



Andreas Gerdes

## 1. Massen- und Energieströme im Bauwesen

Schon in den Anfängen der Menschheit baute der Mensch, um sein Überleben auch unter widrigen klimatischen Bedingungen zu sichern bzw. seine Lebensqualität zu verbessern. Neben persönlichen Behausungen erstellte er dazu auch Bauwerke, die der Versorgung mit lebensnotwendigen Dingen, wie Wasser oder Getreide dienen. In der Abbildung 1 sind beispielhaft Zisternen gezeigt, die bereits vor 2000 Jahren von den Römern in den küstennahen Regionen des Mittelmeers gebaut wurden. Umso erstaunlicher ist, dass die Dauerhaftigkeit dieser Wasserspeicher so gut war, dass sie teilweise bis heute noch genutzt werden.

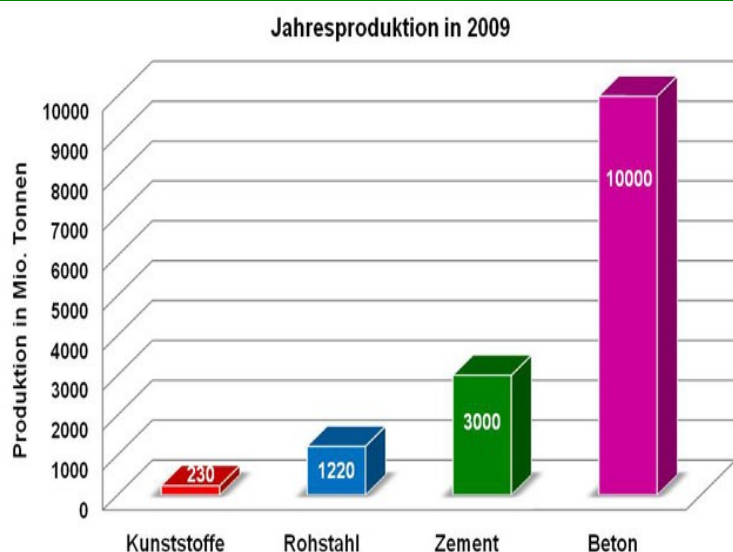


**Abbildung 1:** a) Römische Zisternen auf der Insel Pantelleria (links)

b) Aufbau der zur Auskleidung der Zisternen verwendeten Mörtel

rechts: (B=römischer Mörtel, E=neupunischer Mörtel, D=altpunischer Mörtel)

Im Verlauf der Jahrhunderte entwickelte sich das Bauwesen weiter und stellt heute mit einem jährlichen Umsatz von 1000 Mrd. Euro innerhalb der europäischen Union einen großen Wirtschaftsfaktor dar. Nicht zuletzt, weil eine leistungsfähige Infrastruktur (z.B. Brücken, Kläranlagen, Flughäfen) für Industriestaaten, zunehmend aber auch für Schwellen- und Entwicklungsländer Voraussetzung für eine hohe Wettbewerbsfähigkeit im globalen Markt ist, wird das Bauvolumen weltweit weiter steigen. Damit verbunden sind aber auch erhebliche Umwelteinwirkungen. Kein Wirtschaftszweig verursacht auch nur annähernd so hohe, durch den Menschen, also anthropogen verursachte Massen- und Energieströme. In der Abbildung 2 sind die Zahlen für die Weltjahresproduktion von verschiedenen, uns im täglichen Leben begleitenden Werkstoffen dargestellt. Der Vergleich zeigt deutlich, warum allein die Zementproduktion derzeit jährlich ca. 5 % (1.5 Gigatonnen Kohlendioxid) zur weltweit freigesetzten CO<sub>2</sub>-Menge beiträgt. Die „International Energy Agency“ geht sogar davon aus, dass aufgrund des prognostizierten Zuwachses der Zementproduktion auf ca.



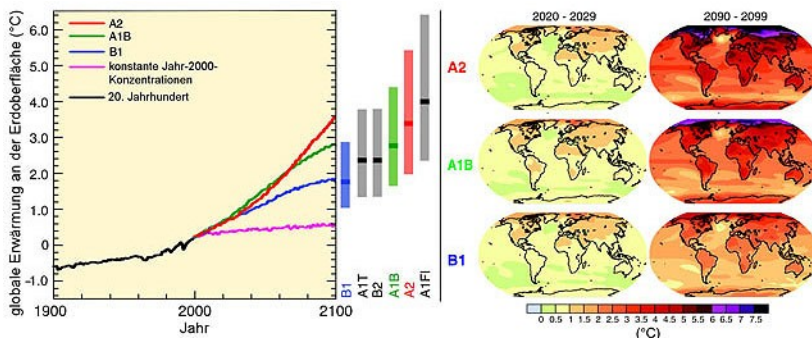
**Abbildung 2:** Weltjahresproduktion verschiedener Werkstoffe

4-6 Mrd. Tonnen der Anteil auf 9 % bis ins Jahr 2050 ansteigen wird.

Da aber gerade CO<sub>2</sub> als wichtigstes Klimagas erheblich zum Klimawandel beiträgt, wird die Bauindustrie in der Zukunft mehr denn je herausgefordert sein, diese CO<sub>2</sub>-Freisetzung zu reduzieren.

## 2. Ausgewählte Grundlagen zum Klimawandel

Ob in Bezug auf Elektroautos oder regenerative Energien, das Thema Klimawandel wird heute in unserer Gesellschaft intensiv diskutiert und ist direkt oder indirekt bereits Teil unseres täglichen Lebens. Dabei ist es für den Laien in der Regel nicht nachvollziehbar, wie die oft weitreichenden Aussagen über die Klimaentwicklung zustande kommen. Dazu ist zunächst zu sagen, dass das Klimasystem der Erde sehr komplex ist, da die verschiedenen Komponenten, wie die Atmosphäre, Hydrosphäre, Cryosphäre, Landoberfläche und Biosphäre über vorwiegend chemisch-physikalische Prozesse miteinander verknüpft sind. In den vergangenen Jahrmillionen wurde das Klima durch natürliche Klimaantriebe, wie dem solaren Energiestrom, aber auch Ereignisse, wie Kometeneinschläge oder Vulkanausbrüche bestimmt. In den letzten 150 Jahren kamen aber zunehmend auch anthropogene Klimaantriebe, wie die extensive Landnutzung, der durch hohen Verbrauch veränderte Wasserhaushalt und vor allem die Klimagase ("Treibhausgase" CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O), die durch technische Prozesse in großen Mengen freigesetzt wurden, dazu. Das Ausmaß dieser Freisetzung wird am Beispiel des CO<sub>2</sub> deutlich. Während der letzten 650 000 Jahre betrug der CO<sub>2</sub>-Anteil an in der Atmosphäre ca. 180-300 ppm. Seit dem Beginn der technischen Revolution, stieg dieser Wert von 280 ppm auf 379 ppm (2005) an. Vergleichbares wurde auch für CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O gefunden. Seit der vorindustriellen Zeit ergibt sich durch die Wirkung der Klimagase, aber auch weiterer Faktoren (z.B. Wirkung von Aerosolen, Oberflächen-Albedo) so ein zusätzlicher anthropogen verursachter Strahlungsantrieb von ca. 1.6 W/m<sup>2</sup>, der zur Erderwärmung und den bereits beobachteten Folgen (z.B. Rückzug der Gletscher) geführt hat. Dass es einen Klimawandel gibt, gilt mittlerweile als sicher. Wichtig wird es daher sein, die Freisetzung von Klimagasen deutlich zu reduzieren und unsere Gesellschaft an die Auswirkungen des bereits unvermeidbaren Klimawandels anzupassen. Bei der Lösung der sich daraus ableitenden Aufgaben spielen Vorhersagen über die Entwicklung des Klimawandels eine zentrale Rolle. Dazu wurden seit den siebziger Jahren Computermodelle entwickelt, bei denen die gekoppelten Prozesse innerhalb des Klimasystems mit Hilfe mathematischer Beziehungen immer realitätsnaher beschrieben werden. Für die Vorhersage benötigen diese Modelle aber Eingangsdaten, welche die zukünftigen Entwicklungen auf der Erde beschreiben. Zu diesem Zweck wurden durch die ICCP (Intergovernmental Panel on Climate Change), die durch die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) und dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) 1988 gegründet wurde, verschiedene Szenarien entwickelt. Diese bilden unter anderen Faktoren, wie das Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum, Einführung nachhaltiger Technologien oder welche Energiequellen in Zukunft eingesetzt werden, ab. Diese Szenarien stehen damit auch für eine entwicklungsabhängige Freisetzungsrates an Klimagasen. Ausgewählte Ergebnisse dieser Modellierungen sind in Abbildung 3 dargestellt.



Die Projektionen (Abb. 3, links) zeigen, dass die mittlere globale Temperatur je nach Szenario unterschiedlich ansteigen wird. Beim Szenario B1 (starkes Wirtschaftswachstum, ökonomische, soziale und ökologische Nachhaltigkeit) ist mit einem globalen Temperaturanstieg von 1.8 °C (wahrscheinliche Bandbreite 1.1-2.9 °C) zu rechnen. Beim Szenario A1FI (starkes Wirtschaftswachstum, fossile Energiequellen dominieren) ist von einem Wert von 4.0 °C (wahrscheinliche Bandbreite 2.4-6.4 °C) auszugehen. Die Folgen für einzelne Bereiche der Welt sind in Abbildung 3, rechts für den Anfang bzw. das Ende des 21. Jahrhunderts dargestellt. Deutlich sind lokale Unterschiede erkennbar. Aus den Projektionen lässt sich auch ableiten, dass für Deutschland mit deutlichen Klimaveränderungen zu rechnen ist. So wird beispielsweise die Zahl heißer Tage (> 30 °C) im Sommer zwar deutlich zunehmen, es wird aber auch weiterhin kalte bis sehr kalte Winter geben.

**Abbildung 3:** Projektionen zukünftiger Klimaänderungen (Quelle: ICPP) links: Die durchgezogenen Linien sind globale Mittelwerte der Erwärmung aus mehreren Klimamodellen

rechts: Projizierte Änderungen für das frühe und späte 21. Jahrhundert

Wie alle technischen Bereichen wird auch das Bauwesen Technologien und Konzepte entwickeln müssen, um auf den Klimawandel zu reagieren. So müssen die hohen Massen- und Energieströme, die durch Herstellung und Nutzung der Bauwerke entstehen, reduziert werden. Aber auch die Baustoffeigenschaften müssen an die prognostizierten Klimaveränderungen adaptiert werden. Für beide Aufgaben wird die Bauchemie eine Schlüsseltechnologie sein.

### 3. Bauchemie und Klimawandel



**Abbildung 4:** Der Lebenszyklus eines Bauwerks

In Zukunft wird der Lebenszyklus eines Bauwerks stärker im Fokus aller am Bau Beteiligten stehen, um neben den Lebenszykluskosten auch gezielt die Auswirkungen auf die Umwelt zu minimieren. Eine Schlüsselrolle wird dabei die Bauchemie spielen, wie es im Folgenden mit einem ausgewählten Beispiel gezeigt werden soll.

#### Chloridinduzierte Korrosion von Stahlbeton – Präventionsmaßnahmen zur Vermeidung von Klimagasen

Die Dichte der Straßeninfrastruktur in Deutschland ist zwar sehr hoch, wie allein die Zahl von mehr als 32 000 Brücken als Teil der Bundesautobahnen zeigt. Der technische Zustand dieser Bauwerke verschlechtert sich aber rasant. Geplant für eine instandsetzungsfreie Nutzungsdauer von 100 Jahren, müssen die meisten der Brückenbauwerke

bereits nach 25-30 Jahren substantiell instandgesetzt werden.

Die Ursachen sind in den Werkstoffeigenschaften des Betons begründet. Im Gegensatz zu den landläufigen Vorstellungen ist Beton ein poröser Werkstoff. Durch dieses Porensystem können im Winter in Wasser gelöste Tausalze in die Betonrandzone transportiert werden. Erreichen sie die Stahlbewehrung führen sie dort zu Korrosionsprozessen, die letztendlich den Verlust der Standsicherheit des Bauwerks bewirken können. Für die Instandsetzung muss dann der Beton bis zur Bewehrung abgetragen werden, die Bewehrung von Korrosionsprodukten gereinigt und abschließend ein Reparaturmörtel auf das Bauteil aufgetragen werden, um die ursprünglichen Bauteilabmessungen wieder herzustellen. Das ist nicht nur technisch sehr aufwendig, sondern auch mit erheblichen ökologischen und ökonomischen Belastungen verbunden. So zeigen die Ergebnisse von Ökobilanzen, dass mit Instandsetzungen Umweltbelastungen verbunden sind, die bis zum Dreifachen höher sind als die Belastungen, die beim Erstellen des Bauwerks entstanden sind. Entsprechendes gilt auch für die finanziellen Aufwendungen. Instandsetzungen sind daher unbedingt zu vermeiden, wozu die Bauchemie zukünftig verstärkt einen Beitrag leisten wird.

So kann beispielsweise im Rahmen von Präventivmaßnahmen die Betonoberfläche imprägniert werden. Üblicherweise setzt man dazu siliciumorganische Verbindungen ein, die sogenannten Silane. Diese werden auf die Betonoberfläche aufgesprüht und von dort in die Betonrandzone transportiert. Während des Transports laufen dabei komplexe chemische Prozesse ab, die heute Gegenstand umfangreicher Forschungsarbeiten sind. Dazu werden neben analytischen Verfahren (z.B. IR-Spektroskopie, Massenspektrometrie) auch computerchemische Methoden („Molecular Modelling“) eingesetzt. Nach der chemischen Reaktion sind die Poren des Betons mit einem wasserabweisenden („hydrophoben“) Silikonharzfilm ausgekleidet, der die weitere Aufnahme von tausalzhaltigen Wässern sicher verhindert. Die bereits vorliegenden Forschungsergebnisse haben so bereits zu bauchemischen Produkten geführt, mit deren Hilfe eine Instandsetzung über einen Zeitraum von 20 Jahren sicher vermieden werden kann. Die finanziellen Aufwendungen bzw. die ökologischen Auswirkungen durch diese Hydrophobierung betragen nur ca. 10 % der Belastungen, die durch eine Instandsetzung verursacht werden. Prävention mit Hilfe bauchemischer Technologien trägt damit direkt zur Reduktion der instandsetzungsbedingt freigesetzten Klimagase bei. Neben der Prävention trägt die moderne Bauchemie aber auch dazu bei, die klassischen Werkstoffe an veränderte Umweltbedingungen anzupassen. So wird erwartet, dass die Zahl der heißen Tage (> 30 °C) in den nächsten Jahrzehnten in Mitteleuropa deutlich zunimmt. Auf der anderen Seite wird es weiterhin harte Winter geben. Unsere bewährten Werkstoffe – seien es mineralische oder polymere Systeme – müssen hinsichtlich der Applikation, aber auch in Bezug auf die Wirksamkeit bzw. Dauerhaftigkeit an diese Klimaveränderungen angepasst werden. Nur so lässt sich zukünftig das vermehrte Auftreten von Bauschäden mit den schon beschriebenen Folgen für die Umwelt vermeiden. Da diese heute erstellten Bauwerke aber eine geplante Lebensdauer von ca. 50 Jahren (z.B. Bürohäuser) bis 120 Jahren (z.B. Tunnel) aufweisen, müssen diese Forschungs- und Entwicklungsarbeiten schon heute geleistet werden. Die Bauchemie wird dazu einen aktiven Beitrag leisten.

Kontakt:	Schlauer Fuchs
 <p><b>Prof. Dr. Andreas Gerdes</b>            Chemie/Sensorik min. Grenzflächen            Karlsruher Institut für Technologie (KIT)            Hermann von Helmholtz Platz 1            76344 Eggenstein-Leopoldshafen            Tel.: +49 (0)721 608-2-5972            E-Mail: <a href="mailto:andreas.gerdes@kit.edu">andreas.gerdes@kit.edu</a></p>	<p>Unsere Schlaue-Fuchs-Frage zu diesem Beitrag lautete:</p> <p>Wie viele Bundesautobahnbrücken gibt es in Deutschland?</p>
	<p><a href="http://www.ifg.kit.edu/index.php">http://www.ifg.kit.edu/index.php</a></p>