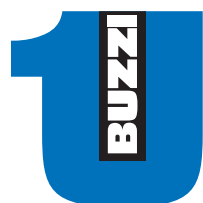


**SONDERDRUCK  
AUS BWI 09/05**

Prof. Dr. Michael Bruse, Prof. Dr. Detlef W. Bahnemann  
und Prof. Dr. Gabriele Ricchiardi

## BWI Interview

Photokatalytische Eigenschaften von Baustoffen



# Dyckerhoff



# Photokatalytische Eigenschaften von Baustoffen

**SONDERDRUCK  
AUS BWI 09/05**

Aktuell werden Umwelteigenschaften von Baustoffen in den Medien verstärkt diskutiert. Kernpunkt ist die durch Titandioxid nachweislich stattfindende Photokatalyse, die u.a. Stickoxide in Nitrate umwandelt. Photokatalytische Effekte des Weißpigments Titandioxid in der Kristallform Anatas waren lange gefürchtet in Farben mit organischen Bindemitteln, wegen ihrer zersetzenden Wirkung auf die Bindemittel. Durch die Entwicklung von Rutilpigmenten mit Oberflächenbehandlung konnten sie aber so stabilisiert werden, dass es nicht mehr zu den Abkündigungseffekten an Farben kam. Titandioxid als Weißpigment wird bereits 1965 „urkundlich“ für seine Langzeitbrillanz erwähnt [1]. Sogar 1959 schon berichtete B. Henk über die Möglichkeit der weiteren Aufhellung von weißem Markierungsbeton durch Weißpigmente [2]. In der Folge wurden zahlreiche Projekte mit Weisszement und Zugabe von Titandioxid als Pigment ausgeführt, wobei sich ein weiterer Vorteil zeigte, nämlich der selbstreinigende Effekt, speziell an vertikalen Flächen.

Als ein marktführender Hersteller von Weisszement in Deutschland, mit langjähriger Kundenerfahrung bei der Titandioxidzugabe, möchte Dyckerhoff im Sinne einer verantwortungsbewussten Produktstrategie jetzt zu einer Versachlichung der Diskussion über die neu entdeckte photokatalytische Wirksamkeit beitragen. Dazu beauftragte Dyckerhoff Untersuchungen bei verschiedenen Instituten und diskutierte die Ergebnisse mit den Experten. Herr Dr. Karutz, Chefredakteur BWI, befragte dazu zusammenfassend Herrn Prof. Dr. Ricchiardi, Universität Turin, Herrn Prof. Dr. Bahnemann, Universität Hannover und Herrn Prof. Dr. Bruse, Universität Mainz.

**Dr. Karutz:** Herr Prof. Ricchiardi, Titandioxide werden seit langem als Weißpigmente eingesetzt. Sie unterstützen darüber hinaus die Selbstreinigung, z.B. auch von Fassaden, und sie sollen nun durch ihre photokatalytische Wirkung auch zur Luftreinigung beitragen. Bitte erklären Sie als Chemiker die zugrunde liegenden Mechanismen in einfachen Worten.

**Prof. Dr. Ricchiardi:** Titandioxid ist ein perfektes Pigment, sehr hell wegen seines hohen Brechungsindex, sehr robust, und völlig untoxisch! Chemiker wissen seit sehr vielen Jahren, dass es kein träges Material ist: Angeregt mit UV-Licht ist es chemisch sehr aktiv. Es wird dann eine stark oxidierende Substanz wie Wasserstoffperoxid, die in der Lage ist, selbstreinigende Oberflächen zu schaffen, aufzuhellen und zu desinfizieren. Das ist kein Zauber, es ist normale Photochemie. Der Vorteil aber ist, dass - während die meisten photoaktiven Verbindungen Moleküle sind, die als Lösung verwendet werden müssen - Titandioxid ein Festkörper ist, der erhalten bleibt, wo er eingebaut ist und der sich nicht verbraucht. Chemiker nennen das einen "heterogenen Katalysator": Er reagiert mit allen Molekülen in Reichweite seiner Oberfläche, ohne dass sich Chemikalien verteilen müssen.

Bestrahltes Titandioxid in feuchter Luft ist eine starke oxidierende Substanz, die viele organische Moleküle vollständig zu CO<sub>2</sub> und Wasser abbauen kann (wie bei einer Verbrennung). Dies ist auch die Art, wie selbstreinigende Materialien funktionieren: Sie verbrennen organischen Schmutz bei Raumtemperatur. Andere Schadstoffe können nicht verbrannt werden, dennoch können sich harmlosere Oxidationsprodukte bilden. Dies ist der Fall bei Stickoxiden, einem Hauptschadstoff in unserer städtischen Umgebung. Die Natur ist an NO<sub>x</sub> gewöhnt, weil es in kleinen Mengen in vielen natürlichen Prozessen entsteht und dann spontan nach einer Oxidation zu Nitraten von Regen als lösliches Salz weggespült werden kann. Aber es ist ein sehr langsamer Prozess.

Photokatalytische Materialien erzeugen dieselben chemischen Reaktionen, nur viel schneller: Jedes einzelne NO-Molekül, das die Oberfläche berührt, wird sofort in Nitrat umgewandelt. Aber dies ist auch ein Nachteil: Das Molekül muss die Oberfläche erreichen, denn nur die Oberfläche ist aktiv. Dies kann das System relativ ineffizient machen, weil die Wahrscheinlichkeit, dass ein Schadstoffmolekül die Oberfläche von einer Straßefahrbahn oder von einem Gebäude erreicht, nicht sehr hoch ist. Und es hängt besonders von dem Wind und den Umwälzungsbedingungen der Gase ab.

Also die Chemie ist erfolgreich im Laborreaktor, aber es gibt immer noch viel Arbeit, um zu verstehen, wie wir diese Reaktionen effizient in der Praxis verwenden können. Einige Versuche sind gemacht worden, um die tatsächliche Wirksamkeit von Photokatalysatoren im Feld zu beurteilen; aber ich denke, dass unsere Erkenntnisse noch



■ Prof. Dr. Michael Bruse, Studium der Geographie und Klimatologie an Univ. Bochum. 1999 Promotion auf dem Gebiet der physikalischen Geographie/ Klimatologie an Universität Bochum. Seit 1999 wissenschaftliche Tätigkeiten auf dem Gebiet der Stadtklimatologie an Universität Köln, Arizona State University Phoenix, Arizona, U.S., University von Strasbourg, France, Universität Bochum, WSGreenTechnologies Stuttgart, Germany. 2007 Lehrstuhl für Geoinformatik / Environmental Modelling Group EMG an Universität Mainz. Seit 2008 ENVI-met.com Consulting & Services, Essen, Germany



■ Prof. Dr. Detlef W. Bahnemann, Studium der Chemie und Biochemie an TU Berlin und Brunel University, Uxbridge, England. 1981 Promotion an der TU Berlin. Bis 2001 wissenschaftliche Tätigkeiten auf den Gebieten Photokatalyse, Synthese von Halbleiter- und Metallnanopartikeln, Photoelektrochemische Brennstoffsynthese, Herstellung und Eigenschaften von Schichtsystemen aus Nanoteilchen, Toxikologie von Nanomaterialien sowie Oberflächenfunktionalisierung von Nanopartikeln am Hahn-Meitner-Institut / Berlin, Department of Environmental Engineering des California Institute of Technology, Pasadena (USA) / Institut für Solarenergieforschung in Hannover. Seit 2002 Leiter des Arbeitskreises Photokatalyse und Nanotechnologie am Institut für Technische Chemie der Leibniz Universität Hannover. Seit 2002 Honorarprofessor (Honorary Visiting Professor) an der Robert Gordon University in Aberdeen/Scotland (Großbritannien)



■ Prof. Dr. Gabriele Ricchiardi, Studium der Chemie an der Universität Turin mit Forschungsaufenthalten zum Thema Simulation von Katalysatoren in San Diego (USA) und am Royal Institution of Great Britain London. Promotion für technische Chemie an der Universität Genua. 1996-1998 Forschungsaufenthalte an der Humboldt-Universität Berlin (AG Quantenchemie der Max-Planck-Gesellschaft: Titanosilikat-Katalysatoren). 1998-1999 Fa. Teksid Spa (Turin): Leitung technische Metallurgie und Entwicklungskoordination. Seit 2000 Universität Turin, wiss. Arbeiten auf den Gebieten „heterogene Katalysatoren und gasabsorbierende Materialien“. Seit 2003 Centre of Excellence "Nanostructured Interfaces and Surfaces" an der Universität Turin. Seit 2006 Wiss. Direktor des NISLabVCO (Spinoff-Unternehmen der Universität Turin für industrielle Materialien)

ungenügend sind. Sie zeigen eindeutig eine Wirkung, aber die Ungewissheit wegen der Komplexität der Luftdynamik in der Praxis ist sehr hoch. Eine wirkliche Kosten/Nutzen-Analyse kann aus den bisher publizierten Daten noch nicht gezogen werden, und auch veröffentlichte Untersuchungen über dieses Thema erlauben bisher noch keine klare Abschätzung über das Ausmaß der Wirksamkeit.

**Dr. Karutz:** Welche Wechselwirkungen verursacht ein photokatalytisches Material in der realen lokalen Atmosphäre dann?

**Prof. Dr. Ricchiardi:** Ein Photokatalysator kann NO<sub>x</sub> und flüchtige organische Substanzen aus einem System entfernen. Das führt hoffentlich auch zu einer Verminderung der Ozonbildung. Es gibt jedoch viele Reaktionen, die berücksichtigt werden müssen, sodass eine eindeutige Antwort immer noch schwierig zu geben ist. Wir glauben, dass Simulationen uns helfen können, diese Chemie zu verstehen.

**Dr. Karutz:** Grundsätzlich ist der photokatalytische Effekt also absolut positiv zu bewerten, und es ist nach einem sinnvollen Einsatz in Baustoffen zu suchen. Auch im Bereich des technischen Regelwerks gibt es dazu schon interessante Ansätze. Prof. Bahnemann vom Institut für Technische Chemie der Universität Hannover ist in diesen Gremien vertreten. Wie ist der aktuelle Stand?

**Prof. Dr. Bahnemann:** International gibt es bereits eine Vielzahl von Standards zur Messung der photokatalytischen Wirkung von Materialoberflächen hinsichtlich ihrer Wirkungen: Selbstreinigung, Luft- und Wasserreinigung, antibakterielle und antifungizide Wirkung. Ausgehend insbesondere von entsprechenden JIS-Normen in Japan sind diese Phänomene inzwischen bereits weitgehend durch ISO-Normen abgedeckt.

Auch in Deutschland beschäftigt sich das DIN heute intensiv mit dieser Problematik. Als Obmann des betroffenen DIN-Ausschusses haben wir bereits die DIN-Norm 52980 zur Messung der photokatalytischen Wirkung der Selbstreinigung erarbeitet und veröffentlicht. Weitere Normen zur Messung der photokatalytischen Wirkung sind derzeit ebenfalls in Arbeit.

Diese Aktivitäten spiegeln auch die Aktivitäten in den internationalen Normungsgremien ISO und CEN wider, in denen die Problematik einer objektiven Bewertung photokatalytischer Effekte in unterschiedlichen Medien beziehungsweise hinsichtlich unterschiedlicher Schadstoffe bearbeitet wird.

**Dr. Karutz:** Um positive Effekte wie die Stickoxidumwandlung bewerten zu können, muss der photokatalytische Vorgang gemessen und quantifiziert werden. Sie verwenden dazu eine Versuchsanordnung und entwickeln diese weiter. Bitte erläutern Sie in einfachen Worten die Funktionsweise der Versuchsanordnung.

**Prof. Dr. Bahnemann:** Im Institut für Technische Chemie der Leibniz Universität Hannover und dem deutschen Normungsgremium wird eine Messapparatur angewendet beziehungsweise favorisiert, die in Japan bereits eine lange Tradition besitzt und inzwischen auch in der ISO-Norm 22197 publiziert ist. Diese Messapparatur ist in Abb. 1 dargestellt: Über eine definierte, zu prüfende Oberfläche (50 x 100 mm<sup>2</sup>), bestrahlt mit einer definierten UV(A)-Strahlung, wird das hinsichtlich der Abbauwirkung zu messende Schadgas NO in einer definierten Verdünnung in einem Standardgas - gemäß ISO-Norm 22197 sind dies 1 ppm NO in Luft mit einer relativen Feuchte von 50% - geleitet und die Konzentration dieses Schadgases zunächst bei abgeschalteter UV-Lampe und

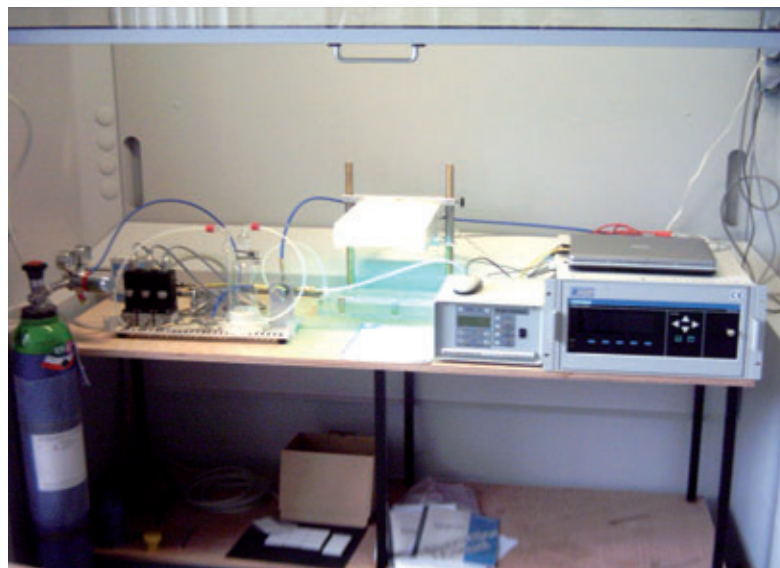


Abb. 1: Schematische Darstellung der Messzelle / Photographie

danach unter UV(A)-Einstrahlung gemessen. Anhand der Schadgasreduktion kann die Wirksamkeit der Oberfläche bestimmt werden.

**Dr. Karutz:** Die Dyckerhoff AG hat Sie beauftragt, die photokatalytische Wirksamkeit einiger Baustoffoberflächen zu untersuchen, die Titandioxid als Photokatalysatoren enthalten. Was waren in Ihren Experimenten die Ergebnisse?

**Prof. Dr. Bahnemann:** Wir haben für die Dyckerhoff AG einige dort hergestellte Materialoberflächen untersucht. Ich möchte hier die Abbauwirkung eines im Markt befindlichen Spezialzements mit Photokatalysator-Nanopigmenten sowie einer photokatalytisch modifizierten Betonoberfläche vorstellen und daran die Wirkungsweise der oben genannten Messzelle beschreiben.

Nach dem Einbau der zu untersuchenden Proben wird die Messzelle mit einem Gasgemisch aus Standardgas + 1 ppm NO/NO<sub>x</sub> ohne Bestrahlung durchströmt, bis die Baustoffoberfläche sich adsorptiv gesättigt hat. In dieser Zeit wird permanent die Konzentration der Schadgase durch einen NO/NO<sub>x</sub>-Analyser gemessen.

Danach wird für ca. zwei Stunden die definierte Strahlungsquelle eingeschaltet und der Abbau der Schadgase quantitativ festgestellt. Am Ende des Versuchs wird wieder die Strahlungsquelle ausgeschaltet und es stellt sich wieder das zu Beginn durchströmende Gasgemisch ein.

An den beiden hier gezeigten photokatalytisch aktiven Baustoffoberflächen (Abb. 2 und 3) kann deutlich die Wirkungsweise festgestellt werden: Der Beton mit dem TiO<sub>2</sub>-Nanopigment dotierten Zement weist einen NO-Abbau von ca. 1,5 % vom gesamten NO-Gehalt auf (Abb. 2), dagegen zeigt der Beton mit der photokatalytisch aktiven Oberfläche zu Beginn der Bestrahlung einen NO-Abbau von circa 70% auf, der sich mit der Dauer der Bestrahlung auf einen konstanten Wert von 50% einpegelt (Abb. 3).

An diesem Beispiel ist ersichtlich, dass es noch ein erhebliches Potenzial gibt, photokatalytisch wirksame Baustoffoberflächen zu optimieren. Das soll im Rahmen eines BMBF-Forschungsprojektes HelioClean zusammen mit renommierten anderen Forschungsinstituten und erfahrenen Industriepartnern, zu denen auch Fa.

Dyckerhoff zählt, durchgeführt werden, um damit in Zukunft Verfahren für eine nachhaltige Umweltverbesserung zu entwickeln. Die hier beschriebene Methode kann die photokatalytische Leistungsfähigkeit von Baustoffoberflächen zwar quantifizieren, ihre Praxisrelevanz muss jedoch zusätzlich auf eine andere Art und Weise nachgewiesen werden.

**Dr. Karutz:** Prof. Ricchiardi sprach eingangs schon die Möglichkeit von Simulationen an. Herr Prof. Bruse beschäftigt sich als Geoinformatiker mit der Simulation von Mikroklima und Lufthygiene in unseren Städten, z.B. Stichwort Feinstaubbelastung. Bitte erläutern Sie in einfachen Worten, welche komplexen mathematischen Vorgänge sich hinter einer solchen Simulation verbergen.

**Prof. Dr. Bruse:** Im Prinzip basiert eine Mikroklimasimulation auf den gleichen physikalischen Gleichungen und Formeln wie die Modelle zur Wettervorhersage oder zur Abschätzung des globalen Klimawandels, nur auf einem sehr viel kleineren Gebiet. Im Computer wird dazu das zu untersuchende Areal, zum Beispiel eine Straße oder ein Häuserblock, mit allen relevanten Elementen wie Häusern, Vegetation oder den verschiedenen Oberflächen dreidimensional nachgebaut. Dann berechnet man mit Hilfe strömungsdynamischer Gleichungen, wie der Wind um Hindernisse wie Häuser herumströmt und wie sich die Turbulenz entwickelt. Eine besondere Bedeutung kommt im städtischen Umfeld der Thermodynamik zu: Im Straßenraum finden wir sehr viele unterschiedliche Materialien mit sehr heterogenen physikalischen Eigenschaften, die sich unter Sonneneinstrahlung unterschiedlich stark aufheizen. Hinzu kommt, dass wir durch die dreidimensionale Struktur von Städten einen sehr komplexen Schattenwurf haben. So muss das Modell für jede Sekunde eines Modelltages berechnen, welche Fläche gerade in der Sonne ist, und welche nicht. Mit Hilfe dieser Informationen kann das Modell dann für jede Boden-, Fassaden- und Dachfläche im Modell die Oberflächentemperatur bestimmen. Zusammen mit den Wind- und Turbulenzdaten kann so berechnet werden, wie und wo sich die Atmosphäre im Straßenraum erwärmt oder abkühlt. In dieses Modell können wir dann noch Schadstoffquellen, z.B. NO und NO<sub>x</sub> vom Autoverkehr einfügen und so beobachten, wie sich die Schadstoffe in der Straße ausbreiten oder welche Auswirkungen Umwandlungsprozesse am Boden oder an Fassaden auf die Schadstoffverteilung im Straßenraum haben.

**Dr. Karutz:** Dyckerhoff hat Sie nun beauftragt, die bei Prof. Bahnmann gemessenen Werte in einer Umweltsimulation einzusetzen. Unter welchen Randbedingungen erfolgte dies, und wie sind die Ergebnisse?

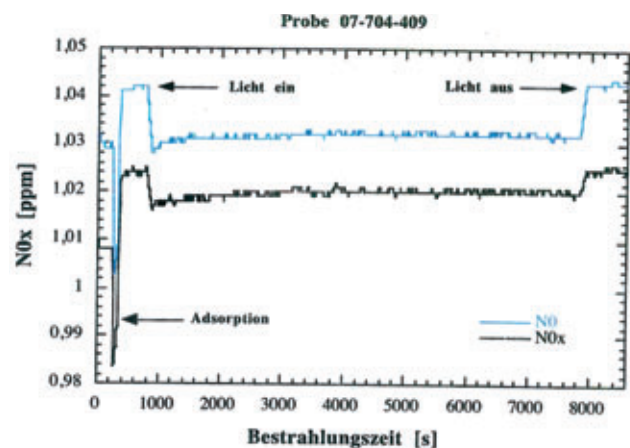


Abb. 2: Betonoberfläche mit Anatas-Nanopigmenten ausgerüstetem Spezialzement

**Prof. Dr. Bruse:** In unseren Simulationen sind wir zunächst von sehr einfachen Prozessen an der Baustoffoberfläche ausgegangen, um uns ein Bild davon zu verschaffen, welche Rückwirkung ein ausschließlich an der Oberfläche stattfindender Prozess auf die Schadstoffbelastung im Straßenraum hat. Denn letztendlich ist es für die Beurteilung der Umweltauswirkungen von photokatalytisch aktiven Oberflächen entscheidend, wie sich die Schadstoffkonzentration in den für Menschen relevanten Luftschichten verändert.

In einer Simulationsserie sind wir von einem TiO<sub>2</sub>-haltigen Zement für einen Straßenbelag aus Beton mit einer effektiven Umwandlungsrate von 1.5% NO ausgegangen. – Dabei wurden die von Prof. Bahnmann bereits erwähnten und durchgeführten Messergebnisse zugrunde gelegt. – In einer zweiten Simulationsserie wurde eine photokatalytisch aktivierte Zementoberfläche für den Straßenbelag mit einer Umwandlungsrate von 50% angenommen. Während im ersten Fall die Auswirkungen auf die NO/NO<sub>x</sub> Belastung im Straßenraum – gemessen in 2 m über Grund, also in Fußgängerhöhe – vernachlässigbar gering waren (unter 0.05% Reduktion der NO<sub>x</sub> Belastung), so konnten wir im zweiten Fall ein Reduktionspotential von bis zu 5% beobachten.

Nicht berücksichtigt wurden allerdings bisher solche Umwelteinflüsse wie die Rückstaubildung von Fahrzeugen vor Ampeln, wobei Verschattungen der horizontalen Flächen eintreten. Bisher beruht unser Modell auf idealen Voraussetzungen, also der vollen Wirksamkeit aller Flächen.

**Dr. Karutz:** Sie sprechen mögliche Einschränkungen bei der photokatalytischen Wirksamkeit horizontaler Flächen an, und geben damit zugleich das Stichwort für geneigte und vertikale Flächen: Hier bringt doch der Selbstreinigungseffekt durch das Abwaschen der Verschmutzungen durch Regenwasser noch einen ganz anderen, zusätzlichen Stellenwert.

**Prof. Dr. Ricchiardi:** Ich denke, dass die Simulationen der photokatalytischen Wirkung auf die lokale Umgebung sehr vielversprechend sind. Die Ergebnisse sind sehr vernünftig, und wir stimmen mit diesen Ergebnissen überein, die ein Wirkungspotential, aber auch starke Einschränkungen zeigen. Die Selbstreinigung betreffend, sind wir in einer besseren Situation: In diesem Fall sind die Substanzen, die wir entfernen wollen, auf der Oberfläche von Katalysatoren, und sie reagieren deshalb sehr gut. Jedoch sollten wir uns auch in diesem Fall daran erinnern, dass glücklicherweise ein Reinigungsprozess durch Exposition an Sonnenlicht ein natürlicher Prozess ist, der auf allen Materialien auftritt, und auch daran dass er nicht nur

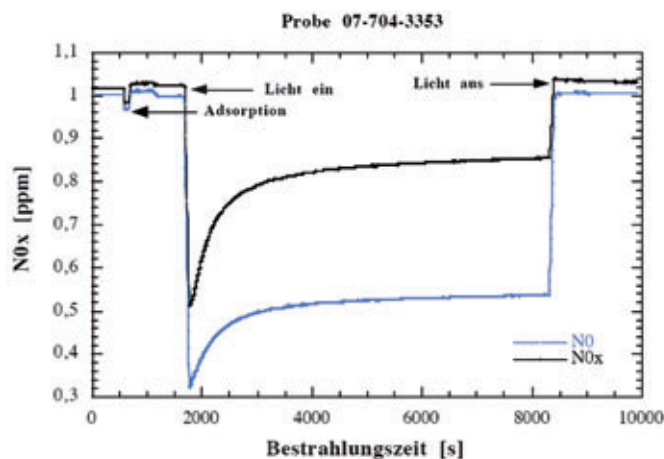


Abb. 3: Photokatalytisch aktivierte Betonoberfläche

von Photokatalysatoren, sondern auch von der Oberflächenausbildung und von Haftseigenschaften abhängt. Man muss an all diesen Aspekten arbeiten, um gute Oberflächenmaterialien zu erhalten.

**Dr. Karutz:** *Wie beurteilen Sie den Stand der Technik? Wo sehen Sie aufgrund der vorliegenden Ergebnisse derzeit sinnvolle Einsatzgebiete für photokatalytisch ausgerüstete Baustoffe? Und wo könnten Sie sich aus Expertensicht zukünftig sinnvoller Weise den Einsatz photokatalytisch ausgerüsteter Baustoffe vorstellen?*

**Prof. Dr. Ricchiardi:** Materialien mit photokatalytisch aktivierter Selbstreinigung haben eine nachgewiesene Wirkung, aber die Photokatalyse ist nur eines von vielen Merkmalen, die die Leistung dieser Materialien bestimmen. Die nachhaltige Umweltwirkung ist derzeit noch unbekannt, und ich glaube, dass noch mehr Forschungsaktivitäten erforderlich sind. Für die Zukunft haben wir zwei Herausforderungen: Erhöhung der Effizienz der Photokatalysatoren (zum Beispiel auch im sichtbaren Licht) und das bessere Verstehen ihrer Wirkung auf die lokale Umgebung, um sie auf unsere speziellen Bedürfnisse zuzuschneiden.

**Prof. Dr. Bruse:** Die nachhaltige Wirksamkeit, z.B. eines photokatalytischen Effekts auf die Luftqualität in einer Straße oder auf einem Platz, hängt vom Stofftransport zwischen der NO/NO<sub>x</sub>-Quelle hin zur aktiven Oberfläche, an der allein die Reaktion stattfindet, ab. In Laborversuchen, bei denen die Zusammensetzung einer definierten Luftsäule über einer photokatalytisch wirksamen Fläche gemessen werden kann, kann zwar die Wirksamkeit der Fläche festgestellt werden, wie sich aber diese Wirksamkeit letztendlich auf die städtische Luftqualität auswirkt und wie sich dadurch der Lebensraum von Mensch, Tier und Pflanzen verbessert, kann dadurch nicht abgeschätzt werden.

Grundsätzlich bedeutet die Anwendung des photokatalytischen Effekts eine Möglichkeit zur Verbesserung der Lebensraumqualität in Stadtgebieten, die neben anderen Möglichkeiten, wie z.B. Restriktionen, die die Emissionen von NO/NO<sub>x</sub>-Quellen eindämmen (verbesserte Autokatalysatoren, Fahrverbote, Reduktionen von Verbrennungsvorgängen usw.), effektiv eingesetzt werden kann. Mit unserem Stadtklimamodell ENVI-met, das unter anderem auch zur Simulation der Ozon- und Feinstaub-Verbreitung im Stadtbereich eingesetzt wird, können wir in Zukunft nach einer erfolgreichen Implementierung der ablaufenden chemischen und physikalischen photokatalytischen Oberflächeneffekte den Beitrag derartiger Oberflächen auf die Luftqualität abschätzen und somit Verbesserungen bei der Weiterentwicklung und Anwendung von Photokatalysatoren auf Baustoffoberflächen bewerten. ENVI-met kann daher in Zukunft ein wichtiges Tool werden, um den Fortschritt auf diesem Gebiet zu messen und seine nachhaltige Wirkung zu beweisen.

**Prof. Dr. Bahnmann:** Die heute in Deutschland und international eingesetzten Messmethoden vergleichen die Effizienz von photokatalytisch aktivierten Oberflächen. Sie lassen keine direkten Aussagen über die nachhaltige Wirkung dieser Oberflächen auf die Umwelt zu, da sie nur punktuell die Wirkungsweise feststellen. Hier ist der klimatologische Simulationsansatz von Herrn Prof. Bruse eine viel versprechende Möglichkeit, Messergebnisse auf Ihre Umweltrelevanz zu untersuchen; eine praktische Verifikation von Simulationsberechnungen auf Grundlage der Messungen der photokatalytischen Oberflächeneffizienz wäre dabei der endgültige Beweis für einen wirkungsvollen Einsatz dieses Phänomens für die Umweltverbesserung.

Allerdings besteht gerade auf dem Gebiet der eingesetzten Photokatalysatoren sowie ihrer Anreicherung in der Oberfläche noch ein großer Forschungsbedarf, wie zum Beispiel die Ausweitung der photokatalytischen Wirkung auch in dem Bereich des sichtbaren Lichtes sowie die Erhöhung der photokatalytischen Effizienz. Dazu kann das gerade startende Forschungsprojekt HelioClean im Rahmen des vom BMBF geförderten Forschungsschwerpunktes Nanotecture, in dem führende Universitätsforschungsinstitute mit kompetenten Industriepartnern zusammenarbeiten, neue Erkenntnisse und innovative Ansätze ermöglichen.

**Dr. Karutz:** *Vielen Dank, meine Herren, für Ihre ausführlichen und anschaulichen Darstellungen des komplizierten Sachverhalts. Als Experten auf den Gebieten der chemischen Katalysatormechanismen, seiner quantitativen Nachweise sowie der Mikroklimatologie und Lüftungsgiene konnten Sie uns einen Überblick über Chancen und Risiken der Photokatalyse für die Umwelt verschaffen.*

*Bevor alle Fragen hinsichtlich der optimalen Ausnutzung der photokatalytischen Eigenschaften von Baustoffen und Bauteilen in der Praxis geklärt sind, erscheint es mir allerdings noch ein langer Weg zu sein. Sehr positiv finde ich hierbei den Ansatz, nicht nur auf Baustoffebene allein die Wirkungsweise und die Auswirkungen zu untersuchen, sondern interdisziplinär zu arbeiten.*

*Vielleicht sollte dabei der Kreis derer, die sich mit diesem Phänomen befassen, auch noch auf die Städteplaner und die Architekten erweitert werden, denn wenn ich hier erfahre, dass der Prozess vornehmlich an der Oberfläche stattfindet, kann ich mir vorstellen, dass zukünftig über ganz neue Gebäude- und Oberflächenstrukturen nachgedacht wird.*

*Auf jeden Fall bin ich zuversichtlich, dass der Baustoff Beton zukünftig auch mit Blick auf die photokatalytischen Eigenschaften eine führende Rolle spielen wird und sich somit einmal mehr durch seine vielfältigen positiven Eigenschaften von anderen Baustoffen erfolgreich abhebt.*

## ■ Literatur

- [1] "Merkblatt für die Herstellung von weißem Ortbeton für Fahrbahnmarkierungen" der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen e.V., 4. Ausgabe 1965
- [2] B. Henk in Straßen- und Tiefbau, Heft 4/1959 "Die Möglichkeit der weiteren Aufhellung von weißem Markierungsbeton durch Weißpigmente"