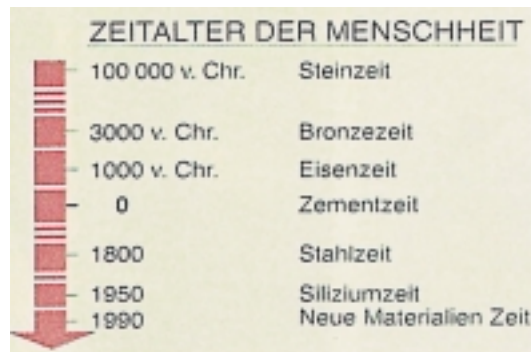


Neue Baustoffe – Innovationen aus der Mikrowelt

Bernd Hillemeier

Materialien und Stoffe sind es, die seit Menschengedenken den Stand der Entwicklung charakterisieren, nach ihren Materialien wurden die Epochen der Menschheit klassifiziert (Abb. 1). Die Neuerungen und ihre Verbreitung vollziehen sich in immer kürzeren Zeitabständen. Hundert Jahre hatte die Industrielle Revolution gebraucht, um die Welt zu erobern, die Verbreitung der Silizium-Technik brauchte dagegen zehn Jahre.

Abb. 1
Die Materialzeitalter
stellen Revolutionen,
nicht Evolutionen
dar



Die erkennbare spezifische Aufgabe des Bauingenieurs setzt mit dem 18. Jahrhundert ein, mit dem Verbauen großer Massen an Werkstoffen. Mit dem Wachstum der Bevölkerung, dem Entstehen von Bürgertum und Wohlstand wurden Häuser, Brücken, Straßen, Kanäle, Industrieanlagen in großen Mengen gebaut. Der gebräuchlichste Werkstoff wurde der Beton. Er ist das in Volumeneinheiten gemessen meist verwendete Material unserer Zeit. Die Bilder unserer Städte zeigen es: Baustoffe prägen Bauwerke. Die Menschen empfinden es: Bauwerke prägen kulturelles und gesellschaftliches Bewußtsein. Dennoch spielen Baustoffe dabei eine untergeordnete Rolle. Wie die Menschen mit Energie, Nahrungsmitteln und Werkstoffen in der Zukunft umgehen, wird ihr Schicksal bestimmen.¹ Doch denken wir dabei lediglich an Energie und Nahrung und natürlich an Wasser. In der Zukunft werden wir uns aber immer häufiger fragen: Wie gesund sind Werkstoffe? Wie

verhalten sie sich in Bauwerken, wenn die Erde bebt?

Nur der Himmel ist die Grenze

Eine Ziegelsäule kann 1.250 m hoch werden, bis die untersten Steine durch die Auflast zerquetschen. Die kritische Länge errechnet sich aus dem Quotienten der Druckfestigkeit durch die Rohdichte. Ein Stahlstab reißt unter seinem Eigengewicht ab, wenn er 5 km lang ist, ein Holzstab, wenn er 20 km lang ist und eine Spannstahlstange, wenn sie 25 km Länge erreicht. Die Baustofftechnologie scheint keine Grenzen zu kennen, wenn auch die Luft um Wolkenkratzer in immer schwindelerregenderen Höhen dünn wird. Geträumt wird in Japan von einer 4.000 m hohen Turmstadt (Abb. 2), dem Fujiyama nachempfunden und als Heimat für bis zu 700.000 Menschen erdacht. Auf dem 3.776 m hohen Berg wird das Wohnen, das städtische Funktionieren und die wirtschaftliche Nutzung in verschiedenen Höhenzonen experimentell erprobt.

Für High-Tech-Baukonstruktionen benötigt man High-Tech-Baustoffe als Ergebnis technischen Fortschritts. Der technische Fortschritt wird in unserer Gesellschaft ambivalent bewertet: Ingenieure sehen den jüngsten Zustand der Technik meistens als den besseren, große Teile der Gesellschaft empfinden altgewohnte Techniken, z.B. den Webstuhl und den Pflug, als menschengerecht, dagegen neue Techniken, z.B. die Atomtechnik und die Raumfahrt, als kaum vertretbar. Für die Werkstoffe gilt: Holz ist human, nämlich natürliche Wärme ausstrahlend und sympathisch, Beton dagegen ist inhuman, weil man eine zubetonierte Welt mit Kälte assoziiert. Würde das Holz heute erfunden, es hätte als Baumaterial keine Chance, die Hürden bautechnischer Sicherheitsvorschriften zu überwinden, weil es brennt wie Zunder, weil es reißt und zerfressen wird von Parasiten, weil es mit mehr oder minder giftigen Chemikalien getränkt werden muß, um nur begrenzt dauerhaft zu bleiben. Beton hingegen wird in der Hand des Könners zum Baustoff von Le Corbusier's Kirche in Ronchamps, oder er wird zum Retter, der es ermöglicht, daß Bauwerke auch ein Erdbeben überstehen. Bei der Verwendung von Werkstoffen

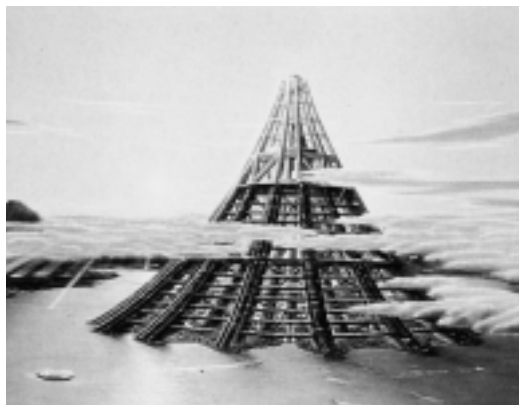


Abb. 2
Utopische Phantasien
gehen bis in Höhen
von 4.000 m

ist nicht die Vollkommenheit der Technik entscheidend, sondern die Vernunft ihres Gebrauchs.

Die Mikrostruktur der Werkstoffe

Das historische Ordnungsschema der Werkstoffe entspricht der ins Kleine wachsenden Größenordnung. Je tiefer der Einblick in Aufbau und Struktur gelang, desto jünger ist die Zeit. Die bedeutenden Veränderungen der Werkstoffe vollziehen sich heute in der Nanowelt. Die Atome und Moleküle versuchen sich innerhalb des Werkstoffs nach dem Minimum ihrer Energie anzuordnen und streben eine bestimmte Ordnung an. Dabei gelten drei Grundregeln:

Erstens: Die Bindungsart zwischen Atomen wird hauptsächlich durch den Füllgrad der äußeren Elektronenschale bestimmt. Zweitens: Die Atome gehen ohne äußeren Zwang nur solche Bindungen ein, die zu einer Verringerung ihrer potentiellen Energie führt; und drittens: Die Atome streben durch Verbindungen den Zustand einer Edelgas-Konfiguration, also eine vollständig gefüllte äußere Elektronenschale an.

Diese Grundregeln führen zu vier wesentlichen Bindungsarten, die die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Werkstoffe bestimmen: die Ionenbindung, die Metallbindung, die kovalente Bindung und die van-der-Waals Bindung.

Die Ionenbindung

Die Ionenbindung ist elektrostatischer Natur, aber nicht orientiert. Die entstehenden Stoffe sind zu meist wasserlöslich (Salze). Salzstöcke etwa haben eine hohe Festigkeit, verformen sich dennoch in längeren Zeiträumen plastisch-viskos. Das hängt mit der Umorientierung der Bindungen zusammen. Sie sollen sich gut als Lagerstätten für Atom-müll eignen, weil sie sich verformen können, ohne zu reißen.

Die Metallbindung

Die Metallbindung ist energetisch weniger fest als die Ionenbindung und ebenfalls nicht orientiert. Das Außergewöhnliche an Metallen ist ihre Fähigkeit, elektrischen Strom und Wärme zu leiten, weil die Elektronen sich leicht zwischen den Atomen bewegen können. Der Nachteil der Elektronenleitung ist die Korrosionsanfälligkeit. Elektronen fließen ab, und zur Herstellung des Gleichgewichts gehen positiv geladene Metallatome in Lösung. Eine Taschenlampenbatterie reicht aus, um Stahl mit den notwendigen Elektronen zu versorgen und so vor Korrosion zu schützen. Kathodischer Korrosionsschutz heißt die technische Anwendung dieses Prinzips. Das irrtümliche Umpolen der „Taschenlampenbatterie“, das Absaugen von Elektronen, hat schon Brückenbauwerke innerhalb weniger Tage zum Einsturz gebracht!



Metalle und ihre Legierungen sind unnatürliche Werkstoffe. Sie streben die Rückkehr in den energieärmeren Zustand ihrer Oxide an. Wir hindern sie daran. Das ist unser verzweifelter Kampf gegen die Korrosion. Die Natur verwendet keine Metalle, sonst hätte sie dem Rhinoceros ein Stahlhorn und uns Menschen Goldzähne wachsen lassen. Metalle kristallisieren in relativ dicht gepackten Strukturen. Abb. 4 veranschaulicht die dichtest gepackte, kubisch flächenzentrierte Anordnung von beispielsweise Aluminiumatomen. Das Prinzip der dichtesten Packung, mit zusätzlichen „kleineren Kugeln“ in den Zwischenräumen der großen „Kugeln“, wenden wir heute auf Kies und Sand von speziellen Betonen an. Sie benötigen dadurch extrem wenig Zement.

Die kovalente Bindung

Die kovalente Bindung ist die klassische Elektronenpaarbindung. Sie ist gerichtet. Beim Kohlenstoff und auch beim Silizium fehlen vier Elektronen auf der äußersten Schale, um eine Edelgas-Konfiguration zu erreichen. Tun sich vier Partner mit dem gleichen Defizit zusammen, leihen sie sich gegenseitig ein Elektron. Vier eigene plus vier geliehene ergibt acht Elektronen, die erforderliche Sättigungsanzahl für die äußerste Elektronenschale. Diese Aufteilung führt zu einer räumlichen speziellen Ordnung mit dem Zentralatom im Zentrum und den Partneratomen auf den Ecken eines Tetraeders. So entstehen Winkel der Bindungen von 109,5 Grad. Die kovalente Bindung ist energetisch begünstigt und streng orientiert. Beispiele sind neben Diamant und Silizium die keramischen Werkstoffe.

Die van-der-Waals Bindung

Äußerst schwache Bindungen verschiedener Natur faßt man unter dem Begriff van-der-Waals Bindung zusammen. Die Adhäsion eines Wassertropfens an einer Glasscheibe beruht auf der van-der-Waals Bindung. Beim Beton (Abb. 5) hydratisie-

Abb. 3
Die über 300 m hohen Gebäude sind Zeugen der Baugeschichte

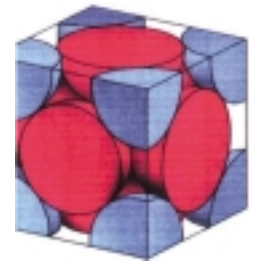


Abb. 4
Dichtest gepackte Strukturen (Aluminiumatome)

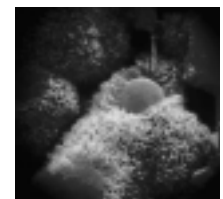


Abb. 5
Calcium-Silikat-Hydrat-Nadeln auf Zementkörnern

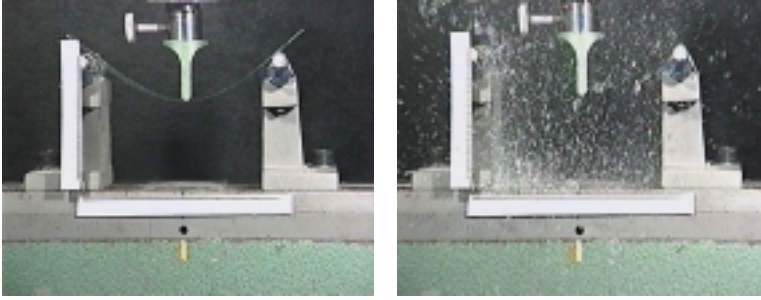


Abb. 6a und 6b
Glas im Biegeversuch

ren Calcium-Silikat-Hydrat-Nadeln (CSH) auf Zementkörnern. Sie verfilzen miteinander und erzeugen auf ähnliche Weise Festigkeit wie die ebenfalls nicht durchgängigen Mikrofasern bei Wolle. Die CSH-Fasern sind in sich gerollt, ähnlich wie die Schultüten der Erstkläßler. Dadurch entstehen innere Oberflächen von über 200 m^2 pro einem Gramm Zementgel.

Schwache Adhäsion und riesige Oberflächen ergeben hohe Festigkeiten. Die Zementkörner im Bild sind etwa $10 \mu\text{m}$ groß.

Hochfesten Beton hält trotz seiner keramischen Eigenschaften nicht die kovalente oder ionische, sondern die van-der-Waals Bindung im Innersten zusammen. Wenn Säure oder Feuer Beton angreifen, wird offensichtlich, daß nur schwache Bindungen strukturwirksam sind. Das Geheimnis seiner hohen Festigkeit liegt in der Größe seiner inneren Oberfläche.

Die Bindungsart beeinflusst auch das Bruchverhalten eines Werkstoffs. Beispielsweise steigt die Spannung am Rand eines Lochs in einer unter Zugspannung stehenden Scheibe auf das Dreifache der außen angelegten Spannung; an einem scharfen Riß wächst sie gegen unendlich. Ein Werkstoff, der sich nicht plastisch verformt, bricht deshalb plötzlich wegen seiner Mikrokerben bei relativ niedrigen äußeren Spannungen.

Den Einfluß von Mikrokerben auf das Tragverhalten zeigen Abb. 6a und 6b für Glas im Biegeversuch. Ein 1 mm dickes und 4 cm breites Plättchen aus Fensterglas mit einer Stützweite von 16 cm läßt sich extrem stark durchbiegen ohne zu brechen, wenn durch Ätzen mit Flußsäure die Mikrokerben auf den Oberflächen entfernt werden. Die rißfreien Glasoberflächen erreichen fast ihre theoretische Zugfestigkeit, die 50 mal höher ist als die reale. Im Moment des Brechens wird die gespeicherte Verformungsenergie schlagartig in andere Energieformen umgewandelt. Der Hauptanteil wandelt sich in Oberflächenenergie. Abb. 6b zeigt den Moment des Brechens, in dem zur Schaffung der Oberflächen das Glas förmlich pulverisiert. Die Bilder entstanden im Rahmen der Übung Baustofftechnologie für Bauingenieure an der TU Berlin. Ziel der Forschung ist es, makrodefektfreie Materialien – z.B. MDF-Zement – herzustellen, der außergewöhnliche Festigkeits- und Verformungseigenschaften besitzt.

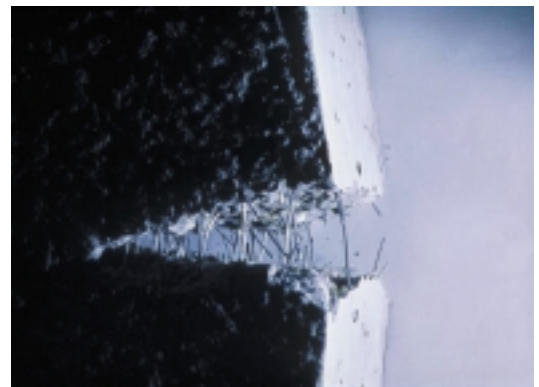
Abb. 7a und 7b
Faserverstärkung

Beton – Baustoffe aus Matrix und Füller

Beton ist ein Synonym für Baustoffe aus Matrix und Füller. Die Matrix, der Zementstein, durchzieht den Baustoff kontinuierlich. Sand und Kies sind als Füllstoff darin eingelagert. Der Aufbau des Betons, des steinalten Materials, von den Römern verwendet und von Vitruv beschrieben, aus drei Volumenteilen Kies und einem Volumenteil Bindemittel, scheint naturgegeben. Der in der Natur vorkommende Nagelfluh ist Naturbeton aus Gneis, Granit oder Amphibolit-Geröll, eingebettet in Kalkstein. Die Schwelle des Löwentors in Mykene ist aus diesem Material gebaut, fest und dauerhaft.

Der heutige Beton ist ein Massenbaustoff und ein Hochleistungswerkstoff zugleich. An der Gestaltung seiner Zukunft ist nicht nur das Bauwesen interessiert. Wer Neuerungen für Beton entwickelt, kann sich großer Absatzmengen sicher sein. Faszinierend bleibt, wie aus flüssigem Beton innerhalb kurzer Zeit harter Stein wird. Beton galt bisher als einfaches Dreistoffsystem aus Zement, Wasser und Zuschlag.

In unseren Tagen erlebt er einen Innovations-schub. High-Tech-Beton wird als 6-Stoff-System behandelt, er besteht aus Zement, Zuschlag, Was-



ser, Zusatzmittel, Zusatzstoff und Luft. Hochleistungsbeton (HPC = High-Performance-Concrete) mit niedrigen Wasserzementwerten für Hochhäuser, Offshore-Bauwerke, Brücken und Schnellstrassen wurde zunächst für hohe Festigkeiten entwickelt. Für eine 100 t tragende Stütze konnte der erforderliche Durchmesser, durch Fortschritte in der Betontechnologie, von über 1 m (1920) auf unter 10 cm (heute) reduziert werden.

80 Prozent des heute hergestellten Betons liegt im Festigkeitsbereich bis zu 35 Megapascal (MPa): Ein Würfelchen von 1 cm Kantenlänge aus diesem Beton ertrüge das Gewicht von 35 Einzentner-Männern. Die DIN 1045 für Betonbauwerke hatte bis 1998 die Festigkeitsobergrenze auf 55 MPa festgesetzt. Wegen der Fortschritte in der Betontechnologie wurde sie jetzt auf 115 MPa hochgesetzt. Im Labor gelingen leicht Festigkeiten bis 200 MPa. Mit geeignetem Zement, niedrigem Wasser-Zement-Verhältnis (unter 0,3) und bei Beschränkung des Größtkorns auf unter 1 mm (Pulverbeton) ergeben sich für den Reactive Powder Concrete (RPC) Druckfestigkeiten bis zu 800 MPa. Zum Vergleich: Normaler Baustahl hat Festigkeiten unter 500 MPa. Besondere Vorzüge von HSC (High-Strength-Concrete) sind: Schnelle Festigkeitsentwicklung, früheres Ausschalen, schnelleres Bauen, frühere Nutzung des Bauwerks mit wirtschaftlichen Vorteilen, geringeres Kriechen, gute Dauerhaftigkeit, hoher Abrasionswiderstand und Materialeinsparung.

Die Faserverstärkung

Fasern verbessern fast alle Eigenschaften der Werkstoffe, besonders aber ihre Zähigkeit: Wolframfasern in Sintermetallen, Glasfasern in Polyesterharz oder Stahlfasern im Beton sind dafür eindrucksvolle Beispiele. Zum ersten Mal liest man über mit Stroh verstärkte Lehmziegel im Alten Testament: „Ihr sollt nicht Stroh sammeln, um es dem Volke zu geben, damit sie Ziegelsteine machen wie früher. Sie mögen selbst gehen und sich Stroh sammeln.“²⁾

Beton wird durch Fasern unempfindlicher gegen Risse (Abb. 7a). Bodenplatten in Fabrikationshallen oder Betonplatten auf Flugpisten werden inzwischen dünner und ohne schlaife Bewehrung mit weniger als 50 kg Fasern pro Kubikmeter Beton hergestellt. SIFCON (slurry-infiltrated-fibre-concrete) stellt ein Extrem der Fasereinmischung in Beton dar (Abb. 7b). Etwa 10 Volumen-% Fasern werden vorgepackt und anschließend mit Zementleim injiziert. Diese hochfesten, hochdichten und bruchfesten Betonschichten sind umweltfreundlich, dauerhaft, sehr gebrauchstauglich und ökonomisch, weil gerissene Untergründe nicht entfernt zu werden brauchen.

Im elektromagnetischen Feld richten wir Stahlfasern entsprechend den Zugtrajektorien aus, deren Verlauf zuvor für Fertigteile aus Beton mit Finiten-

Elementen (FEM) berechnet wurden. Fasern müssen in der Matrix gut verankert sein. Das erreicht man am besten mit Stoffen, die an vielen Kontaktpunkten auf der Faseroberfläche andocken, die also noch wesentlich feiner sind als Zement. Mikrosilica, amorphes Siliziumdioxid, mit einer spezifischen Oberfläche von 20 m²/g führt zu einer molekularen Einbindung der Faseroberflächen in die Zementsteinmatrix. Die Fällungskieselsäure mit Oberflächen von 200 m²/g, wegen der geringen Teilchengröße auch Nanosilica genannt, eröffnet weitere Dimensionen für spezielle Festigkeits- und Verformungseigenschaften.

Die Selbstverdichtung

Neue Superverflüssiger und spezielle Zusatzstoffe (Nanosilica, Kalksteinmehl oder Polysaccharide) führten in Japan zu leisem Beton, der ganz ohne die brummende Rüttelenergie auskommt und unter seinem eigenen Gewicht von selbst fließt, entlüftet und vollständig verdichtet.

Superverflüssigende sterisch wirkende Polycarboxylatether (PCE) halten im Feinstbereich die Teilchen in einem selbstverdichtenden Beton auf Abstand. Dadurch bildet sich eine tragfähige Suspension hoher Viskosität, in der die groben Zuschläge entmischungsfrei schwimmen. Der Zementleim herkömmlicher Betone ist ein strukturviskoser (pseudoplastischer) Bingham-Körper, der mit zunehmender Schergeschwindigkeit dünnflüssiger wird. Beim SVB ist der Feinstteilleim eine dilatante Flüssigkeit ohne Fließgrenze, die bei zunehmender Schergeschwindigkeit dickflüssiger wird.

Die Vorteile eines selbstverdichtenden Betons sind: Es entsteht kein Rüttellärm auf der Baustelle, dieser Beton besitzt eine ausgezeichnete Homogenität, hohe Dauerhaftigkeit und eine hohe Verdichtung auch bei enger und dichter Bewehrung. Er ist an unzugänglichen Stellen verwendbar und erlaubt architektonische Freiheiten, um komplizierte Formen zu verwirklichen. Der Aufwand auf der Baustelle reduziert sich erheblich und trotzdem wird bedeutend schneller gebaut.

Die Säureresistenz

Konsequent die beschriebenen technischen Grundsätze nutzend, wurde an der TU Berlin der säureresistente Beton SRB 85/35 entwickelt. Er ist extrem dicht gepackt, sowohl in Bezug auf den Zuschlag als auch auf das Bindemittel aus Zement, Flugasche und Mikrosilica. Dadurch sinkt der Zementgehalt auf etwa 220 kg/m³ Beton und erreicht dennoch Festigkeiten von 100 MPa. Mit dem SRB 85/35 wurde der höchste Kühlturm der Welt in Niederaußem, westlich von Köln, gebaut. Er ist 200 m hoch, hat keine Innenbeschichtung und ist dennoch säureresistent gegen die Einleitung gereinigter Rauchgase (Abb. 8a). Abb. 8b zeigt die herkömmliche Technik: Monatelang werden aus



Abb. 8a und 8b



*Abb. 9
Staub und Schmutz
werden bei den
Blättern der Lotus-
blume vom nächsten
Regen rückstandfrei
„abgerollt“*

hängenden Arbeitsbühnen 60 t Kunstharz auf die 60.000 m² große Innenoberfläche aufgebracht. Das ist ein Vorgang, der etwa im Zehnjahresrhythmus wiederholt werden muß.

Dauerhafte Schönheit

Für den Massenbaustoff Beton ist keine Alternative in Sicht. Seine Haltbarkeit, seine weltweite Verfügbarkeit und sein niedriger Preis werden ihm auch in Zukunft überragende Marktanteile sichern. Allerdings müssen Weiterentwicklungen darauf zielen, die Oberflächen der Bauwerke unangreifbarer und optisch ansprechender zu gestalten. Dafür findet man wiederum in der Welt des Kleinsten Lösungen: In der Natur gibt es sich selbst reinigende „Baustoffoberflächen“, die den Schmutz bei Regen von Fassaden perlen lassen. Es sind dies z.B. die Blätter der Lotusblume (Abb. 9). Nach den Blättern der Lotusblume wurde der Reinigungseffekt benannt, bei dem Silicon-Fassadenfarbe technisch angewandt wird³. Die Entdeckung, daß nicht etwa eine extrem glatte Oberfläche, sondern im Gegenteil eine mikrorauhe Struktur der Schlüssel zu trockenen, sauberen Oberflächen ist, gelang dem Bonner Bioniker Wilhelm Barthlott, der 1992 dafür den einprägsamen Begriff „Lotus-Effekt“ schuf. Die mikrorauhe Oberfläche reduziert die Kontaktfläche für Schmutz und Wasser extrem.

Zukünftige Entwicklungen

Verbundbaustoffe vereinigen in sich in idealer Weise die Vorzugseigenschaften verschiedener Werkstoffe. So entstehen Baustoffe, die gleichzeitig steif und duktil, wasserdicht und wärmedämmend oder hochfest und leicht sind.

Schier unendliche Werkstoffvariationen werden denkbar, wenn man Nanopartikel aus Metallen oder nichtmetallisch-anorganischen Stoffen erzeugt und sie in andere Materialien einbettet. Es

entstehen Nanokomposite. Die Grenzen zwischen den klassischen Werkstoffen Glas und Keramik, Kunststoff und Metall zerfließen. Hauchdünne, unsichtbare Beschichtungen, die bereits anwendungsreif sind, machen empfindliche Aluminiumoberflächen korrosions- und kratzfest. 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. Die sich selbst abdunkelnden Gläser sind ein Beispiel dafür. Die Schlüsselwerkstoffe für den künftigen technischen Fortschritt gibt es nicht mehr als Rohstoffe zu kaufen: Metalle, Glas oder Kunststoff entwickelt man direkt mit dem Produkt. Werkstoffwissenschaftliche Theorien versuchen, makroskopische Eigenschaften aus mikroskopischen Strukturen und Wechselwirkungen vorauszusagen.

Ein Ziel der Werkstoffwissenschaftler ist es, die Eigenschaften von Werkstoffen schon bei ihrer Herstellung an spezielle Anforderungen anzupassen. In situ verwendete Fasern wie z.B. Stahlfasern im Beton mit magnetischen Feldern in eine Richtung zu lenken oder Kunststoffteile beim Rapid Prototyping aus einer Flüssigkeit durch Laserenergie wachsen zu lassen, bedeuten Ausrichtung und Wachstum. Das fertige Ergebnis könnten baumartige Tragstrukturen wie im Flughafen Stuttgart sein. Noch müssen die „Äste“ geschweißt werden (Abb. 10).

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr.-Ing. Bernd Hillemeier
Technische Universität Berlin
Institut für Bauingenieurwesen
Fachgebiet für Baustoffe und Baustoffprüfung
Sekt. TIB1-B4
Gustav-Meyer-Allee 25, Gebäude 13b
13355 Berlin



*Abb. 10
Stählerne Baum-
strukturen tragen das
Dach des Flughafens
Stuttgart*

Anmerkungen

- ¹ Philip H. Abelson in Science: Spezialausgabe für Werkstoffe.
- ² Exodus 5:7
- ³ ispo GmbH in Kriffel.