

# DIE ROLLE DER KRISTALLINEN ALUMINOSILIKATE BEI DER UMSETZUNG VON KOHLENWASSERSTOFFEN

I. BEDEUTUNG, STRUKTUR UND HERSTELLUNG  
VON ZEOLITHISCHEN MOLEKULARSIEB-KATALYSATOREN

Von

I. SZEBÉNYI, É. GÖRÖG, G. KLOPP und J. SÜTŐ

Lehrstuhl für Chemische Technologie, Technische Universität, Budapest

(Eingegangen am 29. Oktober 1968)

Die Reihe der Katalysatoren, die in der modernen chemischen Technologie der Kohlenwasserstoffe von großer Bedeutung sind, wurde während der letzten Jahrzehnte durch die Anwendung der kristallinen aluminosilikatstrukturellen Zeolithe — auch Molekularsiebe genannt — erweitert [1–4]. Obgleich die Zeolithe als mineralische Stoffe den Mineralogen schon längst bekannt sind, wurde an die industrielle Verwertung ihrer spezifischen Eigenschaften erst vom Anfang der fünfziger Jahre an gedacht. Durch ihre selektive Adsorptionsfähigkeit wurde die Lösung neuer Aufgaben auf dem Gebiet der Gas- und Flüssigkeitstrocknung und -reinigung ermöglicht. Ihre Produktion ist bereits im Gange, und übersteigt heute schon die 15 000 Jato [5].

Auf die Erforschung ihrer Katalysatoreigenschaften war einerseits die Entwicklung der in der Motortreibstoffversorgung hauptsächlich in den USA eine große Rolle spielenden Krackverfahren von großer Einwirkung, andererseits die Auffassung, wonach die günstigen Eigenschaften der Siliziumdioxid-Aluminium-Krack-Katalysatoren auf ihrem den Zeolithen ähnlichen strukturellen Aufbau beruhen [6].

Die ersten Arbeiten [7–10] über die katalytische Wirkung der Zeolithe wurden im Jahre 1960 veröffentlicht.

Heute befassen sich schon zahlreiche Patente mit den Zeolithen als neuen Trägermaterialien oder als Katalysatoren von großer Aktivität, die bei einzelnen Reaktionen Selektivität aufweisen.

Ihre Anwendung erstreckt sich vom Kracken bis zur Polymerisation und vom Reformieren bis zu der Ammoniaksynthese. Als charakteristisch für ihre wirtschaftliche Bedeutung ist zu bezeichnen, daß nach einer bekannt gewordenen Schätzung [11] in den USA durch die 50prozentige Einführung der Zeolith-Krack-Katalysatoren die Kosten der Benzinerzeugung jährlich um 250 Millionen Dollar herabgesetzt wurden.

Durch die Anwendung der Zeolith-Katalysatoren ändern sich die Technologien der Kohlenwasserstoffverarbeitung; sie ergeben eine andere Produktverteilung und zufolge des höheren Widerstandes Katalysatorengeften gegenüber ist eine geringere Vorreinigung des Einsatzstoffes erforderlich.

Ihre Eigenschaften lassen sich zwischen breiten Grenzen ändern. Einigen Ansichten nach ist ihr Wirkungsmechanismus von den bisher bekannten abweichend, daher erweckt ihre Anwendung ein großes Interesse. Das heimische Interesse wird noch durch den Umstand erhöht, daß Ungarn über eigene Molekularsiebproduktion verfügt. Diese Molekularsiebe besitzen von den ausländischen Produkten abweichende Eigenschaften und lassen dadurch selbständige Lösungsmöglichkeiten zu.

In dieser Veröffentlichungsreihe wird einerseits die Literatur über die Umsetzung von Kohlenwasserstoffen mit kristallinen Aluminosilikaten zusammengefaßt, andererseits werden die Ergebnisse der in diesem Bereich am Lehrstuhl für Chemische Technologie der Technischen Universität Budapest durchgeführten Versuche behandelt.

Um die katalytische Wirkung der Zeolithe näher kennenzulernen sollen vorerst deren wichtigste physikalische und chemische Eigenschaften behandelt werden.

### Struktur, chemische und physikalische Eigenschaften der Zeolithe

Für sämtliche Zeolithe ist kennzeichnend, daß sie aus identischen Strukturelementen aufgebaut sind und durch eine Pyramide veranschaulicht werden können, deren Mittelpunkt durch ein Siliziumatom und die vier Spitzen durch je ein Sauerstoffatom gebildet werden. Alle vier Sauerstoffatome besitzen je eine freie Valenz, mit der sich die Tetraeder verkoppeln können.

Das im Mittelpunkt des Tetraeders sitzende Silizium ist durch ein Aluminiumatom ersetzbar. Das Silizium besitzt aber vier Valenzelektrone, die es mit den an den Spitzen befindlichen Sauerstoffen teilt, während das Aluminium nur drei Valenzelektrone hat. Es muß daher neben dem Aluminium noch ein weiteres Metallion eintreten.

Chemisch sind die Zeolithe Alkali- oder Erdalkali-Metall-Aluminiumsilikate, d. h. auch das Wasser mit berücksichtigt, aus mindestens 4 Komponenten (Alkali- oder Erdalkali-Metall, Aluminium, Silizium, Wasser) aufgebaute Stoffe, gegenüber den herkömmlichen Adsorbentien bzw. Katalysatorträgern wie Aluminiumoxid und Silikagel, welche — auch den Wassergehalt in Rechnung gezogen — nur aus zwei Komponenten bestehen. (Der etwaige Alkaligehalt letzterer ist in dieser Beziehung als Verunreinigung zu betrachten.) Die verschiedenen Zeolitharten enthalten selbstverständlich die obenangeführten Komponenten in verschiedenen Verhältnissen. Es sind zur Zeit etwa 18 synthetische [3, 4] und 40 natürliche [1, 3] Zeolithe bekannt, die nach ihrer Kristallstruktur unterschieden werden; gleichzeitig liegt die Zahl der möglichen Kristallstrukturen um 100 [12]. Während sich das atomare Verhältnis des Silizium- und Aluminiumgehaltes den heutigen Kenntnissen nach

zwischen 1 und 5 ändern kann [1, 13], ist der Alkali- oder Erdalkaligehalt immer eine Funktion des Aluminiumgehaltes. Auf jeden Grammatom Aluminiumgehalt fällt je 1 Grammäquivalent Alkali- oder Erdalkaligehalt [2].

Die Zeolithe werden grundsätzlich in drei Gruppen unterteilt: sie können von

- kettenförmiger (fibrillärer),
- geschichteter oder von
- dreidimensionaler Raumgitterstruktur sein.

In Tabelle 1 sind die Namen und Zusammensetzungen der wichtigsten natürlichen Zeolithe auf Grund der Angaben von BARRER [2] zusammengestellt.

**Tabelle 1**  
Zusammensetzung einiger in der Natur vorkommender Zeolithe

Lfd. Nr.	Benennung	Charakteristische Oxidformel
<i>Mordenit-Gruppe</i>		
1.	Mordenit	$(Ca, K_2, Na_2)O \cdot Al_2O_3 \cdot 10SiO_2 \cdot 6-7H_2O$
2.	Ptilolit	$(Ca, K_2, Na_2)O \cdot Al_2O_3 \cdot 10SiO_2 \cdot 4 H_2O$
3.	Dachiardit	$(Na_2, K_2, Ca)O \cdot Al_2O_3 \cdot 9SiO_2 \cdot 7H_2O$
<i>Faujasit-Gruppe</i>		
4.	Faujasit	$(Na_2Ca)O \cdot Al_2O_3 \cdot 5SiO_2 \cdot 9H_2O$
<i>Heulandit-Gruppe</i>		
5.	Heulandit	$CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 5H_2O$
6.	Klinoptilolit	$(Ca, Na_2, K_2)O \cdot Al_2O_3 \cdot 10SiO_2 \cdot 8H_2O$
7.	Stilbit	$(Na_2Ca)O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 6H_2O$
<i>Analzit-Gruppe</i>		
8.	Analzit	$Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 2H_2O$
<i>Natrolit-Gruppe</i>		
9.	Natrolit	$Na_2O, Al_2O_3 \cdot 3SiO_2 \cdot 2H_2O$
10.	Skolezit	$CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3SiO_2 \cdot 3H_2O$
11.	Thomsonit	$(Na_2, Ca)O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$
<i>Chabasit-Gruppe</i>		
12.	Chabasit	$(Ca, Na_2)O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 6H_2O$
13.	Gmelinit	$(Na_2, Ca)O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 6H_2O$
14.	Lévyinit	$CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3SiO_2 \cdot 5H_2O$
15.	Erionit	$(Ca, Mg, Na_2, K_2)O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 6H_2O$
<i>Phillipsit-Gruppe</i>		
16.	Phillipsit	$(K_2, Ca)O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 4-5H_2O$
17.	Harmotom	$(K_2, Ba)O \cdot Al_2O_3 \cdot 5SiO_2 \cdot 5H_2O$

Die wichtigsten drei Typen der synthetischen Zeolithe sind:

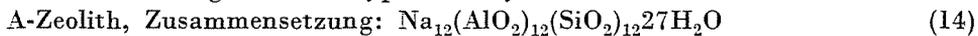


Tabelle 2

Typ	Porendurchmesser	Benennung	Hersteller*	Bemerkung
3 A	3 Å	(LMS) 3 A	I	Verhältnismäßig säurebeständig
		Z-12-k (Microtrap k)	II	
		Bayer S 10	III	
		Zeolox 3 A	IV	
		Zeosorb 3 A	IV	
		Zeosorb Typ 3 A	V	
		Potasit 3	VI	
3,2 Å	(LMS) 3 A-2	I		
	4,5 Å	(LMS) AW-300	I	
4 A		4 Å	(LMS) 4 A	
	Z-12-Na (Microtrap Na)		II	
	Bayer T 10		III	
	Zeosorb 4A		IV	
	ICD-05050-Typ 180		VII	
	Selectosorbon »180«		VIII	
	Siliporite K 10		IX	
	Zeosorb, Typ 4A		V	
	Nalsit 4		VI	
	Molfilit 4 A		X	
	(LMS) 4 A X-H		I	Druckbeständig
	(LMS) 4 A X-H-2		I	Druckbeständig
	(LMS) 4 A XW		I	Von hoher Wasserbindungsfähigkeit
	Klinosorb — 4		XI	Säurebeständig
5 A	5 Å	(LMS) 5 A	I	
		Z-12-Ca (Microtrap Ca)	II	
		Bayer K 10	III	
		Zeosorb 5 A	IV	
		Zeolox 5 A	IV	
		ICD-05050 Typ 436	VII	
		Selectosorbon 436	VIII	
		Siliporite K 20	IX	
		Zeosorb Typ 5 A	V	
		Zeosorb Typ 5 A C	V	
		Zeosorb Typ 5 A M	V	
		Calsit 5	VI	
		Molfilit 5 A	X	
		(LMS) AW-500	I	Säurebeständig bis pH 3

Typ	Porendurchmesser	Benennung	Hersteller*	Bemerkung
10 X	8 Å	(LMS) 10 X	I	
		Zeosorb Typ 10 X	V	
		Calsit 10	VI	
		Molfilit 10 X	X	
13 X	9—10 Å	(LMS) 13 X	I	
		Z-14-Na	II	
		Zeolox X	IV	
		ICD 06060	VII	
		Zeosorb Typ 13 X	V	
		Nalsit 13	VI	
		Molfilit 13 X	X	

\* Bedeutung der in der Spalte »Hersteller« stehenden römischen Ziffern:

- I Linde Air Products Co., USA
- II Davison Chemical Co., USA
- III Farbenfabrik Bayer AG., DBR.
- IV Peter Spence and Sons Ltd., Großbritannien
- V VEB Farbenfabrik Wolfen, DDR
- VI Chemické Závody Juraja Dimitrova, ČSSR
- VII Industrial Chemical and Dye Company, USA
- VIII Silicagel Gesellschaft, DBR
- IX British Ceca Company, Großbritannien—Frankreich
- X Budapesti Vegyiművek, UVR
- XI Reanal Finomvegyszergyár, UVR

Diese Grundtypen werden heute schon in mehreren Varianten erzeugt<sup>7</sup> von den Herstellerfirmen abhängig mit verschiedenen Benennungen. Diese Varianten werden in Tabelle 2 nach ESPE, LHOTSKY und HYBL [17] veranschaulicht.

Weder in dieser Zusammenstellung noch in den übrigen, im Besitz der Verfasser befindlichen Beschreibungen kommen die hinsichtlich der Katalyse besonders interessanten Y-Molekularsieve vor. Zur Herstellung dieser, strukturell den X-Zeolithen ähnlichen, aber im Silizium-Aluminium-Verhältnis abweichenden Produkte werden durch viele Unternehmen Versuche angestellt, in größeren Mengen werden sie jedoch nur von der Fa. Linde unter der Bezeichnung SK vertrieben.

Offensichtlich kann die unterschiedliche katalytische Wirkung der vielen Zeolithenarten schon von den Änderungen der chemischen Zusammensetzung und Kristallstruktur herrühren. Die Variationsmöglichkeiten sind aber noch mannigfaltiger, *einerseits*, weil sich das Silizium-Aluminium-Verhältnis in den einzelnen Zeolithen auch bei gegebener Kristallstruktur ändern kann, wie z. B. bei der Faujasit-Struktur [11], wo ja sogar das Aluminium und

das Silizium mehr oder weniger durch andere Metalle ersetzt werden können [13], *andererseits* weil in den einzelnen Strukturen auch ein Ionenaustausch vor sich gehen kann und die Alkali- und/oder Erdalkali-Kationen durch verschiedene 1—2—3—4-wertige Kationen oder deren Kombinationen ersetzbar sind. Die Zahl der Varianten wird nur dadurch einigermaßen beschränkt, daß die Zeolithe mit höherem Aluminiumgehalt in gewissen Kationenformen nur über eine begrenzte strukturelle Stabilität verfügen [3, 18, 19].

Die Schwermetallionenformen der Zeolithen lassen sich in Wasserstoffstrom bei hoher Temperatur zu atomar verteilten Elementarmetallen reduzieren, wobei das Zeolithskelett wahrscheinlich in Protonenform überführt wird [1, 10, 13, 20, 21]. Den im Zeolithskelett verteilten individuellen Metallatomen werden spezifische Eigenschaften zugeschrieben.

Das chemische Reaktionsvermögen der Zeolithe ist mit dem bisher behandelten Ionenaustausch noch nicht erschöpft. Die Zeolithe mit einem hohen Siliziumgehalt können außer dem Ionenaustausch noch weiteren Umsetzungen unterzogen werden.

Durch Erhitzung der Ammoniak-Form kann — bei Ammoniak- bzw. Ammoniak- und Wasserverlust — die Wasserstoff-Form, oder das sog. entkationisierte Zeolith erzielt werden [10, 13, 21, 26], dessen Rolle in der Katalyse schon heute bedeutend ist.

Es besteht auch die Möglichkeit, das Silizium—Aluminium-Verhältnis in den Zeolithen mit hohem Siliziumgehalt nachträglich zu ändern. Durch warme Säurebehandlung läßt sich das Aluminium und damit der Kationen-gehalt aus diesen Materialien teilweise oder ganz entfernen. Das zurückbleibende Material erweist sich als mehr oder weniger kristallig, und verfügt über eine bedeutende, jedoch nicht unbedingt molekularsiebartige Adsorptionsfähigkeit. Die Wirkung der Säurebehandlung wurde eingehend von BARRER [2, 27] an Klinoptilolit untersucht.

Es ist also offensichtlich, daß Stoffe von zeolithischem Charakter im Gegensatz zu den in der Katalyse bereits früher angewendeten und in der Einleitung schon erwähnten Trägern und aktiven Materialien in unendlich vielen chemischen Zusammensetzungen herstellbar sind. Die Zeolithe eröffnen außerdem auch auf Grund ihrer physikalischen Eigenschaften den Chemikern und Physikern neue Möglichkeiten.

Den früher benützten Materialien gegenüber verfügen zeolithische Molekularsiebe in jedem Falle über eine streng kristallinische Struktur und bei der Kationenform kommt das Aluminium im Gitter nur in einer Tetraederkoordination vor [1, 10, 13, 21].

Zur Klärung der theoretischen Fragen bezüglich der vieldiskutierten katalytischen Rolle des Aluminiums mit verschiedenen Koordinationszahlen ist schon allein dieser Umstand von großer Wichtigkeit, die Kristallstruktur bringt aber noch weitere positive Folgen mit sich.

Zufolge ihrer Kristallstruktur verfügen die Molekularsiebe, bis zu einer relativ hohen Temperatur (etwa 700 °C), im allgemeinen über große Stabilität [1, 13].

Mit einer Sinterung muß im Stabilitätsbereich der Kristallstruktur viel weniger gerechnet werden als im Falle der bisher gebräuchlichen, über hohe freie Energie verfügenden Systeme.

Die Struktur der Molekularsieb-Träger und -Katalysatoren kann infolge des kristallinen Zustands durch eine beliebig vielfache Wiederholung einer gut definierbaren Grundeinheit, der Elementarzellen, dargestellt werden. Deshalb erweist sich hier die Langmuirsche Hypothese in erhöhtem Maße als stichhaltig, wonach die Oberfläche tatsächlich aus einer begrenzten Zahl von identischen Sektionen besteht. Diesem Umstand zufolge besitzen Molekularsieb-Katalysatoren auch von ihrer Molekularsieb-Wirkung unabhängig spezielle selektive Eigenschaften.

Die von der Molekülgröße und/oder Form abhängige, sich aus der Kristallstruktur ergebende spezielle Adsorptionsselektivität der Molekularsiebe — der sie auch ihren Namen verdanken — ermöglicht auch in der Katalyse das Erreichen einzigartig selektiver Wirkungen, z. B. die selektive Umsetzung von n-Kohlenwasserstoffen neben anderen Kohlenwasserstoffen oder die selektive Herstellung von n-Kohlenwasserstoffen bzw. n-Olefinen [8, 10, 13, 28, 30].

Die Kristallstruktur und die bestimmten Porengrößen ermöglichen die Durchführung einzelner Reaktionen ausschließlich an der äußeren Zeolithoberfläche, wodurch deren Rolle bei Eliminierung des Diffusionseffektes studiert werden kann [13].

Charakteristisch für die Molekularsiebe ist, daß sich im Laufe des Ionenaustausches, durch Änderung ihrer chemischen Zusammensetzung und anderer Eigenschaften, auch die Porengrößen bzw. die Molekularsieb-Eigenschaften ändern.

Die für die katalytischen Eigenschaften vorteilhaften Ionenaustausche können die Adsorptionsselektivität sowohl vorteilhaft als auch nachteilig beeinflussen, da ein gegebener Ionenaustausch bei verschiedenen Zeolithen die Porengröße in verschiedenem Sinne und Maße ändern kann. Bekannterweise ist die ausführlich studierte, die Porengröße verändernde Wirkung des Na—Ca-Ionenaustausches [3] auch bei den beiden bekanntesten synthetischen Zeolithen Typ »A« und Typ »X« entgegengesetzt. Bei einer entsprechenden Auswahl der Zeolithstruktur kann durch Ionenaustausch die gleichzeitige und gewünschte Änderung der katalytischen Aktivität und Selektivität erreicht werden.

Schließlich ist zu erwähnen, daß die Zeolithe zufolge ihrer Kationen, im Gegensatz zu den bisher in der Katalyse allgemein gebräuchlichen Materialien mit großer Oberfläche, wie z. B. Aluminiumoxyd, Silikagel, Aktivkohle, auch eine elektrische Leitfähigkeit besitzen [1, 10, 13, 31]. Das Studium der elektri-

schen Eigenschaften wird sicherlich zur Deutung der katalytischen Eigenschaften verhelfen.

### Die Herstellung von Katalysatoren auf Zeolithbasis

Auf Grund der erwähnten chemischen und physikalischen Eigenschaften der Zeolithe ergeben sich zur Herstellung von Kontaktkatalysatoren verschiedenartiger Zusammensetzung mehrere Möglichkeiten.

Angenommen, daß das Zeolithgrundmaterial aus irgendeiner Quelle, z. B. aus dem Handel, bereits zur Verfügung steht, wird die gewünschte Kationenform durch einen geeigneten Ionenaustausch erzielt. Bei der Herstellung von Mehrfunktionsmaterialien ist es zweckmäßig, den Ionenaustausch mit den herkömmlichen Katalysatorerzeugungsmethoden zu kombinieren.

Erwähnenswert ist, daß der Ionenaustausch der Zeolithe in den letzten Jahren eingehend studiert wurde [3, 32–38] und dabei interessante Eigenheiten beobachtet wurden. Die wichtigsten, bisher erkannten Gesetzmäßigkeiten sind in der folgenden Zusammenstellung angeführt:

— Die Geschwindigkeit des Ionenaustausches ist von der Porengröße der Zeolithe stark abhängig.

— Im allgemeinen werden mehrwertige Ione langsamer ausgetauscht als einwertige.

— Bei gleicher Ladung wächst die Austauschgeschwindigkeit im allgemeinen mit dem Atomgewicht.

— Bei der Diffusion einzelner Kationen in bestimmten Zeolithen ergeben sich starke Abweichungen.

— Die Molekularsieb-Zeolithe sind beim Ionenaustausch nicht schwelungsfähig.

— Die Ionenaustauschselektivität der Zeolithe nimmt mit abnehmender Porengröße zu und übersteigt im allgemeinen um mehrere Größenordnungen die Ionenaustauschselektivität der Harze.

— An den Molekularsieb-Zeolithen sind auch Ionensieb-Eigenschaften zu beobachten.

Bei einzelnen Zeolithen können auch spezifische, selektive Austauschwirkungen vorkommen. Zum Ionenaustausch bzw. zur Katalysatorerzeugung werden von den synthetischen Zeolithen aus verständlichen Gründen nicht die für Adsorptionszweck hergestellten, Bindemittel enthaltenden, handelsüblichen Molekularsiebpastillen verwendet, man geht vielmehr von deren Grundmaterial, d. h. vom Endprodukt der Zeolithsynthese, dem chemisch reinen Zeolithmaterial im allgemeinen auf Natriumbasis aus [3, 28, 39, 41]. Dieses besteht meistens aus Zeolithkristallchen von etwa  $10^{-4}$  cm Größe und wird u. a. auch von der Fa. Linde vertrieben. Die Kennwerte des Ionenaustausches

nsid in der Literatur zumeist für dieses Material angegeben [3]. Bei den in der Natur vorkommenden Materialien, z. B. bei Klinoptilolit, beziehen sich die Angaben auf gegebene Kornfraktionen [37, 38].

Bei der Herstellung von Mehrfunktionskatalysatoren bestehen zum Einbau aktiver Metallkomponenten — nach der Fa. Linde [42] — folgende Möglichkeiten:

- Direkte Adsorption der Metaldämpfe in den Molekularsieb-Kristallen.
- Einbau durch Ionenaustausch der Ionen gewünschter Metalle und darauffolgende Reduktion der Ionen.
- Adsorption leichtlöslicher Metallverbindungen und ein nachträglicher Abbau.
- Einbau komplexer Metallaminkatione durch Ionenaustausch und nachträglicher Abbau.

Es wird auch die Möglichkeit einer Impregnaierung erwähnt [12, 43], man betont aber, daß die feinste Dispersion der aktiven Metallkomponente durch den Ionenaustausch gesichert wird.

In engporigen, nicht säurebeständigen, synthetischen Molekularsieben sind in einzelnen neutralen oder nahezu neutralen Medien hauptsächlich nur großmolekulare, komplexe Kationen bildende Edelmetalle, z. B. Platin, am zweckmäßigsten durch Synthese einzubauen [12, 13, 28].

Selbstverständlich ist auch die Eintragung von aktiven Metallkomponenten an reinen Zeolithkristallen am erfolgreichsten durchführbar. Die Pastillierung ist nach der Behandlung auch ohne Bindemittel ausführbar [28, 41, 43]. Die endgültigen Eigenschaften der fertigen Katalysatorpastillen entstehen in der letzten Phase der Herstellung, bei der Aktivierung, wo auch die Entfernung des durch das Zeolith gebundenen Wassers erfolgt [43].

\*

Wegen der großen chemischen Widerstandsfähigkeit und Hitzebeständigkeit der Zeolithe können die Molekularsieb-Katalysatoren theoretisch im gesamten Bereich der heterogenen Katalyse angewandt werden. In den letzten Jahren kommt ihre Verwendung auf voneinander fernliegenden Gebieten der chemischen Industrie in Frage [12, 44].

In den folgenden Beiträgen der Artikelreihe werden die bekanntesten Anwendungsgebiete der Molekularsieb-Katalysatoren in den Kohlenwasserstoff-Umsetzungstechnologien behandelt.

### Zusammenfassung

Verfasser schildern die Bedeutung der kristallinen Aluminosilikate bei der Umsetzung von Kohlenwasserstoffen, wobei im ersten Teil der Artikelreihe der Aufbau, die Arten und die Herstellungsmöglichkeiten der Molekularsieb-Katalysatoren behandelt werden.

