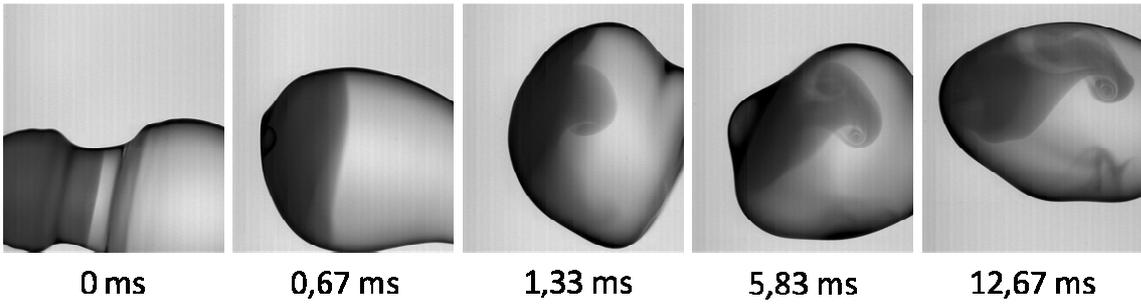


Abb.

1: Interne Strömung bei Koaleszenzereignis Toluol/Wasser

Gasseitiger Stofftransport von Flüssigkeitsfilmen an einem senkrechten Draht

J. Grünig, T. Skale, S. Horn, M. Kraume,

Technische Universität Berlin; Fachgebiet Verfahrenstechnik

Motivation

Ein neuartiges Konzept für Packungskolonnen ist eine Packung aus parallelen senkrechten Drähten. Es wird erwartet, dass sie gegenüber herkömmlichen Packungen Vorteile hinsichtlich der Belastungsgrenzen, dem spezifischen Druckverlust sowie der Gleichmäßigkeit der Flüssigkeitsverteilung aufweist. Es stellt sich jedoch die Frage, ob mit dieser Packung ähnlich hohe Trennleistungen erreicht werden können. Ziel der Untersuchungen ist es daher neben der Charakterisierung der Fluidodynamik, den Stofftransport im Detail zu erfassen. Hierfür wurden Experimente an einem einzelnen Draht durchgeführt.

Methodik

Der Draht (\varnothing 1mm) ist mittig in einen Glaskanal (Länge 1 m, Innenabmaß 20 mm x 20 mm) eingespannt durch den Luft im Gegenstrom zum am Draht aufgetragenen Flüssigkeitsfilm strömt (Abb. 1). Für das Stoffsystem Wasser/Luft wird der Stoffüber-

gang über die Verdunstung der Flüssigkeit ermittelt. Hierfür wird die Ein- und Austrittsfeuchtigkeit der Luft mit einem Taupunktspiegelhygrometer gemessen und über den Gasvolumenstrom der übergehende Stoffstrom

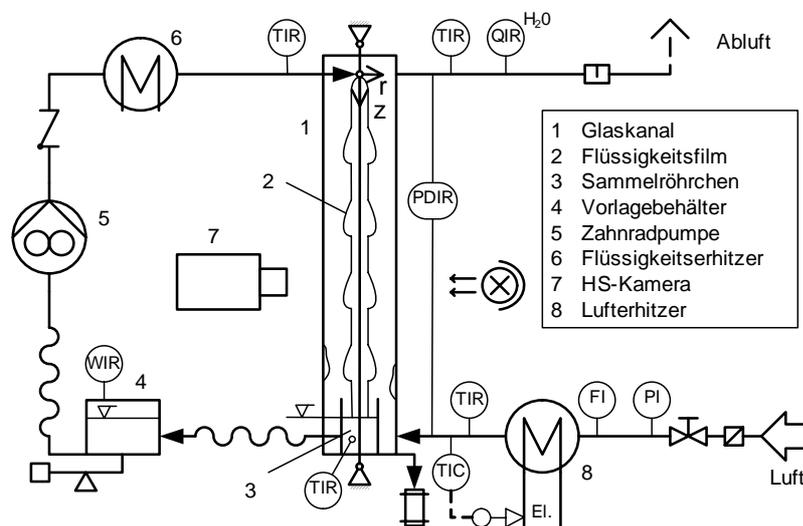


Abb. 1. Versuchsanlage

bestimmt. Die variierten Parameter sind die Flüssigkeits- und die Gasbelastung. Zusätzlich wurde eine Veränderung der Stoffeigenschaften u. a. durch die Variation der Temperatur der Phasen vorgenommen. Die effektive Filmoberfläche zur Stoffübertragung wurde aus Daten der lokalen Filmdicke und der Perlungeschwindigkeit be-

rechnet. Hierfür wurden die mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommenen Bildsequenzen mit einem automatisierten Bildauswertungsprogramm ausgewertet.

Ergebnisse

Die charakteristische Filmstruktur bestehend aus herabfließenden „Perlen“ und einem dünnen Basisfilm ergibt eine effektive Filmoberfläche, die deutlich größer ist als die Drahtoberfläche. Die Auswertung der Bilddaten zeigt, dass die Filmoberfläche hauptsächlich von der Flüssigkeitsbelastung abhängt. Obwohl die Dicke der Perlen mit zunehmender Gasbelastung steigt, ändert sich die Filmoberfläche nur unwesentlich. Mit zunehmender Temperatur lässt sich eine leichte Abnahme der Filmoberfläche beobachten, dies ist auf die deutlich verringerte Oberflächenspannung und Viskosität der Flüssigkeit zurückzuführen.

Bei der Betrachtung der gaseitigen Stoffübergangskoeffizienten zeigt sich ein ansteigender Verlauf mit zunehmender Gasbelastung. Obwohl die Veränderung der Filmoberfläche in den Stoffübergangskoeffizienten berücksichtigt ist, lässt sich ein Einfluss der Flüssigkeitsbelastung feststellen. Vermutlich wird dies durch eine höhere Turbulenz in der Gasströmung durch die größere Frequenz der Perlen verursacht. Bei höheren Temperaturen verschieben sich die Stoffübergangskoeffizienten zu niedrigeren Werten. Es zeigt sich, dass dieses Verhalten nicht allein auf die Veränderung des Diffusionskoeffizienten zurückzuführen ist, es wird zusätzlich ein Einfluss der temperaturbedingt veränderten Filmstruktur auf die Gasphase vermutet (s. Abb. 2).

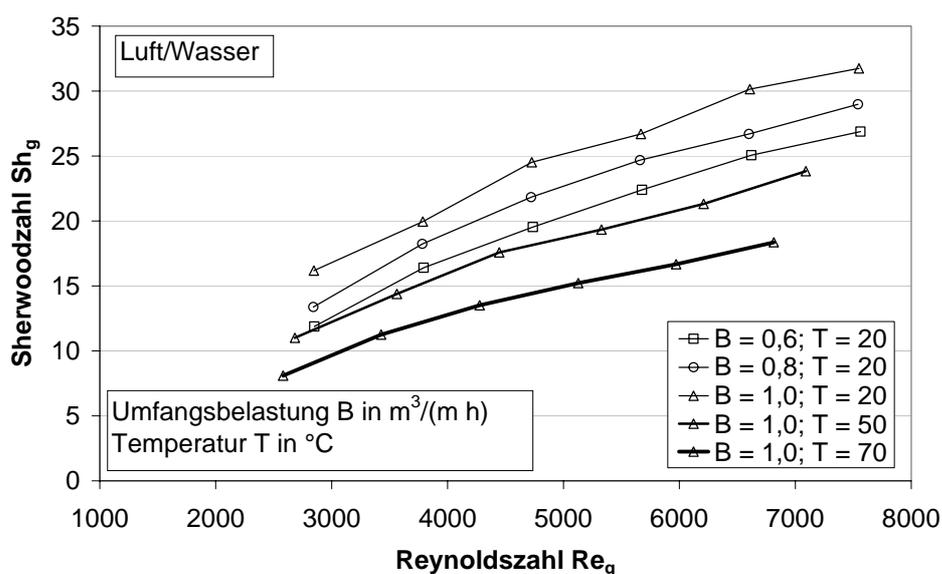


Abb. 2. Gasseitige Sherwoodzahl in Abhängigkeit von der Reynoldszahl der Gasphase für unterschiedliche Umfangsbelastungen und Temperaturen

Konzentrationsprofile in trocknenden flüssigen Beschichtungen auf kreiszylindrischen Substraten

Klaus Czaputa, Günter Brenn, Walter Meile, Technische Universität Graz

Institut für Strömungslehre und Wärmeübertragung, 8010 Graz, Österreich

Email brenn@fluidmech.tu-graz.ac.at, meile@fluidmech.tu-graz.ac.at

Optische Fasern und Metalldrähte werden für viele Anwendungen beschichtet. Die Beschichtung geschieht durch Trocknung eines Auftrags einer Polymerlösung auf dem kreiszylindrischen Substrat. Die vorliegende Arbeit behandelt den Stofftransport in der schrumpfenden flüssigen Schicht während der Trocknung (Abb.1). Zur Beschreibung des gaseitigen Stofftransports gilt auch für die zylindrische Beschichtung ein d^2 -Gesetz; bei konstanter Sherwood-Zahl nimmt die Querschnittsfläche der Schicht linear mit der Zeit ab. Die Stoffbewegung in der Flüssigkeit wird durch Diffusionsgleichungen für die Massenanteile der Flüssigphasenkomponenten beschrieben, die mit dem Crank-Nicolson-Verfahren numerisch gelöst werden. Für den Fall mit verschwindendem Substratradius $b=0$ (Filamenttrocknung) existiert eine analytische Lösung. Radiale Profile der Gemisch-Massenanteile werden bei gegebenem Verhältnis von flüssigseitigem Diffusionskoeffizienten D zur Schrumpfrate des Beschichtungsquerschnitts $\gamma = -da^2/dt$ für variierende Zeit berechnet. Erwartungsgemäß entstehen nahe der Flüssigkeitsoberfläche bei schnellem Trocknen steilere Konzentrationsprofile als bei langsamem Trocknen (Abb. 2 für Lösung von Polyvinylalkohol in Wasser). Für das Filament in Abb. 2a stimmen die numerisch errechneten Profile des PVA-Massenanteils bereits bei grober räumlicher Diskretisierung sehr gut mit der analytischen Lösung überein. Im Fall dünner Beschichtungen (Abb. 2b) erfolgt die Trocknung des Beschichtungsvolumens bedingt durch den beschleunigten diffusiven Transport nahezu unabhängig von der Verdunstungsrate und homogen; die Profile des PVA-Massenanteils sind flach. In dem Vortrag wird gezeigt, dass für diesen Trocknungsvorgang eine Darstellung des Systemverhaltens analog den Gröber-Diagrammen bei der instationären Wärmeleitung entsteht.

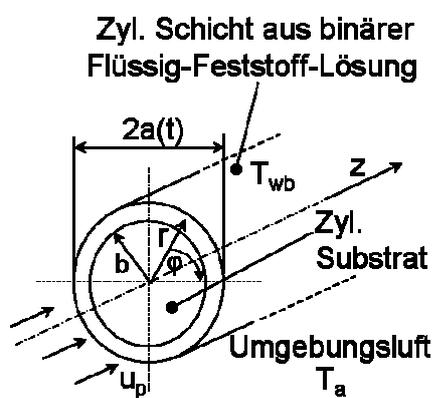


Abb.1: Schichttrocknung

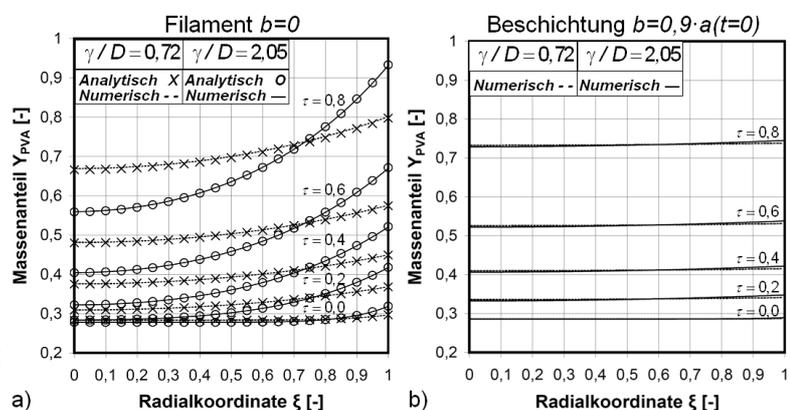


Abb.2: Radiale Profile des PVA-Massenanteils

Oberflächendeformation aufgrund von oberflächenspannungsgetriebenen Stoffströmen während der Prozessierung flüssig applizierter Polymerbeschichtungen

Joachim Krenn, Philip Scharfer, Wilhelm Schabel

Institut für Thermische Verfahrenstechnik, Bereich Thin Film Technology (TFT)

Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe

Die Prozessierung aus der flüssigen Phase applizierten Polymerschichten ist ein wichtiger Verfahrensschritt zur Herstellung hochwertiger Produkte. Die Anforderungen an solche Schichten bezüglich Homogenität, Filmdicke und Oberflächenbeschaffenheit sind dabei sehr hoch. Inhomogene Temperatur- und Konzentrationsverteilungen während der Trocknung können zu Oberflächen- deformationen der flüssig applizierten Polymerbeschichtungen führen.

Als Arbeitshypothese wird davon ausgegangen, dass die beobachtete Strukturierung durch Konvektionsvorgänge erfolgt. Theoretische Überlegungen zeigen, dass bei den betrachteten Schichtdicken (unter 1 mm) als treibende Kraft für die Konvektion nur Oberflächenspannungskräfte in Frage kommen. Aufgrund der Temperatur- und Konzentrationsabhängigkeit der Oberflächenspannung können bei lateral inhomogener Trocknung starke laterale Oberflächenspannungsgradienten auftreten.

Um ein besseres Verständnis der beobachteten Strukturbildung zu erlangen, wurde die inhomogene Trocknung und die dabei auftretenden Konvektionsvorgänge experimentell untersucht sowie parallel mit Hilfe eines kommerziell erhältlichen CFD- Softwarepaketes simuliert. Oberflächenstrukturen, die unter anderem durch aufgeprägte Temperaturgradienten in Folge unterschiedlicher Substratmaterialien entstehen, werden in dieser Arbeit mit Hilfe einer optischen Methode visualisiert. Diese basiert auf der Auswertung von Bildern eines Punktmusters unter der Polymerfilmoberfläche (Digital Image Correlation-Methode). Die aus diesen Messungen gewonnenen Informationen geben Aufschluss über den zeitlichen Verlauf der Strukturbildung und sollen als Validierung einer angestrebten CFD-Simulation genutzt werden. Erste Schritte zur Implementierung (in CFD) einer freien Oberfläche, an welcher Oberflächenspannungen und die Verdunstung eines Lösemittels berücksichtigt werden müssen, wurden bereits durchgeführt.

Experimental and numerical investigation of capillary driven free surface oscillations of liquid argon under non-isothermal conditions

*Nikolai Kulev, Michael Dreyer,
ZARM /University of Bremen,
Bremen/Germany*

Knowledge of dynamic behaviour of cryogenic fluids under microgravity is of key importance for the management of cryogenic propellants in space vehicles.

In this work we present experimental and numerical investigations of the capillary driven free surface oscillations of liquid argon ($T_{\text{sat}} = 87.3\text{K} @ 1\text{atm}$) under non-isothermal boundary conditions. Such oscillations take place during the reorientation of the equilibrium position of the free surface upon step reduction of gravity. The aim was to investigate the impact on the reorientation when the main capillary flow is superimposed in the vicinity of the contact line by a flow, induced by thermal effects due to heat flux from the vessel's hot wall towards the cold cryogenic liquid.

The experiments were performed at the Bremen Drop Tower. Axial wall temperature gradients of averaged 0.14 K/mm - 1.82 K/mm towards the free surface were implemented. A general dependence of the system behavior on the value of these gradients was observed. Thus the characteristics of the free surface oscillations vary accordingly. The aperiodic movement of the apparent contact line changes to a periodic one, accompanied by a distinctive change in the vapor pressure increase – hinting to a peak evaporation on the receding contact line. Nucleation boiling in highest range of the axial wall temperature gradients, indicating the formation of wall thermal boundary layers, was also observed. The individual or combined action of the physical mechanisms of Marangoni convection, vapor recoil and evaporation/condensation are to be expected behind the observation. Numerical simulations of the drop tower experiments utilizing the VOF method were exploited in search for the explanation. Simulation results and comparison to the experiment are also presented.

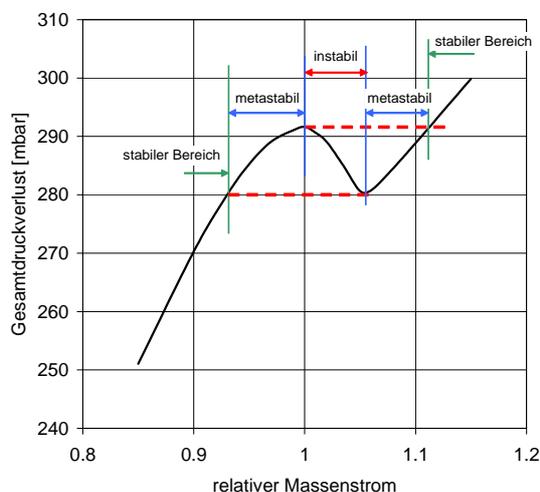
Ledinegg-Instabilität bei Verdampfung von aufwärts strömenden Fluiden: physikalisches Phänomen oder Recheneffekt?

Arndt-Erik Schael, Linde AG - Geschäftsbereich Linde Engineering - Werk Schalchen, Tacherting, Deutschland;

In vielen industriellen Verfahren werden Prozessströme mittels verdampfender Kältemittel abgekühlt oder kondensiert. In kompakten Wärmeübertragern strömen diese vertikal durch den Apparat, wobei das Kältemittel aufwärts strömend verdampft wird. Bei besonders energieeffizienten Anlagen werden Gemischkältemittel mit einem großen Siedebereich eingesetzt, so dass die Temperaturdifferenz zwischen dem abzukühlenden Fluid und dem Kältemittel über der ganzen Verdampfung in etwa konstant bleibt.

Bei einem aufwärts strömenden und verdampfenden Fluid setzt sich der Druckverlust aus verschiedenen Anteilen zusammen. Dies sind der Reibungsdruckverlust der ein- und zweiphasigen Strömung, der hydrostatische Druckverlust über der Verdampferlänge und der Beschleunigungsdruckverlust verursacht durch die Volumenzunahme bei der Verdampfung und der hydrostatische Druckentlastung. Während der hydrostatische Druckgradient mit zunehmendem Strömungsdampfgehalt stetig abnimmt, nimmt der Gradient des Beschleunigungsdruckverlustes stetig zu. Für den Reibungsdruckverlust einer Zweiphasenströmung ist bekannt, dass dieser bei einem bestimmten Strömungsdampfgehalt x (i. a. im Bereich $x = 0,6 \dots 0,9$) ein Maximum besitzt (vgl. u. a. R. Müller-Steinhagen, K. H. Heck: A simple friction pressure drop correlation for two-phase flow in pipes. Chem. Eng. Proc. 20(1986), 297-308). Danach fällt der Reibungsdruckverlust mit steigendem Strömungsdampfgehalt ab bis auf den Wert der reinen Gasströmung bei $x = 1$. Auch ist bekannt, dass dieser Effekt bei niedrigem (reduzierten) Druck stärker ausgeprägt ist als bei hohem.

Berechnet man nun so den Gesamtdruckverlust für verschiedene Massenströme, kann es



vorkommen, dass man den in der Abbildung dargestellten Verlauf errechnet (auch als Ledinegg-Instabilität bekannt): In einem bestimmten Bereich existieren für einen Druckverlust zwei mögliche Massenströme, das System ist also meta- bzw. instabil. Hat ein Verdampfer mehrere parallele Kanäle, so sollten es also Kanäle mit einem höheren und Kanäle mit einem niedrigeren Massenstrom geben. Der experimentelle Nachweis gestaltet sich allerdings als schwierig.

Verdampfung viskoser Reinstoffe in einem scale-up fähigen Fallfilmverdampfer

*Dipl.-Ing. Stefanie Arndt, Prof. Dr.-Ing. Stephan Scholl
Institut für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik,
Technische Universität Braunschweig, Deutschland*

In der produktschonenden Eindampfung von temperatursensiblen Stoffen, wie Lebensmitteln, Natur- und Aromastoffen oder Wirkstoffen, ist die Fallfilmverdampfung eine verbreitete Technik. Die geringen Temperaturdifferenzen zwischen Heiz- und Produktseite, der geringe Druckverlust und die geringe Verweilzeit des Produktes an der heißen Wand machen Fallfilmverdampfer in diesem Bereich zu einem effektiven Werkzeug. Die bisher verwendeten Auslegungsgleichungen für Fallfilmverdampfung in Rohren [1] sind für Prandtl-Zahlen > 7 nur sehr lückenhaft mit experimentellen Daten belegt. Die Anwendung wird empfohlen bis zu einer Prandtl-Zahl von 50. Zuckerlösungen z.B. weisen jedoch bei der Eindampfung Prandtl-Zahlen von 6,5 bis 90 auf [2]. Weiterhin konnte bei Messungen in einem Fallfilmverdampfer in Miniplant-Größe gezeigt werden, dass die Berechnung des Wärmeüberganges insbesondere für $Pr > 30$ die aktuellen Berechnungsvorschriften nicht zutreffen [3].

Um die Berechnungsgrundlagen für die Fallfilmverdampfung insbesondere bei hohen Prandtl-Zahlen zu verbessern, wurde ein scale-up fähiger Einrohr-Verdampfer aus Edelstahl (1.4571) mit den Dimensionen $d_a \times s \times l = 36 \times 3 \times 2500 \text{ mm}^3$ aufgebaut. Reinstoffe mit Prandtl-Zahlen von 1,7 bis 160 werden verdampft um Mischungseffekte und eine Änderung der Stoffdaten über die beheizte Länge zu verhindern. Dabei wird die Film-Reynolds-Zahl zwischen 10 und 2000 variiert. Mit Wärmestromdichten bis zu 35 kW/m^2 wird sowohl der Bereich des Oberflächensiedens als auch der Beginn des Blasensiedens abgedeckt. Dies kann mittels endoskopischer Beobachtung verifiziert werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass für die Messung mit destilliertem Wasser eine gute Übereinstimmung mit den Berechnungsvorschriften nach VDI erreicht wird. Für hohe Prandtl-Zahlen jedoch ist der Wärmeübergang deutlich niedriger als theoretisch berechnet. Es zeigt sich, dass die gegenüber den Untersuchungen von Weise [3] veränderte Fluidynamik und auch die Oberflächeneigenschaften des

Verdampferrohres in dem hier verwendeten Verdampfer einen großen Einfluss auf den Wärmeübergang hat.

- [1] *VDI-Wärmeatlas: 10. Auflage, VDI, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006*
- [2] *Schmidt, Torsten (2000): Viskositäts- und Oberflächenspannungsverhalten von reinen und technischen Saccharoselösungen. Dissertation. Berlin. Technische Universität Berlin*
- [3] *Weise, Felix (2007): Experimentelle Untersuchungen zur Strömung und Wärmeübertragung von Reinstoff-Fallfilmen mit hohen Prandtl-Zahlen. 1. Aufl. Göttingen: Cuvillier (ICTV-Schriftenreihe, 3).*

Blasensieden an makroskopischen Diamant-Heizflächen im Vergleich zu Saphir-, SiC- und konventionellen Heizflächen

Ufuk Bardas, Stephan Uhkötter, Stefan aus der Wiesche

FH Münster, Fachbereich Maschinenbau, Labor für Wärmetechnik

Stegerwaldstr. 39, 48565 Steinfurt, Germany

Bezüglich des Einflusses der thermischen Eigenschaften des Heizwandmaterials auf den Wärmeübergang beim Blasensieden konnte bislang in der Literatur noch keine einheitliche Position gefunden werden. Zudem weisen viele Modellvorstellungen diesbezüglich große Lücken auf, oder enthalten rein empirische Korrekturen, die keine tieferen physikalischen Einsichten gestatten.

Bei den in der Literatur bislang untersuchten Heizwandmaterialien wies Kupfer den höchsten Wert für die Wärmeleitfähigkeit auf. Für Grundlagenuntersuchungen bietet sich aber die Verwendung von Diamant als entsprechende physikalische Obergrenze an. Aufgrund des aktuellen Fortschrittes im Bereich der synthetischen Diamantherstellung konnten makroskopische elektrisch betriebene Diamant-Heizflächen mit 1,5cm Kantenlänge und 1mm Dicke für Grundlagenuntersuchungen zum Blasensieden verwendet werden. Hierbei weist der CVD-Diamant einen sehr hohen Wert für die Wärmeleitfähigkeit auf (bis rund 1800 W/m K) und kann mit identischen Heizflächen aus Saphir und SiC bzw. mit konventionellen Materialien direkt verglichen werden. Mit Hilfe einer Blasensiedezelle für Wasser unter Normaldruck 1bar können Temperaturverteilungen und mittlere Wärmeübergangskoeffizienten für die verschiedenen Heizflächen beim Blasensieden bestimmt werden. Zudem gestattet die Blasenzelle Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Blasendynamik und die Messung des akustischen Spektrums während des Siedevorganges.

Im Beitrag werden die bislang gefundenen experimentellen Ergebnisse sowie deren Interpretation vor dem Hintergrund der vorhandenen Modelle vorgestellt. Zudem wird das Potential des CVD-Diamanten für zukünftige thermisch und geometrisch mikrostrukturierte Hochleistungsverdampferflächen diskutiert.

Direkte Numerische Simulation von Transportprozessen an fluiden Grenzflächen

*Dieter Bothe, Mathematical Modeling and Analysis,
Center of Smart Interfaces, TU Darmstadt*

Inzwischen ist allgemein akzeptiert, dass für eine Effizienzsteigerung in der Produktionslinie verfahrenstechnischer Produkte eine reine Prozessoptimierung allein nicht mehr ausreicht. Vielmehr ist eine Prozessintensivierung gefordert, mit dem Bestreben Edukte und Produkte zum richtigen Zeitpunkt und in der notwendigen Menge an den richtigen Ort zu bringen, zum Beispiel durch signifikante Verbesserung von Wärme- oder Stofftransport. Um dieses Ziel erreichen zu können, ist ein tiefer gehendes Verständnis der lokalen, prozessrelevanten Phänomene unabdingbar. Im Fall fluider Systeme kann die so genannte Direkte Numerische Simulation (DNS) ein wertvolles Instrument bereitstellen, das lokale Daten grundlegender Prozessgrößen wie z.B. Geschwindigkeit, Temperatur und Konzentration beteiligter chemischer Spezies simultan unter Berücksichtigung der vollen Komplexität des jeweiligen Problems liefert. Für zweiphasige flüssig / fluid Systeme ist zusätzlich die Phasentopologie entscheidend, da diese direkt mit überlagerten Transportprozessen wechselwirkt.

Die numerische Erfassung der Phasentopologie erfolgt in der Regel mittels Front- oder Volume-Tracking Verfahren. Mittlerweile werden oft auch zusätzliche Transportprozesse numerische untersucht. In diesem Vortrag werden aktuelle Entwicklungen zur numerischen Modellierung auf Basis der Volume of Fluid (VOF)-Methode bezüglich des Stoffüberganges über deformierbare Grenzflächen und des Einflusses grenzflächenaktiver Substanzen auf das lokale Strömungsfeld aufgrund von Marangonikräften vorgestellt. Dabei werden Möglichkeiten aber auch Grenzen und Schwierigkeiten aufgezeigt. Hier sei exemplarisch die Auflösungsproblematik feinsten Konzentrationsgrenzschichten beim Speziestransport genannt. Um dieses Problem bei der Simulation des (reaktiven) Stoffübergangs aus frei aufsteigenden Luftblasen zu bewältigen, werden verschiedene numerische Techniken wie mitbewegte Rechengebiete, Subgridskalen-Modellierung, lokale Gitterverfeinerung und verbesserte Randbedingungen an künstlichen Gebietsgrenzen kombiniert. Ein weiteres Problem stellen insbesondere bei der Simulation von grenzflächennahen Transportprozessen oder grenzflächengetriebenen Strömungen die so genannten parasitären Strömun-

gen dar, zu deren Reduktion in jüngster Zeit beachtliche Fortschritte erzielt worden sind.

Neben der numerischen Umsetzung gibt es aber weiterhin auch noch offene Fragen bezüglich der zugrunde liegenden mathematisch-mechanistischen Modellierung. Basis bilden hier die kontinuumsmechanischen Bilanzgleichungen, die durch konstituierende Gleichungen für die molekularen Flüsse vervollständigt werden. Letztere sind nur für einfache Situationen ausreichend verstanden, wie z.B. das Fick'sche Gesetz für die Diffusion von verdünnten Spezies. Im Fall mehrkomponentiger Fluide können die Flussgesetze auf Basis der Maxwell-Stefan Gleichungen modelliert werden, wodurch eine realitätsnahe Beschreibung von Kreuzdiffusionen erreicht wird. Gegebenenfalls müssen sogar individuelle Impulsbilanzen verwendet werden. Eine weitere Frage bei der Modellierung resultiert aus dem Fakt, dass aus der standardmäßig verwendeten vereinfachenden Annahme des lokalen thermodynamischen Gleichgewichts an der Phasengrenze nicht das lokale chemische Gleichgewicht folgen muss. Selbst im Fall einer vernachlässigbaren Entropieproduktion auf der Grenzfläche müssen chemische Potentiale über die Phasengrenze hinweg nicht stetig sein.

Das durch die DNS von Transportprozessen gewonnene Wissen erlaubt z.B. die Entwicklung verbesserter Schließungsterme, die dann in vereinfachenden, skalenreduzierten CFD-Ansätzen wie dem Euler–Euler oder dem Euler–Lagrange–Modell genutzt werden können, um etwa für eine Prozessoptimierung den Gesamtprozess auf der Apparateskala zu simulieren.

Numerische Simulation des Stofftransports über fluide Phasengrenzflächen mittels CFD

Konzept der Continuous-Species-Transfer (CST) Methode

H. Marschall, Christian Schüler, O. Hinrichsen

Catalysis Research Center, Technische Universität München

D-85747 Garching b. München, Germany

1. Einführung

Für die Optimierung und Intensivierung mehrphasiger Prozesse ist das detaillierte Verständnis physiko-chemischer Vorgänge an fluiden Phasengrenzflächen, wie bspw. in Gas-Flüssig-Systemen, von grundlegendem Interesse für das Reaktordesign in der chemischen Verfahrenstechnik.

2. Aktueller Kenntnisstand

Die Computational Multi-Fluid Dynamics (CMFD) entwickelt sich immer mehr zu einem effizienten Werkzeug zur Untersuchung von Strömungen mit freier Oberfläche in Mehrphasen-Reaktoren [1]. Jedoch liegt in dem in diesen Systemen häufig räumlich wie zeitlich vorhandenen großen Skalenunterschied eines der Hauptprobleme für die CMFD (multi-scale CMFD).

Die numerische Simulation des Stofftransports über fluide Phasengrenzflächen (freie Oberflächen) ist eine zentrale Herausforderung an heutige CMFD-Methoden. Diese vermögen es derzeit kaum, die steilen Konzentrationsgradienten (bei hohen Schmidt-Zahlen), die es durch das numerische Verfahren bis zur Bachelor-Längenskala aufzulösen gilt, sowie den sich aufgrund unterschiedlicher Löslichkeit einstellenden Konzentrationssprung an der Phasengrenzfläche (bei hohen Henry-Koeffizienten) simulativ abzubilden.

3. Konzeptueller Ansatz

Als Lösungsansatz wird im Rahmen dieser Arbeit ein kontinuumsmechanischer Ansatz für die Löslichkeit samt zugehörigem Stoffdurchgang basierend auf Haroun et al. vorgeschlagen [2]. Dieser Ansatz überführt das zugrunde liegende Henry'sche Gesetz gemäß der Löslichkeit der übergehenden Stoffspezies in eine Stoffmengenstromdichte über die Phasengrenzfläche. Infolge wird der Konzentrationssprung als kontinuierlicher Effekt über mehrere Rechenzellen verteilt abgebildet. Dies ist in der Volume-of-Fluid (VoF) Methode für die modellhafte Erfassung der Grenzflächenspannungskraft in der Impulsbilanz durch die Continuous-Surface-Force (CSF) Methode [3] eine seit mehreren Jahrzehnten etablierte Verfahrensweise.

Wir haben den originalen kontinuierlichen Grundansatz zur Continuous-Species-Transfer (CST) Methode weiterentwickelt, die es nunmehr vermag, unter Berücksichtigung der Topologie der fluiden Phasengrenzfläche (Flächennormale und

-krümmung) auch den lokalen Stoffmengenstrom richtig zu erfassen. Zudem wird ein ‚multivariate convection scheme‘ eingesetzt, um den gleichzeitigen Stoffdurchgang einer beliebigen Anzahl chemischer Spezies auch dann konsistent beschreiben zu können, wenn sich das zugrunde liegende Konzentrationsmaß zahlenwertig um mehrere Größenordnungen unterscheidet.

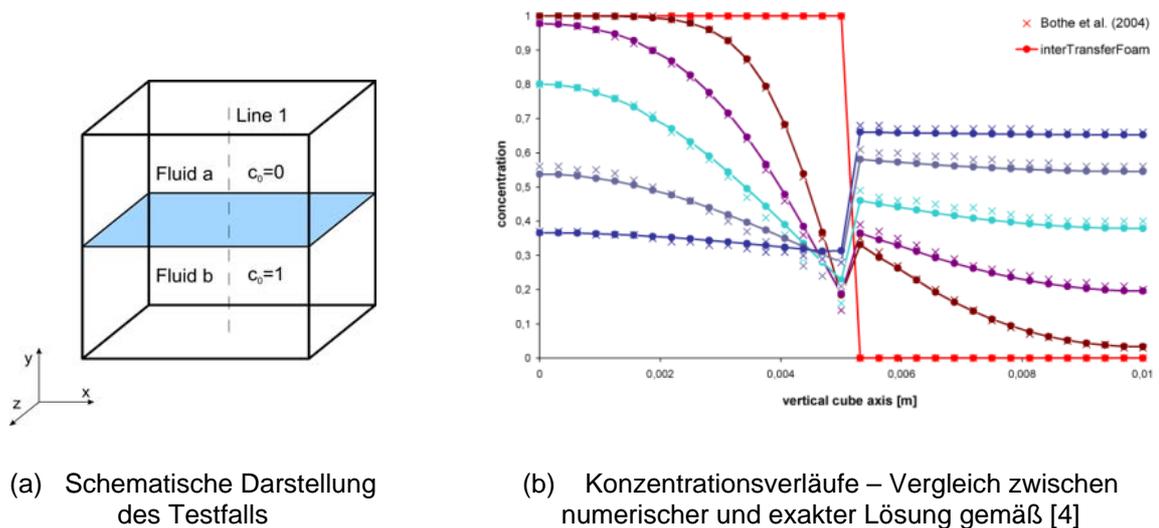


Figure 1 Simulationsergebnisse – CST-Methode

Die Implementierung und Validierung des Modells wurden im OpenSource CFD Softwarepaket OpenFOAM^{®1} vorgenommen, das als flexible und effiziente C++ Bibliothek eine Vielfalt an numerischen Methoden und Verfahren zur Lösung kontinuumsmechanischer Problemstellungen darstellt.

4. Simulationsergebnisse

In Abbildung 1 (a) ist schematisch ein einfacher Testfall zur Validierung der neuen CST-Methode dargestellt. Es handelt sich um einen Würfel mit 1 cm Kantenlänge, der zu Beginn der Simulation zur unteren Hälfte mit Wasser und zur oberen mit Luft gefüllt ist. In beiden Fluiden liegt kein konvektiver Stofftransport vor, da an den Wandungen des Würfels Schlupf-Randbedingungen aufgeprägt und beide Phasen im Strömungsgebiet ruhend initialisiert werden. Des Weiteren werden Benetzungseffekte mit einem Kontaktwinkel von 90° vernachlässigt und eine Stoffspezies gleichverteilt mit einer normierten Konzentration von $\bar{c} = 1$ in der flüssigen Phase initialisiert.

Exemplarisch ist in Abbildung 1 (b) ein Ergebnis als zeitlicher Verlauf der Konzentration mittig im Würfel entlang einer vertikalen Gerade dargestellt. Der Vergleich zwischen der exakten Lösung und dem Simulationsergebnis zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den Erwartungswerten. Im Rahmen eines Vortrags sollen wesentliche Grundzüge des Modells, dessen Implementierung und weitere

¹ OpenFOAM ist ein eingetragenes Warenzeichen von OpenCFD Limited (www.opencfd.co.uk).

Ergebnisse für hohe Schmidtzahlen und Henry-Koeffizienten vorgestellt und erörtert werden.

Literatur

- [1] V.V. Ranade. *Computational Flow Modeling for Chemical Reactor Engineering*, volume 5. Academic Press, 2002.
- [2] Y. Haroun, D. Legendre, and L. Raynal. Direct numerical simulation of reactive absorption in gas-liquid flow on structured packing using interface capturing method. *Chemical Engineering Science*, 65(1):351 – 356, 2010. 20th International Symposium in Chemical Reaction Engineering–Green Chemical Reaction Engineering for a Sustainable Future.
- [3] J. U. Brackbill, D. B. Kothe, and C. Zemach. A continuum method for modeling surface tension. *Journal of Computational Physics*, 100(2):335 – 354, 1992.
- [4] D. Bothe, M. Koebe, K. Wielage, J. Prüss, and H.-J. Warnecke. Direct numerical simulation of mass transfer between rising gas bubbles and water. In M. Sommerfeld, editor, *Bubbly Flows: Analysis, Modelling and Calculation*, pages 159–174. Springer, 2004.

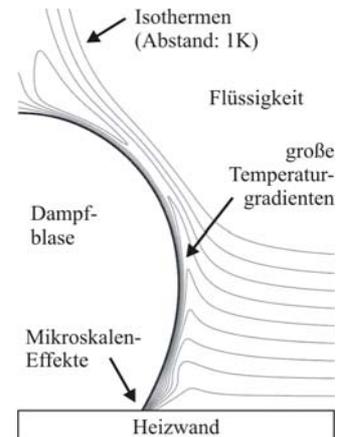
Erweiterung der Volume-of-Fluid Methode in OpenFOAM zur Simulation des Wärmetransports beim Sieden

C. Kunkelmann, P. Stephan

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Technische Thermodynamik

Petersenstraße 30, 64287 Darmstadt

Trotz der weit verbreiteten Nutzung von Siedevorgängen, ist deren Simulation bis heute eine große Herausforderung. Die hauptsächlichen Probleme sind die großen Temperaturgradienten an der Phasengrenze sowie die Mikroskalen-Effekte im Bereich der Kontaktlinie, die beide zu sehr hohen Verdampfungsraten führen (siehe Abbildung). In der Vergangenheit wurden Siedevorgänge meist auf mitbewegten Gittern [1] oder mithilfe der Level-Set (LS) Methode [2] simuliert. Im



Vergleich zur Volume-of-Fluid (VOF) Methode ermöglichen diese Ansätze eine genauere Abbildung der Phasengrenze, sind aber weniger robust und zuverlässig. Als Weiterführung der in [3] vorgestellten Arbeit werden die für die Simulation von Siedevorgängen notwendigen Erweiterungen der VOF Methode in OpenFOAM vorgestellt. Da die genaue Lage der Phasengrenze für die korrekte Berechnung der lokalen Verdampfungsrate immens wichtig ist, wird aus dem VOF-Feld in jedem Zeitschritt iterativ ein LS-Feld berechnet. Hierdurch ist die präzise Rekonstruktion der Phasengrenze und die exakte Berechnung der lokalen Verdampfungsrate bei gleichzeitiger Erhaltung der Robustheit und Massenerhaltung der VOF Methode gewährleistet. Die Mikroskalen-Effekte an der Kontaktlinie werden parametrisiert und in einem an die Simulation gekoppelten Untermodell abgebildet. Das Gesamtmodell wurde verwendet, um das Anwachsen und Ablösen von Blasen an einer Heizwand unter realen Bedingungen zu simulieren. Vergleiche zu experimentellen Daten sind viel versprechend.

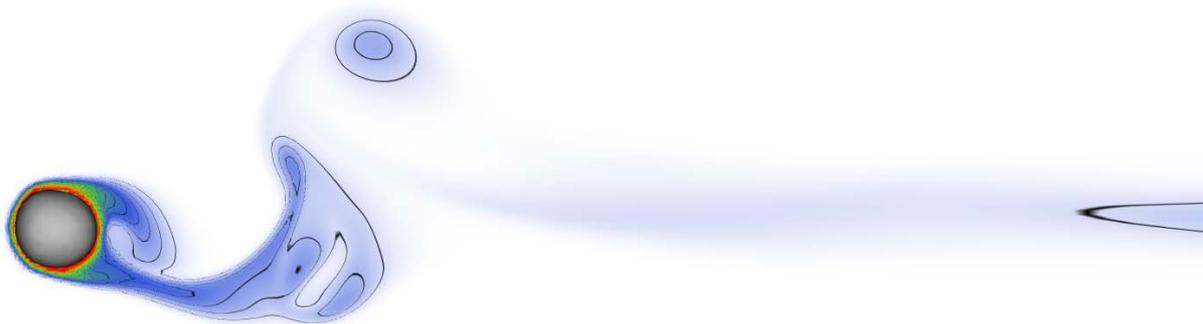
- [1] T. Fuchs, J. Kern, P. Stephan, 2006, A transient nucleate boiling model including microscale effects and wall heat transfer, *J. Heat Transfer*, vol. 128, pp. 1257-1265
- [2] G. Son, V. K. Dhir, N. Ramanujapu, 1999, Dynamics and heat transfer associated with a single bubble during nucleate boiling on a horizontal surface, *J. Heat Transfer*, vol. 121, pp. 623-631
- [3] C. Kunkelmann, P. Stephan, 2009, CFD simulation of boiling flows using the Volume-of-Fluid method within OpenFOAM, *Proc. Int. Conf. Boiling Heat Transfer*

Direkte Numerische Simulation des Verdampfungsverhaltens von angeströmten, verformten Tropfen

Jan Schlottke, Bernhard Weigand

Institut für Thermodynamik der Luft- und Raumfahrt (ITLR), Universität Stuttgart

70569 Stuttgart, Deutschland



Das Verständnis des Wärme- und Stoffübergangs von angeströmten, verformten Tropfen ist für viele technische Anwendungen von großer Bedeutung. Insbesondere für die makroskopische Modellierung der Tropfenverdampfung, z. B. im Rahmen der Spraymodellierung, ist die Kenntnis der bedeutenden Vorgänge notwendig.

Es werden angeströmte, verdampfende Tropfen betrachtet, die sowohl aufgrund der Anströmung als auch aufgrund ihrer initialen Verformung eine oszillierende Bewegung ausführen. Die Simulationsergebnisse liefern detaillierte Informationen zum Schwingungsverhalten und zum Strömungs-, Dampfkonzentrations- und Temperaturfeld außerhalb und innerhalb der Tropfen. Hierbei kann eine starke Abhängigkeit des zeitaufgelösten Stoffübergangs von der momentanen Tropfenform und der resultierenden Umströmung beobachtet werden.

Die Simulationen werden mit dem am ITLR entwickelten Code FS3D durchgeführt. Dabei werden die inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen gelöst, zur Verfolgung der Phasengrenze wird der Volume of Fluid (VOF) Ansatz verwendet. Die Berechnung der Verdampfungsrate erfolgt ohne die Verwendung empirischer

Korrelationen durch direktes Auflösen des Gradienten des Dampfmassenanteils an der Phasengrenze. Die Methode wurde in [1] vorgestellt, bereits veröffentlichte Ergebnisse zum Verdampfungsverhalten verformter Tropfen finden sich in [2].

- [1] J. Schlottke, B. Weigand, Direct numerical simulation of evaporating droplets, *Journal of Computational Physics* 227 (2008), S. 5215-5237.
- [2] J. Schlottke, E. Dülger, B. Weigand, A VOF-Based 3D numerical investigation of evaporating, deformed droplets, *Progress in Computational Fluid Dynamics* 9 (2009), S. 426-435

Modellierung und Simulation des Wärmeübergangs beim Abschrecken mit Flüssigkeitsjets

*Paul Stark, Fabian Krause, Michaela Krauss und Udo Fritsching
Stiftung Institut für Werkstofftechnik (IWT), Bremen, Deutschland*

Hintergrund

An Wälzlagerkomponenten werden hohe Anforderungen in Bezug auf Materialeigenschaften und Präzision gestellt. Ziel des Projekts ist es, fertigungsbedingte Bauteilverzüge bei der Herstellung und Abschreckung von Großwälzlagerkomponenten (Ringe mit $d > 1\text{m}$) zu minimieren, indem direkt aus der für den Umformprozess notwendigen Wärme kontrolliert (asymmetrisch) abgeschreckt wird.

Siedephasen

Die Abschreckung metallischer Bauteile im Flüssigkeitsdüsenfeld wird von Siedevorgängen erheblich beeinflusst. Zu Beginn des Prozesses kann die Temperaturdifferenz zwischen Körperoberfläche und Fluid so hoch sein, dass die entstehenden Dampfanteile nicht direkt von der Strömung abtransportiert werden. Zumindest bereichsweise entsteht ein geschlossener Dampffilm, der geringe Wärmeübergänge bewirkt (Filmsieden). Sinkt die Temperatur des Bauteils, bricht am „Leidenfrostpunkt“ der Dampffilm zusammen. Die Wiederbenetzung der Oberfläche mit Flüssigkeit bei weiter auftretender Blasenbildung ermöglicht sehr hohe Wärmeübergänge (Blasensieden). Bei der Abschreckung von Bauteilen in Flüssigkeiten können diese Siedephasen an verschiedenen Orten auf der Bauteiloberfläche gleichzeitig existieren. Starke Gradienten des Wärmeübergangskoeffizienten sind die Folge, deren Kenntnis entscheidend zur Einstellung der gewünschten Materialeigenschaften ist. Die gezielte Anströmung der Bauteiloberfläche mit Flüssigkeitsjets ermöglicht die zielgerichtete Beeinflussung des Siedeverlaufs und somit auch des Abkühlverlaufs.

Simulationsumfang

Es wird untersucht, inwieweit die Siede- und Abkühlvorgänge bei der Fluidabschreckung in einer transienten Strömungssimulation abgebildet werden können. Zur Berechnung der lokalen Phasenanteile beim Sieden wurde ein Mixture-Modell und zu Vergleichszwecken ein Euler-Euler-Mehrfluidmodell verwendet. Die

Berücksichtigung des Phasenübergangs erfolgt mittels zusätzlicher Quell- und Senkterme in den Erhaltungsgleichungen, die in die Berechnung einbezogen werden. Basierend auf diesen Modellannahmen wird am Beispiel eines rotationssymmetrischen Bauteils der Einfluss von Prozessparametern wie der Anströmrichtung, der Anströmgeschwindigkeit, der Oberflächentemperatur und der Fluidunterkühlung auf den Siede- und Abkühlverlauf analysiert.

Prediction of polydisperse steam bubble condensation in sub-cooled water using the inhomogeneous MUSIG model

*C. Lifante, T. Frank, A.D. Burns, ANSYS Germany GmbH, Otterfing (Germany);
D. Lucas, E. Krepper, Institute of Safety Research, Forschungszentrum Dresden-Rossendorf (Germany).*

The aim of this paper is to present the validation of a new methodology implemented in ANSYS CFX (ANSYS Inc., 2009), that extends the standard capabilities of the inhomogeneous Multiple-size group model (MUSIG) by additionally accounting for bubble size changes due to heat and mass transfer. Bubble condensation plays an important role in sub-cooled boiling or steam injection into pools among many other applications. Since the mass transfer rate between phases is proportional to the interfacial area density, a polydisperse modeling approach considering different bubble sizes is of main importance. Therefore, an accurate prediction of the bubble diameter distribution is required.

The standard MUSIG approach is an inhomogeneous one, which combines the size classes into different velocity groups to precisely capture the different behavior of the bubbles depending on their size. In the framework of a collaboration between ANSYS and the FZ Dresden-Rossendorf (FZD) an extension of the MUSIG model was developed, which allows to take mass transfer due to evaporation and condensation into account in addition to breakup and coalescence effects.

After the successful model verification, the next step was the validation of the new developed model against experimental data. For this purpose a testcase was chosen, which was investigated in detail at the TOPFLOW test facility at FZD. It consists of a steam bubble condensation case in sub-cooled water at a large diameter (DN200) vertical pipe. Sub-cooled water flows into the 195.3 mm wide and 8 m height pipe, where steam is injected at $z=0.0\text{m}$ and is recondensing. The experimental results are published in (Lucas & Prasser, 2006). Using a wire-mesh sensor technique the main characteristics of the two-phase flow were measured, i.e. radial steam volume fraction distribution and bubble diameter distribution at different heights and measurement cross-sections. The main physical parameters of the testcase are: 2 MPa pressure at the end of the pipe, an inlet superficial velocity of 1 m/s for the water and 0.54 m/s for the steam and 3.9 K of water sub-cooling. Due to

the high amount of injected steam of up to local volume fraction of about 30% this case represents a challenge for a CFD computation.

ANSYS CFX 12.0 was used for the numerical prediction. A 60 degrees pipe sector was modeled in order to save computational time, discretized into a mesh containing 260.000 elements refined towards the pipe wall and towards the location of the steam injection nozzles. Interfacial forces due to drag, lift, turbulent dispersion and wall lubrication force were considered.

The numerical results were compared to the experimental data. The agreement is highly satisfactory, proving the capability of the new MUSIG model extension to accurately predict such complex two-phase flow, as it can be seen in the Figures [1, 2].

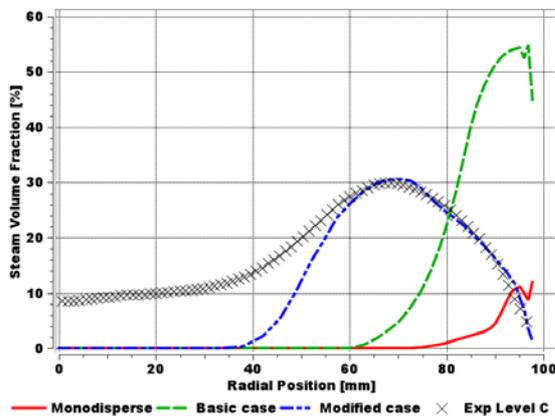


Fig. 1: Radial Steam Volume Fraction Distribution at Level C

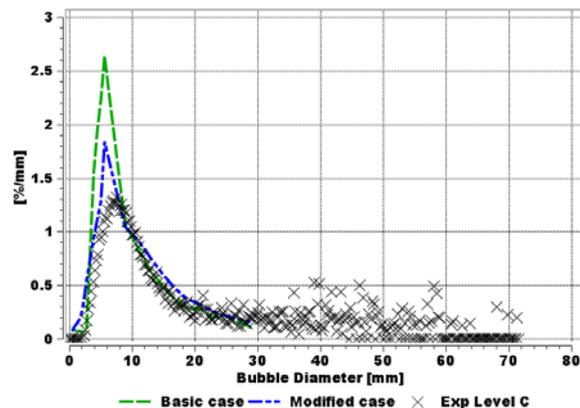


Fig. 2: Bubble Size Distribution (dr_α/dD_B) at Level C

References

ANSYS Inc., ANSYS CFX 12: Users Manual, 2009

Lucas D. and Prasser H-M., Steam bubble condensation in sub-cooled water in case of co-current vertical pipe flow, Nuclear Engineering and Design, Vol. 237, Issue 5, pp. 497-508, 2007

Virtueller Abgassensor

Dipl.-Ing. Marc Brück¹, Dr.-Ing. Sascha Klett¹,

Dipl.-Ing. Stephan Göll³,

*Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Piesche*²

¹ Robert Bosch GmbH, Stuttgart

² Institut für Mechanische Verfahrenstechnik, Universität Stuttgart

³ Institut für Energieforschung (IEF 3 - Brennstoffzellen), Forschungszentrum Jülich

Ansprechpartner: Dr.-Ing. Sascha Klett

Abstract Gesamtvortrag

In Abgasanlagen von modernen Kraftfahrzeugen haben Abgassensoren einen festen Platz. Die relevanten Abgassensoren sind Lambdasonden, Temperatursensoren und zukünftig Partikelsensoren sowie NO_x-Sensoren. Die geringen geometrischen Abmessungen von Abgassensoren gepaart mit den hohen Einsatztemperaturen und mechanischen Belastungen führen zu einem sehr schwierigen und zum Teil unmöglichen experimentellen Zugang zu relevanten Größen für Funktion und Belastung. Aus diesem Grund ist eine optimale Designentwicklung eines Abgassensors nur durch den zusätzlichen Einsatz eines ganzheitlichen Simulationsmodells zur Bestimmung der erforderlichen Größen möglich. Dieser ganzheitliche Ansatz für einen virtuellen Sensor umfasst die Berechnung des Impuls-, Wärme- und Stofftransports von Gasen, Partikeln und Flüssigkeiten im Abgasstrom, innerhalb der Schutzrohre und Schutzschichten bis zu den dynamischen Vorgängen an den Elektroden und im Innern der Feststoffe sowie die Bestimmung der mechanischen Belastungen innerhalb der Sonde, bedingt durch den Einsatz im Kraftfahrzeug und durch Fertigungsprozesse.

Im Rahmen einer Forschungskooperation zwischen der Robert Bosch GmbH, Stuttgart und dem Institut für Mechanische Verfahrenstechnik der Universität Stuttgart wurde ein Simulationsmodell zur Berechnung eines Lambdasonden-Signals unter motorischen Randbedingungen entwickelt. Hierzu wird eine 1D-Ladungswechselsimulation mit einer 3D-Strömungssimulation gekoppelt. An der Oberfläche des Sensorelements werden die zeitabhängigen Verläufe der interessierenden Zustandsgrößen an ein eindimensionales Modell zur Beschreibung des Stofftransports innerhalb des Sensorelements übergeben und das resultierende Sensorsignal berechnet.

Ein Einführungsvortrag gibt einen Überblick über moderne Abgassensoren. Das Konzept des virtuellen Abgassensors wird vorgestellt. In 2 separaten Vorträgen wird auf die Teilprojekte

der CFD-Modellierung und der Modellierung des Stofftransports in der Sondenkeramik eingegangen. Abschließend werden die vorgestellten Arbeiten zusammengefasst, und in den Produktentwicklungsprozess eingeordnet. Es wird eine Betrachtung hinsichtlich wirtschaftlicher und qualitätsbezogener Aspekte durchgeführt.

Abstract 2. Vortrag (Teilprojekt I):

Die Beschreibung des Wärmetransports in Abgassensoren erfordert die Modellierung der WÜ-Mechanismen Konvektion, Wärmeleitung und Strahlung. Zur Modellierung der Strahlungs-WÜ innerhalb der komplexen Schutzrohrgeometrien wurde ein eigenes Strahlungsmodell basierend auf der Netto-Strahlungsmethode nach Poljak in den kommerziellen CFD-Code FLUENT implementiert. Die Validierung erfolgt anhand von Messungen des Temperaturprofils innerhalb eines Sensorelements.

Der Stofftransport wurde anhand experimenteller Untersuchungen an einem Ähnlichkeitsmodell einer Lambdasonde analysiert. Das Ähnlichkeitsmodell unter Berücksichtigung der REYNOLDS-, SCHMIDT- und SHERWOOD-Analogie erlaubt Untersuchungen in maßstabsvergrößerten Plexiglasgeometrien bei Umgebungstemperatur. Mittels der Absorption von Ammoniak und anschließender chemischer Farbreaktion (Braunsteinreaktion) wird die lokal an die Sensorelementoberfläche übergegangene Stoffmenge bestimmt. Hierzu wird die lokale Intensität der Braunfärbung bildanalytisch ausgewertet. Das Ähnlichkeitsmodell erlaubt eine schnelle Parametervariation. Unter Anwendung von Methoden der Statistischen Versuchsplanung wurde ein umfangreiches Versuchsprogramm durchgeführt und ausgewertet.

Zur Modellierung des Stofftransports wurde ein dreidimensionales numerisches Modell des Versuchsstandes erstellt und der Stofftransport an die Sensorelementoberfläche mittels user defined functions in den kommerziellen CFD-Code FLUENT implementiert. Die turbulenten Strömungsfelder werden mit einem geeigneten 2-Gleichungs-Turbulenzmodell berechnet. Der Vergleich zwischen numerischen und experimentellen Ergebnissen ist gut.

Zur Beschreibung des Ladungswechsels und der Abgaszusammensetzung von Verbrennungsmotoren stellt die kommerzielle Software GT-POWER validierte numerische Modelle bereit. Die zeitabhängigen motorischen Randbedingungen in Form des Abgasmassenstroms, dessen Temperatur und Zusammensetzung werden durch eine bidirektionale 1D/3D-Kopplung von Ladungswechselsimulation und Strömungssimulation bei der Berechnung des Impuls-, Wärme- und Stofftransports in einer Lambdasonde berücksichtigt. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Zustandsgrößen an der Oberfläche des Sensorelements.

Abstract 3. Vortrag (Teilprojekt II):

Zur numerischen Berechnung des Sondensignals als Funktion der Abgaszusammensetzung, der thermischen Bedingungen sowie der Sondengeometrie wird der reaktive Mehrkomponenten-Stofftransport im Inneren der Abgassensoren betrachtet. Dies beinhaltet sowohl den Transport des Mehrkomponenten-Abgasgemischs durch eine mikroporöse Keramik bis zu den wirksamen Elektroden als auch die elektrochemische Umsetzung des Restsauerstoffs bzw. der unvollständig oxidierten Kraftstoffkomponenten an der Elektrodenoberfläche. Der gewählte Reaktionskinetikansatz für die Elektrodenreaktion ist vom Arrhenius-Typ, so dass die Abhängigkeit von der Temperatur der beheizten Sensoren berücksichtigt wird. Ebenso wie die Massenerhaltungsgleichungen, welche die Reaktionsquellterme enthalten, werden auch die Impulsgleichungen spezifisch für jede einzelne Spezies formuliert. Nur so lassen sich die an den Mikroporenwänden auftretenden Molekularströmungseffekte adäquat abbilden. Die resultierenden Wandreibungskräfte werden entweder durch Volumenmittelung in einen effektiven Widerstandsterm überführt oder in Form speziesspezifischer Gleitrandbedingungen berücksichtigt. In beiden Fällen wird das resultierende Differenzialgleichungssystem in Anlehnung an das Euler-Euler-Mehrphasenmodell in das kommerzielle CFD-Programm FLUENT implementiert. Ein abgeleitetes, eindimensionales Transportmodell wird zur verkürzten Berechnung außerdem in die Programmierumgebung MATLAB übertragen.

Mit den entwickelten Methoden kann das Sensorsignal für beliebige Abgaszusammensetzungen sowohl unter stationären als auch unter instationären Randbedingungen berechnet werden. Die so erhaltenen Ergebnisse stimmen in hohem Maße mit Messungen überein, die an seriennahen Sensoren durchgeführt wurden. Die numerische Simulation auf der Porenebene zeigt darüber hinaus weitreichende Möglichkeiten zur Strömungscharakterisierung in mikroporösen Strukturen auf.

Gewünschte Vortragszeit 45 Minuten

Numerische Simulation von Zerstäubungsvorgängen in turbulenten Gas-Flüssigkeitsströmungen mittels LES

Peter Renze, Kerstin Heinen

BASF SE, Ludwigshafen, Deutschland

Die Berechnung turbulenter Gas-Flüssigkeits-Zweiphasenströmungen ist in vielen industriellen Anwendungen von großer Bedeutung. Die Beschreibung der physikalischen Phänomene in solchen Strömungen ist seit mehreren Jahren ein Schwerpunkt der akademischen Forschung. Insbesondere bei Zerstäubungsproblemen ist die exakte Modellierung der turbulenten Strömungsstrukturen entscheidend. Die Grobstruktursimulation (Large-Eddy Simulation, LES) hat sich als zuverlässiges Verfahren etabliert, das inzwischen auch für technische Anwendungen eingesetzt werden kann. Im Rahmen der hier beschriebenen Arbeiten werden mehrphasige Strömungssimulationen von Zerstäuberdüsen mit einer Volume of Fluid Methode (VOF) und einem LES Turbulenzmodell durchgeführt. Hierfür wird die CFD-Software OpenFOAM® eingesetzt. Zur Validierung der Turbulenzmodellierung in OpenFOAM® werden verschiedene Testfälle mit wandgebundener und freier Turbulenz simuliert und mit der Literatur verglichen, z.B. ein turbulenter Kanal und ein Freistrah (siehe Abbildung 1).

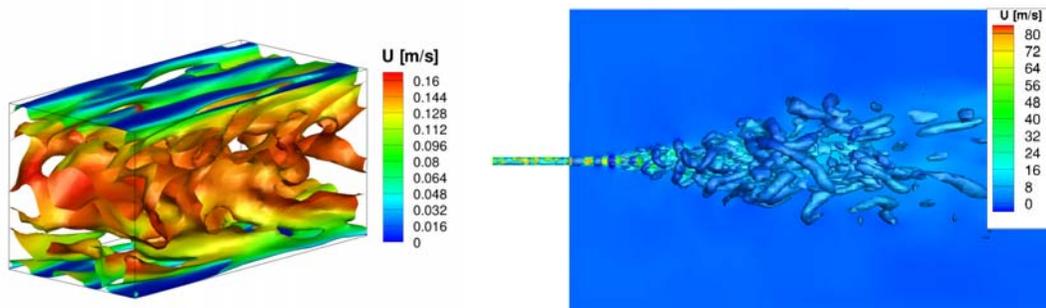


Abb. 1 Ergebnisse der Validierung der Turbulenzmodellierung durch Grobstruktursimulation in OpenFoam; links: Konturen des Geschwindigkeitsfelds im turbulenten Kanal bei $Re_{\tau} = 395$; rechts: Wirbelstrukturen in einem turbulenten Freistrah bei $Re_D = 14000$;

CFD Simulation einer Extraktionskolonne vom Typ Kühni gekoppelt mit PBM

*Mark W. Hlawitschka, Christian Drumm, Matthias Mickler, Hans-Jörg Bart,
TU Kaiserslautern, Kaiserslautern, Germany*

Die Auslegung von flüssig-flüssig Extraktoren mit Hilfe einfacher Modelle, wie dem Gleichgewichtsmodell, kann nur zuverlässig für einen Mixer-Settler durchgeführt werden. Auch die Auslegung über Nichtgleichgewichtsmodelle führt aufgrund der komplexen Vorgänge, wie z.B. Sedimentation, Stofftransport, Koaleszenz und Zerfall zu keinen zufriedenstellenden Ergebnissen.

In der Vergangenheit wurden eindimensionale Simulationen gekoppelt mit Tropfenpopulationsbilanzen (DPBM) durchgeführt. Durch die Kopplung der DPBM mit Simulationen können Aussagen über Koaleszenz und Zerfall getroffen werden.

Eine Kopplung der DPBM mit FLUENT erfolgte zuvor an einer rotationssymmetrischen Geometrie, dem Rotating Disc Contactor (RDC). In dieser Arbeit werden die gewonnenen Ergebnisse auf eine dreidimensionale Geometrie, der Kühni-Miniplant Kolonne mit samt ihren Einbauten, übertragen.

Einphasige und zweiphasige Simulationen der Kühni-Miniplant Geometrie werden ohne, im einphasigen und zweiphasigen Betrieb und gekoppelt mit DPBM im zweiphasigen Betrieb durchgeführt. Das erstellte Modell erlaubt die Benutzung der instationären Sliding Mesh Technik. Die Turbulenz wird durch das realizable $k-\epsilon$ Modell zusammen mit dem Mixture Multiphase Modell beschrieben. Zur Validierung wurden Ein- und Mehrphasenmessungen mit PIV durchgeführt. Die Mehrphasenmessungen wurden durch die Wahl eines iso-optischen Systems aus Calciumchlorid-Wasser/n-Butylacetat ermöglicht. Zweiphasige Simulationen werden mit den in FLUENT Code implementierten Populationsbilanzen, sowie mit dem One Primary One Secondary Particle Modell (OPOSPM) durchgeführt. Die verwendeten Populationsbilanzmodelle werden miteinander, aber auch mit Messergebnissen der Tropfengrößenverteilung verglichen. Diese Arbeit zeigt erste Ergebnisse der genannten Simulationen sowie deren Validierung.

Beschreibung der Grenzflächeninteraktion mit Topologieänderung in Emulgierprozessen

Dipl.-Ing. Fabian Krause, Prof. Dr.-Ing. habil. Udo Fritsching,

Universität Bremen, Bremen, Deutschland

Emulgieren

Das Emulgieren ist eine verfahrenstechnische Grundoperation zur Dispergierung eines Fluids. Grundlage der Emulgierung ist die Neustrukturierung von Grenzflächen durch Desintegration eines Fluidkontinuums, stets gekoppelt mit dem umgekehrten Fall, der Koaleszenz von Fluidphasen/Tropfen. Diese Grenzflächeninteraktionen stellen eine Topologieänderung bezogen auf die Grenzflächenstruktur dar. Die Phaseninteraktion wird bestimmt auf der molekularen Ebene durch die jeweiligen Stoffparameter und durch grenzflächenaktive Substanzen (Emulgatoren), ebenso wie durch die hydrodynamischen Bedingungen.

Numerische Modellierung

Mit herkömmlichen numerischen Methoden lässt sich die Mikrofluidik des Emulgierprozesses phasenaufgelöst berechnen, jedoch mit wesentlichen Einschränkungen in Bezug auf die Wiedergabe der Topologieänderung. Die Analyse von Phasenteilung / Desintegration und Phasenvereinigung / Koaleszenz ist nur eingeschränkt möglich (bspw. in Surface-Tracking-Methoden), oder die Koaleszenz erfolgt stets und unmittelbar bei Annäherung der Phasengrenzen innerhalb einer Gitterzelle (Phase-Fraction-Methoden).

Zur Analyse der Grenzflächeninteraktion mit Topologieänderung wurde eine Kombination aus Phase-Fraction Methode mit einem Surface-Tracking-Algorithmus genutzt. Als Ausgangspunkt dient das Volume of Fluid Modell (VOF). Dieses löst zusätzlich zu der Impuls und Massenerhaltung eine Gleichung für den Phasenanteil γ . Für das Modell wird nun für jedes separate Fluidvolumen ein eigener Phasenanteil γ_i bestimmt. Dies verhindert zunächst eine unmittelbare Koaleszenz beim Kontakt. Aus dem Gradient der Phasenanteile $\nabla\gamma$ wird eine orientierte Grenzfläche bestimmt. Treffen in einer Zelle die Gradienten aufeinander, wird eine zuvor vorgegebene Dynamik zur Beschreibung der Interaktion abgearbeitet, wodurch es zu einer verzögerten Koaleszenz oder zu einem Abgleiten der Phasenflächen (slip / bouncing) kommen kann.

Anwendung

Angewendet wird das Modell zur Simulation des teilweise stabilisierten Emulgiervorgangs an Kapillaren. Aus den lokalen Bedingungen (Fluidodynamik, Kontaktzeit und Kontaktfläche) wird bestimmt, ob es zu a) Anhaftung, b) Abstoßung oder c) Koaleszenz der gebildeten Tropfen der Dispersphase kommt. Koaleszenz wird ermöglicht, indem die Phasenanteile der berührenden Tropfen gleichgesetzt werden. Prozessparameter des Emulgierprozesses werden so abgeleitet.

A coupled pressure based solution algorithm based on the volume-of-fluid approach for two or more immiscible fluids

Kathrin Kissling¹ and Julia Springer²,

Steffen Schütz¹ and Karsten Urban²

Hrvoje Jasak³

¹Institut für Mechanische Verfahrenstechnik, Universität Stuttgart

²Institut für Numerische Mathematik, Universität Ulm

³Wikki Ltd., London, United Kingdom

The current study deals with the problem of describing multiphase systems where neither of the single phases can be regarded as dominant. In the usually applied segregated approach with a constant solution sequence of the equations, the phase for which the equation is solved first is dominating the phase for which the transport equation is solved later. This is a result of the requirement to preserve the boundedness of the volume fraction values. If a cell is already completely filled with one fluid it cannot receive any more fluid of any other phase.

In the present study a coupled solution approach of the equations to describe the transport of the phases and the pressure equations is presented. This new coupled approach avoids the predescribed, numerically induced predominance of a single phase due to the common segregated algorithm.

The system is described by the continuity equation

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0, \quad (1)$$

the equations to model the transport of the i -th volume fraction α_i

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{U} \alpha_i) = 0, \quad (2)$$

and the volumetric averaged momentum balance

$$\frac{\partial (\rho \vec{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho \vec{f} + \sum_{i=1}^N \sum_{k=i+1}^N \vec{F}_{ik} \quad (3)$$

with the viscous stress tensor τ , an arbitrary mass related force \vec{f} and \vec{F}_{ik} , the influence of the surface tension in the formulation of Brackbill [1].

In analogy to the derivation of the pressure equation in PISO or SIMPLE [3], the discretised momentum balance is inserted in the equations to describe the transport

of the N phases (2). While the volume fractions of $(N-1)$ phases are gained by solving the transport equations, the volume fraction of the N -th phase is calculated by applying the closure equation

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1. \quad (4)$$

In contrary to segregated approaches, the equations for pressure and volume fractions are now solved simultaneously in a single step, where the state variable can implicitly depend on other state variables. To achieve a strong coupling between the volume fractions and the pressure, the pressure is treated implicitly in the equations for the volume fractions, while the phase fractions are treated implicitly in the pressure equation. Therefore this modelling approach is especially recommended, if a strong coupling between the regarded phases should be achieved or if three or more phases are present.

The equations for each cell of the system are described in the form

$$A_i \bar{x}_i + \sum_n A_n \bar{x}_n = \bar{S}, \quad (5)$$

where \bar{x}_i are the variable values in the considered cell and \bar{x}_n are the variable values of the neighbour cells. Correspondingly A_i describes the influence of the considered cell and therefore the diagonal elements in the coefficient matrix while A_n describes the offdiagonals which couple the single cells with each neighbour. \bar{S} is the explicit source term for the considered cell.

Due to the coupled approach and the additional implicit dependencies the resulting matrix is larger and has more non-zero entries compared to the matrix in the segregated approach.

In the presentation this algorithm is explained in detail. It is coupled with an economic storage strategy for the entries in the coefficient block matrix [2]. Simulation results will be discussed which show the advantage of this new coupled solution approach compared to the common segregated approach.

- [1] J.U. Brackbill, D. B. Kothe and C. Zemnach: **A Continuum Method for Modelling Surface Tension.** *Journal of Computational Physics* **100**, (1992), pp. 335-354.
- [2] I. Clifford and H. Jasak: **The Application of a Multi-Physics Toolkit to Spatial Reactor Dynamics.** *Proceedings International Conference on Mathematics, Computational Methods & Reactor Physics (M&C 2009).*
- [3] H. G. Weller: **Derivation Modelling and Solution of Conditionally Averaged Two-Phase Flow Equations.** *Technical Report TR/HGW/02, Nabla Ltd, (2002).*

TAU und THETA – CFD in Verkehr, Energie, Luft- und Raumfahrt

Cornelia Seyfert, Roland Kessler, Dieter Schwamborn

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt,

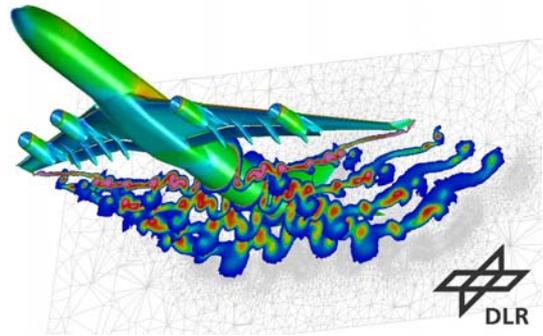
Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik,

C²A²S²E Center for Computer Application in AeroSpace Science and Engineering (C²A²S²E)

Email: cornelia.seyfert@dlr.de

Am DLR wird seit über zwei Jahrzehnten Softwareentwicklung im Bereich CFD betrieben. Daraus resultieren u.a. die Programme TAU und THETA, die bei kompressiblen (TAU) und inkompressiblen (THETA) Strömungen zum Einsatz kommen. Die vielfältigen Funktionen, die implementierten Modelle und die Leistungsfähigkeit beider Codes werden anhand von Beispielen aus den Forschungsbereichen des DLR vorgestellt und erläutert.

Der Antrieb für die Entwicklung von CFD am DLR kommt aus den Feldern der Luft- und Raumfahrt, in denen experimentelle Untersuchungen und Messungen oft mit hohem zeitlichen und finanziellen Aufwand verbunden sind. Dies gilt insbesondere für komplexe Konfigurationen bei großen (Flug-)Reynoldszahlen (Abb). Durch die Nutzung hybrider Gitter kann hier einerseits die komplexe Geometrie behandelt und andererseits der wandnahe Grenzschichtbereich mit guter Genauigkeit aufgelöst werden.



Besondere Aufmerksamkeit gilt dabei der Turbulenz-, Transitions- und Grenzschichtmodellierung. In den TAU Code sind derzeit eine Vielzahl von Ein- und Zweigleichungs-Turbulenzmodellen implementiert, die auf unterschiedlichen Ansätzen basieren. Gleiches gilt für die in den Code integrierten Reynolds-Spannungs-Modelle. Hybride RANS/LES-Ansätze wie DES bieten darüber hinaus die Möglichkeit zur Simulation massiv abgelöster Strömungen, wobei die Untersuchung des Potentials neuer Wege auf diesem Gebiet (z.B. DDES und IDDES) Gegenstand laufender Forschungsvorhaben ist. Die für eine aerodynamische Leistungsvorhersage zunehmend bedeutsame Transition der Strömung in der Grenzschicht kann mit Hilfe der e^N-Methode auch an komplexen Konfigurationen berücksichtigt werden. Ein Zweigleichungs-Transitionsmodell befindet sich derzeit in der Testphase.

Die oft großen Konfigurationen (mehrere Millionen Netzpunkte) erfordern eine hohe Effizienz der Codes, zu der geeignete numerische Verfahren sowie die Parallelisierung der Codes beitragen.

In THETA stehen darüber hinaus Modelle aus den Bereichen der Wärmeübertragung sowie der Mehrphasenströmung zur Verfügung. Die Weiterentwicklung beider Codes auf diesen Gebieten wird in den kommenden Jahren verstärkt in den Fokus rücken.

Der Vortrag soll zu einem interdisziplinären Austausch an Erfahrung und Techniken im Bereich CFD anregen und einen Überblick über die Kompetenzen des DLR auf diesen Gebiet geben. Das DLR verfügt über langjährige Erfahrung in der Handhabung von Turbulenz- und Transitionsmodellen und der dafür notwendigen Grenzschichtmodellierung. Dies trifft auch auf den Grad der Realisierung dieser Modelle zu, welcher eine Anwendung im industriellen Umfeld ermöglicht. Universitäten werden TAU und THETA kostenfrei zur Verfügung gestellt werden. Beide Codes sind modular aufgebaut, erweiterbar und basieren auf der Programmiersprache C.

A CFD-based Numerical Investigation of the Impact of Burner Aerodynamics on the Stability of Swirl Oxycoal Flame

Dobrin Toporov and Reinhold Kneer

*Institute of Heat and Mass Transfer, RWTH Aachen University,
Eilfschornsteinstrasse 18, D-52062 Aachen, Germany*

Replacing air by a mixture of recycled flue gas (mainly CO₂) and oxygen (oxycoal) has gained a justified interest as an option for a significant and relatively quick reduction of emissions from fossil fuel power generation to the atmosphere. However, the combustion of pulverised coal in a CO₂/O₂-atmosphere, due to the changed thermo-physical and radiative properties, leads to modified distributions of temperature, species and radiation fluxes inside the combustion chamber. Utilizing a burner design, which was optimised for coal combustion in air, for oxycoal combustion will lead to flame instability and poor burnout.

The work presents a fluid dynamics approach for oxycoal swirl flame stabilisation, based on a thorough understanding of the underlying interaction between burner aerodynamics and reaction kinetics.

Computational Fluid Dynamics was intensively applied as an investigative method contributing to the development of the design of burners by comparing various burner concepts and operation conditions without having to resort to a large number of expensive experimental tests. For this purpose a numerical model based on adapted for oxycoal conditions models for char burnout, volatiles combustion and gas emissivity was developed [Toporov *et al*, 2008 and Erfurth *et al*, 2009].

Based on this, a swirl burner able to operate at wide range of oxygen concentrations (18-34 vol.-%) under oxycoal conditions as well as under atmospheric ones was designed and experimentally tested. The resulting oxycoal flame is characterized by a strong internal recirculation zone, which draws hot combustion products with a temperature of about 1200 °C back toward the burner inlet. This provides the heat input required for the compensation of the higher c_p of the incoming fresh gas mixture and the endothermic Boudouard reaction. Thus, fast particle heating, drying, release and ignition of the volatiles, and an improved particle ignition and CO₂ gasification of particles are achieved. As a result, the combustion rate in the near-burner region is

enhanced, thereby enabling stabilization and full burnout of an oxycoal swirl flame with oxidizer O₂ concentrations equal to or less than those in air.

Based on the experience accumulated, the oxycoal burner was scaled-up to 120 kW according to the constant residence-time scaling approach and successfully tested in the oxycoal test facility at RWTH Aachen. Further CFD based design of an industrial 70 MW_{th} pulverised fuel swirl burner was made and numerical predictions of its performance in a 1210 MW utility boiler were made with the results focusing on the heat transfer. Numerical analysis based on a non-grey implementation of the Exponential Wide Band Model for local emissivity of the flue gas in an utility furnace operating at oxycoal conditions with different flue gas recycle ratios was carried out. The impact of the O₂ content at the burner outlets and the type of recycling (wet or dry) on the radiative heat transfer in the furnace is discussed with respect to retrofit options.

References

1. Toporov D., P. Bocian, P. Heil, A Kellermann, H. Stadler, S. Tschunko, M. Forster and R.Kneer, Detailed Investigation of a Pulverised Fuel Swirl Flame in CO₂/O₂ Atmosphere, *Combust. Flame* 155 (2008), 605-618
2. Erfurth J., Toporov D., Forster M. and R. Kneer, Numerical Simulation of an Oxycoal Swirl Burner: from Bench to Industrial Scale, 10th Int. Conference on Energy for a Clean Environment, 7-10 July 2009, Lisbon, Portugal, [CD-ROM]

Applikation von OpenFOAM® zur Analyse von Airbag-Gasgeneratoren

Voss, M.*, Kato, A.**, Bartsch, P.*, Heym, A.**

*Beuth Hochschule für Technik, Berlin

**TAKATA-PETRI AG

Ein wesentlicher Aspekt bei der Optimierung von Airbag-Gasgeneratoren ist die genaue Kenntnis des zeitlichen Verlaufs des durch die Verbrennung erzeugten Gasmassenstroms sowie dessen thermische Zustandsgrößen.

Ein neuer Weg zur Ermittlung dieser Daten ist die Messung des Schubes von Airbag-Gasgeneratoren. Zur Evaluation dieser Methode und des gewählten Prüfaufbaues sind vertiefende Analysen mittels CFD notwendig.

Basierend auf dem OpenSource-Berechnungstool OpenFOAM® wurden numerische Strömungssimulationen durchgeführt, um detaillierte Informationen über den Strömungs-, Temperatur-, Druck- und Dichteverlauf in der Schubdüse zu gewinnen und dadurch die Genauigkeit des Schubtests zu verbessern.

Es wurden unterschiedliche Randbedingungstypen und Stoffdatensätze auf Einsatzfähigkeit und Berechnungsgüte hin untersucht. Es konnte ein Berechnungsaufsatz erstellt werden, der sowohl die benötigten zeitlich variablen Eintrittsbedingungen als auch die erforderlichen physikalischen Modelleigenschaften enthält. Die Ergebnisse der OpenFOAM-Berechnungen werden mit Messdaten und mit Ergebnissen des kommerziellen Strömungslösers ANSYS CFX® verglichen.

Numerische Berechnung der Signalentstehung in Lambdasonden mit einem fluiddynamischen Ansatz

Stephan Göll, Manfred Piesche

Institut für Mechanische Verfahrenstechnik, Universität Stuttgart

Breitband-Lambdasonden dienen zur quantitativen Online-Messung der Abgaszusammensetzung in Kraftfahrzeugen. Die numerische Berechnung des zugehörigen Sondersignals als Funktion der Abgaszusammensetzung, des Drucks, der Temperatur sowie der Sondengeometrie ist Gegenstand der hier vorgestellten Arbeit. Entsprechend besteht die Aufgabe darin, den reaktiven Mehrkomponenten-Stofftransport im Inneren der Abgassensoren abzubilden. Dieser umfasst

- den konvektiven und diffusiven Transport des Abgasgemischs durch eine mikroporöse Keramik bis zu den aktiven Elektroden und
- die elektrochemische Umsetzung des Restsauerstoffs bzw. der unvollständig oxidierten Kraftstoffkomponenten an der Elektrodenoberfläche.

Es werden sowohl die Kontinuitäts- als auch die Impulserhaltungsgleichungen spezifisch für jede einzelne Spezies formuliert. Nur so lassen sich die an den Mikroporenwänden auftretenden Molekular- und Gleitströmungseffekte adäquat in den Kräftebilanzen abbilden. Die resultierenden Wandreibrungskräfte werden entweder durch Volumenmittelung in einen effektiven Widerstandsterm überführt oder in Form spezies-spezifischer Gleitrandbedingungen berücksichtigt. Das resultierende Differenzialgleichungssystem wird in Anlehnung an das Euler-Euler-Mehrphasenmodell in das kommerzielle CFD-Programm Fluent© implementiert. Außerdem wird ein davon abgeleitetes, eindimensionales Transportmodell in die Programmierumgebung Matlab® übertragen. Wegen der Beheizung der Sensoren muss auch der Temperatureinfluss berücksichtigt werden. Dies geschieht durch temperaturabhängige Stoff- und Transportkoeffizienten sowie einen Reaktionskinetikansatz vom Arrhenius-Typ.

Mit den entwickelten Methoden kann das Sensorsignal für beliebige Abgaszusammensetzungen sowohl unter stationären als auch unter instationären Randbedingungen berechnet werden. Die Ergebnisse stimmen gut mit Messdaten überein, die an seriennahen Sensoren gewonnen wurden. Die numerische Simulation auf der Porenebene ermöglicht darüber hinaus, Strömungen und Gasdiffusionsvorgänge in mikroporösen Strukturen volumenaufgelöst zu untersuchen.

Turbulence models for complex flows based on wavelets

Henning Bockhorn, Jordan A. Denev, Carlos J. Falconi and Emmerich Tempfli

University of Karlsruhe (TH), Karlsruhe, Germany

Introduction

Complex industrial flows are featured by high Reynolds numbers and consequently by time- and length scales which span many orders of magnitude. When additionally chemical reactions within thin reaction zones occur, like in industrial combustion devices, the time- and length scales become even smaller and numerical modelling becomes quite difficult. In that case models which are capable of capturing a wide range of scales – like the ones based on wavelets - offer a great potential for adequate modelling of the physical processes in turbulent flows.

Wavelet models for industrial flows with complex geometry

Wavelet models are based on a multi-resolution approach. Similar to multigrid methods, the original signal in the physical space is presented on a sequence of finer grids. Therefore original wavelet decompositions require the utilization of structured numerical grids for which the number of points in each spatial direction is a power of 2 (e.g. 4, 8, 16, 32 etc.). Such an approach turns out to be beneficial for certain kinds of flows (e.g. flows away from rigid walls), but it is not applicable to engineering applications with complex geometry. The present work shows the development and utilization of several different wavelet-based subgrid-scale models for Large Eddy Simulations of flows with complex geometry.

Results

In the presentation the idea of wavelet models for the use in Large Eddy Simulations is shown and explained based on simple examples. Then numerical results for turbulent flows with increasing complexity are presented, including the TECFLAM burner. The models can easily be incorporated in existing codes which support Large Eddy Simulations of flows with complex geometry. The algorithms for the models require CPU-times which are comparable to those of the standard Smagorinsky model. Very good accuracy of the results is achieved by the new models.

Numerische Berechnung des Transport- und Abscheideverhaltens von Partikeln an Fasern durch Kopplung von CFD und DEM

Martin Schilling¹, Thilo Müller², Martin Lehmann², Steffen Schütz¹, Manfred Piesche¹

¹Universität Stuttgart, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik

²Universität Karlsruhe, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik

schilling@imvt.uni-stuttgart.de

Das Abscheideverhalten von Partikeln an Filterelementen hat einen signifikanten Einfluss auf den Abscheidegrad und die Lebenszeit der Filterelemente. Zur Berechnung des Abscheidegrades für unbeladene Fasern wird zunächst das

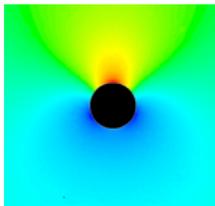


Abb. 1

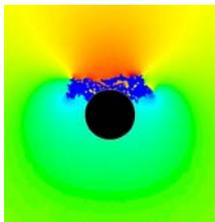


Abb. 2

Strömungsfeld um die Faser berechnet. Abbildung 1 zeigt qualitativ das Profil des statischen Drucks bei einer Stokeszahl von 0,9. Anschließend erfolgt die Berechnung der dispersen Partikel durch Verwendung eines Mehrphasenmodells, beispielsweise des Euler-Lagrange-Modells. Durch eine Erhöhung der Konzentration der aufgegebenen Partikel und durch ein größeres zeitliches Beladungsintervall steigt die Partikelkonzentration an der Oberfläche der Faser. Dadurch formieren sich Ablagerungsstrukturen in Form von Dendriten. Die Partikelablagerungen führen zu einer lokalen Änderung des Strömungsfeldes im Nahbereich der Faseroberfläche. Zur Berücksichtigung dieser Ablagerungen wurde das Euler-Lagrange-Modell durch ein Ablagerungsmodell erweitert [1]. Dadurch ist es möglich, in den durch die abgelagerten Partikel aufgefüllten Rechenzellen Senkenterme zu implementieren. Abbildung 2 zeigt die Ablagerungsstrukturen für eine Stokeszahl

von 0,9 und das resultierende Profil des statischen Drucks.

Die Wiederablösung von Partikeln sowie die Umlagerung von Partikeln innerhalb der Dendriten kann dabei nicht berücksichtigt werden. Daher werden die bestehenden Modellansätze durch Kopplung des CFD-Lösers FluentTM mit dem Programm



Abb. 3

EDEMTM, welches die Partikelbewegung auf Basis der Discrete-Element-Methode (DEM) berechnet, erweitert. Die Restrukturierung der dendritischen Strukturen und die Wiederablösung bereits abgeschiedener Partikel kann mit dieser Methode realistisch abgebildet werden. In Abbildung 3 sind für eine Faseranordnung die Ablagerungsstrukturen dargestellt. Realisiert wurde eine Euler-Euler-Kopplung zwischen CFD und DEM. Ziel der Untersuchungen ist eine realistische

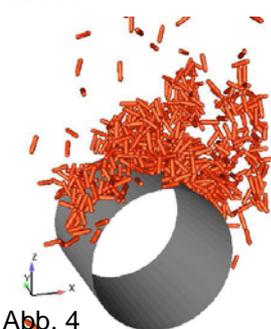


Abb. 4

Bestimmung des Abscheideverhaltens und des Abscheidegrades einzelner Fasern für zunächst kugelförmige Partikel. Abbildung 4 zeigt zudem, dass diese Methode nicht auf kugelförmige Partikel beschränkt ist, sondern auch auf nicht kugelförmige Partikel angewendet werden kann.

[1] Lehmann, M.: Untersuchungen zur Struktur und zur Beladungskinetik von Tiefenfiltern. Dissertation, Universitätsverlag Karlsruhe, 2005

Gekoppelte DEM-CFD-Simulation zur Validierung von Laborreaktoren

T.Eppinger, K. Seidler, M. Kraume

Fachgebiet Verfahrenstechnik, Technische Universität Berlin

Die Oxidative Kopplung von Methan (OCM) zu Ethen ist ein Verfahren zur stofflichen Nutzung von Methan. Es repräsentiert eine ganze Klasse von Einschrittverfahren, deren Hauptvorteil im Wegfall eines energieintensiven Zwischenschritts zur Erzeugung eines Intermediats liegt. Im Rahmen des Exzellenzclusters Unicat wird u. a. die OCM an Li/MgO-Katalysatoren untersucht. Vergleiche experimenteller Messungen im Laborreaktor mit beschichteten Kugeln und numerischer Simulationen unter der Annahme von Plugflow-Bedingungen zeigen sehr starke Unterschiede bezüglich des axialen Konzentrations- und Temperaturverlaufs.

Zur Überprüfung der Gültigkeit der Plugflow-Annahme werden orts aufgelöste CFD-Rechnungen durchgeführt. Dabei wird unter Verwendung der DEM (Discrete Element Method) eine Kugel-Schüttung mit dem Programm STAR-CD erzeugt. Die Partikel-Koordinaten werden dann zusammen mit den Partikeldurchmessern exportiert und in einem weiteren Schritt mit einem Solid-Modeller in eine CAD-Geometrie umgewandelt. Schließlich wird diese Geometrie in das CFD-Programm STAR-CCM+ importiert und dort vernetzt, gerechnet und ausgewertet. Der gesamte Prozess wird automatisiert von einem Skript in Abhängigkeit einiger weniger Parameter wie Partikelanzahl, Stoffwerte und Geometrieabmessungen gesteuert.

Bei der Vernetzung der Schüttung stellt sich das Problem, dass an den Berührungspunkten der Partikel untereinander wie auch an den Berührungspunkten der Partikel und der Wand stark deformierte Zellen entstehen. In der Literatur werden hierzu verschiedene Alternativen vorgeschlagen: Ein Verkleinern der Partikel ermöglicht eine Volumenvernetzung zwischen den Kontaktpunkten. Eine Vergrößerung des Radius führt zu einer Überlappung der Kugeln und damit zu einem größeren Kontaktwinkel, der wiederum eine bessere Zellqualität in diesem Bereich ermöglicht. Beide Verfahren beeinflussen die Porosität, sodass nachträglich eine

Korrektur erfolgen muss. Bei der hier verwendeten Vernetzung werden die Partikel in der Nähe der Kontaktpunkte abgeflacht. Damit kann eine Zellschicht zwischen den Partikeln erzeugt werden. Der Einfluss auf die Porosität ist vernachlässigbar klein, ebenso wird der Druckverlust kaum beeinflusst, da die Strömungsgeschwindigkeit in der Nähe der Kontaktpunkte gering ist.

Die Ergebnisse der orts aufgelösten Simulationen zeigen eine gute Übereinstimmung mit Literaturwerten bezüglich der lokalen Porosität in axialer und radialer Richtung sowie der globalen Porosität über die ganze Schüttung. Der ermittelte Druckverlust stimmt gut mit Literaturwerten überein und ist deutlich genauer als berechnete Druckverlustwerte nach der Ergun-Gleichung. Darüber hinaus zeigt sich, dass im untersuchten Bereich eine deutliche Strömungsungleichverteilung mit einer hohen Randgängigkeit vorliegt.

CFD Modellierung einer Überschall-Quenche

*T. Rakej, K. Schaber, Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik,
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe/D*

Durch die Expansion von heißen Prozessgasen in den Überschall können Abkühlraten in der Größenordnung von $dT/dt = -10^6$ K/s erreicht werden. Auf Grund der kurzen Verweilzeiten im kritischen mittleren Temperaturbereich und der Homogenität der Abkühlung eignet sich dieses Verfahren insbesondere für die Nanopartikelerzeugung. Die notwendige Reduzierung der spezifischen Enthalpie der Gasströmung erfolgt durch die Eindüsung von Wasser in den Überschallbereich mit sich anschließender Totalverdampfung. Dies verhindert ein erneutes Ansteigen der Temperatur. Im Zuge des DFG-Verbundprojektes der „Gasdynamisch initiierten Partikelerzeugung“ wird dieses Konzept bereits erfolgreich eingesetzt und detailliert untersucht. Für ein besseres Verständnis der komplexen zweiphasigen Überschall-/Unterschallströmung wird dieser Gesamtprozess dreidimensional mit Hilfe der Methoden der numerischen Strömungsmechanik (CFD) modelliert. Zur Simulation wird Ansys CFX 11.0 mit einem Euler-Lagrange Ansatz für die Beschreibung des dispersen Systems eingesetzt.

Modellierung der Querstrahleindüsung in eine Überschall Gasströmung

Die Eindüsung des Wassers erfolgt im Prozess über Einstoffdüsen senkrecht zur Strömungsrichtung, um eine ausreichende Eindringtiefe zu erzielen. Zur Modellierung wird der Strahl über Tropfen vom Durchmesser der Einstoffdüse abgebildet, deren Verkleinerung anhand von sekundären Tropfenzerfallsmodellen berechnet wird. Da der Impulsaustausch am Düsenaustritt unter anderem auf Grund der Modellannahmen nicht korrekt wiedergegeben werden kann, wird die Eindringtiefe des Wassers über die Verringerung des Eintrittsimpuls der Lagrange-Phase an experimentelle Ergebnisse und an Strahlkontur-Korrelationen angepasst. Durch die Verwendung einer Zwei-Wege Kopplung werden die Verdichtungsstöße an der Strahlkontur des Wassers berücksichtigt. Auf diese Weise kann die makroskopische Phasenverteilung sowie die Rückwirkung auf die Gasphase modelliert werden, welches durch Direktvergleich von Simulation und Kaltgas Experiment validiert wurde.

Die Übertragung der Querstrahleindüsung auf die Heißgas Überschall-Quenche unter Einbeziehung der Verdampfung des Wassers ermöglicht die Berechnung der Verteilung der statischen Temperatur. Das Modell ist in der Lage die hierfür entscheidenden Parameter lokal aufzulösen und die Verknüpfung von gasdynamischer Abkühlung und Reduzierung der spezifischen Enthalpie durch die Verdampfung herzustellen. In Bild 1 ist dies anhand des Ma-Zahl Verlaufs dargestellt. Der Temperaturverlauf entlang einer charakteristischen Stromlinie verdeutlicht, dass die Verdampfung erneute Temperaturspitzen im Unterschall vermeidet. Das Modell ist somit in der Lage die Phasenverteilung zu beschreiben, die Rückkopplung auf die Gasphase in Form von Verdichtungsstößen zu berücksichtigen und die Verdampfung im Über- und Unterschall zu berechnen.

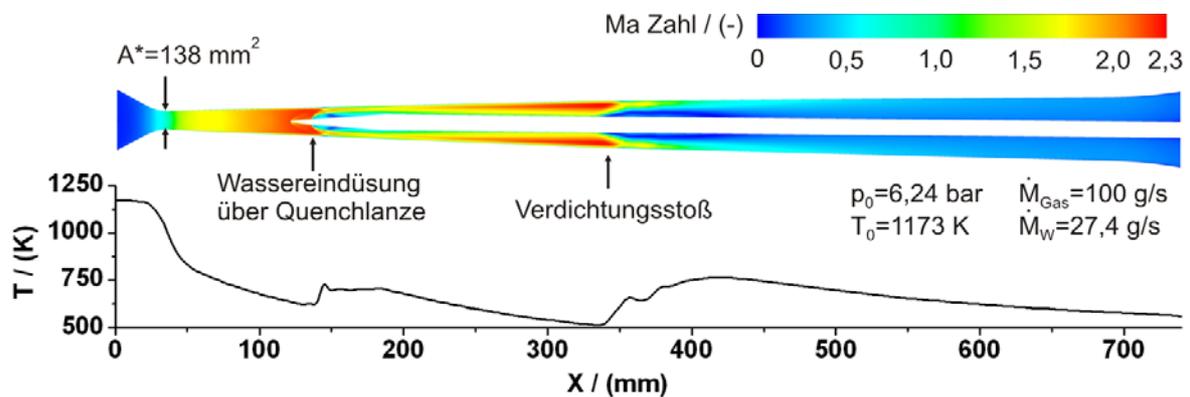


Bild 1: Farblicher Ma-Zahl Verlauf und Temperaturprofil entlang einer Stromlinie

Numerische Berechnung der pneumatischen Förderung mit dem Euler/Lagrange Verfahren

S. Lain¹ and M. Sommerfeld²

¹ *Energetics and Mechanics Department, Universidad Autonoma de Occidente (UAO), Cali, Colombia*

² *Zentrum für Ingenieurwissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, D-06099 Halle (Saale), Germany*

Die pneumatische Förderung wird in vielen Industriebereichen genutzt, um Feststoffpartikel innerhalb von Produktionsprozessen zu transportieren. Für die Auslegung der Förderleitungen ist die Abhängigkeit des Druckverlustes von der Fördergeschwindigkeit, der Staubbeladung als auch der Partikelart entscheidend (Siegel 1991). Derartige Zustandsdiagramme müssen in der Regel experimentell erarbeitet werden.

Eine kostengünstigere und effizientere Möglichkeit eine pneumatische Förderanlage auszulegen besteht in der Anwendung numerischer Berechnungsverfahren für partikelbeladene Strömungen, wie z.B. der Euler/Lagrange Ansatz welcher hier für die numerischen Berechnungen eingesetzt wird. Diese Methode eignet sich besonders für disperse partikelbeladene Strömungen und wenn die Partikelgrößenverteilung von Bedeutung ist. Für zuverlässige Berechnungen ist weiterhin die Modellierung von Elementarprozessen, wie z.B. Partikel-Wandkollisionen und Partikelstöße, besonders für Innenströmungen, von größter Wichtigkeit. Das entwickelte Wandkollisionsmodell berücksichtigt den Einfluss der Wandrauhigkeit auf der Grundlage eines statistischen Ansatzes (Sommerfeld & Huber 1999). Die Kollisionen zwischen Partikeln werden durch ein effizientes stochastisches Modell beschrieben (Sommerfeld 2001). Zur Validierung des Berechnungsverfahrens und der involvierten Modelle wird eine partikelbeladene Strömung in einem Flachkanal betrachtet und die Resultate werden mit Messungen verglichen. Der Druckverlust entlang des Kanals konnte für verschiedene Wandrauhigkeiten und Staubbeladungen sehr gut wiedergegeben werden (Lain & Sommerfeld 2008).

Auf dieser Grundlage wurden dann numerische Berechnungen der pneumatischen Förderung in horizontalen Rohren und in Rohrkrümmern durchgeführt. Insbesondere wurden die Einflüsse von Wandrauigkeit und Partikelkollisionen auf die sich entwickelnde partikelbeladene Strömung analysiert. Es konnte gezeigt werden, dass die Partikel einen entscheidenden Einfluß auf die Sekundärströmung in einem Rohrkrümmer haben, und damit auch den Druckverlust beeinflussen.

Literatur

Lain, S. and Sommerfeld, M.: Euler/Lagrange computations of pneumatic conveying in a horizontal channel with different wall roughness. Powder Technology, Vol. 184, 76-88 (2008)

Siegel, W.: Pneumatische Förderung: Grundlagen, Auslegung, Anlagenbau, Betrieb. Vogel Verlag, Würzburg, 1991.

Sommerfeld, M. and Huber, N.: Experimental analysis and modelling of particle-wall collisions. International Journal of Multiphase Flow, Vol. 25, 1457-1489 (1999)

Sommerfeld, M.: Validation of a stochastic Lagrangian modelling approach for inter-particle collisions in homogeneous isotropic turbulence. International Journal of Multiphase Flows, Vol. 27, 1828-1858 (2001)

Simulation von Filmströmungen

J. Schöck , G. Barroso, R. Wäger, Sulzer Innotec

Filmströmungen an Wänden treten in der Verfahrenstechnik bei unterschiedlichsten Anwendungen auf. Die korrekte Simulation der dabei auftretenden physikalischen Phänomene hilft bei effizienten Auslegungen von verfahrenstechnischen Prozessen und Apparaten. Bei vielen Sulzer Anwendungen sind Wandfilme aktiv oder passiv beteiligt.

In der thermischen Trenntechnik bildet die Flüssigphase auf den strukturierten Packungen von Rektifizierkolonnen einen Wandfilm. Dies führt zu einer Vergrößerung der Phasengrenzfläche und dadurch zu einer Verbesserung des Stoffaustausches zwischen Flüssig- und Gasphase. Im optimalen Fall sind hier alle Wände von einem gleichmässig dicken Wandfilm bedeckt. In der Realität können sich bei zu kleiner Flüssigkeitsbelastung Rinnsale bilden oder im umgekehrten Fall kann bei sehr grossen Flüssigkeits- und Gasbelastungen der Wandfilm instabil werden und Tropfen aus dem Wandfilm gerissen werden. Dies kann im Extremfall zum Fluten der Kolonne führen.

Im Feedbereich der Kolonne oder beim Gasauslass sind Tropfen oft unerwünscht und müssen in Flüssigkeitsabscheidern aufgefangen werden. Dies kann je nach Anwendung in Plattenabscheidern oder in Zyklonen geschehen. In beiden Fällen werden die Tropfen durch die Gasströmung an die Wand geleitet und bilden dort einen Wandfilm, der dann in geeigneter Weise abgeleitet wird. Löst sich der Film an scharfen Kanten wieder von der Wand können neue Tropfen entstehen, die wieder von der Gasströmung mitgerissen werden. Eine korrekte Simulation der Interaktion zwischen Gasströmung, Tropfenflug und Wandfilm ist in diesem Fall wesentlich, um die Abscheiderate bestimmen zu können.

Je nach Anwendung und Ziel der Untersuchung können Wandfilme unterschiedlich modelliert werden. Sind der Wandfilm und die Strömungsverhältnisse im Film von übergeordneter Bedeutung empfiehlt sich eine Euler-Euler Modellierung. In diesem Fall wird sowohl die Gasphase als auch der Wandfilm als kontinuierliche Phase modelliert. Der Nachteil dieses Ansatzes ist, dass er zur Auflösung des Films ein sehr feines Berechnungsgitter in Wandnähe benötigt und, dass die Simulation von Tropfen und die Interaktion zwischen Tropfen und Wandfilm nur schwer möglich sind.

Legt man den Fokus mehr auf das Verhalten der Tropfen in der Strömung empfiehlt sich ein Euler-Lagrange Ansatz. Hier werden die Flüssigkeitstropfen als Partikel modelliert. Schwierig wird es, wenn die Tropfen auf die Wand treffen. Hier können unterschiedlichste Phänomene auftreten. Die Tropfen können einen Wandfilm bilden, sie können an der Wand reflektieren oder in viele kleine Tropfen zerfallen. Dies hängt unter anderem davon ab, ob bereits ein Wandfilm existiert und welche Eigenschaften er besitzt. In diesem Fall ist es sinnvoll den Wandfilm nicht in seiner komplexen 3D Strömung, sondern vereinfacht zu betrachten. Einige CFD-Solver bieten hierfür Modelle an, die ein parabelförmiges Geschwindigkeitsfeld senkrecht zur Wand annehmen. Dadurch vereinfacht sich die Wandströmung zu einem 2 dimensional Problem. Die Parameter, die in diesem Fall den Film beschreiben beschränken sich sind dann auf die mittlere Filmgeschwindigkeit, die Filmdicke und die Filmtemperatur. Ziel dieses Projekts ist, für verschiedene Anwendungen (Packungskolonnen, Flüssigkeitsabscheider) den jeweils optimalen Simulationsansatz zu finden und diese an vereinfachten Geometrien mit Experimenten zu validieren. Erste Ergebnisse zeigen eine vielversprechende Übereinstimmung.

Modellierung und Simulation eines Mikrofallfilmabsorbers

P. Chasanis, A. Lautenschleger, E.Y. Kenig

Universität Paderborn, Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik,

33098 Paderborn, Deutschland

In den letzten Jahren hat sich das Interesse der Industrie und der Forschungsgemeinschaft stark auf das Potential der Mikroverfahrenstechnik konzentriert [1]. Die Mikroverfahrenstechnik zeichnet sich durch den Einsatz von Mikrostrukturapparaten aus, die Strukturelemente im Mikrometerbereich aufweisen. Die geringen Abmessungen bewirken kurze Diffusionswege und ein großes Verhältnis von Oberfläche zu Volumen, wodurch der Wärme- und Stofftransport intensiviert wird.

Eine wichtige Form der Mikroapparate stellen die Mikrofallfilmapparate dar, die eine Phasengrenzfläche bis zu $10000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ aufweisen. In Vergleich dazu betragen die Phasengrenzflächen konventioneller Fallfilmapparate nur 300 bis $600 \text{ m}^2/\text{m}^3$ [2].

In dieser Arbeit wurde die Absorption von CO_2 mittels einer Natriumhydroxidlösung in einem Mikrofallfilmapparat numerisch untersucht. Die Flüssigphase wurde entlang einer Reaktionsplatte, bestehend aus 64 Mikrokanälen mit einer Abmessung von $0,3 \times 0,1 \times 66,4 \text{ mm}$, verteilt. Die Gasphase wurde im Gleichstrom in einer Gaskammer mit einer Tiefe von $5,5 \text{ mm}$ geführt.

Unter der Annahme, dass in allen Mikrokanälen die gleichen Bedingungen herrschen, wurde ein zweidimensionales CFD-Modell zur Beschreibung des Absorptionsprozesses in einem Mikrokanal entwickelt. Die Modellierung gliederte sich in zwei Schritte, wobei im ersten Schritt der Stofftransport vernachlässigt und die exakte Position der Phasengrenzfläche mit Hilfe der Level-Set Methode bestimmt wurde. Anschließend wurde im untersuchten Mikrokanal die Gas- und Flüssigphase in zwei Teilgebiete unterteilt und durch die zuvor ermittelte Phasengrenzfläche mit einander gekoppelt. Die Beschreibung des gesamten Absorptionsprozesses (Fluidynamik und Stofftransport) im untersuchten Mikroabsorber erfolgte für isotherme und stationäre Bedingungen. Als Randbedingung an der Phasengrenzfläche wurden sowohl die Geschwindigkeits- und Scherspannungskontinuität als auch das thermodynamische Gleichgewicht und die Kontinuität der molaren Flüsse des Kohlestoffdioxids implementiert.

Die numerische Untersuchung wurde mit Hilfe des kommerziellen CFD-Tool COMSOL Multiphysics[®] durchgeführt, welches auf der Methode der Finiten Elemente basiert. Mittels experimentellen Untersuchungen aus [3] konnte das entwickelte Modell validiert werden. Die Ergebnisse der Simulation zeigten gute Übereinstimmungen mit den experimentellen Ergebnissen.

Mit dem validierten Modell wurden ausführliche Simulationsstudien durchgeführt, um den Einfluss verschiedener Parameter wie Volumenströme des Lösungsmittels und des Gases sowie die Konzentration des Absorptivs und der NaOH zu untersuchen. Durch diese Studien konnte gezeigt werden, dass der CO₂-Umsatz des Absorptionsprozesses im Wesentlichen durch die Verweilzeit des Gases und die Konzentration der Natriumhydroxidlösung limitiert wird.

[1] Hessel, V., Hardt, S., Löwe, H., 2005. Chemical micro-process engineering, Wiley VCH, Weinheim.

[2] Hessel, V., Ehrfeld, W., Herweck, T., Haverkamp, V., Löwe, H., Schiewe, J., Wille, Ch, 2000. Gas/liquid microreactors: Hydrodynamics and mass transfer, Proceedings of 4th Int. Conf. on Microreaction Technology, pp. 174-186.

[3] Zanfir, M., Gavriilidis, A., Wille, Ch., Hessel, V. 2005. Carbon dioxide absorption in a falling film microstructured reactor: experiments and modeling, Ind. Eng. Chem. Res., 44, 1742-1751.

Simulation eines vereisenden Flugzeugtragflügels

Prof. Dr.-Ing. N. Gilbert, Dipl.-Ing. (FH) O. Rabut, Fachhochschule Kaiserslautern

Während des Fluges unter vereisenden Wetterverhältnissen kann es an ungeheizten Oberflächen zu einem Eisaufbau kommen. Vereiste Tragflächen erfahren eine Erhöhung des Widerstandes und eine Verringerung des Auftriebs. Ohne Gegenmaßnahmen kann der Eisaufbau die Flugeigenschaften derart ändern, dass ein sicherer Betrieb des Flugzeugs nicht mehr gewährleistet ist. Zugelassen für den Flug bei vereisenden Wetterverhältnissen sind daher nur Flugzeuge welche einen sicheren Betrieb unter bestimmten Bedingungen (FAR Part 25, App.C) nachweisen können und durch das Luftfahrtbundesamt (LBA) zertifiziert wurden.

Um Flugeigenschaften unter vereisenden Bedingungen und Enteisungsverfahren testen zu können gibt es unterschiedliche Möglichkeiten:

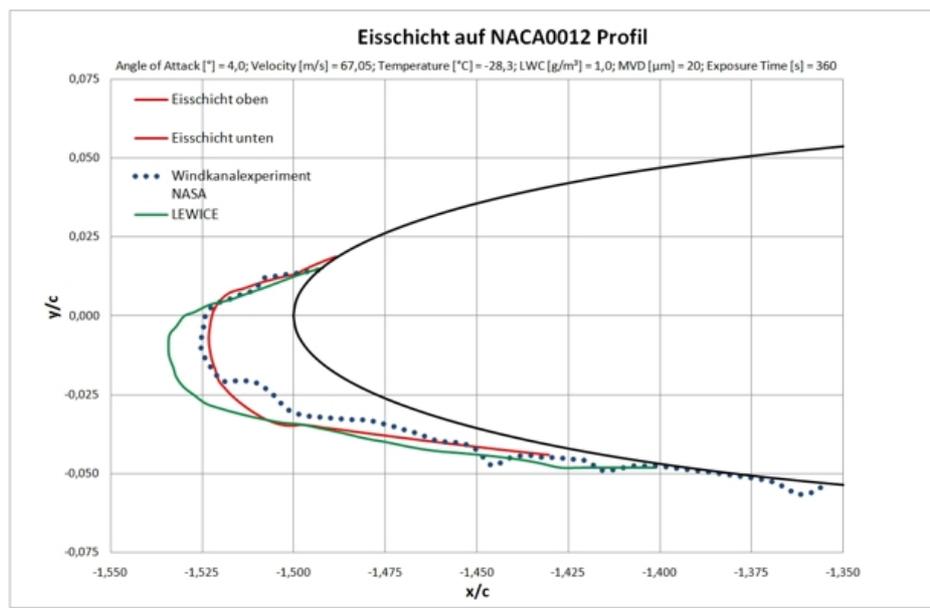
- Testflüge bei kritischen Bedingungen
- Experimente in Klimawindkanälen
- Vereisungssimulationen (CFD)

Ziel des BMBF Projektes „inflight-icing“ an der FH-Kaiserslautern ist es, die wesentlichen Mechanismen der Vereisung in ein kommerzielles CFD-Programm zu implementieren um den Eisaufbau vorherzusagen und daraus den Einfluss auf die aerodynamischen Eigenschaften zu bestimmen.

In einem ersten Schritt wurden die Benetzungseigenschaften von Tragflügeln durch unterkühlte Wolkentröpfchen untersucht. Anschließende Aufgabe war die Lösung des thermodynamischen Problems eines gefrierenden Wasserfilms. Hierzu wurde ein zweidimensionales Modell entwickelt, das alle wichtigen Wärmeströme erfasst und durch Bilanzierung die sich bildende Eisschicht berechnet. Grundlage des Modells ist die Theorie des Phasenübergangs mit einer sich bewegenden Phasengrenzfläche wie sie von J. Stefan erstmalig untersucht wurde (Stefan Problem). Der äußere Wärmeübergangskoeffizient, vom Wasser-/Eisfilm an die Luft, wurde durch CFD-Simulationen bestimmt. Die Bedeutung der einzelnen Terme in der Energiegleichung werden diskutiert. Gefriert die Wasserschicht im betrachteten Zeitintervall nicht vollständig (glaze-ice Bedingungen) wird die verbleibende Wasserschicht, aufgrund

der Wandschubspannungskräfte, stromab transportiert und es bildet sich sogenanntes glaze-ice.

Für einen Literaturtestfall werden die Ergebnisse mit Experimenten und dem „Standardcode“ für Eisberechnung LEWICE der NASA verglichen. Auch die Frage der geeigneten Kopplung der Benetzungssimulation mit der Eisschichtberechnung wird diskutiert.



Durch aerodynamische Simulationen der, durch den Eisaufbau modifizierten, Profilgeometrien werden die Auswirkungen der Vereisung auf die aerodynamischen Eigenschaften des Flugzeugs bestimmt.

Posterprogramm

Experimentelle Modellierung von Raumluchtströmungen im stark verkleinerten geometrischen Maßstab

Max Körner, André Thess, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau

Immer mehr Menschen leben, arbeiten und reisen in geschlossenen und klimatisierten Räumen. Für eine ergonomisch, ökonomisch und sicherheitstechnisch sinnvolle Gestaltung der Klimatisierungssysteme dieser Räume ist die Kenntnis der sich bildenden sogenannten Raumluchtströmungen eine maßgebliche Voraussetzung. Solche Raumluchtströmungen stellen eine räumliche und zeitliche Überlagerung aus freier und erzwungener Konvektion dar, welche dementsprechend von Wärme- und Stofftransport gleichermaßen gekennzeichnet sind und auch unter dem Namen gemischte Konvektion bekannt sind. Bisherige experimentelle Methoden zur Untersuchung von Raumluchtströmung beruhen entweder auf Untersuchungen im Originalmaßstab [1] oder auf einer Skalierung der Strömung mit einer Wasser-Salz-Lösung [2]. Erstere Methode ist technisch sehr aufwendig und bietet nur wenig Variabilität hinsichtlich der Randbedingungen der Strömung und damit nur sehr spezifische Erkenntnisse. Die Skalierung der Strömung mit einer Flüssigkeit birgt Fehler hinsichtlich der einzuhaltenden Ähnlichkeitstheorie, bestehend aus den dimensionslosen Kennzahlen Reynolds-Zahl Re , Rayleigh-Zahl Ra und Prandtl-Zahl Pr , und den damit verbundenen Vergleich der Wärme- und Stofftransporte zwischen Original und Modell.

Die an der TU Ilmenau entwickelte SCALEX-Anlage (SCALEX: *engl.* Scaled Convective Airflow Laboratory Experiment) basiert auf dem neuen und bereits patentierten Verfahren der Hochdruckmodellierung [3] und eröffnet eine einfache und exakte Möglichkeit zur Modellierung von Raumluchtströmungen im stark verkleinerten Maßstab. Damit steht eine Anlage zur Verfügung, die mit einem sehr geringen Fehler bezüglich der Ähnlichkeitstheorie und einer gleichzeitig hohen Variabilität der Randbedingungen eine umfassende Untersuchung der Raumluchtströmung ermöglicht. Zur Skalierung der Strömung wird komprimiertes Schwefelhexafluorid (SF_6) verwendet. Dadurch können die Materialeigenschaften des Fluides, welche die Wärme- und Stofftransporte beeinflussen, an den gewählten geometrischen Maßstab angepasst werden. So ist es in einer ersten Versuchsreihe möglich, mit einem

Arbeitsdruck von $p \approx 4.9$ bar ein Maßstabsverhältnis von 1:10 einzustellen. Der dabei zu untersuchende skalierte Modellraum ist eine Abstraktion einer Flugzeugkabine, was die weitgefächerten und hochaktuellen Einsatzmöglichkeiten der Anlage unterstreicht.

Im vorliegenden Beitrag wird das neue Verfahren zur Modellierung von Raumluftrömungen im stark verkleinerten Maßstab vorgestellt. Weiterhin wird auf die experimentelle Verifizierung des Verfahrens und die damit verbundenen Untersuchungen eingegangen. Im Vergleich mit einer numerischen Simulationen und der Untersuchung des Modellraumes im Originalmaßstab kann eine Aussage hinsichtlich der Qualität dieser neuen Methode formuliert werden.

- [1] Müller D., Gores I., Zieliński R., 2004, Impact of the Thermal Load on the Room Airflow Pattern, *Roomvent 2004, 9th International Conference on Air Distribution in Rooms, Portugal*
- [2] Linden P. F., Kaye N. B., 2006, Interacting Turbulent Plumes in a Naturally Ventilated Enclosure, *International Journal Of Ventilation*, 4 (4)
- [3] Thess A., Wagner C., 2007, *Verfahren und Anordnung zur Nachbildung einer Raumluftrömung*

Effects of variable properties of nanofluids on heat transfer enhancement in natural convection

Eiyad Abu-Nada, Leibniz Universität Hannover, Institute für Technische Verbrennung
eiyad@itv.uni-hannover.de

In this paper, the heat transfer enhancement in a differentially heated enclosure using variable thermal conductivity and variable viscosity of Al₂O₃-water and CuO-water nanofluids is investigated. The results are presented over a wide range of Rayleigh numbers ($Ra = 10^3 - 10^5$), volume fractions of nanoparticles ($0 \leq \phi \leq 9\%$), and aspect ratios ($1/2 \leq A \leq 2$). For an enclosure with unity aspect ratio, the average Nusselt number of a Al₂O₃-water nanofluid at high Rayleigh numbers was reduced by increasing the volume fraction of nanoparticles above 5%. However, at low Rayleigh numbers, the average Nusselt number was slightly enhanced by increasing the volume fraction of nanoparticles. At high Rayleigh numbers, CuO-water nanofluids manifest a continuous decrease in Nusselt number as the volume fraction of nanoparticles is increased. However, the Nusselt number was not sensitive to the volume fraction at low Rayleigh numbers. The Nusselt number demonstrates to be sensitive to the aspect ratio. It was observed that enclosures, having high aspect ratios, experience more deterioration in the average Nusselt number when compared to enclosures having low aspect ratios. The variable thermal conductivity and variable viscosity models were compared to both the Maxwell Garnett model and the Brinkman model. It was found that at high Rayleigh numbers the average Nusselt number was more sensitive to the viscosity models than to the thermal conductivity models.

Experimentelle und numerische Optimierung einer 180° Strömungsumlenkung mit Wärmeübergang mit Hilfe der Eisschichtformationsmethode.

S.O. Neumann, S. Zehner, H. Steinbrück, M. Schüler, B. Weigand

Das Poster zeigt Ergebnisse der Optimierung eines 180°-Krümmers mit Hilfe Eisschichtformationsmethode, die ein gekoppeltes experimentelles und numerisches Verfahren ist. Solche Strömungsumlenkungen werden beispielsweise in internen Kühlungssystemen von Turbomaschinenkomponenten verwendet.

Grundsätzlich beinhaltet ein inkrementeller Optimierungsprozess (Evolution) die beiden wesentlichen Schritte Variation und Selektion einer Spezies. Konventionelle Optimierungsalgorithmen (z.B. Genetische Algorithmen, Gradientenverfahren, usw.) führen stets Restriktionen bezüglich der Parametrisierung des Ausgangsproblems und bezüglich der zu optimierenden Zielfunktionen ein. Die Wahl dieser einschränkenden Größen, wie z.B. die Anzahl freier Optimierungsvariablen oder deren Lage und Intervallgrenzen im Lösungsraum, ist normalerweise dem Bearbeiter überlassen und somit einer menschlichen Einflussnahme unterworfen.

Dem gegenüber steht die natürliche Optimierung, die im Rahmen der Evolution eine kontinuierlich verbesserte Anpassung der Individuen an die Umgebung darstellt, jedoch ohne Verwendung einer expliziten Zielfunktion. Die Eisformationsmethode basiert auf einem solchen natürlichen, übergeordneten Prinzip – der Minimierung von lokalen Entropieproduktionsraten (siehe dazu auch Bejan [10] oder in der Anwendung La Fleur [1-3]). Grundlage dazu bildet eine Kopplung von Impuls- und Wärmeaustausch in der fluiden Phase und der Interaktion mit der festen Wand, bestehend aus der erstarrten Phase.

Im experimentellen Teil der Methode wird die zu untersuchende Basisgeometrie, deren Wände auf einer Temperatur unterhalb der Erstarrungstemperatur des Wassers gehalten werden, mit einer Eisschicht überzogen und die sich im Gleichgewichtsfall einstellende Körperkontur optisch vermessen. Verschiedene dimensionslose Wandunterkühlungen Θ_C und Reynoldszahlen Re führen dabei i.A. zu unterschiedlichen Körperkonturen. Im Falle der hier vorgestellten 180° Umlenkung wurde die Trennwand auch in Kombination mit der Prallwand vereist.

Eine Analyse der so erhaltenen Formen führt zur Identifikation von Klassen optimierter Konturen im Hinblick auf Druckverlust und Wärmeübergang gerade bei komplexen Strömungsformen, die in geeigneter Weise parametrisiert und als

Explosive Kristallisation in dünnen amorphen Schichten auf wärmeleitenden Substraten

C. Buchner und W. Schneider, Institut für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung, Technische Universität Wien

Explosive Kristallisation ist ein Transformationsprozess von einem amorphen in den kristallinen Zustand. Der Prozess wird von der Umwandlung der Schmelzenthalpie in Wärme angetrieben. In den meisten Anwendungen findet die Kristallisation in dünnen Schichten statt, die auf Substraten aufgebracht sind.

Eine Literaturrecherche zeigt, dass die quantitative Vorhersage von explosiver Kristallisation gewöhnlich auf semi-empirischen Gesetzen beruht, z.B. auf der Annahme einer temperaturabhängigen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Kristallisationsfront, oder auf Einführung eines fiktiven Wärmeübergangskoeffizienten zur Beschreibung des Wärmeverlusts an das Substrat. Ziel dieser Arbeit ist, den Prozess der selbsterhaltenden explosiven Kristallisation auf der Basis von Grundgleichungen der Kristallisationskinetik und der Wärmeleitung zu analysieren.

Unter der Annahme, dass die Dicke der kristallisierenden Schicht sehr klein gegen die Abmessungen des Kristallisationsgebietes ist, reduziert sich die Energiebilanz für die Schicht auf die eindimensionale Wärmeleitungsgleichung mit einem Quellterm aufgrund der Freisetzung der Schmelzenthalpie und einem Verlustterm aufgrund der Wärmeleitung in das Substrat. Der Quellterm ist proportional zur Kristallisationsrate, welche von einer Ratengleichung bestimmt wird, die in einer Arbeit von W. Schneider et al. auf der Grundlage der Kristallisationstheorie von A.N. Kolmogorov und M. Avrami hergeleitet wurde. Die Wärmeleitung in das Substrat wird durch die Einführung einer kontinuierlichen Verteilung von bewegten Wärmequellen an der Grenzfläche zwischen kristallisierender Schicht und Substrat beschrieben. Dies ergibt als Lösung der Wärmeleitungsgleichung für die Temperatur im Substrat eine Integraldarstellung mit der unbekanntenen Quellenverteilung im Integranden. Dimensionslose Variablen werden eingeführt, um die für den Prozess maßgebenden dimensionslosen Parameter zu identifizieren. Unter der für viele Anwendungen zutreffenden Annahme, dass die Temperaturleitfähigkeit des Substrats viel kleiner ist als die Temperaturleitfähigkeit der kristallisierenden Schicht, kann die Integraldarstellung invertiert werden, und das Gleichungssystem einschließlich der

Kopplungsbedingungen an der Grenzfläche reduziert sich auf ein System aus einer Integrodifferentialgleichung und einer gewöhnlichen Differentialgleichung.

Das Problem wird numerisch mit einer Finite-Differenzen-Methode gelöst. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Kristallisationsfront wird als Eigenwert des Gleichungssystems ermittelt. Ein überraschend einfaches Ergebnis von praktischem Interesse ist eine exponentielle Beziehung für die Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit vom maßgebenden dimensionslosen Parameter. Weiter stellt sich heraus, dass ein selbsterhaltender Kristallisationsprozess nur existieren kann, wenn der dimensionslose Parameter, der den Wärmeverlust zufolge des Substrats beschreibt, einen kritischen Wert nicht überschreitet.

Ein Vergleich mit verfügbaren experimentellen Daten ist in Vorbereitung.

Experimentelle und numerische Untersuchung einer Adsorptionskältemaschine auf Zeolithbasis

T. Vasytsova, G. Steffen, J. Nocke, H. Schmidt, E. Hassel

Universität Rostock, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik

Albert-Einstein-Str. 2, 18059 Rostock

Vor dem Hintergrund der „Treibhaus-Problematik“ und damit verbundener Anforderung, den CO₂-Ausstoß aus Energieumwandlungsprozessen zu senken, rückt die Adsorptionstechnik aufgrund ihrer primärenergetischen Vorteile gegenüber elektrisch betriebenen wieder in den Blickpunkt des Interesses.

Am Lehrstuhl für Technische Thermodynamik der Universität Rostock wird eine periodisch funktionierte Adsorptionskältemaschine seit 2004 untersucht und entwickelt. Die Adsorptions-Stoffsystem Zeolith-Wasser ist ungiftig und nicht korrosiv, unbrennbar und ungefährlich; in ausreichende Mengen vorhanden; preiswert sowie im interessierenden Druck- und Temperaturbereich chemisch und thermisch stabil. Außerdem kann während eines Adsorptionszyklus bezogen auf die Zeolithmasse besonders viel Wasser im Zeolith umgesetzt werden, was attraktive Nutzungsgrade erwarten lässt.

Die Schwerpunkte der Untersuchung sind:

- Aufbau, Vermessung und Auswertung eines Funktionsmusters der Adsorptionskältemaschine;
- Thermodynamische Analyse einer Adsorptionskälteanlage auf der Basis von Energie-, Exergie- und Entropiebilanzierung;
- CHT- und CFD-Modellierung und Simulation der Stoff- und Wärmeübertragung im Zeolith Reaktor auf der Basis eines kommerziellen Codes (Ansys CFX11).

Als Ergebnis werden Vorschläge zur Optimierung der Stoff- und Wärmeübertragungsvorgänge, zur thermodynamischen Optimierung sowie auch zur Geometrie- und Werkstoffoptimierung erarbeitet.

Experimentelle Untersuchungen zum Einsatz von Turbulenzpromotoren und strukturierten Rohren in Naturumlaufverdampfern

Dipl.-Ing. Jochen Hammerschmidt, Prof. Dr.-Ing. Stephan Scholl

Institut für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik, TU Braunschweig

In der Prozessindustrie finden Naturumlaufverdampfer eine weite Verbreitung als einstufiger Eindampfer oder als Brüdenerzeuger in Rektifikationskolonnen. Der Selbstlauf stellt sich aufgrund des Dichteunterschieds zwischen einphasiger Flüssigkeit im Zulauf und zweiphasigem Flüssigkeits- / Dampfgemisch im Verdampferrohr ein. Hierdurch besteht eine Kopplung von Fluidodynamik und Wärmeübertragung, die den Betriebsbereich des Naturumlaufverdampfers einschränkt. Insbesondere niedrige Drucke auf der Produktseite, hohe Flüssigkeitsviskositäten sowie geringe treibende Temperaturdifferenzen zwischen Heiz- und Produktseite können zu einem instabilen Umlaufverhalten oder zu einem Totalzusammenbruch des Umlaufstroms führen.

Der Einfluss von Turbulenzpromotoren und Rohrstrukturierungen auf den Betriebsbereich und das Wärmeübergangsverhalten von Naturumlaufverdampfern wird am ICTV an einem Einrohr-Naturumlaufverdampfer der Geometrie $d_a \times s \times l = 20 \times 2 \times 1500 \text{ mm}^3$ untersucht. Versuche mit Wasser und Wasser- Glycerin Gemischen wurden bei unterschiedlichen treibenden Temperaturdifferenzen zwischen Heiz- und Produktseite unter Variation des scheinbaren Flüssigkeitsstands durchgeführt. Das Umlaufverhalten, die Wärmeströme und die daraus berechneten produktseitigen Wärmeübergangskoeffizienten wurden zunächst an einem Edelstahlrohr (St. 1.4571) ermittelt. Weitere Messungen erfolgten an einem mit hiTRAN[®]-Element bestückten Rohr sowie an einem innenprofilierten Rohr.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Rohreinlaufgeschwindigkeit durch Einsatz des hiTRAN[®]-Elementes bei Reinstoffen reduziert. Trotz des geringeren Umlaufstroms ist eine Verbesserung der Fluidodynamik feststellbar. Insbesondere bei geringen treibenden Temperaturdifferenzen konnte mit Drahtgestrickeinbauten im Gegensatz zum Leerrohr ein stabiler Umlaufstrom erzielt werden. Bei Gemischen ist durch Verwendung dieser Turbulenzpromotoren zudem eine Erhöhung des produktseitigen Wärmeübergangskoeffizienten um bis zu 15% bei großen scheinbaren Flüssigkeitsständen festzustellen. Auf Basis der Versuche können vorteilhafte Einsatzgebiete von Drahtgestrickeinbauten in Naturumlaufverdampfern identifiziert und die damit erzielten Verbesserungen quantifiziert werden.

CFD zur Bestimmung von Kennzahlen in der Wärmeübertragung: Postprocessing mittels second law analysis (SLA)

Tammo Wenterodt, Heinz Herwig, Technische Universität Hamburg-Harburg

In energie- und verfahrenstechnischen Anlagen geht eine Verbesserung des Wärmeüberganges meistens mit einem erhöhten Druckverlust einher, bzw. eine Verringerung des Druckverlustes verschlechtert i.d.R. den Wärmeübergang. Daher ist eine gemeinsame Bewertung beider Effekte in konvektiven Wärmeübertragungssituationen im Rahmen von Optimierungen bei der Auslegung solcher Anlagen von zentraler Bedeutung. Es ist Stand der Technik, dass in der Auslegungsphase von Wärmeübertragern verschiedene Geometrien und Betriebszustände des gekoppelten Strömungs-/Wärmeleitungsproblems numerisch simuliert werden. Durch Bilanzierung über die Systemgrenzen werden dann globale Kennzahlen (z.B. Nußelt-Zahl, Widerstandskoeffizienten,...) bestimmt.

Es bietet sich jedoch an, in einem weiteren Schritt die berechneten Feldinformationen der Geschwindigkeit und Temperatur zur Berechnung der Entropieproduktion zu nutzen. Auf diese Weise wird ein Vergleich der Verluste aufgrund von Dissipation und Wärmeleitung auf einer gemeinsamen Basis (dem Exergieverlust, d.h. Verlust an nutzbarer Energie) ermöglicht. Durch Integration der lokalen Entropieproduktionsraten über das gesamte Rechengebiet können globale Kennzahlen bestimmt werden, die gegenüber solchen, die durch Bilanzierung über die Systemgrenzen erhalten werden, eine höhere inhärente Genauigkeit haben. Weiterhin kann die lokale Entropieproduktion, also die Energieentwertung in jeder einzelnen Zelle des Rechengebiets, herangezogen werden, um Verbesserungspotenziale zu identifizieren, die bei anderen Untersuchungsmethoden verborgen bleiben. Da die zur Berechnung der Entropieproduktionsraten notwendigen Felder ohnehin bekannt sind, werden die Kosten für die Rechnungen nicht nennenswert erhöht.

Die Theorie, Implementierung und Anwendung der Methode werden gezeigt und schließlich an einem ausführlichen Beispiel (Hochleistungswärmeübertrager mit verschiedenen Fins) veranschaulicht.

Physikalische Untersuchung der Wirkmechanismen / genetische Optimierung zur Erhöhung des konvektiven Wärmeübergangs auf Dellenoberflächen

J. Turnow, N. Kornev, E. Hassel

Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik,

Lehrstuhl für Technische Thermodynamik

Ziel der im Rahmen eines DFG-Verbundprojektes mit der TU Darmstadt und TU Hamburg-Harburg durchgeführten Untersuchungen ist es, ein fundamentales Verständnis über die komplexen strömungsmechanischen und thermodynamischen Prozesse an spezifisch verformten Dellenoberflächen zu erlangen. Die direkte Erhöhung des Wärmestroms bei nahezu gleichbleibendem Druckverlust durch Ausbildung von speziellen Wirbelstrukturen auf Dellenoberflächen zeigt sich deutlich in der hohen thermohydraulischen Effizienz des Wärmeübertragers im Vergleich zu anderen Möglichkeiten. Experimentelle Ergebnisse ergaben, dass sich die auftretenden dominierenden Wirbelstrukturen innerhalb der Dellen stark instationär verhalten und folglich einen wesentlichen Einfluss auf den lokalen Wärmetransport aufweisen. In den zeitlich aufgelösten Simulationen mittels Large Eddy Simulation (LES) bilden sich diese Schwankungen der asymmetrischen Wirbelformen sowie deren direkter Einfluss auf den Wärmestrom innerhalb und im Nachlauf der Delle deutlich ab. Es zeigt sich, dass für tiefe Dellen ($t/D > 0.26$) ab einer Reynoldszahl $R_D \geq 20000$ die Ausbildung von sogenannten Wirbelmonostrukturen mit schwankender Wirbelachse ($\pm 45^\circ$ zur Anströmung) bezeichnend ist, welche wesentlich zur Effizienzerhöhung des Wärmeübertragers beitragen. Detaillierten Einblick in die für die Wärmeübertragung relevanten energietragenden Strukturen aus dem zeitlich aufgelösten Datensatz der LES gibt die in OpenFOAM implementierte orthogonale Zerlegung (POD-Analyse) der Strömungskomponenten von Druck, Geschwindigkeit und der Temperatur. Zusätzlich geben die Zeitkoeffizienten der einzelnen Moden der POD-Analyse eine Übersicht in die Physik der Wirbelstrukturen.

Für eine weitere Effizienzsteigerung des gesamten Wärmeübertragers wurde ein Optimierungsverfahren auf Basis der Evolutionsstrategie (genetische Algorithmen) in das Programmpaket OpenFOAM implementiert. Der zu optimierende Parametersatz besteht hierbei aus den normalen Knotenverschiebungen der diskretisierten Fläche für die Wärmeübertragung. Hierbei werden die zu optimierenden Freiheitsgrade nicht wie gewöhnlich an bestimmte Voraussetzungen, wie z.B. Splinegeometrie, gebunden, wodurch die Wärmeübertragungsfläche sich in diesem Verfahren frei verformen und somit jegliche Geometrieformen annehmen kann. Desweiteren erfolgt die Erstellung der einzelnen Rechengitter voll automatisch mittels Gitterbewegung über eine Gitterdiffusionsgleichung, wodurch auf diese Weise eine komplette Neuvernetzung des Rechengbietes für jede einzelne Konfiguration umgangen und zusätzlicher Zeitaufwand eingespart wird. Die jeweiligen Konfigurationen des Wärmeübertragers werden auf Basis des RANS-Verfahrens berechnet, wobei die Berechnung der aktuellen Konfiguration als Startlösung die Lösung der vorhergehenden Konfiguration verwendet. Mit Hilfe des stark reduzierten Rechenaufwandes lässt sich eine Vielzahl von Variationen des Wärmeübertragers mit geringen Rechenressourcen berechnen bzw. erlaubt die Verwendung einer Vielzahl von Freiheitsgraden des zu optimierenden Systems. Das Verfahren der vollständigen dreidimensionalen Optimierung der Wärmeübertragungsfläche wird im Beitrag vorgestellt. Mit Hilfe des eingesetzten Optimierungsverfahrens konnte die thermohydraulische Effizienz des Wärmeübertragers um bis zu 16% gesteigert werden.

Enhancement of near wall convective heat transfer by dimple structures at the solid-liquid interface

M.Sc. Bo Su, Dr. Frank Dammal, Prof. Peter Stephan (POSTER)

Technische Thermodynamik TU-Darmstadt

Dimples are concave geometries which can be manufactured on a wall in order to increase the convective heat transfer to a liquid. It has been reported that the heat transfer enhancement of these structures is accompanied by a rather low increase in flow resistance in comparison to other methods. However, more details about the heat transfer mechanisms at these interfaces need to be uncovered.

This is done within the framework of DFG project by three collaborative groups in simulation, experiment and entropy production evaluation. For the experiments which are carried out at the institute of Technische Thermodynamik in TU-Darmstadt, high temporal and spatial resolution temperature measurement technologies make it possible to visualize a detailed vivid temperature field in a transient time over the solid-liquid interface of the dimple structure. The data from the experiments will be the proof and foundation for the simulations and evaluations.

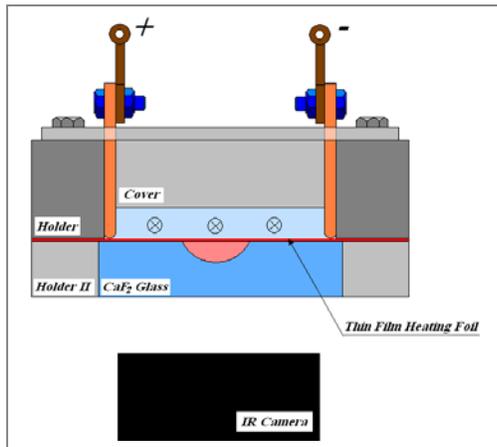


Fig. 1 The IR observation of a heating dimple surface

In the current experiments, water flows through a channel with a heated bottom wall which contains one or two dimples (Fig.1). Infrared thermography is applied for observing the wall temperature. In the sketch, the heating surface at the bottom of the channel is heated up by electricity which is supplied by the electrodes aside. The heated surface is observed from underneath by an IR camera. The details of the experiment are shown in the table below:

Dimple diameter	15,5mm	Dimple depth	4mm	Flow media	deionized water
Channel height	5mm	Reynolds number	1461, 2042, 3869		

An appropriate pixel-by-pixel calibration of the camera enables a high quality and accurate temperature observation over the dimple surface. Afterwards, the local Nusselt number distribution can be determined.

First experimental results are in qualitative agreement with the simulation:

1. The observation indicates a heat transfer degenerated zone at the entrance and a heat transfer enhanced zone at the outlet of the dimple.
2. Both zones are symmetric to the flow direction in different Reynolds numbers of the flow.
3. The local Nusselt number falls to half of the flat surface in the degenerated zone. In contrast, a high peak of Nusselt number can be found at the very edge of the dimple outlet.

Untersuchung des Wärmeübergangs und des Bündeleffekts an Rippenrohren mittels CFD

A. Gotterbarm, J. El Hajal, A. Beutler, Wieland-Werke AG, Ulm, Deutschland

In Rohrbündelverflüssigern von kältetechnischen und petrochemischen Anlagen werden oftmals Hochleistungsrippenrohre eingesetzt. Durch Herabtropfen von Kondensat oberer auf untere Rohrreihen wird der Kondensationswärmeübergang wesentlich limitiert, was als Inundationseffekt bekannt ist. Ziel dieses in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT) der Universität Erlangen-Nürnberg und von der bayerischen Forschungstiftung (BFS) geförderten Gemeinschaftsprojektes ist es, durch eine Optimierung der Rippengeometrie mittels CFD dem Inundationseffekt zu begegnen. Daher werden zuerst adiabate Simulationen durchgeführt, um die optimale Rippenteilung in Bezug auf die effektive Oberfläche zu ermitteln, mittels diathermen Simulationen wird der Wärmeübergang bei der Kondensation an unterschiedlichen Rohrstrukturen berechnet.

Der Rückhaltewinkel des Kondensats zwischen den Rippen wird in einem 3D-Modell unter stationären (ohne Flüssigkeitsüberschuss) und dynamischen (mit Flüssigkeitsüberschuss) Bedingungen simuliert. Für den stationären Fall konnte eine Übereinstimmung von $\pm 10\%$ im Vergleich zum theoretischen Modell nach Rudy und Webb [1], welches an Messdaten validiert wurde, erzielt werden. Weiterführende Simulationen mit Flüssigkeitsüberschuss zeigen für das Kältemittel R134a ein Optimum der Rippendichte, welches sehr gut mit dem experimentell ermittelten Optimum der Rippendichte bei Hochleistungsrippenrohren der Firma Wieland-Werke AG übereinstimmt.

Da die Berechnung des Wärmeübergangs bei der Kondensation in den aktuellen CFD-Programmen keine Standardfunktion ist, muss ein Modell zur Berechnung des Phasenwechsels implementiert werden. Dafür wurde auf Basis der Nußelt-Gleichung eine User-Defined-Function (UDF) entwickelt und in das Ansys-Fluent CFD-Programm eingebunden. Die Simulationsergebnisse des Wärmeübergangs zeigen an den drei untersuchten Rippenrohrstrukturen und am Glattrohr eine Übereinstimmung bis auf $\pm 20\%$ mit Mess- und Literaturdaten. Diese positiven Ergebnisse dienen als Basisarbeit, die Leistungsfähigkeit und Eignung von CFD bei der Entwicklung von Standard- und Hochleistungsrippenrohre zu validieren.

[1] T.M. Rudy, R.L. Webb, *An Analytical Model to Predict Condensate Retention on Horizontal, Integral-Fin Tubes*, Journal of Heat Transfer, Vol. 107, pp. 361-368

Fallfilm-Benetzung und Scaling auf polymeren Oberflächen

J.B.P. Christmann, L. Krätz, H.-J. Bart

TU Kaiserslautern, Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik

<http://www.uni-kl.de/wcms/tvt.html>

Die steigenden Preise für metallische Hochleistungswerkstoffe verteuern erheblich die Investitionskosten für Verdampfer, die, wie z. B. bei der thermischen Meerwasserentsalzung, in einem stark korrosiven Milieu betrieben werden. Andererseits wird dadurch aber auch die Suche nach geeigneten Werkstoffalternativen beschleunigt. So ließen sich beispielsweise die Wärmeübertragungsflächen aus preiswerten und korrosionsunempfindlichen Polymerwerkstoffen fertigen.

Auf den ersten Blick stehen allerdings bestimmte Polymereigenschaften einer Anwendung entgegen. Ein wichtiger Aspekt bei der Fallfilmverdampfung ist die vollständige Benetzung der Wärmeübertragungsfläche durch die zu verdampfende Flüssigkeit. Hydrophobe Polymerfolien, wie das für die Versuche ausgewählte Polyetheretherketon (PEEK, Folienstärke 25µm), lassen sich bekanntlich nur schlecht mit einem lückenlosen Wasserfilm benetzen. Im Rahmen des Beitrags wird nun anhand von Fallfilm-Benetzungsforschungen und Kontaktwinkelmessungen gezeigt, dass der Grad der Benetzbarkeit durch eine Konditionierung der Folien signifikant und nachhaltig verbessert werden kann (Abb. 1). Diese erfolgte wenig aufwendig durch Lagerung in Wasser über mehrere Tage bei Raumtemperatur. Auch für plasmabehandelte, mit Talkum gefüllte PEEK-Folien konnten gute Benetzungseigenschaften nachgewiesen werden.

Ein weiteres Problem, das oftmals in Wärmeübertragern auftritt, ist das Kristallisationsfouling (Scaling) durch schwerlösliche Präzipitate. Die Ergebnisse von Scalingexperimenten auf der PEEK-Folie mit einer Calciumsulfatlösung werden präsentiert. Das Zusammenspiel von Flexibilität und antiadhäsiven Oberflächeneigenschaften der PEEK-Folie wirkt sich ausgesprochen positiv aus. Es verhindert, dass die gebildeten Scalingbeläge fest auf der Folienoberfläche haften. Die Beläge lassen sich problemlos ablösen (Abb. 2), denn es genügt, die Folien, z. B. durch einen kleinen Druckstoß, leicht zu bewegen.

* Das Projekt (240 ZN) wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) gefördert.

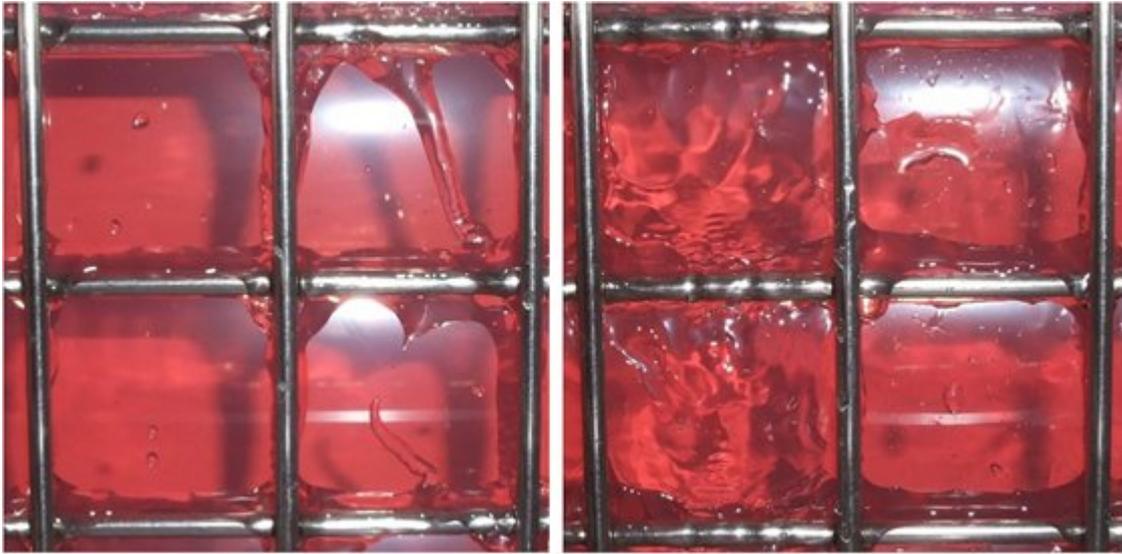


Abb. 1: Verbesserung der Folienbenetzbarkeit durch Konditionierung



Abb. 2: Polymerfolie vor und nach der Belagentfernung

Wärmetechnische Untersuchungen von oberflächenmodifizierten Rippenrohren zur Reduzierung des Bündeleffektes

Thomas Gebauer, Alfred Leipertz und Andreas Paul Fröba

Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT), Universität Erlangen-Nürnberg

Beim Einsatz von Rohrbündelwärmeübertragern mit Kondensation auf der Rohraußenseite wird der Wärmeübergang hauptsächlich durch den sogenannten Bündeleffekt limitiert. Dieser beschreibt die Reduzierung des kondensatseitigen Wärmeübergangskoeffizienten mit zunehmender Bündeltiefe durch von oben auf untere Rohrreihen herabtropfendes Kondensat. Für das Kondensatablaufverhalten und damit auch für den Wärmeübergang an Rippenrohren ist unter anderem der Kondensatrückhaltewinkel von Bedeutung. Dieser beschreibt das Kondensatrückstauverhalten zwischen den Rippen von Verflüssigerrohren und ist vom Kontaktwinkel abhängig. Mit Hilfe von Oberflächenmodifikationen geringer Oberflächenenergie ist eine Reduzierung des Kondensatrückhaltewinkels zu erwarten, wodurch eine Erhöhung der kondensatfreien Rippenoberfläche und folglich eine Verbesserung des kondensatseitigen Wärmeübergangs in einem Rohrbündel möglich scheint. Dieser Ansatz wird von Seiten des LTT-Erlangens im Rahmen eines gemeinsamen Projektes mit der Fa. Wieland-Werke AG zur Leistungssteigerung von Rohrbündelkondensatoren verfolgt.

Zur experimentellen Verifizierung dieses auf theoretischer Basis vorhergesagten Effektes werden derzeit Messungen des kondensatseitigen Wärmeübergangskoeffizienten mit R134a an unbehandelten und oberflächenmodifizierten Rippenrohren durchgeführt. Für die Messungen steht eine Verflüssigeranlage mit vier direkt untereinander liegenden Rohrreihen sowie einer Berieselungseinheit zur Simulation tiefer gelegener Rohrreihen zur Verfügung. Die Eignung der Anlage für vergleichende Untersuchungen konnte mit unbehandelten Kupferglattrohren aufgezeigt werden. Mit unbehandelten Standardrippenrohren GEWA-K-40 bzw. Hochleistungsrippenrohren GEWA-C+LW der Fa. Wieland-Werke AG ergaben sich für Einzelrohruntersuchungen im Vergleich zur Nußeltschen Wasserhauttheorie Verbesserungsfaktoren des kondensatseitigen Wärmeübergangskoeffizienten bei gleichen Wärmestromdichten von etwa 17 bzw. 27, was mit den Daten des Herstellers im Rahmen der Messunsicherheit übereinstimmt. Die Charakterisierung des Wärmeübergangs an einzelnen oberflächenmodifizierten Rippenrohren sowie der Beeinflussung des Bündelfaktors durch die Oberflächenmodifikationen sind Gegenstand aktueller Untersuchungen. Dabei erfolgt die Modifikation der Rohroberfläche mit einer Plasmapolymerschicht, die eine sehr geringe Oberflächenenergie von $21,5 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ aufweist.

Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten von Bauteilen beliebiger Geometrie: ein einfaches, praxisnahes Verfahren

A. Moschallski, J. P. Rückert, H. Herwig

Technische Universität Hamburg-Harburg

Mit einer einfachen experimentellen Anordnung kann der zeitliche Verlauf der Aufheizung oder Abkühlung von (prinzipiell beliebigen) Körpern gemessen werden. Wenn diese die Bedingung kleiner Biot-Zahlen erfüllen, tritt in den Körpern eine jeweils einheitliche aber zeitlich abhängige Temperatur auf. Aus dem Temperaturverlauf über der Zeit kann dann sehr einfach auf den mittleren Wärmeübergangskoeffizienten α bzw. auf die Nußelt-Zahl Nu geschlossen werden.

Am Beispiel von Kreiszyllindern, Kugeln und Würfeln wird gezeigt, dass mit diesem Verfahren auf sehr einfache Weise Wärmeübergangsdaten bestimmt werden können, die gut mit den bekannten Werten übereinstimmen. Die Erweiterung auf beliebige Körper wird diskutiert.

Numerical investigation of convective losses in cavity receivers for concentrating solar power

Felipe Vásquez, Reiner Buck, Birgit Gobereit, Ralf Uhlig

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Institut für Technische Thermodynamik

Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart/Germany.

Convective losses play a significant role regarding the efficiency of cavity receivers in solar tower power plants. In this study, the convective losses of cavity receivers are predicted by numerical simulations using a commercial CFD code. The thermal power of the receivers is in a range between 0.18 MW and 6.5 MW. The model used accounts for the effects of the large density variations of air, which is treated as an ideal gas. Wall temperatures are obtained from radiative heat transfer calculations using a grey radiosity FE model. Previously, investigations have been carried out to validate the CFD model and the results obtained are in good agreement with experimental data and correlations found in literature. Furthermore, the effects of side wind and angle of inclination of the aperture are studied in the present work, and a noticeable influence on the convective losses is shown. During the study of different cavity geometries, it was found that the correlations are only valid in a limited range of Grashof numbers and new correlations are necessary for predicting the convective losses of cavities with Grashof numbers larger than 10^{10} .

Verdampfung und Kondensation in keramischen Schwämmen

Dipl.-Ing. B. Dietrich, Dipl.-Ing. J. Große, cand. chem. ing. M. Wallenstein, Prof. Dr.-Ing. M. Kind, Institut für Thermische Verfahrenstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

In der gängigen Literatur werden offenporige und damit allseitig fluiddurchlässige Schäume als feste Schwämme bezeichnet. Die in dieser Arbeit untersuchten Probenkörper besitzen ein dreidimensionales nicht isotropes Netzwerk aus keramischen Stegen mit Porositäten zwischen 75 und 90 %. Potentiell Anwendung können die Schwämme als Porenbrenner, Solarreceiver oder in thermischen Trennkolonnen finden. Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet ist die Verwendung als katalytischer Träger, auf welchem chemische Reaktionen ablaufen. Hierbei treten häufig Kondensations- und Verdampfungsvorgänge auf.

Bisher gibt es in der Literatur keine Arbeiten zur Untersuchung von Kondensations- und Verdampfungsvorgängen in keramischen Schwämmen. Deshalb wurde innerhalb eines Teilprojektes der Forschergruppe FOR 583 eine Kolonne zur zweiphasigen Durchströmung keramischer Schwämme aufgebaut. Der Versuchsaufbau ermöglicht den Einbau verschieden langer Probenstücke bis zu einer maximalen Länge von 400 mm in doppelwandbeheizten/ -gekühlten Kolonnen-elementen. Zur Ermittlung des Temperaturfeldes können bis zu 50 Thermolemente Typ T in die Kolonne eingeführt werden. Die Zufuhr der Flüssigkeit erfolgt über eine speziell entwickelte Aufgabevorrichtung, so dass eine gleichmäßige und kontinuierliche Flüssigkeitsaufgabe über den Querschnitt gewährleistet ist, wobei die Berieselungsdichte variiert werden kann. Die Luftzufuhr wurde so gestaltet, dass entweder trockene oder mit Wasser gesättigte Luft temperierbar der Kolonne zugeführt werden kann. Zu ermittelnde Parameter sind der Wärmeübergangskoeffizient bei zweiphasiger Durchströmung, die Phasenverteilung innerhalb des Schwammes sowie Verdampfungs- bzw. Kondensationsraten. Als Probenkörper stehen dazu Schwämme aus Al_2O_3 , Mullit und siliziuminfiltriertem Siliziumcarbid verschiedener Porositäten (75 – 90 %) und Porenzahlen (10 – 45 pores per inch) zur Verfügung.

Wärmeübertragungsmechanismen beim Blasensieden von Propan und R134a an Hochleistungsverdampferrohren aus Baustahl

Prof. Dr.-Ing. A. Luke, Dipl.-Ing. O. Kruck

Institut für Thermodynamik, Leibniz Universität Hannover

Der Wärmeübergang beim Behältersieden wird durch die Verwendung von Heizflächen mit hinterschnittener Oberfläche und mehr oder weniger abgeschlossenen Kanälen im Vergleich zu Glattrohren wesentlich verbessert. Die Verwendung solcher Hochleistungsverdampferrohre steigert die Übertragungsleistung der Wärmeübertrager und damit Energieeffizienz des gesamten Prozesses. Zudem werden die Materialkosten beim Bau von Wärmeübertragern gesenkt.

Der Beitrag behandelt den Wärmeübergang von siedendem Propan und R134a an einem Hochleistungsverdampferrohr aus Baustahl, im Druckbereich von 3 bis 50% des kritischen Druckes und bei Wärmestromdichten zwischen 0,05 und 100 kW/m². Die Messungen werden in einer Standardsiedeapparatur durchgeführt, wobei die Blasenbildung mit Foto- und Videoaufnahmen dokumentiert wird.

Beim Vergleich des Wärmeübergangs beider Stoffe an Hochleistungsverdampferrohren sowie an Rohren mit gezogener Oberfläche zeigen sich abhängig von Druck und Wärmestromdichte systematische Unterschiede. Anhand von Messwerten sowie Foto- und Videoaufnahmen der Blasenbildung, werden unterschiedlichen Siedemechanismen voneinander abgegrenzt. Diese sind komplexen physikalischen Phänomenen zu zuordnen.

Einfluss von Kältemaschinenöl auf den Wärmeübergang beim Strömungssieden von CO₂

*Dipl.-Ing. M. Wetzel¹, Prof. Dr.-Ing. Y. Saito, Prof. Dr.-Ing. M. Kind¹,
Prof. Dr.-Ing. Th. Wetzel¹,*

¹Institut für Thermische Verfahrenstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT),

²Research Reactor Institute, Kyoto University (KURRI)

Aufgrund verschärfter Richtlinien für den Einsatz von Kältemitteln gewinnen heutzutage insbesondere natürliche Kältemittel wie CO₂ an Bedeutung. In einem Kältemittelkreislauf bestehend aus ölgeschmierten Elementen (wie z.B. Verdichter) strömt jedoch stets ein Kältemittel/Öl-Gemisch. Schon in geringen Konzentrationen besitzt das Kältemaschinenöl einen deutlichen Einfluss auf den Wärmeübergang, zumeist resultierend in einer Verminderung der Kälteleistung.

Die Kältemittelverdampfung findet in der Praxis häufig in horizontalen Verdampferrohren statt. Zur Vorausberechnung des Wärmeübergangskoeffizienten und als Bewertungsgrundlage der Messwerte werden Korrelationen zum Strömungssieden in horizontalen Rohren verwendet. Darin sind die Stoffdaten für das Kältemittel/Öl-Gemisch in Abhängigkeit der Öl-Konzentration zu bestimmen.

Der Einfluss des Öls auf den Wärmeübergang ist speziell auch durch eine Änderung der Strömungsform charakterisiert. Dies soll zunächst in Abhängigkeit der Betriebsparameter sowie der Ölkonzentration (0 bis 3 Gew.-%) im Kältemittel aufgezeigt werden. Die visuelle Bestimmung der Strömungsform wurde erstmals durch Messung der Flüssigkeitsschichtdicke am Rohrscheitel mittels der konfokalen Laser-Wegmessung gestützt. Die Messtechnik wird in diesem Zusammenhang vorgestellt und zwecks Anwendbarkeit bewertet.

Anschließend werden die Auswirkungen auf den Wärmeübergangskoeffizienten beim Strömungssieden veranschaulicht. Es werden Werte auf Basis der eigenen experimentell ermittelten Daten gezeigt. Korrelationen aus der Literatur werden hinzugezogen und hinsichtlich Übereinstimmung diskutiert. Als Betriebsparameter wurden der Massenstrom an Kältemittelgemisch, die im Verdampferrohr zugeführte Wärmestromdichte sowie der lokale Dampfgehalt variiert.

Hochauflösende Messungen beim Strömungssieden in einem Minikanal

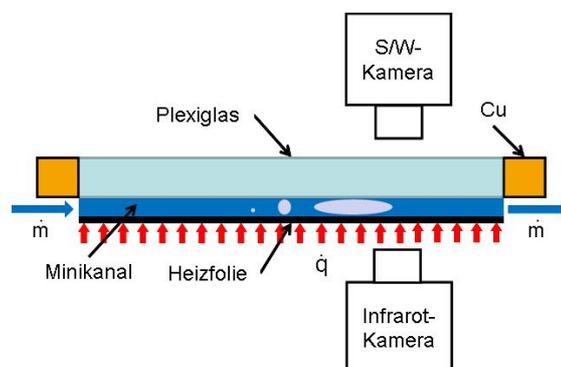
Martin Freystein, Andreas Fenner, Nils Schweizer, Peter Stephan

Fachgebiet Technische Thermodynamik, TU Darmstadt

Aufgrund von stark gestiegenen Anforderungen an die Kühlung elektronischer Bauteile, hat das Strömungssieden in Mini- und Mikrokanälen in den letzten Jahren deutlich an Bedeutung gewonnen. Die konventionellen Methoden zur Kühlung mittels freier und erzwungener Konvektion oder passiver zweiphasiger Systeme (Wärmerohre) stoßen dabei an ihre Leistungsgrenzen. Neben den hohen Wärmeübergangskoeffizienten bietet das Strömungssieden die Möglichkeit, den Verdampfer aufgrund der sehr kleinen Strukturen direkt in das zu kühlende Bauteil zu integrieren. Die bekannten, vorwiegend empirisch abgeleiteten, Berechnungsmethoden für den Wärmeübergang beim Strömungssieden sind jedoch nicht unverändert zu übertragen, sofern die Kanaldurchmesser kleiner oder gleich typischer Blasenabreißdurchmesser sind. Die speziellen Phänomene des Wärmeübergangs in kleinen Kanälen werden von unterschiedlichen Forschern untersucht, wobei die Schlussfolgerung, welche Phänomene dominant sind, zum Teil deutlich unterschiedlich sind [1,2].

Am Fachgebiet Technische Thermodynamik wurde eine Versuchsanlage mit einem Minikanal entwickelt, die Messungen von lokalen Wärmeübergangskoeffizienten und Temperaturen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung mittels Infrarotthermographie ermöglicht [3]. Gleichzeitig werden die Strömungsformen durch Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera dokumentiert.

Der Minikanal weist einen rechteckigen Querschnitt mit einem hydraulischen Durchmesser von $800\mu\text{m}$ auf und ist von zwei temperierten Kupferplatten seitlich berandet. Über eine beheizbare Stahlfolie wird Wärme in den Kanal eingebracht, der nach oben für die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen durch ein Plexiglasfenster begrenzt ist. Erste Messungen mit dem Fluid FC-72 bei Wärmestromdichten bis 30kW/m^2 haben neben den bereits beim



Fluid FC-72 bei Wärmestromdichten bis 30kW/m^2 haben neben den bereits beim

Behältersieden beobachteten charakteristischen Bereichen an der Dreiphasenkontaktklinie zusätzlich Bereiche hoher Wärmeübergangskoeffizienten gezeigt, die auf eine Dünnschichtverdampfung im Nachlaufbereich von Dampfblasen hindeuten.

- [1] Thome, J.R., „Heat transfer model for evaporation in microchannels. Part I: presentation of the model“, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 47, 2004, pp. 3375-3385
- [2] Kandlikar, S.G., „Heat transfer mechanisms during flow boiling in microchannels“, Journal of Heat Transfer, Vol. 126, 2004, pp. 8-16
- [3] Wagner E., „Hochauflösende Messungen beim Blasensieden von Reinstoffen und binären Gemischen“, Dissertation, TU Darmstadt, 2008

Entwicklung eines kapillar gepumpten Wärmeübertragersystems für einen Mikroenergiewandler

B. Schilder, S. Hardt, P. Stephan

Fachgebiet Technische Thermodynamik, Center of Smart Interfaces, Technische Universität Darmstadt

Der Energieverbrauch portabler elektromechanischer Geräte steigt ständig, daher wird nach neuen Wegen für deren Energieversorgung gesucht. Bisher werden hauptsächlich Akkumulatoren eingesetzt, die jedoch einige Nachteile aufweisen. Ihre Energiedichte ist gering, es ist zeitaufwendig sie zu laden und sie haben eine relativ kurze Lebensdauer. Alternativ könnte man zur Energieversorgung einen Mikroenergiewandler einsetzen, der die chemisch gebundene Energie von flüssigen Kohlenwasserstoffen nutzt, um elektrischen Strom zu generieren [1].

Die Funktionsweise des hier vorgestellten Mikroenergiewandlers zeigt schematisch Abb. 1. Der flüssige Brennstoff Methanol wird verdampft, mit Luft gemischt und anschließend verbrannt. Die dabei frei werdende Wärmeenergie wird dem Thermogenerator von der Brennkammer auf der einen Seite zugeführt, während die andere Seite des Generators von dem Verdampfer gekühlt wird. Über den

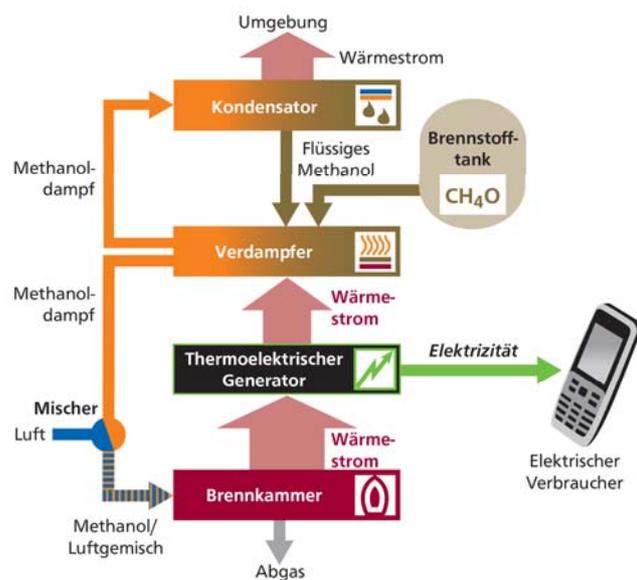


Abb. 1 Schema des Mikroenergiewandlers

Thermogenerator stellt sich somit ein Temperaturgradient ein, der aufgrund des Seebeck-Effekts zu einer elektrischen Spannung führt, die zur Versorgung eines Verbrauchers genutzt werden kann. Die von dem Generator abgeführte Wärme sorgt für die Verdampfung des Methanols. Da die entstehende Dampfmenge jedoch die Menge übersteigt, die zur Versorgung der Brennkammer benötigt wird, wird der größere Teil des Dampfes in einem Kreislauf rekondensiert und dabei Wärme an die Umgebung abgegeben. Die thermische Leistung des Gesamtsystems liegt im Bereich von 50 Watt.

Dieser Beitrag konzentriert sich auf das System von Wärmeübertragern (Verdampfer und Kondensator in Abb. 1), welches in dem Mikroenergiewandler die Aufgaben hat, die Brennkammer mit dampfförmigem Brennstoff zu versorgen und den Thermogenerator möglichst effektiv zu kühlen. Der Wirkungsgrad bei der thermoelektrischen Energiewandlung hängt außer von Materialeigenschaften insbesondere von dem Temperaturgradient in dem Generator ab. Durch eine Optimierung der Generatorkühlung kann somit der Wirkungsgrad des Mikroenergiewandlers gesteigert werden. Um auf bewegliche Teile verzichten zu können, wird ein kapillar gepumpter Verdampfer eingesetzt [2, 3]. Es konnte gezeigt werden, dass ein solcher Verdampfer zur Versorgung der Brennkammer mit dampfförmigem Brennstoff eingesetzt werden kann. Unter Verwendung von Methanol konnte eine Wärmestromdichte von bis zu 35 W/cm^2 abgeführt werden. Weitere Ergebnisse werden detailliert dargestellt.

Literaturverzeichnis:

- [1] Kania T, Schilder B, Dreizler A, Hardt S, Janicka J and Stephan P (2006). Conceptual Study of a Micro Energy Converter Using Thermoelectric Materials. The Sixth International Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS2006). Berkeley, U. S. A.

- [2] Schilder B, Zorbach I, Hardt S, Stephan P, Wondra F and Klotzbücher T (2007). Experimental Investigation of Fuel Evaporation on Microstructured Surfaces for Microcombustion. Sixth International Conference on Enhanced, Compact and Ultra-Compact Heat Exchangers. Potsdam, Germany.

- [3] Schilder B, Schuch W and Stephan P (2009). A Capillary Pumped Two Loop System for Cooling of Electronic Devices. Seventh International Conference on Enhanced, Compact and Ultra-Compact Heat Exchangers: From Microscale Phenomena to Industrial Applications. Heredia, Costa Rica.

Numerische und experimentelle Untersuchung des Aufstiegs von Einzelblasen zwischen senkrechten Platten

Dipl.-Ing. Lutz Böhm, Technische Universität Berlin, Berlin / Deutschland

Dipl.-Ing. Helmut Prieske, Technische Universität Berlin, Berlin / Deutschland

Prof. Pierre Bérubé, University of British Columbia, Vancouver / Kanada

Prof. Dr.-Ing. Matthias Kraume, Technische Universität Berlin, Berlin / Deutschland

Für das Stoffsystem Wasser/Luft wird das Verhalten von zwischen senkrechten Platten aufsteigenden Einzelblasen numerisch und experimentell untersucht, da dies trotz vieler praktischer Anwendungen - z.B. zur Deckschichtkontrolle bei der Filtration - bisher in der Literatur nur in unzureichendem Maße bearbeitet wurde. Hierbei wird mit Hinblick auf diese Anwendung besonderes Augenmerk auf die erzeugten Schubspannungen gelegt, die als entscheidend für die Abreinigung gelten. Variierbare Parameter sind hierbei der Plattenabstand, die Blasengröße und die überlagerte Flüssigkeitgeschwindigkeit.

Numerisch wird der Aufstieg von Einzelblasen in Fluent© mit Hilfe der VOF-Methode und eines mitbewegten Gitters realisiert. Dies ermöglicht eine Reduzierung des Rechenaufwands der transienten Simulation und ermöglicht somit das Erreichen eines stationären bzw. periodischen Zustands, der für einen Vergleich unerlässlich ist. Für die Gitterbewegung wird eine User Defined Function mit Fluent© gekoppelt, die die Gittergeschwindigkeit insbesondere während der Beschleunigungsphase der Blase anpasst, und damit ein feines Gitter im Nahfeld der Blase mitführt. Am oberen und unteren Rand des Gitters wird Layering angewendet, um dort das Auftreten zu stark gestreckter und gestauchter Zellen zu vermeiden.

Zur Validierung der numerischen Daten dienen die experimentell ermittelten Aufstiegsgeschwindigkeiten und die Schubspannungen. Die Ermittlung der Aufstiegsgeschwindigkeiten erfolgt mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera und zur Ermittlung von Schubspannungswerten dient die Elektrodiffraktionsmethode.

Der Vergleich der Aufstiegsgeschwindigkeiten zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen experimentellen und numerischen Ergebnissen mit Abweichungen von 5%. Erste Versuche mit der Elektrodiffraktionsmethode ergeben qualitativ ähnliche Verläufe der Schubspannungen.

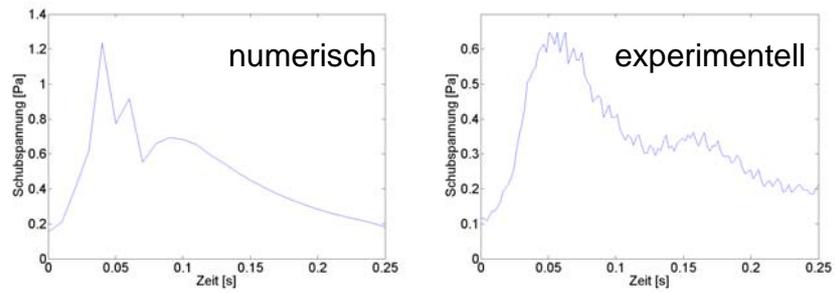


Abb. 1: Entwicklung des Betrags der Schubspannung über der Zeit

Abbildung 1 zeigt exemplarisch die numerisch und experimentell ermittelte Entwicklung des Betrags der Schubspannung an einem Ort bei Passieren einer Blase für zwei gleiche Verhältnisse von Blasengröße zu Plattenabstand.

A second law analysis of mixed convection in a plane channel based on DNS results

Petar Kis, Heinz Herwig, TU Hamburg-Harburg, Hamburg

The most detailed and reliable information one can get in turbulent flow comes from DNS results. With a proper resolution of the finest scales the turbulent motion and heat transfer process can be analysed without any need to model certain aspects of the flow and temperature field. These results, however, are so computationally intensive to an extent that only a few carefully selected cases can be considered. They should be used to extract information that can be incorporated in a proper modelling of turbulent flows since this is the only way in which technically relevant flows can be computed at reasonable cost. Such information can be the flow behaviour very close to the wall from which wall functions can be deduced. It can, however, also be the structure and magnitude of certain turbulence terms that emerge from the modelling procedure.

In our study we combine such considerations with a second law analysis, i.e. by introducing the entropy and its production. In general these quantities can give valuable information about the physics and can serve to evaluate transfer processes. When used in conjunction with a RANS-approach to turbulent flows, however, the entropy is also subject to modelling. Like always in turbulence modelling that part of the entropy which is modelled can and should be compared to the corresponding results from DNS calculations. It also turns out that entropy production is high very close to the wall so that wall functions with respect to this quantity are appropriate, in order to avoid unnecessary grid refinement.

Finally, entropy production considerations can be used to determine the finest scales that have to be resolved in DNS calculations, since dissipation occurs predominantly at the smallest scales of a problem.

Numerische und experimentelle Untersuchung von Rayleigh-Bénard Konvektion in einer geschlossenen Zelle

Wilko Rohlfs, Norman Lahann, Georg Dietze und Reinhold Kneer, RWTH Aachen

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit hoch aufgelösten numerischen Simulationen und Experimenten zur Rayleigh-Bénard Konvektion in einer quaderförmigen geschlossenen Zelle (Breite/Höhe=1.6 und Länge/Höhe=3.1). Untersuchungen dieser Art ermöglichen die rein phänomenologische Aufklärung möglicher Strömungszustände und deren örtlich-zeitlicher Entwicklung für den Fall, dass die Ausbildung der Strömung durch die Gegenwart von Seitenwänden beeinträchtigt wird. Andererseits kann mit ihrer Hilfe ein mechanistisches Verständnis der grundlegenden thermofluidodynamischen Transportprozesse entwickelt werden und somit die stabilitätsanalytische Betrachtung der Fluidodynamik sowie die Charakterisierung des Wärmeübergangs unterstützt werden.

Auf der numerischen Seite wurde das gekoppelte System aus Kontinuitätsgleichung, Energiegleichung und Navier-Stokes Gleichungen (mit der Boussinesq-Annahme für die Temperaturabhängigkeit der Dichte) mit einem Finite-Volumen CFD-Code gelöst. Dabei wurden, für das Verlassen des primären Strömungszustandes erforderliche, Störungen in Form der thermischen Randbedingungen für die horizontalen Begrenzungsflächen in das System eingebracht. Die Amplitude dieser Störungen wurde durch sorgfältige Voruntersuchungen identifiziert, so dass gewährleistet werden konnte, dass die, aus der Instabilität des Primärzustandes resultierende, Fluidodynamik nicht durch numerische Fehlerquellen bestimmt wird.

Mit dieser Methodik wurden voll aufgelöste 3-dimensionale Simulationen von Betriebszuständen durchgeführt, die im Zustandsdiagramm für Rayleigh-Bénard Konvektion in unendlich ausgedehnten Fluidschichten in den Bereichen unimodaler und bimodaler Rollzellenkonvektion bzw. instationärer und turbulenter Konvektion liegen. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf den ersten dieser Betriebszustände gelegt, welcher zusätzlich experimentell untersucht wurde.

Dazu wurden Messungen in einer quaderförmigen Messzelle unter Verwendung eines Glycerin-Wasser Gemisches durchgeführt. Hierbei wurden Temperaturfeld (mit

Flüssigkristall-Thermometrie) und Geschwindigkeitsfeld (mit Particle Image Velocimetry) in verschiedenen Ebenen der Strömung mit optischen Messtechniken erfasst, so dass sich ein 3-dimensionales Bild ergab. Dieses ist gekennzeichnet durch zwei Wirbel, die das gesamte Zellvolumen ausfüllen: einen toroidalen Wirbel und eine angrenzende fast unimodale Rollzelle, welche parallel zur Breite der Messzelle angeordnet ist. Bemerkenswert ist hierbei, dass sich dieser asymmetrische Zustand aus einer anfänglich symmetrischen Strömung entwickelt, was auf eine leichte Asymmetrie der experimentellen Bedingungen hindeutet. In der numerischen Simulation ergeben sich quasi-unimodale Rollzellen unter der Annahme adiabater Seitenwände und ein einzelner toroidaler Wirbel, wenn Wärmeleitung in den Seitenwänden und Wärmeübergang an die Umgebung berücksichtigt werden. Durch zusätzliches Einbringen einer asymmetrischen Störung konnte schließlich die experimentell erhaltene Strömungsform reproduziert werden, wobei sich eine gute Übereinstimmung zwischen experimentellen und numerischen Daten ergab. Simulationsergebnisse für die restlichen Betriebszustände wiesen eine mit der Rayleigh-Zahl steigende Komplexität der Strömung auf bis hin zu zeitlich oszillierenden instationären Strömungsformen.

Simulation der zeitlichen und örtlichen Verteilung der Verdunstungsemissionen im Luftansaugsystem von Motoren

Christian Spengler, Clemens Merten

*Universität Stuttgart, Institut für Chemische Verfahrenstechnik, 70199 Stuttgart,
Deutschland*

Die Abgasvorschriften und -grenzwerte für Kraftfahrzeuge erfahren seit ihrer Einführung in der Europäischen Union in den 1970er Jahren eine permanente Verschärfung, wie zum Beispiel durch die seit 01.09.2009 geltende Euro-5-Norm. Mit dem Ziel der Bewertung und Reduzierung der Emissionen verdunstender Kohlenwasserstoffe aus dem Luftansaugsystem von Ottomotoren werden am Institut für Chemische Verfahrenstechnik der Universität Stuttgart, im Rahmen eines Projektes der Forschungsvereinigung für Verbrennungskraftmaschinen, numerische Untersuchungen zur zeitlichen und örtlichen Ausbreitung der Emissionen durchgeführt.

Im Beitrag werden die Möglichkeiten der numerischen Simulation zur Konzentrationsfeldberechnung mittels der Finite-Volumen-Methode aufgezeigt. Für die Berechnung wurde ein dreidimensionales Modell der Mehrkomponenten-Diffusion nach *Fick* in ANSYS CFX[®] zugrunde gelegt. Mit diesem Modell können die Verdunstungsemissionen eines Mehrkomponenten-Testbenzins aus lokalen Quellen in Luftansaugsystemen des Ottomotors berechnet werden. Die Verdunstungsquellen und ihre Eigenschaften (Anzahl der Quellen und deren Quellstärke) werden über eine adäquate Wahl der Randbedingungen des Simulationsmodells bestimmt. Des Weiteren können verschiedene thermische Belastungen des Luftansaugsystems wie beispielsweise der CARB (California Air Resources Board) -Testzyklus als Randbedingungen aufgeprägt werden. Dadurch werden die thermisch initiierten Konvektionsströmungen des Gasgemisches und deren Einfluss auf den Stofftransport im System berücksichtigt.

Im Beitrag werden die verschiedenen Modellierungsansätze und Berechnungsergebnisse zur Konzentrationsfeldberechnung vorgestellt und diskutiert. Die in Versuchen am Labormodell eines Luftansaugsystems ermittelten Ergebnisse werden mit den Simulationsdaten verglichen und zu deren Validierung genutzt.

CFD-Einsatz bei der Kühlung von Automotive-Infotainment-Geräten

Valod Noshadi

Harman/Becker Automotive Systems, Karlsbad/Deutschland

Einleitung

Um der dauernd wachsenden Anzahl von Features und der steigenden Komplexität der Anwendungen nachzukommen, wird immer leistungsfähigere Hardware in den elektronischen Geräten eingesetzt, womit die Verlustleistungen stetig steigen. Darüber hinaus werden die Geräte immer kompakter und in engen, gut isolierten Hohlräumen in den Autos eingebaut.

Die Kühlungskonzepte der Geräte müssen in sehr frühen Entwicklungsphasen erarbeitet und abgeschlossen werden. Später, wenn die Arbeiten an elektronischem Layout und mechanischer Konstruktion fortschreiten, ist jede Änderung im Aufbau praktisch nicht mehr möglich. Dafür kommt das CFD zum Einsatz. Die Geräte werden 3-D modelliert und simuliert. Die Wärmeleitung, Konvektion sowie Strahlung werden berücksichtigt.

Die CFD-Simulationen für ein luftgekühltes Gerät werden präsentiert und die Ergebnisse mit Infrarotaufnahmen verglichen. Dann werden die Untersuchungen an einem Flüssigkeitgekühlten Gerät präsentiert.

Vergleich CFD mit Infrarotaufnahmen

Ein Gerät wurde außerhalb seines Chassis auf dem Tisch betrieben, um Infrarotaufnahmen zu ermöglichen. Die Ergebnisse wurden mit entsprechenden CFD-Simulationen verglichen. Die Unterschiede zwischen Messung und Simulation liegen im Bereich $\pm 3K$.

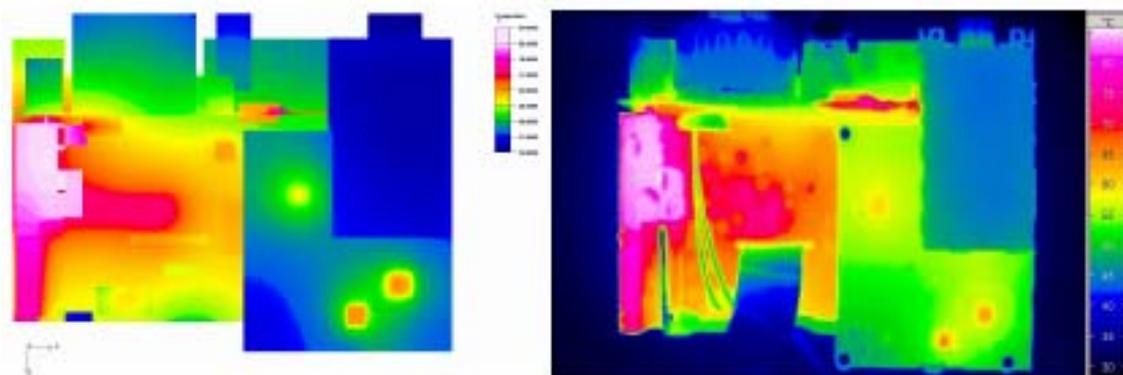


Abb. 1 – Vergleich CFD-Simulationsergebnis, links, mit Infrarotaufnahme, rechts.

Flüssigkeitskühlung

Um die technische Machbarkeit eines Flüssigkeitskühlkonzepts zu demonstrieren, wurde ein aktuelles Gerätes von Luftkühlung auf Wasserkühlung umgestellt. CFD-Simulationen wurden eingesetzt, um den Kuhkreislauf zu dimensionieren und das Konzept zu bewerten. Alle größeren Wärmequellen im Gerät werden mit Hilfe von Gapfiller am Chassisboden kontaktiert. Die Wärme, die vom Bauteil direkt zum Chassis geleitet wurde, wird durch den Wasserstrom in dem schmalen Kanal am Chassisboden weggetragen. Da die transportierte Wärme in einem Wärmetauscher an die Fahrzeugumgebungsluft abgegeben wird, ist das Gerät thermisch von seiner unmittelbaren Umgebung im Bauraum abgekoppelt. Die Fahrzeugumgebungsluft mit höchstens 50°C ist 20K kälter als die Luft im Bauraum. Damit sinkt das Gesamttemperaturniveau im Gerät beträchtlich. Die Flussigkuhlung hat die folgenden Vorteile im Vergleich zur Luftkühlung.

- Niedriger Betriebstemperatur => Höhere Lebensdauer der Komponenten
- Kein störendes Lufgerausch, keine Staub- und Schmutzsammelung im Gerät
- Keine temperaturbedingten Funktionsbeschrankungen
- Kein Kuhkorper, kein Lüfte => kompakteres Gerät
- Keine Luftein-/Auslassöffnungen => bessere elektromagnetische Verträglichkeit

In den Hybrid- oder Elektroautos können die elektronischen Geräte an den schon vorhandenen Kuhkreislauf von Li-Ionen-Batterien angehängt werden und so werden keine zusätzlichen Kosten verursacht.

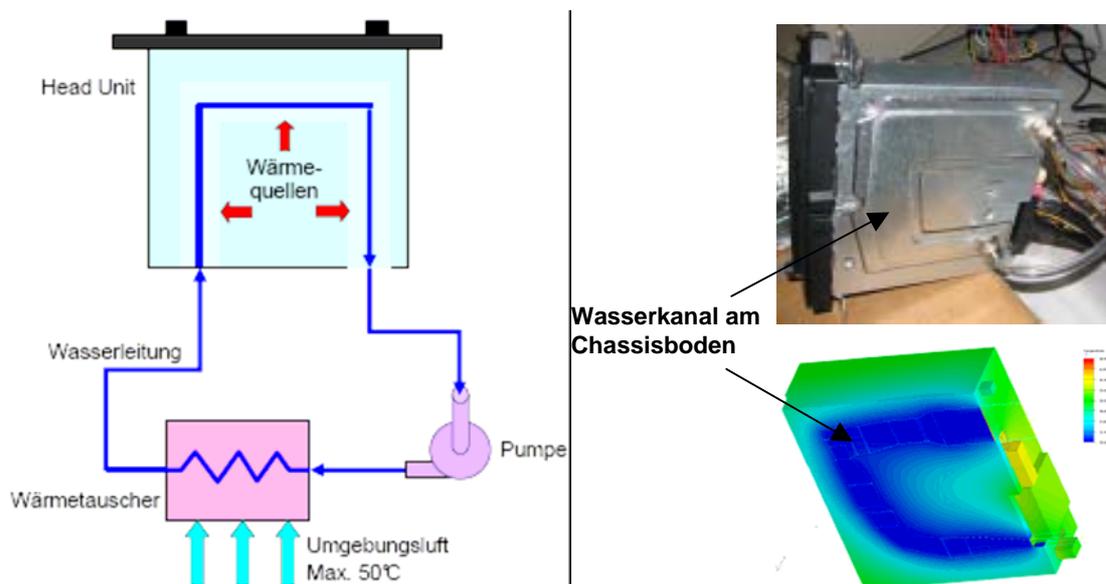


Abb. 2 – Schematische Darstellung des Flüssigkeitskühlkreislaufs, ein Foto von umgebautem Gerät und das CFD-Simulationsergebnis.

Numerische und experimentelle Untersuchungen zur adiabaten Filmkühleffektivität hinter innovativen Filmkühlgeometrien

B. Kröss, M. Pfitzner, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg/Deutschland;

Der Wirkungsgrad einer Gasturbine lässt sich durch die Steigerung der Turbineneintrittstemperatur bei gleichzeitiger Steigerung des Druckverhältnisses erheblich erhöhen. Die auftretenden Gastemperaturen in der Brennkammer und in den ersten Turbinenstufen liegen heutzutage deutlich über den zulässigen Materialtemperaturen, wodurch eine ausreichende Kühlung unerlässlich wird. In Flugzeugtriebwerken kommt hierfür die Filmkühlung zum Einsatz. Nur über eine Verbesserung der Kühleffektivität bei minimalem Kühlluftverbrauch kann eine weitere Erhöhung des Wirkungsgrades durch Steigerung der Gastemperatur erreicht werden. Aus diesem Grund wurden sowohl numerische als auch experimentelle Untersuchungen hinter innovativen Filmkühlgeometrien durchgeführt.

Die numerischen Untersuchungen zur Kühlwirkung wurden mit einem kommerziellen CFD-Tool durchgeführt. Als RANS-Turbulenzmodell kommt das „realizable k- ϵ -Modell“ zum Einsatz. Die Kühlluft wird aus einer zylindrischen, um 30° zur Oberfläche geneigten Bohrung in einem 0,75·D tiefen Oberflächenspalt (Trench) ausgeblasen. Um die ankommende Grenzschicht zu beeinflussen, befindet sich in Strömungsrichtung vor dem Spalt zwischen den Bohrungen ein unregelmäßiger Tetraeder. Der Einfluss der Tetraederhöhe (0,25; 0,5; 0,75 und 1·D) auf die laterale Kühlfilmausbreitung bei unterschiedlichen Ausblaseraten (1; 2 und 3) und konstantem Dichteverhältnis (1,75) wird untersucht und mit der Ausblasung ohne Tetraeder verglichen. Die numerischen Ergebnisse zeigen dabei eine deutliche Verbesserung der lateralen Kühlfilmausbreitung.

Zur Verifizierung der numerischen Untersuchungen wurde ein Filmkühlprüfstand aufgebaut. Die Experimente finden in einem geschlossenen, thermischen Unterschallwindkanal statt. Zur Realisierung eines Dichteverhältnisses von 1,75 wird der Windkanal auf 65 °C erwärmt und die Kühlluft mit flüssigem Stickstoff auf -80 °C gekühlt. Die Oberflächentemperaturen werden mit einer Thermographiekamera aufgenommen, wodurch die 2-d Verteilung der Filmkühleffektivität bestimmt werden kann. Ergebnisse der Messungen zur Filmkühleffektivität mit Tetraedergeometrien liegen bis Anfang 2010 vor.

Wirbelunterdrückung in Filmen

A. Wierschem¹, T. Pollak², D. Wiedenbauer³, N. Aksel²,

¹Strömungsmechanik, Universität Erlangen-Nürnberg, Cauerstr. 4, 91058 Nürnberg

²Technische Mechanik und Strömungsmechanik, Universität Bayreuth, 95440 Bayreuth

³ Systemverfahrenstechnik, TU München, Weihenstephaner Steig 23, 85354 Freising

Filmströmungen treten in vielen industriellen Verfahrensschritten auf. In vielen dieser Anwendungen fließen die Filme über gekrümmte Oberflächen. Die Oberflächentopographie kann dabei nicht nur einen großen quantitativen Einfluss auf die Filmströmung ausüben, sondern auch qualitativ neue Regime provozieren, die in einem Film über ebenem Substrat nicht auftreten können. Hierzu sind das Auftreten von bodennahen Wirbeln in Mulden, der hydraulische Sprung aber auch Resonanz oder das Unterdrücken von Oberflächenwellen zu nennen.

Der starke Einfluss der Substratform auf die Filmströmung kann gezielt genutzt werden, um verfahrenstechnische Prozesse zu kontrollieren, zu optimieren und neue Prozessfenster zu erschliessen. Hier zeigen wir, wie bodennahe Wirbel in einem Reynoldszahlbereich unterdrückt werden können und zeigen, welche Mechanismen dafür ausschlaggebend sind. Die nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft eine Sequenz.

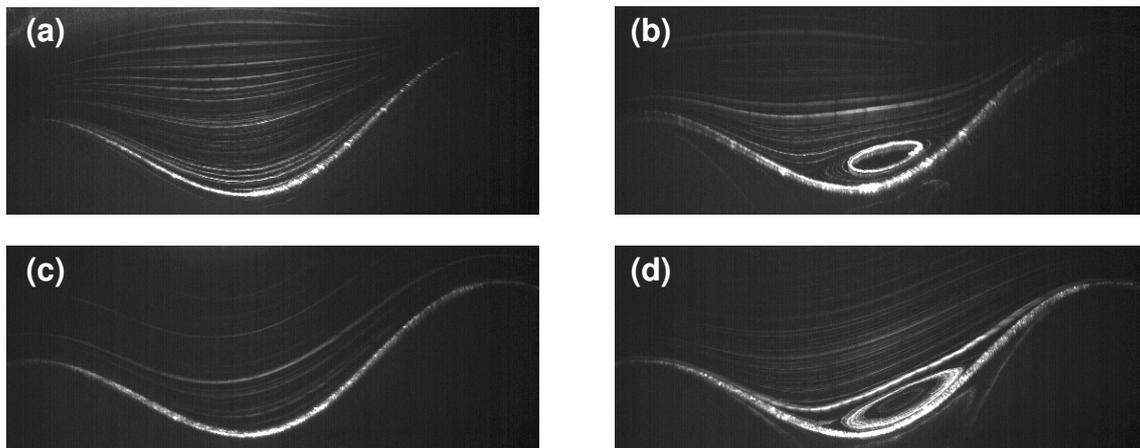


Abbildung: Visualisierung der Filmströmung über einer sinusförmigen Bodenwelle. Bei niedrigen Reynoldszahlen wie in (a) tritt noch kein Wirbel auf. Erst oberhalb einer kritischen Reynoldszahl wird ein trägheitsinduzierter Wirbel beobachtet, wie in (b) gezeigt. Bei weiterer Erhöhung der Reynoldszahl schrumpft der Wirbel und verschwindet schließlich zur Gänze. Der Wirbel bleibt in einem Reynoldszahlfenster unterdrückt. (c) zeigt ein Beispiel aus diesem Bereich. Erst bei hohen Reynoldszahlen tritt der Wirbel wieder auf, wie in (d) gezeigt. Reynoldszahlen: 4,5 (a), 19,5 (b), 34,5 (c), 44 (d).

Direkte numerische Simulation der Filmströmung in hochoberigen Turbinengleitlagern unter Berücksichtigung von Kavitationsphänomenen

M. Grimm, T. Thiemann, Stefan aus der Wiesche

FH Münster, Fachbereich Maschinenbau, Labor für Wärmetechnik

Stegerwaldstr. 39, 48565 Steinfurt, Germany

Die traditionellen Methoden bei der Analyse von hydrodynamischen Gleitlagern basieren im Wesentlichen auf der Reynoldsen Gleichung und damit auf einer indirekten Erfassung der Filmströmung. Wärmeübergangs- und Kavitationsphänomene können hierbei durch geeignete halb-empirische Ergänzungen berücksichtigt werden. Die derzeitigen Konstruktionen für hochoberige Turbinenlager sind allerdings durch immer komplexere Taschen- und Zufuhrgeometrien gekennzeichnet, die auf Strömungen führen, welche prinzipiell nicht mehr durch den Reynoldsen Ansatz erfasst werden können.

Als zukünftige Alternative bietet sich hierbei die Unterstützung durch direkte numerische Simulationen (CFD) der Filmströmung auf Basis der vollen Navier-Stokes-Gleichungen an. Hierfür ist allerdings die Implementierung eines geeigneten Kavitationsmodells für die Praxis essentiell. Zudem müssen Wärmeübergangsphänomene und temperaturabhängige Stoffwerte berücksichtigt werden. Aufgrund der typischen Betriebsparameter (Spaltbreiten, Drehzahlen, Druck- und Temperaturverhältnisse) ergibt sich eine sehr anspruchsvolle Mehrphasenströmung, die durch komplexe Strömungsformen speziell in den Lagertaschen gekennzeichnet ist.

Im Beitrag wird ein solcher direkter CFD-Ansatz vorgestellt und mit Hilfe von Testfällen sowie einer Vergleichsstudie bewertet. Hierbei zeigt sich, dass trotz des hohen rechnerischen Aufwandes ein direkter CFD-Ansatz ein sehr großes Potential für die zukünftige Entwicklung aufweist. Als praktischer Anwendungsfall wird zudem die Analyse der Taschengometrie für ein Gleitlager einer stationären Gasturbine größerer Leistung vorgestellt.

3D direct numerical simulation (DNS) of heat and mass transfer of multi-component mixture droplets

Christian Huber, Bernhard Weigand

*Institut für Thermodynamik der Luft- und Raumfahrt (ITLR), Universität Stuttgart,
Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart*

The droplet-droplet interaction and evaporation of multi-component droplets in a free-stream play a key role in many engineering and natural processes ranging from rain droplet formation, air and ground water pollution, medical applications to fuel injection in engines and gas turbines. The current project, which is placed within the Stuttgart Cluster of Excellence "Simulation Technology" (SimTech), investigates the basic processes by means of numerical simulation. Therefore the inhouse 3D-CFD program Free Surface 3D (FS3D) is used.

FS3D solves the Navier-Stokes equations for incompressible multiphase flows with free surfaces. Tracking of the interface is based on the volume of fluid method (VOF) combined with a piecewise linear interface reconstruction (PLIC) method. Evaporation of single component droplets (Fig.1.) was simulated in, e.g., [1].

The aim of the present project is to implement additional species transport equations and to extend the existing evaporation model so that a large number of species can be considered. One application will be the study of the time dependent spreading of a substance by prescribing initial distributions of different species in the computational field. The mass and heat transfer processes of different multi-component droplets will be predicted by numerical computations. From these results, models can be developed which can improve large scale simulations (e.g. spray models).

The presentation covers the numerical method applied as well as some first results of multi-component droplet simulations.

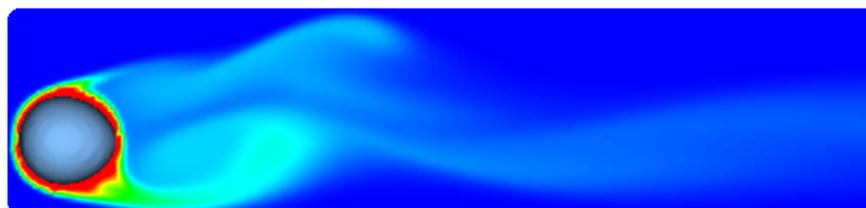


Fig.1. Vapor distribution behind a water droplet in a hot air stream at $t=0.7\text{ms}$

- [1] J. Schlottke, B. Weigand, Direct numerical simulation of evaporating droplets, Journal of Computational Physics 227 (2008) 5215-5237.

Untersuchung von reaktiven turbulenten Mischungsvorgängen in einem coaxialen Strahlmischer

M.Walter, N.Kornev, Z.Zhdanov und E.Hassel

Universität Rostock, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik

Albert-Einstein-Straße 2, 18059 Rostock

Mischungsvorgänge in reaktiven turbulenten Strömungen werden vornehmlich durch konvektive Transportprozesse und molekulare Diffusion beeinflusst. Das Verhältnis daraus ist die dimensionslose Schmidt Zahl, welche zur Charakterisierung des Stofftransports in der Strömung dient. Abhängig von den Zeitskalen der makroskopischen und mikroskopischen Vermischung stellen sich unterschiedliche Mischungszustände ein. Für die vollständige Erfassung aller turbulenten Strukturen in der Strömung ist es notwendig, das Gebiet bis zur Kolmogorov Länge aufzulösen. Bei der Vermischung von Fluiden, insbesondere unter Berücksichtigung von chemischen Reaktionen, müssen jedoch aufgrund von kleinskaligen diffusiven Prozessen weitere (turbulente) Strukturen berücksichtigt werden, die abhängig vom Fluid bis zu 100 Mal kleiner sein können als die Kolmogorov Länge (z.B. in Flüssigkeiten). Dieser Bereich wird als Batchelor Länge bezeichnet. Mit Hilfe direkter numerischer Simulationen (DNS) können alle Strukturen während des Mischungsprozesses erfasst werden. Von Vorteil ist hierbei die geschlossene Form der turbulenten und chemischen Quellterme im Gleichungssystem, wobei der Nachteil in der vollständigen Auflösung des gesamten Rechengebiets bis hin zur Batchelor Länge besteht, was sehr große Rechenkapazitäten und Rechenzeiten erfordert. Häufig werden deshalb RANS oder LES Simulationen zur Berechnung von reaktiven turbulenten Mischungsvorgängen eingesetzt, da diese Verfahren das Gebiet nur teilweise auflösen und somit geringere Rechenkapazitäten und Rechenzeiten benötigen. Die notwendige Modellierung der Turbulenz sowie der Turbulenz-Chemie-Interaktion muss hierbei durch geeignete Verfahren erfolgen. Komplexe Turbulenz-Chemie Modelle sind z.B. „presumed PDF Methoden“, „Conditional Moment Closure“ oder „transported PDF Methoden (RANS)“ bzw. „filtered density functions (LES)“. Der erforderliche Rechenaufwand im Rahmen einer RANS oder LES liegt dabei unter dem einer DNS, aber dennoch werden zur

Berechnung der Turbulenz-Chemie-Interaktion relativ große Rechenkapazitäten benötigt, wodurch sie für industrielle Anwendungen z.Zt. noch wenig geeignet sind. Ein bisher ungelöstes Problem in der Modellierung besteht in der exakten Berücksichtigung großer Schmidt Zahlen. Die derzeitig verfügbaren Modelle sind bisher nicht in der Lage den Einfluss großer Schmidt Zahlen abbilden zu können ohne das Rechengbiet extrem zu verfeinern.

Diese Studie untersucht das Potential von LES und RANS zur Berechnung von reaktiven turbulenten Strömungen mittels einfachen Mischungsmodellen und chemischen Schließungsansätzen bei hohen Schmidt Zahlen und geringen Gitterauflösungen. Ein turbulenter Freistrahler mit Reynolds Zahl ~ 12000 und Schmidt Zahl ~ 1000 dient dabei als Basis für die numerische Simulation einer schnellen irreversiblen Ein-Schritt-Reaktion $A+B \rightarrow P$ (Neutralisationsreaktion) und einer schnellen Reaktion $A+B \rightarrow R$ mit unerwünschter Folgereaktion $B+R \rightarrow S$ (Azo Kopplung). Die Simulationsergebnisse bzgl. der Neutralisationsreaktion werden mit experimentellen Daten aus aktuellen PLIF Messungen verglichen. Bei der numerischen Untersuchung der Azo-Kopplung stehen vor allem effektive Konzepte zur Unterdrückung von Selektivitätsverlusten durch die unerwünschte Folgereaktion im Vordergrund. Zur Mischung der Fluide wird ein klassischer koaxialer Strahlmischer verwendet. Der Strahlmischer besteht aus einer Düse mit dem Durchmesser $d=0.01\text{m}$ welche koaxial in einem Rohr mit dem Durchmesser $D=0.05\text{m}$ und der Länge $L=0.4\text{m}$ angeordnet ist. Das Verhältnis der Volumenströme zwischen Düsenaustritt und Rohr beträgt 5. Die Konzentrationen werden durch Reaktionsfortschrittsvariablen beschrieben, deren Werte mittels Transportgleichungen berechnet werden und auf der „conserved scalar theory“ basieren. Zur Schließung der chemischen Quellterme in den Transportgleichungen werden einfache „moment closure“ Ansätze genutzt.

Numerische Untersuchung eines Rotor-Stator-Mischers hinsichtlich des Einflusses der Betriebsparameter auf Druckabfall, Drehmoment, viskose Dissipation und Mischgüte

Christina Smuda, Steffen Schütz, Manfred Piesche

Universität Stuttgart, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik

Böblinger Str. 72, 70199 Stuttgart

Rotor-Stator-Mischer werden häufig zur Vermischung (hoch)viskoser Flüssigkeiten eingesetzt. Bei mittel- und höherviskosen Fluiden findet der Mischprozess vollständig im laminaren Strömungsbereich statt. Dabei liegt in Rotor-Stator-Mischern die Überlagerung einer axialen und einer rotatorischen Strömung vor. Die Rotationsströmung wird durch die Bewegung eines Rotors induziert, der sich koaxial und mit hoher Drehzahl in einem Stator dreht. In den engen Spalten zwischen Rotor und Stator liegen sehr steile Geschwindigkeitsgradienten vor, die eine starke Deformation einzelner Fluidelemente und damit eine hohe Mischeffizienz bewirken.

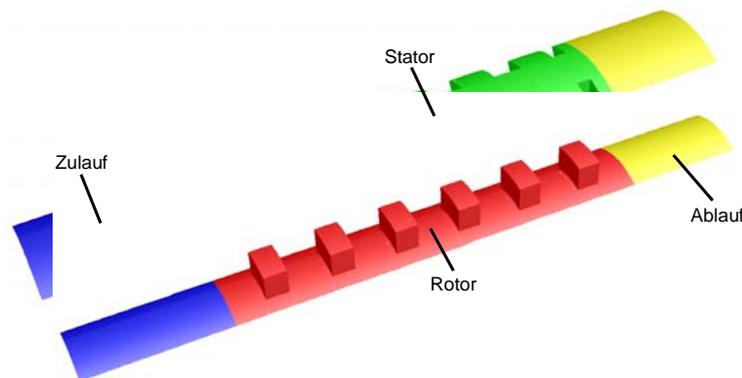


Abb. 1: Simulationsmodell Rotor-Stator-Mischer

Das Betriebs- und Mischverhalten eines Rotor-Stator-Mischers wurde mit Hilfe der numerischen Strömungsmechanik untersucht. Hierzu wurde das in Abb. 1 dargestellte Simulationsmodell verwendet. Eine deutliche Verkürzung der Rechenzeit wurde mit Hilfe periodischer Randbedingungen in Umfangsrichtung erreicht. Aus den Simulationsergebnissen konnten allgemeingültige Zusammenhänge in Form von Ähnlichkeitsgesetzen zwischen geometrischen, stofflichen und betrieblichen Einflussgrößen sowie dem Differenzdruck, dem auf die Rotorwelle wirkenden Moment, der viskosen Dissipation und der Mischgüte abgeleitet werden. Erste Vergleiche der aus den Simulationen erhaltenen Daten mit experimentellen Untersuchungen zeigen eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse.

Single-phase study of a RDC-column and evaluation of turbulence models using Particle Image Velocimetry (PIV)

Enes Aksamija, Thomas Gurker und Matthäus Siebenhofer

Extraction columns have been object of investigation for decades. In the last couple of years however, the importance and applicability of Computational Fluid Dynamics (CFD) is constantly growing due to the increase of calculation power. So far, the physical reality is still far too complex to be predicted without using a bunch of models and assumptions.

In previous work, single-phase and two-phase simulations have been performed in order to predict significant operating parameters like the axial dispersion coefficient or the bubble hold-up. Mostly *Laser Doppler Anemometry* (LDA) has been used so far to evaluate the simulation results. DRUMM & BART have also performed *Particle Image Velocimetry* (PIV) in order to evaluate the performance of the different turbulence models in a RDC-column. The findings of DRUMM & BART were independently verified and deepened in the present work.

The single-phase flow of a *Rotating Disc Contactor* (RDC) extraction column ($D_K = 150 \text{ mm}$) has been investigated. The general idea behind the study was the attempt to predict the single-phase flow as accurately as possible, avoiding as many assumptions and simplifications as possible. Therefore *Enhanced Wall Treatment* was chosen instead of *Wall Functions*, axial symmetry (2D) was not assumed and the promising polyhedral mesh was used.

By applying *Particle Image Velocimetry* (PIV), twelve different operating conditions were recorded while varying the speed of shaft rotation and the volume flow of the continuous phase. One could observe that the qualitative flow pattern (number of eddies, centers of the eddies, etc.) did not vary between the different operating conditions, and appears to be a function solely of geometric dimensions.

The mean velocity vector fields obtained from PIV were subsequently used to evaluate the most common turbulence models used in CFD. By performing initial 2D simulations in *Ansys Fluent 12*, the *Reynolds Stress Model* turned out to give the best predictions. All other models failed to predict the flow pattern in the inner area close to the shaft, which is absolutely consistent with the findings of *Drumm & Bart*.

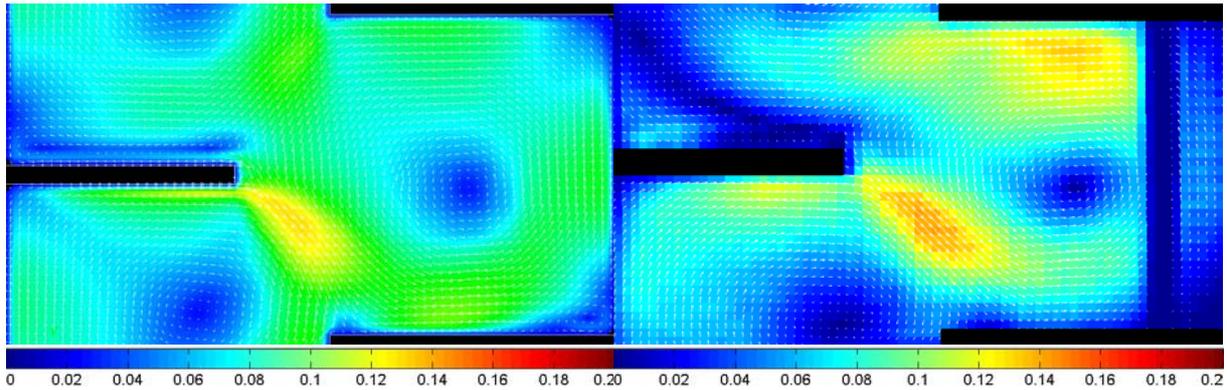


Figure 1: Comparison of vector fields at 300 [rpm] shaft speed and 120 [l/h] volume flow, RSM (left), PIV (right), Colour bar in [m/s].

Because of its strong performance, RSM was the model of choice for a costly 3D simulation where the effect of the stator pins was investigated. For this purpose, additional experimental data from a LDA measurement of WEIB (1995) was available. While there was a big deviation in the 2D simulation where the effect of the pins was neglected, the 3D simulation produced extraordinary agreements with WEIB'S experiment.

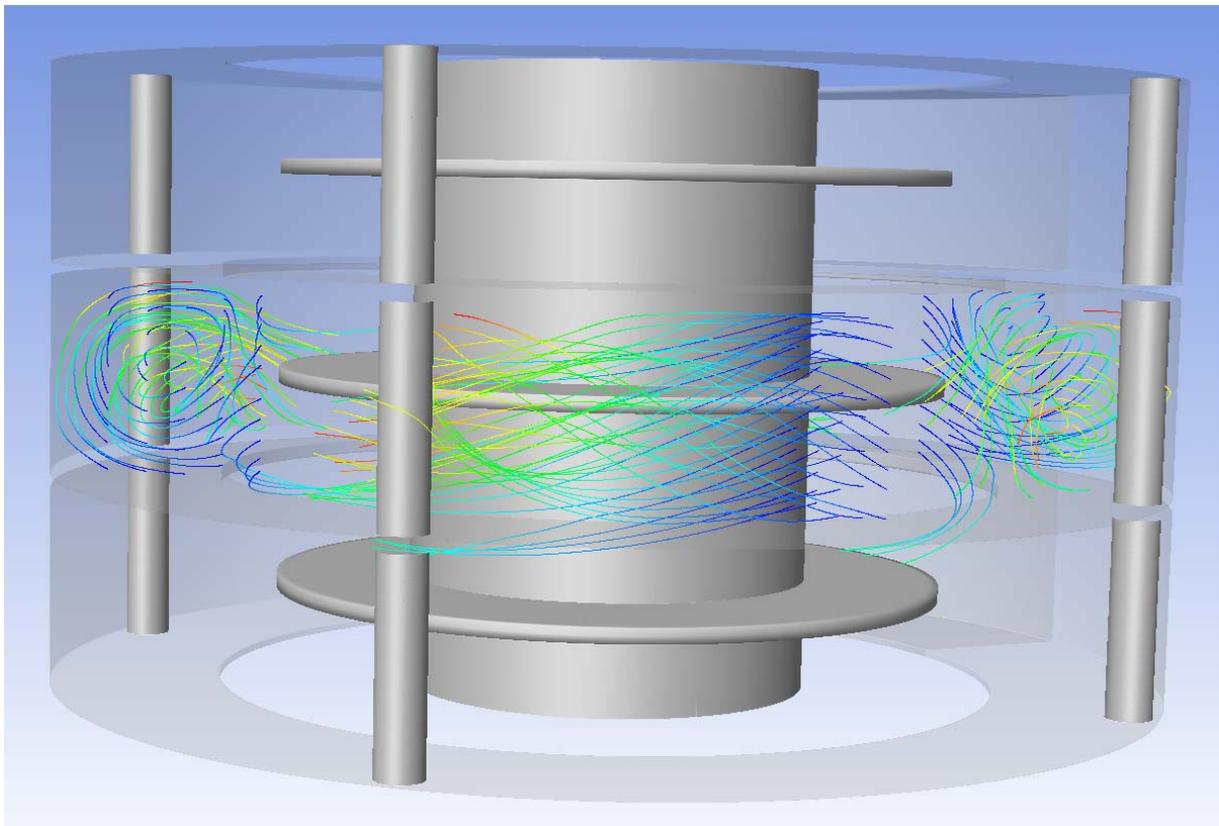


Figure 2: Path lines of the single phase flow in the outer part of the Compartment.

Finally, a fully polyhedral 3D mesh was tested for its performance. Meshing this complex geometry with *Enhanced Wall Treatment* turned out to be extremely challenging in *Ansys Gambit*, even with 16GB of memory. Subsequent comparison of the attained results with data from axis-symmetric 2D simulation did not show any significant loss of accuracy due to the reduction.

Literature:

- [1] Drumm C., Bart H.J., "Hydrodynamics in a RDC Extraktor: Single and Two-Phase PIV Measurements and CFD Simulations", *Chem. Eng. Technol.*, 29, No. 11, pp 1297-1302, 2006.
- [2] Weiß C., "Experimentelle Charakterisierung und numerische Simulation von dispersen Zweiphasenströmungen in gerührten Gegenstromkolonnen der Bauart RDC", Dissertation, TU Graz, Oktober 1995.

Simulation der Übergangszone zwischen zwei Elektrolyten bei simultanem elektroosmotischen und elektrophoretischem Transport in Mikrokanälen

Tobias Baier¹, Friedhelm Schönfeld², Gabriele Goet¹, Steffen Hardt¹,

¹TU Darmstadt, ²Hochschule Rhein-Main, Rüsselsheim

Isotachophorese (ITP) in Mikrokanälen konnte sich in den letzten Jahren als leistungsfähige und vielseitige Methode sowohl zur Probenaufkonzentrierung als auch zur Trennung und Detektion von Analyten etablieren. In den meisten Fällen ist der rein isotachophoretische Transport jedoch von einem elektroosmotischen Fluss (EOF) aufgrund der elektrischen Doppelschicht an der Grenzfläche zwischen Flüssigkeit und Kanalwand überlagert. Da die Stärke des EOF entscheidend von der Zusammensetzung der jeweiligen Elektrolyten abhängt, ist dieser in den jeweiligen Kanalbereichen unterschiedlich stark ausgeprägt. Insbesondere kommt es in der Übergangszone zwischen zwei Elektrolyten zur Rezirkulation und damit zu einem Verschmieren dieser Zone.

Trotz seiner Bedeutung für das Auflösungsvermögen isotachophoretischer Trennverfahren wurde das Zusammenspiel von ITP und EOF bisher wenig untersucht. Wir präsentieren ein Finite-Elemente-Modell zur Berechnung der entsprechenden Strömungsfelder und Konzentrationsprofile. Dieses Modell basiert auf der Nernst-Planck-Gleichung für den Ionentransport gekoppelt an eine Lösung der Stokes-Gleichung für das Geschwindigkeitsfeld unter Berücksichtigung der Helmholtz-Smoluchowski-Randbedingung für den elektroosmotischen Fluss. Je nach Verhältnis der elektrophoretischen und elektroosmotischen Geschwindigkeiten in den Elektrolyten lassen sich verschiedene Regimes identifizieren. Die Simulationen zeigen, dass bei unterschiedlichen elektroosmotischen Geschwindigkeiten auf beiden Seiten der Übergangszone der Grenzbereich zwischen den beiden Elektrolyten deformiert wird. Führt man den dimensionslosen Parameter γ als Verhältnis der elektroosmotischen Geschwindigkeiten zu beiden Seiten der Übergangszone ein, so zeigt sich, dass das Ausmaß der Verzerrung proportional zu $1-\gamma$ ist. Wir vergleichen die Resultate der Simulation in unterschiedlichen Näherungen mit analytischen Modellen. Insbesondere wird ein analytisch berechneter Ausdruck des Geschwindigkeitsfeldes in der Nähe der Übergangszone mit Simulationen verglichen.

Diskrete-Elemente-Modellierung des Verweilzeitverhaltens von Partikeln bei der Wirbelschichtgranulation

L. Fries¹, S. Antonyuk¹, S. Heinrich¹, S. Palzer²

*¹ Institut für Feststoffverfahrenstechnik und Partikeltechnologie,
Technische Universität Hamburg-Harburg, Deutschland*

² Nestlé Research Center Lausanne, Vers-Chez-Les-Blanc, Schweiz.

Granulations- und Agglomerationsverfahren in der Wirbelschicht spielen eine bedeutende Rolle bei der Erzeugung und Veredelung von pulverförmigen Feststoffen in der Lebensmitteltechnologie und in der pharmazeutischen Industrie. Sie ermöglichen die Herstellung staubfreier, frei fließender Partikel mit definierter Korngrößenverteilung und Festigkeit. In eine fluidisierte Feststoffschüttung wird über eine Düse Flüssigkeit eingetragen, welche die Partikeloberflächen benetzt, so dass feuchte Partikel kollidieren und aneinander haften. Wichtige Haftmechanismen sind die Ausbildung von Flüssigkeitsbrücken sowie insbesondere bei amorphen Materialien zunehmende Van-der-Waals-Kräfte infolge plastischer Kontaktdeformation. Eine homogene Verteilung der Sprühflüssigkeit im Wirbelbett ist Voraussetzung für gleichmäßiges Partikelwachstum, wogegen eine lokale Überfeuchtung in der Nähe des Düsenaustritts zur Bildung von Partikelclustern führt. Im Gegensatz dazu kann eine zu gleichmäßige Verteilung der Feuchtigkeit oder eine zu hohe Luftfeuchte im Produkt zu einem Zusammenbruch der Wirbelschicht führen.

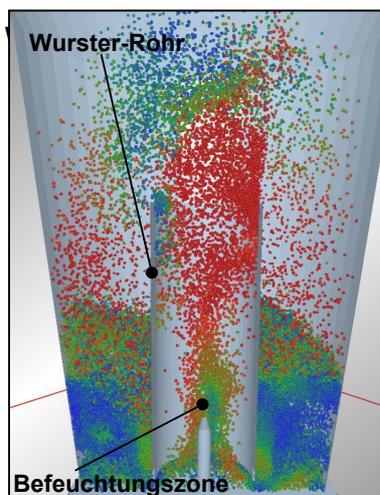


Abbildung 1: DPM-Simulation der Partikelbewegung;
rot: $v_p > 1,5$ m/s;
blau: $v_p < 0,5$ m/s

Die Diskrete-Partikel-Modellierung (DPM, Abbildung 1) ermöglicht eine detaillierte Betrachtung der zugrunde liegenden komplexen Gas-Feststoff-Strömung ausgehend von einer exakten Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen individuellen Partikeln.

Die Bewegung der Gasphase wird über volumengemittelte Navier-Stokes-Gleichungen beschrieben und mit der dispersen Phase gekoppelt.

Am Beispiel eines Wirbelschichtgranulators mit zentral positionierter Bottom-Spray-Düse und darüber angebrachtem Wurster-Rohr (Glatt GF3, Abbildung 2) wurde die Verweilzeit der Partikel innerhalb einer

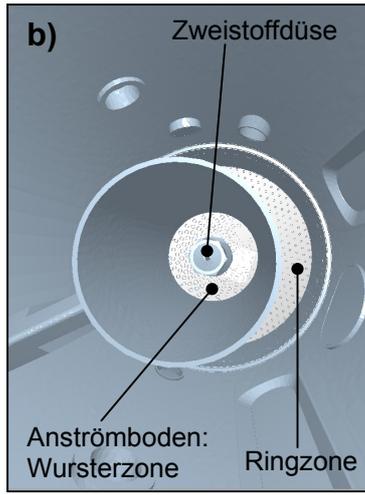


Abbildung 1: Geometrie des Wurster-Granulators.
 a) Seitenansicht, b) Draufsicht des Innenraums

kegelförmigen Befeuch-
 tungszone oberhalb der
 Düse sowie in der lateralen
 Trocknungszone untersucht.
 Aus der Integration der
 Partikeltrajektorien lässt sich
 auf den Flüssigkeitsgehalt
 der Partikel schließen.

In diesem Zusammenhang
 wurde der Einfluss einer
 Variation geometrischer

Parameter wie der Spaltbreite am Boden und der Höhe des Wurster-Rohres sowie einer Modifikation von Prozessparametern wie der Anströmgeschwindigkeit und des zentral zugeführten Gasmassenstromanteils auf die Breite der Verweilzeitverteilung in der Schüttung untersucht. Darauf basierend können Design und Prozessführung eines Wurster-Granulators optimiert werden.

Zudem wurde der Einfluss des Kontaktmodells für Partikelkollisionen auf die simulierte Fluidynamik eines Wurster-Granulators untersucht.