

In situ Spektroskopie an katalytisch aktiven Nanoteilchen

Spektroskopie an Modellkatalysatoren unter Atmosphärendruck

Katalyse beeinflusst unser Leben in vielfältiger Weise. Dies geschieht zum Teil direkt und unmittelbar durch Biokatalysatoren (Enzyme), die in unserem Körper chemische Prozesse beschleunigen oder in eine gewünschte Richtung lenken – oder eher indirekt und unmerklich – durch technische Katalysatoren, die zur Herstellung vieler wichtiger Stoffe (Kraftstoffe, Polymere, Feinchemikalien, Arzneimittel, Düngemittel, etc) Verwendung finden. Das wohl bekannteste Beispiel für den Einsatz von Katalysatoren ist die Abgasreinigung in Kraftfahrzeugen, bei der der so genannte 3-Wege-Katalysator (bestehend aus Platin-, Palladium- und Rhodium-Nanoteilchen auf einem keramischen Monolith) unverbrannte Kohlenwasserstoffe C_xH_y und Kohlenmonoxid CO zu Kohlendioxid CO_2 oxidiert und Stickoxide NO_x zu Stickstoff N_2 reduziert.

Trotz der enormen Bedeutung der Katalyse und intensiver Forschung ist es nach wie vor nahezu unmöglich, die (genaue) katalytische Wirkungsweise eines neuen Katalysatormaterials vorherzusagen

oder (umgekehrt) einen Katalysator für eine bestimmte chemische Reaktion „maßzuschneidern“. Dies trifft natürlich umso mehr zu, je komplexer der Katalysator und die Reaktion sind (man sollte hier aber auch festhalten, dass einfache katalytische Reaktionen kleiner Moleküle wie CO schon sehr gut verstanden werden). Im Folgenden soll für einen bestimmten Katalysatortyp – nämlich Edelmetall-Trägerkatalysatoren – dargelegt werden, worin die wissenschaftlichen Probleme liegen und weshalb selbst nach etwa 100 Jahren Katalyseforschung nach wie vor großer Handlungsbedarf für die Grundlagenforschung besteht.

Metall-Trägerkatalysatoren bestehen meist aus Edelmetall-Nanoteilchen die auf einem Trägermaterial, z.B. einem Metalloxid mit hoher spezifischer Oberfläche (mehrere hundert m^2 pro Gramm), aufgebracht sind. Durch die kleine Größe der Metallteilchen (meist 1–10 nm) wird das Verhältnis zwischen der katalytisch aktiven Oberfläche der Teilchen und ihrem (zumeist) inaktiven Inneren (Volumen) optimiert – oder anders gesagt, es wird möglichst wenig Edelmetall für das Teilcheninnere „verschwendet“.

Dazu kommt, dass sich die geometrische und elektronische Struktur von Edelmetall-Nanoteilchen im Größenbereich von 1–10 nm typischerweise stark verändert. Das Trägeroxid stabilisiert die feine Verteilung der („hochdispersen“) Edelmetall-Nanoteilchen, kann aber auch aktiv an der katalytischen Reaktion teilnehmen.

Um katalytische Prozesse auf molekularer Ebene verstehen zu können, müssen mehrere Randbedingungen erfüllt werden. Zunächst müssen die Struktur und Zusammensetzung und die katalytische Wirkungsweise des Katalysatormaterials bekannt sein. Daneben ist

die Bestimmung der aktiven Zentren, d.h. jener spezifischer Plätze auf einem Katalysator, an denen die katalysierte chemische Reaktion stattfindet, von immenser Bedeutung. Wie bereits angesprochen kann eine katalytische Reaktion nur auf dem Edelmetall stattfinden, oder es können einzelne Teilschritte getrennt auf dem Metall und dem Oxid ablaufen, oder es kann auch die Grenzfläche zwischen dem Metall, dem Oxid und einem Reaktionsgas besonders wichtig sein. Für technisch verwendete Katalysatoren gestaltet sich die Beantwortung dieser Fragestellungen jedoch aus mehreren Gründen sehr schwierig: Die exakte strukturelle Charakterisierung der nur wenige Nanometer großen Metallteilchen ist selbst mit der modernen hochauflösenden Elektronenmikroskopie infolge störender Einflüsse des Trägermaterials oft nicht möglich, insbesondere wenn es sich um poröse Metalloxide handelt. Konventionelle Trägermaterialien sind vielfach Isolatoren, sodass oberflächenanalytische Methoden – die auf der Streuung, Absorption oder Emission von Elektronen, Ionen oder Atomen basieren – aufgrund von Aufladungseffekten meist nur eingeschränkt eingesetzt werden können. Hält man sich vor Augen,

In situ schwingungsspektroskopische Untersuchungen katalytischer Reaktionen auf Modellkatalysatoren erlauben die „Drücklücke“ zwischen der Oberflächenanalytik und der heterogenen Katalyse zu überbrücken. Als Beispiele dienen die CO-Adsorption und Hydrierung und die Methanol-Oxidation auf Pd-Nanoteilchen und Pd(111) bei Atmosphärendruck.

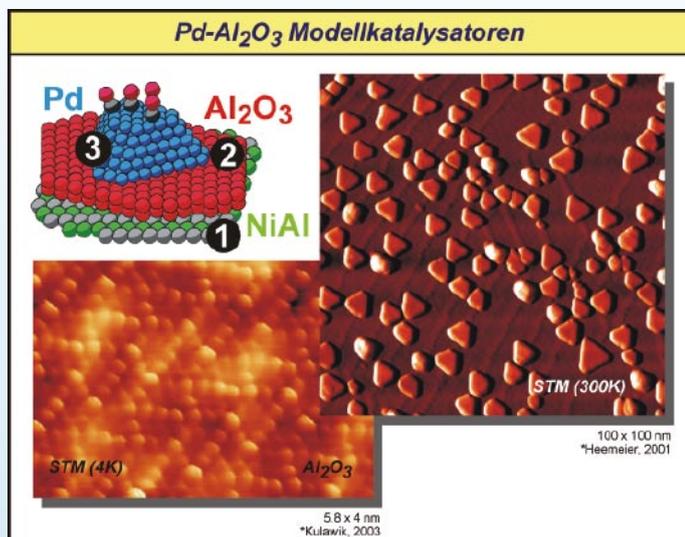


Abb. 1: Schematische Darstellung der Präparation eines Pd- Al_2O_3 -Modellkatalysators
Urheber: Fritz-Haber-Institut, Berlin

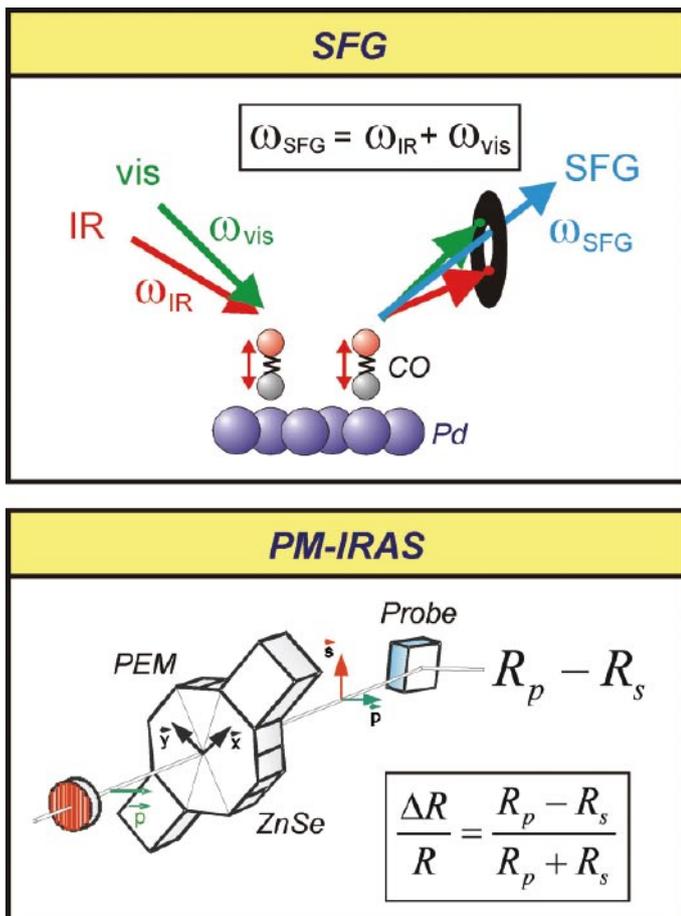


Abb. 2: *In-situ*-Schwingungsspektroskopie von auf katalytisch aktiven Oberflächen adsorbierten Gasmolekülen
 Urheber: Fritz-Haber-Institut, Berlin

dass industriell verwendete Katalysatoren noch dazu Multikomponentensysteme sein können (aktive Komponente, Kokatalysatoren, Promotoren, gemischte Trägeroxide, etc.), versteht man die hohe Komplexität der heterogenen Katalyse.

Modellsysteme

Die Grundlagenforschung in der heterogenen Katalyse, die es sich zum Ziel gemacht hat, Elementarprozesse auf atomarer Ebenen zu erklären, bedient sich deshalb so genannter Modellkatalysatoren, deren weniger komplexe Struktur und Zusammensetzung eine exakte Charakterisierung und die Formulierung von Struktur-Wirkungs-Korrelationen ermöglicht. In den vergangenen Jahren wurde eine Reihe von Modellkatalysatoren entwickelt, die aus dünnen kristallinen Oxidfilmen und darauf deponierten Edelmetall-Nanoteilchen bestehen. Die Präparation erfolgt im Ultrahochvakuum (UHV) in einem mehrstufigen Prozess, in dem

zuerst das Trägeroxid hergestellt wird und nachfolgend darauf metallische Nanoteilchen gewachsen werden.

Abbildung 1 zeigt als Beispiel die Präparation eines ~0,5 nm dicken Al_2O_3 -Modellträgers durch Oxidation eines NiAl Substrats, gefolgt von der Bedampfung mit Palladium, wodurch Pd-Nanopartikel entstehen. Durch den Einsatz von Rastertunnelmikroskopie (Scanning Tunneling Microscopy, STM), bei der die Oberfläche mit einer feinen Spitze abgetastet wird, konnten sowohl der Al_2O_3 -Träger als auch die darauf sitzenden Pd-Teilchen exakt charakterisiert werden. Neben Al_2O_3 stehen zurzeit aber auch SiO_2 , FeO , Fe_3O_4 , Cr_2O_3 , NiO , Nb_2O_5 und andere als Modell-Trägeroxide zur Verfügung. Die Größe, Gestalt und Oberflächenstruktur der metallischen Nanoteilchen kann durch Variation der Substrattemperatur und der Metallmenge gezielt gesteuert werden, wobei bereits verschiedene Kombinationen von Pd, Pt, Rh, Ag, Au, Pd/Co, etc. Na-

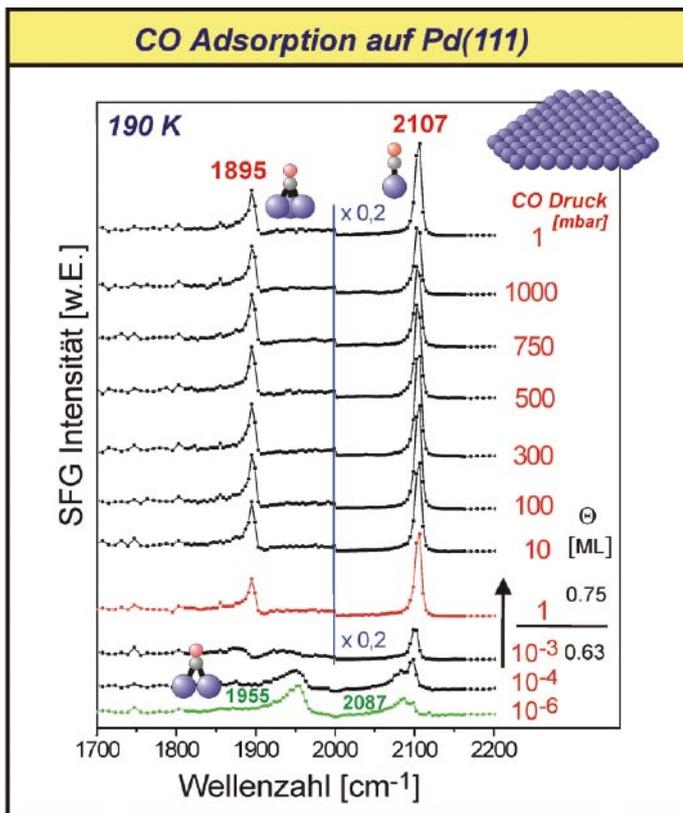


Abb. 3: CO-Adsorption auf Pd(111) im Druckbereich 10^{-6} bis 1.000 mbar (190 K). Die SFG-Spektren zeigen, dass nach der Sättigung der Oberfläche bei ca. 1 mbar keine weiteren Änderungen in der Adsorptionsgeometrie der CO-Moleküle auftreten, weshalb man für dieses System von einer guten Übertragbarkeit von UHV-Ergebnissen auf ambiante Bedingungen ausgehen kann. Urheber: Fritz-Haber-Institut, Berlin

noteilchen auf den genannten Oxiden untersucht wurden. Die Präparation im Ultrahochvakuum schließt unerwünschte Fremdatome und die Adsorption von Gasmolekülen und somit den Einfluss nicht kontrollierbarer Parameter aus. Die Modellkatalysatoren werden daneben mittels verschiedener oberflächenanalytischer Methoden auch hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und ihrer Wechselwirkung mit Gasmolekülen charakterisiert, so z.B. mit Photoelektronenspektroskopie (X-ray Photoelectron Spectroscopy; XPS) oder Infrarot-(Schwingungs-) Spektroskopie (Infrared Reflection Absorption Spectroscopy; IRAS).

Die Anwendung dieser Strategie führte zu neuen Erkenntnissen zur Keimbildung und zum Wachstum von Metallteilchen auf Oxiden, und zur Adsorption, Dissoziation und Reaktion kleiner Moleküle wie CO, O₂, H₂, NO, C₂H₄, etc. Diese Untersuchungen wurden jedoch „nur“ unter Ultrahochvakuum-Bedingungen (ca. 10^{-13} bar) ausgeführt, während die technische Katalyse

natürlich bei deutlich höherem Druck stattfindet (ca. 1 bis > 10 bar). Die Übertragbarkeit der UHV-Ergebnisse auf die technische heterogene Katalyse ist aufgrund der bis zu 14 Größenordnungen betragenden Druckdifferenz nicht notwendigerweise gegeben. Diese Problematik wird üblicherweise als die Drucklücke („pressure gap“) zwischen der Oberflächenanalytik und der heterogenen Katalyse thematisiert. Deshalb ist es natürlich erstrebenswert, oberflächenanalytische Untersuchungen auch bei erhöhtem Druck bzw. sogar während Ablauf einer katalytischen Reaktion (*in situ*) durchzuführen.

In-situ-Methoden

Aus diesen Gründen wurde eine Reihe von Methoden (weiter)entwickelt, die auch im mbar bis bar Druckbereich oberflächenspezifische Informationen über an einer Katalysatoroberfläche vorhandene oder reagierende Moleküle liefern sollen. Dies ist kein einfacher

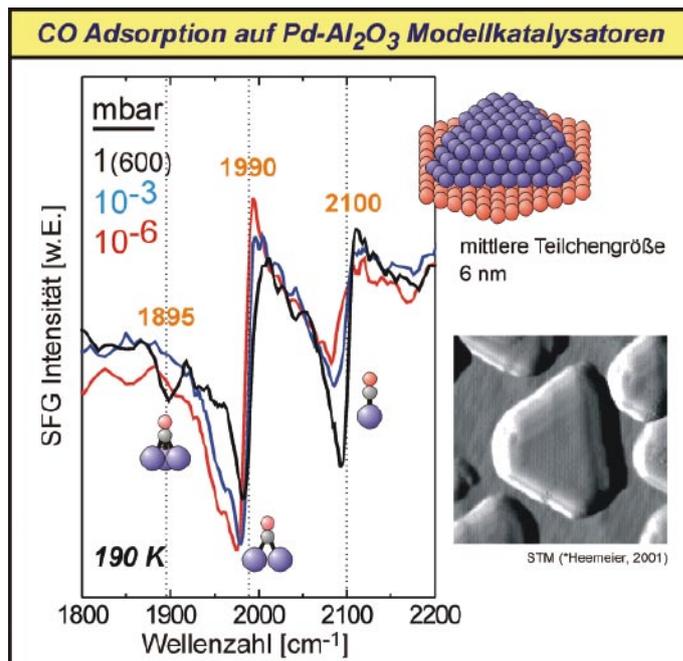


Abb. 4: CO-Adsorption auf ca. 6 nm großen Pd-Teilchen auf Al₂O₃. Zusätzlich zu den auf Pd(111) beobachteten Spezies tritt an Kanten- und Stufenplätze der Partikeln gebundenes CO auf (~ 1990 cm⁻¹). Diese Spezies wird auch bei erhöhtem Druck beobachtet und ist für die unterschiedliche Aktivität von Pd-Teilchen und Pd(111) mit verantwortlich.

Urheber: Fritz-Haber-Institut, Berlin

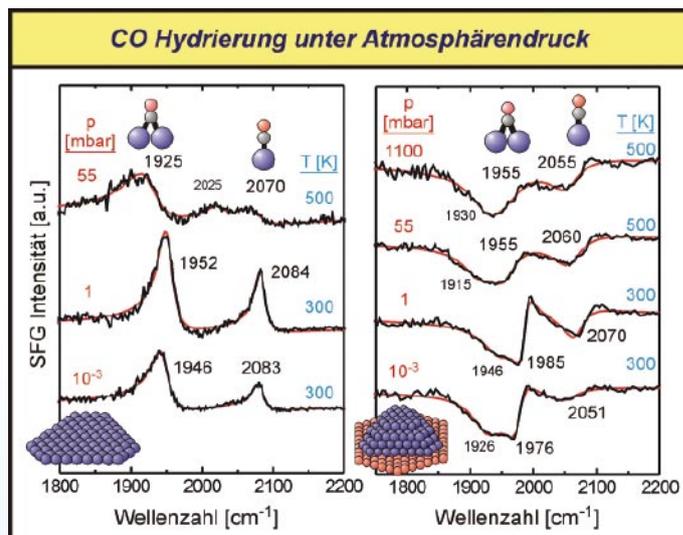


Abb. 5: *In-situ*-SFG-Spektren zur CO-Hydrierung auf Pd(111) und Pd-Nanoteilchen (mittlere Größe 6 nm; CO:H₂=1:10). Die Spektren deuten auf eine teilweise ungeordnete CO-Adsorbatphase oder eine mögliche Oberflächenaufräuhung hin. Urheber: Fritz-Haber-Institut, Berlin

Anspruch, da die Anzahl der Gasmoleküle im Probenvolumen üblicherweise sehr viel größer ist als die Anzahl der auf der Katalysatoroberfläche adsorbierten Moleküle. Es wurden hier zwei Methoden eingesetzt, die Schwingungsspektren von adsorbierten Molekülen während Ablauf einer katalytischen Reaktion bei 1 bar liefern, nämlich die Summenfrequenz-Laserspektroskopie (Sum Frequency Generation; SFG) und die Polarisations-Mo-

dulations-Infrarot-Reflexions-Absorptionsspektroskopie (PM-IRAS). Die Messprinzipien beider Methoden sind in Abbildung 2 verdeutlicht. Zur Messung eines SFG-Spektrums werden ein durchstimmbarer infraroter und ein festfrequenter sichtbarer (grüner) Picosekunden-Laserpuls auf der Probe örtlich und zeitlich überlagert, wobei im Fall einer Schwingungsanregung im Adsorbat (blaue) Licht-Photonen erzeugt werden, deren Frequenz

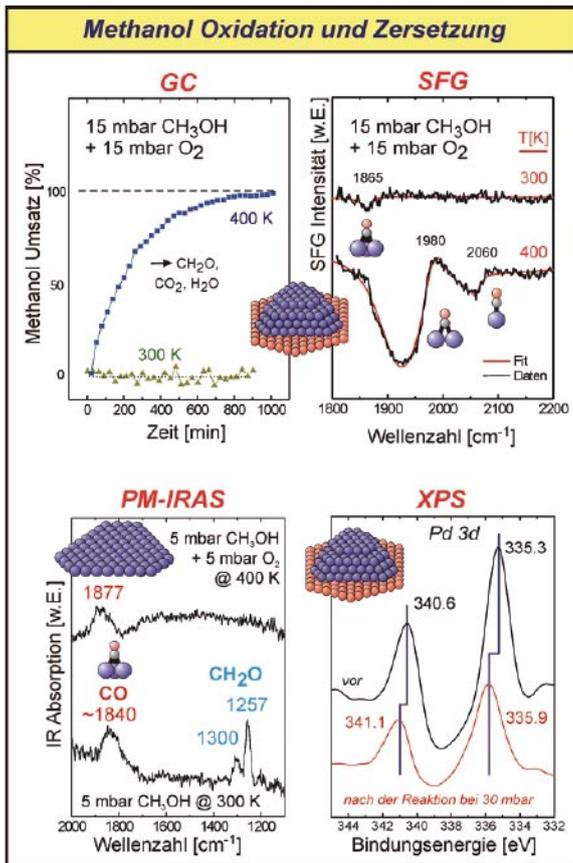


Abb. 6: *In-situ*-Untersuchungen zur Methanol-Oxidation auf Pd-Modellkatalysatoren mittels Gaschromatographie (GC), Summenfrequenz-Erzeugung (SFG) und IR Polarisations-Modulation (PM-IRAS). Während Ablauf der Reaktion wird auf der Oberfläche adsorbiertes CO detektiert. Photoelektronenspektroskopie (XPS) wurde (*ex-situ*) vor und nach der katalytischen Reaktion durchgeführt und deutet auf eine partielle Oxidation der Pd-Partikel hin.

Urheber: Fritz-Haber-Institut, Berlin

der Summe der Frequenzen der Anregungsstrahlen entspricht. Ein SFG-Spektrum wird erhalten, indem die SFG-Signalintensität gegen die IR-Energie (Wellenzahl) aufgetragen wird. Da der SFG-Prozess nur in Medien ohne Inversions-symmetrie erlaubt ist, wird das SFG-Signal im wesentlichen ausschließlich vom Adsorbat an der Katalysatoroberfläche erzeugt. Bei der PM-IRAS-Spektroskopie wechselt die Polarisati-on des IR-Lichts zwischen p- und s-polarisiert, wodurch – nach einer Signalaufbereitung und Entfernung des Gasphasenbeitrages – Absorp-tions-(Schwingungs-)Spektren eines Adsorbats auch bei Drücken bis 1 bar oberflächenspezifisch gemessen werden können.

Die Experimente werden in folgender Weise durchgeführt: Nach der Herstellung im UHV werden die Modellsysteme in eine Reaktorzelle transferiert. In dieser werden *in situ*-SFG und/ oder PM-IRAS Spektren aufgenommen, wobei im Fall katalytischer Reaktionen die Aktivität und Selektivität gleichzeitig mithilfe von Gas-chromatographie und Massenspektroskopie bestimmt werden. Nachfolgend werden bei-spielsweise einige Anwendungen zur Untersu-

chung der CO-Adsorption und Hydrierung und zur Partialoxidation von Methanol unter Atmosphärendruck vorgestellt.

CO-Adsorption unter erhöhtem Druck

Kohlenmonoxid tritt in vielen katalytischen Reaktionen auf (z. B. in der erwähnten Abgasreinigung aber auch in der Methanol- und Fischer-Tropsch-Synthese, etc.) und CO wird zudem gerne als Sondenmolekül zur Bestimmung von Adsorptionsplätzen auf metallischen Nanoteilchen eingesetzt (sowohl für konventionelle- als auch Modell-Katalysatoren). Daraus erklärt sich die Vielzahl früherer oberflächenanalytischer Untersuchungen im Ultrahochvakuum. Für die Katalyse deutlich relevanter sind jedoch Adsorptionsuntersuchungen bei erhöhtem Druck und insbesondere die Klärung der Frage, ob sich die Wechselwirkung von CO mit Metalloberflächen im UHV von jener unter erhöhtem Druck unterscheidet oder nicht. Erste „Hochdruck-Untersuchungen“ haben sich deshalb mit CO-Adsorbatphasen auf Pd(111)-Einkristalloberflächen und auf Pd-Nanoteilchen auf Al₂O₃ beschäftigt. Abbildung 3 zeigt SFG-

Messungen auf Pd(111), die im Bereich von 10⁻⁶–1000 mbar durchgeführt wurden. Die atomare Struktur einer Einkristalloberfläche ist exakt definiert (die hexagonale Anordnung der Pd Atome ist schematisch dargestellt), weshalb Pd(111) ein gutes Referenzsystem darstellt. Aufgrund der beobachteten Schwingungsfrequenzen und basierend auf früheren spektroskopischen Untersuchungen konnte eine Zuweisung der Adsorptionsplätze von CO erfolgen. Beispielsweise besetzt CO bei 10⁻⁶ mbar bevorzugt so genannte Brückenplätze (2-fach verbrücktes CO) und einzelne Pd-Atome (terminales CO), während bei 1 mbar und darüber 3-fach Muldenplätze und einzelne Pd-Atome populiert werden (alle Spektren bei 190 K). Mit diesen Messungen konnten also die Adsorptionsuntersuchungen im UHV bis zu einem Druck von 1 bar ausgeweitet werden. Es konnten jedoch selbst bei 1 bar keine neuen CO-Adsorbatstrukturen („Hochdruckspezies“) beobachtet werden, woraus folgt, dass die aus oberflächenanalytischen Untersuchungen im UHV bekannten Adsorptionsgeometrien auch auf die heterogene Katalyse übertragen werden können (zumindest für

das System CO/Pd(111) unter den untersuchten Randbedingungen).

Ähnliche Experimente wurden für oxidgetragenen Pd-Nanoteilchen (mittlere Größe 3–7 nm) ausgeführt. Abbildung 4 zeigt als Beispiel Messungen an Pd-Nanoteilchen mit einer mittleren Größe von 6 nm. Diese Partikel haben die Gestalt von (abgeschnittenen) Kubooktaedern, deren Oberfläche zu ca. 80 % aus (111) Facetten besteht (ca. 20 % der Oberfläche sind (100) Facetten mit quadratischer Anordnung der Pd-Atome). Obwohl die Pd-Teilchen einer (111) Einkristallobersfläche sehr ähnlich sind, zeigen sie deutlich verschiedene Schwingungsspektren für adsorbiertes CO (es sind nur die Bandenpositionen zu beachten, die unterschiedliche Linienform, die durch eine Anregung des NiAl-Substrats während des SFG-Prozesses hervorgerufen wird, ist hier nicht relevant). Im Vergleich von Pd-Nanoteilchen und Pd(111) fällt vor allem eine Adsorptionsbande bei $\sim 1990\text{ cm}^{-1}$ auf, die der CO Adsorption auf den Kanten und Stufen der Pd-Teilchen zugeschrieben wird (mit einem kleinen Beitrag der (100) Facetten). Diese Spezies ist mit für die unterschiedliche katalytische Aktivität von Pd-Nanoteilchen und Pd(111) verantwortlich. Weiters ist zu beobachten, dass bei 200 K brückengebun-

denes CO auf Pd(111) nur bei Drücken $< 1\text{ mbar}$ auftritt, während diese Spezies auf Pd Nanoteilchen selbst bei 600 mbar noch immer anwesend ist. Zudem konnte gezeigt werden, dass die Belegung der Adsorptionsplätze stark von der Oberflächenstruktur der Pd-Teilchen abhängt, so wird beispielsweise bei größerer Oberflächenrauigkeit vermehrt terminales CO beobachtet. Diese Experimente wurden mittlerweile auch durch PM-IRAS-Messungen bestätigt und verdeutlichen die Unterschiede in den Eigenschaften von Nanomaterialien und makroskopischen Oberflächen.

Wechselwirkung von CO und H₂

Deutlich komplexere Strukturen wurden für die Wechselwirkung von CO und H₂ erhalten. Die Koadsorption und Reaktion dieser beiden Moleküle ist z. B. für die Methanol-Synthese interessant. Bei sehr tiefen Temperaturen (100 K) wurde eine sehr starke Behinderung der H₂-Adsorption durch CO (und umgekehrt) festgestellt (hier nicht gezeigt), sodass Reaktionsstudien unter statischen UHV-Bedingungen nicht durchführbar sind. Unter technischen Reaktionsbedingungen, d. h. bei mindestens 1 bar und bei deutlich höherer Temperatur (550 K), besteht

jedoch ein dynamisches Gleichgewicht zwischen der CO/H₂-Gasphase und den auf der Oberfläche adsorbierten Molekülen. Entsprechende *in situ*-SFG-Spektren für Pd-Nanoteilchen und Pd(111) sind in Abbildung 5 gezeigt. Diese Spektren weisen auf einen hohen Bedeckungsgrad der Oberfläche mit CO hin (ca. eine halbe Monolage). Unter statischen UHV-Bedingungen ist eine Reaktion ausgeschlossen, da auf einer CO-gesättigten Oberfläche kein Wasserstoff adsorbieren kann. Unter dynamischen (Gleichgewichts-) Reaktionsbedingungen ist die H₂-Adsorption jedoch infolge der bei hohem Druck hohen Oberflächen-Auftrefferate der H₂-Moleküle nicht vollkommen ausgeschlossen, sodass es auch zur Reaktion von CO und atomarem Wasserstoff H zu Formyl (CHO) kommen kann. Formyl stellt die erste Stufe zur Methanol-Synthese dar. Bei genauerer Betrachtung unterscheiden sich die *In-situ*-Spektren von jenen unter UHV Bedingungen. So wurde terminales CO detektiert, das im UHV bei einer Bedeckung von ca. einer halben Monolage nicht auftritt. Dies deutet auf eine teilweise ungeordnete CO-Lage bzw. eine mögliche Oberflächenaufrauung hin. Die zusätzlichen terminalen CO-Moleküle reagieren wahrscheinlich mit benachbarten Wasserstoff-Atomen zu den erwähnten Formyl-Gruppen.

Methanol-Zersetzung und -Oxidation

Da die Methanol-Zersetzung die Umkehrung der Methanol-Synthese darstellt, können auch aus dieser Reaktion Informationen über die Methanol-Bildung gewonnen werden. Die Methanol-Oxidation ist gleichsam ein Prototyp für die Verbrennung flüchtiger organischer Verbindungen und die Partialoxidation von Methanol zu Formaldehyd ist von technischem Interesse. Beide Prozesse wurden sowohl mit SFG als auch mit PM-IRAS untersucht, einige Resultate sind in Abbildung 6 zusammengefasst.

Für den Fall der CH_3OH -Zersetzung gibt es zwei Reaktionswege: (i) Dehydrierung (über C-H und O-H Bindungsbruch) zu CO und H_2 und (ii) die Ausbildung kohlenstoffhaltiger Ablagerungen (via C-O Bindungsbruch). Im mbar Druckbereich verlaufen beide Prozesse bereits bei Raumtemperatur schnell. Mittels SFG und PM-IRAS wurden adsorbiertes CO und Formaldehyd CH_2O als Produkte der CH_3OH Dehydrierung identifiziert. Durch den parallel ablaufenden C-O Bindungsbruch und der damit verbundenen Ablagerung von kohlenstoffhaltigen Spezies CH_x ($x=0-3$) erfolgt jedoch eine rasche Deaktivierung der Katalysatoroberfläche, sodass keine Reaktionsprodukte durch Gaschromatographie festgestellt werden konnten. Die Kinetik der Ausbildung von CH_x wurde mithilfe der Photoelektronenspektroskopie (XPS) verfolgt. Bei Raumtemperatur und einem CH_3OH -Druck von ~ 1 mbar wurden nahezu unmittelbar 1–2 Monolagen CH_x abgeschieden.

Abbildung 6 zeigt ebenfalls Umsatz-Zeit-Kurven und *in situ*-SFG und PM-IRAS Spektren nach der Zugabe von Sauerstoff, wobei die Oxidationsreaktion zu Formaldehyd CH_2O , Kohlendioxid CO_2 und Wasser H_2O Temperaturen von mindestens 400 K benötigt. Unter Reaktionsbedingungen detektieren SFG und PM-IRAS CO als einzige Adsorbatspezies, was die Dehydrierung von CH_3OH zu CH_2O und dessen weitere Dehydrierung zu CO und

nachfolgende Oxidation zu CO_2 als Reaktionswege vorschlägt. Die Schwingungsfrequenzen entsprechend dabei typischen Werten von CO auf (metallischem) Pd. XPS-Spektren, die nach der Reaktion aufgenommen wurden, weisen jedoch auf eine mögliche partielle Oxidation der Pd-Nanoteilchen unter Reaktionsbedingungen hin. Weitere Experimente zur Aufklärung dieses Verhaltens werden derzeit durchgeführt. Die Veränderung der Katalysatoroberfläche bzw. deren Zusammensetzung während der Reaktion erschwert natürlich die Formulierung von Struktur-Aktivitäts-Korrelationen, doch solche Veränderungen sind auch für konventionelle Katalysatoren möglich und manchmal sogar für eine hohe katalytische Aktivität notwendig.

Die Kombination von *In-situ*-Methoden (SFG/PM-IRAS und anderen) mit einem gut definierten Nanoteilchen-Modellkatalysator ist sicherlich eine vielversprechende Methode, die „Drucklücke“ zwischen der Grundlagenforschung und der angewandten Katalyse zu überbrücken. Die zukünftige Anwendung dieser Strategie auf neue und auch komplexere Modellsysteme und Reaktionen kann sicherlich zu einem besseren Verständnis der heterogenen Katalyse beitragen.

Autoren:

Prof. Dr. Günther Rupprechter, Dr. Unterhalt, H.; Dr. Borasio, M; Dr. Morkel, M.; Prof. Dr. Freund, H.-J., Chemische Physik, Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft, Berlin

► KONTAKT

Univ.-Prof. Dr. Günther Rupprechter

Ordinarius für Oberflächen- und Grenzflächenchemie
Institut für Materialchemie
Technische Universität Wien,
Österreich

Tel.: +43 1 25077 3800

Sekretariat +43 1 25077 3801

Fax: +43 1 25077 3890

grupp@imc.tuwien.ac.at