

CO₂-freie Kohlekraftwerke

Wissenschaft und Innovation im Bereich der Energietechnik sind heute wichtiger als je zuvor. Eine bedeutende Entwicklung zum Schutze des Klimas kommt aktuell aus dem Bereich der Werkstofftechnik: Keramische Membranen sollen Kohlekraftwerke emissionsfrei machen.

Die Erderwärmung gehört zu den Themen, welche hierzulande und weltweit hitzige und kontroverse Diskussionen auslösen. So blieb der UN-Klimagipfel in Kopenhagen im Dezember 2009 ohne Ergebnis und auch die internationale Klimakonferenz im Juni 2010 ging ohne einen gemeinsamen Beschluss zu Ende. Dabei sind sich alle einig: Der Ausstoß von Treibhausgasen muss zugunsten des Klimaschutzes verringert werden. Insbesondere die Europäische Union und Deutschland verfolgen ehrgeizige Ziele. Sie wollen bis zum Jahr 2020 die Treibhausgasemissionen um 40 Prozent gegenüber 1990 senken. Deutschland hat es sich zum Ziel gesetzt, 2050 kaum noch Kohlendioxid zu emittieren. Allerdings werden solche Maßnahmen auf nationaler Ebene das Weltklima nur in geringem Maße beeinflussen. Denn in Schwellenländern wie China und Indien sind aufgrund des rapide steigenden Energiebedarfs und der hohen eigenen Kohlevorkommen viele neue Kohlekraftwerke geplant. Diese werden in den kommenden Jahrzehnten für eine beträchtliche Emission des Treibhausgases Kohlendioxid sorgen. Schon heute haben Indien und China einen Anteil von ungefähr 45 Prozent am gesamten Weltkohleverbrauch.

Neben einem Klimaabkommen von internationaler Gültigkeit bedarf es neuartiger Technologien, die in der Lage sind, die CO₂-Emissionen zu begrenzen. Die größten Hoffnungen ruhen dabei momentan auf der CCS-Technologie (Carbon Capture and Storage). Sie ermöglicht es, das entstehende CO₂ abzuscheiden und einzulagern. Dabei wird Kohle im so genannten Oxyfuel-Verfahren mit reinem Sauerstoff und rezirkuliertem Rauchgas verbrannt. So entsteht als Abgas nahezu reines Kohlendioxid mit Wasser. Nach Kondensation des Wassers kann das Kohlendioxid unter hohen Drücken verdichtet und verflüssigt werden, so dass es nicht mehr in die Atmosphäre gelangt. Größter Nachteil dieses Verfahrens ist die Verringerung des Wirkungsgrades der Kraftwerke um rund zehn Prozentpunkte. Dabei treten die höchsten Verluste bei der Bereitstellung von hochreinem Sauerstoff für die Verbrennung auf, denn das geschieht in bisher gebauten Forschungs- und Demonstrationsanlagen über das energieaufwändige Verfahren der Luftzerlegung bei niedrigen Temperaturen.

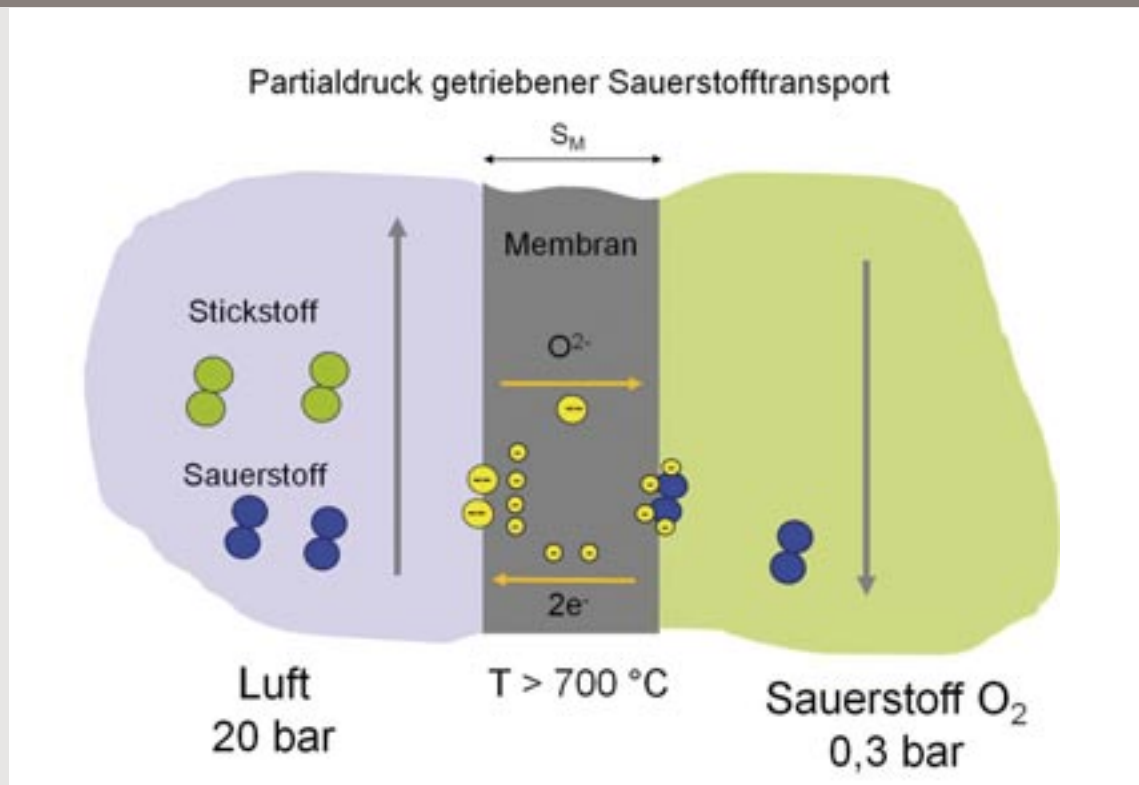
Genau an diesem Punkt setzen die Forschungen des OXYCOAL-AC Projektes an, bei dem neben RWTH-Instituten namhafte Industriepartner aus dem Bereich der Energietechnik beteiligt sind. Ziel ist die Entwicklung eines emissionsfreien Kraftwerksprozesses, der sich von dem konventionel-

len Oxyfuel-Prozess dadurch unterscheidet, dass der Sauerstoff nicht über energieaufwändige Luftzerlegungsverfahren bereitgestellt wird, sondern durch Abtrennung in einer keramischen Hochtemperaturmembran. Hochtemperaturmembranen haben gegenüber konventionellen Membranen den entscheidenden Vorteil, dass sie vollständige Selektivität für Sauerstoff besitzen und trotzdem hohe Abtrennraten erzeugt werden. Die Keramik, die dabei zum Einsatz kommt, besitzt eine dem Mineral Perowskit sehr ähnliche Struktur und hat die Summenformel ABO₃. Hierbei steht A für Erdalkalimetalle oder Seltenerdmetalle und B für Übergangsmetalle wie Kobalt oder Eisen. Die größeren A-Kationen bilden zusammen mit den O-Anionen eine kubisch dichteste Kugelpackung, wobei die wesentlich kleineren B-Kationen die oktaedrischen Lücken besetzen. Tatsächlich haben Untersuchungen gezeigt, dass die Summenformel nicht exakt einge-

Bild 1: Schematische Darstellung des Sauerstoffionenflusses durch eine keramische Membran.

halten wird; vielmehr haben die Materialien ein Sauerstoffdefizit. Dieses Defizit äußert sich in Form unbesetzter Sauerstoffgitterplätze in der Kristallstruktur, den so genannten Leerstellen. Bei höheren Temperaturen, also ab etwa 700 °C, können sich die Sauerstoffionen über diese Leerstellen durch das Membranmaterial bewegen. Die Abtrennung von Sauerstoff durch eine solche Membran erfordert aber eine gerichtete Bewegung der Ionen. Dies wird durch Anlegen einer Differenz des Sauerstoffpartialdrucks pO₂ beiderseits der Membran ermöglicht, die damit die treibende Kraft für den Sauerstofftransport durch das Membranmaterial darstellt, siehe Bild 1.

Die Zahl der Sauerstoffleerstellen im Membranmaterial hängt allerdings nicht nur vom Sauerstoffpartialdruck ab, son-



Was können keramische Membranen leisten?

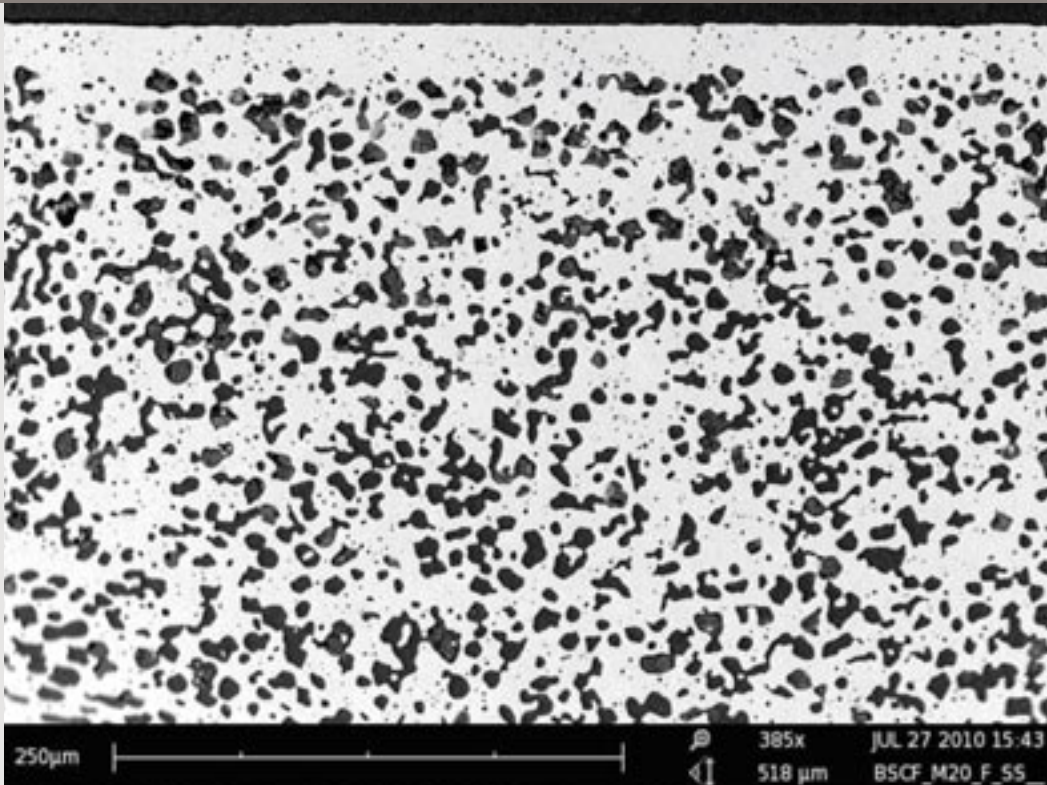


Bild 2: Schnitt durch eine dünne Membranschicht (20 µm) auf einem porösen Träger.

dern auch von der chemischen Zusammensetzung des Materials selbst. Sie kann durch eine geeignete Materialwahl erheblich gesteigert werden und damit auch der Sauerstoffdurchsatz durch die Membran.

Der Suche nach verbesserten Materialien widmet sich ein weiteres Projekt mit dem Namen MEM-OXYCOAL, in dem neben der RWTH und dem Forschungszentrum Jülich weitere Partner grundlagenorientiert forschen.

Der Sauerstoffdurchsatz wird im Allgemeinen in Form eines Permeationsflusses j_{O_2} angegeben, der die in einer Materialkonstante zusammengefassten Materialeigenschaften enthält, aber auch noch von weiteren Parametern abhängig ist. Es lassen sich drei wichtige Prozessparameter festhalten:

- Sauerstoffpartialdruckdifferenz
- Temperatur
- Membrandicke

Die Differenz des Sauerstoffpartialdrucks lässt sich in der Praxis auf unterschiedliche Weise einstellen; eine einfache Druckdifferenz ist ausreichend. Dazu wird beispielsweise an einer Seite der Membran ein Überdruck von 20 bar Luft angelegt und auf der anderen Seite ein geringer Unterdruck von circa 400 mbar. In einem Kraftwerksprozess kann man statt des Unterdrucks auch das sauerstoffarme, rezirkulierte Rauchgas nutzen.

Den zweiten Einflussfaktor bildet die Temperatur. Diese sollte so hoch wie nötig und so gering wie möglich gehalten werden. Hier gilt es, einen wirtschaftlich sinnvollen Kompromiss zu finden. Denn mit steigender Temperatur steigt zwar der Sauerstofffluss, es wird aber auch mehr Energie benötigt. Zudem ist zu erwarten, dass sich mit steigender Betriebs-

temperatur die Lebensdauer der Membranen verkürzt. Die derzeitigen Einsatztemperaturen liegen bei 850 °C.

Als dritter Einflussfaktor ist die Membrandicke entscheidend. Je dünner die Membran, desto höher ist der Sauerstoffdurchsatz. Sehr dünne keramische Membranen müssen dabei mechanisch gestützt werden, um nicht zu zerbrechen. Deshalb ist neben der Auswahl des optimalen Werkstoffs auch die Entwicklung von geeigneten Strukturen notwendig. Diese können aus einem porösen Träger mit einer dünnen und gleichzeitig dichten Membranschicht bestehen. In Bild 2 ist ein Querschnitt einer solchen Membran dargestellt.

Die eigentliche Membranschicht ist dabei nur 420 µm dick. Der Träger muss einerseits möglichst durchlässig sein, damit der Sauerstoff problemlos abgeführt werden kann. Andererseits darf er nicht zu porös sein, um eine ausreichende mechanische Stabilität zu gewährleisten. Hier gilt es ein Optimum zu finden.

Die Membranen können je nach Modulkonzept rohrförmig oder als Platten ausgeführt sein. Zur Herstellung solcher Membranen werden keramische Pulver in Form gebracht und bei hohen Temperaturen, hier 1000 bis 1200 °C, gebrannt. Bei diesem so genannten Sinterprozess verdichten die Pulverpartikel zu einem nahezu porenfreien Bauteil. Für die Herstellung poröser Bauteile werden in der Regel organische Porenbildner genutzt; das können beispielsweise Mais-, Reis- oder Kartoffelstärke sein. Diese brennen während des Sinterns aus und hinterlassen entsprechend Poren. Als Formgebungsverfahren kommen für Rohre meist das Strangpressen oder das kaltsostatische Pressen zum Einsatz. Beim Strangpressen wird das keramische Pulver zu einer knetbaren Masse verarbeitet und wie beim Spritzguss durch eine Form gepresst.

Als die vielversprechendere Methode für die Herstellung von Membranrohren hat sich das kaltsostatische Pressen erwiesen. Sie birgt die größten Aussichten auf eine großserientaugliche Fertigung. Dabei wird das keramische Pulver zunächst granuliert. Das bedeutet, ihm werden verschiedene Binder wie beispielsweise Presshilfsmittel oder Plastifizierungsmittel beigemischt. Das kugelförmige Granulat besteht aus vielen kleinen Partikeln des keramischen Pulvers, das sich, fein gemahlen wie Mehl, nur schlecht verpressen lässt. Dieses Granulat wird in Pressformen gefüllt, die aus einem Stahlkern und einer Kunststoffummantelung bestehen. Diese Formen werden anschließend in einer Flüssigkeit mit Drücken bis zu 2000 bar beaufschlagt, so dass das eingefüllte Granulat durch die flexible Kunststoffummantelung gegen den starren Stahlkern gepresst und somit zu einem Bauteil mit noch geringer Festigkeit verdichtet wird. Dieses Bauteil erhält seine endgültige Festigkeit durch den keramischen Brand. Mittels einer geeigneten Brennführung lassen sich gezielt die funktionalen



Bild 3: Nach dem isostatischen Pressen werden die keramischen Membranrohre aus den Pressformen entnommen. Danach müssen die Membranen die weitere Prozesskette (Grünbearbeitung, keramischer Brand,

Fügen an metallische Hülsen und Berstdruckprüfung) durchlaufen, bis sie schließlich in die Modul-Pilotanlage eingebaut werden können.
Foto: Peter Winandy

54

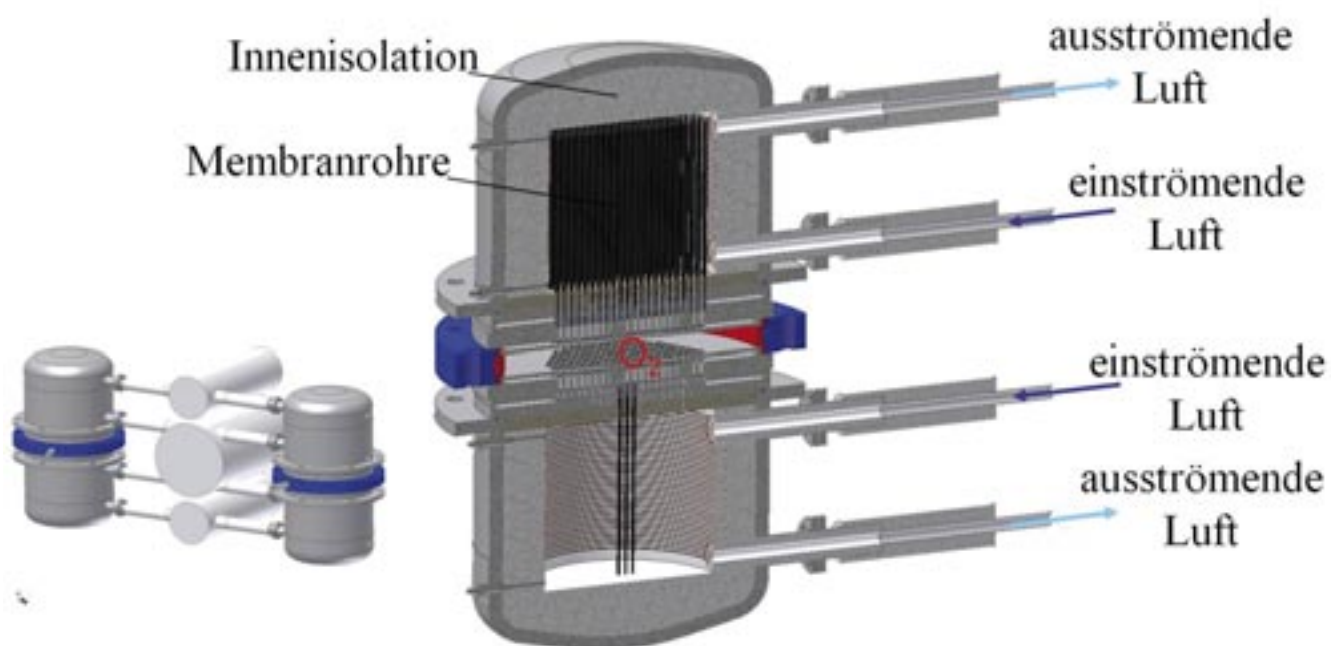


Bild 4: Schematische Darstellung der Modul-Pilotanlage.

und mechanischen Eigenschaften einstellen. Die Sinterung ist bestimmend für die Ausbildung des Mikrogefüges und dieses hat seinerseits einen hohen Einfluss auf die Festigkeit, die Langzeitstabilität und die Sauerstoffleitfähigkeit.

Für Membranen in der Form von Platten bietet sich das Folien gießen an. Die Pulver werden hier zu einem so genannten Schlicker verarbeitet, der eine sahnähnliche Konsistenz aufweist. Dieser Schlicker wird auf eine Kunststoffolie gegossen. Nach dem Trocknen bleibt eine flexible Folie zurück, bestehend aus den Keramikpartikeln und einem sehr hohen Anteil an Zusatzstoffen, die diese Partikel zusammenhalten. Diese Folie kann mehr oder weniger endlos gegossen und nach Bedarf zurechtgeschnitten werden. Durch den Sinterprozess brennen die Zusatzstoffe aus und die Keramikpartikel verdichten sich zu einer stabilen dünnen Platte.

Die vorgestellten Verfahren werden für andere Anwendungen in der keramischen Industrie bereits im großen Maßstab genutzt. Deshalb sind sie für die Membranen in Kraftwerksanwendungen besonders geeignet. Denn durch die Größe der Kraftwerke werden zukünftig Millionen Stück einzelner Membranen

benötigt, die in Modulen zusammen geschaltet werden. Eine einfache und damit kostengünstige Produktion ist daher Grundvoraussetzung.

Mithilfe des kalisostatischen Pressens hat das Institut für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau bereits eine Produktion keramischer Membranen als einseitig verschlossene Rohre im Maßstab einer Kleinserie realisiert. Dabei werden 600 Rohre zur Bestückung eines Membranmodul-Prototyps, siehe Bild 4, benötigt, welcher von RWTH-Wissenschaftlern entwickelt und im Sommer 2011 in Betrieb genommen wird.

Diese Pilotanlage kann bis zu 300.000 Liter reinen Sauerstoff pro Tag zu produzieren. Da diese Technologie noch ganz am Anfang steht, birgt sie sehr viel Entwicklungspotenzial. Zum jetzigen Zeitpunkt können noch keine Aussagen zum Langzeitverhalten solcher keramischer Membranen getroffen werden. Diese sollen in der aktuellen Projektphase des OXYCOAL-AC Projekts durch Untersuchungen im Betrieb der Pilotanlage gefunden werden. Dann sind auch erste Aussagen zur Lebensdauer solcher Anlagen möglich.

Die CCS-Technologie wird im Bereich der Kraftwerkstechnik als Brückentechnologie bezeichnet.

Denn auch wenn das anfallende Kohlendioxid nicht in die Atmosphäre gelangt, so muss es dennoch gespeichert und gelagert werden. Auch hier bietet die Natur nur beschränkte Kapazitäten. Bis es eines Tages möglich sein wird, den gesamten Energiebedarf der Welt aus regenerativen Energiequellen zu decken, bietet CCS allerdings eine sinnvolle Alternative zur Atomkraft.

Auch wenn die Technologie der keramischen Hochtemperaturmembranen bisher noch nicht am Markt eingeführt worden ist, besitzt sie dennoch ein sehr großes Potenzial für eine ganze Reihe verschiedener technischer Anwendungen. Dabei ist Ihr Einsatz nicht nur an die CCS-Technologie geknüpft. Prinzipiell sind keramische Trennmembranen überall dort interessant, wo reiner Sauerstoff benötigt wird, zum Beispiel in der Verfahrenstechnik, der Stahlindustrie und der Glasherstellung. Im Vergleich zu konventionellen Verfahren zur Sauerstoffherstellung, wie beispielsweise dem Linde-Verfahren, erscheint der Membraneinsatz besonders dann interessant, wenn die Sauerstoffabtrennung in einen schon bestehenden Hochtemperaturprozess integriert wird. Denn dort kann die zum Betrieb der Hochtemperaturmembran benötigte Wärme-

energie wirtschaftlich bereitgestellt werden. Hier ist neben der CCS-Technologie insbesondere die großtechnische Produktion von Synthesegas durch katalytische Oxidation von Methan zu nennen. Synthesegas, eine Mischung aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff, wird in großem Maßstab für die Herstellung verschiedener Grundchemikalien verwendet.

Autoren:

Dr.-Ing. Stefan Baumann ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energieforschung im Forschungszentrum Jülich. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Broeckmann ist Inhaber des Lehrstuhls für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau. Dipl.-Ing. Anke Kaletsch ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau. Dr.-Ing. Ewald M. Pfaff ist Akademischer Direktor am Lehrstuhl für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau. Dr.rer.nat. Michael Schroeder ist Privatdozent am Institut für Physikalische Chemie.

Anzeige

Zukunft braucht Energie. Deshalb arbeiten Erschließung und Entwicklung neuer Erdöl- Mit modernster Technologie und starken Nordafrika, Südamerika, Russland und dem verfügen wir über ein hohes Maß an regionaler und technologischer Expertise. Ausgebaut werden auch unsere Aktivitäten im Mittleren Osten. Als größter Erdöl- und Erdgasproduzent mit Sitz in Deutschland sorgen wir so für eine sichere Energieversorgung. Heute und in Zukunft.

www.wintershall.com

Wir fördern Zukunft.

wir international an der Suche, und Erdgaslagerstätten. Partnern. Vor allem in Europa, Raum am Kaspischen Meer



• BASF Gruppe

Fügen mit Glas

Unter dem Begriff des „Fügens“ versteht man nach DIN 8593 das dauerhafte Verbinden von mindestens zwei Bauteilen. Sie können aus gleichen, aber auch sehr unterschiedlichen Materialien bestehen. Wenn die Verbindung hermetisch dicht sein soll, dann bietet sich eine so genannte stoffschlüssige Verbindung an. Sie wird durch die Eigenschaften eines vermittelnden Fügwerkstoffes zusammengehalten. Das Verfahren begegnet einem im Alltag meist beim Kleben. In der Werkstofftechnik geht es oft darum, hermetisch dichte Verbindungen herzustellen, die für den Einsatz bei höheren Temperaturen geeignet sind. Organische Klebstoffe kommen dann nicht mehr in Frage. Ein typisches Beispiel ist die Verbindung von metallischen und funktionskeramischen Komponenten einer Sauerstoffsonde, wie beispielsweise der „Lambda-Sonde“, mit der in unseren PKW das Verhältnis von Kraftstoff und Sauerstoff optimal eingestellt wird. Das für diesen Artikel ausgewählte Beispiel ist die Hochtemperaturbrennstoffzelle SOFC (Solid Oxide Fuel Cell). Das Institut für Gesteinshüttenkunde arbeitet auf diesem Gebiet eng mit dem Forschungszentrum Jülich zusammen, um ein einfach anwendbares, praxistaugliches

Fügekonzept für die SOFC zu entwickeln.

Allgemein sind Brennstoffzellen Aggregate, welche die Energie einer Verbrennungsreaktion auf elektrochemischem Wege direkt in elektrische Energie umwandeln. Wie bei der klassischen Verbrennung reagiert dabei ein gasförmiger Brennstoff, etwa Wasserstoff oder Methan, mit Sauerstoff zu einem Abgas, also Wasser und gegebenenfalls Kohlenstoffdioxid ab. Die Verbrennungsreaktion läuft in einer Brennstoffzelle allerdings räumlich getrennt als kathodische, also Elektronen annehmende, und anodische, also Elektronen liefernde, Teilreaktion ab, siehe Bild 1. Kathode und Anode sind durch einen Ionenleiter elektrochemisch verbunden. Bei Stromlosigkeit, das heißt im Gleichgewicht, liegt an den Endphasen der Zelle eine Spannung an, die für typische Verbrennungsreaktionen etwa ein Volt beträgt. Zum Erreichen technisch nutzbarer Spannungen schaltet man mehrere Zellen als so genannte Stapel oder Stacks hintereinander. Bei Leistungsabgabe fließt ein Strom I , im Bild in technischer Stromrichtung dargestellt, über einen Verbraucher; die Zellenspannung sinkt dabei geringfügig ab.

Die SOFC bietet dabei den Vorteil einer besonders hohen Leistungsdichte. Alle ihre Kom-

ponenten sind für einen Betrieb bei typischerweise 700 bis 900 °C ausgelegt. Bei diesen Temperaturen erreicht der Feststoffelektrolyt eine hinreichend hohe elektrische Leitfähigkeit. Im Forschungszentrum Jülich wird das Konzept verfolgt, die SOFC aus planaren Einzelzellen aufzubauen. Bleche aus Chrom-Nickel-Stahl dienen als Gehäuse und als Träger für die elektrochemisch aktiven Komponenten. Das Konzept funktioniert nur dann, wenn es gelingt, alle Komponenten gasdicht und zugleich elektrisch isolierend miteinander zu verbinden. Die Funktion der Fuge muss zudem beim Durchlaufen vieler Aufheiz- und Abkühlzyklen während einer Betriebszeit von 40.000 Stunden gewährleistet sein. Eigentlich hat die Fuge mit der prinzipiellen Wirkungsweise einer SOFC gar nichts zu tun. Sie stellt scheinbar nur einen Seitenaspekt der Entwicklung dar. Tatsächlich aber steht und fällt der Erfolg der SOFC mit der Entwicklung eines geeigneten Fügekonzeptes.

Zur Lösung des Problems bieten sich Lote auf der Basis anorganischer Gläser an. Dabei wird ein Glas geeigneter chemischer Zusammensetzung pulverförmig als Paste oder Schlicker, seltener monolithisch als Folie oder Einzeltropfen, auf die Fügepartner aufgetragen. Beim

Aufheizen beginnt das Glas zu fließen und sintert zu einer monolithischen Fuge zusammen. Die Fügetemperatur liegt dabei stets etwas über der späteren Anwendungstemperatur. Je nach Glaszusammensetzung setzt parallel zum Fließen und Sintern Kristallisation ein – ein gewünschter Effekt, der dazu führt, dass das Material sich einem thermodynamischen Gleichgewicht annähert. Die Eigenschaften einer derart hergestellten glaskeramischen Fuge bleiben so über lange Anwendungszeiten hinweg konstant.

Die Herausforderung bei der Entwicklung geeigneter Stoffsysteme besteht nun darin, neben der Funktion der hermetischen Abdichtung einen Katalog weiterer Anforderungen zu erfüllen. Beim Fügeprozess selbst kommt es auf eine gute Benetzung der zu fügenden Komponenten und eine gute Fließfähigkeit an. Beides muss innerhalb eines engen Temperatur- und Zeitfensters realisiert sein. Die Fuge muss zudem die Komponenten der SOFC elektrisch voneinander isolieren, stabil in (brennstoffseitig) reduzierender und (luftseitig) oxidierender heißer Atmosphäre sein, sich unter diesen Bedingungen chemisch mit dem Stahl vertragen, in ihrem thermischen Ausdehnungsverhalten so gut an den Stahl angepasst

56

Bild 1: Prinzipskizze zur Funktionsweise einer Brennstoffzelle; I = Strom (technische Stromrichtung).

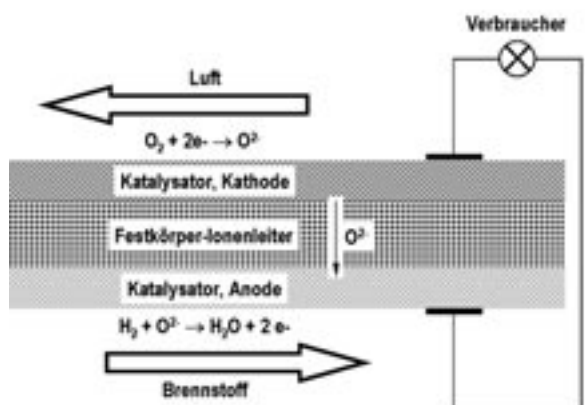
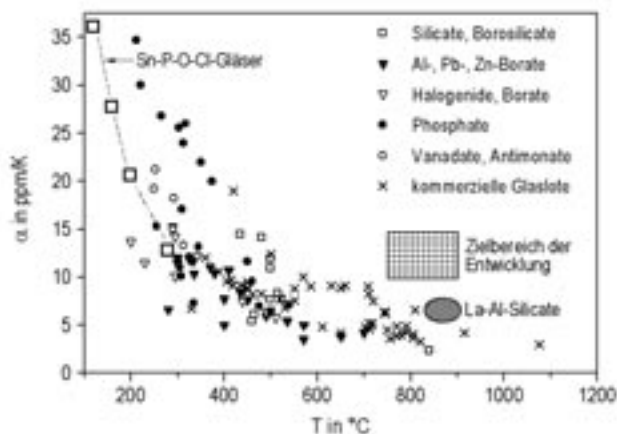


Bild 2: Zusammenhang zwischen thermischem Ausdehnungskoeffizienten und Erweichungstemperatur verschiedener Glaslote.



Entwicklung von Werkstoffsystemen für glaskeramische Lote

sein, dass die Festigkeit und Dichtigkeit des Verbundes beim Abkühlen und Aufheizen erhalten bleibt.

Greifen wir die zuletzt genannte Anforderung heraus: Der thermische Ausdehnungskoeffizient eines Werkstoffes wird in der Einheit „millionstel Teil (ppm) der Ausgangslänge je Grad Temperaturänderung“ angegeben; dabei ist es in der Wissenschaft üblich, 1 Grad Temperaturänderung nicht als 1 °C, sondern als 1 K (Kelvin) zu schreiben. Der Effekt der thermischen Ausdehnung ist nur scheinbar vernachlässigbar klein. Tatsächlich ist der Wert des eingesetzten Stahls mit 12-14 ppm/K recht hoch; er dehnt sich beim Aufheizen von Raum- auf Betriebstemperatur um etwa ein Prozent seiner Ursprungsgröße aus. Ein Blick auf Bild 2 lehrt, dass es gar nicht so einfach ist, geeignete Basisgläser mit passenden Eigenschaften zu finden. Man arbeitet gewissermaßen gegen einen natürlichen Trend an: Gläser, die im für den Fügeprozess angestrebten Temperaturbereich gut fließen, haben im Allgemeinen niedrige Ausdehnungskoeffizienten. Unter den kommerziell verfügbaren Glasloten ist kaum ein geeignetes Material zu finden. Es gilt also, neue Lotsysteme zu entwickeln, trotz des erheblichen finanziellen

und zeitlichen Aufwandes, der damit verbunden ist. Optimal sind Lösungen, die es erlauben, ein einmal gewähltes Lotsystem in gewissen Grenzen ohne großen Aufwand an sich ändernde Anforderungen anzupassen. Dazu zählt etwa eine Verschiebung der Betriebstemperatur der SOFC oder der Einsatz einer besser geeigneten Stahlsorte.

Die folgende Vorgehensweise hat sich als erfolgreicher Ansatz bewährt: Zuerst wird ein Basisglas ausgewählt, das eine gute chemische Verträglichkeit mit den Komponenten der SOFC ausweist und gute Benetzungs- und Fließeigenschaften besitzt. Die Anpassung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten wird getrennt davon durch Zugabe eines geeigneten kristallinen Zuschlages realisiert. Dieser Zuschlag hat einen deutlich höheren Ausdehnungskoeffizienten als das Basisglas. Mit Hilfe thermochemischer Modellierung werden Basisglas und Zuschlag so aufeinander abgestimmt, dass sie im thermodynamischen Sinn „koexistieren“ – so, wie Eis und Wasser bei 0 °C in beliebigen Mischungsverhältnissen stabil nebeneinander vorliegen können. Nach dem Fügeprozess erhält man dann als Füge einen glaskeramischen Verbundwerkstoff, dessen Eigenschaften sich auch während

langer Betriebszeiten nicht mehr verändern. Die Massenverhältnisse von Ausgangsglas und Zuschlag lassen sich – da sie „koexistieren“ – über einen weiten Bereich variieren. Bild 3 zeigt das Beispiel eines Lotsystems, das aus einem Barium-Magnesium-Silicatglas und kristallinem Bariumsilicat besteht. Innerhalb dieses sehr einfachen Stoffsystems lässt sich der thermische Ausdehnungskoeffizient in den Grenzen zwischen 10 und 13 ppm/K sehr genau an die Eigenschaften der Fügepartner anpassen.

In ähnlicher Weise kann man dem Lotsystem ein – ebenfalls koexistierendes – weiteres Glas zugeben, das besonders leicht fließt. Die Auswahl einer geeigneten Glaszusammensetzung erfolgt wieder mit Hilfe thermochemischer Modellierung. Parallel dazu wird die zu erwartende Viskositäts-Temperatur-Funktion modelliert. Mit Hilfe der Erhitzungsmikroskopie, einer ebenso einfachen wie effektiven Methode, wird das Ergebnis getestet, siehe Bild 4. Ein derart ausgewähltes Glas als weiterer Zuschlagstoff gewährleistet innerhalb gewisser Grenzen die Feinanpassung der Funktion „Fließfähigkeit“ während des Fügeprozesses. Eine Variation der Füge­temperatur im Bereich ±50 K ist problemlos zu erreichen. Der Weg bis zu einer erfolgrei-

chen Entwicklung eines praxistauglichen glaskeramischen Lotsystems erfordert die Lösung einer Reihe weiterer Probleme, auf die im Rahmen dieses Artikels nicht eingegangen werden kann. Ein besonders kritisches Problem ist die chemische Verträglichkeit des Ausgangsglases mit dem Stahl. Bei der Auswahl des Grundglases kommt diesem Aspekt die höchste Priorität zu. Der oben skizzierte Entwicklungsweg erlaubt es dann, ausgehend von relativ einfachen Stoffsystemen, rasch zu geeigneten und flexibel anpassbaren Lösungen zu gelangen.

Autor:
Univ.-Prof. Dr.rer.nat Reinhard Conradt hat den Lehrstuhl für Glas und keramische Verbundwerkstoffe inne.

Bild 3: Thermischer Ausdehnungskoeffizient eines Lotsystems aus Barium-Magnesium-Silicatglas und kristallinem

Bariumsilicat als Funktion des Massenverhältnisses der beiden Komponenten.

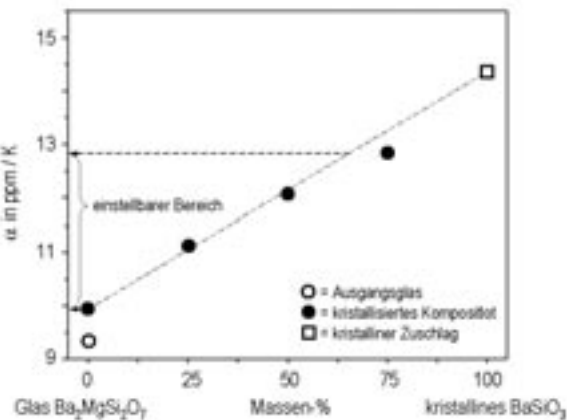


Bild 4: Näherungsweise experimentelle Bestimmung des Fließverhaltens eines Glases im Erhitzungsmikroskop; h = Visko-

sität; der spätere Fügeprozess erfolgt im Temperaturintervall zwischen T₂ und T₃.



Neue Dimensionen

Werkstoffsimulation zwischen Materialphysik

RWTH THEMEN 1/2011

Werkstoffmodellierer für metallische Werkstoffe haben es schwer: Von ihnen wird erwartet, dass ihre Modelle und Computerprogramme zu Verbesserungen von Materialien führen, an denen empirisch bereits seit Tausenden von Jahren geforscht wurde. Dies hat zur Folge, dass die heutigen industriell gefertigten Materialien bereits in vielerlei Hinsicht optimiert sind, beispielsweise in Bezug auf Festigkeit, Duktilität, Kriechfestigkeit, zyklische und thermische Belastbarkeit oder Korrosionsbeständigkeit. Die niedrig hängenden Früchte sind also längst geerntet.

Zusätzlich bedeutet die Erforschung bereits optimierter Legierungen, beziehungsweise Halbzeuge oder Bauteile häufig, dass eine Reihe physikalischer Prozesse, die während der Herstellung oder der Anwendung von Materialien ablaufen, zeitgleich signifikant aktiv sind. Hierzu sei als Beispiel die Härtung von Metallen durch ausgedehnte Partikel einer zweiten fest-

en chemischen Phase genannt. Die Härtung wird dadurch bewirkt, dass diese Partikel die Bewegung eindimensionaler Baufehler im Kristallgitter, also der Versetzungen, behindern. Die Bewegung dieser Versetzungen im Material ist der technisch wichtigste Mechanismus, der die plastische Verformbarkeit von Metallen gewährleistet. Wird die Versetzungsbewegung nun durch Partikel oder andere Gitterstörungen wie Korngrenzen, die Kristallite mit unterschiedlichen Kristallorientierungen trennen, behindert, so muss die äußere Belastung des Materials gesteigert werden, um die Versetzungen von den Partikeln loszureißen und so eine plastische Verformung zu erzwingen. Für dieses „Losreißen“ gibt es nun mehrere Mechanismen. Sind die Partikel klein, so können sie in vielen Fällen von den Versetzungen unter Energieaufwand durchschnitten und so überwunden werden. Sind die Partikel groß, so krümmen sich die Ver-

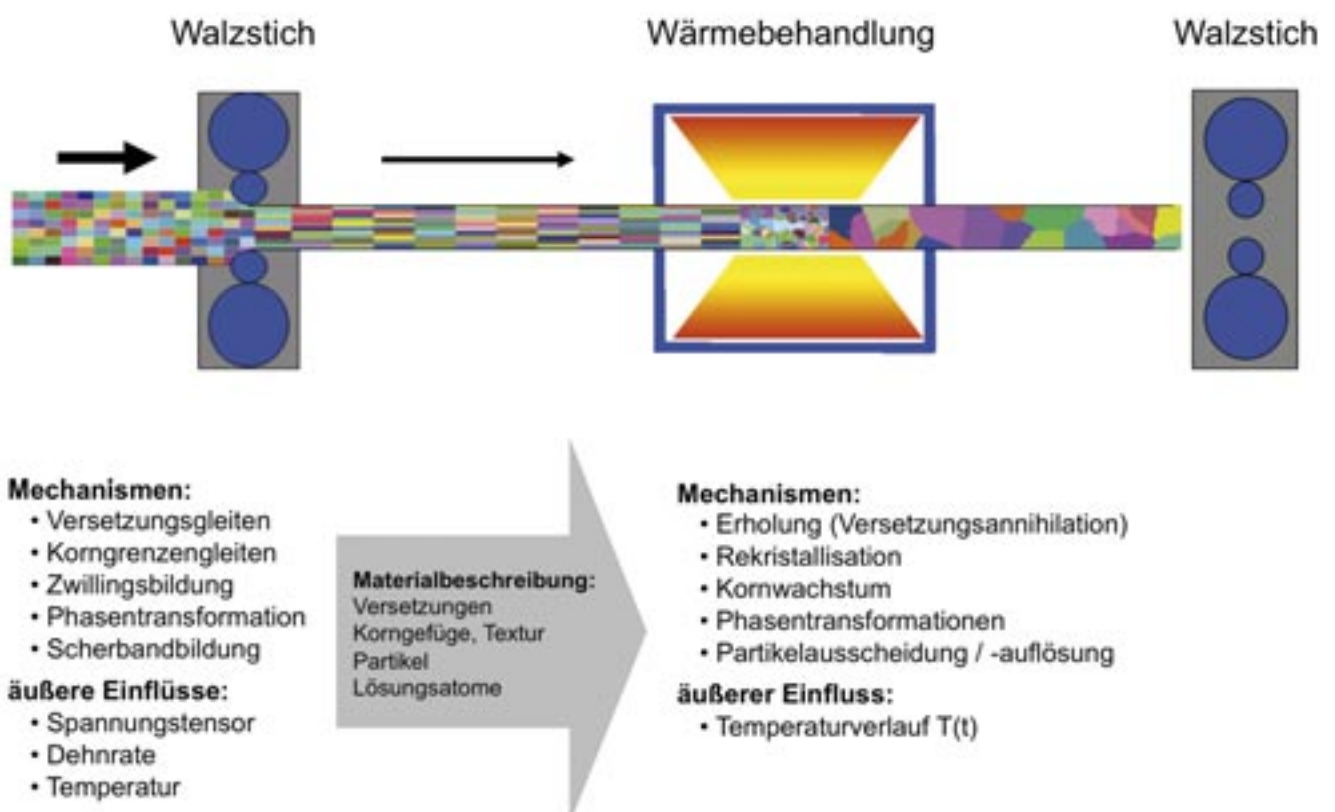
setzungen in ihren Gleitebenen so stark, dass sie die Partikel seitlich umgehen. Den optimalen Härtungseffekt erreicht man dabei, wenn die im Material vorhandene Menge an Legierungsatomen auf mittelgroße Partikel verteilt sind. Diese werden dann teils durchschnitten und teils umgangen. Bei hohen Temperaturen und langsamer Verformung kommt hinzu, dass die Partikel in dritter Dimension umklettert werden können. Es sind also mehrere Mechanismen aktiv, die alle eine plastische Verformung und damit, als schwächstes Glied der Kette, ein Versagen eines Bauteils bewirken können.

Dabei wurde hier bislang nur das Versetzungsgleiten als Mechanismus zur Formänderung betrachtet. Gerade in den hochfesten Materialien, an denen aktuell geforscht wird, sind jedoch weitere Mechanismen relevant. Ein Beispiel sind feinkörnige Materialien mit Korngrößen unterhalb eines Mikrometers, die man durch wiederholte massive Um-

formung, die so genannte „Severe Plastic Deformation“ (SPD), herstellen kann. In solchen nanokristallinen Materialien tritt das Kornzüngeln als Verformungsmechanismus hinzu, da das Versetzungsgleiten durch die vielen Korngrenzen massiv erschwert ist. Ein weiteres Beispiel sind die TRIP/TWIP-Stähle, wie sie im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 761 erforscht werden. Hier treten gleich drei weitere Verformungsmechanismen in erheblichem Maße hinzu: die martensitische Phasenumwandlung (Transformation Induced Plasticity, TRIP), die Zwillingsbildung (TWinning Induced

Bild 1: In einer Gesamtprozess-Simulation werden die physikalischen Mechanismen, die beispielsweise während der Walzstiche und der Wärmebehandlungen ablaufen, durch eine detaillierte Beschreibung des Materialzustandes verknüpft.

58



der Materialentwicklung als Schnittstelle und Prozesstechnik

RWTH THEMEN

1/2011

Plasticity, TWIP), und die Scherbandbildung. Und falls alle diese physikalischen Vorgänge nicht aktiviert werden können, beispielsweise weil sie sich gegenseitig behindern, dann bleibt noch der Bruch des Materials durch die Entstehung und Ausbreitung von Mikrorissen. Dies kann wiederum bevorzugt an den Korngrenzen oder innerhalb der Kristallite stattfinden. Im Gegensatz zur plastischen Verformung ist der Bruch als Formänderung besonders tückischer Natur, da mit der Rissausbreitung eine weitere Schwächung des Materials eintritt.

Für die Werkstoffmodellierung und -simulation bedeutet die Vielfalt gleichzeitig aktiver physikalischer Vorgänge, dass diese auch gleichzeitig berücksichtigt werden müssen, um den

Gesamtvorgang verstehen und im Idealfall weiter optimieren zu können. Die entsprechenden Simulationsprogramme und deren Kopplung werden hierdurch enorm komplex. Werkstoffmodellierer müssen in der Lage sein, die Physik der einzelnen Mechanismen zu verstehen und mathematisch zu beschreiben. Des Weiteren sollten sie diese effizient implementieren, also zu einem schnell arbeitenden Computerprogramm formen. In einem ersten Schritt muss dabei entschieden werden, welche physikalischen Effekte vereinfacht oder vernachlässigt werden können, weil ihr Beitrag nur zweitrangig ist. Wie oben ausgeführt wurde, ist dieser Schritt gerade bei bereits optimierten Materialien schwierig - oft ist die Signifikanz einzelner Beiträge

einfach unbekannt. Mögliche Vereinfachungen bestehen darin, anstelle individueller Partikel nur die Auswirkung einer statistischen Verteilung von Partikeln, oder gar nur eines einzigen „effektiven“ Partikels zu betrachten. In einem zweiten Schritt gilt es, geeignete Algorithmen zu finden und zu programmieren. Dabei muss möglichst auch auf Parallelisierbarkeit geachtet werden, damit die Simulationen von der weiteren Entwicklung der Prozessoren hin zu vielen Rechenkernen profitieren kann. Die in den beiden Schritten erreichte Effizienz ist von immenser Wichtigkeit. Zwar wächst die zur Verfügung stehende oder bezahlbare Rechenleistung weiterhin exponentiell an, aber ihr Nutzen kann im Handumdrehen vollständig vernichtet werden: Ent-

weder dadurch, dass letztlich irrelevante Dinge berechnet werden (Schritt 1) oder dadurch, dass mit schlechter Skalierung in Bezug auf die Anzahl berechneter Objekte oder rechnender Kerne programmiert wird (Schritt 2). Werkstoffsimulationen erfordern daher sowohl physikalisches als auch mathematisch-informatisches Verständnis.

Die Vielfalt gleichzeitig im Material ablaufender Prozesse bedeutet aber auch, dass die Mikrostruktur des zu simulierenden Materials - unabhängig von der konkreten Simulationstechnik - in vielerlei Hinsicht genau charakterisiert werden muss. Die Charakterisierung dieses Ausgangszustandes kann im Prinzip experimentell erfolgen. Dies ist aber nicht nur mit hohem Aufwand verbunden, sondern oft-

Anzeige



Dik Lokhorst,
Entwicklungsleiter, Aachen

Wir suchen die richtig Guten. Software-Ingenieure und Architekten

- die unsere weltweit eingesetzten Echtzeitsysteme für den Öffentlichen Verkehr mitgestalten wollen,
- die nicht nur ein paar Programmiersprachen, sondern Objektorientierung als Konzept beherrschen,
- die komplexe Anforderungen in modulare Architektur und robuste Software umsetzen können,
- die mitdenken, mit ihren Lösungen überzeugen und Verantwortung übernehmen wollen,
- Frauen und Männer, die mehr als nur einen Job suchen.

Mehr über uns und unsere Systeme erfahren Sie unter www.ivu.de

IVU Traffic Technologies AG
Borchersstraße 20
52072 Aachen
job@ivu.de





mals schlicht unmöglich. Eine Walzstraße zur Produktion von Blechen oder Folien kann beispielsweise nicht einfach angehalten werden, um einen Zwischenzustand zu ermitteln. Ebenso kann eine Branne nicht „abgeschreckt“ werden, um ihren mikrostrukturellen Zustand zwecks Untersuchung einzufrieren. In einigen Fällen lässt sich immerhin mit optischen in-situ-Methoden eine Teilcharakterisierung an der Oberfläche vornehmen, beispielsweise in Hinblick auf Textur und Korngrößen, aber ein Blick ins Innere ist im Allgemeinen nicht möglich. Daher ist es notwendig, auch diesen Ausgangszustand durch Simulationen zu ermitteln und eventuell auch den Zustand davor. Solche Simulationen ganzer Prozessketten wurden an der RWTH erstmals in den Jahren 1994 bis 2005 durch den Sonderfor-

schungsbereich 370 etabliert und danach bis 2008 im Transferbereich 63 weiter zur Anwendungsreife gebracht. Neben der Berücksichtigung aller Prozessparameter ist für die Gesamtprozesssimulation entscheidend, dass die Materialbeschreibung nicht in Form beliebiger, angepasster Simulationsparameter, sondern in Form physikalisch bedeutsamer Zustandsvariablen erfolgt, also der Korngröße, der Textur und der Versetzungsdichte. So wird sichergestellt, dass experimentell ermittelte Daten als Ausgangspunkt einer Simulation dienen können und deren Ergebnisse wiederum genauer validierbar sind. Während einer Wärmebehandlung, wie sie beispielsweise im Laufe einer Blechproduktion mehrfach auftritt, siehe Bild 1, finden Erholung, Rekristallisation, Kornwachstum und die Ausscheidung oder Auf-

lösung von Partikeln sekundärer Phasen statt. Dabei ändern sich die Versetzungsdichte, Korngröße, Textur, Partikeldispersion und Lösungsgehalte von Fremd-Atomen. Dies erfolgt in Produktionsprozessen meist lokal unterschiedlich, da die Temperaturentwicklung am Rand und im Inneren des Materials unterschiedlich verläuft oder wenn aus dem vorangegangenen Prozessschritt bereits Inhomogenitäten resultierten. Schon kleine Temperaturänderungen können drastische Auswirkungen zeigen, da sie stark die Geschwindigkeiten thermisch aktivierter Prozesse steuern, wie beispielsweise Diffusion, Korngrenzenwanderung oder Versetzungsklettern. Vor allem können sie aber auch abrupte Phasenübergänge bewirken, mit entsprechenden Auswirkungen auf alle anderen Vorgänge. Ortsaufgelöste Information über

Bild 2: Zur Validierung der Prozesssimulationen werden die Mikrostruktur und, wie hier, die mechanischen Eigenschaften des Materials experimentell untersucht. Foto: Peter Winandy

diese physikalisch vielschichtigen Abläufe kann zur Modellvalidierung genutzt werden. Sie muss aber auch an eine nachfolgende Umformsimulation weitergegeben werden, die diese in unterschiedlichster Weise benötigt. Durch die Verwendung echter Zustandsparameter können Simulationsmodelle später auch durch neue, genauere Modelle ersetzt werden.

Bis heute hat die Thematik der Gesamtprozesssimulation nichts an Aktualität verloren. Im Gegenteil: Wie anfangs ausge-



Anzeige




Der Veranstaltungs- ort der Region.

Ob Kongress, Tagung,
Konzert, Ballettaufführung,
Ball oder Ausstellung:
hier finden Sie stets
den richtigen Rahmen.

Top-Technik, variables
Raumangebot, Spitzen-
gastronomie, Kongress-
Service etc. sind hier
selbstverständlich!

**Das gewisse "Mehr" bei uns:
Individueller Service.**

Wir informieren Sie!

Eurogress Aachen
 Monheimsallee 48
 52062 Aachen
 Telefon 0241/9131-230
 Telefax 0241/9131-200
info@Eurogress-Aachen.de

Foto: www.fotostudio-bergmann.de

führt, sind es gerade die anspruchsvollen, bereits hoch optimierten Materialien und Prozessen, die eine sehr detaillierte Charakterisierung und Modellierung erfordern. Bei der Pionierarbeit des SFB 370 konnte dies nur in Ansätzen geleistet werden. Obendrein wachsen die ökonomischen und ökologischen Ansprüche, beispielsweise durch einen verstärkten Einsatz von Recycling-Materialien. Diese verursachen kleine, aber nicht vernachlässigbare Schwankungen der chemischen Zusammensetzung, deren meist negative Auswirkungen auf die angestrebten Materialeigenschaften zumindest abgeschätzt werden müssen. Im Idealfall könnte solchen Auswirkungen über eine prozessintegrierte Werkstoffsimulation mit leichten Eingriffen in den Produktionsablauf entgegengesteuert werden. Für den Weg dorthin sei-

en drei aktuelle Ansätze an der RWTH genannt: Das AixViMaP-Projekt (aixvipmap.de) im Rahmen des Exzellenzclusters „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“ entwickelt eine Internet-Plattform, die eine automatisierte Kopplung von Simulationsprogrammen zu möglichst breit gefächerten Prozess- und Materialmodellen anstrebt. Auch das „SimWeb“ des Instituts für Metallkunde und Metallphysik (lx7.imm.rwth-aachen.de) ist ein Internet-Portal, auf dem speziell auf die Blechproduktion zugeschnittene und aufeinander abgestimmte Simulationen bereits ausgeführt werden können. Des Weiteren gibt es die interdisziplinäre, werkstoff- und prozessübergreifende Arbeitsgruppe „SimPRO“ des Forums Materialwissenschaft und Werkstofftechnik (wefo.rwth-aachen.de). Diese Arbeitsgruppe ging aus dem

vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Kompetenzzentrum für Prozesssimulation hervor und ist ein Zusammenschluss verschiedener Forschungseinrichtungen aus dem Umfeld des genannten Forums. Hier wird das Know-how zur Modellierung und Simulation von Materialien und Herstellungsverfahren gebündelt, und es werden neue Ansätze zu deren Verknüpfung entwickelt. Der Anfang dieses Beitrags enthielt die Klage, dass die niedrig hängenden Früchte in der Materialentwicklung schon geerntet seien. Dies erkennt natürlich völlig, dass mit den Simulationen neue Werkzeuge bereitstehen. Allein die Rechenkapazität, die in den nächsten zwei Jahren neu hinzukommen wird, erreicht grob die aufsummierte Kapazität sämtlicher bisher existierender Computer. Entspre-

chend könnten Simulationen, die heute entwickelt werden, morgen in Steuerungsrechnern einer Produktion ablaufen. Der bremsende Faktor in dieser Entwicklung liegt in der wachsenden Komplexität der Programme durch parallel ablaufende, wechselwirkende Prozesse, durch die auch die sequenzielle Modellkopplung in der Prozesskette immer komplizierter wird. ■

Autor:
Priv.-Doz. Dr.rer.nat. Volker Mohles leitet die Arbeitsgruppe Simulationen¹ am Institut für Metallkunde und Metallphysik.

Textilbetonbandagen für den Aachener Dom

RWTH THEMEN 1/2011

Wie kann ein Riss über Jahrhunderte gesichert werden? Der Dom zu Aachen ist eines der bedeutendsten und ältesten Kulturdenkmäler sowie Geschichtsmonument auf deutschem Boden. In Anerkennung seines hohen Erhaltungswertes wurde er als eines der ersten Denkmäler von der UNESCO in die Liste der Objekte des Welt-erbes der Kultur aufgenommen. Zusammen mit der ehemaligen Pfalz Karls des Großen, dem heutigen Rathaus, bildet der Dom bis heute den städtebaulichen Mittelpunkt der Stadt Aachen.

In den vergangenen Jahren wurden umfassende Instandsetzungsmaßnahmen im Außen- und Innenbereich des Doms durchgeführt. Im Zuge der Instandsetzungsarbeiten an den neobyzantinischen Mosaiken im Innenbereich wurde unter anderem ein Riss im Bereich des Gewölbes des Sechszehneckes unmittelbar oberhalb der Mosaik festgestellt. Im Rissverlauf gefundene Reste eines Bleivergusses lassen darauf schließen, dass der Riss aus der Bauzeit des Doms stammt und infolge eines Erdbebens im Jahre 803 entstanden ist. Infolge von Riss-

bewegungen sind die Mosaik deutlich geschädigt worden.

Um Rissbewegungen dauerhaft auf ein unschädliches Maß zu reduzieren, ist eine kraftübertragende und flexible Verbindung der beiden Rissufer erforderlich. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Höhe der Verstärkung aufgrund des Dachaufbaus maximal 30 mm betragen darf. Selbstverständlich sollte der Eingriff in den Bestand durch die Instandsetzungsmaßnahme den Regeln des Denkmalschutzes entsprechen und eine Lebensdauer von möglichst mehreren hundert Jahren aufweisen.

Lösungsansatz

Eine „traditionelle“ Möglichkeit die Rissbewegungen zu minimieren, ist die steife Verbindung der Rissufer mittels Stahlklammern, die auf beiden Seiten des Risses in das Mauerwerk eingebunden werden. Problematisch bei diesem Verfahren ist, dass infolge der punktuellen Belastung des Mauerwerks die Gefahr des Ausreißens der Stahlklammern besteht. Dies kann durch eine flächige Bandage, die die Rissufer flexibel miteinander ver-

bindet, verhindert werden. Eine Möglichkeit der Ausführung einer solchen flexiblen flächigen Bandage ist die Verwendung von faserverstärkten Kunststoffbahnen, die mittels Reaktionsharzen auf den Untergrund geklebt werden und die Steifigkeit anhand des Fasergehalts eingestellt werden kann. Solche ausschließlich kunstharzgebundenen Materialien kommen sowohl aufgrund der Anforderungen des Denkmalschutzes als auch aufgrund der begrenzten Dauerhaftigkeit für das vorliegende Projekt nicht in Frage. Eine alternative elastische Rissuferverbindung ist die Verwendung einer bewehrten dünnen Mörteltasche, die sowohl flexibel als auch lastabtragend wirken kann. Eine Möglichkeit ein solches dünnes, lastabtragendes und flexibles Bauteil herzustellen, ist der Einsatz des Werkstoffes „Textilbeton“.

Textilbeton ist eine Weiterentwicklung des klassischen Stahlbetons, der die Herstellung von dünnwandigen und hochbelastbaren Bauteilen ermöglicht. Bei Textilbeton wird anstelle einer Stahlbewehrung eine Bewehrung auf Basis von technischen Textilien aus alkali-

beständigem Glas oder Carbonfasern mit einem Durchmesser von wenigen Millimetern verwendet. Neben der hohen Zugfestigkeit dieser Materialien, die das Zehnfache der Zugfestigkeit des Stahls betragen, ist der geringe Durchmesser der Bewehrung im Wesentlichen dafür verantwortlich, dass sehr dünne und trotzdem hochbelastbare Bauteile realisiert werden können.

Um einen möglichst effektiven Schutz der innenliegenden Mosaik zu erzielen, sind die Rissbewegungen mit einer möglichst steifen Rissbandage zu minimieren. Die konstruktiven Randbedingungen vor Ort, die maximale Höhe der Rissbandage beträgt 30 mm, sowie die Zusammensetzung des Mörtels ermöglichen maximal den Einbau von zwei Lagen Bewehrung. Aufgrund der Anforderungen an die Dauerhaftigkeit sowie einer möglichst hohen Steifigkeit wurde ein epoxidharzgetränktes, biaxiales Carbondetextil bestehend aus 1600 tex (1600 g/km Länge) Faserbündel, so genannten Rovings, mit einer Maschenweite von 8 mm als Bewehrung der Rissbandage vorgesehen. Im Rahmen von Untersuchungen vor Ort wurde festgestellt, dass der Untergrund Höhendifferenzen von bis zu 10 cm aufweist. Diese Höhendifferenzen sind der Bauweise des Gewölbes von innen nach außen geschuldet, da die außenliegende Seite der letzten Steinreihe nur grob bearbeitet wurde. Um die Applikation einer textilbewehrten Rissbandage zu ermöglichen, ist allerdings ein vergleichsweise ebener Untergrund erforderlich. Daher wurde ein Egalisierungsmörtel („Estrich“) zusätzlich zu dem Mörtel der Rissbandage entwickelt und im Aufbau vorgesehen.

Damit eine ausreichende Rissverteilung innerhalb der Bandage erreicht wird, musste eine dauerhafte Maßnahme zur Rissverteilung oberhalb des



Bild 1: Risse in den wertvollen Deckenmosaiken des Aachener Doms.

Wie kann ein Riss über Jahrhunderte gesichert werden?

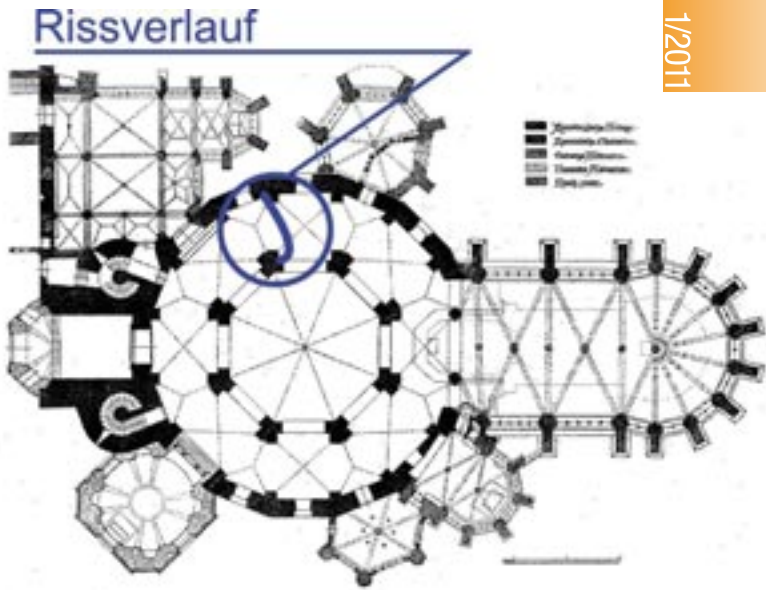
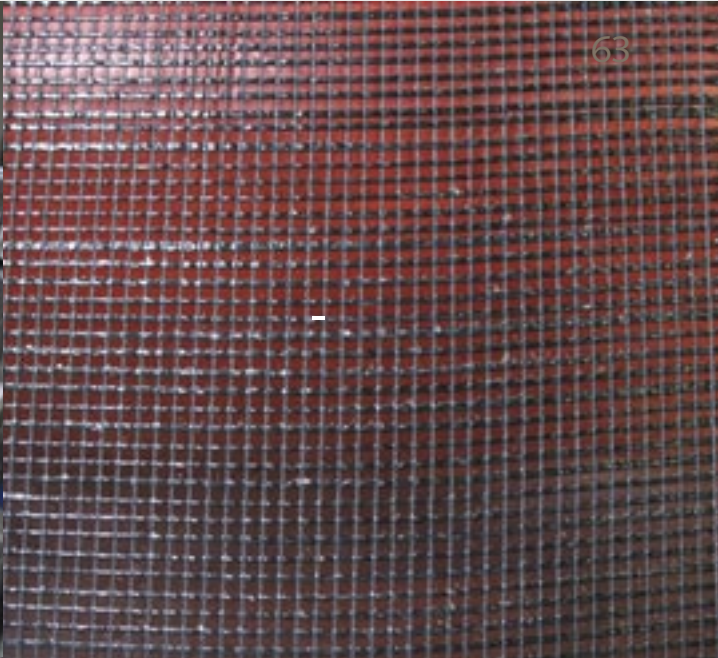


Bild 2: links: Ansicht des Risses – Aufnahme vom Dach des Sechszehneckes aus vor der Schutzmaßnahme; rechts: Rissverlauf im Grundriss.

Bild 3: links: Herstellung der getränkten Bewehrungsstrukturen; rechts: Detailaufnahme der verwendeten Bewehrungsstruktur.



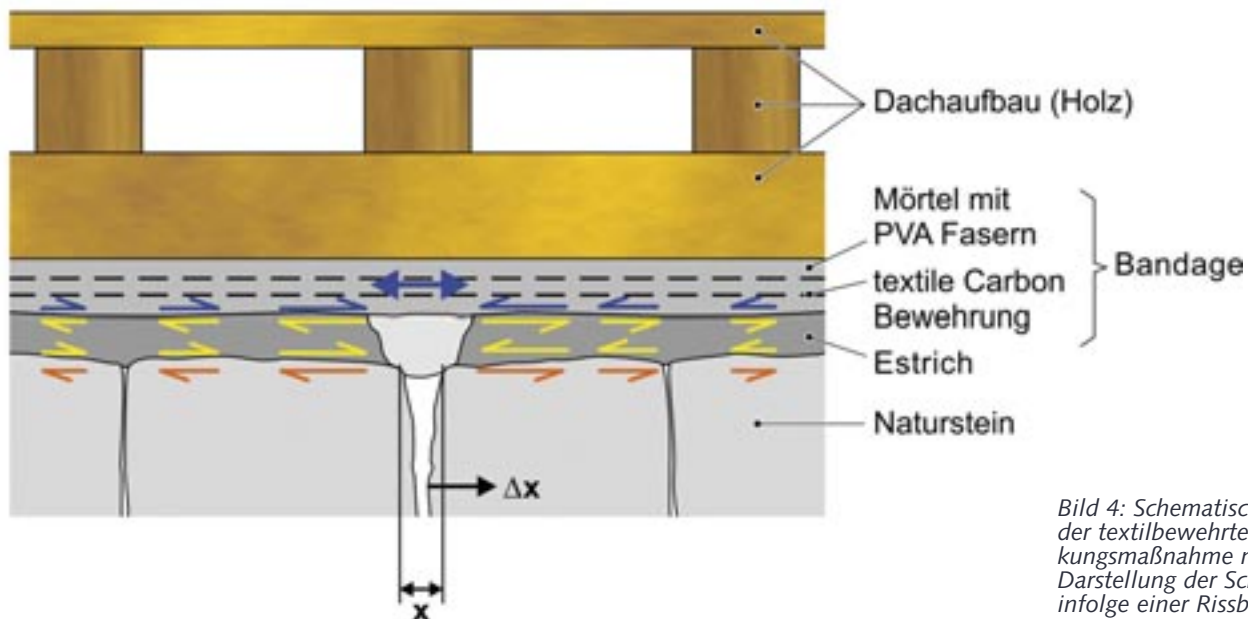


Bild 4: Schematischer Aufbau der textilbewehrten Verstärkungsmaßnahme mit Darstellung der Schubkräfte infolge einer Rissbewegung Δx .

Risses konzeptioniert werden. Als Alternative zu dem Einbau einer Trennlage wurde der Einbau eines Mörtelstreifens oberhalb des Risses vorgesehen, der auf einer Breite von maximal 20 cm eine deutlich geringere Festigkeit als der Estrich aufweist. Dies hat zur Folge, dass sich Rissbewegungen innerhalb der mechanisch schwachen Schicht verteilen und nicht in einen diskreten Riss umgewandelt werden.

Entwicklung im Labor

Als Grundlage für die Entwicklung des Feinbetons diente eine Mörtelentwicklung, die für den Vergussmörtel der Instandsetzungsarbeiten an der Aachener Chorrhalle am Institut für Bau-forschung durchgeführt wurde. Als Bindemittel kommen neben einem speziellen Zement Weißkalkhydrat, Hüttensand rheinischer Trass sowie Kalksteinmehl zum Einsatz. Die Festlegung

des Größtkorns der Gesteinskörnung bei textilbewehrten Bauteilen erfolgt in Abhängigkeit der Maschenweite der textilen Bewehrung. Es wurde daher ein Sand mit einer maximalen Korngröße von 0,6 mm ausgewählt. Aufgrund der bei der Egalisierung des Untergrundes zu erstellenden Schichtdicken wurde für den Estrich eine gröbere Gesteinskörnung mit einer maximalen Kornfraktion von 4 mm gewählt. Weiterhin erhielten beide Mörtelmischungen Kurzfasern aus PVA mit einer Länge von 8 mm als Zugabe, um eine Minimierung der Rissbreite sowie der Rissabstände zu erreichen.

Die Charakterisierung der Bewehrung erfolgte anhand von einaxialen Zugversuchen. Die Zugfestigkeit des Textils beträgt circa 2500 N/mm² (Newton per Quadratmillimeter) je Roving. Neben den einzelnen Materialkomponenten wurden

auch Verbundprobekörper untersucht. Dafür wurde ein Rissüberbrückungsprobekörper aus Beton entwickelt. Er weist einen mittigen Riss sowie eine 2 cm tiefe Vertiefung im Bereich des Risses über eine Länge von 20 cm auf. Diese Vertiefung repräsentiert die mittels eines Mörtelstreifens erzeugte freie Dehnlänge. Dieser Grundkörper wurde nicht aus Naturstein, sondern aus Beton hergestellt, da die Schwankungen der mechanischen Eigenschaften von Natursteinen erheblich größer sind. Die Länge des Probekörpers wurde ebenfalls anders als die Bedingungen vor Ort gewählt, da bei einer Probekörperlänge von 120 cm eine Vorschädigung während der Versuchsvorbereitung nicht sicher ausgeschlossen werden kann. Die Belastung der Probekörper erfolgt in einem einaxialen Zugversuch mit einer konstanten Verformungsgeschwindigkeit

von 0,1 mm/min. Die Probekörper sind starr mit der Prüfmaschine gekoppelt und während des Versuchs verhindern zwei reibungsfrei eingebaute Stahlstangen ein Abkippen. Während des Versuches wird sowohl die Kraft als auch die Rissöffnung an beiden Seiten der Probe erfasst. Die Versuchsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Probekörper weisen im Zustand I eine Steifigkeit von etwa 400 kN/mm je laufenden Meter auf. Dies entspricht der Größenordnung der im Rahmen der Vorbemessung ermittelten möglichen Federsteifigkeit einer mörtelbasierten Rissbandage und zeigt, dass die Verbundtragwirkung der Rissbandage aktiviert werden kann.
- Nach dem Erreichen der Erstrisslast kommt es zu einer Aktivierung des Bewehrungs-

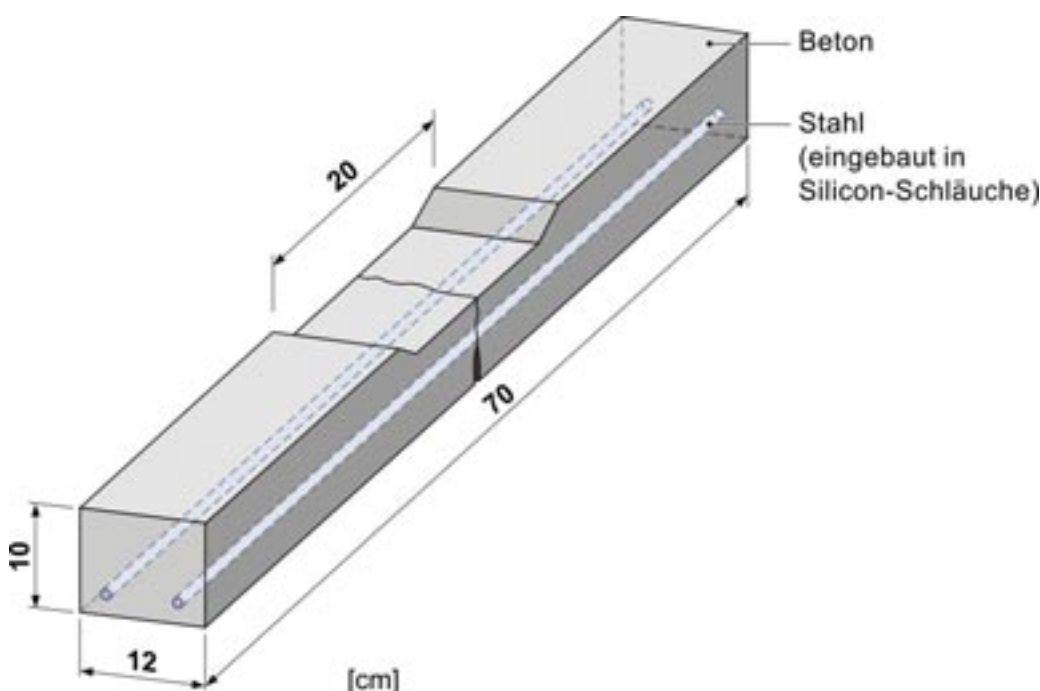


Bild 5: Isometrische Darstellung des Grundkörpers.



Bild 6: Einbau des Estrichs zur Egalisierung des Untergrundes. Die textilbewehrte Rissbandage wurde im Anschluss an die Nachbehandlung mittels Lamiertechnik frisch-in-frisch auf den Estrich appliziert.

traganteils und die Last kann weiter von der Rissbandage aufgenommen werden.

- Das Versagen des Substrates bei beiden Grundkörpern repräsentiert nicht die Verhältnisse vor Ort, da bei dem Aachener Dom die Verbundfuge zwischen Mauerwerk und Rissbandage deutlich länger ist und es somit zu einem späteren Versagen kommen wird.

Vom Labor auf die Baustelle

Nach der Entwicklung der Materialien und der Konstruktion im Labor stand die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse in die Praxis an. Zunächst wurde der Untergrund gereinigt und Lockermaterial entfernt. Nach der Untergrundvorbereitung erfolgte die Egalisierung mit dem Estrich. Um einen ausreichenden Verbund zwischen Estrich und Rissbandage zu erzielen, wurde

die Oberfläche mittels einer Zahnkelle aufgeraut. Der farblich abgesetzte Mörtelstreifen unmittelbar oberhalb des Risses dient zum einen der Einstellung der freien Dehnlänge und zum anderen der Kennzeichnung des Rissverlaufs. Der Estrich wurde für insgesamt 18 Tage mit feuchten Tüchern nachbehandelt.

Langzeitmonitoring der Rissbandage

Entscheidend für eine Beurteilung der Wirksamkeit der Rissbandage ist die Kenntnis der Verformungen, die während der Nutzung auftreten. Um dies beurteilen zu können wurden innerhalb der Rissbandage sechs interne Dehnungsmessstreifen (DMS) sowie drei Temperaturfühler eingebaut. In Kombination mit einem vor Ort installierten Datenlogger können so die Verformungen der Rissbandage infolge Temperatur und Bewegungen aus dem Untergrund er-

fasst werden. Die bereits vorliegenden Messungen zeigen, dass die Rissbandage in der Lage ist, die vorhandenen Bewegungen aufzunehmen und sich wie eine Feder flexibel zu verformen.

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes wurde mittels der Verknüpfung traditioneller und innovativer Materialien eine dauerhafte Maßnahme zur Substanzerhaltung des Aachener Doms entwickelt. Aufgrund des modularen Aufbaus der Rissbandage ist es möglich, das Verfahren an andere Randbedingungen anzupassen. Das installierte Langzeitmonitoring demonstriert, dass die Rissbandage in der Lage ist, Bewegungen und die Lasten, die aus dem Untergrund auf die Bandage wirken, aufzunehmen und sich ebenfalls flexibel zu verformen.

Autoren:

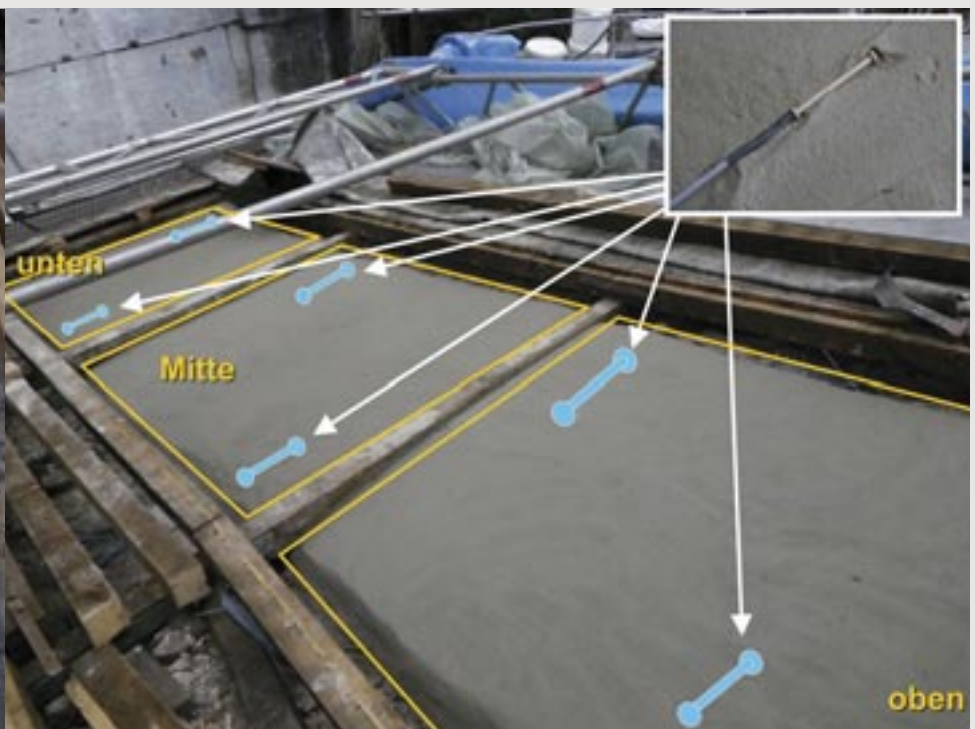
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Raupach leitet das Lehr- und Forschungsgebiet Bauwerkserhaltung und Instandsetzung und das Institut für Bauforschung.

Dipl.-Ing. Till Büttner ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bauforschung – Arbeitsgruppe Erhaltung und Instandsetzung.

Bild 7: Darstellung des lagenweisen Aufbaus der textilbewehrten Rissbandage.



Bild 8: Lage der Dehnungsmessstreifen in der Rissbandage.



Gewürzmetalle in Hochleistungs- werkstoffen

Das Wachstum der europäischen Wirtschaft hält aufgrund des Erfolges in den Bereichen der angewandten Technologien und der Hochtechnologien an. Diese benötigen zahlreiche Metalle, die nur schwer auf dem Weltmarkt zu erhalten sind, da sie größtenteils als so genannte Koppelprodukte bei den entsprechenden Gewinnungsverfahren der Hauptmetalle in vergleichsweise geringen Mengen dargestellt werden können. Zu den derart knappen und seltenen Metallen zählen beispielsweise Indium, Tantal, Lithium und Palladium. Sie sind zur Herstellung hochtechnisierter Geräte, wie Mobiltelefone, Flachbildschirme und Solarzellen, unverzichtbar, obwohl sie nur in kleinen Mengen benötigt werden. Prof. Armin Reller aus Augsburg verdeutlichte dieses besondere Verhältnis von Menge und Wirkung einmal am Beispiel des Rezepts für einen Safran-Risotto. So wie man für die Zubereitung der italienischen Spezialität Safran benötigt, braucht man für die Herstellung eines Flachbildschirms oder eines Touchscreens unbedingt etwas Indium: In einen Risotto für vier Personen kommen 0,1 bis 0,2 g Safran, dies entspricht circa 100 ppm (parts per million) Safran pro Portion. Zur Herstellung eines Flachbildschirms wird 1 g Indium, also circa 200 ppm, gebraucht. Ein weiteres Beispiel: In einem typischen, härtesten Konstruktionsstahl liegt der Niobgehalt bei ungefähr 100 ppm.

Um ein Kilo Safran zu gewinnen, braucht man etwa 80.000 bis 150.000 Blüten beziehungsweise 500.000 Blütenstempel einer bestimmten Krokus-Art, dem *Crocus sativus*, die getrocknet als Gewürz verwendet werden. Der *Crocus sativus* wird im Iran, in Kaschmir und im Mittelmeerraum angebaut und kann nur in Handarbeit gepflückt und verarbeitet werden. Das Gewürz Safran trägt aufgrund der roten Farbe der Stempelfäden und wegen seines hohen Preises von ungefähr 8.000 Euro pro Kilogramm auch den Namen „rotes Gold“. Indium wird entsprechend als

„Gewürzmetall“ bezeichnet, da man zwar nur sehr geringe Mengen dieses Schwermetalls für einen Flachbildschirm braucht, der Rohstoff jedoch sehr knapp und teuer ist: Ein Kilogramm Indium kostet derzeit 380 Euro. Das Metall kommt kaum in gediegenem Zustand vor. Die größten Vorkommen liegen in Zinkerzen, insbesondere in Sphalerit, dessen Vorkommen sich in Kanada, China und Peru befinden. Indiumhaltige Erze werden aber auch in Australien, Bolivien, Brasilien, Japan, Russland, Südafrika, den USA und einigen europäischen Ländern gefunden. Indium wird hauptsächlich als Nebenprodukt bei der Produktion von Zink oder Blei gewonnen. Die theoretischen Indium-Reserven werden auf 16.000 Tonnen geschätzt, von denen derzeit nur 11.000 Tonnen abbaubar sind, das heißt die natürlichen Indium-Reserven werden in naher Zukunft erschöpft sein. Es stellt sich die Frage, womit man dann Flachbildschirme und Touchscreens „würzen“ kann, damit sie ihre komplizierten Funktionen weiterhin ausführen können. Ein Risotto lässt sich zwar auch mit Kurkuma gelb färben, aber der typisch-würzige Safrangeschmack ist dann verloren.

Kritische Rohstoffe

Politik- und Wirtschaftsverbände befürchten zukünftige Versorgungsengpässe für die „Gewürzmetalle“ Gallium, Scandium, Indium, Yttrium, Lithium, Niob, Neodym und Germanium. Die Verfügbarkeit dieser Metalle für Zukunftstechnologien wird dadurch erschwert, dass sie meist nur vergesellschaftet mit anderen Elementen in Erzen vorkommen und damit über keine eigene Produktionsinfrastruktur verfügen. Darüber hinaus sind bei einigen dieser Gewürzmetalle einzelne Länder oder Bergbauunternehmen weltweite Marktführer - es ist also eine starke Produzentenkonzentration zu verzeichnen. Die zunehmende Verwendung in Hightech-Produkten treibt demnach den Bedarf an diesen Metallen in die Höhe. Es gibt

nur wenige Beispiele, wo die jeweiligen Metalle in reiner Form verwendet werden, zumeist dienen sie als Beimengungen in anderen Materialien. Außerdem spielen sie eine wichtige Rolle in Legierungszusätzen moderner Werkstoffe, die in Autokonstruktionen verwendet werden. Aufgrund ihrer geringen Beimengungen werden sie auch als „Tuningmetals“ oder „Mikrolegierungselemente“ bezeichnet.

Prinzipiell sind die mit diesen Materialien hergestellten Produkte nach der Nutzungsphase recyclebar. In den meisten Fällen ist ein hochwertiges Recycling jedoch nicht vollständig möglich, da sie nur in minimalen Konzentrationen verarbeitet und daher – wie der Safran vom Reis – „aufgezehrt“ werden. Der effiziente Rohstoffeinsatz bei der Produktherstellung und das Schließen der Materialkreisläufe durch Recycling auch von „Spicemetals“ ist eine wichtige künftige Aufgabe für Wissenschaft und Technik. Es müssen große Anstrengungen unternommen werden, um über die Verbesserung der Rohstoffbereitstellung und Ausweitung der Produktion mit gleichzeitiger Erhöhung der Ressourceneffizienz, die Versorgung der Industrie mit den knappen Gewürzmetallen sicherzustellen. Das Erreichen dieses Ziels erfordert die Untersuchung des gesamten Produktions- und Wertschöpfungskreislaufs von der Lagerstätte mineralischer Rohstoffe über die Aufbereitung und Metallurgie bis zum Recycling.

Sicherung der Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe

Die Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik forscht interdisziplinär zu Themen dieser kritischen Rohstoffe: Die Fachgruppen Geowissenschaften und Geographie, Rohstoffe und Entsorgungstechnik sowie Metallurgie und Werkstofftechnik arbeiten gemeinsam daran, wie die anhaltende Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe gewährleistet werden kann, damit der Bedarf dieser Materialien für zukünftige Industrien sichergestellt wird. Ziel dieser Gemein-

schaftsforschung ist es, Kreislaufstrategien für knappe Materialien zu entwickeln, die wichtig für entstehende Zukunftstechnologien sind. Forscher und Wissenschaftler von der Philosophischen Fakultät werden ebenfalls eingebunden und untersuchen die Beziehungen zwischen dem Rohstoffbestand und den wirtschaftlichen sowie sozialen Belangen. Um nachhaltige Strategien zu planen, die den langfristigen Bedarf der Rohstoffe sichern, sind die Kompetenz und der Einsatz von Forschern der Natur- und Ingenieurwissenschaften sowie der Politik-, Wirtschafts- und Sozialwissenschaften erforderlich. Der Bedarf und die Beschaffung von Rohstoffen werden von der technologischen Entwicklung und der Wirtschaft beeinflusst. Dazu haben globale, politische und soziale Gesichtspunkte deutliche Auswirkungen auf die Wirtschaft. Die wichtigsten wissenschaftlichen Ziele sind:

- Bestimmungskriterien für den produktionsrelevanten Bedarf an kritischen Rohstoffen zu entwickeln, welche für die zukünftigen Mobilitäts- und Produktionstechnologien wichtig sind;
- Neue Techniken zu identifizieren, welche die Reserven an Rohstoffen unter Berücksichtigung der Prozesskette von der Lagerstätte zum metallurgischen Produkt vergrößern;
- Strategien zu entwickeln, welche garantieren, dass die Rohstoffe nachhaltig für das Entwickeln von Mobilitäts- und Produktionstechnologien vorhanden sind, die innovative Technologien für den Bestand an Rohstoffen und Basiswerkstoffen verwenden und zugleich soziale Interessen berücksichtigen.

Die RWTH-Wissenschaftler bewerten die entwickelten Basisprinzipien für den abzunehmenden Rohmaterialbedarf, indem sie auf ihre Materialkompetenz zurückgreifen. Nach Ermittlung des künftigen Bedarfs an Ressourcen wird der Bedarf an kritischen Rohstoffen, die zum Beispiel für die Mobilität oder Energieversorgung von morgen gebraucht werden, erforscht.

Als weiteres Beispiel dient Aluminium, das ein wichtiges, leichtes Material für den Fahrzeugbau ist. Der Rohstoffkreislauf des Elements Aluminium ist auch eine wichtige Grundlage, um das seltene Metall Gallium zu gewinnen. Gallium allein wird in der Natur nicht in hohen Konzentrationen gefunden, daher ist technisches Wissen über die Galliumproduktion aus der Rohstoffquelle Bauxit erforderlich.

Der Aluminiumbedarf wird zunehmend mittels Sekundäraluminium gewonnen und eine Abnahme der Verfügbarkeit von Gallium aus primärem Bauxit ist daher absehbar. In diesem Falle sind Forschung und Entwicklung in den Bereichen Lagerstätte, Abbau, Bergbautechnik und Metallurgie gefordert, um Lösungen zu finden. Solche Entwicklungen sind auch für andere „Gewürzmetalle“ notwendig.

Zur Identifizierung neuer Technologien, welche die Rohstoffreserven ausweiten, ist es notwendig, das Wissen über Rohstoffe zu erweitern und auszubauen. Forscher aus verschiedenen Wissenschaftsfeldern kooperieren interdisziplinär von der Lagerstätte zur Werkstofftechnik.

Die nachhaltigen Strategien für einen lang anhaltenden Bestand an Rohstoffen sind eine herausfordernde, interdisziplinäre Forschungsaufgabe. In den Bereichen Energie und Rohstoffe müssen Quellen und unkonventionelle Vorkommen sichergestellt werden. Deren Auffinden stellt ein neues Forschungsgebiet dar. Auf dem Gebiet des Bergbaus und der Entwicklung neuer Technologien zur Anreicherung von Metallen in Spurenkonzentrationen werden sowohl die Abbaufverfahren als auch die Produktionsausstattung weiterentwickelt. Metallurgie und Recycling entwickeln Technologien weiter für die selektive Entnahme und Gewinnung von Metallen sowie für die Entwicklung von innovativen Prozessänderungen, Automation und den Prozess verbessernde Flexibilität. Die Geistes-, Sozial- und Wirtschaftswissenschaften ermitteln die Möglichkeiten und Grenzen für den Bereich „Gesellschaft und Rohstoffe“. Naturwissen-

schaften und Maschinenbau schließlich stellen weitere wesentliche Kenntnisse und Möglichkeiten bereit.

Die Forschung zielt darauf ab, einen ganzheitlichen Ansatz zu liefern, der Wissenschaftler und Forscher aus den Natur-, Ingenieur- und Geisteswissenschaften verbindet und die Antworten und Lösungen miteinander verknüpft. An der RWTH Aachen arbeitet die Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik an einem Konzept zur wissenschaftlichen Erforschung dieser zukunftsorientierten Aufgaben, um geeignete Lösungen für die nachhaltige Sicherung der industriellen Versorgung von „Gewürzmetallen“ zu finden.

Werkstofftechnik ist ein Schlüsselement für die Industrieländer und sichert die Zukunft. Neue Hochleistungsmaterialien für intelligente Produkte werden auf Grundlage neuer Modelle mit verstärktem Einsatz von „Tuningmetals“ entworfen.

Die vorgestellte interdisziplinäre Forschung untersucht das „vorgelagerte“ Feld vom primären und sekundären Rohstoff zum Hochleistungswerkstoff unter Beachtung von Kosten, Gewinnung der Rohstoffe und ihrer Verhüttung, Recycling und Veredelung sowie Umweltschutz. Es werden methodisch

und parallel verschiedene Basisansätze im Feld der Rohstoffverfügbarkeit miteinander verbunden sowie Ressourcen- und Energieeffizienz der Prozessketten entwickelt.

Autoren:

Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Franz Michael Meyer hat den Lehrstuhl für Mineralogie und Lagerstättenlehre inne.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Niemann-Delius ist Inhaber des Lehrstuhls für Rohgewinnung über Tage und Bohrtechnik. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz ist Inhaber des Lehrstuhls für Aufbereitung und Recycling fester Abfallstoffe.

Dr.-Ing. Elinor Rombach ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Senk leitet den Lehrstuhl für Metallurgie von Eisen und Stahl.

Anzeige



Ausschreibung für das Junge Kolleg



Stiftung
Mercator

Die Nordrhein-Westfälische Akademie der Wissenschaften und der Künste hat im Jahr 2006 ein Junges Kolleg als Förderprogramm für herausragende junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aller Fachrichtungen eingerichtet. Die Mitglieder werden mit finanzieller Unterstützung durch die Stiftung Mercator, Essen, für drei Jahre mit der Möglichkeit der Verlängerung (bis zu vier Jahren) berufen, um sie durch die Aufnahme persönlich und sichtbar auszuzeichnen, um sie in ihrer Forschungsarbeit ideell und finanziell zu fördern und um ihnen eine interdisziplinäre Plattform für die kritische Bewertung von Problemen der Bildungs- und Forschungspolitik zu bieten.

Für das Jahr 2012 ist die Aufnahme weiterer Mitglieder vorgesehen. Kandidatinnen und Kandidaten können bis zum **01.09.2011** nominiert werden oder sich bewerben. Der Auswahlausschuss der Akademie trifft eine Vorauswahl anhand der eingereichten Unterlagen und entscheidet nach persönlichen Vorstellungsgesprächen, die am **01.12.2011** in Düsseldorf geführt werden.

Die Mitglieder des Jungen Kollegs sollen folgende Voraussetzungen erfüllen:

- Sie sind promoviert.
- Sie zeichnen sich durch besondere wissenschaftliche Leistungen aus.
- Sie arbeiten an einer wissenschaftlichen Hochschule oder Forschungseinrichtung in Nordrhein-Westfalen.
- Sie sind bei der Aufnahme nicht älter als 36 Jahre.
- Sie haben keine unbefristete Hochschullehrerstelle (W2/W3) inne.

Arbeitsweise des Kollegs

Die Mitglieder des Kollegs verbleiben an den wissenschaftlichen Hochschulen und Forschungseinrichtungen Nordrhein-Westfalens. Sie treffen sich regelmäßig zu gemeinsamen Veranstaltungen in der Akademie. Im Einzelnen geht es um:

- aktive Mitarbeit in dem ein- bis zweimal jährlich stattfindenden kolleginternen Forschungsforum Junges Kolleg.
- aktive Mitarbeit in einem kolleginternen Arbeitskreis des Jungen Kollegs zu wissenschafts- und gesellschaftspolitischen Problemen.
- aktive Teilnahme an einem jährlich stattfindenden öffentlichen Symposium „Forschungstag der Akademie“, ggf. mit Vortrag aus der aktuellen Forschungsarbeit.

Finanzielle Förderung:

- Die Mitglieder des Jungen Kollegs erhalten ein Forschungsstipendium in Höhe von 10.000 Euro pro Jahr für persönliche Forschungszwecke und zur Deckung der Kosten von Reisen zu Veranstaltungen des Jungen Kollegs und der Akademie.
- Auf Antrag können Zuschüsse zu Forschungsaufenthalten an wissenschaftlichen Einrichtungen im Ausland gewährt werden.

Nominierungen / Bewerbungen

Geeignete Kandidatinnen und Kandidaten werden in der Regel durch die Leitungen wissenschaftlicher Hochschulen, wissenschaftlicher Forschungseinrichtungen in Nordrhein-Westfalen, insbesondere der Max-Planck-Institute, der Helmholtz-Forschungszentren und der Leibniz-Einrichtungen vorgeschlagen. Auch Selbstbewerbungen sind möglich.

Die Bewerbung ist unter Beifügung folgender Unterlagen unter dem Stichwort „Junges Kolleg“ bei der Nordrhein-Westfälischen Akademie der Wissenschaften und der Künste, Palmenstraße 16, 40217 Düsseldorf sowohl in Papierform wie digital einzureichen:

1. Bezeichnung des engeren Forschungsgebietes des Kandidaten / der Kandidatin
2. Zwei Fachgutachten, nach Möglichkeit von verschiedenen Hochschulen
3. Lebenslauf (incl. Adresse, Telefonnummer, E-Mail-Adresse der Kandidaten)
4. Schriftenverzeichnis
5. Bis zu drei Publikationen im PDF-Format (nur auf CD)

Bewerbungsschluss: 01.09.2011

Weitere Informationen zum Jungen Kolleg finden Sie unter www.awk.nrw.de.