

Projekt „Green Carbon“

Carbonfasern-Bauteile aus Algen

Die menschengemachte Veränderung des Klimas durch Treibhausgase zwingt zum Umdenken in allen Sektoren der Wirtschaft. Forschungseinrichtungen und Universitäten reagieren bereits. Es entstehen Technologieansätze, die früher als Utopie angesehen worden wären. Wie man CO₂ nutzbar machen kann, um nicht nur Emissionen zu senken, sondern CO₂ nach Möglichkeit dem Klimasystem dauerhaft zu entziehen und gleichzeitig Wertschöpfung zu erzielen, wird nun zur Notwendigkeit. Entscheidend hierfür ist die industrielle Skalierbarkeit innovativer Lösungen. Es reicht nicht aus, dass solche Entwicklungen technisch machbar sind. Sie müssen einen relevanten Effekt auf die künftige Entwicklung des Klimageschehens haben. Das können sie aber nur dann, wenn sie wirtschaftlich und wettbewerbsfähig sind. Hier zeigen wir Wege auf, wie dies bei der Herstellung von Fertigbauteilen gelingen kann.

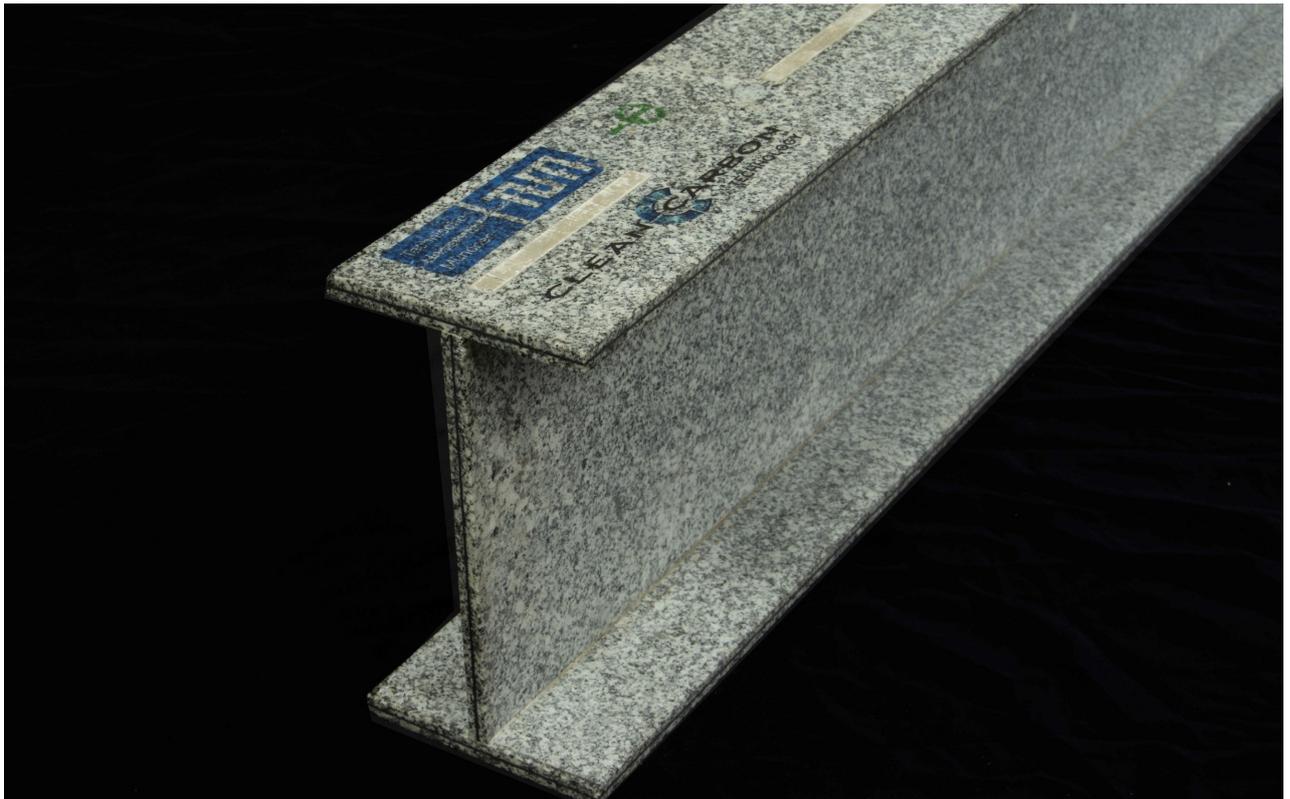
Baumaterialien spielen in Klima-Szenarien eine herausragende Rolle. Der Bau- und Gebäudesektor inklusive Baustoffgewinnung, Baulogistik, Herstellung und Nutzung von Bauwerken und Bauabfallbehandlung verursacht weltweit etwa ein Drittel des Energieverbrauchs und mehr als ein Fünftel der Treibhausgasemissionen. Bei unveränderten Bautechnologien wird sich in Folge fortschreitenden Bevölkerungswachstums und verstärkter Urbanisierung allein der zugehörige Energieverbrauch bis 2050 verdoppeln [1]. Zum einen sind Baumaterialien (insbesondere Stahl, Beton) selbst die Quelle eines großen Teils der prozessbedingten Treibhausgas-Emissionen. Zum anderen eröffnet die große Masse der im Einsatz und Umlauf befindlichen Baumaterialien Potentiale für die Bildung global relevanter Kohlenstoffsinken, wenn Kohlenstoff, der sich zuvor in Form von CO₂ in der Atmosphäre befunden hat, dauerhaft in eine nicht-flüchtige Form umgewandelt und im Baumaterial selbst gebunden wird.

Im jüngsten IPCC Sachstandsbericht SR1.5 zum 1,5°C-Ziel ist die breite Verwendung von Carbonfasern als eine der Möglichkeiten erwähnt, um dem Erdsystem CO₂ dauerhaft dadurch zu entziehen, dass die Carbonfaser aus CO₂ hergestellt wird und im Verbund mit mineralischen Stoffen konventionelle Baumaterialien ersetzt. Der IPCC SR1.5 bezieht sich dabei auf zwei im Journal „Industrial & Engineering Chemistry Research“ der American Chemical Society erschienenen und von internationalen Experten geprüfte Publikationen. Diese Fachartikel sind durch eine enge Zusammenarbeit der TU München mit KMUs entstanden und beschreiben verschiedene Pro-

zessszenarien zur Transformation von Algenbiomasse in Polyacrylnitril-basierte Carbonfasern. Die Artikel bewerten nicht nur die technische Machbarkeit, deren Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Risiken, sondern ermitteln auch den Flächen- und Energieverbrauch, wenn große Mengen an Carbonfasern benötigt werden, um die weltweit hergestellte Menge an Baustahl zu ersetzen. Erst in einem solchen Szenario mit einem Entzug von jährlich bis zu 4 Gt CO₂ aus der Atmosphäre und einer dauerhaften Immobilisierung durch Umwandlung in Carbonfasern könnte eine deutliche Eindämmung des Klimawandels erreicht werden, wenn solche Carbonfasern in einem ersten Schritt in Fertigbauteilen aus Beton zum Einsatz kommen.

Eine alternative Prozessroute zur Generierung von CO₂ basierter Carbonfaser führt über eine erweiterte Fischer-Tropsch-Synthese unter Anwendung des sogenannten „Power-to-X“ Ansatzes. In diesem Szenario wird über eine durch erneuerbare Energien betriebene elektrolytische Wasserspaltung in einem ersten Schritt „grüner“ Wasserstoff hergestellt. Die thermokatalytische Umsetzung von CO₂ mit Wasserstoff führt dann zur Herstellung von nachhaltig hergestelltem Methanol. Dieses Methanol wird in weiterführenden chemischen Transformationen zu Acrylnitril, Polyacrylnitril und schließlich zu carbonisierten Fasern umgesetzt. In diesem mehrstufigen Prozess könnte CO₂ über Direct Air Capture (DAC) aus der Luft extrahiert werden. Alternativ könnte CO₂ direkt aus industriellen Prozessen, wie der Stahl- oder Zementherstellung in hochkonzentrierter Form abgeschieden und in Carbonfasern permanent gebunden werden.

[1] https://www.stiftung-mercator.de/media/downloads/3_Publikationen/Klimafakten.de_Klimawandel_-Bausektor_201409.pdf, p. 4-5



© Kolja Kuse

Der Doppel-T-Träger ist bei gleicher Traglast zwei mal leichter als sein älterer Bruder aus Stahl

Die TU München (TUM) arbeitet mit TechnoCarbonTechnologies und AHP GmbH & Co. KG im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes „Green Carbon“ daran, CO₂ durch synergistische Kombination biotechnologischer und chemischer Verfahren zu fixieren und in CO₂-basierte Carbonfasern umzuwandeln, die im Bausektor Verwendung finden können. Dieses CO₂ kann zum Beispiel direkt aus den Abgasen der Zementherstellung stammen. In einem weiterführenden Ansatz validiert TechnoCarbonTechnologies seine patentierte, klimawirksame CarbonFaserStein-Komposit-Technologie für den Einsatz in der Bauindustrie mit dem Ziel, zunächst Stahl und längerfristig – so die Hoffnung – auch Beton durch faserstabilisierten Granit zu ersetzen, der energiearm und ohne prozessbedingte CO₂ Emissionen gewonnen werden kann. Diese Arbeiten werden unter fachkundiger Begleitung der Hochschule München durchgeführt. In diesem Kontext ist es erwähnenswert, dass Naturstein etwa das gleiche spezifische Gewicht wie Aluminium hat. Wird der Stein nun durch Vorspannung mit der steifen Carbonfaser stabilisiert, gelingt es, das sonst spröde Hartgestein dauerhaft rissfrei zu flexibilisieren. In Abbildung 2 wird gezeigt, dass bis zu 2 mm dünne Steinplatten, welche die Größe von ganzen Unmaßplatten von typischerweise 2,90 m x 1,80 m haben können, gefertigt werden, die so eine direkte Anwendung als Baustoff haben, wenn sie entsprechend formgebend weiterverarbeitet werden, Abbildung 3 zeigt einen Doppel-T-Träger aus bayerischem Granit

und Carbonfasern. Besonders, wenn solche Platten beidseitig Carbon-beschichtet werden, entstehen „Bleche“ aus Stein und Carbon, die etwas leichter als Aluminium sind und der Steifigkeit von Stahl nahe kommen.

Unter anderem wurden von TechnoCarbon in Zusammenarbeit mit dem Labor für Stahl- und Leichtmetallbau GmbH (LSL) und der FH-München ganze Hauswände und Bahnschwellen aus Carbon-beschichteten Steinplatten gebaut und getestet. In Zusammenarbeit mit den Massivbauern der TUM sollen demnächst solche Lamellen aus CarbonFaserStein (CFS) mit einer innen-liegender Carbonschicht getestet werden, die als Armierung von Beton anstelle von Stahl in Betonfertigteilen verwendet werden können. Dies ist möglich, da der Stein als Zwischenschicht den idealen Kraftschluss zwischen Beton und Carbon herstellt. Das funktioniert deshalb problemlos, weil Granit unter Vorspannung etwa die gleiche Flexibilität hat wie Aluminium. Da Granit einen Temperaturexpansionskoeffizienten hat, der exakt zwischen dem von Beton und Carbon liegt, ist der Stein Dank seiner hohen Flexibilität beziehungsweise seines kleinen e-Moduls von ca. 60GPa perfekt in der Lage die völlig unterschiedlichen Temperaturexpansionskoeffizienten von Beton und Carbon mit geringst-möglicher Schichtdicke auszugleichen und eine Delamination an den Schichtgrenzen Stein/Carbon und Stein/Beton in einem Temperaturbereich von -40 °C bis +80 °C dauerhaft und nachhaltig zu

unterbinden. 200 Jahre Frostwechsel sollen als nächstes durch Dauer-Biegetests simuliert werden. Die Erwartung ist, dass das Beton-Material keinen Steifigkeitsverlust erleidet, und im Beton jegliche Rissbildung unterbunden wird, was mit Stahl nur unvollständig und nicht nachhaltig erreicht wird.

Unter Führung der TU München werden im Rahmen des vom BMBF mit 6,9 Mio. Euro geförderten Projektes „Green Carbon“ nicht nur nachhaltig hergestellte Carbonfasern, Harze, Thermoplaste und Schmierstoffadditive prototypisch hergestellt, sondern es sollen aus CFS-Platten auch Leichtbauteile aus Carbon, Stein und Beton entstehen. Zunächst ist an Lamellen zur Armierung von Beton und Doppel-T-Trägern gedacht, aber auch für Anwendungen in den Sektoren Automotive- und Aerospace denken die Entwickler über ähnliche Leichtbauprofile aus CFS nach.

Entscheidend für die industrielle Skalierbarkeit und Wettbewerbsfähigkeit solcher neuen Technologien werden die Ergebnisse der techno-ökonomische Analyse sein. Projektpartner hierfür im „Green Carbon“-Vorhaben ist die AHP GmbH & Co. KG, die über die speziell für die Bewertung neuer Technologien benötigten Analyse-Tools verfügt. Mit Hilfe eines dynamischen Modellsystems für die techno-ökonomische Gesamtmodellierung eingebettet in Monte-Carlo-Simulationen werden die Investitionschancen und -Risiken Variationsanalysen unterzogen, welche die Rentabilitätsbewertung neuer Technologien im Vergleich mit existierenden Geschäftsmodellen erlauben. Die ersten Berechnungen haben ergeben, dass sich die CO₂-basierte Carbonfaser-Produktion im Vergleich zum Bauen mit Stahl „rechnen“ kann, insbesondere auch dann, wenn die permanente Speicherung von Kohlenstoff durch CO₂-Zertifikate vergütet wird.

AHP analysiert im Rahmen des Projekts ‚Green Carbon‘ die gesamte Prozesskette auf ihren wirtschaftlichen Wert. Betrachtet man die gesamte Wertschöpfungskette vom Algenwachstum bis zum endgültigen Baustoff basierend auf Carbon und Granit, so kann mit neuen Baumaterialien nach den bisherigen Berechnungen genauso wirtschaftlich gebaut werden, wie mit den heute üblichen CO₂-intensiven Materialien..

Die ersten Bruchversuche mit Doppel-T-Trägern aus CFS geben Hinweis auf ein zweifach besseres Verhältnis von Traglast zum Gesamtgewicht im Vergleich zu Stahl. Da die Traglast durch einfache Verklebung von Zusatzlamellen aus CFS ohne großen Aufwand verdoppelt werden kann, ist es möglich, anfängliche Effizienzdefizite am Front-End durch einfache technische Optimierung am Back-End ohne große Kosten auszugleichen. Als nächstes muss das Brandschutzverhalten geprüft werden, welches im Rahmen des ‚Green Carbon‘-Projektes noch nicht Untersuchungsgegenstand ist.

Ein weiterer Aspekt, der im Rahmen des Projekts ‚Green Carbon‘ analysiert wird, ist die massive Speicherung von Kohlenstoff in fester Form, sobald im Bausektor Kohlefasern zum Ersatz von Stahl verwendet werden. Stammt das CO₂ aus der Atmosphäre, kann der gesamte Prozess unter geeigneten Rahmenbedingungen CO₂-negativ werden, sofern die Faser am Ende ihres Lebenszyklus nicht verbrannt, sondern für immer sicher gespeichert wird. Nur, wenn der Kohlenstoff auch langfristig über mehrere zehntausend Jahre gespeichert bleibt, ist es ernsthaft möglich, über so etwas wie CO₂-Negativität des Bauens insgesamt nachzudenken, was bedeutet, dass mehr CO₂ gebunden und damit klimaunschädlich gemacht, als im Zuge der Baustoffherstellung und -Nutzung emittiert wird.

Der IPCC-Sonderbericht über das 1,5 °C-Ziel (IPCC SR1.5 [2]) hat die ersten wissenschaftlichen Veröffentlichungen zur Untersuchung der grünen Kohlenstofffasern des ‚Green Carbon‘-Teams in Kapitel 4 des SR1.5 „Substitution und Zirkularität“ mit folgendem Kommentar erwähnt: „Optionen für die Substitution von Material und die Speicherung von CO₂ sind in der Entwicklung, beispielsweise die Verwendung von Algen und erneuerbaren Energien für die Kohlefaserproduktion, die zu einer Netto- CO₂-Senke werden könnten (Arnold et al., 2018 [3]).“

[2] Global warming of 1.5°C, An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C ...2019 P. 335 see: <https://www.ipcc.ch/>

[3] Arnold U., Brück T., de Palmenaer A., Kuse K. „Carbon Capture and Sustainable Utilization by Algal Polyacrylonitrile Fiber Production: Process Design, Techno-economic Analysis, and Climate Related Aspects“; Ind. Eng. Chem. Res. 2018, 57, 7922–7933 und: Arnold U., de Palmenaer A., Brück T., Kuse K. „Energy-Efficient Carbon Fiber Production with Concentrated Solar Power: Process Design and Techno-economic Analysis“; Ind. Eng. Chem. Res. 2018, 57, 7934–7945

Power-to-X-Plus

Zwar liegen diese Szenarien noch in der Zukunft, die prinzipielle Strategie schafft nun jedoch Raum für aktuelle Entwicklungen, wie der neuen Wasserstoff-Initiative der Bundesregierung, denn dieser Wasserstoff kann ebenfalls als Quelle von Acrylnitril und damit Carbonfasern dienen. Durch Kombination mit Produktionskapazitäten eines thermokatalytischen Power-to-X-Verfahrens können die biogenen Prozessrouten ergänzt beziehungsweise flexibilisiert werden und ermöglichen so einen kontinuierlichen Standortbetrieb in Deutschland oder Nordeuropa. Eine vernetzte Systemintegration öffnet die Verfahren für die synergistischen wirtschaftlichen und ökologischen Effekte der Kombination konventioneller thermochemischer Prozessrouten mit neuen biotechnologischen Verfahren.

Biodiesel als grüner Kraftstoff, Methanol und Propylen als grüne Grundchemikalien, sowie nachhaltig produzierte Carbonfasern sind je nach Prozess-Steuerung mögliche Produktauslässe einer H₂-gestützten Bioraffinerie („PtX-Plus“-Anlagenkonzept [4]). Erste Break-even-Analysen mit einem ökonomischen Grobmodell des PtX-Plus-Parks deuten darauf hin, dass der Wasserstoffproduzent einen kontinuierlichen Betrieb seiner kapitalintensiven Anlagen durchführen kann und eine Reduzierung des Wasserstoffpreises auf bis zu 1,20 EUR/kg möglich ist, wenn der Bezugspreis des Offshore-Windstroms auf die Stromgestehungskosten von ca. 0,1 EUR/kWh beschränkt würde. Der Sauerstoff wäre dabei zu einem Preis von etwa 0,6 EUR/kg intern zu verrechnen, was ungefähr dem einer O₂-Produktion mit einer Luftaufspaltungsanlage nach dem Linde-Verfahren entspricht. Die exakte ökonomische und ökologische Bewertung des PtX-Plus-Konzepts ist Gegenstand derzeitiger und künftiger Forschungsaktivitäten.

Die Produktdiversifizierung von PtX-Anlagen hin zu nachhaltigen Hochleistungsmaterialien und grünen Edukten für die Erzeugung grüner Produkte in bestehenden Chemieparks eröffnet auch neue Marktchancen für Betreiber bestehender Anlagen und kann damit zur Dekarbonisierung der Chemie- und Baustoffindustrie in Deutschland und in der EU beitragen.

Prof. Dr. Uwe Arnold
Prof. Dr. Thomas Brück
Kolja Kuse



© FOTO-UTECH

v.l.n.r.: Kolja Kuse (TechnoCarbonTechnologies, München), Prof. Dr. Thomas Brück (Werner Siemens Lehrstuhl für Synthetische Biotechnologie, TU München) und Prof. Dr. Uwe Arnold (AHP GmbH & Co. KG, Berlin)“

[4] Arnold, U.; Brück, T., Battenberg, A.: Mehr Wertschöpfung mit Power-to-X-Plus - Ein flexibler Verbund nutzt Wasserstoff für eine nachhaltige Chemie; CHEManager 4/2020, S. 11