

IAT Forschung aktuell

September 2023

DOI: <https://doi.org/10.53190/fa/202309>

Ausgabe 09/2023

Abriss, Neubau oder Sanierung - CO₂-Emissionen im Gebäudesektor

Nicht nur sparsamer, sondern auch weniger

Marius Angstmann & Stefan Gärtner



Auf den Punkt

- Zur Erreichung der Klimaschutzziele spielt der Gebäudesektor eine zentrale Rolle.
- Der Fokus hierbei darf nicht allein auf Effizienz in der Nutzungsphase liegen.
- Auch die Erstellung von Gebäuden trägt in hohem Maße zu CO₂-Emissionen bei.
- Ferner ist zu befürchten, dass neue Gebäude im Betrieb weniger effizient sind, als erwartet.
- Hinzu kommen andere Nachteile des Bauens, wie Flächenversiegelung und zunehmende Verkehrsströme, wenn die Gebäude in nicht integrierten Ortslagen errichtet werden.
- Daher stellen sich zwei Fragen: Wie kann Neubau reduziert werden? Wie kann Neubau weniger CO₂-intensiv erfolgen?
- So gilt es trotz technischer und organisatorischer Innovationen weniger zu bauen und weniger Wohn- und Arbeitsraum in Anspruch zu nehmen.

Inhalt

Auf den Punkt	1
1. Einleitung	3
2. Umweltauswirkungen des Baugewerbes	4
3. Embodied Carbon im Bausektor	4
4. Von allem weniger	8
4.1 <i>Weniger Emissionen durch den Einsatz von Sekundärmaterialien</i>	8
4.2 <i>Weniger Emissionen durch CO₂-Abscheidung</i>	12
4.3 <i>Weniger Zement in der Bauwirtschaft</i>	13
4.4 <i>Weniger Bauen</i>	13
5. Zusammenfassung	15
6. Literatur	16

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2: Lebenszyklusbetrachtung von Gebäuden.....	6
Abbildung 3: Aufkommen zentraler Sekundärprodukte für die Bauwirtschaft.....	10

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung der Unterschiede zwischen verkörperter und betrieblicher Energie und Kohlenstoff.....	5
--	---

Schlüsselwörter: Ressourceneffizienz, Sekundärmaterialien, Bauwirtschaft, Ab-risssmoratorium, Bauwende

1. Einleitung

Dass der Gebäudesektor (inkl. Erstellung und Nutzung) nicht nur eine zentrale ökonomische und soziale Rolle spielt, sondern aufgrund des Energieverbrauchs und der Emissionen, aber auch durch Flächenverbrauch, durch die Reduktion von Frischluftschneisen etc. eine zentrale Rolle für die Zukunftsfähigkeit der Welt spielt, steht außer Frage. Allerdings ist der öffentliche Diskurs noch immer stark auf die Gebäudenutzung und den damit verbundenen Energieverbrauch (Stichwort Heizungswende) fokussiert. Beim Neubau aufgewendete Energie, hierbei verursachte CO₂-Emissionen sowie Flächenversiegelung werden nur selten betrachtet. Dort, wo sie in den Blick geraten, werden meist Innovationen, wie ressourceneffiziente Materialien oder kreislauffähige Bauprodukte, als Ansätze genannt, um die Auswirkungen von Neubauten zu reduzieren. Ansätze, die darauf abzielen, Gebäude weiter- oder umzunutzen, Gebäude also direkt „im Kreislauf“ zu führen, aber auch Ansätze, die sich mit einem durch CO₂-Reduktionsziele gebotenen „Weniger an Wohnraum“ bzw. „Weniger an Wohnraumwärme“ beschäftigen, werden weiterhin wenig betrachtet.

So werden in einschlägigen Architekturzeitschriften immer wieder Neubauprojekte als Beitrag zur Bauwende zitiert, in denen recycling-fähige Baustoffe eingesetzt wurden. Diese kommen jedoch in der Regel nur als Downcycling (z. B. geschredderte Abrissmaterialien als Baugrundunterlage) zum Einsatz. Es fehlt aus unserer Sicht an Beispielen, bei denen Recycling-Baustoffe tatsächlich eingesetzt wurden. Der geringe Einsatz dieser liegt u.a. an einer Reihe von organisatorischen und regulativen Hemmnissen (Goldmann 2022). Zudem wird die Ertüchtigung von Bestandsbauten häufig als nicht wirtschaftlich angesehen, obwohl es Hinweise darauf gibt, dass dies in einigen Fällen durchaus möglich und sinnvoll ist.

Es muss daher zukünftig nicht nur um den Neubau gehen, sondern auch um den Eingriff in und insbesondere den Erhalt von Bestandsgebäuden. Wenn infolge des zurzeit (aufgrund der Klimaschädlichkeit des Neubaus) sehr kritisch diskutierten Umgangs mit Bestandsgebäuden (<https://abrissmatorium.de/>) zukünftig mehr Gebäude erhalten blieben (und energetisch ertüchtigt würden), könnte sich das positiv auf die Klima- und Umweltbilanz des Gebäudesektors insgesamt auswirken.

Das vorliegende „IAT Forschung aktuell“ basiert auf den Ergebnissen aus Interviews, Literaturrecherchen, Archivarbeiten und Datenanalysen aus zwei Forschungsarbeiten: Einerseits „InSym.Ruhr - Industriesymbiosen im Ruhrgebiet: Entstehung & Potentiale des Konzepts für die Transformation von Regionen im Wandel“, welches durch die Forschungsförderung der Westfälischen Hochschule gefördert wurde, und andererseits das BBSR-Forschungsprojekt „Vorstudie: Kleinstädte – Teil der Lösung der aktuellen Wohnungsfrage“.

2. Umweltauswirkungen des Baugewerbes

Das Baugewerbe in Deutschland stellt wirtschaftlich und gesellschaftlich einen zentralen Sektor dar. Im Jahr 2020 können 1.98 Millionen Beschäftigte (5,8% der SVB) dem Sektor zugerechnet werden, gleichzeitig erwirtschaftete der Wirtschaftszweig F (Baugewerbe) über 177 Milliarden €, was etwa 5,2% des Bruttoinlandsprodukts entspricht (RDB 2023a; RDB 2023b).

Neben der gesamtwirtschaftlichen Bedeutung des Sektors treten jedoch insbesondere im Zusammenhang der Diskussion über die planetaren Grenzen, verschiedene weitere Aspekte in den Vordergrund: Ihr Beitrag zu Emissionen, Ressourcenverbrauch, Versiegelung und Flächenverbrauch.

Modellierungen gehen davon aus, dass die von Menschen künstlich geschaffene Masse aus Beton, Zuschlagstoffen, Ziegeln, Asphalt, Metallen und anderen Komponenten (z.B. der Papier-, Glas- oder Kunststoffindustrie) mittlerweile die gesamte weltweit vorhandene Biomasse übertrifft: So existierten im Jahr 2020 weltweit etwa 1.100 Gt. an Gebäuden und Infrastruktur, während die Biomasse von Bäumen und Gewächsen 900 Gt. ausmachte (Elhacham et al. 2020).

Betrachtet man die jährliche Ressourcengewinnung, wird die langfristige Entwicklung sichtbar. So stellen nichtmetallische Mineralien, wie Sand, Kies und Lehm, einen Großteil der extrahierten und genutzten Ressourcen dar. Während derartige Materialien 1970 noch etwa 9 Billionen Tonnen und damit 34% der extrahierten Ressourcen ausmachten, stellten sie 2017 bereits 44 Billionen Tonnen und 48% der global extrahierten Materialien, was eine starke Verlagerung hin zum Abbau von mineralischen Ressourcen zeigt (UNEP 2019). Bau- und Konstruktionstätigkeiten haben somit nicht nur Einfluss auf Wirtschaft und Gesellschaft, sondern auch direkt darauf, wie sich unser Planet insgesamt verändert.

Der treibhausgasbedingte Klimawandel und sektorale sowie individuelle Klimaschutzmaßnahmen stehen in diesem Kontext im Zentrum vieler Debatten. Mit Verkehr und Wohnen sind dabei Felder betroffen, die direkt mit der Lebenswirklichkeit der Bevölkerung zusammenhängen. So sind Debatten über die Elektrifizierung dieser Sektoren, beispielsweise durch Elektromobilität oder Wärmepumpen aktuell allgegenwärtig und werden als Lösungsansätze gesehen, die Emissionen in der Nutzungsphase von Verkehrsmitteln und Gebäuden gegenüber den bisher verbreiteten Technologien zu reduzieren.

3. Embodied Carbon im Bausektor

Eine reine Betrachtung der Emissionen in der Nutzungsphase von Produkten oder Gebäuden und Ansätze zur Reduktion dieser greifen in vielen Fällen zu kurz. Insbesondere im Kontext der Errichtung und Nutzung von Gebäuden und Infrastrukturen

zeigt sich, dass Einsparungen in der Nutzungsphase zwar sinnvoll sind, ein erheblicher Teil der Emissionen und Ressourcennutzung aber bei der Betrachtung anderen Abschnitten des Lebenszyklus, nämlich dem Bau (BBSR 2020a) und dem Abriss zuzuordnen sind. Für eine möglichst vollständige Betrachtung der Emissionen, die Bauen und Wohnen verursachen, gilt es somit sowohl auf „embodied carbon“ (eingebetteter oder verkörperter Kohlenstoff) als auch auf „operational carbon“ (Betriebskohlenstoff), also die Emissionen im Betrieb, zu schauen (s. Tabelle 1) (Simonen et al. 2013).

	Eingebettet	Im Betrieb
Energie	<p>Aufgewendete Energie:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zur Rohstoffgewinnung • Zur Verarbeitung von Materialien • Zur Montage von Bauteilen • Zum Transport zwischen den Standorten • Für den Bau • Für Wartung und Instandhaltung • Rückbau/Abbruch • Entsorgung 	<p>Aufgewendete Gesamtenergie im Gebäudebetrieb (Strom, Dampf, Erdgas)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Heizung/Kühlung • Beleuchtung • Ausrüstung • Belüftung
CO₂	<p>CO₂-Emissionen aufgrund von:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verbrennung fossiler Brennstoffe zur Energiegewinnung (für o. g. Zwecke) • Chemische Reaktionen, die Treibhausgase in die Atmosphäre freisetzen • Sequestrierung (Einlagerung) von CO₂ bzw. Kohlenstoffabsonderung/-abtrennung im Kraftwerksprozess • Verbrennung von Biokraftstoffen zur Energiegewinnung (für o. g. Zwecke) <p>Anmerkung: Die Sequestrierung und die biogenen CO₂-Emissionen sollten idealerweise als separate Einträge aufgenommen werden, um eine klare Auswertung der Daten zu ermöglichen.</p>	<p>Betriebsbedingte CO₂-Emissionen hängen von der Menge des verwendeten Brennstoffs, der Brennstoffquelle und der Verbrennungsmethode ab.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Emissionen aus dem Stromnetz • Verbrennung von Erdgas und Erdöl am Standort • Verbrennung von Holz und Pellets vor Ort (siehe Anmerkung links)

Tabelle 1: Zusammenfassung der Unterschiede zwischen verkörperter und betrieblicher Energie und Kohlenstoff (Eigene Darstellung nach Simonen et al. 2013).

So lohnt es sich für eine umfassende Betrachtung zwischen Betrieb, also der Nutzung der Gebäude, und verschiedenen Stufen der Erstellung und Entsorgung (inklusive Transporte) zu unterscheiden. Eine exemplarische Darstellung der Phasen des Lebenszyklus eines Gebäudes, die bei einer möglichst vollständigen Betrachtung der konstruktions- und nutzungsbedingten Emissionen eines Gebäudes zu beachten sind, können Abbildung 1 entnommen werden. So zeigt sich, dass neben der Nutzung eine Vielzahl an weiteren Prozessen eine Rolle spielt.

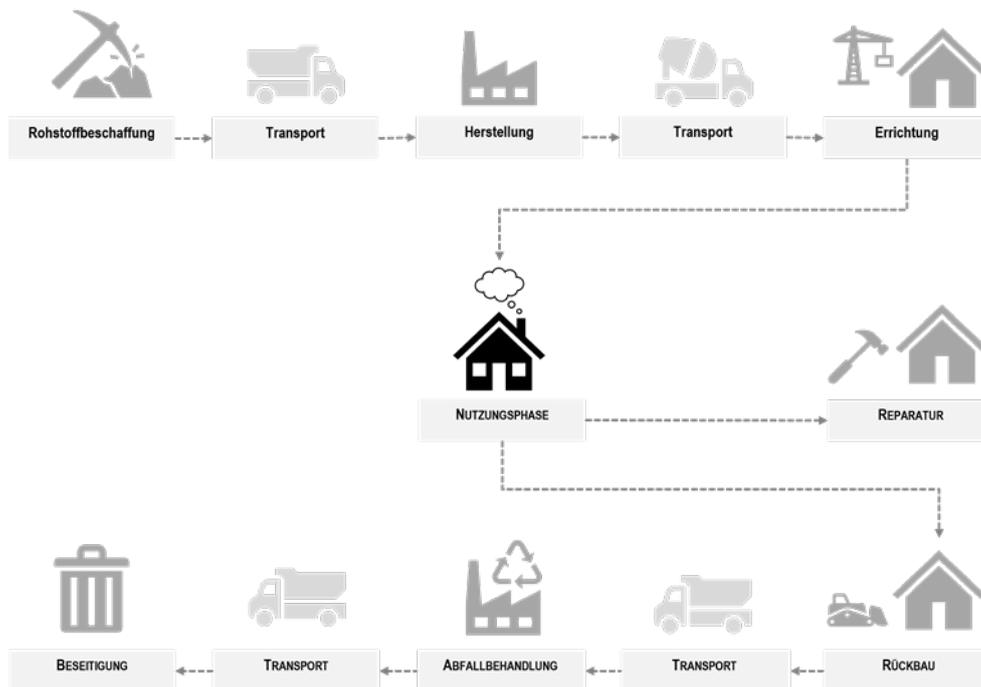


Abbildung 1: Lebenszyklusbetrachtung von Gebäuden. (Eigene Darstellung)

Leider liegen in Bezug auf die Betrachtung dieser unterschiedlichen Größen aus unserer Sicht keine validen Zahlen vor. Wir gehen in Anlehnung einiger Veröffentlichungen (z. B. BSBK 2021) davon aus, dass der Gebäudenutzung ungefähr 25 % der CO₂-Emissionen zuzuschreiben sind. Weiterhin schätzen wir (eher konservativ), dass für die Erstellung und Entsorgung (inkl. aller Vorprodukte, Transport und Lagerung) noch einmal rund 15 % dazu kommen (BUND BaWü 2018; BSBK 2021), weshalb eine Studie im Auftrag des BBSR eine ganzheitliche Betrachtung der Gebäude vor allem im Fall von Neubauvorhaben als wichtig ansieht (BBSR 2019).

Verkörperter Kohlenstoff wurde bisher wenig beachtet, trägt aber zu den gesamten globalen Kohlenstoffemissionen bei (WGBC 2019). Auch wenn es wenig zufriedenstellend ist, keine validen und eindeutigen Zahlen vorlegen zu können, wollen wir die o. g. 25 % und 15 % einmal für eine modellhafte sehr grobe Betrachtung zugrunde legen. Das heißt, – und dazu finden sich wiederum überschlägige Berechnungen in der Literatur (BBSR 2020a: 17) – dass rund 40 % der gesamten THG-Emissionen in CO₂-Äquivalenten (folgend als CO₂-Emissionen bezeichnet) auf den Gebäudesektor entfallen. Modellhaft und bewusst gut nachvollziehbar skizziert, müsse danach ein Ersatzgebäude als Nullenergiegebäude (unterstellt man für die Berechnung eine Restnutzungsdauer von 75 Jahren) gut 45 Jahre¹ genutzt werden, damit sich aus ökologischer Sicht die Investition lohnt (eigene Berechnungen). Allerdings nur dann, wenn es sich in der Tat um ein Nullenergiehaus handelt. Halbiert sich der Gesamtenergieverbrauch eines Gebäudes nur um 50% im Vergleich zum

¹ $x^{\text{NUTZUNG}} = 25$; $z^{\text{ERRICHTUNG}} = 15$; $t^{\text{NUTZUNGSDAUER}} = 75$. Danach heißt die Formel: $z:(x:t)=y$

(eventuell energetisch ertüchtigten) Bestandsgebäude, lohnt sich der energetisch „optimale“ Neubau ökologisch erst nach 90 Jahren.

Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass es sich um eine modellhafte Betrachtung handelt und dringend differenziertes Zahlenmaterial benötigt wird. Doch auch abgesehen von dem unzulässigen Zahlenwerk können wir davon ausgehen, dass es nicht nur geboten ist, die CO₂-Emission durch den Betrieb der Gebäude zu reduzieren, sondern auch die durch die Erstellung. Vor allem, weil noch hinzukommt, dass Neubauten oftmals weniger effizient sind als angenommen. So besteht eine erhebliche Energiebedarfslücke (Performance Gap). Dies ist die Differenz zwischen projektiertem Energie- und tatsächlichem Energiebedarf. Gerade als besonders effizient ausgewiesene High-Tech-Gebäude verbrauchen häufig deutlich mehr Energie in der Nutzung als vorher prognostiziert (Reimann & Bühlmann 2016; Lauss et al. 2022). Denn aufgrund eines Nutzungsverhaltens, was nicht den Modellannahmen entspricht, unsachgemäßer Installation und einer störanfälligen Steuerungstechnik (BBSR 2020b; Franke et al. 2023) verbrauchen Niedrig- und Nullenergiehäuser deutlich mehr Energie als in der Planung erwartet wird. Hinzu kommt der sogenannte Rebound-Effekt, der besagt, dass technologische Fortschritte oder Effizienzsteigerungen bei der Nutzung von Ressourcen oft nicht zu den erwarteten Einsparungen führen, da sie durch erhöhten Verbrauch oder andere Verhaltensänderungen teilweise ausgeglichen werden. So zeigen Untersuchungen, die den prognostizierten und tatsächlichen Verbrauch gegenüberstellen, dass insbesondere Bestandsgebäude mit hohem Energiebedarf in der Praxis häufig weniger Energie verbrauchen als angenommen wird, da die Nutzenden sparsamer mit Energie umgehen, während in effizienten Neubauten ein gegenteiliger Effekt auftritt (Sunikka-Blank & Galvin 2012). Dies führt dazu, dass die tatsächliche Nutzungsdauer, die einen Neubau ökologisch rechtfertigen würde, sicherlich noch deutlich höher liegen dürfte.

Im Rahmen europäischer und nationaler Klimaschutzbestrebungen gewinnt die Betrachtung der Emissionen durch Bautätigkeiten auch auf politischer Ebene zunehmend an Relevanz. Die Niederlande erfassen „embodied carbon“ in Gebäuden bereits seit 2013 (DED 2023). Mit der Leistungsberechnung umweltbewusster Gebäude („Milieuprestatie Gebouwen“, MPG) wurde hier eine einheitliche nationale Methodik zur Erhebung eingeführt. Diese Berechnung ist für Bürogebäude größer als 100m² sowie neue Wohnhäuser vorgeschrieben und ermöglicht somit einen Überblick über die Umweltauswirkungen der genutzten Materialien (DGBC 2021). Auch in der Schweiz steht graue Energie seit der Einführung der SIA 2023 im Jahr 2010, welche die Bilanzierung von grauer Energie in Bauten standardisiert, im Fokus (Gugerli et al. 2008). Ebenso werden „Construction-related emissions“ von Bauvorhaben seit 2022 auch in Frankreich erfasst (Agora Energy Transition 2022). Hier wurden zudem Grenzwerte für das emittierte CO₂ pro m² festgelegt: Dürfen Einfamilienhäusern im Jahr 2022 baubedingte Emissionen in der Höhe von 640kg/m²/Jahr verursachen, wird der Grenzwert in 2031 bei 490kg CO₂/m²/Jahr liegen (Agora Energy Transition 2022).

Die Betrachtung der Gesamtemissionen gewinnt jedoch auch im Kontext der EU-Taxonomie an Relevanz. So müssen Gebäude, die größer als 5.000 m² sind, ihren Beitrag zur Erderwärmung entlang jeder Stufe des Lebenszyklus berechnen und für Investoren und Kunden bei Bedarf offenlegen (Global ABC 2021). Zudem wird durch die Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) ab 2027 eine Lebenszyklusanalyse für solche Gebäude notwendig, die größer als 2.000 m² sind, ab 2030 dann für sämtliche Neubauten (EU 2021).

Auch der EU-Emissionshandel trägt indirekt dazu bei, dass produktions- und prozessbedingte Emissionen sich langfristig auch in der Bepreisung von Produkten sichtbar machen. Während der Emissionszertifikathandel in der Vergangenheit nur geringen Einfluss auf die Herstellung von Zement als wichtigem Baustoff hatte (Neuhoff et al. 2014), stellt dieser seit der Reduktion der bis 2012 noch kostenlos an die Industrie zugeteilten Zertifikate und insbesondere auch vor dem Hintergrund des geplanten Wegfalls von Zertifikaten in den nächsten Jahren (EU 2020) mittlerweile einen größeren Einflussfaktor dar. Somit wird die Betrachtung der verursachten Treibhausgasemissionen in verschiedenen Sektoren, der Bauwirtschaft und insbesondere auch der Zement- und Betonindustrie auch in Deutschland in Zukunft immer wichtiger.

4. Von allem weniger

Wie zuvor ausgeführt ist eine ganzheitliche Betrachtung des Gebäudesektors dringend nötig und auf allen Ebenen sind Maßnahmen zu ergreifen. So kann beispielsweise die Reduktion der Energiebedarfslücke (Performance Gap), das heißt zum Beispiel eine stärkere Berücksichtigung des Nutzungsverhaltens, zur Emissionsreduktion beitragen, wie auch die Bereitschaft auf weniger Quadratmetern zu wohnen oder Bestandsgebäude nachzunutzen. Auch im Neubaubereich gibt es verschiedene Möglichkeiten den Energieinput, den Entsorgungsaufwand, den Flächenfraß und die Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Die folgenden Unterkapitel listen verschiedene Strategien auf und beginnen bei den technologieorientierten Ansätzen im Bereich der Erstellung von Gebäuden (4.1- 4.3) und widmen sich im weiteren Verlauf dem Bestand (4.4).

4.1 Weniger Emissionen durch den Einsatz von Sekundärmaterialien

Die Zementindustrie hat – getrieben durch die Energiepreise – in der Vergangenheit bereits verschiedene Effizienzsteigerungen und eine starke Reduktion der brennstoffbedingten Emissionen vornehmen können. So wurden die brennstoffbedingten Emissionen pro hergestellter Tonne Zement durch den Einsatz alternativer Brennstoffe (wie z. B. Biomasse, Klärschlamm und anderer Abfallstoffe) zwischen 1990 und 2012 beinahe halbiert (VDZ 2013; Neuhoff et al. 2014). Alternative Brennstoffe machen daher heute bereits 76 % der verwendeten Energieträger aus (VDZ 2022: 19).

Insbesondere in der Zementherstellung gibt es jedoch neben der eingesetzten Energie weitere prozessbedingte Herausforderungen. So entstehen bei der Herstellung von Zementklinker (in der Kalksteinsäuerung) prozessbedingt etwa 587 kg CO₂ pro Tonne produzierten Zements (WWF Deutschland 2019).

Um diese Emissionen zu reduzieren, können Zementhersteller einen Teil des CO₂-intensiv herzustellenden Zementklinkers durch alternative Ressourcen ersetzen, um den Klinkeranteil und somit auch die produktionsbedingten Emissionen zu verringern. Der Anteil alternativer Rohstoffe an den insgesamt in Deutschland verwendeten Ressourcen des Zementherstellungsprozesses beträgt derzeit ca. 19 % (VDZ 2022). Als alternativen Materialien zur Herstellung können hierbei Primärressourcen, also alternative abzubauen Mineralien, oder, so wie es aktuell der Fall ist, Sekundärrohstoffen verwendet werden.

Sekundärmaterialien, also Ressourcen, die in anderen industriellen Prozessen anfallen und sich zur Weiterverwertung eignen, spielen aktuell eine zentrale Rolle bei der Herstellung von Zement und Beton. Die Verwendung dieser Beiprodukte anderer Industrien stellt eine Win-Win-Situation dar. So wird Hüttensand, also granuliert Hochofenschlacke als Nebenprodukt der Eisen- und Stahlerzeugung, bei der Herstellung von CEM II- bis CEM V-Zementen verwendet, während Flugasche und Gips aus Kohlekraftwerken weitere wertvolle Sekundärrohstoffe bei der Zement- und Betonherstellung sind, die es ermöglichen den Gesamtanteil an Klinker und Zement zu reduzieren.

Aufgrund des deutschen Ausstiegs aus der Kohleverstromung sowie der sich anbahnenden Dekarbonisierung der Stahlproduktion werden Nebenprodukte, die derzeit als Sekundärrohstoffe in der Herstellung von Zement oder Beton verwendet werden, zukünftig jedoch nur noch in reduziertem Umfang verfügbar sein. So führt der Kohleausstieg bereits jetzt zu einer verringerten Verfügbarkeit und einer zunehmenden Volatilität von REA-Gips und Flugasche. Mit der Transformation der Eisen- und Stahlproduktion (z. B. die wasserstoffbasierte DRI-Route) wird auch der Anteil der anfallenden Hochofenschlacke perspektivisch sinken. Bisher in großem Stil verwendeter Hüttensand wird wegfallen, andere Arten von Schlacken (insbes. Stahlwerksschlacken) werden langfristig an Bedeutung gewinnen. Bisher gibt es mit dem Einsatz dieser als Sekundärmaterialien in der Zementproduktion jedoch nur wenig Erfahrung hinsichtlich ihrer Materialität und Verwendung.

Somit zeigt sich bereits jetzt, dass die Verfügbarkeit der zur Zeit bereitwillig verwendeten Sekundärmaterialien stetig abnimmt und durch den Ausstieg aus der Kohleverstromung bzw. im Kontext einer sinkenden Nachfrage nach Energie aus Kohlekraftwerken weiterhin zurückgehen wird, was jetzt bereits sichtbar ist, wie Abbildung 2 zeigt. Während der Rückgang im Falle der Nebenprodukte aus der Energiewirtschaft stetig erfolgt, sind durch den Umbau ganzer Stahlwerke insbesondere im Falle der Schlacke starke Einschnitte in der Verfügbarkeit zu erwarten, sobald erste Hochöfen abgeschaltet werden.

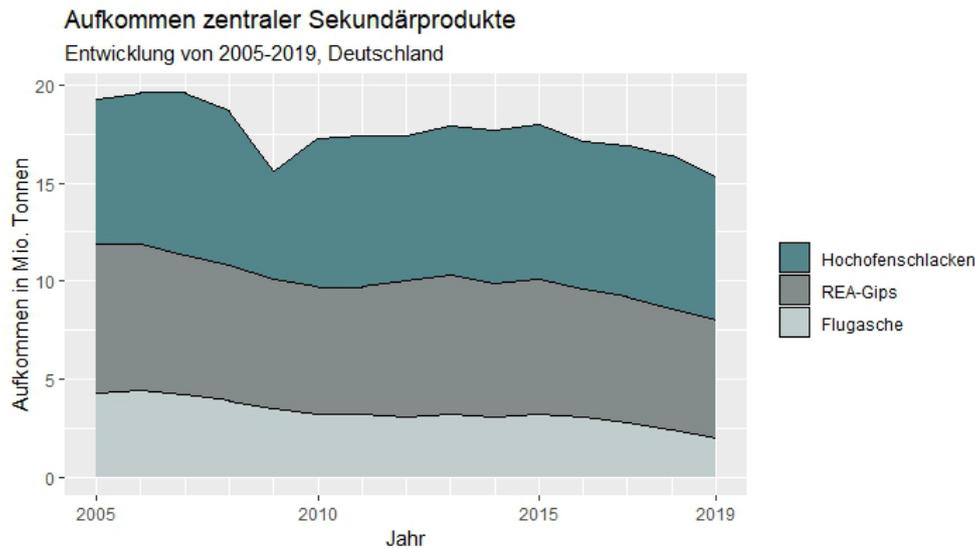


Abbildung 2: Aufkommen zentraler Sekundärprodukte für die Bauwirtschaft (Eigene Darstellung nach BBS 2022; vgabe energy e. V. 2022)

Ausblick

Zement- und Betonhersteller, Verbände und verschiedene Forschungseinrichtungen konzentrieren sich vor diesem Hintergrund zunehmend auf die Erforschung und Erprobung alternativer Optionen zur Reduktion der produktionsbedingten CO₂-Emissionen von Zement und Beton.

Eine davon bildet der vermehrte **Einsatz von alternativen mineralischen Primärressourcen** (z. B. kalziniertem Ton). Dieser führt jedoch zu neuen Fragen bezüglich der Herkunft und Gewinnung und der damit verbundenen lokalen Auswirkungen. Die durch eine langfristig sinkende Verfügbarkeit bedingte Abkehr von diesen Sekundärmaterialien hin zu einem verstärkten Einsatz neuer Primärressourcen stellt somit die Frage danach, wie dies möglichst kostengünstig und umweltverträglich erfolgen kann. Insbesondere im Kontext planetarer Grenzen und der eingangs beschriebenen Entwicklungen und Herausforderungen, können diese alternative Ressourcen zur Reduktion der prozessbedingten Emissionen beitragen, bedingen jedoch im Kontext anderer planetarer Grenzen weitere Negativeffekte (Flächenverbrauch etc.). Daher stellt sich die Frage nach anderen Sekundärrohstoffen:

Die **Verwendung von metallurgischen Schlacken** – abseits der bisher verwendeten Hochofenschlacke – stellt einen weiteren vielversprechenden Ansatz dar. Der Einsatz dieser als Sekundärmaterialien ist insbesondere hinsichtlich der Einsparung von Primärrohstoffen positiv zu bewerten. Während Fragen bezüglich der Eignung, Zertifizierung und Zulassung vielfach noch offen sind, stellt sich hierbei auch die Frage nach der Quantität, die abhängig von den zukünftig in der Stahlproduktion genutzten Technologien und der wirtschaftlichen Entwicklung der Stahlproduktion in Deutschland insgesamt ist. So zeigte sich bereits bei der Verfügbarkeit der Hochofenschlacke

ein enger Zusammenhang mit der Produktion der Stahlindustrie und der gesamtwirtschaftlichen Lage. Insgesamt ist somit langfristig – insbesondere auch im Vergleich zum bisher eingesetzten hohen Anteil von Hüttensand aus Hochofenprozessen – mit einer geringeren Menge an verfügbaren Sekundärmaterialien aus der Eisen- und Stahlproduktion zu rechnen. Der Verein Deutscher Zementwerke e. V. (VDZ) prognostiziert, dass Hüttensand im Jahr 2050 nur noch einen Anteil von 32 % an den insgesamt eingesetzten alternativen Rohstoffen ausmachen wird (VDZ 2022: 23).

Der **Ansatz des Urban Mining** sieht Städte und deren gebaute Infrastruktur und Gebäude als Ressourcenquelle an. Da Abriss- und Bautätigkeiten im urbanen Raum konzentriert auftreten, versprechen Städte und insbesondere Metropolräume kurze Transportwege, eine reduzierte Notwendigkeit längerer Zwischenlagerung und allgemeinen Bedarf für Sekundärmaterialien aus Abrissarbeiten. Im Sinne einer Circular Economy werden Rohstoffe aus dem Abriss von Gebäuden sortiert und aufbereitet um z. B. granuliert als Brechsand wieder der Herstellung von Zement und Beton zugeführt zu werden. Der Einsatz von Construction Demolition Waste (CDW) bzw. Betonbrechsand knüpft direkt an bisherige Erfahrungen in der Verwertung von Sekundärmaterialien an.

Aktuell beträgt der Anteil alternativer Rohstoffe in Betonen etwa 1%; Recycling-Gesteinskörnung macht hiervon wiederum 30 % (0,9 Mio. t) aus (VDZ 2022: 25-26). Im Szenario des VDZ e.V. für 2050 stellen alternative Rohstoffe in Form von Recycling-Gesteinskörnung hingegen 26 % der verwendeten Ressourcen (53, Mio. t.) der Betonherstellung dar.

Doch nicht nur in der Betonherstellung, auch in der Herstellung von Zement wird Brechsand, also granulierter recycelter Beton, als einer der wichtigsten alternativen Rohstoffe angesehen (VDZ 2022: 23). Hier gibt es heute jedoch kaum Erfahrungen oder größere Pilotprojekte. Auch befinden sich Normen, die den Einsatz auf europäischer Ebene regeln, bisher noch in der Erarbeitung (VDZ 2022). Dieser Ansatz ist somit zwar als sinnvoll und zukunftsfähig anzusehen, bisher jedoch kaum erprobt. Gleichzeitig stellen sich auch hier Fragen bzgl. des hierzu benötigten Energieaufwandes.

Bisher finden recycelte Baustoffe zwar bereits in Form von Gesteinskörnung als Beton- und Asphaltzuschlag (15 Mio. Tonnen) einen Weg in die Bauwirtschaft, jedoch wurde der Großteil der Recyclingbaustoffe im Jahr 2020 im Straßen- (39 Mio. Tonnen, 50 %) und Erdbau (18 Mio. Tonnen) verwendet (UBA 2023). Während der zukünftige Einsatz dieser Stoffe in „höherwertigen“, CO₂-einsparenden Anwendungen wie z. B. als Brechsand in der Zementherstellung und somit eine Abkehr vom Downcycling sinnvoll ist, stellt sich somit jedoch die Frage, ob dies nicht zu einer höheren Nachfrage nach Primärmaterialien in anderen Anwendungen wie z.B. dem Straßenbau führt.

4.2 Weniger Emissionen durch CO₂-Abscheidung

Einen weiteren Ansatz zur Reduktion der CO₂-Emissionen der Zementindustrie stellt das **Abscheiden und Speichern entstehender CO₂-Emissionen** dar. Insgesamt sind Zementwerke hierfür als große Punktquellen besser geeignet als z. B. Direct-Air-Capture Technologien, die CO₂ aus der Umgebungsluft abscheiden. Nach zahlreichen Studien und Forschungsvorhaben sieht sich die Zementindustrie heute in der Lage, die CO₂-Abscheidung großtechnisch zu erproben (VDZ 2023). Aktuell werden hierzu verschiedene Technologien (Oxyfuel, Post-Combustion, Calcium-Looping) erprobt, so gibt es erste Pilotprojekte und Demonstratoren.

Je nach gewählter Technologie bedarf es somit hoher Investitionen in neue Anlagen wie z. B. neue Öfen oder Luftzerteilungsanlagen. Gleichzeitig steigt der Bedarf an elektrischer Energie im Betrieb. Doch auch beim zweiten Schritt, der Speicherung, gibt es noch Herausforderungen: Eine aktuelle Studie, die zwei langjährige Carbon-Capture-and-Storage-Projekte (CCS) in Norwegen untersucht, kommt zu dem Ergebnis, dass sich die langfristige Sicherheit selbst in den zwei bisher am besten erforschten geologischen Feldern zur CO₂-Speicherung nur bedingt vorhersagen lässt. Obwohl an den beiden in der Studie untersuchten Feldern mehr seismische Untersuchungen und -überwachungen durchgeführt wurden als an fast jedem anderen Ort der Welt, entwich injiziertes CO₂ bereits einige Jahre nach Beginn der Speicherung unbeabsichtigt in höhere geologische Schichten, was zuvor nicht antizipiert wurde (IEEFA 2023).

Vor diesem Hintergrund werden neben der Lagerung auch die **industrielle Nutzung von abgedehntem CO₂** (Carbon Capture and Utilisation, CCU) oder aus diesem hergestellte Verbindungen und Derivate (Ammoniak, Methanol, Urea) an Bedeutung gewinnen. Dieser Ansatz ist insbesondere vor dem Hintergrund vieler sich parallel transformierender Industriezweige als vielversprechend anzusehen. So stellt sich z. B. für die Basischemie in Zukunft die Frage danach, woher Kohlenwasserstoffe für die Produktion verschiedenster Grundstoffe bezogen werden können, wenn auf fossile Quellen wie Naphta (aus Erdöl) verzichtet werden soll. Abgedehntes CO₂ aus großen industriellen Punktquellen (z. B. an Standorten der Zementindustrie) kann somit dazu beitragen den Bedarf an Kohlenstoffen zu decken und die Nutzung anderer Quellen, wie z. B. fossiler Quellen oder aber den Einsatz von Biomasse zu schonen.

In beiden Ansätzen ist auch der Aufbau einer grundlegenden Infrastruktur nötig, die den Transport des abgedehnten CO₂ ermöglicht. Für die Zementindustrie ist der Ansatz daher insbesondere für Standorte vielversprechend, die an CO₂-Netze angebunden werden können oder sich in geographischer Nähe zu möglichen Abnehmer-Industrien, wie z. B. Chemieparks, befinden.

4.3 Weniger Zement in der Bauwirtschaft

Doch nicht nur in der Produktion von Grundstoffen für die Bauwirtschaft, auch im Einsatz von Materialien gibt es Ansätze um Ressourcen, Energieeinsatz und CO₂-Emissionen zu reduzieren, insbesondere eine ressourceneffizientere Bauweise. So könnten geringere Querschnitte von Bauteilen, hybride Bauweisen, insbesondere aber auch der Einsatz wiederverwendbarer Betonfertigteile dazu führen, den Bedarf an Beton und Zement langfristig zu reduzieren (VDZ 2022). Während der Einsatz von wiederverwertbaren Betonfertigteilen sinnvoll ist, ist jedoch zu beachten, dass die Wiederverwertbarkeit erst am Ende der Lebensdauer von Gebäuden eine Rolle spielt und somit erst nach Ende der Nutzungsphase relevant wird. Während somit also Einsparungen in der Zukunft ermöglicht werden, dauert es bis zu einer tatsächlichen Wiederverwendung der Bauteile jedoch². Während Einsparungen durch dünnere Querschnitte von Bauteilen und den sparsamen Einsatz von Materialien wie Zement also direkte Vorteile bringen, zeigen sich Einsparungen durch die Wiederverwertung ganzer Bauteile erst in ferner Zukunft.

Insgesamt verfolgt die Zement- und Betonindustrie verschiedenste Ansätze, die sich hinsichtlich der notwendigen Investitionen, dem jeweiligen Energieaufwand sowie der möglichen Einsparungen von CO₂-Emissionen, aber auch von Primärressourcen, stark unterscheiden. Bedingt durch die unterschiedlichen Reifegrade der einzelnen Verfahren sowie die unterschiedlichen Phasen in der Produktion bzw. im Lebenszyklus von Gebäuden und Bauteilen, in denen angesetzt wird, gibt es weiterhin Unterschiede hinsichtlich des Zeitpunktes, zu dem nennenswerte CO₂-Einsparungen realistisch sind. Gleichzeitig hängen viele der Ansätze, wie z. B. CCUS, CCS oder aber auch Recycling von CDW davon ab, wie zukünftige Kooperationen mit anderen Industriezweigen als Zulieferer oder Abnehmer ausgestaltet werden und wann und wo die hierzu notwendige Infrastruktur vorhanden ist. Viele der Ansätze sind somit vielversprechend, insbesondere in ihrem Zusammenspiel, ein Einsatz dieser Technologien im großen Stil ist jedoch vielfach erst auf lange Sicht zu erwarten.

4.4 Weniger Bauen

Der Satz von Lemaitre und Auer (2022); „Wir können auf der einen Seite nicht Klimaziele verfehlen und auf der anderen Seite pauschal den Neubau von 400.000 Wohnungen als Ziel einführen“, macht das Dilemma sehr deutlich. So bedarf es neben der oben skizzierten technologischen Ansätze Ressourcenverbrauch und Emissionen der Bauwirtschaft zu reduzieren auch einen breiteren gesellschaftlichen Diskurs darüber, bisherige Entwicklungen zu hinterfragen. Zu ähnlichen Schlüssen kommen auch Hild & Schulz (2023) in Ihrer Untersuchung von Ansätzen der Circular Economy in der Bauwirtschaft in Luxemburg, die insbesondere einen Diskurs der tech-

² So haben Einfamilienhäuser in Deutschland eine durchschnittliche Gesamtnutzungsdauer von 60 bis 100 Jahren, Mehrfamilienhäuser 60 -85 Jahre (Bauprofessor o.D.).

nologisch ermöglichten Zirkularität vorfinden, der als Legitimation für ein grundsätzliches business-as-usual dient, während die Notwendigkeit bestimmter Neubaumaßnahmen, aber auch der Platzansprüche im privaten Wohnungsbau kaum hinterfragt werden.

Nach BBSR-Berechnungen standen im Jahr 2018 schätzungsweise 1,7 Mio. Wohnungen in Deutschland leer (Ammann et al. 2021). Auch wenn zu konstatieren ist, dass sich viele dieser Wohnungen an Orten befinden, wo sie nicht oder nur unzureichend nachgefragt sind, muss berücksichtigt werden, dass aufgrund fehlender Aktivierbarkeit von Baugrundstücken an nachgefragten Orten die Gefahr besteht, dass, um die politischen und aus sozialer Perspektive gebotenen quantitativen Ziele zu erreichen, wieder Wohnungen an weniger nachgefragten Standorten gebaut werden. Ferner könnte ein Teil des Leerstandes in strukturell herausgeforderten oder peripheren Orten durch Steuerungs- und Förderinstrumente aktiviert werden. Dabei ist darauf zu achten, das Thema Wohnen nicht isoliert zu betrachten. Wohnen muss immer im Zusammenhang mit anderen Funktionen wie sozialen Infrastrukturen, Versorgungsstrukturen und Arbeitsplätzen gedacht werden. Denn genau an diesen anderen Funktionen mangelt es häufig in den Räumen, die über einen nennenswerten Bestand an Leerstand verfügen. Aber selbst, wenn es gelingt, Nutzungsgemischte attraktive Quartiere in von Leerstand betroffenen Städten zu schaffen und bestehende Bestände zu sanieren und wieder zu nutzen, kann nur ein kleiner Teil des Wohnraumnachfrageüberhangs aus den sogenannten Schwarmstädten in diese Städte gelenkt werden.

Leerstehende Gebäude oder Wohnungen befinden sich aber nicht nur in benachteiligten, demographisch schrumpfenden Räumen, sondern teilweise handelt es sich auch um Spekulationsobjekte, durch Strukturwandel (z. B. im Einzelhandel) leergefallene, vernachlässigte oder sanierungsbedürftige Objekte. Im Rahmen von für das BBSR-Forschungsprojekt „Vorstudie: Kleinstädte – Teil der Lösung der aktuellen Wohnungsfrage“ durchgeführten Interviews wurde in diesem Zusammenhang ferner bemängelt, dass bei einem Umbau, beziehungsweise einer Ertüchtigung von Bestandsgebäuden, die gleichen baurechtlichen Genehmigungsverfahren anzuwenden sind, wie bei einem Neubau. Eine „Umbaubauordnung“ könnte dies erleichtern. Auch sei zu überprüfen, ob für jede Maßnahme tatsächlich ein Bauantrag durch Architekt:innen benötigt wird oder die Bauvorlageberechtigung (wie dies in einzelnen Bundesländern schon der Fall ist) nicht auch von Meisterbetrieben übernommen werden könnte. Der Umbau sollte jedoch nicht nur planungsrechtlich erleichtert werden, sondern auch finanziell stärker gefördert werden. Energetische Sanierung von Bestandsgebäuden scheitern teilweise an den Vorschriften zur Ausschreibung. Diese sind nur möglich, wenn man sehr kleine Tranchen vergibt, weil der Gesamtumfang von solchen Projekten nicht genau abgeschätzt werden kann. Daher ergibt sich häufig der falsche Eindruck, dass eine Gebäudesanierung ökologisch und ökonomisch nicht sinnvoll ist. Häufig konnte aber wohl gezeigt werden, dass die Sanierung eines zum Abriss stehenden Gebäudes letztendlich günstiger war als Abriss und Neubau.

Der hohe Druck auf die Wohnungsmärkte, vor allem in Städten und Agglomerationen, ist nicht nur dem Trend in die Stadt zu ziehen geschuldet, sondern auch einer gestiegenen Pro-Kopf-Wohnfläche (Henger & Voigtländer 2019). Weniger Pro-Kopf-Wohnraum würde nicht nur weniger Neubau und dadurch weniger induzierte CO₂-Emissionen bedeuten, sondern auch mit weniger CO₂-Emissionen im Betrieb der Immobilien einhergehen. „Wir müssen auch lieb gewordene Standards hinterfragen. Winterliche Raumtemperaturen von 22 bis 24°C im Wohnungsbau sind nicht nur unnötig, sondern führen auch zu trockener Luft, was wiederum die Gefahr einer Ansteckung mit Infektionskrankheiten erhöht“, so Lemaitre und Auer 2022.

Doch was bedeutet dies konkret? CO₂-Steuer erhöhen, Raumtemperaturen regulieren, Energiepreise weiter anheben? Im Bereich marktwirtschaftlicher Lösungen zur Erreichung der Klimaziele liegt ein doppeltes Dilemma vor: Eine höhere Bepreisung zum Beispiel der Energie führt zwar nach marktwirtschaftlicher Gesetzmäßigkeit zu Einsparungen, allerdings sind einkommensstärkere Menschen wenig preissensibel und damit wäre in dieser Gruppe das Preissignal wenig wirksam, während einkommensschwächere Menschen in einem sozial nicht verträglichen Maße belastet würden.

5. Zusammenfassung

Im Kontext der oben skizzierten Herausforderungen der Bauindustrie stellt sich die Frage nach weiteren Ansätzen zur Reduktion des CO₂ Aufkommens in Bau und Gebäude. Bisherige Ansätze, wie z.B. der Einsatz von Sekundärmaterialien stehen vor langfristigen Herausforderungen durch den Wegfall dieser, neue Ansätze werden erforscht, pilotiert und durch die Industrie gefördert, sind jedoch in vielen Fällen bisher kaum erprobt und erst langfristig in großem Stil zu erwarten. Gleichzeitig zeigen viele der Ansätze enge Wechselwirkungen mit anderen, sich ebenfalls langfristig wandelnden Industriezweigen oder benötigen eine grundlegende Infrastruktur. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie schnell eine Transformation bestehender Anlagen möglich ist.

Während insbesondere die Kreislaufführung von Betonteilen, Baumaterialien sowie Materialien aus dem Abriss im Sinne eines Urban Mining sinnvoll ist, da diese konzentriert dort anfallen, wo eine hohe Bautätigkeit herrscht, stellt sich im Kontext der bereits jetzt hohen Verwertung von Materialien aus dem Abriss die Frage, wie hier noch höhere Verwertungsraten erreicht werden können. Ein Einsatz von bisher im Straßenbau genutzten Sekundärmaterialien im Betonbau der Zukunft ist zwar sinnvoll, eröffnet jedoch auch die Frage danach, ob hierdurch nicht zukünftig verstärkt Primärmaterialien an anderer Stelle verwendet werden.

Zwar gehen sowohl der BBS e.V (2022). als auch der VDZ e.V. von einer in Zukunft sinkenden Nachfrage nach primären Rohstoffen im Baubereich aus, dennoch gilt es

– anknüpfend an Hild & Schulz (2023) – die Frage danach zu stellen, inwiefern es nicht auch ein stärkeres Suffizienzdenken braucht.

Hierbei sind nicht nur die Hersteller von Baumaterialien und somit die direkten Emittenten der „verkörperten Emissionen“ gefragt, vielmehr stellt sich die Frage nach einem allgemeinen gesellschaftlichen Umdenken. Graue Energie und Embodied Carbon stellen daher nicht nur einen Ansatz zur Bewertung von Neubaugebäuden, sondern gleichwohl insbesondere einen Ansatz zur stärkeren Argumentation zur Bewahrung, Renovierung und Anpassung bestehender Gebäude dar.

Somit bedarf es einer umfassenderen Sichtweise, die nicht nur Effizienz im Betrieb und die Bautätigkeit (Bauwende), sondern auch die Nutzung (Gebäudenutzungswende) in die Betrachtung mit einbezieht. Dies würde neue und abwechslungsreiche Städte ermöglichen, aber auch neue Möglichkeitsräume für produktive Nachnutzungen schaffen. Gleichzeitig stellen sich jedoch hierbei Fragen, die auch, aber nicht nur, durch einzelne Wirtschaftszweige wie den Bausektor, sondern auf gesellschaftlicher Ebene angegangen und politisch eingebettet werden müssen.

6. Literatur

- Agora Energie Transition (2022). *Reducing embodied carbon in new buildings: RE200 in France*. Im Internet unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Success_Stories/BP/BP_FR_RE200/A_E_272_Succ_Stor_BP_France_RE200_WEB.pdf Letzter Abruf am 29.08.2023.
- Ammann, I., Brack, N., Claßen, G., Degener, E., Duvernet, C., Franke, J. et al. (2021): *Wohnungs und Immobilienmärkte in Deutschland 2023*. Bonn. Im Internet unter: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/sonderveroeffentlichungen/2021/wim-2020.html>. Letzter Abruf am 29.08.2023
- Bauprofessor - Nutzungsdauer von Gebäuden (o.D.) Im Internet unter: <https://www.bauprofessor.de/nutzungsdauer-gebäude/> . Letzter Abruf am 29.8.2023
- BBS– Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V. (2022). *Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Stein- und Erden-Industrie bis 2040 in Deutschland*. Im Internet unter: https://www.baustoffindustrie.de/fileadmin/user_upload/bbs/Bilder/Aktuelles/2022-04-20_BBS_Rohstoffstudie_01_ONLINE.pdf Letzter Abruf am 29.08.2023.
- BBSR– Bundesinstitut für Bau -, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (2019). *Graue Energie im Ordnungsrecht/Förderung*. Endbericht. Bonn. Im Internet unter: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2017/graue-energie/Endbericht.html?__blob=publicationFile&v=3 . Letzter Abruf am 29.08.2023.
- BBSR– Bundesinstitut für Bau -, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (2020 a). *Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland*. Kurzstudie zu sektorübergreifenden Wirkungen des Handlungsfelds „Errichtung und Nutzung von Hochbauten“ auf Klima und Umwelt. BBSROnline-Publikation , Nr. 17/2020. Bonn. Im Internet unter:

https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2020/bbsr-online-17-2020-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=3. Letzter Abruf am 29.08.2023.

BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (2020b). *Lowtech im Gebäudebereich*. Fachsymposium TU Berlin 17.5.2019. Forschung für die Praxis, Band 21. Bonn. Im Internet unter: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/zukunft-bauen-fp/2020/band-21-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=1. Letzter Abruf am 29.08.2023.

BSBK – Bundesstiftung Baukultur (2021). *Mit Freude sanieren*. Ein Handbuch. Berlin. Im Internet unter: https://www.bundesstiftung-baukultur.de/fileadmin/files/content/BBK_SAN-Web.pdf. Letzter Abruf am 29.08.2023.

BUND BaWü – Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, Landesverband Baden-Württemberg e. V. (2018). *Graue Energie. Abreißen oder sanieren*. BUND Ökologisch Bauen & Renovieren. Im Internet unter: https://www.bund-bawue.de/fileadmin/bawue/Dokumente/Themen/Klima_und_Energie/Oeko-logisch_Bauen_und_Renovieren_2018_Graue_Energie._Abreißen_oder_sanieren.pdf. Letzter Abruf am 29.08.2023.

DED – Dutch Environmental Database (2023). *Environmental performance calculation*. Im Internet unter: <https://milieudatabase.nl/en/environmental-performance/environmental-performance-calculation/>. Letzter Abruf am 29.08.2023.

DGBC – Dutch Green Building Council (2021). *Whole Life Carbon Position Paper*. Im Internet unter: <https://www.dgbc.nl/publicaties/position-paper-whole-life-carbon-44>. Letzter Abruf am 29.08.2023.

Elhacham, E., Ben-Uri, L., Grozovski, J., Bar-On, Y. M. & Milo, R. (2020) *Global human-made mass exceeds all living biomass*. *Nature* 588 (7838), S. 442-444. Im Internet unter: [10.1038/s41586-020-3010-5](https://doi.org/10.1038/s41586-020-3010-5). Letzter Abruf am 29.08.2023.

EU – Europäische Union (2020). *Das Emissionshandelssystem der EU. Kostenlose Zuteilung von Zertifikaten sollte gezielter erfolgen*. Sonderbericht 18/2020. Im Internet unter: <https://www.eca.europa.eu/de/publications?did=54392>. Letzter Abruf am 29.08.2023.

EU – Europäische Union (2021). *Proposal for a Directive Of The European Parliament And Of The Council on the energy performance of buildings (recast)*. Brussels. Im Internet unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021PC0802>. Letzter Abruf am 29.08.2023.

Franke, L., Niemann, A., Varga, Z., Kränkel, T., Jarmer, T., Auer, T. & Nagler, F. (2023). *Einfach Bauen & Messen, Validieren, Rückkoppeln*. München. Im Internet unter: https://www.einfach-bauen.net/wp-content/uploads/2023/05/01-EINFACH-BAUEN-3_Endbericht-mit-Anlage-A1-und-A2.pdf. Letzter Abruf am 29.08.2023.

Global ABC – Global Alliance for Buildings and Construction (2021). *The EU taxonomy – what does it mean for buildings*. Briefing Paper developed by PEEB. Im Internet unter: https://globalabc.org/sites/default/files/2021-05/PEEB_EU_Taxonomy.pdf. Letzter Abruf am 29.08.2023.

Goldmann, M. (2022). *Bauen im Kreislauf*. DAB – Deutsches Architektenblatt 01.2022. Im Internet unter: <https://www.dabonline.de/2022/01/05/gebrauchte-bauteile-recycelt-recyclingfaehige-baumaterialien-cradle-urban-mining/>. Letzter Abruf am 29.08.2023.

- Gugerli, H., Frischknecht, R., Kasser, U. & Lenzlinger, M. (2008). *Merkblatt SIA 2032: Graue Energie im Fokus*. Schweizerisches StatusSeminar «Energie- und Umweltforschung im Bauwesen». Zürich. Im Internet unter: https://www.umwelt-chemie.ch/wp-content/uploads/Graue_Energie_im_Fokus.pdf . Letzter Abruf am 29.08.2023.
- Henger, R. & Voigtländer, M. (2019). *Ist der Wohnungsbau auf dem richtigen Weg?* WP-Report 28/2019. Köln. Im Internet unter: <https://www.iwkoeln.de/studien/ralph-henger-michael-voigtlaender-ist-der-wohnungsbau-auf-dem-richtigen-weg.html> . Letzter Abruf am 29.08.2023.
- Hild, P. & Schulz, C. (2023). *Das Versprechen der Zirkularität*. Standort 47, S. 6-11. Im Internet unter: <https://doi.org/10.1007/s00548-022-008123> . Letzter Abruf am 29.08.2023.
- IEEFA – Institute for Energy Economics and Financial Analysis (2023). *Norway's Sleipner and Snøhvit CCS: Industry models or cautionary tales?* Examining the geologic storage risks of CSS in Norway. Vortrag. Im Internet unter: <https://ieefa.org/resources/presentation-norways-sleipner-and-snohvit-ccs-industry-models-or-cautionary-tales> . Letzter Abruf am 29.08.2023.
- Lauss, L., Meier, A. & Auer, T. (2022). *Uncertainty and sensitivity analyses of operational errors in air handling units and unexpected user behavior for energy efficiency and thermal comfort*. Energy Efficiency 15 (4). Im Internet unter: <https://doi.org/10.1007/s12053021-10013w> . Letzter Abruf am 29.08.2023.
- Lemaitre, C. & Auer, T. (2022). *Bauwende: Jetzt mal ehrlich!* Essay. Im Internet unter: <https://www.nbau.org/2022/10/12/bauwende-jetzt-mal-ehrlich/> . Letzter Abruf am 29.08.2023.
- Neuhoff, K., Vanderborght, B., Ancygier, A., Atasoy, A. T., Haussner, M., Ismer, R. et al. (2014): *Carbon Control and Competitiveness Post 2020: The Cement Report*. Final Report . Climate Strategies. Im Internet unter: <https://climatestrategies.org/wp-content/uploads/2014/02/CS20140226EII-cement-report-final.pdf> . Letzter Abruf am 29.08.2023.
- RDB – Statistische Ämter des Bundes und der Länder, Regionaldatenbank Deutschland (2023a). *Bruttoinlandsprodukt/Bruttowertschöpfung nach Wirtschaftsbereichen- Jahressumme regionale Ebenen*. Code: A 8211401-05-4-B. Im Internet unter: <https://www.regionalstatistik.de/genesis/online?operation=download&code=8211401-05-4-B&option=ffcsv> . Letzter Abruf am 29.08.2023.
- RDB – Statistische Ämter des Bundes und der Länder, Regionaldatenbank Deutschland (2023b). *Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte am Arbeitsort nach Geschlecht, Nationalität und Wirtschaftszweigen Stichtag 30.06.- regionale Ebenen*. Code: 1311407-05-4-B. Im Internet unter: <https://www.regionalstatistik.de/genesis/online?operation=download&code=1311407-05-4-B&option=ffcsv> . Letzter Abruf am 29.08.2023.
- Reimann, W. & Bühlmann, E. (2016). *Erfolgskontrolle Gebäudeenergiestandards 2014 2015*. Bern. Im Internet unter: https://www.econcept.ch/de/projekte/erfolgskontrolle-gebaudeenergiestandards-2014-2015_0/ Letzter Abruf am 29.08.2023.
- Simonen, K., Kestner, D., Yang, F., Roberts, K. & Lemay, L. (2013). *Q7: Embodied Energy vs. Embodied Carbon*. Im Internet unter: <http://structureandsustainability.blogspot.com/2013/04/lca-q7-embodied-energy-vs-embodied.html>. Letzter Abruf am 29.08.2023.
- Sunikka-Blank, M. & Galvin, R. (2012). *Introducing the prebound effect: the gap between performance and actual energy consumption*. Building Research & Information

40(3), S. 260–273. Im Internet unter: <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/09613218.2012.690952?needAccess=true&role=button>. Letzter Abruf am 29.08.2023.

UBA – Umweltbundesamt (2023). *Bauabfälle* Im Internet unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewahlter-abfallarten/bauabfaelle#mineralische-bauabfaelle>. Letzter Abruf am 29.08.2023.

UNEP – United Nations Environment Programme (2019): *Global Resources Outlook 2019. Natural Resources for the Future We Want*. New York: United Nations. Im Internet unter: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/27517> Letzter Abruf am 29.08.2023.

VDZ – Verein Deutscher Zementwerke e. V. (2013). *Verminderung der CO₂-Emissionen*. Beitrag der deutschen Zementindustrie. Monitoring -Abschlussbericht 1990/2012.11. Aktualisierte Erklärung zur Klimavorsorge. Düsseldorf. Im Internet unter: <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/monitoring-abschluss-bericht-1990-2012-verminderung-der-co2-emissionen>. Letzter Abruf am 29.08.2023.

VDZ – Verein Deutscher Zementwerke e. V. (2022). *Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton – Potenziale und Handlungsstrategie* Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton. Düsseldorf. Im Internet unter: https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/VDZ-Studie_Ressourcenroadmap_2022.pdf. Letzter Abruf am 29.08.2023.

VDZ – Verein Deutscher Zementwerke e. V. (2023). *Klimaschutz*. Im Internet unter: <https://www.vdz-online.de/zementindustrie/klimaschutz/uebersicht>. Letzter Abruf am 29.08.2023.

vgbe energy e.V. (2022). *Statistik zur Vermarktung von Flugasche 201-2021*. Essen. Nicht öffentlich.

WGBC – World Green Building Council (2019). *Bringing embodied carbon upfront* Coordinated action for the building and construction sector to tackle embodied carbon. London, Toronto. Im Internet unter: <https://worldgbc.org/advancing-net-zero/embodied-carbon/>. Letzter Abruf am 29.08.2023.

WWF Deutschland – World Wildlife Fund For Nature (2019). *Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie* Hintergrund und Handlungsoptionen. Berlin. Im Internet unter: https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Klimaschutz_in_der_Beton-_und_Zementindustrie_WEB.pdf. Letzter Abruf am 29.08.2023.

/// Zitationshinweis

Angstmann, M , Gärtner, S. (2023). Abriss, Neubau oder Sanierung - CO₂-Emissionen im Gebäudesektor. Nicht nur sparsamer, sondern auch weniger. *Forschung aktuell*, 09/2023. <https://doi.org/10.53190/fa/202309>

/// Autoren

Marius Angstmann ist Mitarbeiter des Forschungsschwerpunkts Raumkapital des Instituts Arbeit und Technik der Westfälischen Hochschule Gelsenkirchen.

Stefan Gärtner ist geschäftsführender Direktor des Instituts Arbeit und Technik der Westfälischen Hochschule Gelsenkirchen.

/// Impressum

Herausgeberin

Westfälische Hochschule Gelsenkirchen
Institut Arbeit und Technik
Munscheidstr. 14
45886 Gelsenkirchen

Redaktion

Claudia Braczko
Telefon: +49 (0)209.17 07-176
E-Mail: braczko@iat.eu

Bildnachweis

Titelbild: Photographie Stefan Gärtner

Mit dem Publikationsformat „*Forschung aktuell*“ sollen Ergebnisse der IAT-Forschung einer interessierten Öffentlichkeit zeitnah zugänglich gemacht werden, um Diskussionen und die praktische Anwendung anzuregen. Für den Inhalt sind allein die Autorinnen und Autoren verantwortlich, die nicht unbedingt die Meinung des Instituts wiedergeben.