

Bernd Hillemeier

## Hochleistungsbeton – Internationale Entwicklungen

Prof. Dr. Ing. Bernd Hillemeier  
 Technische Universität Berlin

Hochleistungsbeton (HL-Beton) und internationale Entwicklungen sind Superlative, die gleichzeitig Konkurrenzängste erzeugen und Träume von unbegrenzten Möglichkeiten hervorrufen. Technik, vor allem technische Innovationen, sind die Inhalte, Netzwerke sind der Weg und das Ziel.

Die Werkstoffe nehmen eine Schlüsselposition bei den Innovationen und damit in der Technologie des Bauens ein. Sie bestimmen die Wirtschaftlichkeit, Bauzeit, Dauerhaftigkeit und Qualität von Bauwerken. Die strategische Zielrichtung im Bauwesen ist deshalb die Weiterentwicklung der Baustoffe. Für den am weitesten verbreiteten Baustoff Beton werden nachfolgend Entwicklungen und Tendenzen aufgezeigt.

Bild 1: Die Auswertung der Zeitschriften CCR und RILEM von Jänner bis Oktober 2003. Gelb geschrieben sind die subjektiv als innovativ eingeschätzten Forschungsfelder mit der Anzahl der gezählten Veröffentlichungen und der Herkunftsländer der Autoren.

Mixtures (Additives, Admixtures)	12	
Corrosion	5	<b>D, AU</b>
Leaching, Electricity	5	
Fresh Concrete / Rheology	4	Canada, S. Korea, Egypt, France
Temperature	4	
Nano, Phases	4	Pakistan, Tunisia, CH, USA
Reinforced Concrete	4	<b>D</b>
Fibres	4	China, USA, Korea, France
Modelling	3	Turkey, USA, Korea
Waste	2	
Rotation	1	
CFRP	1	

### Forschung international

Internationale Veröffentlichungen zum Thema Hochleistungsbeton sind Anhaltspunkte für Forschungsfelder. Zwei internationale Fachzeitschriften, Cement and Concrete Research (CCR) und RILEM: Materials and Structures, berichteten von Jänner bis Oktober 2003 über die in Bild 1 dargestellten Forschungsthemen. „Rheologie des Frischbetons“ bezieht sich auf selbstverdichtenden Beton, „Nano und Phases“ befasst sich mit der Nanostruktur und der Nanotechnologie zur Entwicklung neuartiger Werkstoffeigenschaften, wobei die Werkstoffbindungen und der Aufbau der Werkstoffe nach Art

und Menge der festen Phasen Gegenstand der Betrachtung sind. „Fibres“ behandelt Material, Form und Haftung der Fasern in der Matrix und beschreibt die Steigerung der Duktilität. „Modelling“ meint die mathematische Modellierung der Porosität und deren Einfluss auf Volumenänderungen, wie Schwinden und Quellen, aber auch die Vorausbestimmung von Festigkeits- und Verformungseigenschaften auf thermodynamischer Basis oder mithilfe neuronaler Netze.

### Baufaufgaben – Motor für Innovationen

Bauen ist Notwendigkeit und Nützlichkeit, ist Sicherheit und Luxus, ist Faszination. „Bauen ist ein Spiegel der Bedürfnisse und Wünsche der Gesellschaft.“

Die gesellschaftlichen Komponenten für das Bauen bleiben relevant, sie wandeln sich mit den gesellschaftlichen Veränderungen. Erhaltung, Instandsetzung und Modernisierung im Wohnungsbau müssen immer neue Anforderungen erfüllen.

Die Mobilität der modernen Industrie- und Freizeitgesellschaft schafft Bauaufgaben in großem Rahmen.

Zum Schutz der Umwelt warten naturentlastende Baumaßnahmen dringend auf Verwirklichung. Die Abwasserkanäle in Deutschland reichen, aneinander gereiht, von der Erde bis zum Mond, 380.000 km weit. Etwa die Hälfte davon ist durchlässig und verseucht schleichend das Grundwasser. Preiswerte, schnelle, dauerhafte und inspektionsfreundliche Sanierungs- und Neubausysteme sind zu entwickeln. Allein in Deutschland existiert ein Markt von 200 Milliarden Euro Umfang.

### Hochleistungsbeton

Beton erlebt in unseren Tagen einen Innovationsschub. Er galt bisher als einfaches Dreistoffsystem aus Zement, Wasser und Zuschlag. High-Tech-Beton ist ein 6-Stoff-System, bestehend aus Zement, Zuschlag, Wasser, Zusatzmittel, Zusatzstoff und Luft. Hinter jeder dieser Komponenten stehen Industrien und Wissenschaftsbereiche der angewandten Physik und der Chemie. Sie fördern ökonomische und ökologische Forschungs- und Entwicklungsleistungen in großem Stil.

Die Festigkeit des Betons kann man durch das Spiel mit der Granulometrie der festen Ausgangsstoffe in schwindelnde Höhen treiben. Druckfestigkeiten bis zu 800 MPa werden bei der Beschränkung des Größtkorns auf 1 mm erreicht. Dieser Beton könnte das Bauen mit Fertigteilen revolutionieren. Baustahl besitzt zum Vergleich Festigkeiten unter 500 MPa. Schnelle Festigkeitsentwicklung, frühes Ausschalen, frühe Nutzung des Bauwerks mit wirtschaftlichen Vorteilen, geringeres Kriechen und Materialeinsparung sind die großen Vorzüge hochfesten Betons.

### Faserverstärkung

Fasern können die Zähigkeit des Betons bis zur vollständigen Einsparung der schlaffen Bewehrung verstärken. Ein eindrucksvolles Beispiel ist der über eine Länge von 120 m gespannte Bogen der Seonyu Fußgängerbrücke über den Han-Fluss in Seoul in Südkorea.

Fasern können Baustoffe in erdbebengefährdeten Regionen duktil und fest und

damit sicher gegen schlagartiges Versagen machen. Die Anstrengungen, die für leichte aber stabile Tragwerke unternommen werden, sind auf Bild 3 veranschaulicht.

Die TUB entwickelt für derartige Tragstrukturen gemeinsam mit dem Building and Housing Research Center (BHRC) in Teheran einen leichten, zähen und zugfesten HL-Beton.

### Nanowelt

Eine Ära neuer High-Tech-Baustoffe mit erstaunlichen Eigenschaften beginnt. Vorgänge und Konstruktionsdetails in der Nanowelt zeigen uns den Weg zu deren Erforschung. Selbstverdichtung, dauerhafte Schönheit von Beton und nicht rostender Stahl sind Perspektiven, die sich eröffnen.

Die Omnipräsenz von Beton, vor allem von gewöhnlichem Beton, lässt dessen Außerordentlichkeit und Komplexität vergessen. Der Werkstoff Beton ist mit einem lebenden Organismus vergleichbar. Am Prozess seiner Festigkeitsbildung sind eine Unmenge chemischer Substanzen beteiligt, um

Bild 2: Der 120 m weit gespannte Bogen der Seonyu Fußgängerbrücke über den Han-Fluss in Seoul in Südkorea  
© LAFARGE, Ductal



Bild 3: Eine Deckenkonstruktion im Iran. Aus Bambus, Drahtgewebe, Gips und Dämmstoff werden leichte, duktile und ausreichend standfeste Tragstrukturen für erdbebengefährdete Gebiete im Iran hergestellt. [5]





Bild 4: Science Center Phaeno von Zaha Hadid in Wolfsburg, eine Symphonie in selbstverdichtendem Beton

### Selbstverdichtung

Nicht die Festigkeit setzt der Betontechnologie Grenzen, sondern vielmehr Verarbeitbarkeit und Verarbeitungszeit. Hier profitiert die Betonbauweise von den neuesten Erfahrungen mit selbstverdichtendem Beton. Neue Superverflüssiger und spezielle Zusatzstoffe führten in Japan und auch bei uns zu „leisem Beton“, der gänzlich ohne die brummende Rüttelenergie auskommt und unter seinem eigenen Gewicht von selbst fließt, entlüftet sowie vollständig verdichtet. Ausgezeichnete Homogenität und hohe Dauerhaftigkeit wie auch architektonische Freiheiten bei komplizierten Formen und schnelleres Bauen zählen zu seinen Vorzügen.

Selbstverdichtender Beton (SVB) kann im Gegensatz zu konventionellem, normalfestem Rüttelbeton zwei zurzeit noch wirtschaftliche Nachteile haben. So muss die Frischbetonkonsistenz mit unüblich aufwendigen Prüfungen nachgewiesen werden und führt die hohe Packungsdichte des Mehlkorns leicht zu Festigkeiten eines hochfesten Betons. Den Stand der Technik von SVB dokumentiert der Report zum RILEM-Kongress in Reykjavik, Island, im August 2003. [2]

hierarchische Strukturen vom Nanometer bis zum Meter zu bilden, um vom Beginn des Mischens mit Wasser Festigkeit zu bilden und über Jahrzehnte weiter zu reifen.

Eine Herausforderung an die Herstellung von Beton ist die Verwendung industrieller Nebenprodukte im Dienste von Energieeinsparung und Umweltschutz. Um ehrgeizige Fortschritte in der Betontechnologie und bei verwandten Baustoffen zu erzielen, ist ein Netzwerk zur Erforschung des Nanowissens zementgebundener Materialien nötig. Die Europäische Union unterstützt im 6. Rahmenprogramm diese Forschung. Fasern der futuristischen Art sind so genannte Nanoröhren. Sie sind fester als Stahl. Die Fantasien hinsichtlich dieser nur wenige Millionstel Millimeter dicken Fäden reichen von Autokarrosserien, die sich nach einem Zusammenprall von selbst ausbeulen, bis zu erdbebensicheren Gebäuden. Ihre Festigkeit erreicht 45 Milliarden Pascal. Hochfeste Stähle brechen bei etwa zwei Milliarden Pascal. [6]

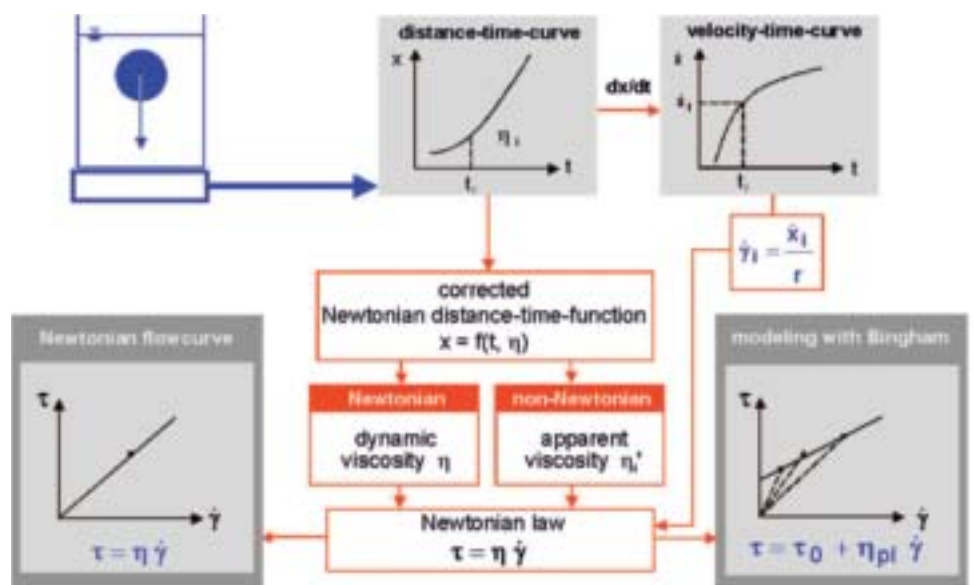


Bild 5: Methode zur Ermittlung der Fließkurve eines SVB [2]

Forschungsziel an der Technischen Universität Berlin (TUB) ist es, durch Zusatz von inerten Steinmehlen normalfesten SVB des Mehlkorntyps herzustellen [1]. Gleichzeitig wird an der TUB ein einfaches rheologisches Messverfahren zum Nachweis der Frischbetoneigenschaften entwickelt. Das Messprinzip ist vergleichbar dem eines Kugelfallviskosimeters. Im Unterschied zum Viskosimeter wird aus der Sinkgeschwindigkeit einer beschleunigenden Kugel numerisch eine Fließkurve ermittelt. [2] Dadurch wird sich das Qualitätsmerkmal Selbstverdichtung auf der Baustelle kontinuierlich für eine qualitätsgesicherte Wirtschaftlichkeit überprüfen lassen. Behälter und Kugel sind auf Bild 5 oben links dargestellt. Der Behälter sitzt auf der Mess- und Auswerteeinheit.

### Dauerhafte Schönheit

Zum Massenbaustoff Beton wird es wohl keine Alternative geben. Die Oberflächen unserer Bauwerke sollen jedoch zunehmend ansprechender werden. Auch dafür finden wir Lösungen: sich selbst reinigende Baustoffoberflächen. Schmutz perlt bei Regen von Fassaden ab. Dies ist ein Reinigungseffekt, der nach den Blättern der Lotusblume benannt wurde.

Das gegenteilige Phänomen nutzen die Japaner für selbst reinigende Oberflächen. Eine bei 750° C auf Keramikfliesen aufgebraute Spezialschicht verleiht der Oberfläche eine so große Adhäsionskraft, dass die Wassertropfen anstatt abzuperlen, sich als gleichmäßiger Film auf der Fliese verteilen und so alle Schmutzpartikel „unterspülen“.

kehrplanung von morgen. Der Untergrund wird erschlossen für Verkehrsströme, Produktions- und Lagerstätten, Einkaufsmeilen, Kultur- und Sportanlagen, Ver- und Entsorgungsnetze, Kommunikation und menschengerechte Lebensverhältnisse in einer ökologisch intakten Umwelt. Der Blick in die Tiefe wird zu einem Blick in die Zukunft.

Ein reales Vorbild für die „Terra-City“ von morgen gibt es schon im kanadischen Montreal. Dort entwickelte sich seit den 80er Jahren unter dem historischen Stadtzentrum die „Ville Souterraine“, die größte unterirdische Stadt. 1.800 Geschäfte, 200 Restaurants, 34 Kinos und Theater sowie unterirdische Sportstätten. Die Passagen haben eine Länge von 29 km.

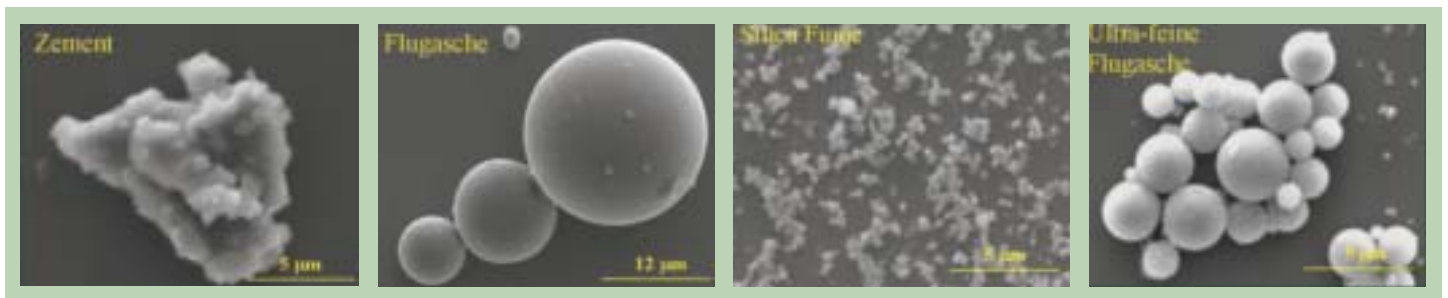


Bild 6: Die Ausgangsstoffe für eine dichteste Packung im Feinstbereich eines Zementsteins [4]

### Säureresistenz

Eine „dichteste“ Packung des Zuschlaggemischs, abgestuft bis in den Feinstbereich, minimiert den Bindemittelanspruch auf nur 50 % eines herkömmlichen Hochleistungsbetons. Zusammen mit einer Bindemitteloptimierung aus reaktiven Stäuben und speziellem Zement ergibt sich säureresistenter Beton für abwassertechnische Anlagen, Kühlturmschalen oder Gründungsbauwerke in aggressivem Baugrund. Er ist beständig gegenüber lösendem und treibendem Angriff, hochdicht gegenüber der Diffusion von Chloriden und Gasen und gegenüber Wasser. Dieser Beton schwindet durch die dichteste Packung und den niedrigen Zementgehalt um etwa 40 % weniger als herkömmlicher Beton.

### Makrotechnologien

In den vergangenen 50 Jahren hat sich die Zahl der Menschen, die in Städten leben, von 740 Millionen auf rund drei Milliarden mehr als vervierfacht. London brauchte 130 Jahre, um die Einwohnerzahl von einer auf acht Millionen zu steigern. Mexiko City hat das in 30 Jahren geschafft. Von „angemessener Unterkunft für alle“, ausreichender Trinkwasserversorgung, Abwasserbeseitigung, Abfallentsorgung und der „Förderung umweltverträglicher Energieversorgungs- und Verkehrssysteme“ kann in den Riesenstädten der Entwicklungs- und Schwellenländer noch nicht gesprochen werden.

Die Erdoberfläche kann nicht vergrößert werden. Der Blick unter die Erde eröffnet neue Horizonte, denn hier bieten sich neue Gestaltungsräume für die Stadt- und Ver-

### Wissenschaftliche Ausblicke

Die moderne Wissenschaft befasst sich mit den Eigenschaften und dem Verhalten materieller Strukturen, die zu klein sind, um die uns bekannten makroskopischen Eigenschaften aufzuweisen, aber auch zu groß, um der Mikrowelt einzelner Atome oder Moleküle anzugehören. Schier unendliche Werkstoffvariationen werden denkbar, wenn man Nanopartikel aus Metallen oder nichtmetallisch-anorganischen Stoffen erzeugt und sie in andere Materialien einbettet. Die Grenzen zwischen den klassischen Werkstoffen Glas und Keramik, Kunststoff und Metall zerfließen. So gibt es bereits anwendungsfähige, hauchdünne, unsichtbare Beschichtungen, die empfindliche Aluminiumfelgen korrosions- und kratzfest machen. Mit solchen Beschichtungen veredelte Glas- oder Kunststoffscheiben beschlagen nicht mehr.

Smart materials, adaptive Materialien, haben keine festen Eigenschaften mehr, sondern variieren diese selbsttätig aufgrund äußerer Einflüsse. Sich selbst abdunkelnde Gläser sind ein Beispiel dafür.

Ein noch utopisch fernes Ziel der Werkstoffwissenschaftler ist es, Werkstoffe wachsen zu lassen. Es muss jedoch noch der genetische Code dazu entdeckt werden. Dem Wachstum mit elektromagnetischen Feldern eine Richtung zu geben oder Kunststoffteile beim Rapid Prototyping aus einer Flüssigkeit durch Laserenergie wachsen zu lassen, deuten in diese Richtung. Das fertige Ergebnis haben wir schon als Modell vor Augen, die baumartigen Tragstrukturen von Meinhard von Gerkan im Flughafen Stuttgart. Noch musste geschweißt werden, vielleicht brauchen wir jedoch bald nur noch zu „säen“ und wachsen zu lassen.



Bild 8: Terra City, Bauaufgaben in Hochleistungsbeton für die Infrastruktur von Ballungsräumen (www.gstt.de)

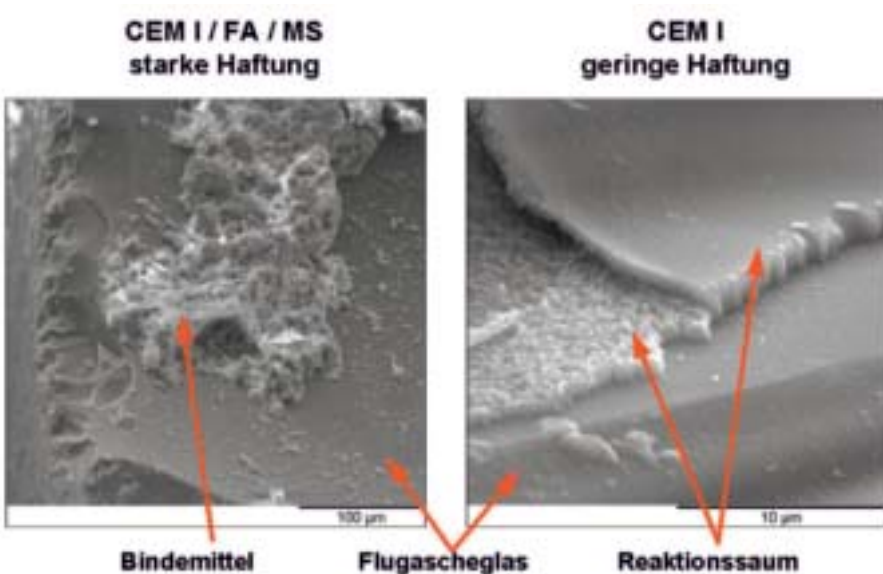


Bild 7: Durch eine physikalisch-chemisch begründete Kombination von Zement, Flugasche und Silikastaub lässt sich im Zementstein der Haftverbund steigern (links) oder schwächen (rechts). [3]

### Literatur

- [1] Buchenau, G., Hillemeier, B. (2001): Gesteinsmehle für selbstverdichtenden Beton, Betonwerk + Fertigteil-Technik. Vol. 67. November 2001. S. 32–37.
- [2] Buchenau, G., Hillemeier, B. (2003): Quality-Test to prove the flow behavior of SCC on site. Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium Self-Compacting Concrete. August 2003, Island. S. 84–93.
- [3] Hillemeier, B., Hüttl, R.: Hochleistungsbeton – Beispiel Säureresistenz, Betonwerk und Fertigteil-Technik. Heft 1/2000. S. 52–60.
- [4] Quelle: NIST: National Institute of Standards and Technology. Technology Administration. U.S. Department of Commerce.
- [5] Prototyp in der Versuchsanstalt des BHRC: Building and Housing Research Center. Teheran, Iran.
- [6] Spektrum der Wissenschaften. Spezial 2/2001. Nanotechnologie.