

Metallische Mikrostrukturapparate – neue Wege in der Verfahrenstechnik

K. Schubert, IMVT

Einleitung

Der metallische Würfel ist gerade mal einen Kubikzentimeter groß und trotz seiner Kleinheit ist er von 8000 sich kreuzenden Mikrokanälen durchzogen, jeder Mikrokanal so fein wie der Durchmesser eines Haares (Abb. 1). Versieht man den Würfel mit Rohranschlüssen, so erhält man einen Mikrostrukturapparat, mit dem sich von einem heißen Flüssigkeitsstrom die Wärmeleistung eines Einfamilienhauses, d. h. ca. 20 Kilowatt, abführen lässt. Mit etwas größeren Würfeln kann dieser Wert problemlos auf das Zehnfache gesteigert werden. Diese riesigen, mit normalen Apparaten bei weitem nicht erreichbaren Wärmeabfuhraten in kleinstem Raum erklären sich dadurch, dass in Mikrokanälen die Wärmeübergänge um Größenordnungen höher sind als in den Strömungskanälen konventioneller verfahrenstechnischer Apparate.

Das Anwendungspotential für solche Kleinstapparate könnte insbesondere in der chemischen Technik liegen, dort wo die Abfuhr von extrem hohen Wärmeleistungen bei chemischen Reaktionen und deren exakte Temperaturkontrolle oft von entscheidender Bedeutung sind – und zwar sowohl für die Produktqualität als auch für die Betriebssicherheit. In einer zukünftigen chemischen Produktion könnte der Einsatz dieser miniaturisierten Chemieapparate völlig neue Wege in vielen Bereichen eröffnen. Eine der vielleicht nicht mehr allzu fern liegenden Visionen ist es, dass die heutigen, viele Kubikmeter gro-

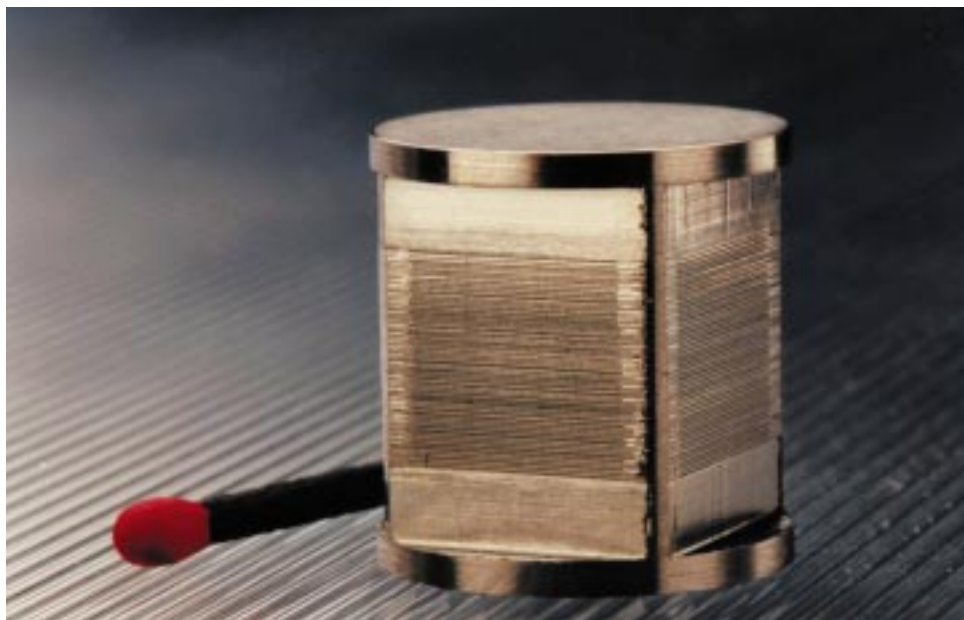


Abb. 1: Metallischer Kern eines Mikrostrukturapparats in Würfelform, der von 8 000 sich kreuzenden Mikrokanälen durchzogen ist, jeder Mikrokanal so fein wie ein Haar. Mit Wasser als Medium kann in diesem Würfel von einem Kubikzentimeter eine Wärmeleistung von 20 Kilowatt übertragen werden, was dem Wärmebedarf eines Einfamilienhauses entspricht. Das Anwendungspotential für diese extrem leistungsfähigen Miniaturapparate wird in der chemischen und thermischen Verfahrenstechnik gesehen.

ßen Rührkessel mit ihren bekanntlich unbefriedigenden Wärmeabfuhereigenschaften durch einige wenige Mikrostrukturapparate ersetzt werden. Dadurch werden die Mengen der miteinander reagierenden, oft giftigen und explosiven Chemikalien drastisch erniedrigt, und entsprechend reduziert sich das Gefahrenpotential. Neben der erhöhten Betriebssicherheit erhofft man sich durch die verbesserte Temperaturkontrolle in Mikroreaktoren eine größere Nutzung der Ausgangsrohstoffe – Ressourcenschonung heißt hier das Stichwort – und letztlich, wie bei jeder industriellen Anwendung, eine bessere Wirtschaftlichkeit des Herstellungsprozesses. Aber auch außerhalb der Chemie lassen die

herausragenden wärmetechnischen Eigenschaften der Mikroapparate eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten im effizienten Wärmemanagement von industriellen Prozessen erwarten.

Auf der Basis solcher leistungsfähigen Mikrostrukturapparate, wie sie im IMVT entwickelt werden, ist im Forschungszentrum Karlsruhe ein neues Forschungs- und Technologiegebiet entstanden, die Mikroverfahrenstechnik, an der mittlerweile neben dem IMVT fünf weitere Institute des Zentrums beteiligt sind: ITC-CPV, IRS, IPE, IMF I und IMF III. Ein gelungenes Beispiel für die organisationsübergreifende Kompetenznutzung, wie sie nur in einem Großforschungszentrum möglich

ist. Als Ziel der gemeinsamen Arbeiten will man in der Mikroverfahrenstechnik die herausragenden Eigenschaften der Mikrostrukturapparate in vielfältiger Weise zur Verbesserung und Intensivierung von chemischen und thermischen Prozessen nutzen und darüber hinaus in völlig neuartige verfahrenstechnische Bereiche gewinnbringend vordringen, die der klassischen Verfahrenstechnik verschlossen sind.

Auch außerhalb des Forschungszentrums haben die Mikrostrukturapparate und ihre Potentiale für die Verfahrenstechnik in den letzten Jahren ein rasant gestiegenes Interesse in der einschlägigen Fachwelt gefunden [1], [2]. So arbeitet heute weltweit eine ständig wachsende Zahl von Forschergruppen in Wissenschaft und Industrie auf diesem relativ jungen und attraktiven Technologiegebiet, zum Teil auch mit ganz unterschiedlichen Lösungsansätzen und Konzepten [3], aber mit der gleichen Zielrichtung wie hier im Forschungszentrum.

Technische Durchsätze und vielversprechende Eigenschaften

Die grundlegende Idee, chemische und thermische Prozesse in Mikrokanälen eines Kleinstapparates zu führen, entstand vor wenig mehr als zehn Jahren im Forschungszentrum Karlsruhe. Zu der Zeit hatte man mit ersten Prototypapparaten gerade experimentell demonstriert, dass Wärmeübergänge in Mikrokanälen um bis zum Hundertfachen effektiver sind als in den Strömungs-

kanälen von herkömmlichen Wärmeübertragern [4], [5]. Und diese Vorteile will man für technische Anwendungen nutzen, z. B. für chemische Reaktionen, die bekanntermaßen oft mit heftiger und großer Wärmeproduktion verbunden sind. Auch bei vielen anderen verfahrenstechnischen Vorgängen, wie extrem schnelles Erhitzen oder Abkühlen von Fluiden, Verdampfen, Kondensieren, Mischen, Emulgieren kann eine Prozessführung in Mikrokanälen von Mikrostrukturapparaten zu erheblichen Verbesserungen führen. Das im IMVT verfolgte Konzept sieht vor, Tausende oder gar Zehntausende von Mikrokanälen in einer einzigen Funktionseinheit

zusammenzubündeln. So erhält man hocheffiziente Mikrostrukturapparate wie Mikroreaktoren, Mikrowärmeübertrager und Mikromischer mit den für technische Anwendungen erforderlichen hohen Durchsätzen und vermeidet bzw. minimiert unnötige Parallelschaltungen [6].

Ein solcher Mikrostrukturapparat, der große Stoffdurchsätze erlaubt, ist in Abb. 2 in seiner technischen Ausführung gezeigt. In einem würfelförmigen Mikrostrukturkörper von nur 3 cm Kantenlänge sind hier insgesamt 15 000 Mikrokanäle auf zwei Passagen aufgeteilt im Kreuzstrom untergebracht. In der einen Hälfte der Mikrokanäle läuft z. B. eine chemi-



Abb. 2: Technische Ausführung eines Mikrostrukturapparates aus Edelstahl für große, industrielle Stoffdurchsätze für verfahrenstechnische Anwendungen. Der innere Kern des Apparates ist ein würfelförmiger Körper mit 3 cm Kantenlänge. Er enthält insgesamt 15 000 Mikrokanäle, die auf zwei Passagen aufgeteilt sind. Mit Wasser als Testmedium können bis 7 000 Liter pro Stunde durch die Mikrokanäle der einen Passage gepumpt werden und dabei bis zu 200 Kilowatt Wärmeleistung auf die Kühlflüssigkeit in der im Kreuzstrom verlaufenden zweiten Passage übertragen werden.

sche Reaktion ab, die Wärme produziert. In der anderen Hälfte der Kanäle strömt eine Kühlflüssigkeit, welche die entstehende Wärme effektiv und gezielt abführt. Zum Anschluss der Mikrokanäle an die äußere Makrowelt ist der Würfel in ein kreuzförmiges Gehäuse mit normalen Rohranschlüssen eingeschweißt, und zwar vakuumdicht. Diese hohe Dichtigkeit stellt sicher, dass auch nicht die geringsten Spuren der chemischen Reaktionsmedien in die Kühlflüssigkeit oder in die Außenwelt gelangen. Durch diesen Mikrostrukturapparat können 7 000 Liter pro Stunde an wässriger Chemielösung durchgepumpt und eine Wärmeleistung von bis zu 200 Kilowatt auf eine Kühlflüssigkeit übertragen werden. 7 000 Liter pro Stunde, dies entspricht bei Tag- und Nachtbetrieb einem Jahresdurchsatz von etwa 60 000 Tonnen für eine einzige Mikrostruktureinheit, ein Durchsatz, den man durchaus als technisch relevant bezeichnen kann. Und sollte ein noch größerer Durchsatz gefordert sein, so könnte man durch das Parallelschalten von einigen wenigen dieser Mikrostruktureinheiten auch Stoffdurchsätze von mehreren 100 000 Tonnen pro Jahr erreichen bei Wärmeübertragungsleistungen, die dann im Megawatt-Bereich liegen. Fazit ist: Große und technisch relevante Durchsätze dürften für die Mikrostrukturapparate des IMVT kein Problem sein.

Neben der Möglichkeit, große Stoffdurchsätze zu realisieren, besitzen die metallischen Mikrostrukturapparate weitere vielversprechende Eigenschaften: Be-

dingt durch die große Anzahl von Mikrokanälen, die in kleinsten Volumina angeordnet sind, ergeben sich hohe spezifische innere Oberflächen von bis zu 30 000 Quadratmeter pro Kubikmeter, vergleichbar mit der menschlichen Lunge. Mit wässrigen Medien werden daher Aufheiz- bzw. Abkühlzeiten im Bereich von Millisekunden erzielt und spezifische Wärmeübertragungsraten, die um viele Faktoren über denen von konventionellen Apparaten liegen [7]. Aufgrund dieser Eigenschaften ist eine in der konventionellen Technik nicht erreichbare äußerst präzise Temperaturkontrolle von verfahrenstechnischen Prozessen möglich. Chemische Prozesse, die stark exotherm sind und damit eine große Wärmeproduktion haben, können dann isotherm, d. h. mit konstanter, optimaler Betriebstemperatur gefahren werden. Dies steigert die Ausbeute an dem gewünschten chemischen Produkt und damit die Wirtschaftlichkeit. Eine Erhöhung der Produktausbeute bedeutet auch eine Verringerung der eingesetzten Ausgangsmaterialien und der Abfallströme, was letztendlich der Umwelt zugute kommt. Dass erhebliche Ausbeutesteigerungen bei stark exothermen chemischen Prozessen durch den Einsatz von Mikroreaktoren auch realisierbar sind, wurde im Labormaßstab an einem Mikroreaktor des Forschungszentrums am Beispiel einer exothermen Gasphasen-Reaktion bei einem Partner in der chemischen Industrie erfolgreich nachgewiesen [8].

Exotherme chemische Prozesse mit exzessiver Wärmeentwick-

lung werden wegen der nicht sehr effektiven Wärmeabfuhr in konventionellen Chemieapparaten oft mit Verdünnungsmedien in hohem Überschuss gefahren, die anschließend wieder kostenaufwendig abgetrennt werden müssen. Auf Verdünnungsmedien kann bei einem Mikrostrukturreaktor verzichtet werden, und die Reaktion wird trotzdem sicher und kontrolliert geführt. Ein „Durchgehen“ der chemischen Reaktion und eine damit möglicherweise verbundene Freisetzung von Chemikalien wird durch die im Überfluss vorhandene Wärmeabfuhrkapazität des Mikroreaktors wirkungsvoll verhindert. Entsprechende Versuche dazu, d. h. Reaktionen mit „unverdünnten“, stark exotherm miteinander reagierenden flüssigen Medien wurden im Rahmen einer Industriekooperation im IMVT mit speziell entwickelten Mikroreaktoren erfolgreich durchgeführt [9].

Die hohe Druckfestigkeit der Mikrostrukturapparate bis zu mehreren hundert bar Überdruck und die explosionshemmende Wirkung der Mikrokanäle sind von erheblicher Bedeutung für die Betriebssicherheit, insbesondere wenn man mit toxischen oder explosiven Stoffen umgeht.

Die Druckfestigkeit, die durch statische Langzeittests und dynamische Druckbelastungsversuche nachgewiesen wurde [6], ist nicht nur bei Betriebsstörungen sicherheitstechnisch wichtig, sondern auch für chemische Verfahren, wo hohe Betriebsdrücke erforderlich sind. Dies ist z. B. bei chemischen Reaktionen in und mit überkritischen Fluiden der Fall, ein neues und vielverspre-

chendes Anwendungsgebiet für Mikrostrukturreaktoren, welches zusammen mit den Experten des ITC-CPV gestartet wurde.

Aufgrund der ebenfalls experimentell nachgewiesenen explosionshemmenden Wirkung der Mikrokanäle [6] sind Reaktionen mit explosiven Gasgemischen ein besonders attraktives Einsatzgebiet für die Mikrostrukturapparate. Ausführliche Versuche dazu wurden am Beispiel des wohl bekanntesten explosiven Gasgemisches durchgeführt, dem Knallgas, welches aus Wasserstoff und Sauerstoff besteht. Die Experimente bestätigten, dass die äußerst explosiven Knallgasgemische in den Mikrokanälen kontrolliert und sicher zur Reaktion gebracht werden können und dass die entstehende Reaktionswärme über die Mikrokanäle der Kühlpassage nutzbringend aus dem Mikrostrukturreaktor abgeführt werden kann [10], [11]. Diese mehr zur Demonstration des Potentials der Mikrostrukturapparate durchgeführte Untersuchungen sind auch für bestimmte technische Anwendungen interessant, die gemeinsam mit einem Industriepartner untersucht werden, wie z. B. die Wärmeerzeugung in den Wasserstoff-Erzeugungssystemen von zukünftigen Fahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb [12].

Praxisnahe Fertigung und standardisierte Bauformen

Die metallischen Mikrostrukturapparate für chemische und thermische Prozesse werden im IMVT als Prototypen für spezielle Anwendungen und in standardisier-

ten Bauformen mit einem bewährten, ebenfalls weitgehend standardisierten Herstellungsverfahren gefertigt.

Folgendes Fertigungsprinzip wird angewendet: In die Oberfläche von metallischen Folien werden parallel verlaufende Mikrokanäle eingearbeitet. Dies geschieht hauptsächlich mit Mikroschneidwerkzeugen durch Präzisionsdrehen oder Präzisionsfräsen. Wenn eine kompliziertere Formgebung der Mikrokanäle erforderlich ist, werden auch Mikroätzttechniken eingesetzt.

Als Materialien wurden bisher Edelstähle, Aluminiumlegierungen, Kupfer, Silber und Rhodium verwendet. Für chemisch sehr aggressive Medien wurden das korrosionsbeständige Palladium und verschiedene Hastelloy-Sorten, das Wunschmaterial in der chemischen Technik, in den Fertigungsprozess eingeführt. Über keramische Materialien, aus denen im IMF III Kompaktreaktoren für die Mikroverfahrenstechnik gebaut werden, wird im vorliegenden Heft in einem gesonderten Beitrag des IMF III berichtet.

Die mikrostrukturierten Folienplättchen werden anschließend zwischen zwei Deckplatten abwechselnd kreuzweise übereinander gestapelt und in einem Diffusionsschweißofen bei genau definierten Kombinationen von Presskraft und hohen Temperaturen, die bis zu 1100 °C gehen, unlösbar miteinander verbunden. Aus dem Folienstapel ist jetzt ein zusammenhängender Mikrostrukturkörper geworden, der von Tausenden sich kreuzenden Mikrokanälen durchzogen ist. Um

auch nicht diffusionsschweißbare Materialien verwenden zu können, was die Materialpalette beträchtlich erweitern würde, haben die Spezialisten im Nachbarinstitut IMF I vielversprechende Entwicklungen begonnen, auch solche Folien mit Mikro-Laserschweißen zu einem Mikrostrukturkörper zusammenzufügen.

Um nun Flüssigkeiten oder Gase durch die Mikrokanäle leiten zu können, wird der Mikrostrukturkörper meist in einer Elektronenstrahlschweißanlage vakuumdicht und überdruckfest in ein Gehäuse mit Rohranschlüssen (vgl. Abb. 2) eingeschweißt oder mit entsprechenden Adaptern versehen.

Diese Fertigungsmethode für Mikrostrukturapparate wurde in den letzten Jahren durch die Optimierung und Standardisierung der einzelnen Fertigungsschritte fortlaufend verbessert hinsichtlich der Reproduzierbarkeit, der Zuverlässigkeit und der Herstellungskosten der Mikroapparate. Durch die Einführung eines ausführlichen Dokumentations- und Qualitätssicherungssystems wird die Übertragbarkeit der Fertigung auf die Industrie vorbereitet.

Wesentlich für die Fortschritte war auch die konsequente Ausrichtung des Fertigungsprozesses auf die Herstellung von Mikrostrukturapparaten in standardisierten Bauformen. Als Beispiele sind in Abb. 3 drei standardisierte, unterschiedlich große Bauformen von Mikrostrukturapparaten vor ihrer Adaptierung mit Rohranschlüssen gezeigt. Der kleinste Apparat in Form eines Würfels

mit einem Zentimeter Kantenlänge ist für maximal 700 Liter Wasserdurchsatz pro Stunde und eine übertragbare Wärmeleistung von 20 kW geeignet. Der größte Würfel mit drei Zentimeter Kantenlänge erlaubt Wasserdurchsätze von maximal 7 000 Liter pro Stunde bei 200 kW Wärmeübertragungsleistung. Mit den drei Bauformen lassen sich auch alle Werte zwischen wenigen Litern pro Stunde bis 7 000 Litern pro Stunde und den entsprechenden Wärmeleistungen praktisch stufenlos einstellen. Dazu werden die drei Bauformen, jede für sich, mit unterschiedlich großen, wiederum standardisierten Durchmessern der Mikrokanäle ausgestattet sowie mit einer durch das Fertigungsverfahren frei vorgebaren Anzahl von Mikrokanälen. Durch diese Flexibilität bei den standardisierten Bauformen lässt sich ein weiter Bereich von verfahrenstechnischen Aufgaben, wie sie aus der Industrie angefragt werden, allein schon mit diesen drei Bauformen abdecken.

Bei der Auslegung der Standard-Apparate für die ganz unterschiedlichen verfahrenstechnischen Aufgabenstellungen aus der Industrie hat sich die gemeinsam mit dem IRS entwickelte Computer-Simulation der Wärmeprozesse in einem Mikroapparat als äußerst wertvolles Instrument bewährt. Mit den durch Experimente bestätigten Computerprogrammen kann man heute den Strömungs- und Temperaturverlauf in jedem einzelnen Mikrokanal eines Mikroapparates vorausberechnen, wie dies in Abb. 4 beispielhaft gezeigt ist. [13]. Auf-

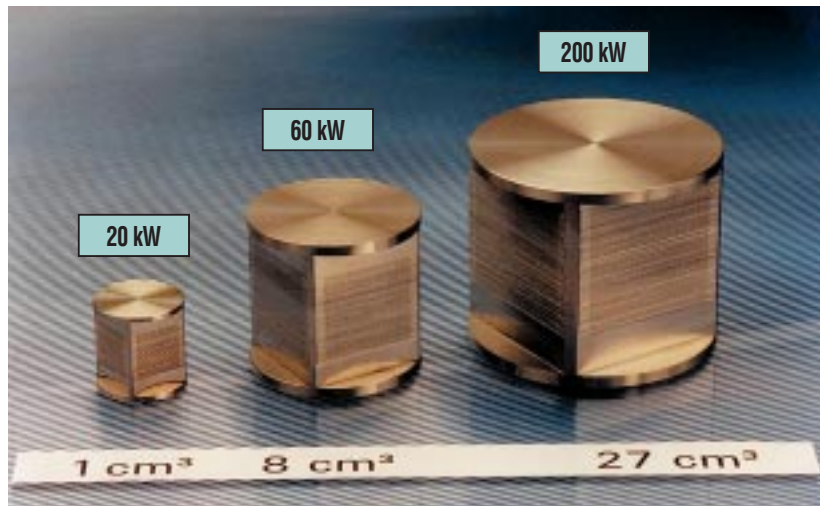


Abb. 3: Standardisierte Mikrostrukturapparate in unterschiedlichen Baugrößen vor dem Einschweißen in ein Gehäuse mit Rohranschlüssen, wie es in Abb. 2 gezeigt ist. Die kleinste Bauform ist, mit Wasser als Testflüssigkeit, bis 700 Liter Durchsatz pro Stunde und bis zu einer übertragbaren Wärmeleistung von 20 Kilowatt geeignet, die größte Bauform bis 7 000 Liter pro Stunde und bis 200 Kilowatt Wärmeleistung. Alle Zwischenwerte lassen sich mit den drei Bauformen realisieren.

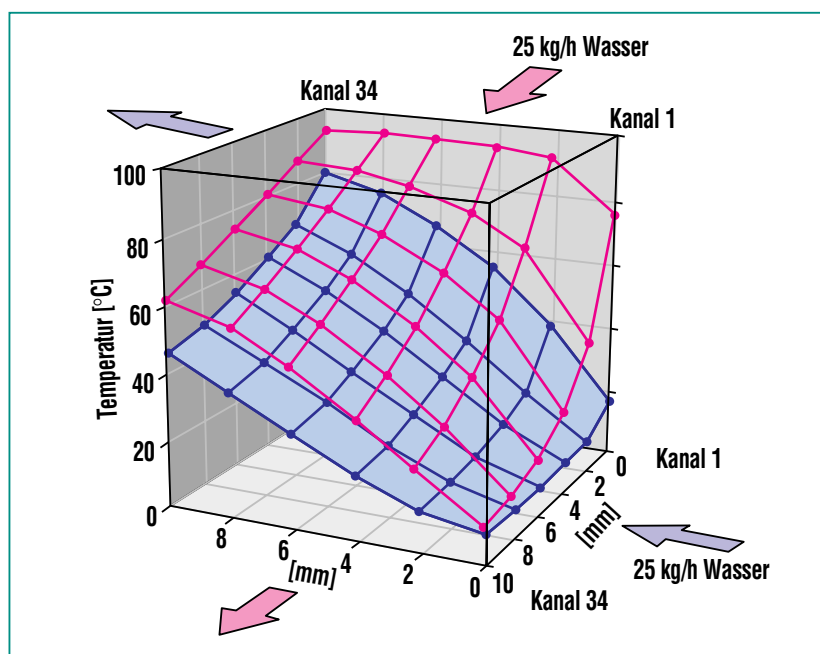


Abb. 4: Beispiel für die Computersimulation der Temperaturverläufe in den einzelnen Mikrokanälen eines Mikrostrukturwärmeübertragers in Kreuzstrombauweise. Aus solchen Ergebnissen lassen sich wertvolle Rückschlüsse für die Optimierung der Auslegung, der Fertigung und der Betriebsbedingungen der Mikroapparate ziehen.

grund der Ergebnisse lassen sich dann Rückschlüsse für die Auslegung, die Fertigung und auch für die einzustellenden Betriebsbedingungen der Mikrostrukturapparate für den jeweiligen Anwendungsfall ziehen [14].

Die Standard-Apparate sind auch für chemische Gasphasen-Reaktionen verwendbar, die die Integration eines Katalysators erfordern. Die einfachste Möglichkeit besteht darin, den gesamten Mikrostrukturapparat aus dem katalytisch aktivem Material zu fertigen. Hier wurden schon Mikrostrukturapparate aus Silber und aus Rhodium hergestellt und erfolgreich erprobt [8], [15]. Für Reaktionen, bei denen Katalysatoren aus Vollmaterial nicht ausreichend sind, wurden verschiedene Verfahren entwickelt, um die Mi-

krokanäle der Apparate mit dünnen, porösen und katalytisch aktiven Schichten zu versehen. Solche porösen Schichten vergrößern die an sich schon große innere Oberfläche der Mikrostrukturapparate nochmals um mehrere Größenordnungen. Abb. 5 zeigt einen Querschnitt durch einen Mikrostrukturapparat aus Aluminium. Auf den Wänden der Mikrokanäle wurde mit anodischer Oxidation eine poröse und festhaftende Schicht aus Aluminiumoxid erzeugt, die durch Tränkimprägnierung mit einem Katalysator aus Edelmetall versehen wurde [16]. Mikrostrukturapparate aus Edelstahl wurden mit speziell entwickelten Sol-Gel-Verfahren [17] und durch die Abscheidung von Nanopartikeln [18] mit katalytisch aktiven Schichten ausgestattet und im Rahmen einer Industriekooperation erfolgreich mit Gasphasen-Reaktionen erprobt.

Modularer Baukasten für die Mikroverfahrenstechnik

Aus den bisher entwickelten, standardisierten Mikrostrukturapparaten des IMVT lässt sich nun ein regelrechter „Baukasten“ zusammenstellen, in dem möglichst viele modulartige Bauformen für verfahrenstechnische Grundoperationen angeboten werden. Ein solcher Baukasten für die Mikroverfahrenstechnik wird die Chancen für den zukünftigen technischen Einsatz der Mikrostrukturapparate und vor allem auch die Akzeptanz der Mikroverfahrenstechnik bei der Industrie erhöhen.

Die längerfristige Vorstellung dabei ist, dass man je nach Anforderung

aus der verfahrenstechnischen Industrie in den Baukasten „hineingreift“, sich die passenden Bausteine bzw. Module herausholt und über standardisierte Schnittstellen flexibel miteinander kombiniert, um die gestellte verfahrenstechnische Aufgabe zu erfüllen.

Eine exemplarische Auswahl von vorhandenen, standardisierten Mikrostrukturapparaten des Baukastens ist in Abb. 6 gezeigt: Mikrostrukturwärmetauscher in verschiedenen Größen als Kreuz- und als Gegenströmer. Mikrostrukturreaktoren für chemische Reaktionen mit flüssigen und gasförmigen Medien sowie statische Mikromischer in unterschiedlichem Design, deren herausragenden Vermischungseigenschaften von externen Partnern bereits demonstriert wurden [19], [20].

Ein Beispiel für eine bereits erfolgte Anwendung dieses Baukastens auf eine konkrete verfahrenstechnische Aufgabenstellung aus der Industrie wird im folgenden beschrieben. Für zukünftige Anwendungen in einer Weltraumstation sollen explosive Gasgemischungen aus Wasserstoff und Sauerstoff bei stark schwankenden Gasdurchflüssen vollständig und vor allem sicher in Wasser umgewandelt werden. Zur Lösung dieser Aufgabe wurden drei Standard-Bauteile aus dem in Abb. 6 gezeigten Baukasten modulartig über standardisierte Schnittstellen bzw. Rohranschlüsse zu einem mikroverfahrenstechnischen System verbunden: Ein Mikromischer zur Vermischung der beiden Gasströme, ein Mikroreaktor, um das explosi-

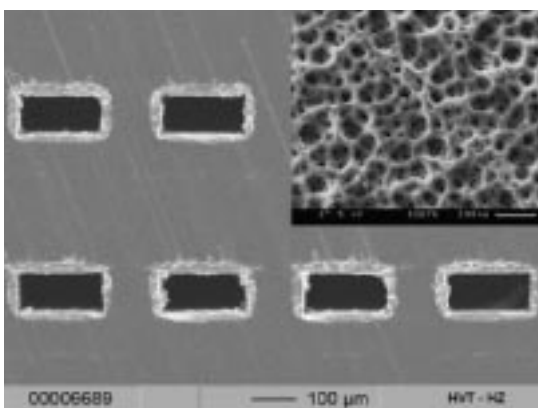


Abb. 5: Querschnitt durch einen Mikrostrukturapparat aus Aluminium für chemische Gasphasen-Reaktionen. Auf den Wänden der rechteckigen Mikrokanäle erkennt man eine dünne helle Schicht, die aus Aluminiumoxid besteht und durch anodische Oxidation erzeugt wurde. In der rechten oberen Bildhälfte ist eine Ausschnittsvergrößerung dieser äußerst porösen Schicht gezeigt, die durch Tränkimprägnierung mit einem für die chemische Reaktion geeigneten Katalysator versehen wird.

ve Gasgemisch in den mit Katalysator beschichteten Mikrokanälen gefahrlos zur Reaktion zu bringen und ein Mikrowärmetauscher, der das entstandene Reaktionsprodukt Wasserdampf abkühlt und zu flüssigem Wasser kondensiert. Dieser in Abb. 7 gezeigte modulartige Aufbau wurde gemeinsam mit Industriepartner erfolgreich getestet [21].

In Ergänzung zu den in Abb. 6 gezeigten Bauformen wurden weitere neuere Bauformen von Mikrostrukturapparaten für den Baukasten entwickelt, die im folgenden kurz vorgestellt werden (Abb. 8).

Für stark exotherme chemische Prozesse mit flüssigen Medien steht eine neuartige Modulreihe von Mikroreaktoren und Mikromischern zur Verfügung, die im Rahmen einer Industriekooperation erfolgreich im Technikum des IMVT getestet wurde [9]. Das Besondere dieser Baureihe ist, dass beim Zusammenflanschen der Reaktormodule der „Totraum“, d. h. der nicht temperaturkontrollierte Raum zwischen den Modulen, vernachlässigbar klein ist.

In dem neu entwickelten, sogenannten Katalytbrenner mit drei Fluidpassagen und sechs Rohranschlüssen wird die Reaktionswärme einer chemischen Gasphasenreaktion genutzt, um Flüssigkeiten zu erhitzen und falls erforderlich zu verdampfen. Die Reaktion wird dabei im Inneren des Mikroapparates durch spezielle Einbauten so gesteuert, dass die Reaktionswärme gleichmäßig in Längsrichtung des Apparates entsteht, so dass keine unzulässigen hot-spots entstehen können. Solche Katalytbrenner wur-



Abb. 6: Modularer Baukasten für die Mikroverfahrenstechnik: Standardisierte Mikrostrukturapparate, wie Mikroreaktoren, Mikrowärmeübertrager und Mikromischer, die über ebenfalls standardisierte Schnittstellen flexibel miteinander kombiniert werden können, um die gestellten verfahrenstechnischen Aufgaben zu lösen.

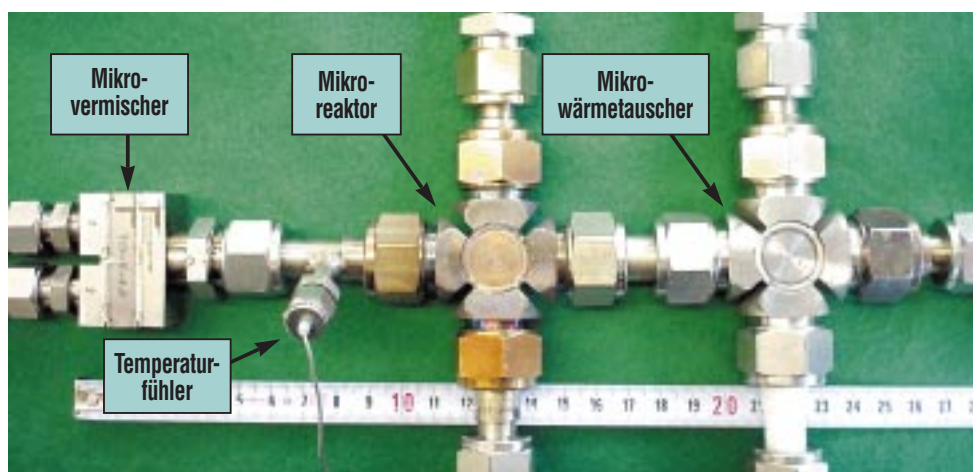


Abb. 7: Beispiel für den Einsatz des in Abb. 6 gezeigten Baukastens bei der katalytischen Umwandlung von explosiven Gasgemischen aus Wasserstoff und Sauerstoff in Wasser für eine zukünftige Anwendung in einer Weltraumstation. Drei Standard-Bauteile aus dem Baukasten wurden dazu modulartig zu einem mikroverfahrenstechnischen System miteinander verbunden. Ein Mikromischer zur Vermischung der beiden Gasströme, ein Mikroreaktor, um das explosive Gasgemisch in den mit Katalysator beschichteten Mikrokanälen gefahrlos zur Reaktion zu bringen und ein Mikrowärmetauscher, der das Reaktionsprodukt Wasserdampf abkühlt und zu flüssigem Wasser kondensiert. Der Aufbau wurde gemeinsam mit einem Industriepartner erfolgreich erprobt.



Abb. 8: Weitere neue Bauformen von Mikrostrukturapparaten für den Ausbau des mikroverfahrenstechnischen Baukastens für chemische und thermische Prozesse aus der industriellen Verfahrenstechnik.

den im IMVT und bei einem Industriepartner zur Verdampfung von Wasser bzw. von Wasser/Methanol-Gemischen mit Erfolg getestet [12].

Mit elektrisch beheizten Mikrostrukturapparaten können Prozessströme einfach, präzise und schnell auf wesentlich höhere Temperaturen erhitzt werden, als dies mit Thermoöl betriebenen Mikrowärmeübertragern erreichbar ist [22]. Diese elektrisch betriebenen Apparate, deren Regelung gemeinsam mit dem IPE entwickelt wird, sind auch für endotherme, d. h. wärmeverbrauchende chemische Prozesse einsetzbar, wie dies bei der Erzeugung von Wasserstoff aus einem Methanol/Wasser-Ge-

misch im IMVT mit Erfolg gezeigt wurde [23].

Eine weitere Bauform, die die Vorteile der Mikrostrukturtechnik besonders eindrucksvoll demonstriert, ist ein „thermisch taktbarer“ Mikrostrukturreaktor mit integriertem Katalysator, dessen Temperatur im Sekundenbereich gezielt um 100 Kelvin erhöht bzw. erniedrigt werden kann [24]. Durch dieses schnelle thermische Takten des Katalysators, welches nur mit Mikrostrukturen realisierbar ist, wird eine Effizienzsteigerung bei chemischen Gasphasenreaktionen erwartet.

Neben diesen metallischen Mikrostrukturapparaten enthält der Baukasten bereits einen ersten Apparat aus Kunststoff, wie er mit

Laser-Stereolithografie, dem sogenannten Rapid-Prototyping-Verfahren, schnell und mit leicht zu variierenden Designs hergestellt wird.

Und last but not least wird der Baukasten durch einen Kompaktreaktor aus Keramik abgerundet, der vom IMF III entwickelt wurde (vgl. gesonderten Beitrag des IMF III). Keramik als Werkstoff erweitert das Anwendungspotential der Mikrostrukturapparate in Richtung Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturanwendungen natürlich ganz erheblich.

Diese bereits heute schon große Vielfalt von Bauformen des Baukastens Mikroverfahrenstechnik wird fortlaufend durch neue Bausteine zu erweitern sein, um auf möglichst viele Anforderungsfälle der Industrie schnell und flexibel reagieren zu können.

Der Gedanke eines modularen Baukastens wird inzwischen auch durch das BMBF in einem strategischen Forschungsprojekt gefördert, in dem das IMVT eng mit anderen Projektpartnern zusammenarbeitet. In diesem Projekt will man einen allgemeinen Baukasten mit in ganz Deutschland gültigen Schnittstellen erarbeiten, um auch die unterschiedlichsten Mikrostrukturapparate von verschiedenen Herstellern flexibel untereinander verbinden zu können. Die Einbindung von zahlreichen Industriefirmen als potentielle Anwender in das Projekt trägt sicherlich wesentlich zu einer zukünftigen Implementierung der Mikroverfahrenstechnik in der Industrie bei.

Zusammenfassung und Ausblick

Für industrielle Anwendungen in der chemischen und thermischen Verfahrenstechnik werden metallische Mikrostrukturapparate entwickelt, die sich durch technisch relevante Durchsätze auszeichnen sowie durch extrem hohe spezifische Wärmeübertragungsraten, die um viele Faktoren über denen von konventionellen Apparaten liegen. Das hohe Entwicklungspotential der Mikrostrukturapparate wurde durch Beispielprozesse experimentell demonstriert. Die Fertigungsmethode, mit der die Mikroapparate hergestellt werden, wurde weiter verbessert, und die zukünftige Übertragbarkeit auf die Industrie wird durch geeignete Maßnahmen vorbereitet. Mit standardisierten Bauformen der Mikroapparate lassen sich weite Anwendungsbereiche abdecken. Computersimulationen der Wärmevorgänge in den Mikroapparaten sind wertvolle Instrumente für die Auslegung und die Fertigung der Apparate für die unterschiedlichsten Anwendungsfälle geworden. Für die Verwendbarkeit der Standardap-

parate für heterog katalysierte Gasphasenreaktionen wurden neue Verfahren entwickelt, um die Mikrokanäle der Apparate nachträglich mit oberflächenvergrößernden, katalytisch aktiven Schichten zu versehen. Aus den standardisierten Bauformen ist ein Baukasten für die Mikroverfahrenstechnik zusammengestellt worden, dessen Bausteine sich untereinander flexibel miteinander kombinieren lassen, um verfahrenstechnische Aufgabenstellungen aus der Industrie zu erfüllen.

Auf der Basis der Mikrostrukturapparate ist im Forschungszentrum ein neues, zukunftsträchtiges Forschungs- und Technologiegebiet entstanden, die Mikroverfahrenstechnik, an der mittlerweile neben dem IMVT noch fünf weitere Institute beteiligt sind. Diese organisationsübergreifende Kompetenznutzung erhöht die Chancen für eine zukünftige industrielle Anwendung der Mikroverfahrenstechnik ganz entscheidend. Die Herausforderung für die nächsten Jahre liegt jetzt darin, durch erfindungsreichen Einsatz der Mikrostrukturapparate

eine Vielzahl von chemischen und thermischen Prozessen zu verbessern und darüber hinaus gewinnbringend neuartige Verfahrensführungen zu entwickeln und zu implementieren, die mit bisherigen Techniken einfach nicht vorstellbar sind.

Danksagung

Herzlichen Dank an alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des IMVT für ihr Engagement und für die hervorragenden Entwicklungsarbeiten und Ergebnisse, die ich hier nur stellvertretend für Sie zusammengestellt habe.

Dank auch an die an der Mikroverfahrenstechnik beteiligten Institute, ITC-CPV, IRS, IPE, IMF I, IMF III, für die gemeinsamen Anstrengungen, die Mikroverfahrenstechnik zum Erfolg zu führen.

Literatur

- [1] W. Ehrfeld, V. Hessel, H. Löwe, *Microreactors*, Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2000
- [2] K. F. Jensen, *Chem. Eng. Sci.* 56 (2001) S. 293/303
- [3] V. Hessel, H. Löwe, *Chemie Ingenieur Technik*, 74 (1-2), S. 17-30, (2002)
- [4] W. Bier, W. Keller, G. Linder, D. Seidel, K. Schubert *Symposium Volume, DSC-Vol. 19*, ASME, p. 189-197 (1990)
- [5] W. Bier, G. Linder, K. Schubert *KfK-Nachrichten Vol. 23*, 2-3, p. 165-173 (1991)
- [6] K. Schubert, 3. Statuskolloquium des Projektes *Mikrosystemtechnik*, Karlsruhe, 2.-3. April 1998 *Wissenschaftliche Berichte*, FZKA-6080 (März 98) S. 53-60
- [7] K. Schubert, J. Brandner, M. Fichtner, G. Linder, U. Schygulla, A. Wenka, *Microscale Thermophysical Engineering*, 5 (2001) S.17-39
- [8] O. Wörz, K. P. Jäckel, Th. Richter, A. Wolf, *Proc. 2nd Int. Conf. on Microreaction Technology*, 183-185, 1998
- [9] M. Kraut, A. Nagel, K. Schubert, *Proceedings of the 6th Internat. Conf. on Microreaction Technology*, *AICHE Spring Nat. Meeting*, New Orleans, March 10-14, 2002

- [10] R. Wunsch, M. Fichtner, K. Schubert, *In Microreaction Technology, R. Irven, [Hrsg.], 4th Internat. Conf.; IMRET 4; AIChE Spring Nat. Meeting, Atlanta, Ga., Topical Conf. Proc. S. 481-487, 2000*
- [11] M. Janicke, H. Kestenbaum, U. Hagendorf, F. Schueth, M. Fichtner, K. Schubert *Journal of Catalysis 191, S. 282-293, 2000*
- [12] *Ergebnisbericht über Forschung und Entwicklung 2000, Forschungszentrum Karlsruhe, S. 37 (2000)*
- [13] A. Wenka, M. Fichtner, K. Schubert, *In Microreaction Technology, R. Irven, [Hrsg.], 4th Internat. Conf.; IMRET 4; AIChE Spring Nat. Meeting, Atlanta, Ga., Topical Conf. Proc. S. 256-263, 2000*
- [14] *Ergebnisbericht über Forschung und Entwicklung 2001, Forschungszentrum Karlsruhe, S. 274 (2001)*
- [15] M. Fichtner, J. Mayer, D. Wolf, K. Schubert, *Industrial and Engineering Chemistry Research, 40 (2001) S. 3475-3483*
- [16] R. Wunsch, M. Fichtner, O. Görke, K. Haas-Santo, K. Schubert, *Chemie Ingenieur Technik, 73 (2001) S.1168-1172*
- [17] K. Haas-Santo, M. Fichtner, K. Schubert, *Applied Catalysis A, 220 (2001) S.79-92*
- [18] P. Pfeifer, O. Görke, K. Schubert, *Proceedings of the 6th Internat. Conf. on Microreaction Technology, AIChE Spring Nat. Meeting, New Orleans, March 10-14, 2002*
- [19] T. Zech, D. Hönicke, M. Fichtner, K. Schubert, *In Microreaction Technology, R. Irven, [Hrsg.], 4th Internat. Conf.; IMRET 4; AIChE Spring Nat. Meeting, Atlanta, Ga., Topical Conf. Proc. S. 390-399, 2000*
- [20] S. Ehlers, K. Elgeti, T. Menzel, G. Wießmeier *Chem. Eng. Proc. 39, S. 291-298, 2000*
- [21] O. Görke, K. Haas-Santo, K. Schubert, J. Fiedler, H. Funke, *In Microreaction Technology, M. Matlosz, W. Ehrfeld, J. P. Baselt (Eds.), Proceedings of the 5th Internat. Conf. on Microreaction Technology, S. 313-321, 2001*
- [22] J. Brandner, M. Fichtner, K. Schubert, *Proceedings of the 3rd Internat. Conf. on Microreaction Technology, S. 213-223, 1999*
- [23] P. Pfeifer, K. Schubert, M. Fichtner, M. A. Liauw, G. Emig, *Proceedings of the 6th Internat. Conf. on Microreaction Technology, AIChE Spring Nat. Meeting, New Orleans, March 10-14, 2002*
- [24] J. Brandner, M. Fichtner, K. Schubert, M. Liauw, G. Emig, *In Microreaction Technology, M. Matlosz, W. Ehrfeld, J. P. Baselt (Eds.), Proceedings of the 5th Internat. Conf. on Microreaction Technology, S. 164-174, 2001*