

# Technikfolgenabschätzung zum Thema Betone der Zukunft – Herausforderungen und Chancen

Matthias Achternbosch

## Zusammenfassung

In diesem Artikel werden Methoden der Technikfolgenabschätzung vorgestellt, die zur Bewertung von Entwicklungen neuartiger Bindemitteln eingesetzt werden können. Es wird aufgezeigt, dass es mit einer TA möglich ist, schon in einem frühen Stadium der Entwicklung einer Bindemittel-Technologie erste Antworten in Bezug auf Machbarkeit, Realisierungsbedingungen und CO<sub>2</sub>-Einsparpotential zu geben. An den konkreten Beispielen Novacem und Celitement wird dies exemplarisch demonstriert.

Allgemein gilt, dass derzeit keine ausgeklügelte Lösung als Alternative für den universellen OPC in Bezug auf Masseneinsatz entwickelt ist. Die Umsetzung stößt u.a. deshalb an Grenzen, weil derzeit das Wissen über die Abläufe der Prozesse, die die Hydratation und Dauerhaftigkeit der Bindemittel-Systeme bestimmen, begrenzt ist. Aus unserer Sicht befinden wir uns derzeit in einer wichtigen Phase der Wissensgenerierung. Der Einsatz moderner analytischer Methoden und die Modellierung wird das Verständnis der Prozesse auch komplexerer Phasenzusammensetzungen weiter verbessern. Noch sind die Innovationszyklen und die Prüfprozeduren davon unbeeinflusst, so dass davon auszugehen ist, dass die Folgen des neuen Wissens und damit die Markteinführung neuer Systeme erst in einiger Zeit sichtbar werden. Auch wenn es viel versprechende Entwicklungen gibt, ist aus unserer Sicht trotz der Dringlichkeit der CO<sub>2</sub>-Problematik eine globale Alternative zu konventionellem Zement als Massenbaustoff in den nächsten 10-15 Jahren nicht zu erwarten.

## 1 Allgemeines

Mit Methoden der Technikfolgenabschätzung wird versucht, die Chancen, Potentiale und Risiken von Technologien schon zu einem relativ frühen Stadium der Entwicklung abzuschätzen, mit dem Ziel, Entwicklern und Stakeholdern Entscheidungshilfen zur Verfügung zu stellen. Seit mehr als 10 Jahren untersucht die Arbeitsgruppe „Zementäre Bindemittel“ des Instituts für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) systemanalytisch Entwicklungen zu alternativen Zementen. An ausgewählten Beispielen sollen in diesem Beitrag Fragestellungen, Vorgehensweise und Ergebnisse der Technikfolgenabschätzung zu neuartigen Zementsystemen vorgestellt werden.

Aufgrund der breiteren Perspektive einer Technikfolgenabschätzung eignet sich der hier vorgestellte Beitrag sehr gut als Einführung in das komplexe Thema der Bewertung neuartiger Zementsysteme, die Basis für Betone der Zukunft sein könnten. Da solche Untersuchungen auch immer die vorgegebene „Landschaft“ in Betracht ziehen müssen, in die eine angedachte Technologie eingebettet werden soll, sind die Rahmenbedingungen zu analysieren, insbesondere um potentielle fördernde oder hemmende Faktoren früh zu identifizieren. Dies

schließt natürlich auch gesamtwirtschaftliche und gesellschaftliche Wandelprozesse mit ein.

Im Folgenden werden zuerst gesamtwirtschaftliche gesellschaftliche Trends dargelegt, die den Verlauf wesentlicher Einflussfaktoren für die Bauwirtschaft in Zukunft bestimmen werden. In diesem Kontext wird dargelegt, warum insbesondere der Klimaschutz ein wichtiger Treiber ist, neuartige Zement- und Betonsysteme zu entwickeln und welche Komplexität mit der Umsetzung dieser Anforderung verbunden ist. Im Anschluss werden die charakteristischen Merkmale, die angewandten Methoden und die Vorgehensweise einer Technikfolgenabschätzung vorgestellt. Dies soll an ausgewählten Beispielen näher erläutert werden.

## 2 Wirtschaftliche und gesellschaftliche Rahmenbedingungen - Trends

Im globalen Maßstab zählt die Bauwirtschaft zu den größten Wirtschaftssektoren. Das jährliche globale Bauvolumen wird derzeit auf 9000 Milliarden US Dollar geschätzt [1]. Bis zum Jahr 2025 wird mit einem Anstieg auf 15.000 Milliarden US Dollar gerechnet. Seit der internationalen Finanz- und Wirtschaftskrise im Jahr 2008 ist eine Verlagerung der Bauaktivitäten aus den Industrieländern in die

Schwellenländer, insbesondere China und Indien zu beobachten. Für die Industrieländer werden Wachstumsraten von jährlich 2% (in Westeuropa bei 1,2%) prognostiziert, außerhalb der OECD werden über 4% erwartet (in Asien ohne Japan und in der Golfregion sogar über 5%).

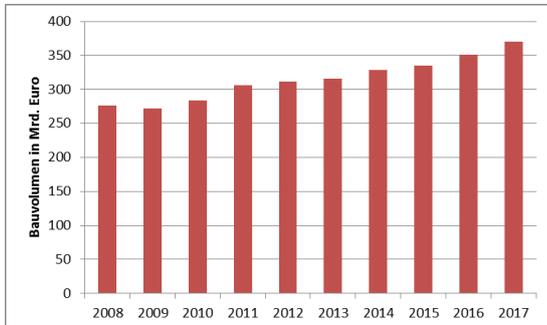


Abb. 1: Entwicklung des Bauvolumens in Deutschland [2]

Auch in Deutschland ist die Bauwirtschaft ein wesentlicher Wirtschaftssektor. Im Jahr 2016 hatten Baumaßnahmen rund zehn Prozent Anteil am deutschen Bruttoinlandsprodukt [3]. Das jährliche Bauvolumen, das die gesamte inländische Bauleistung in nominaler und realer Entwicklung beziffert, lag 2017 bei 370 Mrd. Euro [4]. Derzeit ist ein starker Bauaufschwung zu verzeichnen: Treiber sind der Wohnungs- und der Bundesverkehrswegebau. Die Wachstumsraten liegen für 2017/2018 bei 5-6%.

Die Bauwirtschaft steht zukünftig vor großen Herausforderungen. Die zukünftigen Rahmenbedingungen werden durch verschiedene gesellschaftliche Veränderungen und Trends im starken Maße beeinflusst. Wichtige Megatrends [5], die auch den Bereich Bauen und Wohnen nachhaltig verändern werden sind [6, 7]:

- die Urbanisierung,
- der demographische Wandel,
- der soziologische Wandel im Bereich Lebens- und Arbeitskultur,
- die Digitalisierung (Wissenskultur),
- Klimaschutz und Ressourceneffizienz (Nachhaltigkeit).

Während im Folgenden auf die ersten vier Punkte nur knapp eingegangen wird, sollen die Punkte Klimaschutz und Ressourceneffizienz eingehender behandelt werden.

### 2.1 Urbanisierung

Die Trends Urbanisierung und demographischer Wandel stellen soziologisch wichtige gesellschaftliche Wandlungsprozesse dar, die ohne das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung kaum zukunftsfähig gestaltet werden können. Derzeit leben in Deutschland rund 75% der Menschen in Städten. Prognosen

gehen davon aus, dass sich dieser Anteil bis 2050 auf 84% erhöhen wird [6]. Umgekehrt werden vor allem ländliche und wirtschaftlich schwache Regionen von Schrumpfung betroffen sein. Der seit Jahren zu beobachtende Zuzug in die Ballungszentren wird durch die Migrationsbewegungen noch einmal stark verstärkt. Mittelfristig wird erwartet, dass jährlich 500.000 Zuwanderer nach Deutschland kommen. Bei einer prognostizierten Bleibequote von 60-70% werden jährlich mindestens 350.000 neue Wohnungen benötigt. Es fehlt insbesondere in größeren und mittleren Städten Wohnraum. Ebenso sind kleine Wohnungen knapp, weil es mehr Singles gibt. Zudem wird mehr Flexibilität verlangt, so kann der Arbeitsplatz vom Standort des Privatlebens immer weiter entfernt sein. Die Gesellschaft wird immer mobiler werden müssen, wofür die Infrastruktur entsprechend angepasst werden muss. All diese Trends erfordern stärkere Aktivitäten des Bauwesens, dessen Beitrag zur Nachhaltigkeit zudem immer wichtiger wird.



Foto: Pixabay CC/PublicDomain

### 2.2 Demographischer Wandel

Der demographische Wandel stellt die Gesellschaft zudem vor weitere große Herausforderungen. Bei steigender Lebenserwartung kommen heute weniger Kinder auf die Welt als früher: Die Geburtenziffer liegt in Deutschland trotz eines Anstiegs mit 1,5 Kindern je Frau weiterhin unter dem Durchschnitt der Europäischen Union [8]. Die hiesige Bevölkerung wird zukünftig deutlich älter sein als jetzt: Prognosen gehen davon aus, dass 2060 jeder Dritte mindestens 65 Jahre alt sein wird. Dies bedeutet im Wohnungsbau eine verstärkte Ausrichtung auf altersgerechtes Wohnen mit einer entsprechenden Gestaltung von Wohnraum, Gebäuden und urbanen Infrastrukturen. Auch dies verstärkt den Druck in Richtung Zuzug in Städten, da dort eine bessere Anbindung an Einrichtungen im Gesundheits- und Pflegewesen möglich ist.

### 2.3 Digitalisierung

Nicht fehlen darf natürlich der Hinweise auf die zukünftige Bedeutung der Digitalisierung. Die Bauwirtschaft ist durch eine unterdurchschnittliche Produktivitätsentwicklung gekennzeichnet, diese

war in den Jahren 2000 bis 2011 mit 4,1% deutlich geringer als in der gesamten deutschen Wirtschaft (11%). Hier kann die Digitalisierung einen wichtigen Beitrag zur Prozessoptimierung der Bauabwicklung liefern. Digitale Planungsmethoden wie Building Information Modeling (BIM) dürften verstärkt genutzt werden. Intelligente Technologien im Bereich Gebäudetechnik (Smart Homes) bieten Chancen insbesondere bei Raumklima und Energie Management in Gebäuden.

#### 2.4 Klimawandel und Ressourceneffizienz

Die Berichte des Weltklimarats (IPCC) zeigen eindrucksvoll, dass sich das Klima verändert und die beobachtete globale Erwärmung vorwiegend auf menschlichen Einflüssen beruht, insbesondere der Emission von Treibhausgasen. Heute ist die Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre so hoch wie noch nie in den vergangenen 800.000 Jahren. In Vereinbarungen zur Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) wie dem Kyoto-Protokoll konnten bislang nur die reichen Industrieländer dazu verpflichtet werden, ihre Treibhausgasemissionen zu senken. Im Pariser Übereinkommen vom 12. Dezember 2015 hat sich nun die gesamte Staatengemeinschaft dazu bekannt, Maßnahmen zu ergreifen, um den globalen Temperaturanstieg in diesem Jahrhundert deutlich unter 2 Grad Celsius über dem vorindustriellen Niveau zu halten und Anstrengungen zu unternehmen, den Temperaturanstieg noch weiter auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen. Dies würde bedeuten, dass radikale Reduktionen von CO<sub>2</sub>-Emissionen in allen Wirtschaftssektoren erreicht werden müssen. Ziel ist nach dem Pariser Abkommen sogar die CO<sub>2</sub>-Neutralität in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts.

Bauen und Wohnen ist für die negativen Auswirkungen in der Umwelt mitverantwortlich. Beim Bauen spielen zementgebundene Baustoffe eine herausragende Rolle. Wie später noch näher ausgeführt wird, beträgt der Beitrag der Produktion von Zement an den globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen derzeit über 8% [9]. Mit der Nutzung von Gebäuden sind derzeit 30% des globalen Endenergieverbrauchs und ca. 20% der globalen Treibhausgasemissionen verbunden. Der Bausektor ist zudem für 40% des globalen Ressourcenverbrauchs verantwortlich und somit sehr ressourcenintensiv.

Die Anforderungen für nachhaltiges Bauen und Wohnen werden zukünftig deutlich steigen. Deutschland hat zum Beispiel mit der aktuellen EnEV 2014 / EnEV 2016 die europäische Gebäuderichtlinie nur teilweise umgesetzt [10]. Diese EU-Richtlinie fordert, dass die Mitgliedsstaaten ab 2021 nur noch Niedrigstenergie-Neubauten genehmigen, deren Definition national aber noch nicht näher bestimmt ist.



Foto: Pixabay CC/PublicDomain

Am 14. November 2016 wurde vom Bundeskabinett zudem der Klimaschutzplan 2050 verabschiedet [11]. Danach muss der Bestand an Gebäuden bis 2050 nahezu klimaneutral saniert sein.

Auch das Thema Ressourceneffizienz hat erheblich an umwelt- und wirtschaftspolitischer Bedeutung gewonnen – so hat die Kommission im September 2011 einen „Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa“ veröffentlicht [12]. Für den Bausektor verlangt die EU deutliche Verbesserungen beim Ressourcen- und Energieverbrauch während der Lebensdauer von Gebäuden und Infrastruktur – mit nachhaltigen Werkstoffen, mehr Abfallrecycling und besserem Design.

Die Herausforderung besteht unter anderem darin, Baustoffe zu entwickeln, bei deren Herstellung deutlich weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen freigesetzt werden und bei deren Verwendung Gebäude deutlich energieeffizienter werden. Was letztere Eigenschaft betrifft, so stehen aktuell Materialien als passive Bauelemente wie Wärmedämmverbundsysteme im Vordergrund, die auf additive, nachgeschaltete Baustofftechnologien beruhen. Für innovative und nachhaltige Gebäude- und Konstruktionstechniken wäre die Entwicklung neuartiger homogener Baustoffe wünschenswert, die sich durch eine deutlich gesteigerte Wärmedämmung bei höheren Festigkeiten und besserer Recyclingfähigkeit auszeichnen. Auf Ansätze solcher Entwicklungen kann in diesem Beitrag nicht eingegangen werden, da dies den Rahmen sprengen würde. Im Folgenden liegt der Fokus auf klimaschonende Bindemittel.

### 3 Warum neue Bindemittelsysteme?

Moderne Gebäude bestehen im Kern aus Beton, das weltweit in größter Menge hergestelltes Material. Mit schätzungsweise 28 Mrd. t/a wird nur Trinkwasser in größerer Menge benötigt. Heute wird für Beton neben Sand, Kies und Wasser als Bindemittel Zement benötigt, der auf Zementklinker basiert. Zementklinker ist in seiner Herstellung sehr energieintensiv – etwa 3% des weltweiten Primärenergiebedarfs werden dafür benötigt. Etwa ein Drittel der Rohstoffe besteht aus chemisch gebundenem CO<sub>2</sub>, das beim Brennen freigesetzt wird. Weitere hohe

CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen aus den eingesetzten Brennstoffen. Trotz der hohen CO<sub>2</sub>-Emission der Zementherstellung ist der spezifische CO<sub>2</sub>-Fußabdruck einer Tonne Beton erstaunlich niedrig – da sie im Mittel nur etwa 150 kg Zement enthält.

Der immense globale Bedarf an Beton führt allerdings heute zu einem extrem steigenden Zementverbrauch mit einem entsprechenden CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Nach Schätzungen stammten derzeit über 8% der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Zementherstellung. Diese Entwicklung ist langfristig nicht akzeptabel und verlangt neue Ansätze.

Klimaschutz und Kostendruck haben in den letzten Jahren dazu geführt, dass das Herstellungsverfahren von konventionellem Zement erheblich optimiert wurde, etwa durch ingenieurtechnische Verbesserungen, die zur Senkung des Energiebedarfs und damit zu geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen führten, den verstärkten Einsatz von inerten, puzzolanischen und latent-hydraulischen Klinkerersatzstoffen oder die vorwiegende Nutzung sekundärer Brennstoffe mit z. T. hohen biogenen Anteilen statt fossilen Energieträgern wie Kohle, Öl und Gas. Allerdings sind die Potentiale zur CO<sub>2</sub>-Reduktion bereits weitgehend ausgeschöpft [13, 14]. Wie in Achternbosch et al. [14] aufgezeigt, wird es der globalen Zementindustrie trotz Ausschöpfung aller dieser zur Verfügung stehenden Möglichkeiten nicht gelingen, die zukünftigen CO<sub>2</sub>-Emissionen auf dem Niveau von 2005 zu halten.

Weitgehend einig sind sich viele Stakeholder, dass Handlungsbedarf besteht – obwohl sehr unterschiedliche Lösungsansätze favorisiert werden. Unter denjenigen, die das Klinker-Paradigma beibehalten wollen, scheint CCS eine essentielle Lösung zu sein. Der Vertrauensvorsprung, den CCS hierbei bekommt, muss erst einmal erworben werden, zu groß sind die Herausforderungen hinsichtlich bisher unbekannter technischer und wirtschaftlicher Realisierungsbedingungen, ganz zu schweigen von mangelnder gesellschaftlicher Akzeptanz.

Viele Wissenschaftler sind der Meinung, dass wesentliche Schritte zur Reduzierung der Emissionen nur möglich sind, wenn Fortschritte bei der Entwicklung neuer Bindemittelkonzepte erzielt werden. Einige favorisieren Fortschritte bekannter Konzepte, die von radikal neuen unterschieden werden müssen. Prominente Beispiele des ersteren sind Geopolymere, Belit-Calciumaluminatzemente und Zemente unter Verwendung von calcinierten Tonen [15, 16]. Den Stand der Forschung zu diesen Zementen wird in den Beiträgen von Herrn Ludwig und Herrn Thiel behandelt.

In der letzten Dekade war die Zementbranche zudem mit radikaleren Entwicklungen konfrontiert, die von außerhalb der traditionellen Zementbranche kamen und auf völlig anderen Bindemittelkonzepten

und Technologieansätzen beruhten. Diese Konzepte haben sowohl in der Industrie als auch in der Politik bemerkenswerte Aufmerksamkeit erregt. Prominente Beispiele sind Magnesia-basierte Systeme (Novacem), Calciumcarbonat-basierte Systeme (Calera, Solidia) und *h*-C-S-H-basierte Systeme (Celite) [17, 18, 19, 20].

Alle diese Entwicklungen wurden als ein Durchbruch und mögliche Lösung für das CO<sub>2</sub>-Problem der Zementproduktion bezeichnet. Sie zogen Investoren an und Startup-Unternehmen wurden gegründet.

Neben der Suche nach neuartigen mineralischen Bindemittelsystemen, die für Betone eingesetzt werden können, gibt es auch Bestrebungen, Betone mit deutlich geringerem Gehalt an Portlandzementklinker zu entwickeln, um damit die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen für Beton zu senken [21]. Hier wird speziell an der Rezeptur der Betone gearbeitet.

An der Entwicklung alternativer Zemente wird z. T. seit Jahrzehnten gearbeitet. Bisher wurde keiner der alternativen Ansätze zur Marktreife gebracht. Von verschiedenen Seiten werden an die Wissenschaft Anfragen gestellt, wie sie das Potential alternativer Zemente als Ersatz für den traditionellen Portlandzement (OPC) einschätzt. Hier kann die Technikfolgenabschätzung einen Beitrag zur Beantwortung dieser Fragen leisten.

#### **4 Methodologie der Technikfolgenabschätzung**

Die Machbarkeit einer Technologie schon zu Beginn ihrer Entwicklung abzuschätzen, stellt für die Systemanalyse eine große Herausforderung dar. Die Verwendung üblicher Bewertungsmethoden wird dadurch erschwert, dass kein Zugriff auf internes Wissen und Know-How besteht. Einzelheiten zu der Invention werden von den Erfindern und Technologieentwicklern oft aus Konkurrenzgründen nicht bekannt gegeben. Selten wird in wissenschaftlichen Arbeiten oder auf Konferenzen fundiertes Wissen zur Verfügung gestellt. In den meisten Fällen müssen Informationen aus verschiedenen Quellen wie Zeitungsartikeln, Zeitschriften, Pressemitteilungen oder Interviews gesammelt und analysiert werden. Solche Informationen sind oft ungenau oder nicht konsistent. Daher ist es schwierig, ein kohärentes Bild auf der Grundlage dieser verschiedenen Quellen aufzubauen.

Daneben besteht aufgrund des frühen Entwicklungsstandes oft bei den Entwicklern selbst eine hohe Unsicherheit bezüglich des aussichtsreichsten Weges zur technologischen Realisierung. In vielen Fällen befindet sich die Entwicklung noch im Labormaßstab, bestenfalls besteht schon eine kleine Pilotanlage, und man steht vor der Herausforderung, den

Ansatz auf eine technische oder gar industrielle Größe zu skalieren. Darüber führen erste Schritte zur Kommerzialisierung häufig zu neuem Wissen und Erkenntnissen auf Laborebene, die bisher getroffene Prozessführungen in Frage stellen können oder gar zu Unsicherheiten über den weiteren Weg führen können.

Zu Beginn der 70er Jahre entwickelte die Technikfolgenabschätzung (TA) Methoden, um mit solchen Kenntnislücken und Unsicherheiten umzugehen, die mit neuen Technologien verbunden sind [22]. TA zielte ursprünglich darauf ab, politische Entscheidungsträger über Chancen, Risiken und die unbeabsichtigten Auswirkungen im Zusammenhang mit neuen Technologien zu informieren und ein wissenschaftlich fundiertes Basiswissen für den politischen Entscheidungsprozess zu liefern. Neben der klassischen Politikberatung existieren aber auch TA-Varianten, die näher an der Technologieentwicklung dran sind. Bei einem solchen „early engagement“ der Systemanalytiker [23] müssen die prospektiven Bewertungsmethoden auf den Ebenen Planung, Labor oder Pilotanlage den Rahmenbedingungen angepasst werden und die Unabhängigkeit der Bewertung gewährleistet sein.

Ziel einer begleitenden TA ist es primär, die technischen Realisierungsbedingungen, das wirtschaftliche Potenzial, sowie die Chancen und Risiken der neuen Technologie so früh wie möglich abzuschätzen. Während solche Arbeiten häufig mit dem Ansatz der Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Analysis, LCA) in Verbindung stehen, folgt die begleitende TA einem anderen Ansatz. Da LCA-Tools auf standardisierte Datensätzen zurückgreifen, ist LCA oft nicht für solche Fälle geeignet, in denen sich Technologieentwicklungen noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium befinden. Die TA erarbeitet die Basisdaten für einen technisch realisierbaren Weg stattdessen selbst und zwar mit der hierfür angemessenen Genauigkeit.

Für die Bewertung neuartiger Zemente besteht eine praktikable Vorgehensweise darin, zuerst eine Materialflussanalyse durchzuführen, die alle relevanten chemischen oder stofflichen Umwandlungen identifiziert, um eine kohärente Bilanz von den Rohmaterialien bis zum zementären Bindemittel aufbauen zu können. Lücken müssen durch Plausibilitätsbetrachtungen und Schätzungen geschlossen werden. Ziel ist es, eine Prozesskette zu generieren, indem alle relevanten Prozessoperationen unter Berücksichtigung des Stoffumsatzes (bezogen auf die Produktionskapazität) der Anlage identifiziert werden.

Geeignete Systemkomponenten und zusätzliche alternative Lösungen werden bewertet und weiter spezifiziert, mit besonderem Augenmerk auf energieeffiziente und wirtschaftlich sinnvolle Lösungen.

Dadurch kann ein plausibles Modell für eine technische Realisierung erstellt werden. Dies alles wird auf iterative Weise durchgeführt, um eine Rückkopplung und fortlaufende Interaktion mit den Entwicklern zu ermöglichen und um die Technologie in einem frühen Stadium des Entwicklungsprozesses optimieren zu können. Die für die Modellierung verwendeten Energiebilanzen beruhen auf thermodynamischen und chemischen Methoden, einschließlich realistischer Abschätzungen des jeweiligen Wirkungsgrades. Darüber hinaus müssen geochemische, chemische und mineralogische Aspekte für die Analyse der Ressourcennutzung und -verfügbarkeit berücksichtigt und verfügbare Technologien für die Gewinnung der Materialien entlang der Versorgungskette untersucht werden. Die Abschätzung der Herstellungskosten beruht weitgehend auf Kostenstellenanalysen.

Neben dem Ziel, die technologische und ökonomische Machbarkeit darzustellen, können im Rahmen einer TA auch die Innovationsbedingungen für die Invention näher untersucht werden. Die Invention ist in eine bestehende „Landschaft“ einzubetten und somit ist die Struktur der Branche mit zu berücksichtigen. Hierzu wird das Transition Information System (TIS) angewendet [24]. Dieser Ansatz ermöglicht zunächst eine strukturelle Perspektive auf das Zusammenspiel von Netzwerken, Akteuren und Institutionen, die das Innovationsfeld charakterisieren [23]. Neben der Struktur stellt sich die Frage, warum und wie sich diese Struktur verändert. Ziel ist es, die Barrieren aufzuzeigen, die die Innovationsprozesse in einem im Falle des Bauwesens ausgereiften Innovationssystem bestimmen.

## 5 Technikfolgenabschätzungen ausgewählter Entwicklungen neuer Zemente

Im Folgenden wird die Komplexität, die mit der Entwicklung neuartiger Zemente verbunden ist, an zwei konkreten Beispielen demonstriert. Die beiden Inventionen Novacem und Celitement gehen zementchemisch komplett andere Wege. Bei der Novacem-Technologie handelt es sich um einen innovativen Magnesiabinder. Im Falle von Celitement um eine neue Familie von Calciumhydrosilikaten mit niedrigem Calciumgehalt. Vom Innovationsforschungsansatz zeigen beide Entwicklungen gewisse Gemeinsamkeiten: Beide Ansätze kommen von außerhalb der Zement-Community, beide sind mit dem Ziel angetreten, ein marktfähiges zementäres Bindemittel zu entwickeln, das Portlandzement ersetzen kann. Beide haben durch Auszeichnungen Erwartungen in der Politik und in der Zementindustrie hinsichtlich der Umsetzbarkeit dieser Erfindungen erzeugt. Beide konnten Investoren anziehen.

Obwohl Fragestellungen wie die Einschätzung der Leistungsfähigkeit des Binderprinzips natürlich in den Untersuchungen auch eine Rolle spielten, konzentrierten sich die TA-Arbeiten auf die Aspekte technische Realisierungsbedingungen, Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen, Verfügbarkeit der Rohstoffe und spezifische Innovationsbedingungen.

Während Novacem aus der Distanz begutachtet werden musste, bestand im Falle von Celitement die Möglichkeit und Chance, die Technologieentwicklung von Anfang begleitend zu betrachten.

### 5.1 Novacem

Bislang besetzen Magnesiabinder, deren Erhärtung auf Säure-Base Reaktionen und auf Carbonatisierung beruhen, nur Nischenbereiche im Markt [17]. Die Novacem®-Technologie versucht einen völlig neuen Weg einzuschlagen: Technologisch basiert das Verfahren auf der mineralischen Sequestrierung, einem Ansatz der künstlichen Verwitterung vorwiegend magnesiumsilikathaltiger Gesteine. Dabei fällt amorphe Kieselsäure als Nebenprodukt an, der als reaktiver Zementbestandteil eine große Bedeutung zukommt. Das Aushärten erfolgt durch Hydratation. Ausgehärtete Novacem® Zemente bestehen aus einem Gemisch aus (nicht umgesetztem) Brucit und Magnesiumsilikathydraten (M-S-H). Der Übergang von der Carbonatisierung hin zur Hydratation ermöglicht gegenüber herkömmlichen Systemen prinzipiell eine Ausweitung des möglichen Anwendungsspektrums für dieses neue Bindemittel [18].

Viele dieser Informationen waren zunächst nicht bekannt, da Novacem aus Gründen des Schutzes vor Nachahmern nur wenige Informationen zum Prinzip des Bindemittels und zum Herstellungsverfahren dieses Zements veröffentlichte. Die Informationen gaben zudem kein konsistentes Bild und waren zum Teil widersprüchlich.

Novacem stellte verschiedene Zementformulierungen vor, deren Zusammensetzungen nicht im Detail offen gelegt wurden. Wir modellierten u.a. einen (M-S-H)-Zement, der auf die Masse bezogen zu 40 % aus MgO, 10 % aus (Hydro)-Magnesit und zu 50 % aus in situ-gebildetem reaktiven SiO<sub>2</sub> besteht. Um die wesentlichen Verfahrensabläufe für die Herstellung dieser Zemente herzuleiten, wurden zunächst die gut dokumentierten Forschungsergebnisse aus der mineralischen Sequestrierung, die jahrzehntelang weltweit in verschiedenen Institutionen erarbeitet wurden, ausgewertet. Es wurde schnell klar, dass Novacem vor großen technologischen Herausforderungen stand und nach unserer Kenntnis für diese mineralischen Sequestrierung bis dato keine großtechnische Realisierung existierte. Mit der in Kapitel 4 vorgestellten Vorgehensweise gelang es eine kohärente Prozesskette mit einer jährlichen Produktionskapazität an (MSH)-Zement von 15.000 Tonnen zu erstellen, die dazugehörige Anlage zu modellieren und zu bilanzieren.

Die ersten Schritte der Prozesskette (siehe Abbildung 2) beginnen mit dem Abbau und der Anreicherung von Magnesiumsilikaten.

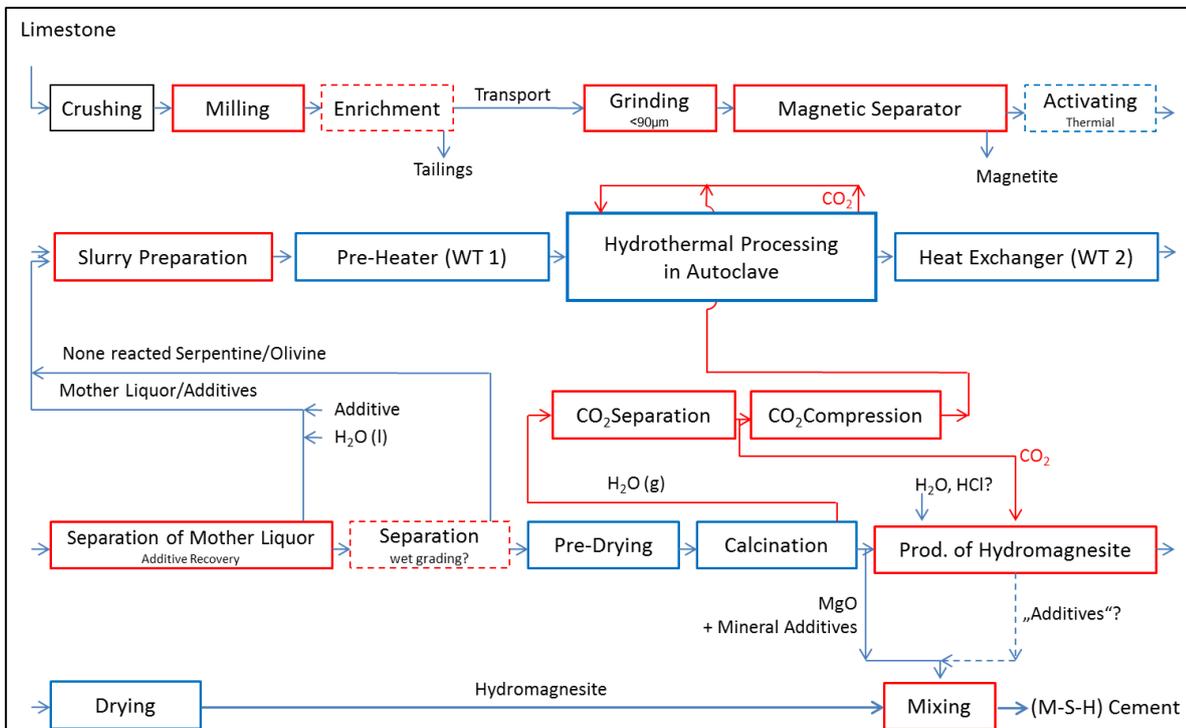


Abb. 2: Modellierter Prozessablauf für die Herstellung von MSH-Zement.

Nur feingemahlene thermisch aktivierte Materialien können carbonisiert werden. Hierzu wird eine wässrige Aufschlämmung des Pulvers mit CO<sub>2</sub> bei einem Druck von 150 bar und einer Temperatur von 180°C hydrothermal behandelt. Die Autoklavenprodukte (Hydromagnesit und amorphes SiO<sub>2</sub>) werden abgetrennt, getrocknet und der überwiegende Teil hiervon bei Temperaturen von etwa 700°C kalziniert. Ein Teilstrom bleibt unbehandelt. CO<sub>2</sub> soll in der Technologie so weit wie möglich im Kreise geführt werden. Daher berücksichtigt die Prozesskette auch eine fraktionierte Trennung und Kompression von CO<sub>2</sub>. Abschließend wird das Bindemittel gemischt.

Schon ein kurzer Blick auf die Prozesskette zeigt, dass die gesamte Technologie sehr komplex ist, komplexer auf jeden Fall als von den Erfindern angegeben. Dies wird auch durch die errechneten Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen bestätigt, die einen relativ hohen thermischen und elektrischen Energiebedarf aufweisen (siehe Tabelle 1). Nach unseren Abschätzungen kann der Primärenergiebedarf für die Herstellung von M-S-H-Zementen unter realisierbaren Bedingungen doppelt so hoch liegen, wie der für die Produktion von OPC.

Die Netto-CO<sub>2</sub>-Bilanz zeigt zwar, dass relativ niedrige CO<sub>2</sub>-Emissionen erreicht werden können; das Ziel, "carbon negative" Zemente zu produzieren, lässt sich jedoch kaum realisieren.

Tab. 1: Energiebedarf und CO<sub>2</sub>-Emissionen im Modell der Herstellung von 1 Tonne (M-S-H)-Zement

Prozess	[MJ]	[kWh]	[kg CO <sub>2</sub> ]
Vorbereitung		23	13,8
Transport		3	1,8
Therm. Energie	3900-5200		193-259
Elektr. Energie		45-287	29-173
CO <sub>2</sub> -Absorption			-36
Net. CO <sub>2</sub> -Bilanz			201-411

Die TA weist darauf hin, dass die Realisierungsbedingungen für die Technologie sich nicht verbessern, wenn im Kontext der mineralischen Sequestrierung statt einem zu deponierenden Produkt ein Produkt mit Wertschöpfung erzeugt werden soll. Dies wird noch dadurch erschwert, dass wenig Erfahrung zur Leistungsfähigkeit von (M-S-H)-Zementen vorliegen. Viele in der Natur vorkommende Magnesiumsilikathydrate haben zudem geringe Festigkeitswerte.

Novacem ging im Jahr 2012 insolvent. Die Rechte wurden von Calix erworben. Grundsätzlich wird die Forschung an Bindemittel auf Magnesiumbasis fortgesetzt, wie entsprechende Beiträge auf der 14. ICCS 2015 in Peking zeigen.

Rückblickend drängen sich aus der Sicht der TA einige Aspekte auf, die mit dazu geführt haben

mögen, dass das Entwicklungsvorhaben scheiterte: Die technologischen Herausforderungen waren von Anfang an als außerordentlich groß einzuschätzen und damit risikobehaftet. Trotz dieser ungelösten Probleme bei der mineralischen Sequestrierung ging Novacem schon früh mit der Ankündigung „der Lösung“ medienintensiv an die Öffentlichkeit. Das Projektmanagement war unserer Meinung nach sicher nicht optimal und hat Strukturmerkmale der Zement-„Landschaft“ zu wenig berücksichtigt. Dass sich die Entwicklung von Novacem zeitlich mit der Wirtschafts- und Finanzkrise überschneidet, hat die Suche nach einem Investor, der bereit war, mit längerem Atem die Entwicklung zu fördern, sicher auch ungünstig beeinflusst.

## 5.2 Celitement

Celitement ist eine Entwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) [25]. Das Bindemittel besteht aus Calciumhydrosilicaten (h-C-S-H), die bei der Hydratation von C<sub>3</sub>S und C<sub>2</sub>S als intermediäre C-S-H-Phase mit relativ kleinem C/S-Verhältnis gebildet werden und für deren Existenz es zuvor Hinweise gab. Es gelang den Erfindern diese Spezies zu stabilisieren, zu isolieren und eine Synthesestrategie für ein Bindemittel zu entwickeln. Im Jahr 2009 wurde das Start-up Unternehmen Celitement GmbH in Kooperation mit der SCHWENK-Gruppe gegründet [20]. Zwei Jahre später wurde auf dem Campus des KIT eine Pilotanlage mit einer täglichen Produktionskapazität von 100 kg aufgebaut und in Betrieb genommen. Neben Beteiligungen des KIT und von SCHWENK hat das Start-up zwischen 2009 und 2013 Mittel vom Bundesministerium für Bildung und Forschung eingeworben.

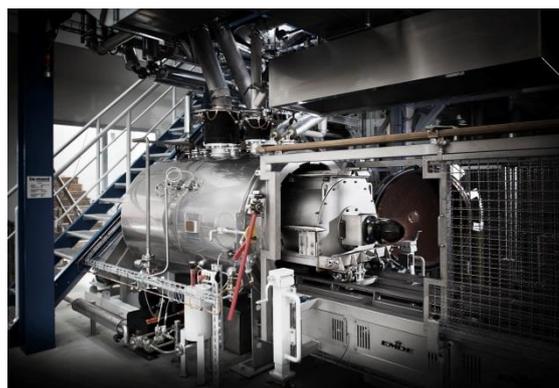


Abb. 3: Pilotanlage der Celitement GmbH. Foto: KIT

Calciumhydrosilikate können via  $\alpha$ -C<sub>2</sub>SH oder über die nahezu amorphe C-S-H-Phase mit idealisierter Formel Ca<sub>5</sub>[HSi<sub>2</sub>O<sub>7</sub>]<sub>2</sub> · 8 H<sub>2</sub>O (C<sub>1,25</sub>-S-H) hergestellt werden. Die Syntheserouten verwenden derzeit Kalkhydrat und Quarzsand als Ausgangsverbindungen. Die hier vorgestellten Ergebnisse der TA beziehen sich auf die Syntheseroute über C<sub>1,25</sub>-S-H. Diese Phase bildet sich hydrothermal aus Ca(OH)<sub>2</sub> und

feingemahlenem SiO<sub>2</sub> in 6 Stunden bei 190 °C in einem Autoklaven. Starke Wasserstoffbrücken in der Struktur führen jedoch dazu, dass diese Spezies keine hydraulische Reaktivität aufweist. Eine strukturelle Störung ist notwendig, um C<sub>1,25</sub>-S-H in einen reaktiven Zustand zu überführen. Ein vielversprechender Weg hierzu erscheint eine tribomechanische Aktivierung (Mahlung). Die reaktive Produktfamilie hat die idealisierte Formel C<sub>1,25</sub>[HSiO<sub>4</sub>]<sub>y</sub>[H<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>]<sub>z</sub> mit C/S = 0,75-2,75 [20].

Im Rahmen einer TA können zunächst angenommene Lösungen für eine technische Realisierung von denen abweichen, die für die Konstruktion einer realen Pilot- oder Referenzanlage verwendet werden. Dieses Vorgehen ermöglicht die Bewertung alternativer Lösungen für grundlegende Prozessschritte. In der Celitement-Technologie betrifft es beispielsweise die Frage, wie die Beheizung des Autoklaven realisiert oder wie anfallende Restenergie genutzt werden kann. Die vorgestellten Bilanzen

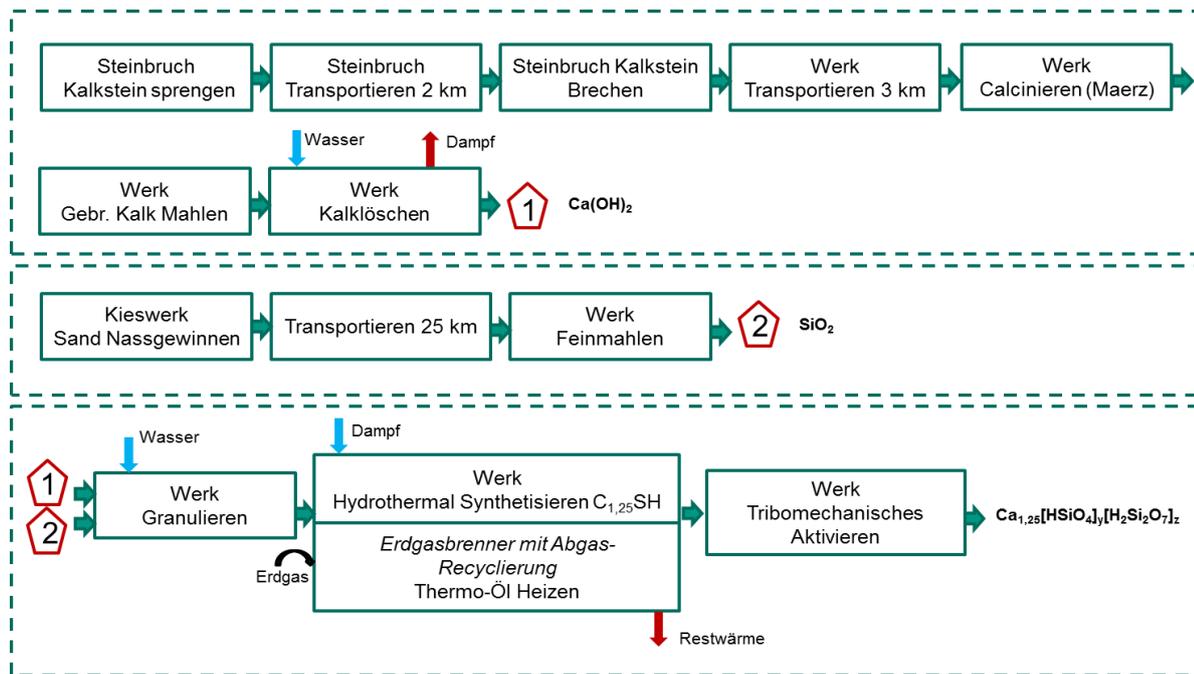


Abb. 4: Modellierter Prozessablauf für die Herstellung von Celitement.

Um die Machbarkeit der Technologie zu untersuchen, wurden Abschätzungen durchgeführt, die wie schon beschrieben auf Prozesskettenanalysen und modellhaften Anlagenauslegungen beruhen. Die jährliche Produktionskapazität der Modellanlage betrug 15.000 Tonnen. Anhand der zur Verfügung gestellten Betriebsparameter und Daten der Pilotanlage konnte eine kohärente Prozesskette (Abbildung 4) erstellt werden.

Aufgrund der relativ geringen Produktionskapazität der Modellanlage lag es nah, diese am Standort eines Zement- oder Kalkwerkes zu integrieren. Dies ermöglicht die gemeinsame Nutzung von Vorstufen (z. B. Steinbruch, Brechen und Zerkleinern von Kalkstein) und Infrastruktur (z. B. Kalksteintransport), natürlich unter Berücksichtigung entsprechender Allokationen bei der Bilanzierung. Für die Erzeugung von gebranntem Kalk nahmen wir moderne Calciniertechnologie (z. B. Maerz-Ofen) an. Für die folgenden Prozessstufen Kalklöschchen, Granulieren des angelieferten Quarzsandes mit Kalkhydrat und Wasser und dem Autoklavieren mit Dampf verwendeten wir in der Industrie etablierte Verfahren und Technologien.

erheben somit nicht den Anspruch der Darstellung eines Endergebnisses.

Eine Analyse der Prozesskette zeigt, dass die Celitement-Technologie technisch machbar ist. Zwar stellt die Skalierung der tribomechanischen Aktivierung auf industrielle Maßstäbe eine Herausforderung dar, dies erscheint aber realisierbar. Alle anderen Prozessschritte sind industriell etablierte Verfahrensstufen. Die verwendeten Ressourcen sind mit denen für konventionellen Zement identisch. Damit kann auf bestehende Vorstufen zurückgegriffen werden. Ein großer Vorteil ist, dass das ausgehärtete Bindemittel aus (C-S-H)-Gelen besteht, zu denen im Vergleich zu anderen Bindemittelkonzepten relativ viel Erfahrung vorliegt.

Tab. 2: Energiebedarf und CO<sub>2</sub>-Emissionen im Modell der Herstellung von 1 Tonne Celitement

Prozessgruppe*	[MJ]	[kWh <sub>el</sub> ]	[kg CO <sub>2</sub> ]
Kalkhydrat	1200	10	440
Quarzsand	20	30	19
Celitement	580-980	100-150	90-140

\* Zusammengefasste Prozessgruppen entsprechen den in Abbildung 4 aufgeführten Prozessschritten.

Der thermische Energiebedarf beträgt schätzungsweise 60% des für Herstellung von OPC benötigten Energiebedarfs. Der elektrische Energiebedarf ist relativ hoch – in unserer Bilanzierung verursachen die Mühlen ca. 90% des Stromverbrauchs. Im Rahmen der technischen Optimierung der Aktivierung muss es ein Ziel sein, diesen zu senken.

Die gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Herstellung sind deutlich niedriger als die von OPC und dies ohne Berücksichtigung alternativer Energieträger und nachwachsender Rohstoffe mit formalen "Null"-Emissionen.

Die Abschätzungen der Herstellungskosten zeigen, dass diese im Bereich von Weißzementen liegen werden.

Derzeit ist eine großtechnische Anlage mit einer jährlichen Produktionskapazität von 50.000 Tonnen in Planung. Der Markteintritt soll mit Spezialbaustoffe erfolgen. Für den Start einer Referenzanlage wurde 2020 genannt.

## 6 Warum es so schwierig ist, ein neuartiges Bindemittel zu entwickeln, das OPC ersetzen kann

Im Kapitel 5 wurde an konkreten Beispielen radikaler Zement-Entwicklungen demonstriert, welchen Beitrag eine Technikfolgenabschätzung zu deren Bewertung leisten kann. Es ging um die Abschätzung der Realisierungsbedingungen der mit dem Bindemittel verbundenen Technologie und um die Einschätzung des CO<sub>2</sub>-Einsparpotentials bei einer Produktion unter realistischen Bedingungen. Die TA zieht dabei auch die Rahmenbedingungen in Betracht, die Einfluss auf die Technologieentwicklung haben. Hierbei geht es um die Struktur der „Landschaft“, in der die neue Technologie eingebettet werden soll und um die Innovationsbedingungen.

In diesem Kontext drängt sich die Frage auf, warum es so schwierig ist, alternative Zemente bis zur Marktreife zu entwickeln, obwohl, wie schon erwähnt, an der Entwicklung derartiger Zemente schon seit Jahrzehnten gearbeitet wird. Trotz unterschiedlicher Ansätze ist bisher keine der Inventionen vollständig entwickelt und tauglich für den Massenmarkt – und wahrscheinlich werden viele von ihnen es niemals sein.

Dies liegt im Wesentlichen an den enormen Anforderungen, die an ein für den Massenmarkt taugliches Produkt gestellt werden. Das bestehende Innovationssystem ist über 150 Jahre gereift, und hat sich in all seinen Segmenten verzahnt. Das gilt für den Produktionsprozess, aufeinander abgestimmte Systembaustoffe und die ineinander greifenden Prüf-, Zulassungs- und Normungsanforderungen und -prozeduren. Etwas überspitzt ausgedrückt wäre in diesem Rahmen das ideale Bindemittel der

Zukunft ein Zement, der die gleichen Charakteristika wie OPC aufweist, nur eben ungleich klimafreundlicher in seiner Herstellung und ressourceneffizienter ist.

Dies führt zu einer Liste von Anforderungen, wie solchen, dass das ideale, dem OPC mindestens ebenbürtige Produkt aus weltweit verfügbaren Rohstoffen hergestellt und möglichst auf einfache Weise wieder recycled werden kann. Es sollte nach etablierten Produktionsverfahren hergestellt und mit den gleichen Maschinen verarbeitet werden können wie konventioneller Zement. Schließlich muss das Produkt zu bestehenden Anwendungsvorschriften, Prüfzertifikaten, gesetzlichen und normativen Regelwerken kompatibel sein. Alle diese Eigenschaften müssen zu einem Preis umgesetzt werden können, der ohne Subvention wettbewerbsfähig ist.

Diese meist gar nicht explizit ausgesprochene „Forderungsliste“ stellt Entwickler und Unternehmen vor immense Herausforderungen. Hier greifen viele Einflussfaktoren ineinander, deren komplexes Zusammenspiel insbesondere von Akteuren außerhalb der Zement-Community, aber auch der Politik, unterschätzt wird. All dies ist charakteristisch für die spezifischen Rahmenbedingungen des Innovationsystems Zement, die, wie oben schon angedeutet, von einer Technikfolgenabschätzung nicht ausgeblendet werden können.

### 6.1 Strukturelle Faktoren

Gebäude und Strukturen haben Nutzungsdauern von 50-100 Jahren und mehr. Die Minimierung von Risiken und damit Sicherheitsdenken führen zu einer konservativen Haltung in Bezug auf Regeln und Normen. Die langfristige Zuverlässigkeit eines Materials soll noch vor dessen Einsatz nachgewiesen werden können. Wichtige Kriterien für die Beurteilung von Zementensystemen, wie Festigkeit und Dauerhaftigkeit werden durch makroskopische Tests bestimmt. Die Ableitung von allgemein anwendbaren *Mix-Design-Prozeduren* ist nur mit großen Sicherheitsreserven möglich. Darüber hinaus müssen umfangreiche und sehr zeitaufwendige Testverfahren durchgeführt werden. Für eine Zulassung sind 10-15 Jahre derzeit der übliche Horizont. Aus diesem Sicherheitsdenken heraus versteht man, dass sich in nach 150 Jahren relativ wenig geändert hat.

### 6.2 Wissenskultur

Traditionell werden zementhaltige Materialien hauptsächlich empirisch und inkrementell durch trial and error optimiert, da die maßgeblichen Prozesse bei der Hydratation noch nicht vollständig verstanden sind [27]. Wenn der Ablauf der Hydratation von CEM I im Verständnis noch Fragen aufwirft, gilt dies umso mehr bei einem wesentlich komplizierteren System, wie z. B. im Falle von Komposit-Zementen mit vielen reagierenden Spezies.

Je niedriger der Klinker/Zementfaktor ist, desto ausgeklügelter muss z. T. die Rezeptur sein. An die Spezialchemie werden große Anforderungen gestellt. Die Heterogenität bestimmter Klinkerersatzstoffe wie Flugaschen und Tone erschwert es in der Praxis, wohlabgestimmte Rezepturen aufrechtzuhalten. Die damit verbundenen Unsicherheiten erschweren die industrielle Umsetzung neuartiger Zementsysteme [24, 27].

Ziel ist es somit, mit wissenschaftsbasierter Ansätzen die Prozesse der Hydratation und die Performance von Materialkombinationen insbesondere in Bezug auf Dauerhaftigkeit besser zu verstehen. Die Entwicklung und Nutzung neuer analytischer Methoden mit hoher räumlicher, chemischer und struktureller Auflösung markiert in den letzten Jahren einen methodischen Durchbruch in der Wissenschaft und Entwicklung, der in Zukunft schnellere Innovationszyklen ermöglichen wird. Zum Beispiel wurden Calciumhydrosilikate durch neue analytische Methoden identifiziert. Zusätzlich bringt die nun mögliche Modellierung der Prozesse neue Erkenntnisse. Trotzdem existiert derzeit noch immer eine große „Lücke“ zwischen „Labor“ und „Realwelt“, die die Transformation vieler Ansätze zur Marktreife erschwert [27]. Die derzeitige Forschung zeichnet sich durch die besondere Intensität der Wissensgenerierung aus, deren Folgen wahrscheinlich erst in 10 - 15 Jahren in der Praxis sichtbar werden. Das soll nicht ausschließen, dass es schon früher lokale Lösungen gibt, weil lokal eine Ressource (Ton, Asche) mit besonderer Eignung und Verarbeitbarkeit vorhanden ist, die sich hervorragend als Komponente in das bekannte System einfügt, jedoch nur so lange nutzen lässt, bis dieses Depot abgebaut ist. Dies ist dann aber keine globale Lösung.

### 6.3 R&D-Rahmenbedingungen

Aus dem bisher Aufgeführten folgt, dass für die Grundlagenforschung zu alternativen Bindemittelkonzepten eine Reihe ungünstiger Rahmenbedingungen bestehen [24]. Der Zugang zur Finanzierung entsprechender Forschungsprojekte ist traditionell schwierig. Die langen Zeithorizonte bei der Entwicklung und die Anforderungen an neue Bindemittel in Bezug auf die Zulassung und vorhandene Standards stellen zudem ein hohes Hindernis und Risiko insbesondere für radikalere Forschungsansätze dar. Selbst für inkrementelle Innovationen, wie der Innovationsverlauf von Kalksteinzementen in Deutschland verdeutlicht, stellte der zeitliche Abstand von fast 20 Jahren zwischen Entwicklung und Marktzugang eine Herausforderung dar.

Bei wettbewerblichen Ausschreibungen waren in der Vergangenheit die Erfolgchancen einer Finanzierung von Grundlagenforschung im Bereich

Zement relativ gering. Gilt doch in der allgemeinen Wahrnehmung die Zementtechnologie im Vergleich zu innovativen Technologien wie Biowissenschaften oder Informations- und Kommunikationstechnologien als etabliert und „langweilig“. Im Kontext einer ausgereiften „Low-Tech“-Industrie wie Zement werden inkrementelle Innovationen als Kernmerkmal angesehen. Diese Rahmenbedingungen in einem restriktiven regulativen Umfeld behindern kurzfristige Kapitalanlagestrategien, die für andere neue und aufkommende Technologien charakteristisch sind.

Es stellt sich somit die Frage nach der Forschungs- und Entwicklungsorganisation. Bei Innovationszyklen von 10-15 Jahren könnte man an strategische Kooperationen von Zementunternehmen denken, die diesbezüglich den langen Atem hätten, dem aber kartellrechtliche Bedenken entgegenstehen könnten. Aussichtsreicher erscheint der Aufbau größerer Netzwerke, in denen sich Forschungsinstitutionen abstimmen können, wie derzeit die Aktivitäten zu calcinierten Tonen zeigen. Auch die langfristige Zusammenarbeit eines nationalen Forschungsinstituts, dessen Forschung programmatisch langfristig angelegt ist, mit einem Industrieunternehmen erscheint vorteilhaft, wie dies im Falle von Celiment der Fall ist. Nicht unerwähnt soll bleiben, dass die frühe Integration der Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse in den Entwicklungsprozess wichtige Anstöße liefern kann.

## 7 Fazit

In diesem Beitrag wurden Methoden der Technikfolgenabschätzung vorgestellt, die zur Bewertung von Entwicklungen neuartiger Bindemitteln eingesetzt werden können. Es wird aufgezeigt, dass es mit einer TA möglich ist, schon zu einem frühen Stadium der Entwicklung einer Bindemittel-Technologie erste Antworten in Bezug auf Machbarkeit, Realisierungsbedingungen und CO<sub>2</sub>-Einsparpotential geben zu können. An zwei konkreten Beispielen wurde dies demonstriert. Beide stellen radikale Innovationen dar, Novacem ist mit Brucite/M-S-H von der konventionellen Bindemittelcharakteristik (C-S-H-Phasen) weit entfernt, wogegen der Abstand bei Celiment mit h-C-S-H deutlich geringer ist. Die TA-Studien weisen darauf hin, dass im Falle von Novacem die technischen und ökonomischen Realisierungsbedingungen als außerordentlich schwierig angesehen werden, während die Celiment-Technologie zwar vor technischen Herausforderungen steht, die aber als lösbar angesehen werden. Trotzdem ist auch für diese Technologie anzunehmen, dass sie im bestehenden Innovationssystem 10-15 Jahre benötigt, um dem OPC als universellem Bindemittel auf dem Massenmarkt Konkurrenz zu machen zu können.

Dieser Zeithorizont gilt auch für andere angedachte Alternativen. Derzeit ist keine für den Masseneinsatz ausgeklügelte Lösung zur Marktreife entwickelt. Der Trend, den Klinker/Zement-Faktor in (Multi)-Kompositzementen weiter zu senken, stößt an Grenzen, auch deshalb, weil derzeit das Wissen über die Abläufe der Prozesse die die Hydratation und Dauerhaftigkeit bestimmen, begrenzt ist. Aus unserer Sicht befinden wir uns derzeit in einer wichtigen Phase der Wissensgenerierung. Der Einsatz moderner analytischer Methoden und die Modellierung wird das Verständnis der Prozesse auch komplexerer Phasenzusammensetzungen weiter verbessern. Noch sind die Innovationszyklen und die Prüfprozeduren davon unbeeinflusst, so dass davon auszugehen ist, dass die Folgen des neuen Wissens und damit die Markteinführung neuer Systeme erst in einiger Zeit sichtbar werden. Auch wenn es viel versprechende Entwicklungen gibt, ist aus unserer Sicht trotz der Dringlichkeit der CO<sub>2</sub>-Problematik eine globale Alternative zu konventionellem Zement als Massenbaustoff in den nächsten 10-15 Jahren nicht zu erwarten. Dies dürfte auch die Zementindustrie so sehen.

## 8 Literatur

- [1] Anonym (2017) Das internationale Baugeschäft. Die Deutsche Bauindustrie. Hauptverband der deutschen Bauindustrie e. V. Berlin <https://www.bauindustrie.de/themen/internationales-bauen/das-internationale-baugeschafft/>
- [2] Anonym (2017) Entwicklung des Bauvolumens in Deutschland in den Jahren 2008 bis 2017 (in Milliarden Euro), Statista. Das Statistik Portal. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167953/umfrage/bauvolumen-in-deutschland-seit-2008/>
- [3] Verein der deutschen Zementwerke e.V (VDZ) (2017) Zahlen und Daten. E. Bruttoinlandsprodukt, Bauwirtschaft. Kompilierte Daten aus Destatis. <https://www.vdz-online.de/publikationen/zahlen-und-daten/e-bruttoinlandsprodukt-bauwirtschaft/>
- [4] Anonym (2017) Entwicklung des Bauvolumens in Deutschland in den Jahren 2008 bis 2017 (in Milliarden Euro), Statista. Das Statistik Portal. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167953/umfrage/bauvolumen-in-deutschland-seit-2008/>
- [5] Axel Zweck, Dirk Holtmannspötter, Matthias Braun, Michael Hirt, Simone Kimpeler, Philine Warnke. (2015) Gesellschaftliche Veränderungen 2030, Ergebnisband 1 zur Suchphase von BMBF-Foresight Zyklus II. VDI Technologiezentrum GmbH, Innovationsbegleitung und Innovationsberatung, Düsseldorf
- [6] Thomas Baumanns, Philipp-Stephan Freber, Kai-Stefan Schober, Florian Kirchner (2016) Roland Berger GmbH, UniCredit Bank AG. Bauwirtschaft im Wandel, Trends und Potentiale bis 2020. Roland Berger GmbH, München. [www.rolandberger.com](http://www.rolandberger.com)
- [7] McKinsey Global Institute (2017) Reinventing Construction, A route to higher productivity, McKinsey&Company. [www.mckinsey.com/mgi](http://www.mckinsey.com/mgi)
- [8] Franka Kühn (2017) Die demographische Entwicklung in Deutschland. Bundeszentrale für politische Bildung (BpB). <http://www.bpb.de/politik/innenpolitik/demografischer-wandel/196911/fertilitaet-mortalitaet-migration>
- [9] Robbie M. Andrew (2017) Global CO<sub>2</sub> emissions from cement production. Earth System Science Data. Discussion papers. Andrew, R. M.: Global CO<sub>2</sub> emissions from cement production, Earth Syst. Sci. Data Discuss., <https://doi.org/10.5194/essd-2017-77>, (Open Access).
- [10] Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden. <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:DE:PDF>
- [11] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016) Der Klimaschutzplan 2050 – Die deutsche Klimaschutzlangfriststrategie. <https://www.bmub.bund.de/themen/klimaanergie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/klimaschutzplan-2050/>
- [12] Europäische Kommission (2011) Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa. Brüssel, den 20.9.2011 KOM(2011) 571 endgültig
- [13] Martin Schneider, Michael Romer, Markus Tschudin, Hugo Bolio (2011) Sustainable cement production - present and future. Cem. Concr. Res., Vol. 41 (7), pp. 642-650
- [14] Matthias Achternbosch Christel Kupsch, Eberhard Nieke, Gerhard Sardemann (2011) Klimaschonende Produktion von Zement: eine Utopie? GAIA, Vol. 20, 1, pp. 31-40
- [15] Horst-Michael Ludwig, Wensheng Zhang (2015) Reseach review of cement clinker chemistry. Cement and Concrete and Research, Vol. 78, pp. 24-37

- [16] Karen L. Scrivener (2014) Options for the future of cement. *Indian Concr. J.*, Vol. 88 (7), pp. 1-21
- [17] Matthias Achternbosch Christel Kupsch, Eberhard Nieke, Gerhard Sardemann (2012) Sind magnesiabasierte Zemente die Zukunft? Teil 1: Analyse bisheriger Entwicklungen. *ZKG International*, Vol. 2, pp. 64-72
- [18] Matthias Achternbosch Christel Kupsch, Eberhard Nieke, Gerhard Sardemann (2012) Sind magnesiabasierte Zemente die Zukunft? Teil 2: Novacem - Eine Bewertung neuer Entwicklungen. *ZKG International*, Vol. 3, pp. 64-72
- [19] Matthias Achternbosch, Ulrich Dewald, Eberhard Nieke, Gerhard Sardemann (2015) Is coal fly ash a suitable alkaline resource for manufacturing new calcium carbonate-based cements? A systems analytical evaluation. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 19, 1, pp. 71-81
- [20] Matthias Achternbosch, Ulrich Dewald, Eberhard Nieke, Gerhard Sardemann (2016) New calcium hydrosilicate-based cements Celitement - a technology assessment. *ZKG International*, Vol. 6, pp. 48-57
- [21] Michael Haist, Jack S. Moffatt, Raphael Breiner, Harald S. Müller (2014) Entwicklungsprinzipien und technische Grenzen der Herstellung zementarmer Betone. *Beton- und Stahlbetonbau* Vol. 109 Heft 3, pp. 202-215
- [22] Armin Grunwald (2010) Technikfolgenabschätzung - eine Einführung. Berlin: edition sigma (Gesellschaft - Technik - Umwelt, Neue Folge 1)
- [23] Armin Grunwald, Matthias Achternbosch, (2013) Technology assessment and approaches to early engagement. In: N. Doorn, D. Schuurbiers, I. Poel, M.E. van de Gorman (Hrsg.): *Early engagement and new technologies: opening up the laboratory technology*. Dordrecht Heidelberg New York London: Springer, pp. 15-34
- [24] Ulrich Dewald, Matthias Achternbosch (2016) Why more sustainable cements failed so far? Disruptive innovations and their barriers in a basic industry. *Environmental Innovation and Societal Transition*, Vol. 19, pp. 15-30
- [25] Celitement GmbH (2018) [www.celitement.com](http://www.celitement.com)
- [26] Matthias Achternbosch, Ulrich Dewald, Eberhard Nieke, Gerhard Sardemann (2015) A comparative technology assessment of new radical low CO<sub>2</sub>-cements - conditions of technical realizations, balances. In: *The Chinese Ceramic Society; China Building Materials Academy; State Key Laboratory of Green Building Materials (Organizer) (Hrsg.): Proceedings of the 14th International Congress on the Chemistry of Cement*, 13.-16.10.2015. Beijing, China
- [27] Karen L. Scrivener, André Noat (2011) Hydration of cementitious materials, present and future. *Cem. Concr. Res*, Vol. 41, pp. 651-665

## **Autor**

### **Dr. Matthias Achternbosch**

Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Karlstraße 11  
76133 Karlsruhe