



## Zwerge auf den Bau?

### Definition

Nanotechnologie umfasst die Herstellung und Erforschung der Eigenschaften von winzigen Partikeln und Strukturen um die 100 nm ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ) sowie die Untersuchung des Einflusses von Nanopartikeln und -strukturen auf die Eigenschaften makroskopischer Systeme (z.B. Baustoffe.).

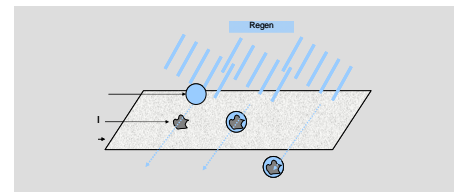
Diese Projektinformation gibt dem interessierten Leser einen kurzen Überblick über grundlegende und aktuelle Entwicklungen zum Thema „Nanotechnologie – Hightech für die Bauwirtschaft“. Grundlage sind Recherche- und Arbeitsergebnisse eines Projektes der Rationalisierungs-Gemeinschaft „Bauwesen“ im RKW Kompetenzzentrum. Die Rationalisierungs-Gemeinschaft „Bauwesen“ befasst sich seit 2007 im Rahmen des Branchendialogs mit dem Thema. Ziel des Projektes ist es vor allem, die Bauwirtschaft für die enormen Potenziale von modernen Querschnittstechnologien wie der Nanotechnologie zu sensibilisieren und spannende Forschungsergebnisse und Produktentwicklungen in der Branche bekannter zu machen. Darüber hinaus wurden eigene Untersuchungen zur Wahrnehmung der Nanotechnologie in der Bauwirtschaft und zu Problemen des Technologietransfers durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Arbeiten fließen in die vorliegende Projektinfo mit ein.

## Inhalt

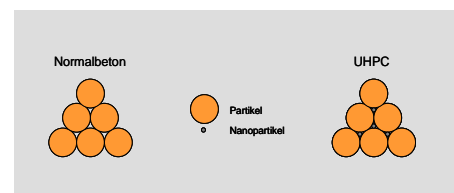
- 1 | Einleitung**  
„Nanotechnologie – Zwerge auf den Bau?“
- 2 | Nanotechnologie als Zukunftstechnologie in der Bauwirtschaft**
- 4 | Ultra High Performance Concrete (UHPC)**
- 7 | Zwergenträume – Nanoschäume – Energieeffizientes Bauen mit Nanotechnologie**
- 9 | Superzwerge  $\text{TiO}_2$  – Umweltschutz mit Nanotechnologie**
- 10 | Zwergerstarke Schichten – Nanotechnologisch funktionalisierte Oberflächen**
- 12 | Wahrnehmung der Nanotechnologie in der Bauwirtschaft**
- 12 | Impressum / Autor**

## Nanotechnologie in der Bauwirtschaft

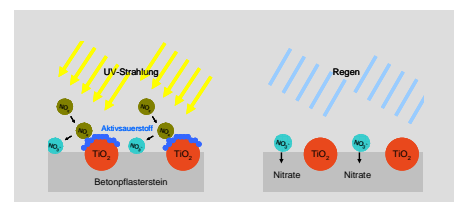
### Selbstreinigende Oberflächen – Lotuseffekt



### Ultrahochleistungsbeton (UHPC)



### Luftreinigende Pflastersteine (Grundlage: Photokatalyse)



### Vakuumisolationspaneelen (VIP)

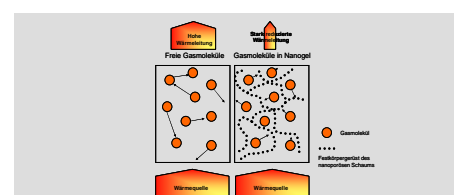


Bild 1: Übersicht Technische Anwendungen

# Nanotechnologie als Zukunftstechnologie in der Bauwirtschaft

Die Hightech-Strategie der Bundesregierung bewertet Nanotechnologie als wichtige Zukunftstechnologie mit hohem Innovationspotenzial und großem wirtschaftlichen Potenzial. Deutschland ist im Bereich der Nanotechnologie-Forschung eine der führenden Nationen in der Welt (Bild 2). Dieser Innovationsvorsprung soll für die deutsche Wirtschaft schnell zu einem strategischen Erfolgsfaktor werden.

Automobilbau, Chemie, Pharma, Informationstechnik oder Optik erscheinen zunächst als die wichtigsten Anwendungsbereiche der Nanotechnologie. Mit der Realisierung kleinerer, schnellerer, leistungsfähigerer und „intelligenterer“ Systemkomponenten eröffnet die Nanotechnologie in diesen Branchen massiv neue Marktchancen.

Aber auch die Wettbewerbsfähigkeit eher traditionellerer Industriezweige wie dem Bausektor könnte durch nanotechnologische Innovationen, die das Bauen schneller, flexibler, besser, nachhaltiger und kostengünstiger machen, signifikant verbessert werden. Hierzu startete die Bundesregierung im Rahmen ihrer Hightech-Strategie Ende 2007 einen Branchendialog mit der Bauwirtschaft. In diesem tauschten sich vor allem führende Forschungseinrichtungen über die Möglichkeiten

aus, wie mit Nanotechnologie, z.B. durch den Zusatz von Nanopartikeln, bessere Produkteigenschaften und zusätzliche Funktionalitäten in Baustoffen und Bauteilen erzielt werden können. Einige Ergebnisse dieses Branchendialogs werden im Folgenden einer breiteren Fachöffentlichkeit vorgestellt. Doch zunächst stellt sich die Frage:

### Was ist eigentlich Nanotechnologie?

Nanotechnologie ist die gezielte Konstruktion in atomaren Dimensionen. Sie beschäftigt sich mit der Herstellung von winzigen Partikeln und Strukturen, der Erforschung der Eigenschaften dieser Nanopartikel und -strukturen sowie dem Einfluss von Nanopartikeln und -strukturen auf makroskopische Systeme, z.B. auf Werkstoffe, welche mit Nanopartikeln modifiziert wurden. Der Begriff „Nano“ kommt aus dem

Griechischen und bedeutet übersetzt Zwerg. Auf einer Länge von einem Nanometer ( $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m} = 1\text{ Milliardstel Meter}$ ) lassen sich ungefähr 5 bis 10 Atome unterbringen. Ein Nanometer ist im Verhältnis zu einem Millimeter ungefähr so groß wie eine Haselnuss im Vergleich zur Erdkugel. Nanopartikel sind maximal einige 100 nm groß.

Nanopartikel und -strukturen sind anders als mikroskopische und makroskopische Strukturen, denn je kleiner die Partikel werden, desto größer ist ihre reaktionsfähige Oberfläche. Nanopartikel verhalten sich daher chemisch und physikalisch oft ganz anders als die gleiche chemische Verbindung in größeren Aggregaten oder in Lösung. Sie sind reaktionsfähiger, chemische und physikalische Eigenschaften werden verstärkt oder sogar in ihr Gegenteil verkehrt, Nichtleiter werden leitfähig, Wärmeleiter wirken isolierend u.v.a.m. Darüber hinaus passen Nanopartikel in kleinste Lücken im Stoffgemisch und können dort ihre ganz besondere Wirkung entfalten.

### Was ist also der Stand der Technik? Welche Anwendungen finden Nanopartikel bereits heute in der Industrie?

Nanopartikel und Nanostrukturen werden primär für eine weitere Miniaturisierung von elektronischen Bauteilen verwendet. Noch kleinere Chips, noch kleinere Datenspeicher

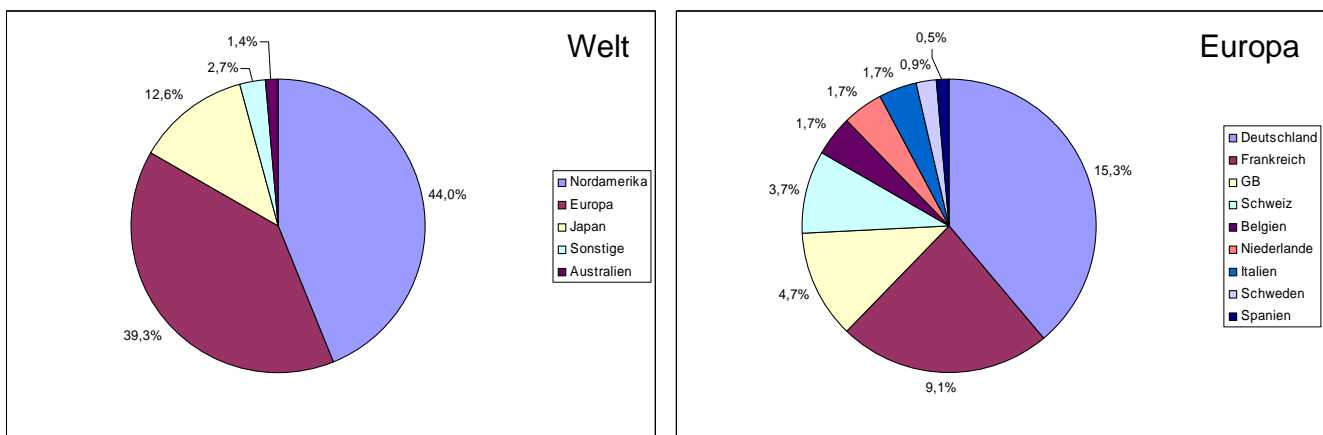


Bild 2: Relative Anzahl von Patenten in der Nanotechnologie (Vgl. u.a.: R. Compañó and A. Hullmann, "Forecasting the development of nanotechnology with the help of science and technology indicators", Nanotechnology, Vol. 13 pp. 243-247, 2002.)

können mit Hilfe von EUV-Lithografie und Interferenzlithografie hergestellt werden. Dies sind nur zwei der innovativen Verfahren, mit denen sich Strukturen im Nanometerbereich auf Oberflächen erzeugen lassen.

Die Nanomedizin, ein weiterer wichtiger Anwendungsbereich der Nanotechnologie, lernt vorzugsweise von der Natur. Körpereigene Substanzen tragen zum Beispiel Nährstoffe genau an den Ort im Körper, an dem der Stoff benötigt wird. In neuen mit Hilfe von Nanotechnologie hergestellten Medikamenten sollen biologisch wirksame Substanzen ebenfalls genau an den Ort im Körper bzw. in der Zelle getragen werden, an dem sie wirken müssen und erst an „Ort und Stelle“ gibt der Träger (z.B. ein synthetisches Polymer) den Wirkstoff (z.B. ein Zellgift) kontrolliert ab. Eine solche medikamentöse Therapie betrifft nach den Vorstellungen der Forscher künftig nur noch die kranke Zelle. Nebenwirkungen werden wesentlich seltener und weniger intensiv auftreten.

Doch auch andere Branchen lernen von der Natur:

- Kleben, wie die Miesmuschel, unter Wasser, hochstabil und trotzdem beweglich
- Haften, wie die Fliegen an der Wand, sicher aber leicht ablösbar oder
- wasserabweisende, blitzsaubere Oberflächen wie bei den Blättern der Kapuzinerkresse (Lotuseffekt) (Bild 3)

sind Vorbilder für mannigfaltige nanotechnologische Produktentwicklungen vom Nanoauto<sup>1</sup> bis zum gewöhnlichen Glasreiniger, denn die Ursache dieser Effekte liegt in den Nanostrukturen verborgen. Deshalb untersuchen Nanoforscher natürliche Systeme und traditionelle

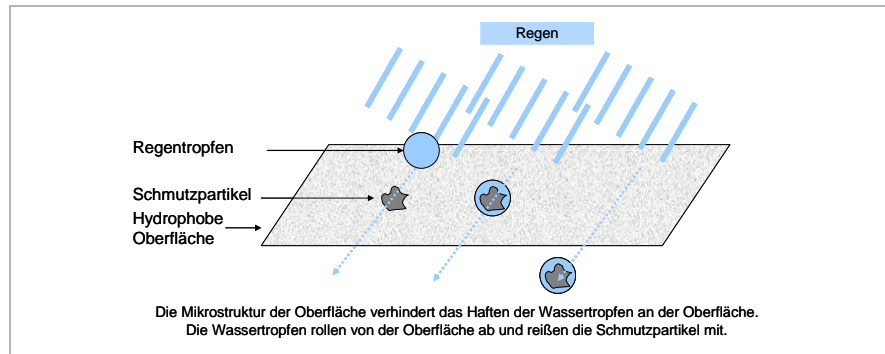


Bild 3: Selbstreinigende Oberflächen – Lotuseffekt

Werkstoffe in Bezug auf Nanostrukturen, die „Nanoeffekte“ verursachen könnten. Darüber hinaus ist man heute in der Lage eine Vielzahl von Nanopartikeln und -strukturen künstlich herzustellen und deren Eigenschaften gezielt zu modifizieren.

Häufig wirken die Nanos nicht allein. Nanopartikel und -strukturen stehen fast immer im Verbund mit konventionellen Materialien und verleihen diesen zusätzliche Eigenschaften, ohne die ursprünglichen Materialeigenschaften zu beeinträchtigen (Werkstoffe).

Sollen die „Zwerge“ nun auf den Bau, dann geschieht dies immer integriert in Baustoffe und Bauelemente.

*Aber ist denn die Nanotechnologie tatsächlich eine Querschnittstechnologie, die wesentliche innovative Impulse für die Bauwirtschaft geben kann?*

Auch wenn es den Bauleuten nicht bewusst war, gebaut wird schon seit hunderten, ja tausenden von Jahren unter Ausnutzung von „Nanoeffekten“. Die Eigenschaften wichtiger Baustoffe, vor allem von Zement und Ton, werden wesentlich durch den Anteil von nanoskaligen Partikeln bestimmt. Heute kann man nachweisen, dass hohe Anteile an natürlich entstandenen Nanopartikeln im Ton die Bildsamkeit, Sinteraktivität und Brennfarbe bei der Dachziegelherstellung mitbestimmen. Ebenso kann man nachweisen, dass höhere Anteile von SiO<sub>2</sub>-Nanopartikeln im Zement das Mikrogefüge des Betons in der

Art beeinflussen, dass eine höhere Festigkeit und Säurekorrosionsbeständigkeit resultieren. Dies ist (stark vereinfacht) der Trick, mit dem hochfeste Betone, z.B. UHPC (Ultra-High-Performance-Concrete) hergestellt werden können. Beton mit der Festigkeit von Stahl ist für visionäre Architekten und Bauherren mit einer Vorliebe für filigrane Bauwerke mit Sicherheit ein sehr interessanter Baustoff der Zukunft.

Nanoskalige Bindemittelzusätze geben dem konventionellen Baustoff Beton z.T. völlig neue Eigenschaften zunächst in Bezug auf Verarbeitbarkeit, Festigkeit und Dauerhaftigkeit. Aber auch zusätzliche Eigenschaften, wie die Fähigkeit Licht zu leiten (Bild 4) oder photokatalytisch Luftschadstoffe zu zersetzen oder sich auf Basis einer photokatalytisch induzierten Reaktion von Oberflächenverschmutzungen zu befreien (Bild 3) sind bereits in der Praxis getestet worden.

Zusätzlich lassen sich sämtliche Oberflächen am und im Gebäude durch funktionale Beschichtungen modifizieren. Selbstreinigende Fassaden, Dachziegel und Glasoberflächen, luftreinigende und biozide Farben, hochwirksame Dämmstoffe auf Basis nanoskaliger Schäume, Bindemittel, die die Entflammbarkeit von Naturstoffen reduzieren, Fenster, die Licht und Wärmeeinstrahlung witterungsabhängig regulieren und viele andere interessante Anwendungen von Nanotechnologie sind an Gebäuden aller Art gut vorstellbar und zum Teil schon in Bauwerken erprobt. Mit

<sup>1</sup> Die aus Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff bestehende Struktur ist rund drei Nanometer breit und zwei Nanometer lang. Die Räder werden von ballförmigen Kohlenstoffmolekülen gebildet. Auf einer Goldoberfläche deponiert, setzt sich das Nano-Auto in Bewegung, sobald die Temperatur der Unterlage über 170 Grad Celsius steigt.

Nanotechnologie lassen sich die Qualität und die energetische Effizienz von Bauwerken wesentlich verbessern. Darüber hinaus sollten innovative Baustoffe künftig auch das Bauen selbst effizienter gestalten helfen, indem die Verarbeitung auf der Baustelle einfacher wird.

Der Branchendialog hat bewiesen, Nanotechnologie kann der Bauwirtschaft wesentliche Innovationsimpulse geben. Zahlreiche Bauteile und Baustoffe können durch Nanotechnologie mit hochinteressanten neuen Produkteigenschaften versehen werden. Die Verwendung innovativer Produkte am Bau befördert nicht nur die Qualität des Bauwerkes sondern leistet gleichzeitig noch Beiträge zum Umwelt- und Klimaschutz.



Bild 4: Lichtleitender Beton

(Quelle: Messe Frankfurt Exhibition GmbH / Petra Welzel, [http://material-vision.messefrankfurt.com/global/de/presse-center\\_fotoservice\\_detail.html?page=7&guid=mf\\_ddsw53\\_29501](http://material-vision.messefrankfurt.com/global/de/presse-center_fotoservice_detail.html?page=7&guid=mf_ddsw53_29501))

Sicher ist nicht ab morgen jedes Haus ein Nanohaus<sup>2</sup>. Die Langlebigkeit von Bauwerken impliziert besonders hohe Anforderungen an die Haltbarkeit und Qualität innovativer Produkte für die Bauwirtschaft. Darüber hinaus sind sicherlich viele innovative Produkteigenschaften auch ohne Nanotechnologie zu erreichen. Aber Pilotprojekte wie die Gärtnerplatzbrücke in Kassel (UHPC)<sup>3</sup> und erste erfolgreiche Produkteinführungen am Markt (antibakterielle Farben, selbstreinigende Tondachziegel u.v.a.m.) zeigen deutlich, künftig gibt es immer mehr „Zwerge am Bau“.

<sup>2</sup> Vgl. auch [www.nano.uts.edu.au/about/australia.html](http://www.nano.uts.edu.au/about/australia.html)

<sup>3</sup> Vgl. u.a. [www.gaertnerplatzbruecke.de](http://www.gaertnerplatzbruecke.de)

## Nanotechnologie und Ultra High Performance Concrete (UHPC)

Kassel, 4. März 2008. Auf dem Campus der Universität wird es international. Über 250 Fachleute aus mehr als 20 Ländern, nicht nur aus Deutschland und Europa sondern u.a. auch aus den USA, Japan, Korea, Australien und dem Iran treffen allmählich ein, um in den folgenden drei Tagen am 2. Internationalen UHPC - Symposium teilzunehmen. Doch zunächst wird rege die Möglichkeit genutzt, die Gärtnerplatzbrücke über die Fulda zu besichtigen.

Was macht diese auf den ersten Blick nicht besonders bemerkenswerte scheinende Fußgängerbrücke zur wissenschaftlichen Attraktion?

Die Gärtnerplatzbrücke ist die erste größere Brücke in Deutschland, für deren vorgefertigte Betonbauteile ultrahochfester Beton verwendet wurde. Die nur 8-12 cm dicken Fahrbahnplatten und die filigranen Obergurte aus vorgespanntem faserhaltigen UHPC wurden bei der Firma ELO-Beton in Eichenzell vorgefertigt. Die Obergurte wurden im Mittelelement der Brücke während der Montage nachträglich gebogen und so der Form des darunterliegenden Stahlrohrfachwerkelements angepasst. Die UHPC-Bauteile wurden ausschließlich durch Kleben mit Sikadur – 30, einem lösungsmittelfreien, thixotropen, zweikomponentigen Epoxidharzmörtel zusammengefügt.

Der verwendete Beton wurde zuvor bereits an fünf kleineren im Fertigteilwerk vorgefertigten Brücken mit einer Spannweite von bis zu 18 m getestet. Aber mit einer Spannweite von 139 m und dem innovativen Klebverfahren ist die Brücke über die Fulda etwas ganz besonderes.<sup>4</sup> Schon deshalb war Kassel für viele Bauingenieure und Baustoffchemiker, Vertreter von Universitäten, Forschungsinstituten sowie Baustoffherstellern eine Reise wert. Darüber hinaus war das Internationale UHPC-Symposium in Kassel

<sup>4</sup> Vgl. u.a. M. Schmidt, R. Krelaus: Kleben von UHPC-Bauteilen bei der Gärtnerplatzbrücke in Kassel, in: BFT 10/2007.

international die bisher einzige Plattform für den wissenschaftlichen Erfahrungsaustausch über ultrahochfesten Beton. Wie kam es dazu?

1998 hatten Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt und Prof. Dr.-Ing. Ekkehard Fehling eine Idee: Durch Zusatz feinsten Partikel mit Korngrößen im Nanometerbereich sollte man die „letzten Löcher“ im Betongefüge „stopfen“ können. Das Ergebnis wäre ein Beton mit einer Druckfestigkeit, die alle bisher bekannten Werte<sup>5</sup> weit übersteigt. Die Grundidee veranschaulicht Bild 8.

Wenn gleichgroße runde Teilchen oder Partikel möglichst platzsparend „gestapelt“ werden sollen, entsteht die sogenannte dichteste Kugelpackung (orange Partikel in Bild 8). Zwischen den Partikeln bleiben jedoch Lücken, in denen sich die Teilchen nicht berühren und beim Erhärten des Zements auch nicht miteinander reagieren. Je größer die Lücken zwischen den Partikeln, desto poröser ist am Ende der Beton. Porosität aber bedeutet geringere Druckfestigkeit und größere Angriffsflächen für betonschädigende Substanzen. Füllt man die Poren mit kleineren Partikeln, so erhöht sich die Oberfläche der miteinander reagierenden Teilchen.

<sup>5</sup> Normalbeton: Druckfestigkeit 10 – 60 N/mm<sup>2</sup>

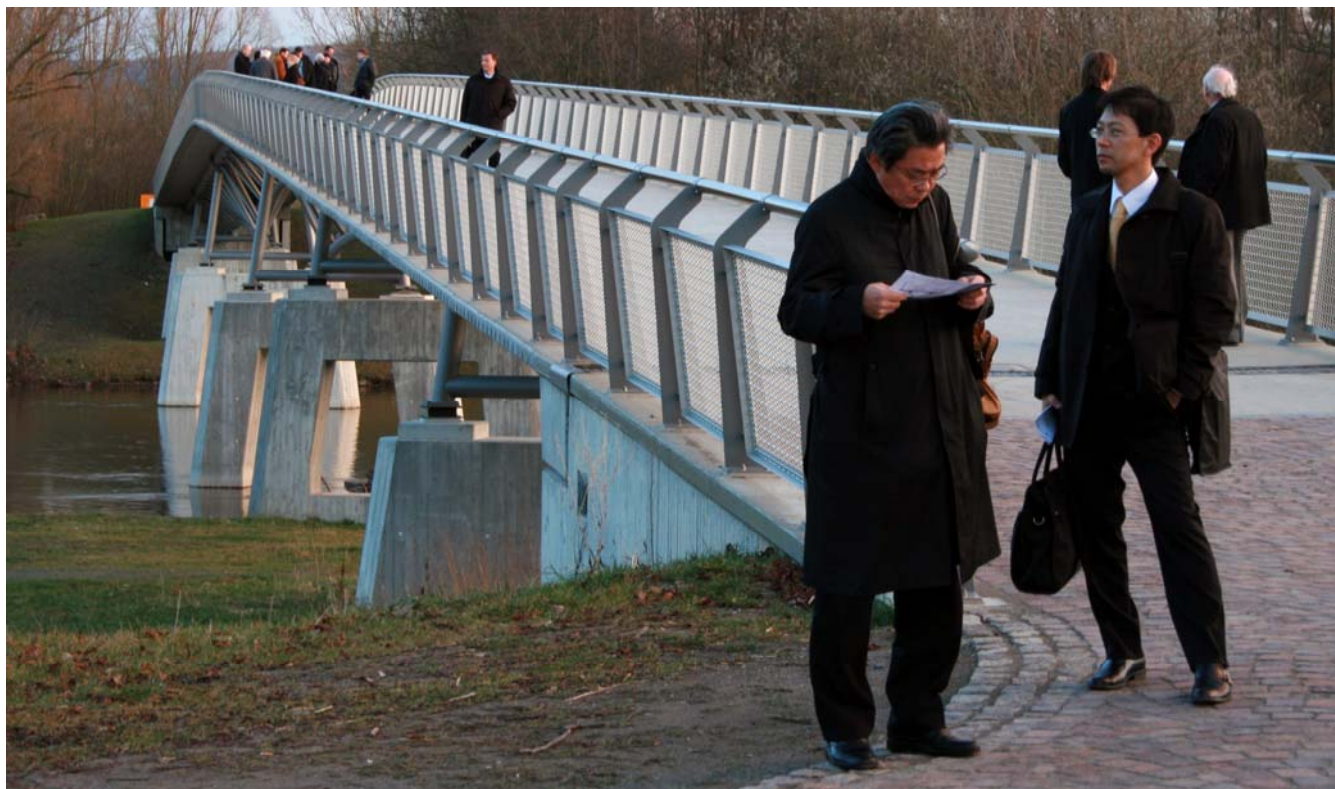


Bild 5: Teilnehmer des UHPC-Symposiums 2008 besichtigen die Gärtnerplatzbrücke über die Fulda

Es entstehen weniger Poren, der Beton wird dichter und härter. Ein Problem ist allerdings, dass mit dem Zusatz von Nanopartikeln auch weniger Platz für Wassermoleküle in der Betonmischung bleibt. Weniger Wasser bedeutet wiederum schlechtere Verarbeitbarkeit. Dem soll durch den Zusatz von neuartigen Fließmitteln in Form von Polymeren auf der Basis von Polycarboxylaten entgegengewirkt werden. Darüber hinaus wird durch den Zusatz von Stahlfasern die Zugfestigkeit von UHPC verbessert. UHPC hat letzten Endes Eigenschaften wie Stahl, aber er rostet nicht.

Die Optimierung der Korngrößenverteilung zur Verbesserung der Materialeigenschaften ist für Zement und Beton nicht die neueste Idee. Betonzuschläge werden schon lange in Bezug auf die Korngrößenverteilung optimiert. Ebenso untersuchte man in der Vergangenheit die Größe der Zementpartikel bis in den Mikrometerbereich und vermu-

tete auch kleinere Partikel im Zement bzw. in Betonzusatzstoffen wie Silica-Fume, Flugaschen und Puzzolanen, mit denen man die Festigkeit, Wasserundurchlässigkeit und Dauerhaftigkeit von Beton verbessern kann.

Aber erst mit der Entwicklung der Nanotechnologie entstanden analytischen Verfahren zur Bestimmung von Partikelgrößen im Nanometerbereich und zur Abbildung von Nanostrukturen. Inzwischen ist man in der Lage, die Wirkzusammenhänge zwischen der Zusammensetzung einer Betonmischung und dem Mikrogefüge des Betons genau zu verfolgen.

Der erste Schritt auf diesem Weg in Kassel war im Rahmen eines ersten DFG-Projektes die Entwicklung und Erprobung der sogenannten Kasseler Mischung von 2000 bis 2004. Dieser auch für die Gärtnerplatzbrücke verwendete Beton besteht aus den Bestandteilen wie in *Tabelle 1* aufgeführt.



Bild 6: Prof. Michael Schmidt und Prof. Ekkehard Fehling moderieren die Abendveranstaltung des 2. Internationalen UHPC Symposiums 2008 in Kassel.

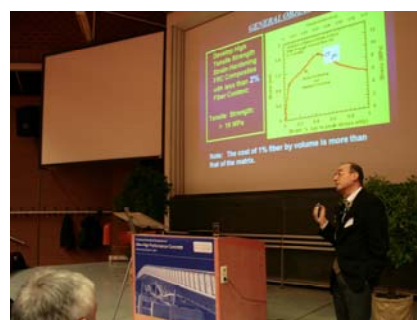


Bild 7: Prof. Antoine Naaman von der University Michigan bei seinem Vortrag über die Eigenschaften von faserbewehrten UHPC

(Fotos: Universität Kassel)

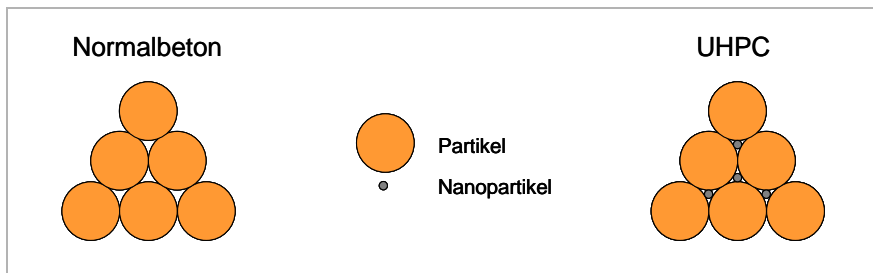


Bild 8: Prinzip des UHPC (Eigene Darstellung)



Bild 9: SiO<sub>2</sub> in unterschiedlichen Partikelgrößen und die Unterschiede im Mikrogefüge von Normalbeton und UHPC (Quelle: Prof. Michael Schmidt: Träume werden Wirklichkeit, Hochleistungsbeton et.al., Vortrag auf dem 4. Nanotechnologieforum Hessen – Forum 2: NanoBuilding, 22.11.2007, Frankfurt/Main)

| UHPC                      | Menge                   | Eigenschaften des UHPC                    |
|---------------------------|-------------------------|---|
| Zement                    | 733 kg/m <sup>3</sup>   | Wasser-Zement-Verhältnis (w/z) 0,24       |
| Basaltsand 0/2,5 mm       | 1.091 kg/m <sup>3</sup> | Wasser-Feststoff-Verhältnis (w/f) 0,19    |
| Silikastaub               | 230 kg/m <sup>3</sup>   | Druckfestigkeit mit 1 Vol.-% Stahlfasern  |
| Stahlfasern (0,99 Vol.-%) | 78 kg/m <sup>3</sup>    | 179 N/mm <sup>2</sup>                     |
| Quarzmehl                 | 183 kg/m <sup>3</sup>   | Biegezugfestigkeit 19,6 N/mm <sup>2</sup> |
| Fließmittel               | 28,6 kg/m <sup>3</sup>  |   |
| Wasser                    | 161 l/m <sup>3</sup>    |   |

Tabelle 1: Zusammensetzung und Eigenschaften des Kasseler UHPC (vgl. u.a. M. Schmidt, R. Krelaus: Kleben von UHPC-Bauteilen bei der Gärtnerplatzbrücke in Kassel, in: BFT 10/2007)

Seit 2005 gibt es ein DFG-Schwerpunktprogramm „Nachhaltiges Bauen mit ultrahochfestem Beton“ in dem in der ersten Förderperiode bis Oktober 2007 21 Forschungsthemen und in der jetzigen 2. Förderperiode weitere 22 Projekte an verschiedenen deutschen Universitäten, Hochschulen und Forschungsinstituten gefördert werden. Ziel dieser Forschung ist es, die Materialeigenschaften des Baustoffs UHPC gründlich zu erforschen und der Fachöffentlichkeit zur Verfügung zu stellen.

Damit sollte es möglich werden, auch die zweite Idee aus Kassel zu verfolgen, in jeder Region mit regionalen Rohstoffen eine „regionale Mischung“ zu entwickeln, die die besonderen Eigenschaften von UHPC besitzt. Damit würde die Nutzung der Innovation UHPC auf eine breitere ökonomische Basis gestellt. Auch mittelständische Betonfertigteilproduzenten oder Bauunternehmen könnten sich mit Hilfe der Kasseler Wissenschaftler

ihre spezifische Mischung zusammenstellen lassen und eigene Produkte daraus entwickeln.

Und hier sind wir an dem Punkt, an dem es wirklich spannend wird. Eine Innovation ist nur als solche zu bezeichnen, wenn dafür ein (zahlungskräftiger und zahlungswilliger) Bedarf am Markt besteht. Und für einen Baustoff braucht man Bauprojekte mit einem innovationsfreudigen Bauherren, der die notwendige wissenschaftliche Begleitung und Materialtests toleriert und eine Baubehörde, die neuen Technologien aufgeschlossen gegenüber steht und die notwendigen Genehmigungen im Einzelfall erteilt.

Weltweit wurde seit 1999 eine ganze Reihe von Brückenbauwerken mit verschiedenen UHPC-Mischungen<sup>6</sup> errichtet. Durch die hohe Fe-

<sup>6</sup> In den USA, Australien und Asien vorwiegend unter Verwendung von Ductal® der Firma Lafarge, welche seit 1999 mit UHPC am Markt bzw. in Pilotprojekten aktiv ist. Die Zusammensetzung von Ductal® ist patentiert. In Deutschland kann man neben der Kasseler Mischung mit Nanodur® der

stigkeit und Dichte von UHPC kann man hier besonders leichte und filigrane Konstruktionen umsetzen und benötigt im Allgemeinen weniger Beton. Kleinere Brücken aus und Brückensanierungen mit UHPC sind oft sogar preiswerter als konventionelle Brückenbauwerke, da bspw. alte weniger tragfähige Fundamente wiederverwendet werden können. Und die Einsparung von Beton trägt zum Klimaschutz bei, denn es wird auch die Gesamt-CO<sub>2</sub>-Bilanz des Bauprojektes verbessert. In Deutschland wären der Bau einer Straßenbrücke aus UHPC und die Erschließung weiterer Einsatzgebiete für diesen innovativen Baustoff, z.B. UHPC statt Stahl, die nächsten Schritte, UHPC aus dem Labor und Technikum heraus auf die Baustellen zu holen und den deutschen F&E-Vorsprung in diesem Bereich in Technologieführerschaft zu überführen.

Fa. Dyckerhoff den ersten kommerziellen UHPC-Zement erwerben.

# Zwergenträume – Nanoschäume

## Energieeffizientes Bauen mit Nanotechnologie

Steigende Energiepreise, Energieeinsparverordnung (EnEV), die Einführung von Energiepässen und nicht zuletzt der drohende Klimawandel durch die anhaltende CO<sub>2</sub>-Emission der Industriegesellschaft verstärken den Druck auf Immobilienbesitzer und Bauherren. Der Gebäudebestand verursacht ca. ein Viertel des Energieverbrauchs in Deutschland. Auch wenn der Auftragsboom für die Bauwirtschaft noch auf sich warten lässt, es lohnt sich künftig ökonomisch und ökologisch, energieeffizient zu bauen oder zu sanieren. Einen hohen Wohnkomfort mit minimalem Energieverbrauch zu erreichen, bedeutet einen harmonischen Mix aus Architektur, Heizungs- bzw. Klimatisierungstechnik und Wärmedämmung/ Isolation zu gestalten. Im Folgenden werden einige Möglichkeiten aufgezeigt, mit Nanotechnologie die Wärmedämmsysteme zu optimieren.

### Herkömmliche Wärmedämmung

Als Dämmstoffe bezeichnet man alle Stoffe, die zur Verbesserung des Wärme- oder Schallschutzes von Konstruktionen eingesetzt werden. Die Wärmedämmeigenschaften eines Baustoffes werden durch die Wärmeleitfähigkeit Lambda ( $\lambda$ ) charakterisiert. Je niedriger die Wärmeleitfähigkeit ist, desto besser dämmt der Baustoff. Dämmstoffe bestehen aus unterschiedlichem Material, aus organischen oder anorganischen, synthetischen oder natürlichen Rohstoffen. Sie weisen unterschiedliche Strukturen auf. Fasern, Granulate oder Schäume werden zu Platten gepresst oder als Schüttung zum Dämmen von Wänden, Böden und Dächern verwendet. Die Wärmeleitfähigkeit herkömmlicher Dämmmaterialien wie Glas-, Mineralwolle oder Polystyrolschaum liegt zwischen 0,035 und 0,050 W/(mK). Lediglich PUR (Polyurethanschaum) erreicht eine wesentlich geringere Wärmeleitfähigkeit (0,020 W/(mK)). Mit nanotechnologischer Optimierung können  $\lambda$ -Werte von 0,004 W/(mK) erreicht werden.

Je kleiner die Wärmeleitfähigkeit, desto geringer werden die für eine effektive Dämmung notwendigen Schichtdicken. Möchte man heute mit einem Wärmedämm-Verbundsystem (WDVS) aus Styropor die Fassade eines Gebäudes auf Passiv-

hausniveau dämmen, so benötigt man Schichtdicken von 20 cm. Mit einem 20 cm dicken Aufbau bekommt man jedoch einige bautechnische und ästhetische Probleme. Um die Fensterleibungen reduziert sich stark der Lichteinfall ins Gebäude, die Dächer vieler Bestandsgebäude müssen umgebaut werden, um die neue Dämmung mit zu bedecken, Fensterbänke und Sockelschienen müssen verbreitert werden (Bild 10). Diese Maßnahmen reduzieren das Platzangebot verändern das Aussehen des Gebäudes und kosten zusätzlich Geld. An einigen dieser „Problemzonen“ verzichtet man deshalb heute oft auf die volle Stärke der Dämmschicht, was eine energetisch fragwürdige Lösung darstellt. Wärmedämm-Verbundsysteme mit wesentlich geringerer Dicke wären die bessere

Lösung und deshalb lohnt sich die Suche nach Dämmsystemen mit einer wesentlich geringeren Wärmeleitfähigkeit.

### Besser Dämmen mit Nanotechnologie

Was für Nanopartikel im Zement gilt, ist auch so beim Dämmmaterial. Noch bevor man die Messtechnik hatte, um die nanoskaligen Strukturen zu analysieren, verfügte man über Materialien, deren überragende Dämmeigenschaften aus eben diesen Strukturen resultieren. Die Entwicklung von porösen Dämmstoffen mit Porengrößen im 100nm-Bereich begann in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. In den 1930er Jahren stellte Samuel Kistler in den USA erstmalig Silica-Aerogele in einem Sol-Gel-Prozess her und demonstrierte deren hervorragendes Wärmedämmvermögen. In den 1960er Jahren wurde dann das, nach Kistlers Verfahren produzierte pulverförmige Material „Santogel“ durch die preiswertere pyrogene Kieselsäure vom Markt verdrängt. Pyrogene Kieselsäure ist ein weißliches nanostrukturiertes Pulver, welches in den 1940er Jahren erstmals bei der Degussa durch Verbrennung von Tetrachlorsilan in einer Knallgasflamme hergestellt wurde und seither als Aerosil® vertrieben wird. Die Herstellung von Aerogelen wurde in den 80er und 90er Jahren von der BASF und Hoechst weiterentwickelt. Heute stellt die US-Firma Cabot auf der Grundlage des von Hoechst erworbenen Know-hows

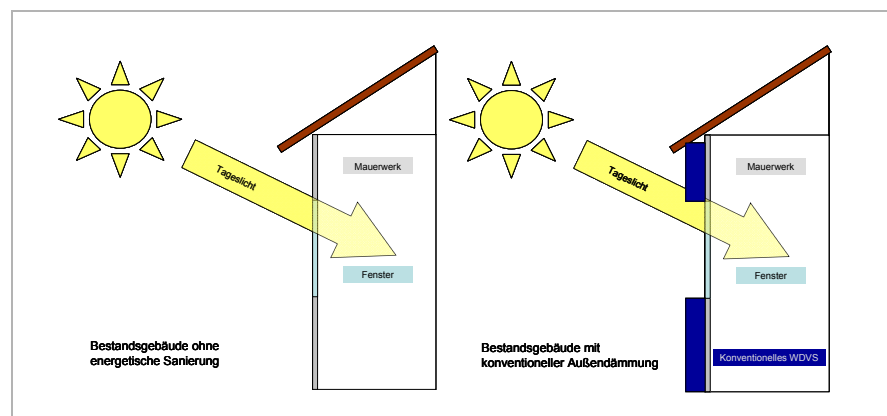


Bild 10: Problemzone Fensterleibung bei konventioneller Außendämmung (Prinzipkizze)

das Produkt Nanogel® in Granulat oder Splitterform her. Nanogel®-Schüttungen haben ebenso wie pyrogene Kieselsäure hervorragende Dämmeigenschaften und sind darüber hinaus noch lichtdurchlässig und durchsichtig. Doch woraus resultiert die geringe Wärmeleitfähigkeit dieser nanoporösen Silikate und wie kann man diese Eigenschaften in Dämmmaterialien für die Bauwirtschaft nutzen?

Ein Schaum ist im Prinzip eine Ansammlung von mit dem Rohstoff umhüllten gashaltigen Poren. Der Wärmetransport in einer solchen porösen Dämmung setzt sich im Wesentlichen aus drei Komponenten zusammen, dem Wärmetransport über das Festkörpergerüst, dem Infrarotstrahlungstransport und der Wärmeleitung des darin enthaltenen Gases. Deshalb führen folgende Maßnahmen zur Herabsetzung der Wärmeleitfähigkeit eines porösen Materials:

Mit der *Reduktion der Porengröße*<sup>8</sup> eines Schaums (Die Porengrößen von Polymerschäumen liegen im Bereich 50 µm, die in Nanogel® nur noch bei ca. 20nm.) kann man die Wärmeübertragung (eigentlich die Übertragung von Bewegungsenergie von einem Gasteilchen auf das nächste) stark verringern, denn nur noch wenige Gasmoleküle finden Platz in einer Pore. Deshalb nimmt die Wärmeleitfähigkeit in einem Schaum mit kleiner werdenden Poren ab (*Bild 11*). Bei nanoporösen Materialien wie pyrogener Kieselsäure oder Aerogelen ist diese Effekt am stärksten. Durch den Übergang von Mikro- zu Nanoporen kann man ungefähr eine Halbierung der Wärmeleitfähigkeit erreichen. Auch konventionelle polymere Schäume wie z.B. Polystyrol können durch den Zusatz von Nanofüllern mit wesentlich kleineren Poren hergestellt werden.

<sup>8</sup> Porengröße wird in diesem Aufsatz im Sinne von Porendurchmesser oder Porenweite einer einzelnen Pore verwendet. (Manche Autoren bezeichnen mit Porengröße das Gesamtporenvolumen oder die gesamte Porenoberfläche in einem Schaum. Bei diesem Sprachgebrauch würden sich die Relationen von Porengröße und Wärmeleitfähigkeit anders gestalten.)

Durch *Evakuieren*, also indem man das Gas aus dem Dämmschaum herauspumpt, kann man die Wärmeleitung eines porösen Dämmmaterials ebenfalls stark herabsetzen. Jedem ist dieses Prinzip von der Thermoskanne bekannt. Allerdings muss das poröse Dämmmaterial dann gasdicht umhüllt werden. Umhüllungen aus Metall sind besonders gasdicht, leiten aber recht gut Wärme, Kunststoffolien leiten keine Wärme, lassen aber in Abhängigkeit von Temperatur und Druckgefälle allmählich Gas und Feuchtigkeit hindurch. Das Vakuum und die Dämmwirkung werden dadurch allmählich schlechter. Die Lebensdauer eines Vakuumdämmsystems wird hierdurch mitbestimmt. Die Wärmeleitfähigkeit von evakuiertem Dämmmaterial nimmt mit „abnehmendem Vakuum“ zu. Je kleiner jedoch die Poren desto weniger Unterdruck ist notwendig um eine hervorragende Wärmedämmung zu erzielen. Also muss man in nanoporösen Materialien weniger Unterdruck erzeugen als in polymeren Schäumen um ähnliche Effekte zu erzielen. Evakuierte Dämmmaterialien weisen im Vergleich zu herkömmlichen Dämmstoffen eine um den Faktor 10 reduzierte Wärmeleitfähigkeit auf. Durch *Beimengungen von Infrarotabsorbieren- und Infrarotreflektoren* kann man zusätzlich die Wärmeleitung durch Infrarotstrahlung reduzieren.

„Schlank und leistungsstark“, „Dünne Haut“ – Seit einiger Zeit werden in der Baufachpresse *Vakuum-Isolationspaneelen (VIP) als innovative Bauelemente* für die Dämmung von Gebäuden beschrieben. Hohe Wärmedämmung bei geringen Dämmschichtdicken sind die großen Vorteile dieser Innovation, denn zum Dämmen eines auf Passivhausniveau benötigt man 20 cm dickes Styropor, mit einem Wärmedämm-Verbundsystem (WVDS) mit VIP-Kern ist der gleiche Effekt mit einer nur 7 cm dicken Außendämmung zu erreichen. Die Vorteile bei der energetischen Sanierung von Bestandsgebäuden und auch denkmalge-

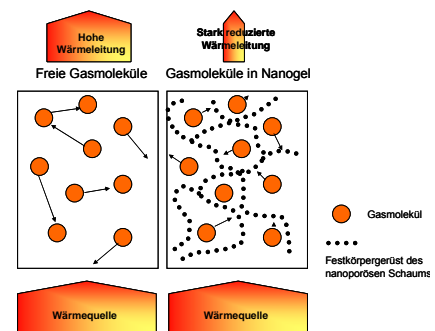


Bild 11: Reduzierung des Wärmetransports über die Gasphase in nanoporösen Schäumen

schützten Gebäuden liegen trotz höherer Kosten auf der Hand. In den bisherigen Problemzonen kann Arbeit und Geld gespart werden, die Eingriffe in erhaltenswerte Architektur werden minimiert, die Raumverluste ebenfalls.

Die VIP-Erfinder haben alle drei obigen Tricks zur Verbesserung der Dämmwirkung auf ihr Produkt angewandt. Der Kern einer VIP ist eine Pressplatte aus nanoporöser pyrogener Kieselsäure. Dem Kernmaterial wurde als Infrarotabsorber, nanoskaliges Graphit bzw. Siliciumcarbid beigemischt. Der VIP-Kern wird von einer kompliziert aufgebauten Verbundfolie (Kunststoff mit Metall, meist Aluminium) umhüllt, die ebenfalls nanotechnologisch optimiert wurde und deshalb, wenn Sie nicht verletzt wird, das Vakuum im VIP-Kern bis zu 50 Jahre aufrechterhält. So können VIP den Ansprüchen der Bauwirtschaft an Qualität und Dauerhaftigkeit gerecht werden kann.

Inzwischen sind VIP an etlichen Pilotprojekten als Innen- und Außendämmung erprobt worden (*vgl. Bild 12*). Für beide Anwendungsmöglichkeiten gibt es auch erste kommerziell angebotene Wärmedämm-Verbundsysteme. Allerdings sind VIP sehr empfindlich bei Lagerung, Transport und Montage und an den Fugenstößen und Befestigungsstellen können leicht Wärmebrücken entstehen. Ein kommerzielles WVDS mit VIP-Kern umhüllt daher die eigentlichen VIP wandseitig mit einer 10 mm starken und außenseitig mit

einer 30 mm starken Polystyrol-dämmung. Ein 20 mm breiter umlaufender Polystyrolrand ermöglicht die Anpassung der Platten. Die Wärmeleitfähigkeit des WDVS beträgt mit  $\lambda = 0,004 \text{ W/(mK)}$  ca. ein Zehntel der Wärmeleitfähigkeit konventioneller Dämmsysteme. Die WDVS-Platten gibt es in den Größen 600x600 und 600x1200 Millimeter. Sondergrößen für „Problemzonen“ liefert der Hersteller nach Aufmaß kurzfristig auf die Baustelle.

Mit VIP ermöglicht die Nanotechnologie die „sanfte“ energetische Sanierung wertvoller Bestandsgebäude. Zum Dämmen von lichtdurchlässigen Fassadenelementen bietet sich die Verwendung von transluzenten Silica-Aerogel als Füllschicht zwischen zwei Glasplatten an. Konventionelle Dämmstoffe z.B. aus nachwachsenden Rohstoffen können mit Nanokompositmaterial zur Verbesserung des Brandschutzes und zur Herabsetzung der Entzündbarkeit beschichtet werden. Einige Forscher träumen von Schäumen, die man zur Wärmedämmung wie eine Farbe auf die Wand auftragen kann. Nanotechnologie am Bau ist jedoch kein Traum, sondern ein starker Treiber für die Entwicklung innovativer Produkte und Verfahren.

## Quellen

Sextl, Haas: Maßgeschneiderte Nanomaterialien/-Partikel als Schlüssel für innovative Bauwerksstoffe, Vortrag auf dem Symposium „Nanooptimierte Hightech-Baustoffe“, Kassel, 09.05.2007.

Tagungsband der 3. Fachtagung, VIP-Bau Vakuum-Isolationspaneele, Evakuierte Dämmungen im Bauwesen, Download: [www.vip-bau.de](http://www.vip-bau.de).

Kleinhempel: Innovative Dämmstoffe im Bauwesen, Forschungsstand und Marktübersicht, Download: [www.vip-bau.de](http://www.vip-bau.de).

Manara, Ebert: Ansätze der Nanotechnologie für hocheffiziente Wärmedämmungen, Vortrag zum Fachgespräch „Nanotechnologie und Bauwesen“ 05.12.06, Düsseldorf.

Luther, Zweck: Anwendungen der Nanotechnologie in Architektur und Bauwesen, Ergebnisse der Fachtagung am 24.01.2006 im VDI in Düsseldorf.

Ausbau+Fassade, Sonderheft „Chance Energie 2008, S.17-19, S.42-43, S.52-53. Isoliertechnik 2/2008, S.2 ff. industrieBAU 3/08, S.41ff.

# Superzweig TiO<sub>2</sub>

## Umweltschutz mit Nanotechnologie

*Titandioxid (TiO<sub>2</sub>) mit „normaler“ Partikelgröße (0,2-0,5 µm) ist schon seit 100 Jahren bekannt. Das farblose Pulver hat einen hohen Brechungsindex und damit ein großes Färbe- und Deckvermögen. Es ist chemisch und thermisch stabil und gilt als ungiftig. Es wurde daher zum wichtigsten Weißpigment und wird hauptsächlich für Lacke, Farben und Anstrichstoffe (ca. 60%), aber auch in Kunststoffen (20%) und Papier (12%), in Kosmetika und sogar als Lebensmittelzusatzstoff E171 verwendet.*

TiO<sub>2</sub>-Nanopartikel haben gerade mal einen Durchmesser von 20nm und in dieser Größe verstärkt sich eine besondere chemische Eigenschaft. Nanoskaliges TiO<sub>2</sub> ist ein hervorragender Photokatalysator. Unter Einwirkung von Sonnenlicht entzieht das Ti (IV) im TiO<sub>2</sub> dem Luftsauerstoff ein Elektron. Es entsteht hochreaktiver Aktivsauerstoff, welcher Luftschadstoffe, insbesondere Stickoxide (NO<sub>x</sub>) aber auch organische Verbindungen (Luft- und Oberflächenverschmutzungen) durch Oxydation zersetzt. Bei vollständiger Reaktion bilden sich aus Stickoxiden wasserlösliche Nitrate und aus organischen Verunreinigungen Kohlendioxid und Wasser. Superzweig TiO<sub>2</sub>, der Photokatalysator, wird dabei nicht verbraucht, sondern kann diesen „Trick“ unendlich oft wiederholen.

Menschen fahren gerne Auto. Autos produzieren Abgase, reichlich Stickoxide und auch organische Verbindungen. Menschen atmen aber auch gerne saubere Luft. Beides zusammen kann man nicht haben, oder vielleicht doch, vielleicht mit Superzweig TiO<sub>2</sub>? Diese Frage stellen sich auch die Forscher in den Leimener Laboren der Heidelberg-Cement AG und schließlich gelang es ihnen, TiO<sub>2</sub> in Zement stabil einzubinden, ohne dass die Verarbeitbarkeit des Zements behindert wird und so, dass die photokatalytische Wirkung im Produkt dauerhaft ist.

Betonsteine und -oberflächen mit nanoskaligem TiO<sub>2</sub> reduzieren nachweislich die Konzentration an Stickoxiden. Das beweisen die Laboruntersuchungen in Leimen und auch die Ergebnisse der Forscher der Universität Twente in den Niederlanden. Das niederländische Forscherteam konnte 30 bis 40 % der Autoabgase durch Photokatalyse unschädlich machen. Der italienische Hersteller Italicementi, Vorreiter bei der Entwicklung von TiO<sub>2</sub>-haltigen Zementen, konnte die Wirksamkeit von photokatalytisch aktiven Pflastersteinen bereits im Herbst 2006 auch außerhalb des Labors untersuchen. 500m einer langen, geraden und dicht bebauten Straße in Bergamo, in der sich die Abgase besonders hartnäckig halten, wurden mit einem photokatalytisch aktivem Betonstein gepflastert, auf weiteren 500m verblieb der ursprüngliche Asphalt. Vergleichende Messungen in beiden Abschnitten ergaben, dass die Stickoxid-Belastung über dem TiO<sub>2</sub>-haltigen Pfla-



Bild 12: Pilotprojekt Dämmung mit VIP; Wohn- und Geschäftshaus, Seitzstraße München ((Architekt: Martin Pool, Foto: Ute Juschkus)

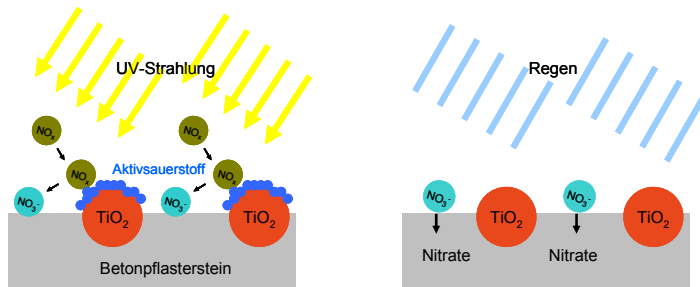


Bild 13: Funktionsweise TiO<sub>2</sub>-haltiger Oberflächen. Mit Hilfe von Sonnenlicht werden schädliche Stickoxide zu wasserlöslichen Nitraten umgewandelt und vom Regenwasser abgespült. Der Photokatalysator TiO<sub>2</sub> wird dabei nicht verbraucht.

ster im Schnitt um 45% geringer war als über dem ursprünglichen Asphalt. In den Niederlanden wird zum Ende dieses Jahres einen Teil des Castorwegs mit TiO<sub>2</sub>-haltigen Steinen gepflastert. Im Sommer 2009 sollen Luftmessungen die Wirksamkeit es Systems belegen.

Dank einer Lizenzvereinbarung zwischen Italicementi und Heidelberg-Cement werden inzwischen in Deutschland erste Produkte aus TiO<sub>2</sub>-haltigem Zement kommerziell angeboten und in Pilotprojekten verbaut. Das Qualitätszeichen TXActive<sup>®</sup> garantiert die photokatalytische Wirksamkeit der Dachsteine und Pflastersteine sowie weiterer Produkte, die in den kommenden Jahren mit dem sogenannten TioCem<sup>®</sup> von HeidelbergCement hergestellt werden. Erste Pilotanwendungen sind das Pflaster der Außenanlagen eines Kindergartens in Bietigheim-Bissingen und die Dächer dreier Wohnhäuser der Evonik Wohnen GmbH. Aber auch mittelständische Hersteller versuchen, die besonderen Eigenschaften von TiO<sub>2</sub>-Nanopartikeln in innovativen Produkten. Zu diesem Zweck haben sich die Monier Braas GmbH, die F.C. Nüdling Basaltwerke GmbH & Co. KG und Keimfarben GmbH & Co. KG in der Initiative photoaktive Baustoffe zusammengeschlossen.

Vorstellbar ist künftig die Fertigung von Straßenbelägen, von Schallschutzwänden oder auch Gebäudeoberflächen mit TiO<sub>2</sub>-haltigen Baustoffen. Allerdings sind vor einem stärkeren Einsatz solcher innovativer umweltfreundlicher Baustoffe

Kosten und Nutzen einer gründlichen Betrachtung zu unterziehen, denn TiO<sub>2</sub> und insbesondere nanoskaliges TiO<sub>2</sub> ist ein teurer Rohstoff.

## Zwergenstarke Schichten Nanotechnologisch funktionalisierte Oberflächen

Architekten unterscheiden zwei grundsätzliche Entwurfshaltungen. Die erste, *Materialerlichkeit* genannt, bevorzugt es, die verwendeten Baumaterialien wie Holz, und Naturstein, aber auch Stahl und Beton sichtbar zu lassen und optisch zu betonen: „What you see is what you get!“. Die zweite Entwurfshaltung verwendet gern künstliche Oberflächen, die z.B. natürliche Materialien imitieren, sogenannte *Fakes*. Mit dem wichtigsten Einsatzgebiet von Nanotechnologie am Bau gewinnen Architekten eine dritte Gestaltungsoption. Oberflächen am und im Bauwerk können durch ultradünne transparente bzw. unsichtbare nanotechnologische Beschichtungen oder die Beimengung von Nanopartikeln in Baustoffen (Nanokomposite) zusätzliche Funktionen übernehmen. Der Nutzer bekommt zu dem was er sieht noch einen „unsichtbaren“ Zusatznutzen. Hier einige Beispiele:

### Selbstreinigende Oberflächen

Einmal gestrichen und für immer schön, das ist für viele Architekten und Bauherren eine faszinierende Vorstellung, denn die Realität ist eine andere. Fassaden, die kurz nach Bauabnahme noch in elegantem Weiß oder in fröhlichen Farben glänzen, werden schon in kurzer Zeit alt und grau. Funkelnde Glasfassaden werden staubig und matt und die regelmäßige Reinigung ist ein nicht unerheblicher Kostenfaktor. Die Möglichkeiten der Nanotechnologie treffen hier auf einen großen Bedarf.

Selbstreinigung beruht auf verschiedenen Wirkprinzipien. Prinzip

Auch wenn durch die Nanotechnologie davon nur geringe Massen benötigt werden, kostet TioCem<sup>®</sup> zur Zeit ca. das Zehnfache des vergleichbaren Normzements. Der ökologische Nutzen der Reduzierung von Stickoxiden in Ballungszentren mit starkem Verkehr muss also bewertet werden und schädliche Nebeneffekte (z.B. die Bildung gesundheitsschädlicher Reaktionsprodukte aus organischen Verunreinigungen durch unvollständige Oxydation) sollten weitgehend ausgeschlossen werden. Wenn das gelingt, könnte Superschwerg TiO<sub>2</sub> helfen, belebte Städte noch lebenswerter zu gestalten.

Nummer 1 ist der Lotuseffekt, der bekannteste Nanoeffekt überhaupt. Durch eine „Noppen“-Struktur im Nanometerbereich wird hierbei verhindert, dass Wassertröpfchen auf der Oberfläche Halt finden. Schmutzpartikel werden mit dem glatt ablaufenden Wasser mitgerissen und so abgespült. Voraussetzung ist regelmäßige Wassereinwirkung (Abspülen oder Beregnen lassen). Dieses Wirkprinzip ist vor allem in Form von Fassadenfarben umgesetzt. Aber auch die Oberflächen von Fliesen oder sanitären Objekten aus Keramik oder Metall können durch eine nanotechnologisch funktionalisierte Oberflächenbeschichtung so modifiziert wer-

den, dass Wasser mit samt der Verunreinigungen rückstandsfrei abläuft und die Flächen sauber und glänzend bleiben.

Darüber hinaus kann Selbstreinigung auch photokatalytisch bewirkt bzw. verstärkt werden. Unter Einwirkung von Licht (beim Photokatalysator  $\text{TiO}_2$  benötigt man den UV-Anteil des Tageslichtes) werden Schmutzpartikel durch Oxydation in leicht abwaschbare chemische Verbindungen überführt. Man benötigt zu dieser Form der „Selbstreinigung“ also das richtige Licht und Wasser. Photokatalytisch selbstreinigende Oberflächen werden nicht nur als Fassadenfarben realisiert. Keramik (vom Dachziegel bis zur Sanitärkeramik), metallische Oberflächen und Glas aber auch textile Membranen können entsprechend ausgerüstet werden. Darüber hinaus werden zementbasierten Baustoffe durch Verwendung von TioCem (Zement mit  $\text{TiO}_2$ -Nanopartikeln) selbstreinigend.

Einen ähnlichen Effekt, aber ein anderes Wirkprinzip haben *Easy-to-Clean-Oberflächen* (ETC). Die chemische Zusammensetzung einer ETC-Beschichtung ist (zumindest an der Oberfläche) wasserabstoßend (hydrophob) und die Oberfläche ist sehr glatt. Das Wasser bildet Tröpfchen, die auf geneigten Flächen wiederum schnell ablaufen und wasserlösliche Verunreinigungen mit sich reißen. Glas, Keramik und Holz aber auch Leder, Textilien und Kunststoffe können so ausgestattet werden und bleiben länger schön und sauber.

Mit Manipulation der Haftung von Wasser auf Oberflächen ist auch die Funktionsweise sogenannter *Anti-*

*Fog-Schichten* zu erklären. Beschlagene Oberflächen in feuchten Räumen, z.B. Spiegel oder Glasscheiben bleiben klar, weil sich auf der wasseranziehenden (hydrophilen) Beschichtung keine Tröpfchen bilden können, sondern ein weiterhin durchsichtiger Wasserfilm. Erst heiß duschen und dann schminken, ohne zwischendurch zu lüften und den Spiegel zu putzen, das geht heute schon mit Anti-Fog-Sprays, die jedoch nur eine vorübergehende Wirkung haben. Dauerhafte Anti-Fog-Beschichtungen sind derzeit jedoch noch weit von der Markteinführung entfernt.

Sogenannte *Anti-Graffiti-Beschichtungen*, nanotechnologische Innovationen für den Bautenschutz, wirksam gegen Sprayer aber natürlich auch gegen betonschädigende Umwelteinflüsse, sind wiederum wasserabweisend (hydrophob). Farbsprays und andere Verschmutzungen finden keinen Halt und können leicht abgewaschen werden. Präparate zum Bautenschutz gibt es schon lange. Sie weisen jedoch einige Nachteile auf. Konventionelle Polymere, z.B. Acrylsysteme blockieren die Substratporen. Wasser kann nicht mehr rein, Feuchtigkeit aus dem Bauwerk aber auch nicht heraus, die Wand kann nicht atmen. UV-Licht schädigt bzw. zersetzt die Beschichtung, welche andererseits nicht einfach zu entfernen und auch nicht einfach zu überstreichen ist, wenn die Wirkung nachlässt. Innovative Bautenschutzsysteme hingegen arbeiten mit nur 1nm kleinen Silanpartikeln. Diese dringen in die Betonporen ein und beschichten deren innere Porenoberfläche gleich mit, anstatt die Poren einfach zu verschließen. Der Beton kann atmen und ist trotzdem stark hydrophobiert und gut geschützt. Die unsichtbaren und notfalls erneuerbaren Beschichtungen halten nachweislich mindestens 10 Jahre<sup>9</sup>. Simulationsrechnungen der Hersteller ergaben, dass die Schadenswahr-

scheinlichkeit von mit Protectosil<sup>®</sup> BHN behandeltem Beton, der regelmäßig Salzwasser ausgesetzt ist, erst nach 40 Jahren die 10 % erreicht. Unbehandelter Beton ist bis dahin mit 95%iger Wahrscheinlichkeit schadhaft. Ebenso gut funktioniert der Schutz historischer Gebäude und Denkmäler.

Die hier ausführlicher dargestellten Anwendungen von nanotechnologisch funktionalisierten Oberflächen am Bau sind schon sehr vielfältig. Doch damit sind den Entwicklern von funktionalisierten Beschichtungen noch lange nicht die Ideen ausgegangen.

Unter dem Oberbegriff „Smart-Windows“ wird an verschiedenen Funktionalisierungen für Glas geforscht. Elektrochrome Beschichtungen verändern ihre Farbe unter Zufuhr elektrischer Energie. So kann eine Glasscheibe auf Knopfdruck verdunkelt oder wieder heller werden, Sonne reinlassen oder aussperren ganz nach Wunsch. Photochrome Beschichtungen nehmen dem Menschen oder dem Steuerungssystem auch noch das aus dem Fenster gucken ab. In Abhängigkeit vom Einfallswinkel des Sonnenlichts verfärbt sich das Glas. Licht- und Wärmeeinfall werden so ganz leicht reguliert. Dritter Zwergentrick auf Glas sind Antireflexschichten.

Nicht wirklich sauber aber schön machen Anti-Finger-Print-Beschichtungen die in der Architektur beliebten Oberflächen aus Stahl oder Glas. Fingerabdrücke, werden durch einen optischen Trick nahezu unsichtbar. Die ultradünnen Beschichtungen sind dauerhaft, verändern die ursprünglichen Materialeigenschaften nicht und zeigen auch nicht die Nachteile von Silikon. Und kratz- und abriebfeste Nanobeschichtungen, die gibt es auch.

Und jetzt bleibt nur noch eine Frage: Wie stellt man ultradünne Schichten mit einer auf Nanometer genau definierten Zusammensetzung her? Wie gelangt der richtige Zwerg an die richtige Position in der funktionalisierten Schicht? Eine Ant-

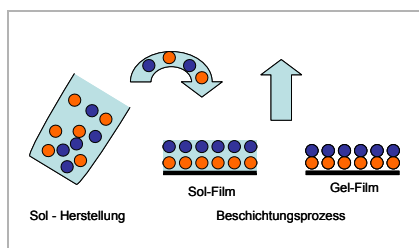


Bild 14: Sol-Gel-Technologie (schematische Darstellung)

<sup>9</sup> Langzeittest von Protectosil<sup>®</sup>BHN an einer Kaimauer des Containerhafens Seebrücke.

wort heißt Sol-Gel-Technologie und diese funktioniert im Prinzip ganz einfach. Die für die gewünschte Funktion benötigten Nanopartikel werden mit einer Flüssigkeit, der Beschichtungslösung vermischt (dispergiert). Anschließend wird diese Dispersion als dünne Schicht, die Sol-Schicht auf ein Trägermaterial aufgebracht, z.B. durch Eintauchen des Trägers. Die Sol-Schicht trocknet zu einer Gel-Schicht und härtet dann aus. Aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften ordnen sich die Nanopartikel in der gewünschten Art und Weise an. *Bild 14* stellt das Prinzip des Sol-Gel-Verfahrens schematisch dar.

### Die Autorin

Ute Juschkus ist seit November 2007 Projektleiterin in der Rationalisierungs-Gemeinschaft „Bauwesen“ im RKW Kompetenzzentrum. Die diplomierte Chemikerin und Wirtschaftswissenschaftlerin befasst sich insbesondere mit dem Einsatz innovativer Technologien in der Bauwirtschaft.



## Impressum

**RKW-Fachinfo (2010-1)**  
**Nanotechnologie am Bau**

### Herausgeber

RKW Kompetenzzentrum  
Fachbereich Branchen

### Projektleitung / Fachredaktion

Dipl.-Wirt.-Chem. Ute Juschkus  
RKW Kompetenzzentrum  
Fachbereich Branchen  
Düsseldorfer Straße 40 · 65760 Eschborn / D  
T +49.6196.495.3505 · F +49.6196.495.4501  
juschkus@rkw.de

### Schlussredaktion / Gestaltung / Titelgrafik

Richard Michalski, RKW

© 2010 Alle Rechte vorbehalten

Rationalisierungs- und Innovationszentrum der Deutschen Wirtschaft e.V. · Sitz des RKW e.V.: Eschborn · Amtsgericht: Frankfurt am Main VR 4170

# Wahrnehmung der Nanotechnologie in der Bauwirtschaft

*Von Februar bis September 2008 nutzte die Rationalisierung-Gemeinschaft „Bauwesen“ im RKW Kompetenzzentrum Messeauftritte und eigene Veranstaltung zur Befragung von Akteuren der Wertschöpfungskette Bau zur ihrer Wahrnehmung der Nanotechnologie und der Potenziale und Anwendungen dieser Technologie für die Bauwirtschaft. Die Auswertung der Fragebögen und ergänzende Interviews ergaben folgendes Ergebnis.*

Insgesamt ist für die Baubranche ein hoher Informationsbedarf zu den Potenzialen und Anwendungsmöglichkeiten der Nanotechnologie festzustellen. Bei informierten Akteuren besteht häufig großes Interesse, wobei diese Akteure meist ohnehin sehr aufgeschlossen für Innovationen sind.

Im Fragebogen wurden 7 Anwendungsmöglichkeiten von Nanotechnologie in der Bauwirtschaft (ohne Nennung von Marken oder Herstellern) kurz erläutert. Die Befragten sollten angeben, ob sie diese oder ähnliche Anwendungen kennen und deren Vorteil gegenüber traditionellen Technologien oder Produkten bewerten. Nach der Zahl der Nennungen ist der Lotuseffekt der bekannteste Naneffekt. Auch andere Oberflächenphänomene, wie Glas mit Antireflexbeschichtung oder antibakterielle Wandbeschichtung auf der Grundlage von Silbernanopartikeln waren noch gut bekannt. Innovationen, wie Ultrahochleistungs Beton (UHPC), Vakuumisulationspaneele oder photokatalytisch aktive Baustoffe auf der Basis von  $TiO_2$ -Nanopartikeln kannten nur wenige Befragte.

Immerhin 27 % der befragten Unternehmen nutzten 2008 bereits die Nanotechnologie in ihren Produkten oder Verfahren. Funktionale Oberflächenbeschichtungen in Form von Farben und Lacken wurden am häufigsten genannt. Aber auch selbstreinigendes Glas, selbstreinigende bzw. luftreinigende Dachsteine und Dachziegel, nanotechnologisch beschichtete Sanitärausstattung, Putz und Gipskarton mit Phasenwechselmaterialien und Vakuumisulationspaneelen werden bereits verwendet. Bis zum heutigen Zeitpunkt hat die Zahl der Produkte und Pilotanwendungen kontinuierlich zugenommen. Einige Pro-

dukte, insbesondere Farben und Beschichtungen haben sich bereits am Markt etabliert.

Aufgrund der Langlebigkeit der Produkte der Bauwirtschaft besteht ein großes Bedürfnis nach Sicherheit in Bezug auf die Funktionstüchtigkeit und Haltbarkeit/ Dauerhaftigkeit der innovativen Produkte und Technologien und in Bezug auf die gesundheitliche und ökologische Unbedenklichkeit. Die Risiken für Anwender innovativer Produkte und Technologien werden deutlich wahrgenommen. Erfolgreicher Technologietransfer funktioniert nur bei Reduzierung dieser Risiken durch umfassende Information, nachhaltige Kooperation sowie die weitgehende rechtliche und technologische Absicherung potenzieller Risiken.

Deshalb ist bei der Vermarktung innovativer Produkte in der Bauwirtschaft, unabhängig davon, ob sie auf Nanotechnologie basieren, mit einem sehr hohen Aufwand für die Erprobung in Pilotprojekten, für die Normung bzw. Zulassung neuer Produkte und für die Information und Schulung von Anwendern (Planer und Bauunternehmen) sowie Bauherren zu rechnen. Hierbei können weitreichende Kooperationen entlang der gesamten Wertschöpfungskette unter Einbeziehung der zuständigen Genehmigungsbehörden und Standardisierungsinstitute (DIN) von großer Bedeutung sein.

Im Rahmen des Projektes Einsatz von Schlüsseltechnologien wie Bionik und Nanotechnologien in der Bauwirtschaft unterstützt die RG-Bau diesen langwierigen und komplizierten Prozess durch die Bereitstellung aktueller und verständlicher Informationen für alle Akteure der Wertschöpfungskette Bau.