

# Beton – alter Baustoff neu entdeckt

INNOVATIVE BETONE ERMÖGLICHEN

NEUE ANWENDUNGEN UND EINE STEIGERUNG DER NACHHALTIGKEIT

Beton ist ein sehr alter Baustoff. Der künstlich hergestellte Stein ist ein vergleichsweise günstiges Massenprodukt, das vielfältig eingesetzt wird. Wissenschaftler vom Institut für Baustoffe forschen an Methoden, um Spezialbetone zu entwickeln, die für besondere Bauten wie zum Beispiel extrem hohe Türme oder Windenergieanlagen geeignet sind.



Abbildung 1  
*Burj Khalifa in Zahlen:*  
 Höhe: 828 Meter  
 Stockwerke: 200, 160 nutzbar  
 Geschossfläche: 517.240 m<sup>2</sup>  
 Aufzüge: 57  
 Gewicht: 500.000 Tonnen  
 Konstruktion: Stahlbeton und Stahl  
 Fassade: Glas und Aluminium  
 Bauzeit: 2004–2010  
 Arbeitsstunden: 22 Millionen  
 Baukosten: ca. 1 Milliarde Euro  
 Eröffnung: 4. Januar 2010  
 Quelle: picture alliance/Geisler-Fotopress

ellen Weltrekord darstellt. Der Beton muss hierfür eine besondere Stabilität im frischen, fließfähigen Zustand aufweisen, damit er ohne extreme Höhe gefördert und an der Einbaustelle angekommen, gut verarbeitet und sicher eingebaut werden kann. Er darf in der Wüstenhitze nicht schon in der Rohrleitung erstarren, weshalb man in den großen Höhen nur nachts betonieren konnte.

Der Burj Khalifa in Dubai ist mit 828 Metern das aktuell höchste Gebäude der Welt. Der Turm stellt in vielerlei Hinsicht einen Superlativ dar. Neben seiner unglaublichen Höhe, den 200 Stockwerken und den 1 Milliarde Euro Baukosten repräsentiert er die aktuelle Weltspitze des Bauens. Technisch möglich wurde die-

ser Turm nur durch den innovativen Einsatz neuer Bautechniken und hochfester Betone.

Um in diesen Höhen bauen zu können, war es notwendig, den vornehmlich verwendeten Baustoff Beton bis zur Einbaustelle zu fördern. Hierzu wurde Beton bis über 600 Meter hoch gepumpt, was den aktu-

Doch die Entwicklung schreitet weiter voran. So wird aktuell am Bau von solaren Aufwindkraftwerken (Solar Chimney) in ariden Gebieten geforscht. Die Höhe des zentralen Turmes soll dabei sogar 1000 Meter betragen. Um solche Bauwerke erstellen zu können, muss der eingesetzte Beton über die komplette Höhe gepumpt werden. Dem-

zufolge müsste der aktuelle Weltrekord beim Pumpen von Beton gleich um mehr als 50 Prozent überboten werden. Neben der enormen Höhe stellen die extremen klimatischen Bedingungen eine besondere Herausforderung dar. Beispielsweise ist bei der Herstellung solcher Betone Eis statt Wasser notwendig, um die Temperatur des Frischbetons zu reduzieren und die Reaktionsgeschwindigkeit des Zementes herabzusetzen. Es

wird die Verbindung zwischen der stählernen Gründungsstruktur und dem eigentlichen Turm durch Rohr-in-Rohr-Verbindungen, den sogenannten »Grouted Joints«, ausgeführt. Der Spalt zwischen den Rohren wird mit speziellen Vergussbetonen ausgefüllt. Die verwendeten Vergussbetone müssen für diesen Anwendungsfall noch weitaus höhere Festigkeiten aufweisen als sie bereits zum Bau des Burj Khalifa notwen-

Um den Aufwand bei der Offshore-Montage zu minimieren, werden die Gründungsstrukturen üblicherweise an Land komplett vorgefertigt und in möglichst großen Teilabschnitten per Schiff oder Ponton zum Einbauort transportiert und am Einbauort mit Errichterschiffen montiert.

Die geplanten Mega-Strukturen können im Gegensatz zu den aktuellen Varianten nicht mehr komplett aus Stahl ge-

Abbildung 2  
Solar Chimney, solare Aufwindkraftwerke mit einer Höhe von 1000 Metern in Wüstengebieten

Quelle: picture alliance/empics



Abbildung 3  
Jacket-Konstruktionen als Gründungsstruktur für Offshore-Windenergieanlagen.

klings schon etwas paradox, dass man in der Wüste zunächst eine Eisfabrik bauen muss, bevor man den Spezialbeton herstellen kann. Mitarbeiter am Institut für Baustoffe der Leibniz Universität Hannover forschen an Konzepten zum Entwurf solcher Betone, die speziell für diesen Anwendungsfall geeignet sind und über große Höhen entmischungsfrei gepumpt werden können.

Ein weiteres faszinierendes Anwendungsgebiet für innovative High-Tech-Betone stellt der Bau von Offshore Windenergieanlagen dar. Aktuell

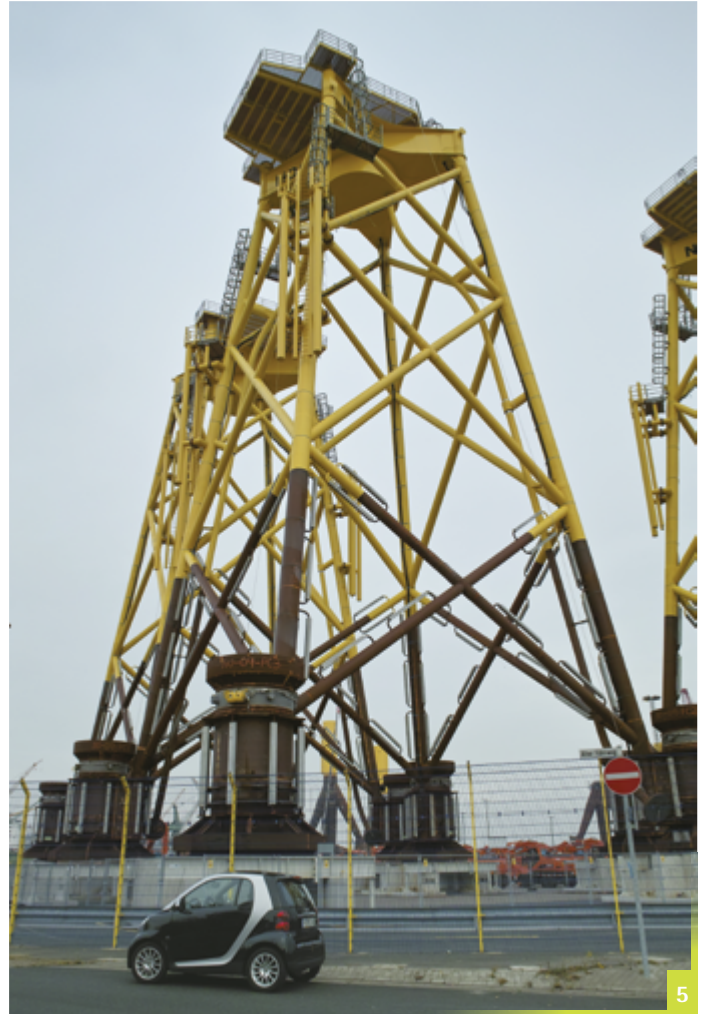
dig waren. Weiterhin benötigen sie eine über mehrere Stunden anhaltende extreme Fließfähigkeit, damit sie beispielsweise in nur 5 Zentimeter breiten Spalten über bis zu 28 Meter Höhe fehlstellenfrei eingebracht werden können. Um die guten Windverhältnisse auf dem offenen Meer besser nutzen zu können, sollen zukünftig Anlagen in immer größeren Wassertiefen (über 50 Meter) errichtet werden. Hierfür sind unter anderem Gründungen aus großen Fachwerk-Mega-Strukturen vorgesehen, die die Dimensionen der aktuellen Anlagen deutlich überschreiten.

fertigt werden, da sie sonst zu schwer werden und mit den verfügbaren Kränen nicht mehr bewegt werden können. Abhilfe sollen Hybrid-Rohre aus stahlblechummantelten ultrahochfestem Beton schaffen, die derzeit am Institut für Baustoffe erforscht werden. Die Rohre bestehen aus zwei dünnwandigen Stahlrohren die im Inneren mit einem ultrahochfesten Beton vergossen sind. Durch diese spezielle Konstruktion erreichen die Rohre Festigkeiten von etwa 200 N/mm<sup>2</sup> (Megapascal: 1 MPa = 1 Million Pa = 1 N/mm<sup>2</sup>) und sind leichter und tragfähiger als Stahl alleine.



Abbildung 4  
Fließfähigkeit verwendeter Vergussbetone

Abbildung 5  
Im Hafen vorgefertigte Jacket-Gründungsstruktur, bereit zur Offshore Montage. Zukünftige Strukturen werden die Dimensionen nochmals übersteigen.



Sie weisen ein ähnliches Verhältnis von Traglast zu Gewicht wie Aluminium auf, das für Offshore-Anwendungen nicht korrosionsbeständig genug und auch zu teuer wäre. Beton als dauerhaftes und robustes Leichtbaumaterial wird möglicherweise nicht nur für die Offshore-Windindustrie wegen seiner Vorteile für die Logistik und das Handling in Werk eine außerordentliche Bedeutung erlangen.

Bei leichten filigranen Betonkonstruktionen können Schwingungsbelastungen maßgebend für die Tragwerksicherheit werden. Unter schwingender Beanspruchung können Schädigungen im Material auftreten, die als Materialermüdung bezeichnet werden. Daher wird an der Leibniz Universität seit längerem das Ermüdungsverhalten speziell von hochfesten und ultra-hochfesten Betonen erforscht. Die Forschungsergebnisse haben aktuell Eingang in internationale Regelwerke, wie dem fib-Modell Code 2010, gefunden, der in den kommenden Jahren die Grundlage für die Weiterentwicklung der europäischen und internationalen Normung im Betonbau darstellt.

Trotz der beschriebenen, teilweise speziellen Anwendungsgebiete bleibt der Baustoff Beton ein vergleichsweise günstiges Massenprodukt, das überwiegend aus lokal verfügbaren Ausgangsstoffen (Zement, Sand, Kies) hergestellt wird. Daher müssen die Zusammensetzungen der verwendeten Betone nicht nur auf spezielle Höchstleistungen im jeweiligen Anwendungsgebiet, sondern auch auf die vor Ort zur Verfügung stehenden Ausgangsstoffe abgestimmt werden. So bedarf es besonderer Entwurfskonzepte, mit denen Spezialbetone, aber auch zunehmend herkömmliche Betone mit maßgeschneiderten Eigenschaften, wie Sichtbeton

oder besonders fließfähige, einfach zu verarbeitende Betone, effizient entwickelt und an die jeweilige Bauaufgabe angepasst werden können.

Das Institut für Baustoffe forscht daher intensiv an praxistauglichen Entwurfskonzepten. Dabei stellen die gegensätzlichen Anforderungen im frischen und festen Zustand eine besondere Herausforderung dar. Man benötigt im Beton für eine gute Verarbeitung im frischen Zustand einen ausreichenden Wassergehalt. Im erhärteten Zustand ist möglichst wenig Wasser erwünscht, weil es zu Poren führt, wodurch die Festigkeit und Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen sowie die Oberflächenqualität für Sichtbeton reduziert wird.

Ein Hauptziel lautet somit, mit einer möglichst geringen Wassermenge eine gute Verarbeitbarkeit zu erreichen. Hierfür wurde in den vergangenen Jahren am Institut für Baustoffe eine Methode entwickelt, die es ermöglicht, die feinen und feinsten Bestandteile des Betons so aufeinander abzustimmen, dass das benötigte Wasser optimal genutzt wird.

Um die Abstimmung der Systeme weiter zu erhöhen, werden Stoffe verwendet, die als Nebenprodukte in industriellen Prozessen entstehen, wie zum Beispiel Flugasche (Kohlekraftwerke) und Hüttensand (Stahlherstellung). Aber auch natürliche Gesteinsmehle wie Kalksteinmehl oder Trass können als Zusatzstoffe für die Betonherstellung verwendet

werden. Neben ihrer Wirkung zur Raumfüllung können diese Stoffe zur Steigerung der Festigkeit beitragen. So kann eine feinere Abstimmung mit dem Zement im Bereich des Bindemittels erzielt werden.

Daneben liefert die Bauchemie spezielle Zusatzmittel, die es ermöglichen, Eigenschaften wie die Fließfähigkeit, die Stabilität oder die Erstarrungsgeschwindigkeit gezielt zu beeinflussen. Ergänzend werden ultrafeine Stoffe, wie Silikastaub (Reststoff aus der Chipproduktion) oder aufbereitetes Metakoalin (getemperte Tonmineralien), die teilweise feiner als Zigarettenrauch sind, eingesetzt, um Betone auf der Nanoskala zu beeinflussen. Damit kann die Wirksamkeit des eingesetzten Zements entscheidend verbessert werden.

Im Sinne der Nachhaltigkeit des Bauens mit Beton ist der Zementbedarf eine entscheidende Größe. Dies liegt vor allem daran, dass bei der Herstellung von Zement neben dem CO<sub>2</sub>, das der Erzeugung der Prozessenergie entstammt, zusätzlich dem Rohmaterial Kalkstein durch eine chemische Abspaltung CO<sub>2</sub> entzogen und freigesetzt wird.

Eine Möglichkeit, den CO<sub>2</sub>-Gehalt zu reduzieren, besteht im teilweisen Ersatz des Zementes durch Zusatzstoffe, wie die bereits eingesetzten Industrie- nebenprodukte Flugasche und Hüttensand. Allerdings wird bei den Industrieprozessen, in denen diese Stoffe gewonnen werden, ebenfalls CO<sub>2</sub> freigesetzt. Da die Stoffe aktuell noch als Abfallprodukte gelten, wird ihr CO<sub>2</sub>-Anteil dem jeweiligen Hauptprodukt zugeschlagen und sie gelten somit als CO<sub>2</sub>-neutral. Betrachtet man sie jedoch korrekterweise als Wertstoff muss ihnen ein anteiliger CO<sub>2</sub>-Gehalt aus dem Herstellprozess des Hauptprodukts zugerechnet werden.



#### Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus

Jahrgang 1954, war 12 Jahre lang in der Bauindustrie tätig. Seit 2001 leitet er das Institut für Baustoffe an der Leibniz Universität Hannover. Im Nebenamt ist er geschäftsführender Direktor der Material Prüfanstalt für das Bauwesen, Hannover. Zudem ist er Gründungsgesellschafter der LPI Ingenieurgesellschaft mbH, Prof. Lohaus – Dr. Petersen. Kontakt: [lohaus@baustoff.uni-hannover.de](mailto:lohaus@baustoff.uni-hannover.de)

Es existieren alternative Zusatzstoffe, wie natürliche Puzzolane oder Kalksteinmehle, die zumindest in ihrer Entstehung weitgehend als CO<sub>2</sub>-neutral angesehen werden können. Ihre potenzielle Verwendung wird in einem NTH-Verbundforschungsvorhaben am Institut für Baustoffe intensiv untersucht. Hierzu wird ein Konzept zum Entwurf von Beton mit verminderter CO<sub>2</sub>-Last entwickelt. Da ein reiner Austausch des Zementes gegen einen Zusatzstoff in jedem Fall zu einem Verlust der Leistungsfähigkeit führt, ist es notwendig, die erforderliche Leistungsfähigkeit durch zusätzliche betontechnologische Maßnahmen sicherzustellen. Einen entscheidenden Einfluss hat hierbei vor allem der für die Verarbeitung notwendige Wassergehalt. Somit können die oben beschriebenen Ansätze aus dem Entwurf von Hochleistungsbetonen genutzt werden, um den notwendigen Wassergehalt durch die optimale Abstimmung der Ausgangsstoffe und die Verwen-



#### Dr.-Ing. Thomas Steinborn

Jahrgang 1975, ist seit 2007 im wissenschaftlichen Dienst in der Funktion als leitender wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baustoffe tätig. Zuvor hat er am Fachgebiet Stahlbau der Technischen Universität Darmstadt promoviert. Kontakt: [t.steinborn@baustoff.uni-hannover.de](mailto:t.steinborn@baustoff.uni-hannover.de)

dung von verflüssigenden Zusatzmitteln zu senken.

Die Forscher verfolgen dabei das Ziel, die CO<sub>2</sub>-Last der eingesetzten Betone durch den Einsatz alternativer Zusatzstoffe gegenüber Betonen, deren angenommener Zement eine Zusammensetzung der durchschnittlichen Zusammensetzung der in Deutschland im Jahr 2010 produzierten Zemente entspricht (EPD-Zement), zu halbieren. Hierdurch entsteht ein deutlicher Beitrag zur Nachhaltigkeit der Betonbauweise.

Durch sein weiteres Entwicklungspotenzial und seine Anpassungsfähigkeit bietet der alte Baustoff Beton ein enormes Innovationspotenzial. Dies gilt sowohl für die Verwendung in neuen Anwendungsfeldern wie der Offshore-Windindustrie als auch für die wirtschaftliche Entwicklung in Schwellenländern als günstiger und nachhaltiger Baustoff und die nachhaltige Entwicklung weltweit.



#### Dipl.-Ing. Christoph Begemann

Jahrgang 1984, ist seit 2012 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baustoffe. Als Mitglied der Arbeitsgruppe Betontechnologie und Frischbeton, beschäftigt er sich mit der Entwicklung und Bewertung von Betonen mit verminderter CO<sub>2</sub>-Last zur Nachhaltigkeitssteigerung der Betonbauweise. Kontakt: [c.begemann@baustoff.uni-hannover.de](mailto:c.begemann@baustoff.uni-hannover.de)