

- [6] R. Busse, A. Mülsch, I. Flemming, M. Hecker, *Circulation* **1993**, im Druck.
- [7] R. F. Furchtgott in *Mechanism of Vasodilatation*, Vol. 4 (Hrsg.: P. M. Vanhoutte), Raven, New York, S. 401–414.
- [8] T. M. Dawson, D. S. Bredt, M. Fotuhi, P. M. Hwang, S. H. Snyder, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **1991**, *88*, 7797–7801.
- [9] V. L. Dawson, T. M. Dawson, E. D. London, D. S. Bredt, S. H. Snyder, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **1991**, *88*, 6368–6371.
- [10] C. F. Nathan, J. B. Hibbs, *Curr. Opin. Immunol.* **1991**, *3*, 65–70.
- [11] D. S. Bredt, P. H. Hwang, Ch. E. Glatt, C. Lowenstein, R. R. Reed, S. H. Snyder, *Nature* **1991**, *351*, 714–718.
- [12] D. S. Bredt, C. Ferris, S. H. Snyder, *J. Biol. Chem.* **1992**, *267*, 10976–10981.
- [13] Jüngste Veröffentlichung hierzu mit dem Titel „Carbon Monoxide: A Putative Neural Messenger“: A. Verma, D. J. Hirsch, C. E. Glatt, G. V. Ronnett, S. H. Snyder, *Science* **1993**, *259*, 381–384.
- [14] E. Coulotta, D. E. Koshland, *Science* **1992**, *258*, 1862–1865.
- [15] T. Malinski, Z. Tada, *Nature* **1992**, *358*, 676–677.

## Heterogene Katalyse – immer noch Kunst oder schon Wissenschaft?\*\*

Von *Robert Schlögl*\*

Technisch-katalytische Vorgänge in Hinblick auf Energieverbrauch und Abfallproduktion zu optimieren wird immer notwendiger. Auch wenn neuere Ergebnisse wegen der hohen Kosten der Anlagen nur langsam umgesetzt werden, handelt es sich um ein sehr forschungsintensives Gebiet mit positiven Zukunftsaussichten. Wissenschaftlich liegt diesen Anstrengungen der Versuch zugrunde, komplexe chemische Reaktionsgeschehen im Detail mechanistisch zu verstehen. Bislang versuchte man die Komplexität solcher Prozesse durch einschränkende Versuchsbedingungen weitgehend zu reduzieren, bis eine befriedigende Beschreibung möglich wurde. Mit diesem Ansatz wurden Einzelaspekte der heterogenen Katalyse bis in die letzten Feinheiten verstanden, und die Zuversicht nahm zu, Gesamtprozesse auf der Basis von in die realen Reaktionsbedingungen extrapolierten Zusammenhängen genau beschreiben zu können. Die Ammoniaksynthese, die Testsynthese der Katalysewissenschaft, ist das bekannteste Beispiel<sup>[1]</sup> für dieses Vorgehen. Hier gelang es, mit einer Kinetik-Theorie die experimentellen Parameter der im Ultrahochvakuum einzeln beobachtbaren Reaktionsteilschritte zu einem Gesamtprozeß zu verbinden und die Parameter der technischen Hochdrucksynthese genau vorherzuberechnen<sup>[2]</sup>.

Leider scheitert dieser Ansatz in allen anderen Fällen bisher in der Praxis, d. h. bis heute wurde kein brauchbarer Katalysator durch Design entwickelt, sondern alle technischen Erfolge beruhen immer noch auf rein empirischem Austesten und erheblichen „Fleißarbeiten“. Dies hat dem Arbeitsgebiet den Ruf eingebracht, keine Wissenschaft, sondern eine „schwarze Kunst“ zu sein. Praktiker sind sehr skeptisch gegenüber induktiv-wissenschaftlichen Ansätzen in der heterogenen Katalyse, denn die Mißerfolge zeigen, daß man hier die Struktur-Wirkungs-Beziehungen bisher nicht richtig versteht.

Ein entscheidendes Hindernis auf dem Weg zum Verständnis der Struktur-Wirkungs-Beziehungen ist die Komplexität

des Feststoffs Katalysator. Wirksame Verbindungen sind Mehrphasensysteme mit stark dynamischem Verhalten bezüglich der Volumen- und Oberflächenstruktur. Diese Dynamik bezieht sich sowohl auf die geometrische Struktur als auch auf die Zusammensetzung und den lokalen elektronischen Zustand<sup>[1]</sup> an einem aktiven Zentrum. Für die Charakterisierung ergeben sich daraus die Forderungen, daß zwischen wichtigen und unwichtigen Komponenten (Aktivkomponente, Träger, Verunreinigungen, Gifte, Promotoren) nicht a priori unterschieden werden soll und daß die Analyse unter Reaktionsbedingungen in-situ zu erfolgen hat. Auf diesen Tatbestand weisen zwar alle einschlägigen Monographien hin<sup>[3]</sup>, aber dennoch werden auch heute noch die meisten Experimente zur Charakterisierung heterogener Katalysatoren nicht unter Reaktionsbedingungen durchgeführt. Der Grund dafür ist, daß nur mit sehr wenigen Techniken solche Untersuchungen möglich sind und daß nahezu kein einziges analytisches Experiment unter vollständig realen Reaktionsbedingungen durchgeführt werden kann.

Daher müssen für derartige Experimente gewisse Einschränkungen bezüglich der Reaktionsbedingungen hingenommen werden. Ein in-situ-Experiment kann wie folgt definiert werden: Die Untersuchung einer Katalysatoreigenschaft wird als Funktion der Reaktionsparameter bei gleichzeitiger Beobachtung der Reaktionskinetik (Umsatz, Selektivität) unter den Bedingungen durchgeführt, die den in der Praxis angewendeten Synthesebedingungen ähneln. Nur dann ist die Charakterisierung wirklich typisch für den aktiven Zustand eines Katalysators, so daß sich Schlüsse auf den Mechanismus einer Reaktion ziehen lassen.

Der Wirkungsmechanismus ist die zentrale Information zum Verständnis eines Katalysators, das wiederum Voraussetzung für den angestrebten induktiv-wissenschaftlichen Weg der Beeinflussung der Katalysatorwirkungsweise ist. Bei der Untersuchung des Katalysators sind jegliche Extrapolationen schlecht, da der Mechanismus einer heterogenen Reaktion von mehreren zentralen, miteinander verketteten Faktoren abhängt (Abb. 1). Kennt man die genaue Verkettung, kennt man die Wirkungsweise des Katalysators. Der Reaktionsmechanismus läßt sich nicht direkt aus Aktivitäts- und Selektivitätsparametern, die durch die formale Kinetik beschrieben werden, ermitteln. Die Kinetik wird durch Chemisorptionsprozesse und durch die Mikrostruktur des Kata-

[\*] Prof. Dr. R. Schlögl

Institut für Anorganische Chemie der Universität  
Niederurseler Hang, D-6000 Frankfurt 50

[\*\*] Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft, der Max-Planck-Gesellschaft und dem Fonds der Chemischen Industrie gefördert. Bedanken möchte ich mich bei den vielen Mitarbeitern der angesprochenen Projekte und bei der Firma BASF (Ludwigshafen) für die langjährige Zusammenarbeit.

lysators bestimmt. Einflüsse von Stoff- und Energietransport und nicht-katalytische Folgereaktionen verschleieren jedoch den direkten Zusammenhang. Die Elementarschritte der Reaktion, die sich zur Mikrokinetik des katalytischen Geschehens zusammensetzen, werden auch durch die Mikrostruktur und die Chemisorptionsvorgänge beeinflußt.

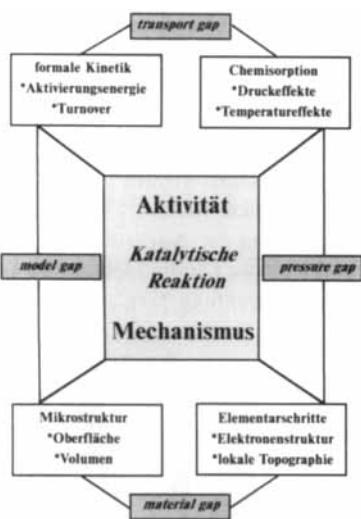


Abb. 1. Zusammenhänge zwischen dem katalytischen Verhalten (Zentrum) eines Festkörpers und den Haupteinflußfaktoren. Die Lücken (gaps) treten durch experimentell notwendige Idealisierungen oder Vereinfachungen auf und gefährden bei unbedachter Extrapolation von Daten des vereinfachten Experiments in bezug auf die eigentlich zu untersuchende katalytische Reaktion alle Aussagen über den zentralen, grau-unterlegten Bereich.

Wird bei einem Katalyseexperiment von dem empirisch ermittelten optimalen Parametern, die als Einflußgrößen auf die vier Faktoren einwirken, abgewichen, entstehen Parameter-Lücken (gaps), die durch Extrapolation ausgeglichen werden müssen. Fehler in der Extrapolation von nur einer Lücke können die gesamte mechanistische Information verfälschen, da alle Faktoren miteinander gekoppelt sind. Dies kann als Hintergrund für das Scheitern der wissenschaftlichen Ansätze in der Katalysatorenentwicklung verstanden werden. Beispielsweise gibt es eine Fülle von Daten über Elementarschritte chemischer Reaktionen auf Einkristallen unter Ultrahochvakuum-Bedingungen, die sich jedoch aufgrund von „pressure gap“ und „material gap“ nicht zur Interpretation einer formalen Kinetik verwenden lassen. Ein berühmtes Beispiel ist die Vorhersage einer scharf definierten Obergrenze der maximalen Selektivität der Epoxidierung von Ethylen mit Sauerstoff, die sich jedoch in der industriellen Praxis überschreiten ließ.

Die Lücken (gaps) in Abbildung 1 gehören zu Versuchsparametern, die alle bei in-situ-Experimenten zu beachten sind. Transport gap beinhaltet die Einflüsse von Masse- und Energietransporteffekten in einer Katalysatorschüttung auf die Kinetik; in einer Festbettsschüttung treten andere Verhältnisse auf als beispielsweise an einem selbsttragenden transparenten Preßling desselben Materials oder gar an einer Einkristalloberfläche. Pressure gap bezieht sich auf den Totaldruck des Experiments; oft wechselt der Mechanismus einer Reaktion im Druckbereich zwischen einigen Millibar und Ultrahochvakuum-Bedingungen<sup>[4]</sup>, da das chemische Potential der Gasphase kritische Schwellen überschreitet. Material

gap<sup>[5]</sup> bezeichnet den Unterschied zwischen wohlgeordneten Einkristallen mit geringer Defektdichte und geringer struktureller Reaktivität sowie realen polykristallinen, verunreinigten Oberflächen mit vielen chemischen und strukturellen Defekten und hoher Reaktivität. Model gap beschreibt dagegen das Problem der Zuordnung von „chemischer Realität“ zu Parametern, die im Laufe der Anpassung eines kinetischen Modells an Aktivitäts-(Selektivitäts-)daten erforderlich wird. Häufig werden Gradienten der spezifischen Aktivität, einer strukturellen Umwandlung oder anderer chemisch-dynamischer Prozesse radial und längs eines Katalysatorbetts zur Beschreibung notwendig, die sich nur schwer experimentell verifizieren lassen.

Um in dieser Situation einen experimentellen Weg beschreiben zu können, wird häufig ein Modellsystem definiert und untersucht. Der Nachteil dieses in Teilbereichen erfolgreichen Konzepts<sup>[6]</sup> besteht darin, daß nur mit erheblichen Schwierigkeiten ein experimenteller Nachweis für den tatsächlichen Modellcharakter des vereinfachten Systems möglich ist.

Fast alle Zusammenhänge, die in Abbildung 1 dargestellt sind, werden in einer bemerkenswerten Studie<sup>[7]</sup>, die Anlaß zu diesem Beitrag war, angeschnitten. Hier geht es um die Entscheidung der Frage, ob bei der katalytischen Hydrierung von CO mit Wasserstoff zu Methanol die aktive Katalysatorfläche aus metallischem oder oxidischem Kupfer besteht. Diese Reaktion wird heute, analog zur Ammoniaksynthese in den vergangenen Jahrzehnten<sup>[8]</sup>, als ein zentrales Thema der Katalyseforschung angesehen. Es ist offensichtlich, daß der Mechanismus dieser Reaktion nicht wissenschaftlich fundiert bearbeitet werden kann, wenn nicht einmal die chemische Natur des aktiven Katalysators zweifelsfrei<sup>[9]</sup> geklärt ist. Ebenso offensichtlich ist die experimentelle Problematik der Durchführung dieser Analyse.

Für diese schwierigen Analysen haben die Autoren eine neue in-situ-Spektroskopie-Methode entwickelt und ihre Resultate mit bekannten Methoden verglichen und halbquantitativ geeicht. Das zentrale Experiment ist eine Variante der Röntgenabsorptionsfeinstruktur-Spektroskopie (EXAFS). Diese wohlbekannte Methode ermöglicht die Bestimmung struktureller Parameter der Nahordnung eines Festkörpers elementspezifisch und unabhängig von der Röntgenkristallinität der Probe. Für Metallatome ist die Röntgenstrahlung hart genug, so daß eine Gasatmosphäre und Fenster durchdrungen werden können, wodurch die Methode für in-situ-Studien an Trägerkatalysatoren prädestiniert ist.

Bei der katalytischen Hydrierung von CO mit Cu-Katalysatoren ließ sich schon anhand der Bindungsabstände eine klare Unterscheidung zwischen metallischem Kupfer und Kupferoxiden treffen, wie auch experimentell gezeigt wurde. Die Untersuchung wurde mit einem realen, polykristallinen Katalysatorpulver durchgeführt unter einem bar Gasbelastung mit der relativen Zusammensetzung, die in der technischen Synthese (bei ca. 60 bar) üblich ist. Die volumenempfindliche Standardmethode zeigt, wie auch die Röntgenbeugung, daß die Katalysatorpartikel aus metallischem Kupfer bestehen. Damit ist jedoch nichts über die Oberfläche, den wesentlichsten Teil des Katalysators, ausgesagt. Durch Verwendung der Emissionsintensität sekundärer Photoelektronen, die beim Absorptionsprozeß entstehen, als Detektionsignal für die Röntgenabsorption – anstelle der

üblichen Direktbeobachtung der transmittierten oder der Fluoreszenzphotonen – wurde die Methode oberflächenempfindlich gemacht (einige Atomlagen statt einige Mikrometer als Informationstiefe). Überzeugend wurde gezeigt, daß sich auch so kein Hinweis auf einen nennenswerten Kupferoxidanteil in der Oberfläche ergibt.

Damit wäre die Grundsatzfrage nach der Natur des Katalysators experimentell geklärt, hätten die Autoren nicht einen wesentlichen Punkt eines *in-situ*-Experiments übersehen. Die gesamte Arbeit charakterisiert einen (beliebigen) Zustand des Katalysators unter einem bar Druck des Synthesegasgemischs. Die Autoren versäumten jedoch den Nachweis zu erbringen, daß es sich um den *aktiven* Zustand des Katalysators handelte. Die oben gemachten Aussagen über die Komplexität eines Katalysators lassen diese Frage nicht als trivial erscheinen. Oft beobachtet man beispielsweise, daß die oberste Schicht einer Katalysatorschüttung inaktiv ist, weil sie die Verunreinigungen der Eduktgase aufnimmt und von Katalysatorgiften geschädigt ist. Im geschilderten Experiment wurde nur eine oberste Lage eines simulierten Katalysatorbetts studiert. Es erfolgte jedoch keine Angabe über die Reinheit der Gase und die Effekte der Zelle und der Schüttung (Differential-Durchflußreaktor) auf die Aktivität des Katalysators. Somit ist die Arbeit kein echtes *in-situ*-Experiment, und die Frage nach der Natur der aktiven Phase bleibt weiter offen für Kontroversen.

Es erhebt sich die Frage nach anderen Methoden, die katalysebezogene Informationen liefern. Eine manchmal geeignete *in-situ*-Methode sind instationäre Umsatzexperimente, bei denen das katalytische Verhalten als Funktion einer mit definiertem Zeitprofil veränderten Prozeßvariablen beobachtet wird. Ein Beispiel sind Speicherexperimente für atomaren Stickstoff in der technischen Ammoniaksynthese<sup>[10]</sup>, deren Interpretation freilich nur aufgrund der guten Kenntnis der Oberflächenchemie von Eisen<sup>[11]</sup> gelang.

Die Gewinnung solch detaillierter chemischer Informationen als Voraussetzung für die Analyse katalytischer Verhaltensmuster setzt den Einsatz mehrfach komplementärer Verfahren voraus. Nur dadurch können gravierende Fehlinterpretationen, die sich als Widersprüche im eigenen Datensatz zeigen, vermieden werden. Ein Beispiel für die fehlerhafte Überinterpretation einer einzelnen Methode ist die Parakristallinitätstheorie. Röntgenbeugungsexperimente<sup>[12]</sup> an aktivierte Katalysatoren für die Ammoniaksynthese zeigen charakteristische Linienprofilverbreiterungen, die mit der molekularen Dispersion von Promotoroxiden im Eisenmetall und der davon ausgehenden katalytischen Effizienz direkt korreliert wurden. Heute weiß man<sup>[13]</sup>, daß die Linienverbreiterung von kristallographischen Effekten, die zwar schon lange bekannt sind, aber in der ursprünglichen Theorie nicht berücksichtigt wurden, hervorgerufen wird und daß kein direkter Zusammenhang zwischen dieser Feinstruktur des aktiven Katalysators und der katalytischen Aktivität besteht. Ein weiteres Beispiel für unzutreffende Daten aus einem *in-situ*-Experiment zur Strukturaufklärung des aktiven Ammoniaksynthekatalysators entstand dadurch, daß nach einer ungeeigneten Aktivierung ein röntgenamorphes Produkt gefunden wurde<sup>[14]</sup>, das ohne Bestimmung der katalytischen Aktivität für das typische Katalysatormaterial gehalten wurde. Heute ist bekannt<sup>[10]</sup>, daß der aktive Katalysator aus hochorientierten, kristallinen Eisenteilchen besteht.

Entsprechend den in Abbildung 1 gezeigten Zusammenhängen ist auch eine detaillierte Mikrostrukturanalyse eines aktiven Katalysators nicht ausreichend für eine Funktionsanalyse. Oberflächeninformationen sind unerlässlich, leider können diese aufgrund der Physik der informationsübertragenden Teilchen (Photoelektronen, Ionen, Atome) nur im Hochvakuum gesammelt und somit niemals wirklich *in situ* erhoben werden. Eine bestmögliche Lösung dieses Dilemmas besteht in der Kombination eines realistisch ausgelegten Hochdruckreaktors mit einem oberflächenanalytischen Gerät. Durch geeigneten Aufbau des Transfersystems vom Hochdruckteil ins Ultrahochvakuum kann ein Einfrieren der Oberflächenstruktur des Katalysators (freilich ohne die adsorbierten, aber naturgemäß flüchtigen Edukt- und Produktmoleküle) erreicht und verifiziert werden<sup>[15]</sup>. Ein Anwendungsbeispiel zur Untersuchung der Natur der aktiven Phase<sup>[16]</sup> eines Eisenoxidkatalysators für die Dehydrierung von Ethylbenzol zu Styrol zeigt Abbildung 2. In einer Theo-

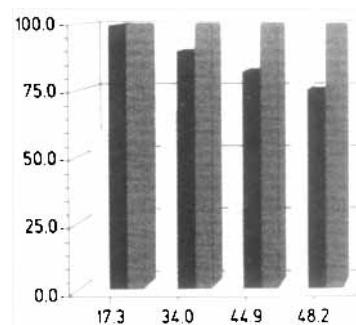


Abb. 2. Quantitative XPS-Oberflächenanalysen eines aktiven Eisenoxidkatalysators als Funktion des Umsatzes von Ethylbenzol zu Styrol. Der Umsatz wurde unter technischen Bedingungen (873–893 K, 6:1-Mischung Wasser:Ethylbenzol, 1 bar Gesamtdruck, LHSV (liquid hourly space velocity)  $0.5 \text{ L h}^{-1}$ ) bestimmt, die Oberflächenanalytik erfolgte im Ultrahochvakuum. Alle absoluten Zahlen wurden zur Basis 100 relativiert. x-Achse: Umsatz von Ethylbenzol in %. y-Achse: spektroskopische Eigenschaften in willkürlichen Einheiten. Hell-punktierte Säulen = C:Fe-Anteil; dunkel-punktierte Säulen = K:Fe-Verhältnis; schwarze Säulen = OH<sup>-</sup>-Anteil.

rie zur Funktionsweise des notwendigerweise mit Kalium promovierten Katalysators wurde unter anderem gefolgt<sup>[17]</sup>, daß die Aktivität mit zunehmender Bedeckung der Oberfläche mit Kalium steigt und mit zunehmender Bedeckung der Oberfläche mit Kohlenstoff (aus den Produkten) wieder fällt. Betrachtet man Abbildung 2, so erkennt man, daß beide Aussagen nach XPS-Oberflächenanalysen<sup>[18]</sup>, die an stationär arbeitenden Katalysatoren unterschiedlicher Umsatzgrade durchgeführt wurden, nicht zutreffen. Deutlich dagegen korreliert der steigende Umsatz mit der abnehmenden Bedeckung an OH<sup>-</sup>-Ionen, die ein Zeichen für das Vorhandensein von freiem KOH sind. Dieses entsteht als Abbauprodukt der aktiven Katalysatorphase KFeO<sub>2</sub><sup>[16]</sup>. Es sei angemerkt, daß eine Reihe von Promotoren, die zur Verbesserung der Selektivität und Stabilität dem Katalysator zugesetzt werden, in nicht nennenswerter Weise an der Oberfläche nachweisbar sind oder in ihrer Oberflächenkonzentration nicht mit dem beobachteten Katalysatorverhalten korrelieren. Dieses Beispiel zeigt deutlich den Wert einer *in-situ*-Messung, die als Funktion des Katalysatorverhaltens durchgeführt wird. Ihre Aussagen ließen sich durch eine Anzahl komplementärer Experimente verifizieren<sup>[16]</sup>.

Versucht man vor diesem Hintergrund die Titelfrage zu beantworten, so bleibt gegenwärtig nur die realistische Feststellung – immer noch Kunst. Die Probleme auf dem Weg zu einem oben skizzierten, ganzheitlichen Begreifen eines heterogenen Katalysators sind enorm. Aber die häufiger werdenden Versuche zu deren Lösung und die ideenreichen neuen Experimente ermöglichen langsam ein analytisches Eindringen in die Katalysatorkunst. Die Katalysatorforschung ist heute in den embryonalen Stadien einer Wissenschaft, in der sie zunehmend von den Kenntnissen von Oberflächenphysik, Festkörperchemie und Reaktionstechnik in rational rekonstruierbarer Weise profitieren kann.

- [1] G. Ertl, *Angew. Chem.* **1990**, *102*, 1258; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1990**, *29*, 1219.
- [2] P. Stoltze, *Phys. Scr.* **1987**, *36*, 824.
- [3] *Characterisation of Catalysts* (Hrsg.: J. M. Thomas, R. M. Lambert), Wiley, New York, **1980**; J. R. Anderson, K. C. Pratt, *Introduction to Characterization and Testing of Catalysts*, Academic Press, **1985**; *Characterization of Heterogeneous Catalysts* (Hrsg.: F. Delannay), Dekker, New York, **1984**.
- [4] C. Rehren, M. Muhler, X. Bao, R. Schlögl, G. Ertl, *Z. Phys. Chem.* **1991**, *174*, 11.
- [5] R. Schlögl, R. C. Schoonmaker, M. Muhler, G. Ertl, *Catal. Lett.* **1988**, *1*, 237.

- [6] Siehe beispielsweise: D. R. Strongin, G. A. Somorjai in *Catalytic Ammonia Synthesis* (Hrsg.: J. R. Jennings), Plenum, New York, **1991**, S. 133; G. A. Somorjai, *Chemistry in Two Dimensions*, Cornell University Press, Ithaca, **1981**.
- [7] G. T. Moggridge, T. Rayment, R. M. Ormerod, M. A. Morris, R. M. Lambert, *Nature* **1992**, *358*, 658.
- [8] G. Ertl, *J. Vac. Sci. Technol. A* **1983**, *1*, 1247; A. Ozaki, K. Aika in *Catalysis, Science and Engineering*, Vol. 1 (Hrsg.: J. R. Anderson, M. Boudart), Springer, Berlin, **1981**, S. 88.
- [9] B. S. Clausen, *J. Catal.* **1991**, *132*, 524; G. C. Chircen, M. S. Spencer, K. Waugh, D. A. Whan, *J. Chem. Soc. Faraday Trans. 1* **1987**, *83*, 2193.
- [10] W. Mahdi, J. Schütze, G. Weinberg, R. Schoonmaker, R. Schlögl, G. Ertl, *Catal. Lett.* **1991**, *11*, 19.
- [11] F. Bozso, G. Ertl, M. Weiss, *J. Catal.* **1977**, *50*, 519.
- [12] R. Hosemann, A. Prisinger, W. Vogel, *Ber. BunsenGes. Phys. Chem.* **1966**, *70*, 797.
- [13] W. S. Borghard, M. Boudart, *J. Catal.* **1983**, *80*, 194.
- [14] T. Rayment, R. Schlögl, J. M. Thomas, G. Ertl, *Nature* **1985**, *315*, 311.
- [15] M. Muhler, R. Schlögl, S. Eder, G. Ertl, *Surf. Sci.* **1987**, *189*, 69.
- [16] M. Muhler, R. Schlögl, A. Reller, G. Ertl, *Catal. Lett.* **1989**, *2*, 201; M. Muhler, R. Schlögl, G. Ertl, *SIA Surf. Interface Anal.* **1988**, *12*, 233; M. Muhler, J. Schütze, M. Wesemann, T. Rayment, A. Dent, R. Schlögl, G. Ertl, *J. Catal.* **1990**, *128*, 339.
- [17] D. Mross, *Catal. Rev. Sci. Eng.* **1983**, *25*, 591; W. Mross in *DECHEMA Statusseminar Fortschritte der Katalyseforschung*, **1987**, S. 173.
- [18] C-Anteil: Integral der C-1s-Linie, K:Fe-Verhältnis: Verhältnisse der um die Wirkungsquerschnitte korrigierten Integrale unter den K-2p- und Fe-2p-Linien, OH-Anteil: relativer Flächenanteil der OH-Emission im O-1s-Spektrum bei 531.7 eV relativ zur Emission der Metalloxide bei 529.9 eV.

... meine  
**ANGEWANDTE**  
**CHEMIE**  
 gehört <sup>zu</sup> mir !

Hans-Wilhelm G., Dr., Habilitand,  
 nach der Lektüre seines persönlichen  
 Exemplars der **ANGEWANDTEN** im  
 kreativen Aufschwung

Bestellen auch Sie gleich Ihr  
 persönliches Abonnement der *Angewandten*!  
 Anruf beim VCH-Leserservice genügt:  
 0 62 01/ 606-199 (Fax -117).