

Innovative Katalysatoren zur oxidativen Dehydrierung in der Gasphase – Metallische Kurzfasern

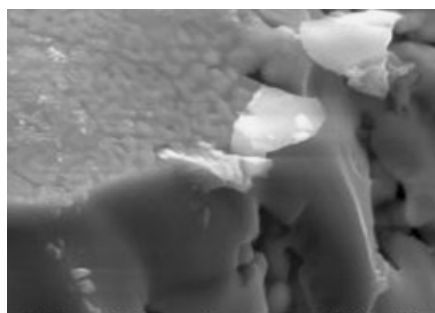
RAINER BRÜNING, PETER SCHOLZ, INGRID MORGENTHAL, OLAF ANDERSEN UND BERND ONDRUSCHKA *

Metallische Kurzfasern in ausgesuchter Legierungszusammensetzung und Gefügestruktur wurden auf ihre katalytische Aktivität bei der oxidativen Dehydrierung (ODH) von Propan zu Propen und von Isopropanol zu Aceton untersucht. Die über das Schmelzextraktions-Verfahren hergestellten Kurzfasern wurden einer intensiven Charakterisierung ihrer werkstoffseitigen Eigenschaften unterworfen. Dabei kamen lichtmikroskopische, DSC-, XRD-, REM- und EDX-Untersuchungen zum Einsatz, um Zusammenhänge zwischen der Werkstoffzusammensetzung, dem Gefüge und den katalytischen Eigenschaften zu ermitteln. Es werden ausgewählte Ergebnisse zur Temperaturabhängigkeit des Propan-Umsatzes bzw.

der Propen-Selektivität präsentiert. So wurde Propen bei einem Propan-Umsatz von mehr als 50 % mit einer Ausbeute von 35 % gebildet. Auch die Selektivoxidation von Isopropanol zu Aceton erfolgte mit attraktiven Ausbeuten von über 80 %. Die Ergebnisse insgesamt belegen das hohe Innovationspotenzial der Metallfaserwerkstoffe.

Innovative Catalysts for Oxidative Dehydration Reactions in the Gas Phase – Metallic Short Fibres

The catalytic activity of metallic short fibres with chosen alloy composition and texture was investigated in the oxidative dehydration (ODH) of propane to yield propene, and of isopropanol to yield acetone. The short fibres were synthesised using a melt extraction process and the properties of the fibres were intensely characterised. A correlation between the structure and the catalytic activity of the material was established. Thus, light-optical microscopic-, DSC-, XRD-, REM- and EDX-methods were used to characterise the fibres. Selective results of the dependency of the temperature on the propane conversion are presented in this work. A yield of more than 35 % propene is obtained at a propane conversion of 50 %. The ODH of isopropanol to acetone occurred with attractive yields of over 80 %. The results demonstrate the high innovative potential of the metal fibre materials.



1 Einleitung und Problemstellung

Propen ist ein wichtiger Ausgangsstoff für die chemische und die Kunststoffindustrie. Die benötigten Mengen können nur mit hohem Kostenaufwand produziert werden. Dabei kommen zurzeit hauptsächlich Steam-Cracking-Prozesse zum Einsatz [1]. Andere Herstellungsverfahren sind die katalytische Dehydrierung und das katalytische Cracken [2]. Die oxidative Dehydrierung von Propan würde eine preiswerte Quelle für das benötigte Propen darstellen. Viele Arbeitsgruppen beschäftigen sich deshalb weltweit mit der

Suche nach geeigneten Katalysatoren und Reaktionsbedingungen. Bis jetzt ist jedoch noch kein Durchbruch auf diesem Gebiet erreicht worden [3 – 8].

Die oxidative Dehydrierung von niederen Kohlenwasserstoffen und Alkoholen erfordert spezifische Reaktionsbedingungen, um Totaloxidation zu vermeiden. Es erweist sich als vorteilhaft, die Sauerstoffkonzentration im Eduktgasstrom gering zu halten. Außerdem werden kurze Verweilzeiten am Katalysator benötigt. Dies wird durch geringe spezifische Oberflächen der Katalysatoren erreicht. Auch eine gute Wärmeabfuhr im Katalysator ist von Vorteil, um überhitzte Zentren im Katalysatorbett zu vermeiden.

In der hier vorgestellten Arbeit wurden zehn verschiedene Katalysatoren auf Basis metallischer Kurzfasern untersucht. Diese Fasern weisen einen geringen Druckverlust über ihrer Schüttung und geringe, jedoch ausreichend hohe spezifische Oberflächen auf. Diese können wiederum über die Variation der Fasergeometrie beeinflusst werden. Vorteilhaft ist die Möglichkeit, die Zusammensetzung der Fasern aus nahezu beliebig wählbaren, katalytisch aktiven

* R. BRÜNING, Dr. P. SCHOLZ, Prof. Dr. B. ONDRUSCHKA, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Technische Chemie und Umweltchemie, Lessingstraße 12, D-07743 Jena, Germany; Dr. I. MORGENTHAL, Dr. O. ANDERSEN, Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), Institutsteil Pulvermetallurgie und Verbundwerkstoffe Dresden, Winterbergstraße 28, D-01277 Dresden, Germany.

Metallen variieren zu können. In [9] sind Drahtgestricke beschrieben, die allerdings – im Gegensatz zu den hier zur Anwendung gekommenen – nur auf kommerziell verfügbaren Legierungen basieren und aufgrund der Drahtstärke eine wesentlich geringere spezifische Oberfläche besitzen.

Die Auswahl der Legierungsbestandteile der Fasern in diesem Fortschrittsbericht erfolgte ad hoc nach dem Vorbild bekannter Mischoxid-Oxidationskatalysatoren [10 – 12]. Die dort als Aktivkomponenten verwendeten Oxide wurden in der vorliegenden Arbeit in metallischer Form als Legierungsbestandteile der Fasern eingebracht. Aus werkstoffwissenschaftlicher Sicht war weiterhin interessant, den Einfluss der Struktur (kristallin, amorph oder quasikristallin) auf die katalytische Wirksamkeit zu betrachten.

2 Experimenteller Teil

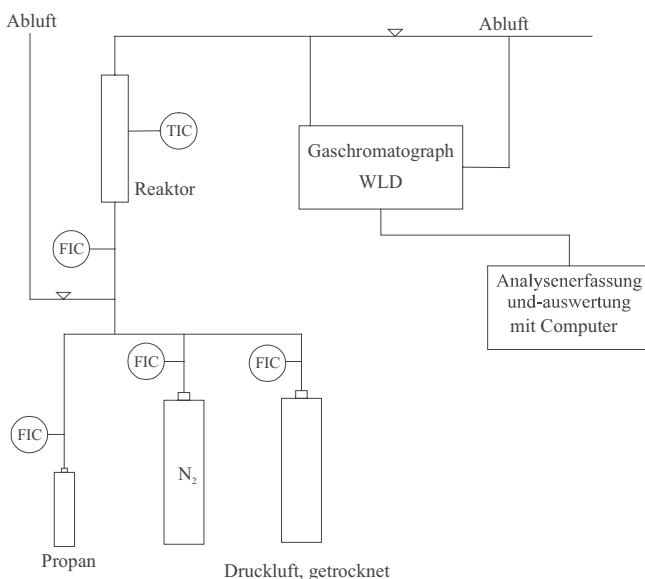
2.1 Katalytische Testung der metallischen Fasern

Für die ODH von Propan zu Propen wurden 2 g Katalysatormaterial eingewogen. Das Eduktgasgemisch, bestehend aus 1 Vol.-% Propan, 1 Vol.-% Sauerstoff und 98 Vol.-% Stickstoff, wurde mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 25000 cm³/h über den Katalysator geleitet. Dies entspricht einer Raumeschwindigkeit von 10000 h⁻¹. Es wurden Temperatur-Umsatzkurven aufgenommen. Dabei wurden bei jedem Temperaturmesspunkt die Propen- und die Kohlendioxid-Selektivität sowie der Umsatz an Propan mit Hilfe eines Online-GC mit Wärmeleitfähigkeitsdetektor bestimmt.

Die Totaloxidationsversuche wurden mit 1 Vol.-% Propan in 99 Vol.-% Luft bei sonst identischen Reaktionsbedingungen im Vergleich zur ODH ausgeführt. Abb. 1 zeigt die schematische Darstellung der für die ODH bzw. Totaloxidation von Propan eingesetzten Apparatur.

Die ODH von Isopropanol zu Aceton erfolgte in einem Neunfach-Reaktorsystem mit Online-FTIR-Detektion

Abbildung 1.
Schematische Darstellung der Apparatur zur Testung der katalytischen Eigenschaften der metallischen Kurzfasern bei der ODH bzw. Totaloxidation von Propan.

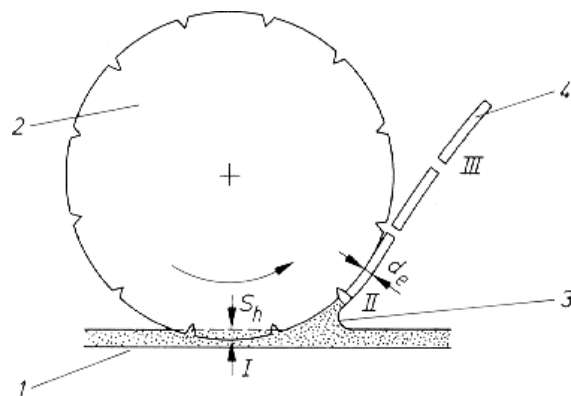


der gasförmigen Edukte wie Produkte am Reaktorausgang, vgl. [13]. Es wurde 1 g Katalysatormaterial eingewogen. Die Strömungsgeschwindigkeit im Reaktor betrug 5000 cm³/h, was einer Raumeschwindigkeit von 5000 h⁻¹ entspricht. Die Isopropanol-Konzentration im Eduktgasstrom betrug 2 Vol.-%, die Sauerstoffkonzentration 1 Vol.-%. Als Trägergas diente Stickstoff. Es wurden Temperatur-Umsatzkurven aufgenommen. Dabei wurden bei jeder angefahrenen Temperatur die Aceton-, Propen-, Kohlendioxid- und die Isopropanol-Konzentration am Reaktorausgang bestimmt, um daraus Selektivitäten und den Umsatz zu berechnen.

2.2 Schmelzextraktion von metallischen Fasern

Der Prozess der Tiegelschmelzextraktion (s. Abb. 2) macht es möglich, kurze Fasern aus nahezu jedem schmelzbaren Material herzustellen. Eine rotierende Walze mit gekerbter Oberfläche taucht in das Schmelzbad. Die Walze ist wassergekühlt und erzeugt damit eine hohe Erstarrungsrate im extrahierten Faservolumen. Dadurch werden eine homogene Verteilung der Legierungselemente, geringe Gefügekorngrößen, hohe Löslichkeit von Legierungselementen und bei Bedarf metastabile oder amorphe Gefügestände erreicht. Die Schmelzextraktionsfasern weisen einen typischen sichel- oder nierenförmigen Querschnitt auf.

Abbildung 2.
Prinzipskizze Tiegelschmelzextraktion von Fasern:
1) Metallschmelze; 2) Walze; 3) dynamischer Meniskus; 4) Metallfaser; S_h Eintauchtiefe; d_e Erstarrungsdicke.



Am Fraunhofer-Institut IFAM in Dresden wurde der Prozess der Tiegelschmelzextraktion weiterentwickelt, um Fasern mit einem durchschnittlichen Äquivalenzdurchmesser von 50 bis 150 µm in Batchgrößen bis zu einigen Kilogramm herstellen zu können [14]. Die Faserlänge kann dabei zwischen 3 und 25 mm mit einer Abweichung von ca. +/- 15% eingestellt werden. Für die vorliegende Arbeit wurden die in Tab. 1 näher charakterisierten metallischen Kurzfasern hergestellt und untersucht. Am Beispiel der folgenden ausgewählten Werkstoffe werden die wichtigsten Ergebnisse stellvertretend beschrieben:

- CuTiNiZrSn, amorph mit intermetallischen Phasen,
- AlCuFe, quasikristallin,
- Cu₃Sn (1), intermetallische Phase (38,1 Ma.-% Sn),
- Cu₃Sn (2), intermetallische Phase (38,1 Ma.-% Sn),
- CuNiMnFe, kristallin.

Tabelle 1.

Zusammenfassung der werkstoffseitigen und katalytischen Eigenschaften der untersuchten Fasern bei der ODH von Propan bzw. Isopropanol.

Katalysator	Zusammensetzung	Dichte [g/cm ³]	mittlere Faserabmessungen		spezifische Oberfläche [m ² /g]	Propan: ODH	Propan: Total-oxidation	Isopropanol: ODH
	Ma.-%		Länge [mm]	Durchmesser [µm]				
Cu ₃ Sn (1)	Cu 61,9 Sn 38,1	8,94	4,93	136 Kristallitgröße: 25,5 µm	0,0084 (BET) 0,0044 (optisch)	+	-	+
Cu ₃ Sn (2)	Cu 61,9 Sn 38,1	8,94	5,27	70 Kristallitgröße: 13 µm	0,0103 (BET) 0,0061 (optisch)	-	+	++
CuTiNiZrSn	Cu 39,94 Ti 22,58 Ni 13,83 Zr 14,33 Sn 9,32	7,16	9,47	95	0,0277 (BET) 0,0052 (optisch)	+	+	++
AlCuFe	Al 42,40 Cu 40,75 Fe 16,85	4,42	10,26	138	0,0418 (BET) 0,0104 (optisch)	++	-	-
CuNiMnFe (V447)	Cu 64 Ni 28 Mn 7 Fe 1	8,52	10,3	81,6	0,0077 (optisch)	+	+	++
CuNiMnFe (V449)	Cu 88 Ni 10 Mn 1 Fe 1	8,81	11,6	98,4	0,0055 (optisch)	-		+
FeCrAlPt	Fe 74,5 Cr 20 Al 5 Pt 0,5	7,2	11,35	89	0,009 (optisch)	+	-	-
FeAlPt	Fe 69,5 Al 30 Pt 0,5	5,4	6,06	59	0,0166 (optisch)	+	-	-
CuTi 5	Cu 95 Ti 5	8,75	41	137	0,0032	-	+	+
CuSi 1	Cu 99 Si 1	8,68	5,5	136	0,0033			+

Der durchschnittliche Äquivalenzdurchmesser und die Gefügekorngröße der Fasern können durch die Extraktionsparameter, wie die Rotationsgeschwindigkeit der Extraktionswalze und die Eintauchtiefe, beeinflusst werden. Die hier untersuchten Fasern wurden mit einer Rotationsgeschwindigkeit der Extraktionswalze von 5,5 m/s (Cu₃Sn (1), AlCuFe) bzw. 13 m/s (Cu₃Sn (2), CuTiNiZrSn, CuNiMnFe) hergestellt. Um die quasikristalline Struktur der AlCuFe-Fasern zu erhalten, wurden diese 3 h bei 720 °C wärmebehandelt. Tab. 1 gibt eine Übersicht über die wich-

tigsten Faserkennwerte und das Verhalten der Metallfasern als Katalysatoren bei exemplarischen oxidativen Dehydrierungen und bei der Totaloxidation.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Untersuchungen zur katalytischen Aktivität der metallischen Kurzfasern

Bei der ODH von Propan zu Propen zeigte sich die quasikristalline AlCuFe-Faser als besonders geeignet. Es wurden hohe Propen-Selektivitäten bei gleichzeitig hohen Umsätzen gefunden (s. Abb. 3). Auch bei Verwendung der CuTiNiZrSn-Faser war eine gute Propen-Selektivität bei hohen Umsätzen nachweisbar (s. Abb. 4). Im Falle der Cu₃Sn-Faser wurde ein mäßig gutes Totaloxidationsverhalten detektiert. Dabei entstand weniger Wasser, als es von der Reaktionsgleichung her zu erwarten wäre. Es wird vermutet, dass ein Teil des während der Reaktion entstehenden Wasserstoffs nicht oxidiert wird. Dieses „Reforming“-Verhalten ist Thema laufender Untersuchungen (s. Abb. 5).

Abbildung 3.

Temperaturabhängigkeit von Umsatz und Selektivität bei der Gasphasen-ODH von Propan an AlCuFe-Fasern.

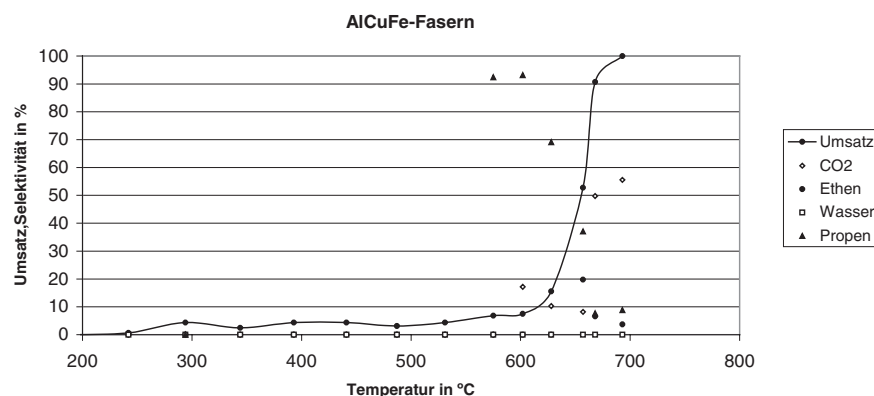


Abbildung 4.
Temperaturabhängigkeit von Umsatz und Selektivität bei der Gasphasen-ODH von Propan an CuTiNiZrSn-Fasern.

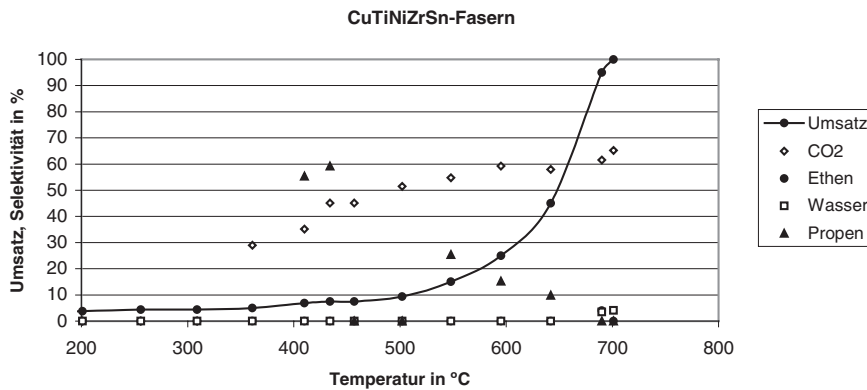


Abbildung 5.
Temperaturabhängigkeit von Umsatz und Selektivität bei der Gasphasen-ODH von Propan an Cu₃Sn (2)-Fasern.

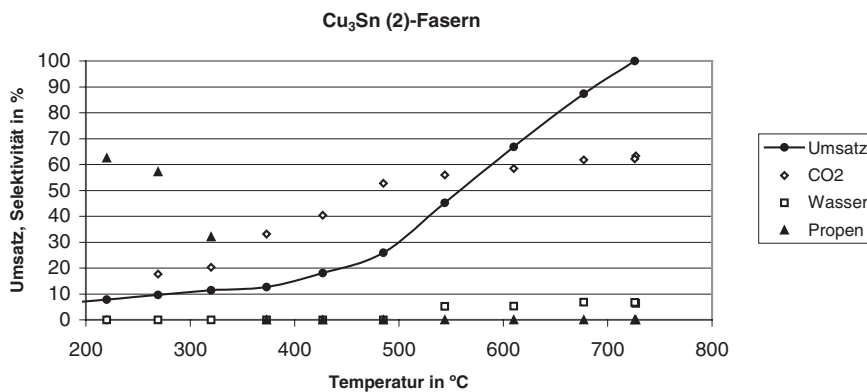
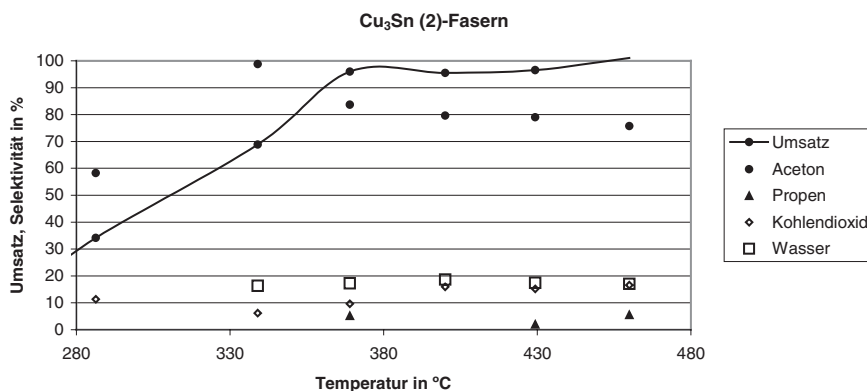


Abbildung 6.
Temperaturabhängigkeit von Umsatz und Selektivität bei der Gasphasen-ODH von Isopropanol an Cu₃Sn-Fasern.



Bei der Selektivoxidation von Isopropanol zeigten einige Fasern ein ausgezeichnetes Umsatz- und Selektivitätsverhalten. Besonders positiv fallen die Fasern Cu₃Sn (2), CuTiNiZrSn und CuNiMnFe auf. Mit ihrer Hilfe können nahezu vollständige Umsätze bei 380 °C erreicht werden. Die Aceton-Selektivität beträgt bei diesen Temperaturen mehr als 85 %, die Kohlendioxid-Selektivität ist mit Werten zwischen 10 und 15 % niedrig (s. Abbn. 6 – 8). Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Selektivoxidation von Isopropanol ist Tab. 1 zu entnehmen. Hier findet man auch eine Zusammenfassung der Eigenschaften der untersuchten Fasern, wie ihre Zusammensetzung, ihre geometrischen

Abmessungen, die spezifische Oberfläche und ihre katalytische Aktivität. Der mittlere Faserdurchmesser variiert in Abhängigkeit von den Schmelzextraktionsbedingungen zwischen 70 und 150 µm. Dünnere Fasern wurden mit Hilfe einer höheren Rotationsgeschwindigkeit der Extraktionswalze während des Schmelzextraktionsprozesses hergestellt. Ein Beispiel dafür sind die Cu₃Sn (2)-Fasern. Trotz des im Vergleich zu anderen Fasern höheren Faserdurchmessers von 138 µm weisen die AlCuFe-Fasern eine größere spezifische Oberfläche auf. Dies ist auf die feinstrukturierte poröse Oberfläche der quasikristallinen Fasern zurückzuführen.

Abbildung 7. Temperaturabhängigkeit von Umsatz und Selektivität bei der Gasphasen-ODH von Isopropanol an CuTiNiZrSn-Fasern.

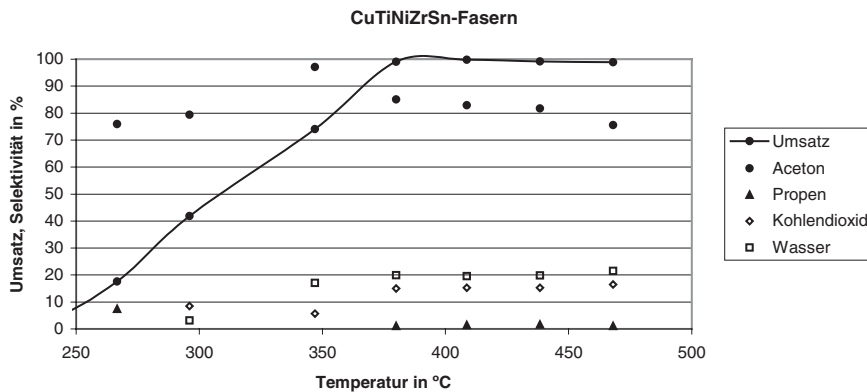
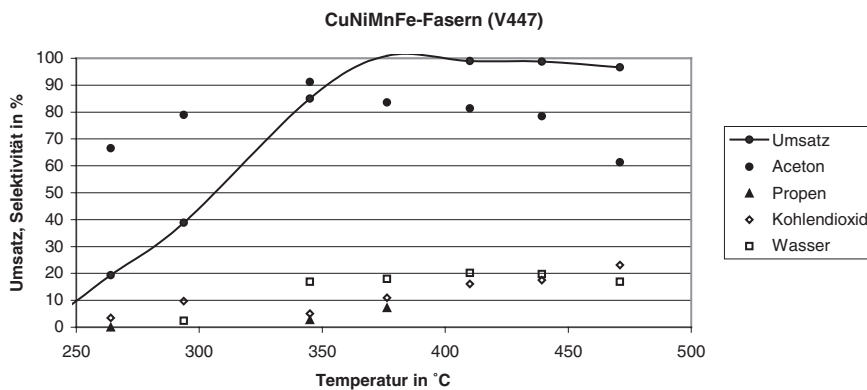


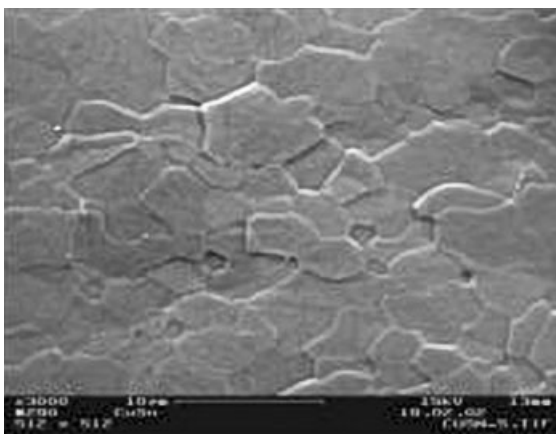
Abbildung 8. Temperaturabhängigkeit von Umsatz und Selektivität bei der Gasphasen-ODH von Isopropanol an CuNiMnFe-Fasern.



3.2 Struktur- und Gefügeuntersuchung der Fasern

Die metallischen Kurzfasern wurden vor und nach der katalytischen Testung analysiert, um mögliche Veränderungen im Gefüge, in der chemischen Zusammensetzung und der Beschaffenheit der Oberfläche zu erfassen. Es war zu erwarten, dass es unter Reaktionsbedingungen zu Diffusionsprozessen in oberflächennahen Bereichen des Faservolumens kommt und dass damit auch Gefügeveränderungen verbunden sein können. Anhand von licht- und elektronen-

Abbildung 9. REM-Aufnahme der Faseroberfläche einer Cu₃Sn (2)-Faser vor Reaktionsbeginn der ODH von Propan.

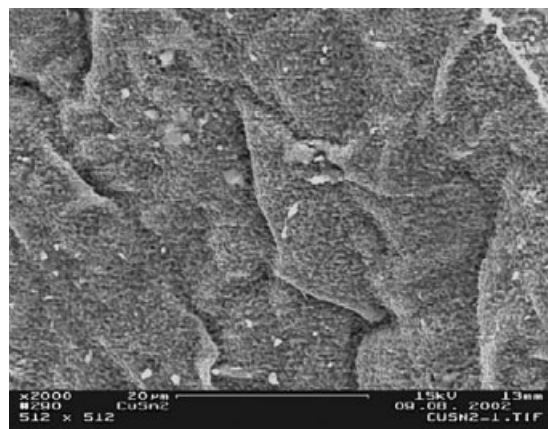


mikroskopischen Untersuchungen ausgewählter Faserquerschliffe war es möglich, eine Einschätzung der Faserstabilität vorzunehmen. Die Analysen zeigten, ob Faservolumen während des Katalyseprozesses aufgezehrt wurde. Diese Untersuchungen erlaubten es, die Langzeitstabilität der Fasern unter Reaktionsbedingungen einschätzen zu können.

3.3 Katalysator aus Cu₃Sn-Fasern

Die Kupfer-Zinn-Fasern, bestehend aus 61,9 Ma.-% Kupfer und 38,1 Ma.-% Zinn, bildeten die intermetallische Phase Cu₃Sn des binären Kupfer-Zinn-Systems. Demzufolge besitzen diese Fasern eine homogene, einphasig kristalline Struktur. Die durchschnittliche Korngröße der Kristallite in den Cu₃Sn-Fasern variiert mit den Extraktionsbedingungen und beträgt 13 bis 26 µm (s. Tab. 1). Die Kristallkorngrößen sind an der Oberfläche der Fasern in der REM-Aufnahme Abb. 9 erkennbar. Bereits nach drei Messzyklen erscheint die Oberfläche der Fasern in der REM-Aufnahme rau und porös. Die Oberfläche ist schwammartig strukturiert und angegriffen (s. Abb. 10). EDX-Analysen am Querschliff belegen eine Cu-Verarmung und Sauerstoffanreicherung in der Oberfläche. Es haben sich offenbar Cu- bzw. Cu-Sn-Mischoxide gebildet.

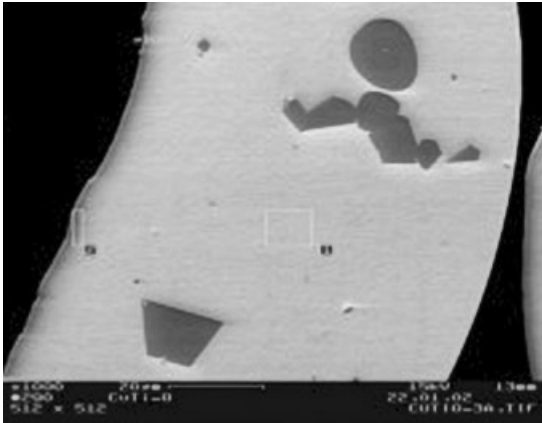
Abbildung 10. REM-Aufnahme der Faseroberfläche einer Cu₃Sn (2)-Faser nach drei Messzyklen der ODH von Propan.



3.4 Katalysator aus CuTiNiZrSn-Fasern

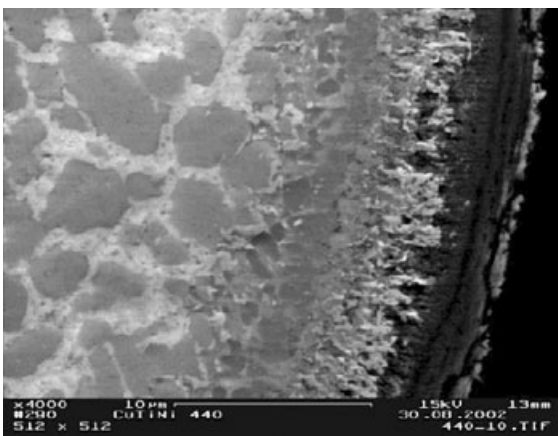
Die CuTiNiZrSn-Fasern, welche aus einer Cu-, Ti- und Ni-reichen Legierung hergestellt wurden, weisen eine amorphe Basisstruktur mit kristallinen Einschlüssen auf. Tab. 1 ist die genaue Zusammensetzung dieser Legierung zu entnehmen. Abb. 11 zeigt einen Faserquerschliff in einer REM-

Abbildung 11.
REM-Aufnahme einer CuTiNiZrSn-Faser vor Reaktionsbeginn der ODH von Propan.



Aufnahme. Es können zwei Phasen in der Faser unterschieden werden. Mittels Röntgendiffraktometrie und EDX-Analysen wurde nachgewiesen, dass es sich um eine Sn-reiche amorphe Phase (hell) mit eingebetteten Sn-armen kristallinen Phasen (dunkel) handelt. REM-Analysen der Oberfläche der Fasern zeigen eine unstrukturierte glatte Oberfläche. REM- und EDX-Aufnahmen von Faserquerschliffen nach fünf Messzyklen der oxidativen Dehydrierung von Propan ergaben einen schichtartigen Aufbau der Faser. Diese Schichten entstanden durch Diffusionsprozesse einzelner Legierungskomponenten innerhalb des Faservolumens. So diffundierte Kupfer an die Oberfläche der Faser, während sich Ti, Ni und Zr im Inneren anreicherten. Der hohe Sauerstoffgehalt in der Oberfläche der Faser, die sich als zerklüftet und angegriffen zeigt, lässt auf die Bildung von Cu- bzw. Cu-haltigen Mischoxiden schließen (s. Abb. 12).

Abbildung 12.
REM-Aufnahme der CuTiNiZrSn-Faser nach fünf Messzyklen der ODH von Propan.



3.5 Katalysator aus AlCuFe-Fasern

Die Mikrostruktur der AlCuFe-Fasern mit der Zusammensetzung 42,4 Ma.-% Al, 40,7 Ma.-% Cu und 16,9 Ma.-% Fe wies nach dem Prozess der Schmelzextraktion dendritische Kristalle auf. Um zu einer quasikristallinen Zielstruktur zu gelangen, wurde die Faser bei 720 °C 3 h calciniert. Die me-

Abbildung 13.
REM-Aufnahme einer Faserbruchstelle einer AlCuFe-Faser vor Reaktionsbeginn der ODH von Propan (Die poröse Oberflächenstruktur ist nur eine dünne Schicht.).

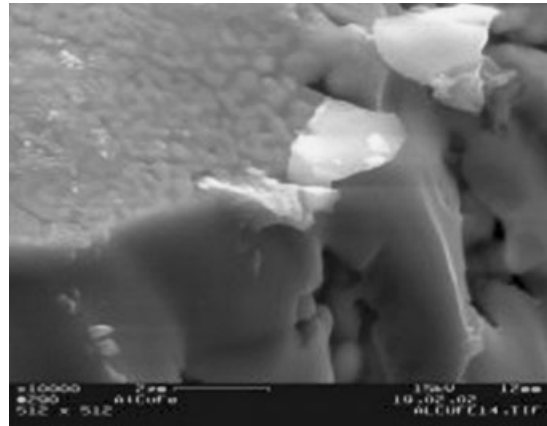
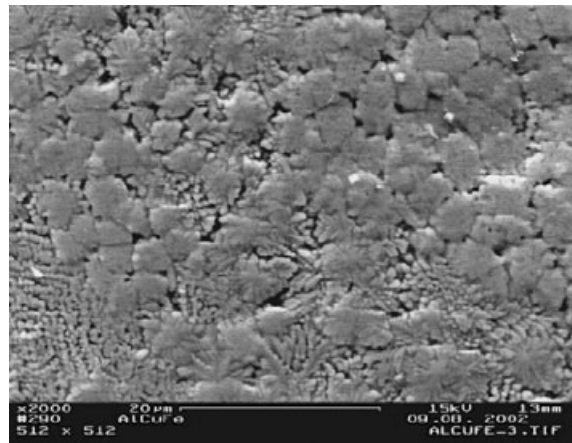


Abbildung 14.
REM-Aufnahme der Faseroberfläche einer AlCuFe-Faser nach fünf Messzyklen der ODH von Propan (Die Oberfläche wurde durch die Messzyklen nicht beeinträchtigt.).



tallographischen Analysen nach der Wärmebehandlung zeigten keine kristallinen Charakteristiken mehr. Mit Hilfe der Röntgendiffraktometrie waren nur quasikristalline ikosaedrische Strukturen nachweisbar. Im Gegensatz dazu wiesen die Oberflächen der Fasern feine Strukturen und ein poröses Raster auf. Abb. 13 zeigt die REM-Aufnahme einer Bruchkante einer Faser. Es ist eine dünne strukturierte Oxidoberfläche mit einer Dicke im nm-Bereich zu erkennen. Diese Beobachtung wird durch EDX-Analysen bestätigt, die einen hohen Sauerstoffgehalt an der Oberfläche erkennen lassen. Abb. 14 stellt die Faseroberfläche nach fünf Messzyklen der ODH von Propan dar. Die Oxidschicht ist erhalten geblieben. Auch mit REM- und EDX-Analysen an Faserquerschliffen lassen sich keine nennenswerten Veränderungen der Faser erkennen, die Faser war unter Reaktionsbedingungen stabil.

Mit Hilfe der hier vorgestellten Fasern konnten relativ hohe Propen-Selektivitäten bei der oxidativen Dehydrierung von Propan gefunden werden. Die Ergebnisse werden in Abb. 3 veranschaulicht. Im Vergleich zu allen untersuchten Katalysatoren zeigten die AlCuFe-Fasern die beste und damit technisch interessante Propen-Selektivität bei mittleren bis hohen Umsätzen.

4 Schlussfolgerung

Es wurde gefunden, dass schmelzextrahierte metallische Kurzfasern aufgrund ihrer Variabilität in der Legierungszusammensetzung und damit des Gefügebau sowie ihrer Oberflächenmorphologie, ihrer optimalen spezifischen Oberfläche und der damit verbundenen geringen Druckverluste über die Faserschüttung als Katalysatoren für oxidative Dehydrierungen geeignet sind.

Ausgewählte Fasern waren unter Reaktionsbedingungen ohne messbare Veränderung mehrere Untersuchungszyklen stabil. Beste Ergebnisse bei der ODH von Propan zu Propen wurden mit den quasikristallinen AlCu-Fe-Fasern erzielt, deren ausgezeichnetes Verhalten bei gleichzeitig hoher Stabilität sowohl mit der chemischen Zusammensetzung als auch mit der nanostrukturierten oxidischen Oberfläche begründbar ist. Auch die oxidative Dehydrierung von Isopropanol zu Aceton erfolgte bei hohen Umsätzen mit sehr hohen Selektivitäten.

Weiterführende Untersuchungen werden zurzeit u. a. mit ausgewählten Eisenhohlkugeln als Trägerstrukturen durchgeführt, die mit Hilfe unterschiedlicher Beschichtungstechniken mit katalytisch aktiven Metallen ausgestattet wurden. Auch Glasfasergewebe, welche mittels PVD-Technologie beschichtet wurden, dienen als Katalysator. Zielsetzung beim Einsatz dieser Strukturen ist es, relativ preiswertes Trägermaterial mit katalytisch aktiven Materialien zu beschichten und damit ökonomisch attraktive Katalysatormaterialien in hoher Variationsbreite für branchentypische ODH-Verfahren bereitzustellen. Über die Ergebnisse soll später an gleicher Stelle berichtet werden.

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle BMBF-Unterstützung im Rahmen des Wachstumskerns „Netzwerk für innovative Oberflächentechnik und Anlagenbau – NOA – (Projekt nr: 03WKG03) und beim NOA-Projektmanagement, insbesondere bei den Herren B. SCHOLZ und Dr. F. HOLLSTEIN (Zittau) für die kooperative Zusammenarbeit.

Eingegangen am 24. Februar 2004 [B 6171]

Literatur

- [1] K. Y. G. Chan, S. Senkan, F. Inal, *Ind. Eng. Chem. Res.* **1998**, 37, 901.
- [2] W. Zhang, P. G. Smirniotis, *J. Catal.* **1999**, 182, 400.
- [3] R. Lodeng, O. A. Lindvag, S. Kvisle, H. Reiher-Nielsen, A. Holmen, *Appl. Catal. A: General* **1999**, 187, 25.
- [4] D. L. Iordanoglou, A. S. Bodke, L. D. Schmidt, *J. Catal.* **1999**, 187, 400.
- [5] S. Marengo, P. Comotti, G. Galli, *Catal. Today* **2003**, 81, 205.
- [6] M. C. Abello, M. F. Gomez, M. Casella, O. A. Ferretti, M. A. Banares, J. L. G. Fierro, *Appl. Catal. A: General* **2003**, 251, 435.
- [7] L. Leveles, K. Seshan, J. A. Lercher, L. Lefferts, *J. Catal.* **2003**, 218, 296.
- [8] P. Boizumault-Moriceau, A. Pennequin, B. Grzybowska, Y. Barboux, *Appl. Catal. A: General* **2003**, 245, 55.
- [9] W. Gürtler, J. Ackermann, G. Emig, *Chem. Ing. Tech.* **1996**, 68, 1438.
- [10] F. Kapteijn, S. Stegenga, N. J. J. Dekker, J. W. Bijsterbosch, J. A. Moulijn, *Catal. Today* **1993**, 16, 273.
- [11] P. O. Larsson, A. Anderson, L. R. Wallenberg, B. Svensson, *J. Catal.* **1996**, 163, 273.
- [12] A. S. Ivanova, E. M. Moroz, *Kinet. Catal.* **1995**, 36, 117.
- [13] R. Brüning, P. Scholz, B. Ondruschka, *unveröffentlichte Arbeitsergebnisse*, Jena 2003/04.
- [14] O. Andersen, G. Stephani, *Metal Powder Report* **1999**, 54, 30.