

# Graue Emissionen im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien

Die menschengemachten CO<sub>2</sub>-Emissionen sind weiterhin viel zu hoch, um die 2015 im Pariser Klimaabkommen gesetzten Ziele – nämlich eine Beschränkung der Erderwärmung auf 1,5°C im Vergleich zum vorindustriellen Zeitraum – zu erreichen. Das Bauwesen spielt dabei eine besondere Rolle, denn es ist anteilig der größte Emittent des klimaschädlichen Gases CO<sub>2</sub>. Der vorliegende Aufsatz untersucht deshalb Umfang und Reduktionspotenzial der grauen Emissionen, die für Herstellung, Einbau und Abbruch von tragwerksrelevanten Bauelementen in Deutschland entstehen. Ziel ist es hierbei, einzuhaltende Grenzwerte aufzuzeigen und zu erläutern, welche Maßnahmen bereits in frühen Planungsphasen eine deutliche Reduktion der grauen Emissionen möglich machen.

**Stichworte** Graue Emissionen; Nachhaltigkeit; Bauwesen; CO<sub>2</sub>-Budget

## 1 Grundlagen

### 1.1 Aktuelles Emissionsgeschehen und globale Zielsetzungen zur Reduktion von Emissionen

Die Auswirkungen des Bauwesens auf Umwelt und Klima unseres Planeten sind in ihrer Komplexität nur schwer zu erfassen. Einige der wichtigsten zu berücksichtigenden Überlegungen werden von den Autoren an anderer Stelle bereits ausführlich behandelt [1–4]. Im Folgenden sollen lediglich die direkten Beziehungen zwischen globalen Emissionen, dem Bauwesen und der Zielsetzung des Pariser Klimaabkommens in den Fokus gerückt werden.

Ende 2015 einigte sich die internationale Staatengemeinschaft in Paris darauf, die Erderwärmung im Vergleich zur vorindustriellen Zeit möglichst auf weniger als 1,5°C zu begrenzen. Ein wesentlicher Treiber der Erderwärmung ist das klimaschädliche, geruchlose Gas CO<sub>2</sub>. Um konkrete Ziele und Grenzwerte für Deutschland definieren zu können, kalkulierte der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) zuletzt 2020 in seinem Umweltgutachten das CO<sub>2</sub>-Restbudget Deutschlands. Für ein Erreichen des 1,5°-Ziels mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% kann Deutschland im Zeitraum 2020–2050 noch 4,2 Gt (1 Gt = 1 Mrd. t) CO<sub>2</sub> emittieren [5]. Dies entspricht einem Anteil der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen von 1% und widerspiegelt in etwa den Bevölkerungsanteil Deutschlands. Aktuell emittiert die Bundesrepublik jedoch knapp 2% der globalen Emissionen [6].

Bei den nachfolgenden Berechnungen sind die Autoren von einem noch verfügbaren deutschen CO<sub>2</sub>-Budget von

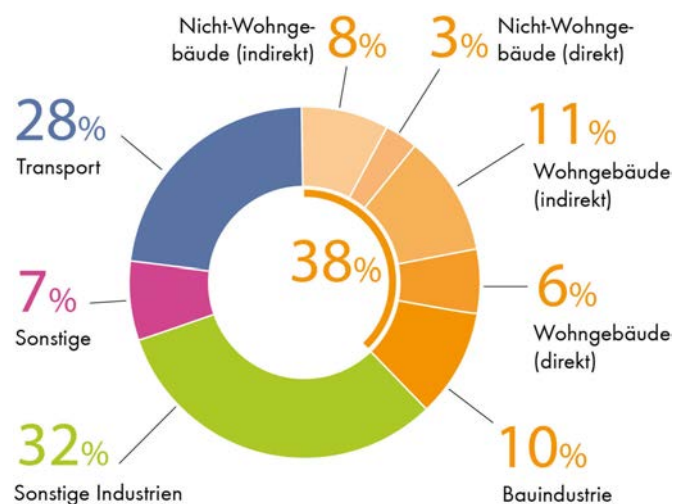
### Embodied emissions in the building sector

The global, manmade CO<sub>2</sub>-emissions remain on a high level. Too high to meet the objectives that were set in the Paris agreement on climate change in 2015. Reducing the global warming to 1,5°C compared to preindustrial times seems to be a hopeless endeavor. When it comes to a sustainable future, the building industry is the most critical sector since it emits the most climate harming CO<sub>2</sub>-emissions. In this paper we address the embodied emissions that occur with production, implementation and disassembly of construction materials in Germany. It is shown what limits must not be overtaken and which manners enable a reduction of emissions in early planning phases.

**Keywords** embodied emissions; sustainability; construction; CO<sub>2</sub> budget

3,4 Gt CO<sub>2</sub> bis zum Jahr 2050 ausgegangen, um den zeitlichen Versatz zum Ausgangspunkt der SRU-Kalkulationen abzubilden. Hierbei sei explizit darauf hingewiesen, dass in den ersten 15 Monaten des Zeitraums 2020–2050 (= 4% des betrachteten Zeitraums) bereits 0,8 Gt bzw. 19% des ursprünglichen deutschen CO<sub>2</sub>-Budgets von 4,2 Gt verbraucht worden sind.

Die Bedeutung des Bauwesens für ein Erreichen der Klimaziele ist enorm. Laut einem Bericht der International Energy Agency (IEA) sind Gebäude weltweit zurzeit für 38% der CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich (Bild 1) [7].



**Bild 1** Verteilung der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen, Stand 2019, erstellt nach [7]  
Distribution of global CO<sub>2</sub> emissions

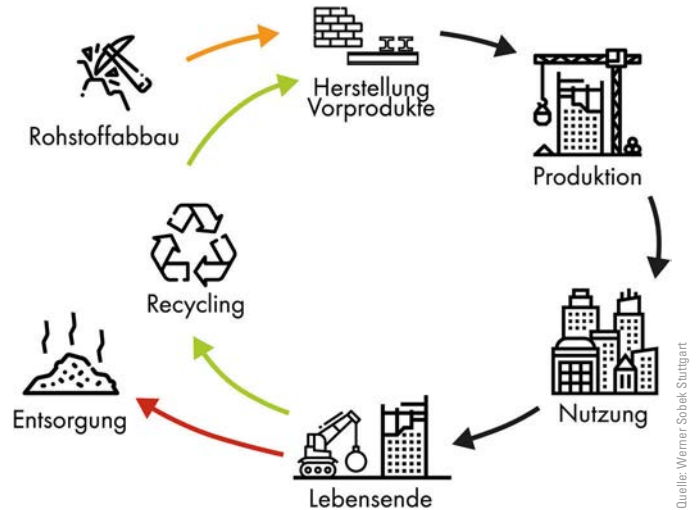
Die CO<sub>2</sub>-Emissionen werden zum größten Teil (28%) indirekt und direkt für den Betrieb der Gebäude, durch Verbrennungsprozesse zur Deckung des Elektrizitäts-, Heiz- und Kühlenergiebedarfs verursacht und zum anderen durch den Bau und die Herstellung von Baumaterialien (10%). Auch für den Transport von Baumaterialien fallen Emissionen an; diese werden aber in der Regel dem Transportsektor zugerechnet. Die von der IEA angesetzten Emissionen berücksichtigen auch keine Abbruchmaßnahmen oder Infrastrukturbauten, wie z. B. Straßen oder Brücken. Es kann bzw. muss also davon ausgegangen werden, dass der tatsächliche Anteil des Bauschaffens an den globalen Emissionen noch deutlich größer ist als bisher angenommen. Nach Ansicht der Autoren kann der Anteil des gesamten Bauwesens auf mindestens 50% der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen geschätzt werden.

## 1.2 Graue Emissionen im Bauwesen

Mit Erlass des Energieeinspargesetzes im Jahr 1976 wurde im damaligen West-Deutschland der Grundstein für die Reduktion von energiebedingten Emissionen der Gebäude gelegt [8]. Darauf aufbauend entstanden unter anderem die Wärmeschutzverordnung, die Energieeinsparverordnung und zuletzt das Ende 2020 in Kraft getretene Gebäudeenergiegesetz. Durch diese verschärften Regelungen ist es gelungen, den rechnerischen Primärenergiebedarf von Gebäuden im Betrieb zu begrenzen. Es gilt jedoch zu beachten, dass zwar die relative Endenergieintensität pro m<sup>2</sup> zwischen 1990 und 2018 um 28% abgenommen hat, die Wohnfläche pro Person hingegen um 35,7% angestiegen ist und so der absolute Endenergieverbrauch im selben Zeitraum nur um 2,6% reduziert werden konnte [9]. Für die Speicherung und Nutzung von Energie sollen gemäß dem Pariser Klimaabkommen spätestens ab 2050 ausschließlich emissionsneutrale Energieträger genutzt werden. Hierdurch werden die energiebedingten Emissionen sukzessive auf null minimiert. Wie in Abschn. 1.1 erwähnt, gibt es aber auch solche Emissionen, die für den Abbau von Baustoffen, den Bau, die Instandhaltung und den Abbruch von Gebäuden und Infrastrukturbauten anfallen – diese Emissionen werden als graue Emissionen (Bild 2) bezeichnet. Auch hier resultiert ein Anteil aus der Energiebereitstellung der Produktionsprozesse, beinhaltet jedoch auch prozessbedingte Emissionen (vgl. Abschn. 2.4). Die folgenden Betrachtungen beziehen sich allein auf diese grauen Emissionen, die für deutsche Hochbautätigkeiten entstehen.

## 1.3 CO<sub>2</sub>-Budget des Bauwesens bis 2050

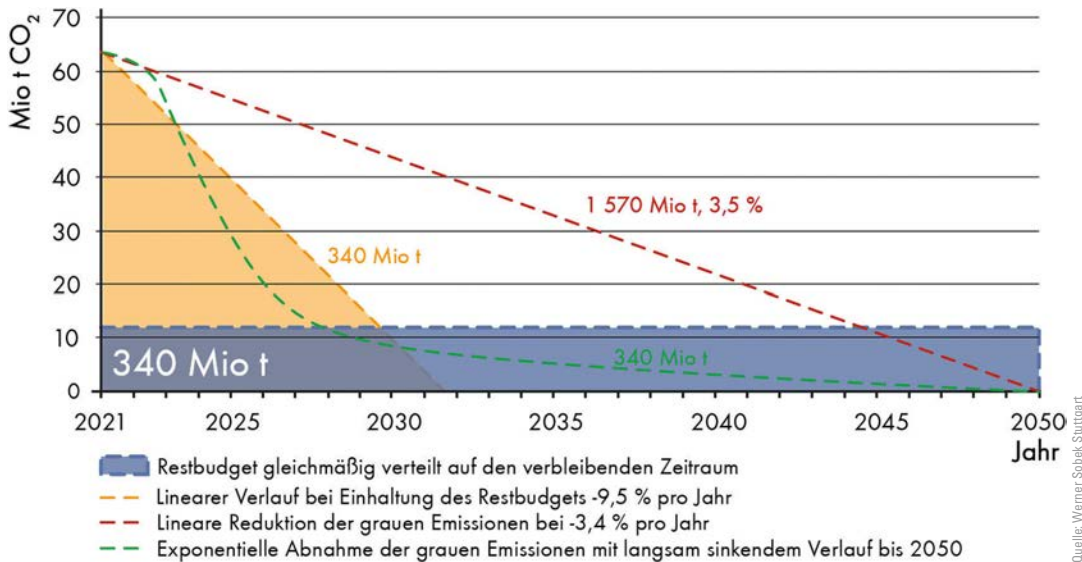
Bei Übertragung des globalen Anteils der grauen Emissionen im Hochbau auf Deutschland steht für die Hochbautätigkeiten ein CO<sub>2</sub>-Budget von 340 Mio. t CO<sub>2</sub> (= 10% des verbleibenden Gesamtbudgets) zur Verfügung. Für jedes der folgenden 29 Jahre sind damit rein rechnerisch 11,7 Mio. t CO<sub>2</sub> verfügbar – bislang liegt der entsprechende Wert aber bei durchschnittlich ca. 64,4 Mio. t CO<sub>2</sub> pro



**Bild 2** Berücksichtigte Lebenszyklusphasen von grauen Emissionen zuzüglich der jeweils anfallenden Transportemissionen zwischen den Phasen  
Included lifecycle stages of embodied emissions additional to the respective transport emissions between the stages

Jahr (= 10% der CO<sub>2</sub>-Emissionen Deutschlands 2020, [10]). Die Verteilung erfolgt bei dieser Hochrechnung phänomenologisch für jedes Jahr im selben Maße. Bild 3 zeigt drei weitere Entwicklungsszenarien. Der gleichmäßigen Verteilung gegenüber steht ein linearer Verlauf bei einer Abnahmerate der grauen Emissionen von 9,5% pro Jahr (gelber Graph). Demzufolge müsste der deutsche Hochbau ab der zweiten Hälfte des Jahres 2031 absolut CO<sub>2</sub>-neutral sein, um das Restbudget einzuhalten. Ob CO<sub>2</sub>-Neutralität im Bauwesen durch den Anteil der prozessbedingten Emissionen erreicht werden kann, z. B. durch Carbon Capture and Storage, bleibt an anderer Stelle zu diskutieren. Eine rein lineare Reduktion der grauen Emissionen bis 2050 entspricht einer Abnahmequote von 3,4% pro Jahr und resultiert in einer Überstrapazierung des zugeteilten Budgets um das 4,6-Fache. Der grüne Kurvenverlauf bedeutet einen ab ca. 2023 exponentiell fallenden Verlauf der grauen Emissionen, welcher ein wünschenswertes Szenario darstellt, da er sich bis 2050 einer CO<sub>2</sub>-Neutralität annähert und damit ebenfalls innerhalb des verfügbaren Restbudgets verläuft.

Ein Anhaltspunkt für die Bauaktivität des Hochbaus in Deutschland stellt das umbaute Bauvolumen (in m<sup>3</sup>) dar, da es die verlässlichste Größe unabhängig von unterschiedlichen Geschosshöhen darstellt. Im Jahr 2019 wurden Baugenehmigungen für 140.472.000 m<sup>3</sup> Wohngebäude und für 223.072.000 m<sup>3</sup> Nichtwohngebäude erteilt [11]. Das gesamte Neubauvolumen umfasste damit eine Summe von 363.544.000 m<sup>3</sup>. Anhand des umbauten Raums (BRI) lässt sich nun ein Richtwert für eine klimakompatible CO<sub>2</sub>-Vorgabe berechnen. Aus der Kalkulation 11.700 Mio. kg CO<sub>2</sub>/363,544 Mio. m<sup>3</sup> resultieren 32,2 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> BRI als Obergrenze der erlaubten grauen Emissionen für jeden Neubau, unter der Annahme, dass sich die Bauaktivitäten kongruent zu 2019 verhalten. Dieser Grenzwert gilt für Industriebauten gleichermaßen wie für Bürogebäude. Zu beachten ist, dass Maßnahmen für



**Bild 3** Mögliche Szenarien zur Reduktion der grauen Emissionen im Hochbau  
Possible scenarios for the reduction of German embodied emissions of buildings

eine energetische Sanierung des Bestands darin nicht enthalten sind und separat betrachtet werden müssen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die durch Sanierung erzeugten Einsparungen im Gebäudebetrieb die grauen Emissionen für die Dämmmaterialien abdecken.

## 2 Strategien zur Verringerung der grauen Emissionen im Bauwesen

### 2.1 Grundlagen

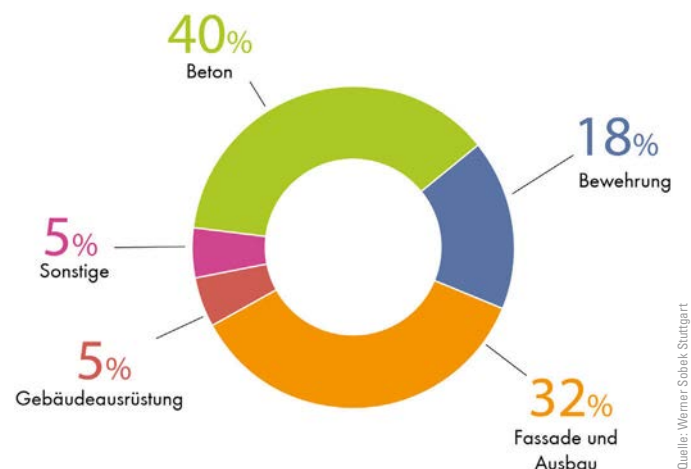
Die grauen Emissionen eines Gebäudes verteilen sich auf das Tragwerk, den baukonstruktiven und technischen Ausbau und die Fassade (Bild 4). Je nach Gebäudetypologie kommt der Tragkonstruktion bei Massivbauten mit einem Anteil von 50–70% der gesamten grauen Emissionen eine besonders wichtige Rolle zu. Folglich liegt auch hier das größte Optimierungspotenzial. In Abschn. 2 wird dargelegt, mit welchen Strategien die grauen Emissionen der Tragkonstruktion reduziert werden können.

### 2.2 Vorhandene Bausubstanz

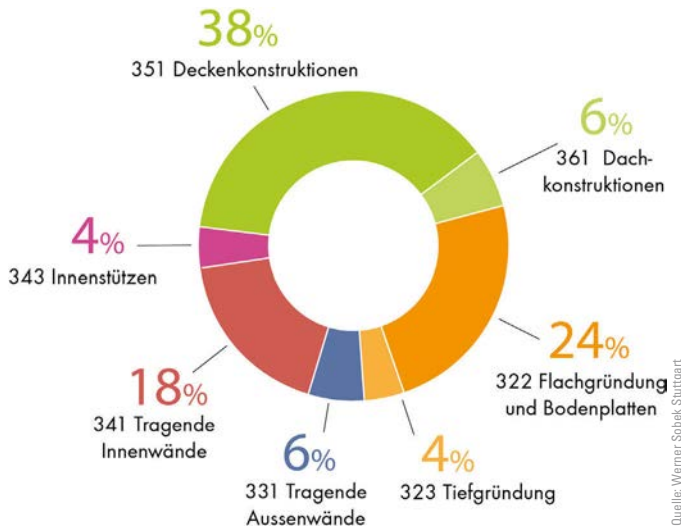
Bevor ein Neubau geplant wird, sollte erst die Frage beantwortet werden, ob vorhandene Bausubstanz weiterverwendet werden kann. Auf die Notwendigkeit der Wiederverwertung von Baustoffen wird an anderer Stelle eingegangen (z. B. in [12]). In Deutschland sind aktuell 6,6 Mio. m<sup>2</sup> MFG (Mietfläche für gewerblichen Raum) an Bürofläche vakant [13] und auch bei Wohnräumen wird bis 2050 ein Leerstand von 3 Mio. Wohneinheiten prognostiziert [14]. Langlebige Baumaterialien, wie z. B. Stahlbeton, können mehrere Jahrhunderte ohne signifikante baukonstruktive Einbußen überstehen. Aufgrund veränderter Besitzverhältnisse oder Nutzeranforderungen erreichen diese Strukturen ihr wirtschaftliches Lebensende allerdings oft deutlich vor ihrem funktionalen

Lebensende. Umnutzungen nach umfassenden Sanierungen gestalten sich zumindest nach aktuellem Stand mit vergleichsweise günstigen Stahl- und Betonpreisen als finanziell aufwendiger als ein Abbruch und vollständiger Neubau.

In welchem Maße sich eine Weiternutzung positiv auf die grauen Emissionen auswirken kann, zeigt das rechnerische Beispiel eines in der Planung befindlichen Projekts in der Wiener Innenstadt mit ca. 80.000 m<sup>2</sup> BGF. Durch die Weiterverwendung bestehender Bausubstanz und eine Sanierung mit nachverdichtender Aufstockung können im projektspezifischen Vergleich zu einem Abbruch-und-Neubau-Szenario über 18.500 t CO<sub>2</sub>-Äq. sowie 132.000 t Rohstoffe für die Stahlbetonstruktur eingespart werden. Darüber hinaus ergeben sich auch Vorteile für die innerstädtische Nachbarschaft durch Reduzierung der Bauzeit, Lärm sowie Staub und die Vermeidung von mehr als 20.000 Lkw-Fahrten, die durch den Abtransport des Bestands notwendig geworden wären. Die Einheit



**Bild 4** Typische prozentuale Verteilung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in einem Gebäude in Massivbauweise  
Typical distribution of CO<sub>2</sub>-emissions in a building in solid construction



**Bild 5** Einfluss auf die tragwerksbedingten Emissionen je Kostengruppe anhand eines dreistöckigen Beispielgebäudes  
Influences per cost group on embodied, structural emissions of a 3-storey building

CO<sub>2</sub>-Äq. beschreibt das globale Erwärmungspotenzial und beinhaltet die Umrechnung der wichtigsten Treibhausgase unter Berücksichtigung ihrer Halbwertszeit und Klimaschädigung in CO<sub>2</sub>. Im Bauwesen ist der Anteil der anderen Treibhausgase jedoch vernachlässigbar gering.

### 2.3 Bauteiloptimierung

Bei Neubauten verteilen sich die tragwerksbedingten grauen Emissionen in unterschiedlichem Umfang auf die einzelnen Kostengruppen (Bild 5). Ein Vergleich gebauter Projekte zeigt, dass der Einfluss der Geschossdecken mit zunehmender Gebäudehöhe ansteigt [15] und einen Anteil von bis zu 50–65 % der tragwerksbedingten Emissionen erreichen kann. Bislang ist die Stahlbetonflachdecke das meistverwendete Deckensystem. Obwohl sie kein materialoptimiertes System darstellt, befördern der geringe Arbeitsaufwand für Bewehrungs- und Schalungsarbeiten die einfache Herstellung sowie die simple Integration von TGA-Elementen und eine geringe Aufbauhöhe die Verwendung.

Eine Möglichkeit zur Reduktion des Materialverbrauchs von Flachdecken ist das Einbringen von Hohlräumen in jene Bereiche des Bauteils, die statisch nicht voll ausgenutzt sind. Um im Sinne einer sortenreinen Ausführung von Betondecken auf Kunststoffkörper zu verzichten und um infolge verdichteter Packung den Hohlraumanteil zu erhöhen, entwickelte Werner Sobek die Technologie des Gradientenbetons [16]. Bei diesem können die Hohlräume wesentlich präziser an die Deckenauslastung angepasst werden; darüber hinaus können auch biaxiale Spannungsverläufe abgebildet werden. Hierdurch lassen sich bis zu 50 % der bisher für ein Deckenbauteil gleicher Größe und Leistungsfähigkeit verwendeten Betonmasse in den Decken einsparen. Zusammen mit Folgereduktionen durch schlankere vertikale Lastabtragungselemente

und geringere Mengen an Bewehrungsstahl lassen sich so allein durch Optimierung der Deckensysteme bis zu 20 % der tragwerksbedingten Emissionen eines Gebäudes einsparen. Im Vergleich zu den marktüblichen Hohlkörpern aus Kunststoff werden bei Gradientenbeton die Hohlkörper aus mineralischen Werkstoffen hergestellt und sind sortenrein rezyklierbar.

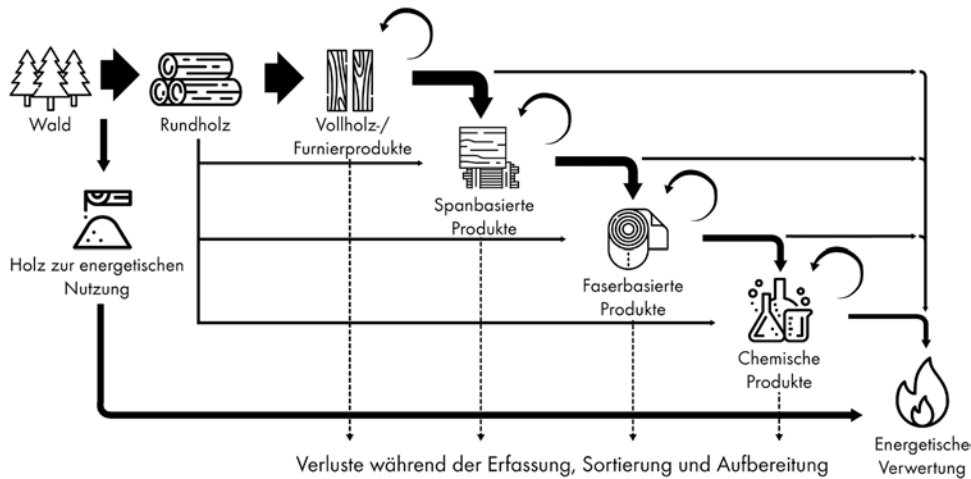
### 2.4 Holz

Im Gegensatz zu anderen konventionellen Baustoffen bindet Holz vor seiner Verwendung als Baumaterial Kohlenstoff, denn ein Baum besteht zu ca. 50 % aus reinem Kohlenstoff. Besonders in Kombination mit Beton lassen sich die positiven Eigenschaften beider Materialien optimal nutzen; schallschutztechnische und bauphysikalische Aspekte eines Gebäudes können so verbessert werden. Bei der Betrachtung der Emissionsbilanz von Holz sind die Faktoren der Herkunft, der Transportdistanz und der Verarbeitungsart ausschlaggebend und müssen gezielt betrachtet werden [17]. Die Wiederverwendbarkeit von Holzbauteilen spielt ebenfalls eine besonders wichtige Rolle in Bezug auf die Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Bauwesens. Während der Nutzung eines Gebäudes gelten die Holzbauteile als Kohlenstoffspeicher. Nach dem Rückbau sieht das heutige Szenario oftmals eine Verbrennung der Bauteile zur Energiegewinnung vor, da die Bauteile weder selektiv zurückgebaut noch auf Schadstoffe aus Holzschutzmitteln geprüft werden. Diese Prozesse müssen sich zukünftig u. a. durch die Anpassung der Normen radikal ändern. Holzbauteile könnten dank einer hohen Dauerhaftigkeit bei entsprechenden Rahmenbedingungen nach Rückbau problemlos als Bauteil wiederverwendet werden. Sollte dies nicht möglich sein, kann eine stoffliche Verwertung in Form von spanbasierten Produkten stattfinden. Wie eine möglichst umweltschonende Nutzung von Holz gestaltet werden kann, zeigt Bild 6.

Wachsen während der Nutzungsphase mehr Bäume nach, können Gebäude zu einer CO<sub>2</sub>-Sequestrierung beitragen. Ein solcher Kreislauf setzt eine nachhaltige Forstwirtschaft voraus. Es muss berücksichtigt werden, dass nach Entnahme des Holzes aus dem Wald die Speicherkapazität des Waldes zunächst deutlich abnimmt. Die aufgeforsteten jungen Bäume können erst nach mehreren Jahren die gleichen Mengen an Kohlenstoff speichern wie die alten Bäume, die für die Verwendung als Baumaterial gefällt wurden. Darüber hinaus gilt es zu beachten, dass natürlich gewachsene Wälder bis zu 40 mal mehr Kohlenstoff speichern als monokulturelle Plantagenwälder [19]. Bei der Wiederaufforstung sollte deshalb auf Biodiversität geachtet werden.

### 2.5 Beton

Im Verlauf des 20. Jahrhunderts entwickelte sich der Baustoff Beton aufgrund seiner bewährten Dauerhaftigkeit



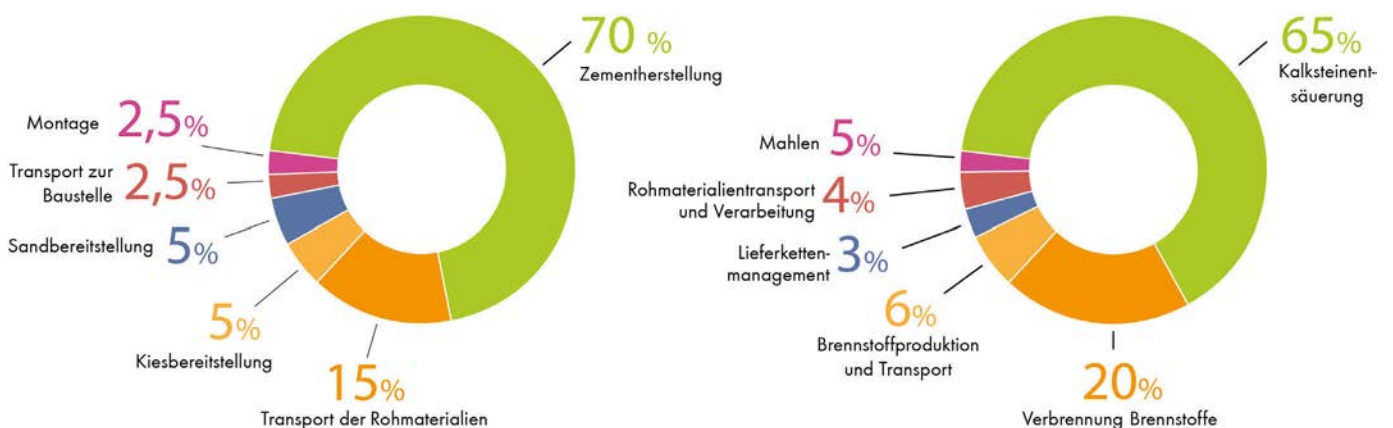
**Bild 6** Holzkaskade, erstellt nach [18]  
Timber cascade

und beliebigen Formbarkeit zum weltweit meistverbrauchten Baustoff. Die Herstellung von Zement und damit verbundene prozessbedingte Emissionen sind maßgeblich für die schlechte CO<sub>2</sub>-Bilanz von Beton verantwortlich. Durch Maßnahmen wie den Einsatz effizienter Öfen und alternativer Brennstoffe, die Verbesserung der Filteranlagen und die Senkung des Klinkergehalts im Zement konnten die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Zementindustrie in den vergangenen Jahren bereits um 20–25% gesenkt werden [20]. Hochofenzemente (CEM III) mit einem Klinkeranteil von 20–34% weisen gegenüber dem Durchschnittszement in Deutschland (mit einem Klinkeranteil von 74%, [21]) eine um 50% verbesserte CO<sub>2</sub>-Bilanz je Tonne Zement auf. Die Verfügbarkeit der für CEM III benötigten Substitutionsstoffe Hüttensand und Flugasche ist in Zukunft aber nicht mehr bzw. nur noch in geringem Umfang gegeben, da beide Stoffe Nebenprodukte der Kohle- und Stahlindustrie sind. Sobald die Kohlekraftwerke abgeschaltet sind und die Produktion der Stahlindustrie auf wasserstoffbasierte Technologien umgestellt ist (vgl. Abschn. 2.5), entfallen diese Nebenprodukte. Alternative Forschungen zu Zementen aus kalziniertem Ton oder Magnesiumsilikaten könnten weitere Veränderungen im Industriezweig bringen. Grundlage einer Anwendbarkeit bildet vor allem eine Umgestaltung der gülti-

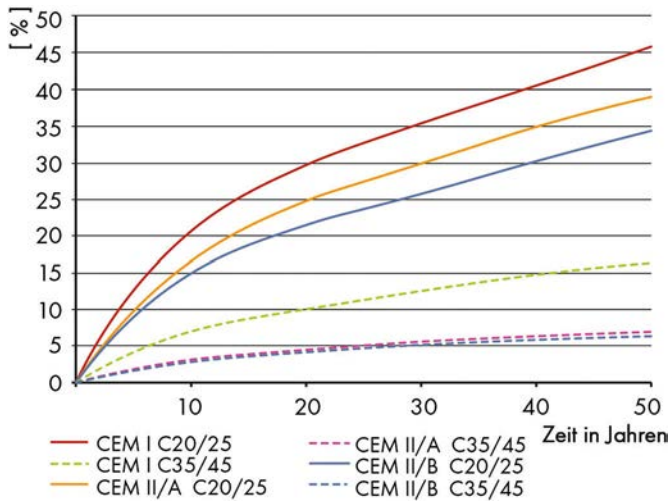
gen Normen, nach denen Portlandklinker bislang als zwingender Bestandteil von Zement gilt [22]. Bild 7 zeigt die Verteilung der CO<sub>2</sub>-Emissionen je 1 m<sup>3</sup> Beton und eines Sacks Zement auf [23].

Daraus wird deutlich, dass der Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung kaum Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Beton bzw. des damit errichteten Gebäudes hat. Die Bereitstellung der Zuschläge liegt in Summe anteilig bei 10% der Emissionen eines m<sup>3</sup> Beton. Beim Rückbau eines Gebäudes muss sowohl die Zerkleinerung als auch die Sortierung des Abbruchmaterials berücksichtigt werden, sodass sich für die grauen Emissionen keine nennenswerten Vorteile gegenüber der Primärkiesbereitstellung ergeben.

Eine entscheidende Einflussgröße bei dieser Bewertung ist die Transportdistanz zwischen den prozessbeteiligten Abbruch-, Verarbeitungs- und Einbauorten. Sofern diese maßgeblich kürzer ist als die der Primärrohstoffe, ist auch mit einer Emissionseinsparung zu rechnen [24]. Einen deutlichen Vorteil bieten der Einsatz von RC-Beton für die Ressourcenschonung und die Einhaltung einer Kreislaufwirtschaft im Bausektor. Während seiner Nutzungszeit kann der Beton in Abhängigkeit von den Umge-

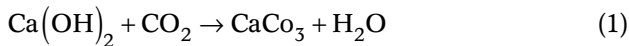


**Bild 7** CO<sub>2</sub>-Emissionen links: für 1 m<sup>3</sup> Beton, rechts: je Sack Zement, erstellt nach [23]  
CO<sub>2</sub>-emissions left: for 1 m<sup>3</sup> of concrete, right: per bag of cement



**Bild 8** Verhältnis von CO<sub>2</sub>-Absorption zu CO<sub>2</sub>-Emissionen der Module A1–A3 je Betongüte  
Ratio of CO<sub>2</sub> absorption to CO<sub>2</sub> emissions of modules A1–A3 per concrete grade

bedingungen und der Druckfestigkeit durch Karbonatisierung mit der Reaktionsgleichung

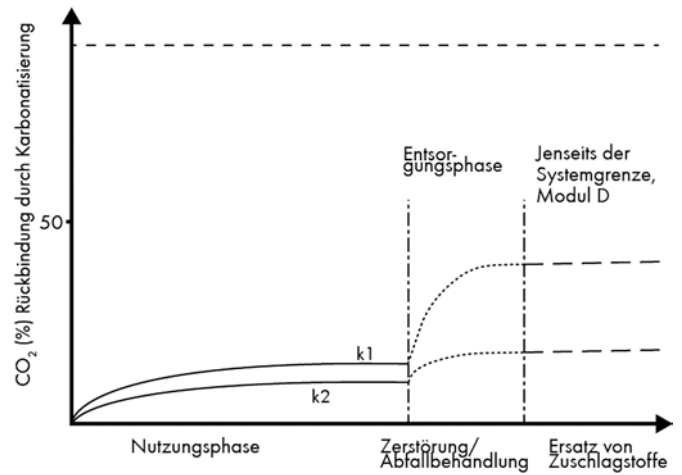


CO<sub>2</sub> aus der Luft absorbieren. Basierend auf [25] wurden die möglichen CO<sub>2</sub>-Absorptionsgrade am Beispiel einer vorgehängten hinterlüfteten Betonfassade für verschiedene Betongüten und Zementarten ermittelt und mit den Emissionswerten aus den Umweltproduktdeklarationen von Beton verglichen. Demnach ergibt sich eine maximale Rückgewinnung der durch die Herstellungsphase (A1–A3) erzeugten CO<sub>2</sub>-Emissionen von 46% mit C20/25 und CEM I. Dieser Prozess erstreckt sich über die ange-setzte Nutzungsdauer von 50 Jahren und nimmt mit Veränderung der Zementart und Erhöhung der Betongüte, wie Bild 8 zeigt, rapide ab. Der Karbonatisierungsprozess bei den zuvor genannten CO<sub>2</sub>-reduzierten Zementen mit hohem Hüttensandanteil ist vernachlässigbar gering.

Nach dem Rückbau eines Gebäudes und der Zerkleinerung des Abbruchmaterials nimmt das Verhältnis von Betonoberfläche zu -volumen schlagartig zu, sodass ein deutlicher Anstieg der CO<sub>2</sub>-Rückgewinnung stattfindet (Bild 9). Dieser zeitliche Abschnitt lässt sich jedoch mit den in der Norm [25] gegebenen Formeln nicht nachvollziehen. Er hängt maßgeblich davon ab, wie lange das Abbruchmaterial der Außenluft ausgesetzt ist. Theoretisch bietet RC-Beton zusätzlich zu den potenziell geringeren Transportaufwendungen damit noch einen weiteren Vorteil in Hinblick auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen, denn die Zuschläge nehmen vor Wiederverwertung CO<sub>2</sub> auf. Der Anteil lässt sich jedoch aufgrund vieler Unbekannter schwer beziffern.

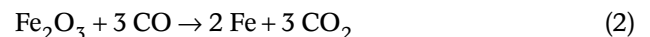
## 2.6 Stahl

Bei der Herstellung von Bewehrungsstahl entstehen ca. 30–40% der Emissionen eines Stahlbetongebäudes. Be-

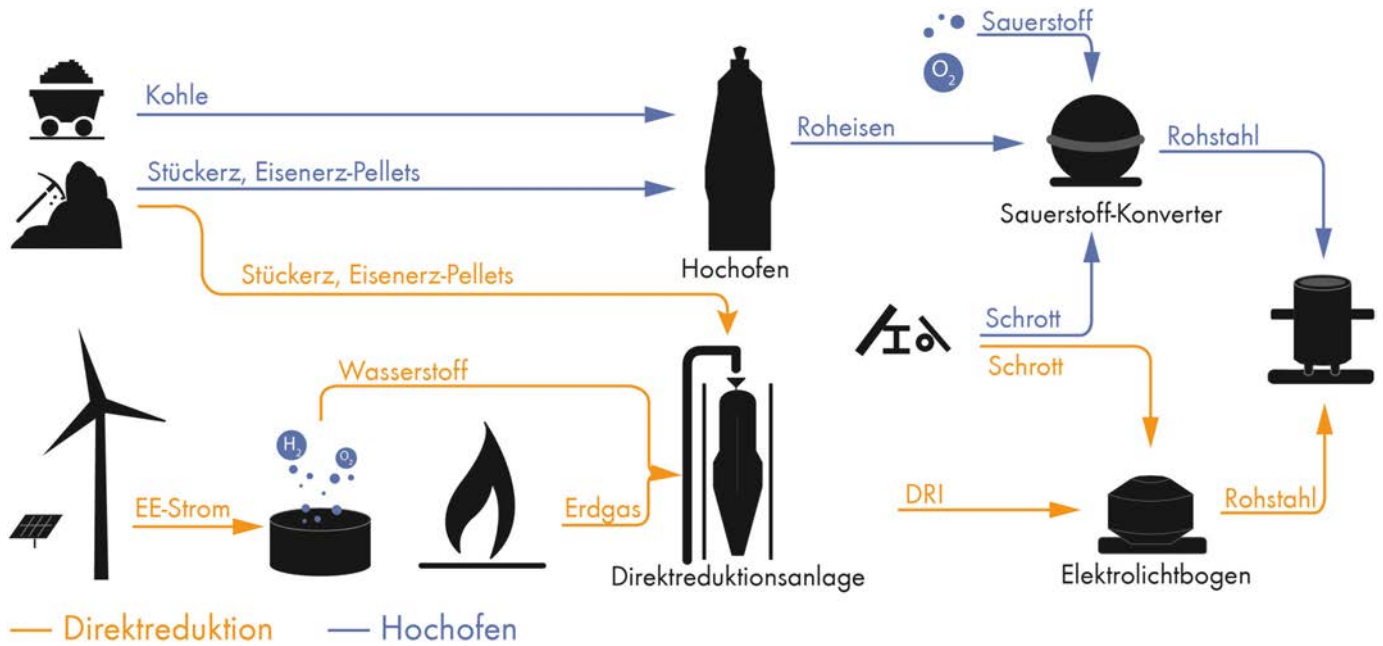


**Bild 9** Karbonatisierung von Beton, erstellt nach DIN EN 16757  
Carbonation in concrete

wehrungsstahl wird in Deutschland aus bis zu 100% Sekundärstahl (Stahlschrott) durch Einschmelzen im Elektroofen hergestellt. Dadurch sind lediglich die Emissionen zu berücksichtigen, die beim Aufschmelzen des Schrotts, der Weiterverarbeitung zu Stäben oder Matten und dem Transport entstehen. Sobald auch bei der Bewehrungsstahlproduktion ausschließlich Energie von emissionsneutralen Trägern verwendet wird, entfallen zumindest die Emissionen für den Schmelzvorgang. Bei der Produktion von Baustahl werden deutschlandweit durchschnittlich ca. 74% Sekundärstahl eingesetzt [26]. Ähnlich der Zementherstellung fallen bei der Baustahlproduktion prozessbedingte Emissionen an. Im Hochofen reagiert das eingebrachte Eisenoxid bei Temperaturen von über 1200°C mit dem aus der Verbrennung von Koks entstehenden Kohlenmonoxid. Es entsteht Roheisen und (als Nebenprodukt) CO<sub>2</sub>. Die Wirkung des Kohlenstoffmonoxids als Reduktionsmittel auf das Eisenerz wird aus der folgenden chemischen Formel deutlich:



Seit einigen Jahren gibt es intensive Bestrebungen der Stahlindustrie, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß bei der Stahlproduktion zu minimieren. Ein Alternativerfahren zum Hochofen ist die Direktreduktion im Elektrostahlwerk (Bild 10). Als Reduktionsmittel wird Erdgas verwendet. Dieses reagiert mit Roheisen zu Kohlenstoff und Wasserstoff. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen werden so zwar auf etwa die Hälfte reduziert, sind aber immer noch prozessimmanent und selbst bei den effizientesten und im Wirkungsgrad optimierten Werken nicht zu vermeiden. Für die maximale Dekarbonisierung der Stahlindustrie wird eine wasserstoffbasierte Technologie verfolgt. Im Gegensatz zur Hochofenroute bindet der Wasserstoff den Sauerstoff des Erzes; es wird einzig Wasserdampf freigesetzt. Die Technologie erfordert gravierende Umrüstungen der Stahlwerke und birgt aktuell noch Schwierigkeiten in der ausreichenden Versorgung mit Wasserstoff. Ohne klare politische Vorgaben und wohl auch ohne zusätzliche Subventionen wird es



**Bild 10** Stahlherstellungsprozesse, erstellt nach Salzgitter AG  
Production process of steel

noch Jahrzehnte dauern, bis die Stahlindustrie nennenswerte Tonnagen CO<sub>2</sub>-neutral produziert.

## 2.7 Transportwege

Gemäß der DIN 14040 und 14044 werden jegliche Transporte der Baustoffe in die Erstellung der Ökobilanz einbezogen. Während die herstellungsinternen Transporte der Produktion (Modul A2) immer in den Umweltproduktdeklarationen deklariert werden, sind für den Transport zur Baustelle (A4) oftmals keine Kenndaten vorhanden. Die Wahl zum Ansatz der Transportkilometer vom Werk bis zur Baustelle obliegt damit dem/der Fachplaner\*in. Abhängig von den Hauptmaterialien der Baukonstruktion können die beim Baustellentransport verursachten Emissionen für 5–10% der Gesamtemissionen eines Gebäudes stehen. Im Rahmen von Zertifizierungssystemen, wie z. B. nach dem DGNB-Verfahren [27], werden die transportbedingten Emissionen in A4 nicht berücksichtigt, um die Benachteiligung verschiedener Unternehmen aufgrund ihrer Entfernung zu vermeiden. Korrekterweise gehören sie jedoch zur gesamtheitlichen Ökobilanzierung eines Gebäudes und sind vor allem bei Holzbaukonstruktionen ein maßgebender Faktor.

## 2.8 Berücksichtigung der grauen Emissionen während der Planung

Eine Auswertung unterschiedlicher Fallstudien zeigt, dass Konzepte zur bewussten Reduktion von grauen Emissionen zwingend von Beginn an in die Planungsprozesse eines Projekts integriert werden müssen. Bild 11 stellt die Handlungsanforderungen gegliedert nach Leistungsphasen (LPH) für eine emissionsoptimierte Planung dar. Wäh-

rend des Planungsprozesses können Tragwerksoptimierungen und -variantenvergleiche sowie eine konsequente Dokumentation der geplanten Gebäudematerialien und -massen zur gezielten Reduktion der grauen Emissionen beitragen. Beginnend in der LPH 2 sollten Bauteilkataloge geführt oder alternativ digitale Gebäudemodelle mit konkreten Volumina und abgeschätzten Bewehrungsmengen erstellt werden. Mithilfe digitaler Tools können Emissionen von Tragwerkskomponenten und ihren -varianten schnell und zielführend berechnet werden. Dadurch kann bereits in einem sehr frühen Stadium eine Näherung über die zu erwartenden Emissionen ermittelt werden. Die Aufstellung nach DIN 276 (erste Kategorie) ermöglicht es, die Bauteilgruppen zu identifizieren, die den größten Anteil an den grauen Emissionen haben.

Die während der Planung festgelegten Maßnahmen zur Reduktion der grauen Emissionen müssen in der Ausschreibung (LPH 6, 7) gezielt definiert werden. Darin können beispielsweise Obergrenzen für das Treibhausgaspotenzial je Materialeinheit oder für die Transportdistanz festgelegt werden. Die konkreten herstellereigenen Materialkennwerte zusammen mit der angewandten Verbindungstechnik, den Einbauorten und -mengen im Gebäude werden begleitend zu den LPH 7 und 8 in digitalen Materialausweisen dokumentiert. Somit ist der Wissenstransfer auch über mehrere Nutzergenerationen hinweg sichergestellt und erleichtert Wartung, Rückbau und Wiederverwendung bzw. -verwertung der Gebäudeteile.

## 3 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Aufsatz zeigt auf, dass fortan eine drastische Reduktion der grauen Emissionen auf max. 32,2 kg





- [13] ZIA, Zentraler Immobilien Ausschuss (2020) *Zahlen, Daten, Fakten: Büroimmobilien*. <https://www.zia-deutschland.de/marktdaten/zahlen-daten-fakten-bueroimmobilien/>. [Zugriff am 1. Mai 2021]
- [14] Waltersbacher M. et al (2020) *Künftige Wohnungsleerstände in Deutschland: regionale Besonderheiten und Auswirkungen*. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Berlin.
- [15] Berger T.; Prasser P., Reinke H. G. (2013) *Einsparung von Grauer Energie bei Hochhäusern* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 108, H. 6, S. 395–403. <https://doi.org/10.1002/best.201300019>
- [16] Sobek W. (2016) *Über die Gestaltung der Bauteilinnenräume* in: *Festschrift zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach*, Dresden, S. 62–76.
- [17] Sundermann W.; Götz T.; Roth K.-H.; Bathon L. (2020) *Alter Werkstoff mit hohem Potenzial – Bauen mit Holz* in: *Ingenieurbaukunst 2021*. Ernst und Sohn, Berlin, S. 164–175.
- [18] Umweltbundesamt (2020) *Potenziale von Bauen mit Holz*. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- [19] Lewis S.; Wheeler C.; Mitchard E.; Koch A. (2019) *Restoring natural forests is the best way to remove atmospheric carbon* in: *Nature* 568, pp 25–28.
- [20] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2020) *Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien*. VDZ, Düsseldorf.
- [21] Institut für Bauen und Umwelt e. V. (IBU) (ed) (2017) *Umwelt-Produktdeklaration Zement; Deklarationsnummer EPD-VDS-20170026-1AG1-DE*.
- [22] Lehne J.; Preston F. (2018) *Making Concrete Change – Innovation in Low-carbon Cement and Concrete*. Chatham House, The Royal Institute of International Affairs, London.
- [23] Habert G. et al. (2020) *Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries* in: *Nature Reviews Earth & Environment* 1, pp. 559–573.
- [24] Hinz H. (2018) *Kreishaus Ludwigsburg – Neue Wege beim Einsatz von Recyclingbeton* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 113, H. 6, S. 460–465. <https://doi.org/10.1002/best.201800011>
- [25] DIN EN 16757:2017-10 (2017), *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Produktkategorieregeln für Beton und Betonelemente*; Deutsche Fassung EN\_16757:2017. <https://doi.org/10.31030/2637764>
- [26] Ökobaudat (2021) *Prozess-Datensatz: Baustähle: Offene Walzprofile und Grobbleche (de)*. [https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uid=5cb2c568-76fe-4803-8b46-0084e79800c8&version=00.14.00&stock=OBD\\_2021\\_I&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uid=5cb2c568-76fe-4803-8b46-0084e79800c8&version=00.14.00&stock=OBD_2021_I&lang=de). [Zugriff am 2. Mai 2021]
- [27] DGNB (2018) *ENV1.1 Ökobilanz des Gebäudes*. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB), Stuttgart.
- [28] Sobek W. (2015) *Die elektrische Stadt*. Unveröffentlichte Rede anlässlich der Verleihung des Fritz-Leonhardt-Preises.
- [29] Forstbauer N. (2021) *Leichtbau-Experte Werner Sobek will Gebäudekreislaufgesetz: „Es ist ein Rennen gegen die Zeit“* in: *Stuttgarter Nachrichten*, Stuttgart.

#### Autorinnen und Autoren



Dr.-Ing. Stefanie Weidner (Korrespondenzautorin)  
stefanie.weidner@wernersobek.com  
Werner Sobek AG  
Albstraße 14  
70597 Stuttgart



Dipl.-Ing. Roland Bechmann  
roland.bechmann@wernersobek.com  
Werner Sobek AG  
Albstraße 14  
70597 Stuttgart



Dipl.-Ing. Alexandra Mrzigod  
alexandra.mrzigod@wernersobek.com  
Werner Sobek AG  
Albstraße 14  
70597 Stuttgart



Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing E.h. Dr. h.c. Werner Sobek  
werner.sobek@wernersobek.com  
Werner Sobek AG  
Albstraße 14  
70597 Stuttgart

#### Zitieren Sie diesen Beitrag

Weidner, S.; Mrzigod, A.; Bechmann, R.; Sobek, W. (2021) *Graue Emissionen im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien*. *Beton- und Stahlbetonbau* 116, H. 12, S. 969–977. <https://doi.org/10.1002/best.202100065>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 15. Juni 2021; angenommen: 23. August 2021.