

# Experimentelle und numerische Untersuchungen von Strömungsvorgängen und Wärmetransport in Mikrowärmetauschern

V. Heinzel, U. Imke, H. Sauter, IRS

## Einleitung

Die Mikroverfahrenstechnik durchläuft z. Z. eine Phase der Entwicklung, die sich in vielen Anwendungen vom Stande bloßer Exploration bereits wegentwickelt und zum kommerziellen Einsatz geführt hat. Hierbei ist eine On-line-Messtechnik und -Analytik im althergebrachten Maßstab nicht mehr möglich. Thermo- und fluiddynamische Parameter sind jedoch von großem Interesse, besonders bei Anwesenheit von Partikeln, da hier das Fouling<sup>1)</sup> eine begrenzende Rolle spielt. Dieses ist seinerseits von lokalen Strömungsparametern, aber auch von Oberflächeneigenschaften abhängig. Notwendige Untersuchungen hierzu legen eine Kombination von numerischer Strömungssimulation und experimenteller Darstellung nahe. Die hier vorgestellten Rechnungen basieren auf vereinfachenden Modellannahmen, um möglichst effizient umfangreiche Parameterstudien durchzuführen. Spezieller Anwendungsbereich dieser Untersuchungen sind die Strömungsverhältnisse in den Miniatur-Hochleistungswärmetauschern, die im IMVT erfolgreich produziert [1] und vermarktet werden. Trotz der sehr guten, integral gemessenen Daten wird ein weiteres Verbesserungspotential vermutet, wenn z. B. die Übergänge laminar-turbulent im Inneren der Kanäle erfasst werden könnten. Auch die Vorgänge an Ein- und Auslauf (Strömungsverteilung) können nur an einem visuell offenen Modell beobachtet und/oder durch numerische Modellierung zugänglich ge-

macht werden. Durch Bündelung von Produktion, Experiment und Simulation wird ein Synergieeffekt zur breiteren Einführung von Mikrokomponenten in die Verfahrenstechnik angestrebt. Im folgenden werden zuerst die experimentellen Arbeiten vorgestellt. Eine Darstellung der numerischen Simulationen schließt sich an.

## Experimenteller Ansatz

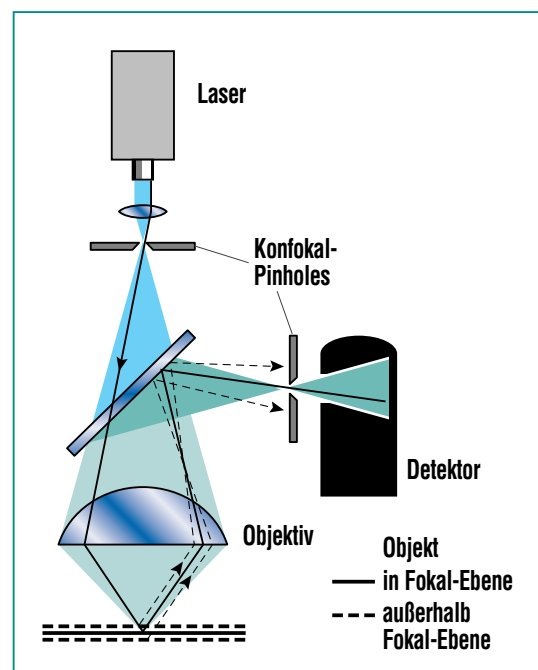
Klassische, auf den Mikromaßstab übertragbare Methoden der Strömungserfassung sind die optischen, wie etwa Laser Doppler Anemometrie (LDA), Particle Image Velocimetry (PIV) oder Tracking. LDA wird aber bei zu kleinen Dimensionen keine Ortsauflösung mehr leisten können, da in zu kleinen Volumina zu wenig Interferenzstreifen vorliegen, um zu einem hinreichenden Signal-Rauschverhältnis zu kommen.

PIV und Tracking verwenden die Bilder von Tracerpartikeln im Fluid, die so zueinander passen müssen, dass die Partikeln den Stromlinien folgen. Bei der Makroanwendung beider Methoden benutzt man einen dünnen (Laser-) Lichtschnitt parallel zur Hauptvortzugsströmung, der seinerseits unter einem rechten Winkel von einer Kamera beobachtet wird.

Nun lassen sich diese beiden Methoden auf den konkreten Anwendungsfall „Strömung in Mikrokanälen“ nicht ohne Modifikationen übertragen. Andernorts [2, 3, 4] bereits mehrfach realisierte Aufbauten ähneln dem eines Auflichtmikroskopes mit Epifluoreszenz-Strahlteiler und konfokaler,

koaxialer Lichteinkopplung des anregenden Strahls (Abb. 1). Der dünne Lichtschnitt wird somit ersetzt durch die dünne, plane Objektebene des Objektivs. Hier existiert aber im Gegensatz zum Lichtschnitt eine Volumenausleuchtung.

Als Folge wird der übliche PIV-Algorithmus in seine Korrelationsuche auch jene Untergrundbewegung mit einbeziehen, deren Streulicht so beschaffen ist, dass es Strukturen aufweist, aber auch nicht mehr ausgefiltert werden kann. Es werden also Vektoren errechnet, deren Zuordnung in Z-Richtung unklar ist [7].



**Abb. 1: Prinzip der konfokalen Ausleuchtung. Leider entspricht die Skizze der gängigen, aber unrichtigen Vorstellung, die Gegenstandsebene sei exakt mit dem Ort des Fokus identisch. Der Fokus liegt leicht oberhalb, auch bei auf  $\infty$  korrigierten Objektiven! Zutreffend ist diese Darstellung allein für Scan-Aufbauten.**

<sup>1)</sup> Ablagerungen, besonders bekannt als Biofouling in Nahrungsmittelfluiden.

Eine gemeinsame Bewertung dieser Fakten führt zu den Aussagen:

- Messungen in dünnen Schichten (im Vergleich zur Tiefenschärfe des Objektivs) sind möglich.
- In dicken Schichten kann an der Oberfläche exakt gemessen werden; in der Tiefe wird die Z-Zuordnung rasch ungenau bzw. schließlich unbestimmt und unmöglich.
- Bei stabilen Strömungsverhältnissen können mehrere Bilder zusammengefasst eine verdünnte Partikelkonzentration erlauben.
- Eine Kombination von PIV und Tracking gestattet eine reguläre Gitterberechnung mit zusätzlicher Information an den Bildrändern (z. B. Wände).
- Die oben zitierten Beispiele von Mikro-PIV-Systemen wurden durchweg zu Beobachtungen an Störungen mit Geschwindigkeiten der Größenordnung  $10^{-2}$  m/s konstruiert. Die Karlsruher Anwendung dagegen strebt den Bereich um 15 m/s an, was eigene Entwicklungsanstrengungen erfordert. Die hierzu betrachteten Kriterien für die Komponentenauswahl sind im Folgenden beschrieben.

### Objektiv und Partikeln

Eine Realisierung einer optischen Mikroströmungsmessanordnung für die vorliegende Applikation muss sich danach orientieren, dass das Testobjekt Drücken bis 0,6 MPa sowie Temperaturen bis 100 °C ausgesetzt werden soll

und dementsprechend die Beobachtungsfenster auszulegen sind. Somit wurde ein großer Arbeitsabstand gewählt, d. h. der Abstand zwischen dem mechanischen, objektseitigen Ende des Objektivs und dem Gegenstand liegt im Bereich von 19 und 6 mm bei 10 und 100fach Abbildungsmaßstäben.

Die Frage nach dem „richtigen“ Maßstab entscheidet sich im Triplet

- Partikelgröße
- Pixelgröße der Kamera
- bildseitig beabsichtigte mathematische Operationen.

Grundsätzlich sollte das Bild einer Partikel größer als ein Pixel sein, da sonst kleine Bewegungen des Bildes auf ein und demselben Pixel unbeobachtbar bleiben [8]. Andererseits wird der Helligkeitswert eines Partikelbildes umso kleiner, je mehr Pixel sich das Bild teilen. Damit verschlechtert sich auch das Signal-Rauschverhältnis.

Das Partikel soll der Strömung folgen können, die in einem  $200 \times 200 \mu\text{m}$  Rechteckkanal verläuft und die Grenzen zur Turbulenz erreicht. Die Grenzschicht wird zu  $60 \mu\text{m}$  abgeschätzt, die Rauigkeit zu  $0,2 \mu\text{m}$ . Damit wird im Allgemeinen die Vorstellung verbunden, möglichst kleine Tracerpartikel einzusetzen, jedoch fällt die Intensität der Fluoreszenzmission mit dem Partikelradius  $r^3$  ab. Geht man zu größeren Partikeln über, erhöht sich dagegen der Volumenfüllgrad des Fluides und man gelangt bald zu optisch dichten Schichten, d.h. zu geringen Eindringtiefen. Komplikationen treten durch Fouling und Agglomeration ein.

### Kamera, Beleuchtung und deren Einkopplung

Seitens der Kamera kommt hier nur eine „echte“ PIV-Kamera mit schneller Doppelbildfolge und hoher Digitalauflösung (12 bit) in rauscharmer, Pixel-homogener Qualität in Frage. Die Auswahl stellt sich zwischen VGA-Ortsauflösung mit 15 Bildpaaren oder SVGA mit 4 Bildpaaren je Sekunde. Im Hinblick auf die dem Experiment wahrscheinlich dahineilende Zeitkonstanz wurde der VGA-Typ gewählt.

Neben den etablierten Doppelpulslasern genügt in Anbetracht der kleinen auszuleuchtenden Fläche (einige  $10^{-3} \text{mm}^2$ ) auch blitztaugliche Leuchtdioden (LED's), bei denen der gesamte, sonst im Dauerbetrieb tolerable Ladungsfluss in sehr kurzen Zeitabschnitten appliziert wird [10]. Es sind hinreichend kurze Lichtimpulse im Wellenlängenbereich von ultrarot bis gelb realisiert worden, in dem auch entsprechend passende Partikel verfügbar sind. Damit erhält man auch die Möglichkeit, auf einfache Art nahezu beliebige Blitzmuster zusammen zustellen, z. B. um Tracking und PIV in Echtzeit zu kombinieren.

Das Herzstück einer Epifluoreszenz-Mikroskopiervorrichtung ist der Strahlteiler, der den zumeist seitlich eintreffenden Anregungsstrahl zum Objektiv lenkt und das Emissionslicht zur Kamera – oder Okular – durchlässt. Der optimale Einbauort dafür ist die Stelle nach dem auf  $\infty$  korrigierten Objektiv und vor der Tubuslinse, die das Bild für die Kamera oder das Zwischenbild für den Betrachter formt.

Bei Einkopplung von aufgeweittem Laserlicht entstehen hier, aber auch im Objektiv sowie einer planparallelen Abdeckplatte Interferenzmuster, die bei völlig korrekter Justierung maximal ausgeprägt sind. Kleine Abweichungen in der Divergenz und Orthogonalität können diese bis zum Verschwinden bringen. Der Preis dafür ist eine nicht konfokale Ausleuchtung, die auch nicht betrachtete Zonen erhellt und damit mehr Streulicht produziert. Grundsätzlich vermieden werden Interferenzprobleme bei LED-Einsatz, da die Kohärenzlänge vielmals kleiner ist.

Zur Bewertung der Ausleuchtungsgüte wurde einerseits die Begleitsoftware der PIV-Kamera mit den Funktionen

- Einstellbare Falschfarbendarstellung
- Pixelgrauwertabfrage
- Intensitätshistogrammdarstellung,

und andererseits geeignete Targets mit homogenen und äußerst gering strukturierten Oberflächen verwendet.

### Erfahrungen mit dem Testaufbau

Um zu entscheiden, ob und in welchem Umfang Mikro PIV-Systeme und/oder deren Komponenten kommerziell zu kaufen sind und wo Entwicklungsbedarf vorliegt, wurde ein erster Aufbau mit einem Leitz Orthoplan Mikroskop, Beschaffungsjahr 1968, begonnen (Abb. 2). Die anfänglich zurückhaltenden Umbauten wichen bald einer weitgehenden Demontage,

um den benötigten Arbeitsraum wenigstens minimal herzustellen. Heute besteht dieser Testtyp aus dem Gehäuse mit maximal tiefergelegter Objektträgermechanik, Durchlichtrevolver mit Objektivadapter und über großem Arbeitsobjektiv sowie der verbliebenen Tubuslinse. Darauf aufgesetzt ist der Strahlteilerwürfel und das Kamerarohr.

Bei den Aussagen aus den Versuchen ist zu unterscheiden zwischen festen bzw. ruhenden Objekten und durchströmten Objekten. Bei ersteren ist der stehende Aufbau lediglich notwendig, wenn ein offener Pool mit Partikelbesetzung untersucht werden soll.

Bei durchströmten Objekten stehen An- und Umbaumöglichkeiten der Objektfixierung und der Zugänglichkeit für Zu- und Ableitungen sowie für Messsonden im Vordergrund. Be- und Entlüftungen, Partikelinjektionssepta, Spülanschlüsse usw. führen zur Notwendigkeit einer Leckagevorsorge.

Partikelablagerungen an Decke und Boden sollten nicht durch Schwerkraft unterstützt werden.

Für den ersten messtüchtigen Aufbau wurde für einen liegenden Aufbau der optischen Achse und ein stehendes Prüfobjekt entschieden. So lassen sich Vibrationen optimal vermeiden und allen übrigen Forderungen ebenfalls nachkommen.

Die Optimierung der Ausleuchtung ist weiterhin Thema, dessen Anforderungen in den Grundsätzen bekannt sind, aber noch kein Abschluss erreicht ist.

### Erster Testkreislauf und Bildresultate

Erste Strömungsvisualisierungen wurden am Testaufbau mit CW Laser ausleuchtung (ca. 60 mW) vorgenommen. Dabei lief die Kamera im Fast Shutter Modus, in dem Mehrfachbelichtungen mit Pausenvorgabe möglich sind (Tracking). Zur Beobachtung gelangte ein ruhiger, gleichmäßiger



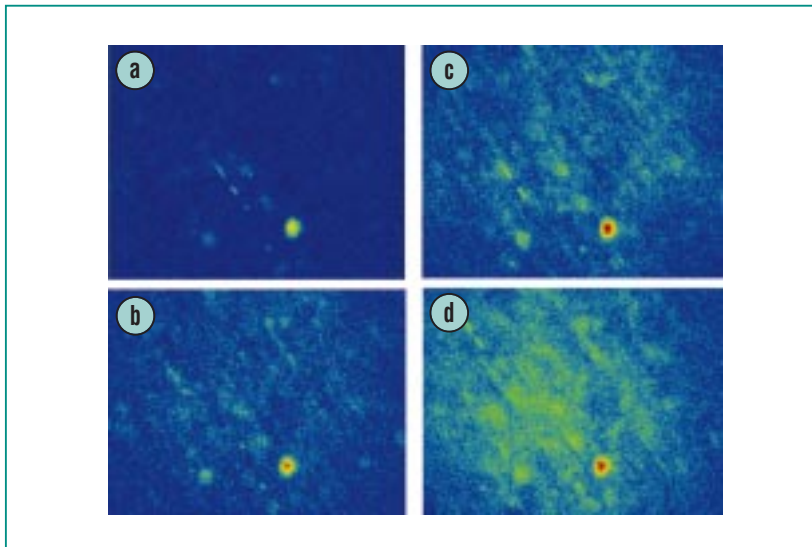
Abb. 2: Testaufbau.

Fluss durch ein einfaches Testobjekt der allein schwerkraftgetrieben war. Das Testobjekt bestand aus einer teilbaren Kuvette, die einen Rechteckkanal mit 100  $\mu\text{m}$  Dicke bildete. Der gemessene Durchfluss wurde zu einer mittleren linearen Strömungsgeschwindigkeit von ca. 23 cm/s umgerechnet.

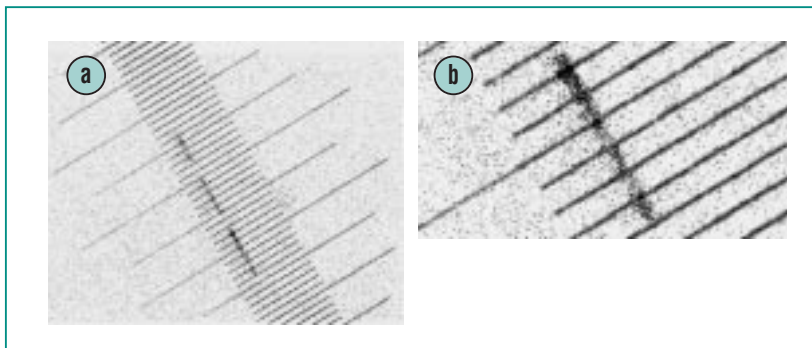
Mit ersten Partikelzugaben wurde das Kamerasetup optimiert, weitere Zugaben erhöhten die beobachtete Anzahl von Teilchen stufenweise. So konnte gelernt werden, dass kürzere Zeiten (damit kürzere Leuchtspuren) mit höheren Partikelkonzentrationen besser verträglich sind (Abb. 3). Weiterhin wurde festgestellt, dass sich

genau gegenüber der Einlauföffnung ein Ringwall von abgeschiedenen Partikeln bildet, der offenbar die Strömung nach unten umlenkt und sie später hin dann noch deutlich vermindert.

Angesichts der Geschwindigkeit, mit der einmal angefangenes Fouling fortschreitet wurde vor allem in Hinblick auf spätere, komplexere Kreisläufe nach Reinigungsmöglichkeiten gesucht. Spülmittel mit Alkoholzusatz erwiesen sich insoweit wirkungsvoll, als ein Großteil der Ablagerungen abgelöst und mit der Lösung ausgetragen wurde. Rück-, Impuls- und Druckspülvorgänge zeigten unbefriedigende Wirkungen.



**Abb. 3: Trackeraufnahmen bei zunehmender Partikeldichte im Zeitakt 100  $\mu\text{s}$  Belichtung, 100  $\mu\text{s}$  Pause, 200  $\mu\text{s}$  Belichtung. Deutlich erkennbare sesshafte Agglomerate.**



**Abb. 4: a) Trackingaufnahme bei sehr geringer Partikeldichte mit nachträglich überblendeter 10  $\mu\text{m}$ -Teilstrichskala, Geschwindigkeit 22 cm/s. b) Ausschnittvergrößerung 8-fach; Skala und Partikel sind unterschiedlich beleuchtet; Skala im Gegenglühllicht, Partikel konfokal; die Laserenergie im Brennpunkt bewirkt Rauschen in der Ortsabbildung. Die ca. 45°-Schräge zu Pixelreihen und -spalten wurde bewusst gewählt, um Artefakte auszuschließen.**

### Bildaufbereitung

Ziel der Vorarbeit am Bild soll sein, zu eindeutigeren Korrelationsmaxima bei der PIV-Auswertung zu gelangen. Hierzu sind sesshafte Leuchtspuren, die einen Peak bei Nullverschiebung unterstützen, und Untergrundrauschen, das beliebige Korrelationen fördert, zu eliminieren. Soll ein Geschwindigkeitsprofil mit Tiefenauflösung erstellt werden, müssen unscharfe Spuren getilgt werden.

Alle verwendbaren Erkennungsfunktionen werden bei zu geringer Vergrößerung und zu kleinen Eigenschaftsunterschieden fragwürdig, da ein Bild eines Objektes stets statistisch auf ein Pixelensemble verteilt ist [12]. So ist etwa das Bild eines Partikels mit 0,7  $\mu\text{m}$   $\varnothing$  bei 10facher Vergrößerung und 10 x 10  $\mu\text{m}$  Pixelgröße statistisch 1,8 Pixel „groß“, denn es kann auf 1, 2 oder maximal 4 Pixel verteilt sein (Abb. 4). Selbst „sesshafte“ Objekte haben von Bild zu Bild kei-



ne identische Verteilung auf Pixel. Physikalisch spielen hier neben der Brown'schen Bewegung wohl temperaturabhängige Fluktuationen des Brechungsindex die Hauptrolle, denn der Laserstrahl erreicht im Objektivfokus eine sehr beachtliche Energiedichte, wie sie im Bereich von schnellen Brutreaktoren in Kernnähe vorkommt.

### Ausblick – experimentelle Untersuchungen

Ein experimentierfreundlicher anwendungsbezogener Mikro-PIV-Aufbau wurde gefunden und die Realisierung ist weitgehend abgeschlossen. Vorversuche und Literaturstudien haben gezeigt, dass die Wahl der Partikelgröße und Anzahldichte extrem die Möglichkeiten von Aussagen beeinflussen. Damit müssen diese Größen schrittweise auf die Zielgeschwindigkeit angepasst werden. Fouling wird die Durchführung von Messungen erschweren und die Entwicklung geeigneter Strategien zur Erleichterung fordern.

An der Ausleuchtung findet sich noch Optimierungspotenzial, obwohl die grundsätzlichen Ansätze bereits Erfolg zeigten. Das Konzept der konfokalen Ausleuchtung muss vor dem Hintergrund der Untergrundproduktion und der Aufheizung im Objektivfokus nach Tests mit dem Impulslaser noch einmal kritisch betrachtet werden.

Die Möglichkeiten der Bildvorverarbeitung wurden erkundet, jedoch müssten die entsprechenden Operationen automatisiert werden. Wenn Korrekturen durch Führung des Experiments vermieden werden können, ist dies vorzuziehen.

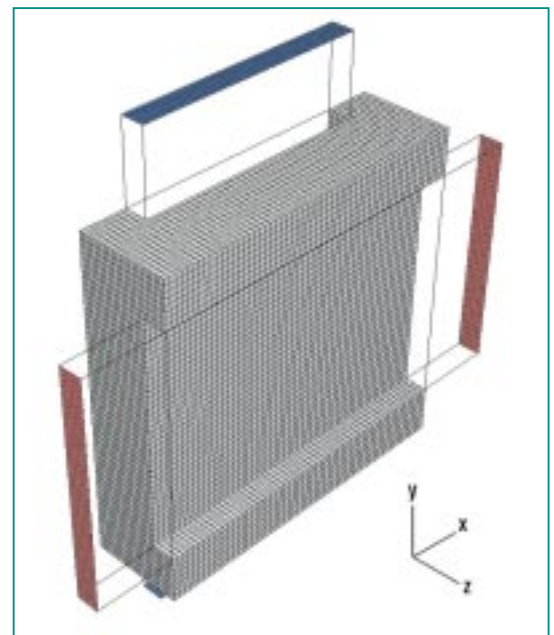
### Vereinfachte numerische Simulation von Mikrowärmetauschern

Die bisherigen Arbeiten zur Berechnung von Mikrowärmetauschern konzentrierten sich auf strukturauflösende Berechnungen von Ausschnitten des Grundkörpers mit entsprechendem großen numerischen Aufwand [13]. Eine vereinfachte, dafür aber effektive Simulation, erlaubt umfangreiche Parameterstudien und somit eine intensive Begleitung von Entwicklung und Anwendung. Insbesondere der Einfluss der Mikrokanalgeometrie, der Temperatur und des Massendurchsatzes lassen sich damit effizient analysieren. Durch eine Vereinfachung der kleinskaligen Geometrie und durch die Modellierung der relevanten physikalischen Vorgänge lässt sich die Auflösung mit feinen Rechengittern durch ein grobmäschiges Netz ersetzen. Die Ergänzung der grundlegenden Gleichungen der Strömungsdynamik und des Wärmeübergangs durch bekannte empirische Korrelationen führt zu einem erheblich geringeren Aufwand bei der numerischen Berechnung und Auslegung von Mikrowärmetauschern. Diese Vorgehensweise erfordert jedoch eine experimentelle Validierung der ergänzenden Modelle und Schließungsansätze. Die wesentlichen integralen Ergebnisse sind die Temperaturänderung und der Druckverlust im warmen und kalten Bereich des Wärmetauschers. Außerdem liefert auch die vereinfachte Simulation Informationen über die thermodynamischen Zustände als räumliche Verteilung innerhalb des Apparates. Im Folgenden werden zwei

unterschiedliche Vorgehensweisen zur vereinfachten Simulation am Beispiel von Mikrokreuzwärmetauschern vorgestellt und die Rechenergebnisse mit experimentellen Daten verglichen.

### Das Spaltmodell für Mikrokreuzwärmetauscher

Dieses Modell bedient sich einer vereinfachten Geometriedarstellung der Feinstruktur der Wärmetauscher. Der den Wärmestrom bestimmende Temperaturgradient befindet sich zwischen der kalten und warmen Passage und nicht zwischen parallelen Kanälen der gleichen Passage. Deshalb können die einzelnen Kanäle durch einen durchgehenden Spalt ersetzt werden, wobei warme und kalte Passage durch das Strukturmaterial getrennt sind (siehe Abb. 5). Dabei werden die sich



**Abb. 5: Spaltmodell des Kreuzstrommikrowärmetauschers mit warmer (rot) und kalter Passage (blau).**

zwischen den Kanälen befindlichen Stege im Spalt als poröser Körper verschmiert. Die Bewegung der Flüssigkeit wird auf die Strömungsrichtung in den ehemaligen Kanälen eingeschränkt. Der Wärmestrom durch die Stege in Strömungsrichtung wird in die trennende Wand zwischen warmen und kalter Flüssigkeit verlagert. In Abhängigkeit von der Geometrie der Einzelkanäle kann sich bei dieser Modellierung die Kontaktfläche zwischen Flüssigkeit und Struktur verändern. Diese Änderung wird durch einen Korrekturfaktor bei der Wärmestromberechnung von der Flüssigkeit in die Struktur berücksichtigt.

Für die korrekte Berechnung der Massenstromverteilung auf die verschiedenen Kanäle ist es notwendig, kleine Bereiche außerhalb des Wärmetauschers in der Umgebung von Ein- und Auslauf in die Berechnung einzubeziehen, sodass sich der Massenstrom entsprechend den unterschiedlichen Druckverlusten in den einzelnen Kanälen automatisch einstellt. Der Druckverlust für Einzelkanalströmung unterscheidet sich von dem der Spaltströmung durch einen Formfaktor und dem unterschiedlichen hydraulischen Durchmesser. Diese Abhängigkeiten werden in der vereinfachten Simulation durch Korrekturfaktoren bei der Viskosität berücksichtigt. Der Druckverlust an Ein- und Auslauf wird durch empirische Druckverlustkoeffizienten beschrieben. Im Falle des Umschlages von laminarer zu turbulenter Strömung wird das einfachste Turbulenzmodell, das Modell des Mischungsweges von Prandtl, benutzt. Dieses Modell führt zu einer erhöhten Viskosität und Wärmeleit-

fähigkeit für die Flüssigkeiten. Der Übergang zur turbulenten Strömung im gesamten Spalt findet bei einer Reynoldszahl von 2300 statt, die aus einer mittleren Geschwindigkeit berechnet wird. Druckverluste, die durch Rauigkeiten entstehen werden durch eine sogenannte additive Rauigkeitsviskosität ersetzt [14]. Bei der numerischen Lösung der Transportgleichungen wird ein Gitter verwendet, welches die hier beschriebene vereinfachte Geometrie auflöst. Besonders in Strömungsrichtung kann ein recht grobes Netz im Vergleich zur detaillierten Beschreibung des Wärmetauschers benutzt werden, und eine Auflösung der Stegstruktur entfällt.

### Das 1D-Strömungspfadmodell für Mikrokreuzwärmetauscher

Dieses Modell stellt eine weitere Vereinfachung des Spaltmodells dar. Wie dort, werden die Stege räumlich verschmiert. Der übrig gebliebene Spalt wird jetzt in Strömungsrichtung in eine Anzahl von eindimensionalen Strömungspfaden zerlegt, die über die Ein- und Auslaufbereiche gekoppelt sind. Die thermische Kopplung erfolgt wieder durch die separierende Wand zwischen der kalten und warmen Passage. Wie beim Spaltmodell werden die Wärmeströme in der restlichen Struktur korrigiert, um die fehlenden Stege zu simulieren. Die Berechnung des Wärmeübergangs vom Strukturmaterial zur Flüssigkeit wird durch die Verwendung von Standard-Nusseltzahlkorrelationen für die Strömung in eindimensionalen Kanälen realisiert. Der Druckverlust berechnet sich aus den allge-

mein bekannten Druckverlustkoeffizienten für laminare oder turbulente Rohrströmung [15]. Die Oberflächenrauigkeit wird wieder mit Hilfe einer Rauigkeitsviskosität berücksichtigt, während der Druckverlust an Ein- und Auslauf durch die gleichen empirischen Druckverlustkoeffizienten wie bei der Spaltströmung bestimmt wird. Die Gleichungen zur Strömungsdynamik in den eindimensionalen Strömungspfaden werden auf der Grundlage einer groben Diskretisierung gelöst. Senkrecht dazu in Richtung des starken Temperaturgradienten gibt es nur vier Rechenzellen, jeweils eine für die Flüssigkeitsströmung und zwei zur Berechnung des Wärmetransports in der Wand zwischen kalter und warmer Flüssigkeit. Hier liegt der Gewinn beim Rechenaufwand im Vergleich zum Spaltmodell. Außerdem sind keine zusätzlichen Turbulenzmodelle erforderlich, da die Physik der Turbulenz in den Standardkorrelationen zum Wärmeübergang und Druckverlust enthalten ist.

Auch hier wird der Umschlagpunkt von turbulenter zu laminarer Strömung bei einer Reynoldszahl von 2300 angenommen, wobei der Übergang ganz lokal in einer Rechenmasche erfolgen kann.

### Lösung der Transportgleichungen mit CFX4.3 und Ergebnisse

Die in den beiden vereinfachten Modellen auftretenden Transportgleichungen für Masse, Impuls und Enthalpie (Navier-Stokes-Gleichungen und Wärmeleitung) werden mit Hilfe des kommerziellen CFD (Computational Fluid Dy-

namics) Programms CFX 4.3 gelöst. Die Stoffeigenschaften und die Modellierung der physikalischen Vorgänge (Wandreibung, Turbulenz, Wärmeübergang) werden mit Hilfe von benutzerdefinierten Funktionen programmiert. Auch die Ermittlung der Mischungstemperatur an den Ausgängen des Wärmetauschers, sowie die Datenausgabe für die graphische Auswertung der Ergebnisse müssen zusätzlich eingebracht werden.

Beispielhaft soll hier ein „1 cm<sup>3</sup> Mikrowärmetauscher“, der mit Wasser betrieben wird, betrachtet werden. Er enthält 34 Mikrokanäle pro kalter und warmer Passage mit jeweils einem Querschnitt von 0.2 mm mal 0.1 mm. Die Stegbreite beträgt 0.1 mm und die trennende Wand zwischen den Passagen hat eine Dicke von 0.1 mm. Die Eintrittstemperatur beträgt auf der kalten Seite 8 °C und auf der warmen Seite 95 °C. Für die hier dargestellten Ergebnisse wurde das Spaltmodell verwendet. Das 1D-Strömungspfadmodell liefert die gleiche Ergebnisqualität. Abb. 6 zeigt die Temperaturerhöhung nach dem Durchlauf der kalten Passage in Abhängigkeit vom Massendurchsatz des kalten und warmen Wassers, während Abb. 7 den Druckverlust auf der warmen Seite darstellt. In allen Graphiken sind zum Vergleich die experimentellen Werte eingetragen. Deutlich ist sowohl im Temperaturverlauf als auch beim Druckverlust der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung in der warmen Passage an der Änderung der Kurvensteigungen zu erkennen. Ähnliche Rechnungen wurden für verschiedenen

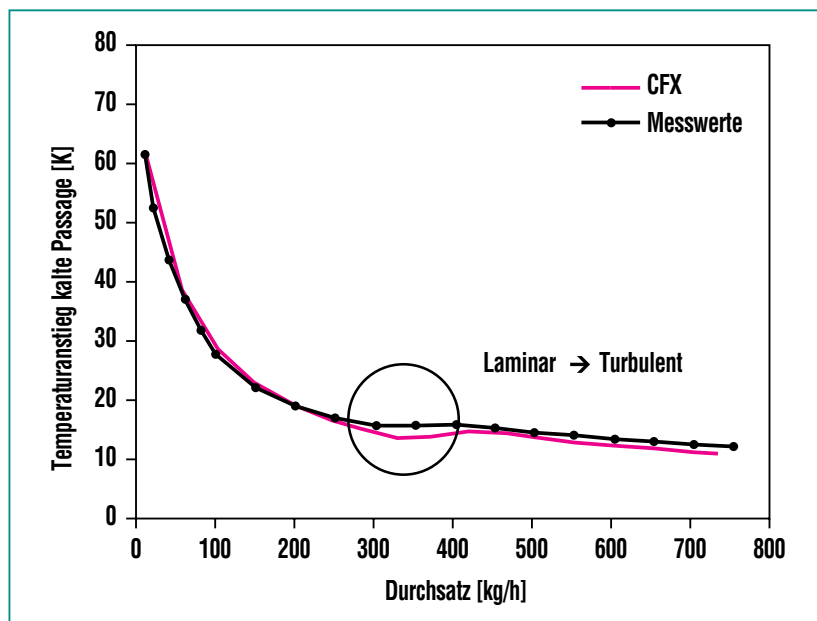


Abb. 6: Berechnete und gemessene Aufheizung der kalten Passage.

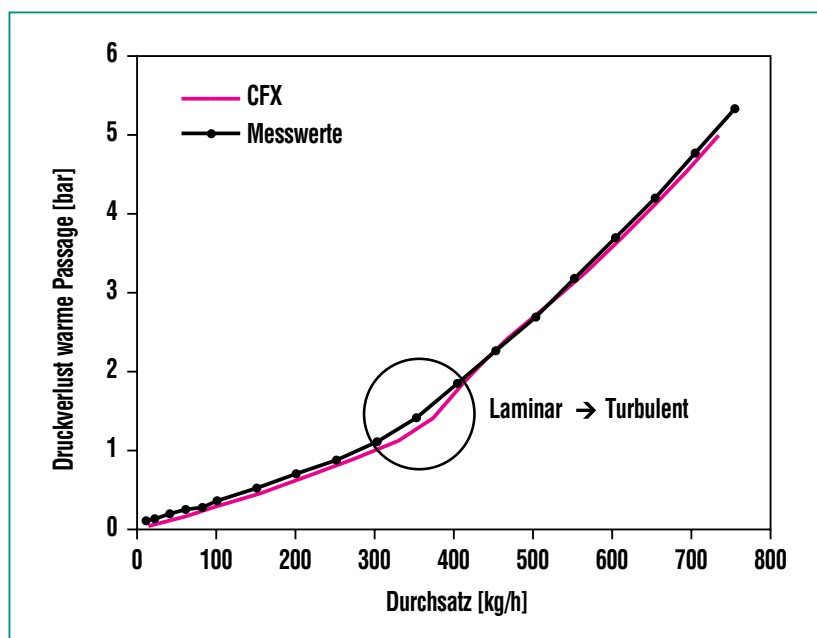


Abb. 7: Druckverlust in der warmen Passage.

Flüssigkeiten und auch für asymmetrische Massendurchsätze auf warmer und kalter Seite durchgeführt und teilweise mit den Ergebnissen detaillierter strukturauflösender Rechnungen verglichen.

Alle Ergebnisse zeigen die gute Anwendbarkeit der vereinfachten Modelle. Die Beziehungen für Druckverlust und Wärmeübergang sind laut Literatur nicht immer für die Verwendung in sehr

kleinen Kanälen geeignet [16]. Somit ist eine Überprüfung experimenteller Art zum Strömungsverhalten an Einzelkanälen der Mikrowärmetauscher erforderlich. Das gilt besonders für den Einfluss der Rauigkeit und den Druckverlust im Ein- und Ausströmungsbereich.

### Ausblick – Numerische Simulation

Mikrowärmetauscher und Mikroreaktoren sollen in der chemischen Verfahrenstechnik eingesetzt werden. Dort spielen Pha-

senwechsel und chemische Reaktionen eine wesentliche Rolle. Deshalb ist es erforderlich auch für diese Vorgänge vereinfachte Modelle zu entwickeln und anzuwenden. Ein erster Schritt in diese Richtung wäre die Verwendung eines Gases in der einen Passage und einer inkompressiblen Flüssigkeit in der anderen. Ein weit größerer Schritt wäre dann die Beschreibung einer Zweiphasenströmung mit Verdampfung in einer Passage des Wärmetauschers und die Simulation von elektrisch beheizten Mikroverdampfern. Eine vereinfachte Si-

mulation von katalytischen Reaktionen in den Mikrokanälen ist notwendig, um die Mikroapparate in ihrer verfahrenstechnischen Anwendung umfassend beschreiben zu können.

## Literatur

- [1] K. Schubert, I. Brandner, M. Fichtner, G. Linder, U. Schygulla, A. Wenka, *Microscale Thermophysical Engineering*, 5, 17-39 (2001)
- [2] J. G. Santiago, S. T. Wereley, C. D. Meinhart, D. J. Beebe, R. J. Adrian, *Exp. Fluids* 25, 316-319 (1998)
- [3] C. D. Meinhart, S. T. Wereley, T. G. Santiago, *Exp. Fluids* 27, 414-419 (1989)
- [4] M. J. Kim, H. J. Kim, K. D. Kim, *Proceedings of PSF VIP-3, March 18-21 (2001) Mani, Hawaii, USA F3112*
- [5] C. D. Meinhart, S. T. Wereley, H. B. Gray, *Mas. Sci. Technol.* 11 (2000), 809-814
- [6] C. D. Meinhart, S. T. Wereley, J. G. Santiago, *Journal of Fluids Eng.*, June 2000, Vol. 122, 285-289
- [7] M. G. Olsen, R. J. Adrian, *Exp. Fluids (Suppl.)* S. 166-174 (2000)
- [8] D. Kean, R. J. Adrian, Y. Zhang, *Mas. Sci. Technol.* 2 (1995), 1202-1205
- [9] D. E. Kataoka, M. M. Troian, *Nature* 402, 794-796 (1999)
- [10] W. J. Hiller, H. M. Lent, G. E. A. Meier, B. Stasicki, *Experiments in Fluids* 5, 141-144 (1987)
- [11] B. Stasicki, W. J. Hiller, G. E. A. Meier, *(DLR unveröffentlicht), SPI Vol. 1032 (1988)*
- [12] R. I. Adrian, *Meas. Sci. Technol.* 8 (1997), 1393-1398
- [13] A. Wenka, M. Fichtner, K. Schubert, *Microreaction Technology: 4th International Conference, IMRET 4, AIChE Spring Nat. Meeting, Atlanta, Ga., March 5-9, 2000, Topical Conf. Proc. pp. 256 - 263, New York, N. Y., 2000*
- [14] Gh. Mohiuddin Mala, Li Dongqing, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 20 (1999) 142-148
- [15] *VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, Springer 1997*
- [16] S. M. Ghiaasiaan, T. S. Laker, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 44 (2001) 2777-2782