

Lichtinduzierte Herstellung von Wasserstoff in Wasser mit TiO_2 und anderen Photokatalysatoren: Gibt es einen einfachen Weg hin zu einer Normierung der katalytischen Verfahren?

Thomas Maschmeyer* und Michel Che

Diffusion · Photokatalyse · Titandioxid ·
Wasserspaltung · Wasserstoff

Einleitung

Ein sinnvoller Vergleich von Materialien, die bei der photokatalytischen Erzeugung von Wasserstoff in Wasser zum Einsatz kommen, ist derzeit kaum möglich, da es an standardisierten Methoden mangelt, was wiederum der Entwicklung auf diesem Gebiet sehr hinderlich ist. Aufgrund der Bedeutung von Wasserstoff für die künftige Wirtschaft und angesichts der zunehmenden Sorgen in der Gesellschaft hinsichtlich Umweltproblemen ist die Produktion von Wasserstoff eine zentrale Herausforderung.^[1] Seit der Entdeckung der elektrochemischen Photolyse von Wasser an Halbleiterelektrodenoberflächen (TiO_2) durch Fujishima und Honda^[2] wurde versucht, das Verständnis der an der Wasserspaltung beteiligten Prozesse stetig zu verbessern.^[3,4] Die dabei gewonnenen Erkenntnisse dienen wiederum dazu, verbesserte oxidische,^[5] aber auch nichtoxidische katalytische Systeme^[6] vorzuschlagen, die vor allem im Bereich des sichtbaren Lichts wirksam sind.

Die Vielfalt, in der Messergebnisse für unterschiedlichste Kombinationen aus photokatalytischem System, Reaktionsbedingungen, Reaktoreigenschaften und Bestrahlungsmöglichkeiten vorgestellt werden, macht es allerdings so gut wie unmöglich, die Eigenschaften der eigentlich katalytisch wirksamen Materialien zu vergleichen. Dies gilt nicht nur für die Arbeiten verschiedener Gruppen, sondern selbst Publikationen der gleichen Gruppe können manchmal in diese Kategorie fallen.

Wir wollen hier einen Weg vorschlagen, die Leistungsfähigkeit von Festkörperphotokatalysatoren so zu beurteilen, dass ein Vergleich möglichst einfach und unabhängig davon, ob eine Opferlösung verwendet wurde oder nicht, möglich ist.

Da das zusätzliche chemische Potential einer etwaigen Opferlösung vom verwendeten katalytischen System unabhängig ist, bleiben die Unterschiede in der photokatalytischen Leistungsfähigkeit aussagekräftig. Die Katalysatoren können sich allerdings in der Fähigkeit unterscheiden, das chemische Potential zu erschließen; dies lässt sich mit der scheinbaren Quantenausbeute (apparent quantum yield (AQY)) beschreiben (siehe unten).

Die Herausforderung ähnelt der, der sich die Wissenschaftler in den 1960er Jahren bei der Forschung an Metallkatalysatoren gegenübersehen. 1960 schlugen Spenadel und Boudart vor, die Chemisorption von Wasserstoff zu nutzen, um die spezifische Oberfläche von Platin auf einem Aluminiumoxidträger in einem Dispersionsbereich zu bestimmen, der nicht der Untersuchung anhand von Röntgenlinienverbreiterungen zugänglich war.^[7] Diese Idee wurde kontinuierlich weiterentwickelt, und am Ende konnte eine neue Methode zur Messung von Metalloberflächen vorgestellt werden, die Wasserstoff-Sauerstoff-Titration. Bei dieser Methode wird bei Raumtemperatur die Reaktion von Sauerstoff, der auf der Oberfläche von trägerfixierten und nicht trägerfixierten Platinkatalysatoren adsorbiert ist, mit Wasserstoff untersucht.^[8] Diese Methode brachte den Durchbruch in der Entwicklung von Metallkatalysatoren auf oxidischen Trägern.

Ogleich es viele Fortschritte beim Versuch gab, die Vorgänge bei der lichtinduzierten Erzeugung von Wasserstoff in Wasser besser zu verstehen, vor allem in den letzten Jahren mit der Einführung von anspruchsvollen Mehrkomponentenoxiden (mit und ohne Opferlösung),^[9–13] ist die Literatur bezüglich der katalytischen Aspekte der Reaktion sehr verwirrend. Insbesondere der quantitative Vergleich von katalytischen Systemen ist kaum möglich. Im Folgenden möchten wir auf einige wichtige Probleme hinweisen, die gelöst werden müssen, um einen besseren Vergleich photokatalytischer Leistungsfähigkeiten zu ermöglichen, als es gegenwärtig der Fall ist.

[*] Prof. Dr. T. Maschmeyer
School of Chemistry, F-11, The University of Sydney
Sydney, NSW 2006 (Australien)
E-Mail: th.maschmeyer@chem.usyd.edu.au

Prof. Dr. M. Che
Laboratoire de Réactivité de Surface, UMR 7197-CNRS
Institut Universitaire de France et Université Pierre et Marie Curie
Paris 6 (Frankreich)

Katalysekontext

Als Erstes gilt festzuhalten, dass die Definition der aktiven Zentren in einem heterogenen photokatalytischen System keine triviale Angelegenheit ist. Angesichts der Vielzahl an Prozessen, die in einem solchen System auftreten und zur Produktion von Wasserstoff und Sauerstoff beitragen (Abbildung 1), stellt sich die Frage, ob es überhaupt sinnvoll ist, eine einzige aktive Spezies zu definieren.

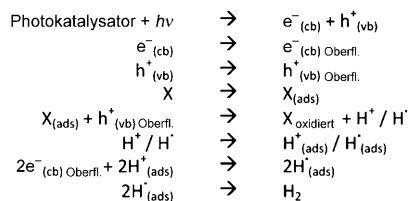


Abbildung 1. Eine charakteristische, wenn auch unvollständige Zusammenstellung der Prozesse, die bei der photokatalytischen Erzeugung von Wasserstoff mit oder ohne Opferlösung ablaufen. cb = Leitungsband, vb = Valenzband, X = oxidierbare Spezies, e^- = Photoelektron, h^+ = Loch.

In einer ersten Näherung könnte man ein solches katalytisches System wie folgt beschreiben: Ein Photon erreicht die Katalysatoroberfläche, nachdem es durch die Reaktorwand und das die Katalysepartikel umgebende Wasser getreten ist. Dort induziert es eine Photoanregung, die ein Photoelektron und das entsprechende Loch erzeugt (natürlich löst nicht jedes Photon, das auf den Katalysator trifft, eine solche Reaktion aus). Die meisten dieser Elektron/Loch-Paare werden sofort rekombinieren, einige wenige werden jedoch durch den Katalysator diffundieren und an der Grenzfläche mit oxidierbaren Molekülen (Opferlösung und/oder Wasser) reagieren. In einigen Fällen werden diese Interaktionen zu Redoxreaktionen führen, bei denen z. B. Wasser durch ein photoneninduziertes Loch oxidiert wird, was zur Bildung von Sauerstoff und Protonen führt. Letztere werden anschließend durch das vorhandene Photoelektron zu Wasserstoff redu-

ziert. Cokatalysatoren unterstützen diese Redoxreaktionen merklich, z. B. wird Platin von mehreren Gruppen mit Erfolg eingesetzt.

Es ist offenkundig, dass der Stofftransport (Substratadsorption und Produktdesorption, Diffusion im Allgemeinen) und photoelektronische Ereignisse (Elektron/Loch-Rekombination etc.) bei der Bestimmung aktiver Spezies unbedingt berücksichtigt werden müssen. Tatsächlich ist es besser, von einer Abfolge gekoppelter Reaktionen zu sprechen, bei denen eine Vielzahl an aktiven Zentren zusammenwirkt – also, von einem Kaskadenreaktionssystem.

Auf dem Weg zu einer Normierung

Da es inhärent schwierig ist, die Leistungen der aktiven Zentren isoliert zu betrachten und die diversen die Photonik und den Stoffaustausch betreffenden Effekte zu untersuchen, stehen Forscher vor einer komplexen Aufgabe, wenn sie experimentelle Daten präsentieren wollen. So ist eine Umsatzberechnung, die auf der Zahl der aktiven Zentren beruht, für die meisten Systeme nur von begrenztem Wert, da es keine saubere Definition des aktiven Zentrums gibt und damit logischerweise auch die Zahl solcher Zentren nicht klar ist (anders ist die Lage bei den sauren Zentren in Zeolithen).

Daher möchten wir hier einen systemischen Ansatz vorschlagen, d. h. einen Ansatz, der erst gar nicht versucht, die aktiven Zentren als solche zu bestimmen, sondern der die Gesamtleistung des katalytischen Systems im Blick hat, die wiederum von anderen Arbeitsgruppen einfach überprüft und reproduziert werden kann. Der Schlüssel zum Erfolg liegt in den seit langem etablierten Methoden aus dem Bereich der heterogenen Katalyse.^[18]

Bei einem solchen Ansatz wird der komplette Reaktor als katalytischer Raum betrachtet: Photonen und Wasser/Opferlösung kommen hinein – Wasserstoff kommt heraus (Abbildung 2). Die gleichen Überlegungen gelten im Prinzip auch für Sauerstoff, sodass dieser hier nicht detailliert behandelt werden muss. Obwohl sehr einfach gehalten, erlaubt dieser Ansatz sinnvolle Vergleiche und die Bewertung unterschiedlicher Materialien. Hierfür braucht man nicht zwischen der „wahren Wasserspaltung“, der Entstehung von Wasserstoff und Sauerstoff im Verhältnis $2H_2:1O_2$, und der „Wasserstofferzeugung“, die sich durch den Zusatz von Opferreagentien auszeichnet, zu differenzieren. Selbstverständlich werden sich die scheinbaren Quantenausbeuten deutlich unterscheiden, je nachdem ob Opferreagentien eingesetzt wurden oder nicht. Das Ziel unseres Ansatzes ist es jedoch, verwandte Systeme sinnvoll vergleichen zu können, was möglich wird, wenn alle experimentellen Details einbezogen werden – ganz gleich, ob Opferreagentien verwendet wurden oder nicht.

Jetzt können wir Begriffe wie Umsatzgeschwindigkeit verwenden und auch die scheinbare Quantenausbeute herleiten, die ein Maß für die Effektivität ist, mit der unter gegebenen Bedingungen eingespeiste Photonen für die Produktion von Wasserstoff genutzt werden.

Es mag auf den ersten Blick sinnvoll scheinen, eine dreidimensionale Darstellung zu entwickeln, in der die Kataly-



Thomas Maschmeyer wurde 1966 in Hamburg geboren. Er promovierte an der University of Sydney und forschte anschließend in London und Cambridge. Nach einem Aufenthalt als Professor, Fachbereichsleiter und stellvertretender Vorsitzender des Delfter Instituts für chemische Technologie kehrte er 2003 als ARC Federation Fellow nach Australien zurück, wo ihm vor kurzem ein ARC Future Fellowship verliehen wurde. Er ist einer der Gründer und Direktoren der Firma Ignite Energy Resources, einer Energie- und Treibstoff-Firma, deren Ziel es ist,

mit „kleinem Kohlenstoff-Fußabdruck“ auszukommen. Weiterhin ist er Mitglied der Herausgebergremien von fünf internationalen Zeitschriften, Präsident der Katalysegesellschaft Australiens und Berater vieler Regierungsorgane und Firmen. 2007 erhielt er den Le-Fèvre-Preis der australischen Akademie der Wissenschaften für herausragende chemische Grundlagenforschung eines Wissenschaftlers von unter 40 Jahren.

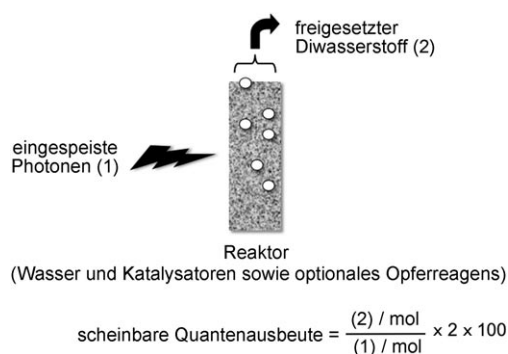


Abbildung 2. Ein simples Modell des Reaktionssystems, das einen einfachen Vergleich von Katalysatoren ermöglicht. Hierbei werden komplizierte Reaktionssequenzen ignoriert, und man konzentriert sich der Einfachheit halber auf die Molzahl eingespeister Photonen und die Molzahl freigesetzten Diwasserstoffs. Weitere experimentelle Details, z. B. die Verwendung von Trägergas oder leichtem Vakuum oder von beiden zusammen zum Auffangen des erzeugten Wasserstoffs, können leicht von anderen Arbeitsgruppen reproduziert werden, und es ist daher nicht notwendig, hier darauf einzugehen. Der Faktor 2 in der Definition der scheinbaren Quantenausbeute resultiert aus der Tatsache, dass die Erzeugung von einem Mol Wasserstoff zwei Mol Elektronen erfordert.

satorbeladung gegen die scheinbare Quantenausbeute und die Photoneneinstrahlungsintensität aufgetragen ist, doch ist das unserer Ansicht nach für eine erste Untersuchung/Einordnung eine unnötige Erschwernis, und es ist wesentlich praktischer, die natürliche Sonnenlichteinstrahlungsintensität als ersten Bezugspunkt zu verwenden, denn schließlich ist das Sonnenlicht der bedeutsamste Photonenzustrom. Daher setzt man am einfachsten Tageslichtsimulatoren ein, die kommerziell erhältlich sind. Es müssen jedoch auch immer das Reaktordesign und die gewählten Spektralfenster berücksichtigt sowie der Photonenzustrom bestimmt werden. Aus diesem Grund genügt es nicht, Messungen außerhalb des eigentlichen Reaktors (z. B. mit einer Photodiode) durchzuführen, sondern es muss die tatsächliche Menge an im Reaktor eintreffenden Photonen bestimmt werden. Die einfachste Form, eine solche Messung durchzuführen und reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, ist die Aktinometrie (von der IUPAC standardisiert^[19,20]). Hierbei müssen allerdings die Befunde von Schiavello et al.^[21] berücksichtigt werden, nach denen es bei trägerfixierten Katalysatoren entscheidend ist, das Trägermaterial mit der Aktinometer-Testlösung aufzuschlämmen, um den Einfluss durch Lichtstreuung auszuschließen. Ein zusätzlicher Vorteil dieses Verfahrens ist, dass Flussdifferenzen aufgrund des Reaktordesigns (spiegelnde Oberflächen etc.) und der Streuwinkel keine Rolle spielen, weil nur die Photonen im Innern des Reaktors erfasst werden.

Die Definition der scheinbaren Quantenausbeute ist in Abbildung 2 gegeben. Mit ihr können verschiedene Photokatalysatoren verglichen und in eine Reihenfolge gebracht werden. Des Weiteren lässt sich die Effektivität einer bestimmten Reaktorkonfiguration beurteilen, indem ein Standardphotokatalysator (z. B. platinisiertes Degussa-P25-Titan-dioxid oder CdS) eingesetzt wird. Es ist zudem möglich, die Umsatzgeschwindigkeit in Mol Wasserstoff pro Stunde und pro Gramm Katalysator oder pro Stunde und pro Quadrat-

meter Katalysatoroberfläche auszudrücken, wobei unter Katalysator zunächst der Einfachheit halber das komplette System, d. h. Träger und aktive Zentren, verstanden wird. Wesentlich ist zudem, dass – eine ausreichende Charakterisierung des Katalysators vorausgesetzt – die Einheiten der Umsatzgeschwindigkeit ineinander überführt werden können. Bei sehr sorgfältiger Charakterisierung sind sogar noch weitere Einheiten möglich (z. B. Mol Wasserstoff pro Stunde und Zahl der Kantenpunkte).

Die Produktion von Wasserstoff in der Einheit mols^{-1} anzugeben ist sicherlich in Forschungsgebieten wie der Spektroskopie (Laserpulseexperimente) sinnvoll, doch solange keine einheitlichen Reaktoren, Katalysatorbeladungen und Reaktionsbedingungen gewählt werden, können die erhaltenen Messwerte nicht ohne Weiteres von einem Katalysator auf einen anderen übertragen werden, geschweige denn von Arbeitsgruppe zu Arbeitsgruppe. Diese Einheit ist darüber hinaus nur von geringem Nutzen, wenn man die Anforderungen an ein praxistaugliches Gerät abschätzen möchte, was jedoch ab einem bestimmten Entwicklungsstand das eigentliche Ziel sein sollte. Aus diesem Grund sollte auch die Katalysatorstabilität beschrieben werden, wofür sich beispielsweise ein über 24 h erstelltes Aktivitätsprofil eignet.

Doch auch die soeben vorgestellte Methode ist unzureichend, denn die Menge an verwendetem Katalysator und die Intensität des eingesetzten Lichts wirken sich erheblich auf die scheinbare Leistungsfähigkeit des Katalysatorsystems aus. Wird trotz homöopathischer Menge eines Katalysators eine Wasserstoffentwicklung beobachtet (möglicherweise wegen eines Messfehlers oder teilweiser Zersetzung des Opfermaterials), dann ergibt sich daraus eine viel zu hohe Menge an produziertem Wasserstoff pro Gramm Katalysator. Ebenso kann es bei sehr intensiver Lichteinstrahlung passieren, dass die scheinbare Reaktivität übermäßig ansteigt. Und will man eine sehr gute scheinbare Quantenausbeute erreichen, wählt man häufig eine geringe Lichteinstrahlung und/oder eine sehr hohe Katalysatorbeladung, um die Photonenaufnahme-Effizienz des Systems zu maximieren, die wiederum von den gewählten Einheiten abhängig ist, mit denen man seine Daten publiziert. Diese unterschiedlichen Auswahlkriterien machen es zuweilen fast unmöglich, Katalysatoren aus der Literatur zu vergleichen oder zu klassifizieren, was wiederum den Fortschritt in diesem sehr aktuellen und wichtigen Forschungsgebiet bremst.

Ein einfacher Weg, diese Probleme zu umgehen, ist, sich bei der Planung der Experimente an den Prinzipien der heterogenen Katalyse zu orientieren, d. h., folgende Punkte zu beachten:

- 1) Die Lichteinstrahlung muss mit ihrem Spektrum und ihrer Intensität ein wirklichkeitsnahes natürliches System widerspiegeln, d. h., sie sollte dem Sonnenlicht vergleichbar sein. Es gibt mehrere Möglichkeiten, solch ein System zu erhalten. Die einfachste und zugleich am leichtesten zu reproduzierende und somit praktischste (und flexibelste) Untersuchungsmethode ist die Verwendung einer Quecksilberdampfampe zusammen mit einem passenden wassergekühlten Sperrfilter (z. B. für die Wellenlängen 305, 395, 430 oder 495 nm). Etwas anspruchsvoller ist der Einsatz eines kommerziell erhältlichen Lichtsimulators,

der mit einer Xenonlampe, einem Monochromatorkristall und einem Filtersystem ausgestattet ist und das in den Referenztabelle definierte Sonnenlichtspektrum wiedergibt.^[22,23] In beiden Fällen sollte der Photonenfluss dem entsprechen, den man erhält, wenn man nichtkonzentriertes Sonnenlicht direkt verwendet.

- Die Untersuchungen müssen unter gut definierten Temperatur- und Druckbedingungen durchgeführt werden (z. B. wassergekühlter Reaktor bei 25 °C und Atmosphärendruck).
- Es muss zwingend belegt werden, dass man nicht in einem diffusionsbegrenzten System arbeitet.

Bei heterogener Katalyse in Aufschlämmungen gilt, dass unter allen Reaktionsbedingungen (Temperatur, Druck, Konzentrationen etc.) eine Verdopplung der Katalysatormenge auch zu einer Verdopplung der Produktmenge führen sollte. Wenn dies nicht der Fall ist, verhindert „etwas“, dass $A + B$ mit der gleichen Effektivität zu C reagiert wie in Gegenwart von weniger Katalysator. Diffusion zu und von den aktiven Zentren ist dieses „Etwas“. Wir wollen hier nicht weiter ins Detail gehen und alle Varianten besprechen, die zu einer Diffusionshemmung führen können, da es systemabhängige und für jeden Katalysator sehr spezifische sind. Jedenfalls lässt sich leicht feststellen, ob ein System diffusionsbegrenzt ist oder nicht (Abbildung 3): Man verdoppelt die Katalysatormenge im Reaktor und bestimmt die Menge an Reaktionsprodukt sowie – im aktuellen Kontext – die scheinbare Quantenausbeute; beide sollten sich verdoppelt haben. Der Punkt, ab dem der Graph vom linearen Verlauf abweicht, markiert die Katalysatorbeladung, unterhalb derer Informationen über die Katalysatoraktivität des Systems ge-

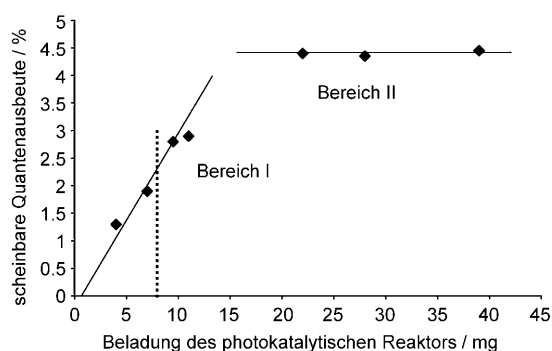


Abbildung 3. Ein typisches Beispiel für das Basislinienverhalten aus unseren Arbeitsgruppen zeigt die scheinbare Quantenausbeute von schon sehr lange bekanntem platinisiertem CdS auf Siliciumdioxid (10 Gew.-% CdS auf SiO_2 , 2 Gew.-% Pt bezogen auf CdS in 50 mL einer wässrigen Lösung von 0.35 M Na_2SO_3 und 0.24 M Na_2S) als Funktion der Beladung mit dem Photokatalysator. Die Strahlung passierte hierbei einen 395-nm-Sperrfilter. Wie von der klassischen Katalyse zu erwarten, lassen sich deutlich zwei Bereiche ausmachen, wobei der erste dem nichtdiffusionsbegrenzten Fall entspricht. Die gepunktete Linie kennzeichnet die Katalysatorbeladung des Reaktors, bei der man mit großer Sicherheit von Linearität für dieses spezielle System ausgehen kann. Sie ist so gewählt, dass sie weit genug von einem sehr niedrigen Umsatz entfernt ist, damit Messungenauigkeiten vermieden werden, und zugleich nicht zu nahe am Bereich II und den damit verbundenen Problemen ist.

wonnen werden können. Wenn man über diesen Wert hinausgeht, wird die Umsatzgeschwindigkeit, z. B. pro Gramm Katalysator, unterschätzt, wohingegen die scheinbare Quantenausbeute (wie sie in Abbildung 2 definiert wurde) für bestimmte Reaktorkonfigurationen (z. B. verspiegelte Reaktorwände) zu hoch ausfallen kann. Hierin liegt das Kernproblem: Wenn an ausreichend unterschiedlichen Punkten auf solchen Kurven Messungen vorgenommen werden, ergeben sich ganz zwangsläufig unterschiedliche Ergebnisse für ein und denselben Katalysator.

Es ist klar, dass sich diese Überlegungen nicht ohne weiteres von einem System mit aufgeschlammtem Katalysator auf eines übertragen lassen, bei dem der Katalysator auf Bleche/Platten aufgebracht ist. Im Falle eines Katalysatorpulvers, das auf ein Blech aufgetragen wurde, kann das Pulver zuerst als Aufschlämmung und im Anschluss daran in der neuen Reaktorkonfiguration untersucht werden, um dann zu ermitteln, wie viel der scheinbaren Quantenausbeute durch das Reaktordesign verloren ging. Auch bei einem Katalysator, der z. B. durch chemische Gasphasenabscheidung (CVD) auf ein Blech/eine Platte aufgebracht wurde, können immer noch die scheinbare Quantenausbeute, wie sie zuvor definiert wurde, und eine Umsatzgeschwindigkeit angegeben werden. Allerdings dürfte es jetzt sinnvoller sein, die Oberfläche des Reaktorbleches und nicht die des eigentlichen Katalysators als Bezugspunkt zu wählen.

Schlussbemerkung

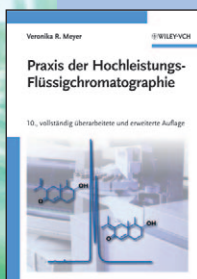
Wir hoffen, dass die ausgeführten Überlegungen die Diskussionen in der Forschungsgemeinschaft beleben und dazu beitragen werden, ein standardisiertes Verfahren zu entwickeln, mit dem Photokatalysatoren getestet und die Resultate vergleichbar publiziert werden können.

Eingegangen am 17. Juli 2009,
veränderte Fassung am 10. November 2009
Online veröffentlicht am 25. Januar 2010

- [1] U. Sahaym, M. G. Norton, *J. Mater. Sci.* **2008**, *43*, 5395.
- [2] A. Fujishima, K. Honda, *Nature* **1972**, *238*, 37.
- [3] J. M. Lehn, *Proc. Int. Congr. Catal. 8th* **1984**, *1*, 63.
- [4] M. Grätzel, *Acc. Chem. Res.* **1981**, *14*, 376.
- [5] M. Anpo, M. Takeuchi, *J. Catal.* **2003**, *216*, 505.
- [6] K. Maeda, K. Domen, *J. Phys. Chem. C* **2007**, *111*, 7851.
- [7] L. Spenadel, M. Boudart, *J. Phys. Chem.* **1960**, *64*, 204.
- [8] J. E. Benson, M. Boudart, *J. Catal.* **1965**, *4*, 704.
- [9] F. E. Osterloh, *Chem. Mater.* **2008**, *20*, 35.
- [10] H. Kato, K. Asakura, A. Kudo, *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, *125*, 3082; K. Maeda, K. Teramura, K. Domen, *J. Catal.* **2008**, *254*, 198.
- [11] H. Kato, A. Kudo, *Catal. Today* **2003**, *78*, 561; A. Kudo, *Int. J. Hydrogen Energy* **2007**, *32*, 2673.
- [12] K. Maeda, K. Teramura, D. Lu, T. Takata, N. Saito, Y. Inoue, K. Domen, *J. Phys. Chem. B* **2006**, *110*, 13753.
- [13] J. F. Reber, K. Meier, *J. Phys. Chem.* **1984**, *88*, 5903; R. M. Navarro Yerga, M. C. I. Galvan, F. del Valle, J. A. Villoria de La Mano, J. L. G. Fierro, *ChemSusChem* **2009**, *2*, 471.
- [14] A. G. Rincon, C. Pulgain, *Appl. Catal. B* **2006**, *63*, 222.

- [15] J. Nowotny, T. Bak, M. K. Nowotny, L. R. Sheppard, *J. Phys. Chem. B* **2006**, 110, 18492.
- [16] N. Serpone, D. Lawless, R. Khairutdinov, E. Pelizzetti, *J. Phys. Chem.* **1995**, 99, 16655.
- [17] R. Fretwell, P. Douglas, *Photochem. Photobiol. Sci.* **2002**, 1, 793.
- [18] *Handbook of Heterogeneous Catalysis*, 2. Aufl. (Hrsg.: G. Ertl, H. Knözinger, F. Schüth, J. Weitkamp), Wiley-VCH, Weinheim, **2008**.
- [19] H. J. Kuhn, S. E. Braslavsky, R. Schmidt, *Pure Appl. Chem.* **2004**, 76, 2105.
- [20] C. A. Parker, *Proc. R. Soc. London Ser. A* **1953**, 220, 104.
- [21] L. Palmisano, V. Augugliaro, R. Campostrini, M. Schiavello, *J. Catal.* **1993**, 143, 149.
- [22] A. Kudo, Y. Miseki, *Chem. Soc. Rev.* **2009**, 38, 253.
- [23] <http://trredc.nrel.gov/solar/standards/am1.5/#a>.

Analysieren Sie richtig!



VERONIKA R. MEYER **Praxis der Hochleistungs-Flüssigchromatographie**

10., vollst. überarb. u. erw. Aufl.

ISBN: 978-3527-32046-2
Februar 2009 396 S. mit 211 Abb. Broschur
€ 59,90

Der Klassiker unter den HPLC Büchern jetzt in 10. Auflage. Mit vielen aktuellen Themen und Ergänzungen ein Muss für alle Anwender.

Anwender der HPLC benötigen ein breites theoretisches und praktisches Wissen. In diesem Standardwerk wird beides vermittelt. Es erklärt Theorie, apparative Grundlagen, die verschiedenen HPLC-Prinzipien. In der neuen Auflage wurden viele neue Techniken der letzten Jahre, z.B. Laser Induced Fluorescence, Hydrophilic Interaction Chromatography und Comprehensive 2D-Chromatography, aufgenommen.

Rezensionen zur neunten Auflage:

Hier findet man auf einen Blick das Praxiswissen, was man sich sonst mühsam zusammensuchen muss.“
www.chemieonline.de



VERONIKA R. MEYER **Fallstricke und Fehlerquellen der HPLC in Bildern**

3., überarb. u. erw. Aufl.

ISBN: 978-3527-31268-9
2006 194 S. mit 94 Abb. Broschur € 49,90

Wer mit der HPLC arbeitet, hat mit einer Vielzahl von Fallstricken und Fehlerquellen zu tun. Mit 13 neuen Beispielen schildert Veronika Meyer in dieser dritten Auflage fast 100 dieser Probleme.

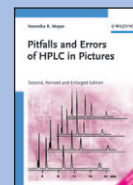
Alle Beispiele werden mit einem knappen, aussagekräftigem Text und einer informativen Abbildung dargestellt. Jeder Anwender findet so schnell heraus, wie er Fehlerquellen beseitigen und Fallstricken aus dem Weg gehen kann.

„Eine praxisnahe Hilfe für zuverlässige und richtige Analyseergebnisse!“ *sicher ist sicher*

Engl. Ausgabe:

VERONIKA R. MEYER
Pitfalls and Errors of HPLC in Pictures
2., überarb. u. erw. Aufl.

ISBN: 978-3527-31372-3
2006 199 S. mit 87 Abb. Broschur € 47,90



Wiley-VCH, Kundenservice, Postfach 10 11 61, D-69451 Weinheim, Germany
Tel.: +49 (0) 6201 606-400, Fax: +49 (0) 6201 606-184
E-Mail: service@wiley-vch.de, www.wiley-vch.de

 **WILEY-VCH**