

B Gestaltung und Konstruktion (Neubau)

Roadmaps zur Klimaeffizienz

**B 1 Der Weg der deutschen Kalksandsteinindustrie
zur Klimaneutralität bis 2045**

Wolfgang Eden und Zakaria Istanbuly

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung 85	5	Forderungen an die Politik 88
2	Die Kalksandstein-Roadmap – Betrachtung der drei Pfade 85	6	Recycling 89
2.1	Der Referenzpfad 85	7	Fazit 89
2.2	Der Pionierpfad 85		
2.3	Der Klimaneutralitätspfad 86		Literatur 89
3	Ergebnisse 86		
4	Recarbonatisierung 87		
4.1	Pfade ohne Recarbonatisierung 87		
4.2	Pfade mit Recarbonatisierung 87		

1 Einleitung

Wie andere Branchen auch steht die deutsche Kalksandsteinindustrie vor tiefgreifenden Veränderungen, um ihren Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele aus den Abkommen von Paris 2015 und Glasgow 2021 zu leisten.

Zentrale Prozesse in den Kalksandsteinwerken hängen derzeit noch an fossilen Energieträgern. Zur Erreichung der Klimaneutralität ist eine vollständige Abkehr von diesen Energieträgern unabdingbar. Hierfür müssen die bestehenden Anlagen umfangreich angepasst und teilweise neu errichtet werden. Damit geht ein erheblicher Investitionsbedarf einher, der passgenaue staatliche Förderprogramme für Investitionen in den Unternehmen erfordert, beispielsweise im Bereich der Anlagentechnik, um deren erhebliche finanziellen Belastungen zu dämpfen und mittels Modernisierung zugleich schneller zu Emissionsreduktionen zu kommen. Wenn diese zusätzliche Belastung in Zeiten ohnehin steigenden Kostendrucks vollständig von den Unternehmen getragen werden muss, könnte die Ressourcenwende schnell zum Verlust der Wettbewerbsfähigkeit vieler Unternehmen führen. Doch Nachhaltigkeit bedeutet in erster Linie, ein Gleichgewicht zwischen ökologischen, ökonomischen und sozialen Interessen zu finden.

Um in dieser Richtung gut gerüstet zu sein, hat die Kalksandsteinindustrie die Studie „Roadmap für eine treibhausgasneutrale Kalksandsteinindustrie in Deutschland“ bei der unabhängigen Münchener Unternehmensberatung FutureCamp Climate GmbH in Auftrag gegeben [1]. Die Roadmap basiert auf den Daten der aktuellen Umweltproduktdeklaration der Kalksandsteinindustrie aus 2021, Basis sind die dort betrachteten 76 Werke mit Daten aus 2019 [2] und zeigt drei unterschiedliche Wege für die Transformation in Rich-

tung Treibhausgasneutralität bis 2045 in Deutschland (Bild 1), dem Zieljahr der deutschen Klimapolitik. Dabei werden auch die bis zum Jahr 2030 realisierbaren Emissionsreduktionen ausgewiesen. Außerdem stellt die Studie die bis zum Erreichen des Ziels der Treibhausgasneutralität verbundenen Maßnahmen, Kosten und Voraussetzungen dar.

2 Die Kalksandstein-Roadmap – Betrachtung der drei Pfade

2.1 Der Referenzpfad

Der Referenzpfad markiert den Vergleichswert für die weiteren Pfade. In diesem theoretischen Pfad kommen keine neuen Technologien und Produktionsprozesse zum Einsatz, sondern es wird davon ausgegangen, dass der Status quo fortgeschrieben wird. Effizienzsteigerungen sowie notwendige Modifikationen der Produktionsanlagen werden abgebildet. Dabei werden bereits heute bekannte externe Rahmenbedingungen, zum Beispiel der Bezug von klimaneutralem Strom des deutschen Strommixes bis ins Zieljahr 2045 zugrunde gelegt. Der Referenzpfad schreibt die aktuelle Situation der Kalksandsteinindustrie in die Zukunft fort und liefert im Vergleich mit den weiteren Pfaden entscheidende Erkenntnisse zu den entstehenden zusätzlichen Belastungen auf dem Weg zur Klimaneutralität für die Branche.

2.2 Der Pionierpfad

Im Pionierpfad werden größere eigene Anstrengungen unternommen, um dem Ziel der Treibhausgasneutralität näher zu kommen. Allerdings werden noch nicht alle dafür notwendigen Maßnahmen aufgrund bestehen-

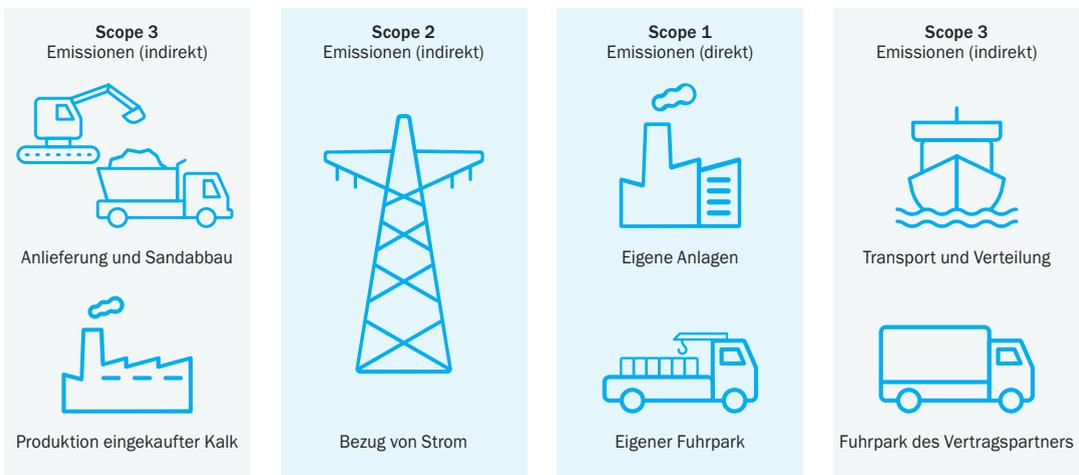


Bild 1. Für die Roadmap berücksichtigte Emissionsquellen (Quelle: FutureCamp)

der Restriktionen flächendeckend umgesetzt. Vor allem sehr innovative Änderungen werden nur von „Pionieren“ der Branche vorgenommen – sie geben daher diesem Szenario den Namen „Pionierpfad“. Hier wird zunächst neben der allgemeinen Effizienzsteigerung die zunehmende Digitalisierung des Produktionsprozesses modelliert. Nun wird der Einfluss von Pionieren herangezogen: Erste Werke setzen komplett neue Technologien auf der Basis von Wasserstoff und erneuerbarem Strom ein. Ziel des Pionierpfads ist, mit betriebswirtschaftlich vertretbarem Mehraufwand den Weg zur Klimaneutralität einzuschlagen. Dennoch werden dabei an der Realität orientierte Grenzen des Machbaren definiert: Das für die Betriebe zusätzlich zur Verfügung stehende Investitionsbudget für die Umsetzung von Maßnahmen zum Klimaschutz ist begrenzt. Allerdings setzt dieser Pfad neben der Reduktion der Emissionen in den Werken bereits eine Verringerung bei den Transporten voraus. In diesem Zusammenhang wird von einer Teilelektrifizierung und Wasserstoffnutzung des LKW-Verkehrs und insbesondere einer Minderung der energiebedingten Vorkettenemissionen des Kalks ausgegangen.

2.3 Der Klimaneutralitätspfad

Im Klimaneutralitätspfad wird auf sämtliche betriebswirtschaftlichen Restriktionen verzichtet. In diesem Pfad wird ermittelt, welche Investitionen nötig sind, um sämtliche notwendigen Maßnahmen zur Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 umzusetzen. Dabei wird keine Rücksicht auf die wirtschaftlichen Auswirkungen dieser Entscheidungen genommen: Die Reduktion der Emissionen auf null bis 2045 wird durch eine Umsetzung aller möglichen Maßnahmen bis zur Zielerreichung rechnerisch erzwungen. In diesem Pfad wird der gesamte Produktionsprozess der deutschen Kalksandsteinindustrie auf neue Technologien umgestellt. Auch die Emissionen aus Transporten werden mithilfe der Umstellung von Transportmitteln und nun auch insbesondere durch Maßnahmen in der Vorkette bei der Kalkproduktion vollständig reduziert. Die dabei entstehenden Kosten werden bestimmt und interpretiert. Da bei der Produktion von Kalksandstein im Klimaneutralitätspfad kein CO₂ mehr freigesetzt wird, die Steine aber während der gesamten Nutzungsdauer fortlaufend CO₂ speichern, führt der Recarbonisierungseffekt dazu, dass die Kalksandsteinindustrie bei diesem Pfad nicht nur klimaneutral, sondern bezüglich der reinen Kalksandsteinproduktion (d. h. ohne Betrachtung der Vorketten) sogar klimapositiv werden kann.

3 Ergebnisse

Die Auswertung der ökobilanziellen Ergebnisse der Kalksandsteine zeigt auf, dass die Umweltwirkungen in allen Umweltkategorien speziell vom Energieverbrauch während des Herstellungsprozesses im Werk (Strom und thermische Energie aus Erdgas) und vor allem dem eingesetzten Branntkalk dominiert werden. Der eingesetzte Sand, die Zuschläge, die Verpackung und der Transport nehmen in diesem Zusammenhang nur eine untergeordnete Rolle ein. Um den Besonderheiten der Branche Rechnung zu tragen, werden in der Roadmap auch wichtige Emissionsquellen aus vorgelagerten Prozessen einbezogen. Zudem werden die Anlieferung der Rohstoffe Kalk und Sand sowie der Transport der Kalksandsteine berücksichtigt, ebenso die Emissionen aus dem Abbau von Sand. Um die Umwelteinflüsse der deutschen Kalksandsteinindustrie abbilden zu können, werden die Emissionen der Branche auf ein virtuelles Durchschnittswerk angewendet, das die derzeit 76 realen Werke in Deutschland repräsentiert.

Die deutsche Kalksandsteinindustrie wird zweifelsfrei ihren Beitrag zum Klimaschutz leisten. Besonders relevante Maßnahmen für die Emissionsreduktion in den Produktionsprozessen der Kalksandsteinindustrie sind dabei

- optimiertes Wärmemanagement in den Werken, z. B. Austausch des Dampferzeugers durch effizientere Anlagen (Bild 2) und Installation von Wärmeenergiespeichern,
- Brennstoffwechsel für die Dampferzeugung zu Wasserstoff und direkter Nutzung von Strom (Elektrokessel),
- Effizienzmaßnahmen durch weitere Digitalisierung (von der Ablaufsimulation bis zum Einsatz künstlicher Intelligenz für die Autoklavensteuerung),
- Umstellung des Fuhrparks auf Fahrzeuge mit Elektroantrieben,
- Reduktion des durchschnittlichen Kalkanteils in den Produkten von derzeit rd. 7 M.-% in der Rezeptur über 6 M.-% bis auf 5 M.-% oder darunter.



Bild 2. Produktion – Härtekessel (Quelle: Bundesverband Kalksandsteinindustrie e. V.)

Grundlage für die Umsetzung dieser Maßnahmen sind hohe Investitionen der Werke in Innovationen und die führen zu relevant steigenden Kosten. Die mittelständisch geprägte Kalksandsteinindustrie braucht daher die Unterstützung der politischen Entscheidungsträger. Hinzu kommt, dass die in der Roadmap von 2021 ausgewiesenen Kosten sich durch die Energiekostenexplosion infolge der aktuellen geopolitischen Ereignisse inzwischen teilweise enorm erhöht haben.

4 Recarbonatisierung

4.1 Pfade ohne Recarbonatisierung

Bereits im Referenzpfad sind Emissionsrückgänge festzustellen, die jedoch trotz verbesserter Rahmenbedingungen das Ziel der Treibhausgasneutralität deutlich verfehlen. Im Pionierpfad gelingt es dagegen, bereits bis 2030 die Emissionen von derzeit rund 780 000 auf 658 000 t CO₂ pro Jahr zu reduzieren und dem Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045 mit dann noch rund 442 000 t CO₂ deutlich näher zu kommen (Bild 3). Das Ziel der Treibhausgasneutralität wird schließlich im Klimaneutralitätspfad erreicht, jedoch unter Inkaufnahme sehr hoher Kosten.

4.2 Pfade mit Recarbonatisierung

Kalksandsteine nehmen im Laufe der Zeit einen beträchtlichen Teil des bei deren Herstellung emittierten CO₂ wieder auf. Deshalb wurde die Recarbonatisierung von Kalksandsteinen für die Kalksandstein-Roadmap quantifiziert und in die Pfade eingerechnet. Bei der Recarbonatisierung handelt es sich um eine natürlich vorkommende chemische Reaktion, deren Ablauf und Größenordnung seit Langem bekannt sind. Das in der Umgebungsluft vorhandene CO₂ dringt dabei langsam in das Porensystem der Kalksandsteine ein und reagiert mit den bei der Autoklavierung entstandenen kristallinen CSH-Phasen zu Calciumcarbonat (CaCO₃). Aus Sicht der CO₂-Bilanz ist die Recarbonatisierung von Kalksandsteinen positiv zu bewerten, denn dadurch werden die CO₂-Emissionen der Kalksandsteinherstellung zum Teil kompensiert. Dieser Vorgang wurde mit zwei eigens für die Kalksandstein-Roadmap durchgeführten Untersuchungsreihen experimentell und rechnerisch bestätigt.

Bereits im Referenzpfad sind merkliche Emissionsrückgänge zu verzeichnen (Bild 4). Bis 2030 von derzeit 780 000 auf 706 000 t CO₂ pro Jahr und bis 2045 auf 568 000 t CO₂. Im Pionierpfad können die Emissionen mit 595 000 t CO₂ pro Jahr deutlich reduziert werden und der Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 mit dann noch 282 000 t CO₂ ganz erheblich näher kom-

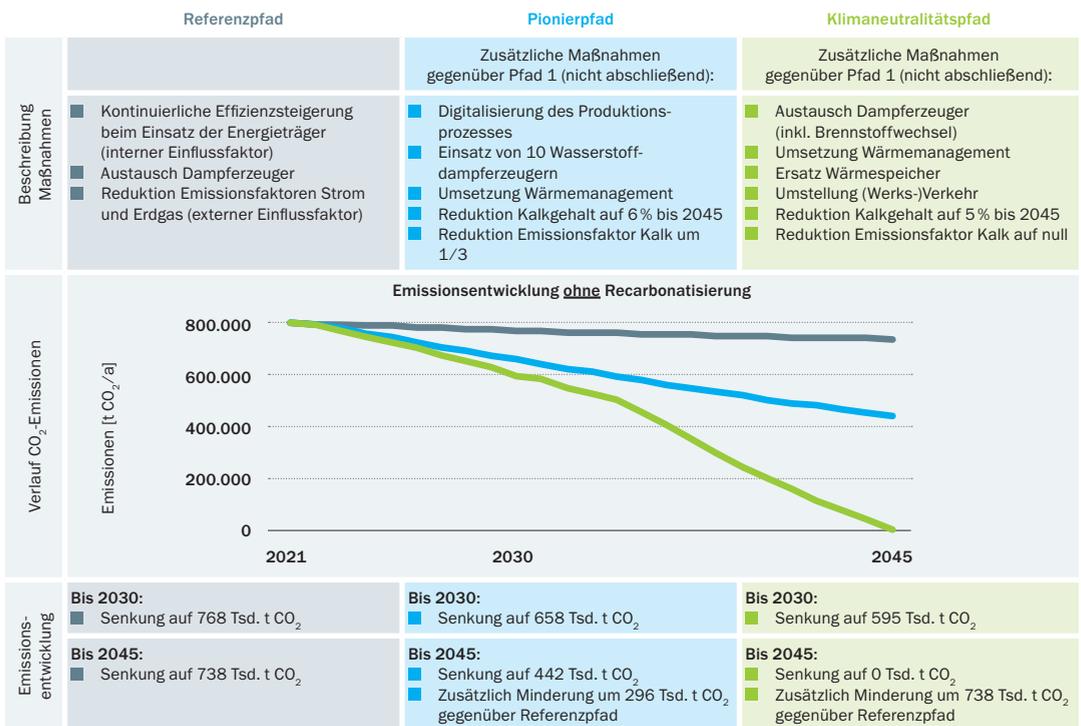


Bild 3. Übersicht der Emissionsentwicklung der drei betrachteten Pfade *ohne* Recarbonatisierung

B Gestaltung und Konstruktion (Neubau)
Geschosswohnungsbau/Kostengünstiges Bauen

**B 4 Recarbonatisierung von zement-
und kalkgebundenen Mauersteinen**

Ronald Rast und Sebastian Pohl

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangssituation: Wohnungsbedarf und Mauerwerksbau	123	5	Quantifizierung der Recarbonatisierung im Gebäudebestand	128
2	Ziele der Untersuchung	126	6	Fazit	131
3	Recarbonatisierung von Mauersteinen	126		Literatur	132
4	Ökobilanzen und CO₂-Kreislauf	127			

1 Ausgangssituation: Wohnungsbedarf und Mauerwerksbau

Der Wohnungsbedarf wird quantitativ aus der künftigen demografischen Entwicklung inklusive der Zuwanderung und qualitativ aus staatlichen Vorgaben zur Entwicklung der Wohnungsbestände bezüglich wesentlicher Eigenschaften, z. B. nach Energieeffizienz und THG-Emissionen gemäß gesetzlichen Vorgaben, abgeleitet. Auf Basis von Bedarfsnormen und gesetzlichen Vorgaben wird dann der Wohnungsbedarf mit dem Wohnungsbestand abgeglichen und daraus ein notwendiger Wohnungsbau abgeleitet.

Der quantitative Wohnungsbedarf wird aus den aktuellen Bevölkerungs-, Haushalts- und Zuwanderungszahlen ermittelt. Das Pestel Institut Hannover hat diese Betrachtungen zum Jahresanfang 2023 unter besonderer Berücksichtigung der Zuwanderungssituation im Jahr 2022 infolge der Ukraine-Kriegs vorgenommen [1]. Zur Ermittlung der Wohnungsmarktsituation zum Jahresende 2022 wird dabei mit rund 1,5 Mio. Personen von einer außergewöhnlichen Zuwanderung ausgegangen. Danach stellt sich die Bevölkerungsentwicklung in Deutschland von 1990 bis 2022 sowie in einem Szenario bis 2045 gemäß Bild 1 dar.

Neben diesem demografischen Wohnungsbedarf, abgeleitet aus einer zunächst weiter zunehmenden Bevölkerungs- und Haushaltsanzahl, besteht auch ein qualitativer Bedarf, der sich aus aktuellen Standards, insbesondere aus den Emissionsminderungszielen des Klimaschutzgesetzes gemäß Bild 2 ableitet. Danach soll der Gebäudebereich bis 2030 die Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Jahr 2020 um rund 43 % senken und bis 2045 Klimaneutralität erreichen.

Dabei gelten von den aktuell 42,8 Mio. Bestandswohnungen seit vielen Jahren rund 10% des Wohnungsbestands – etwa 4,3 Mio. Wohnungen – als technisch und wirtschaftlich nicht mehr sinnvoll sanierbar. Rein quantitativ wird aber auch dieser Wohnraum benötigt, denn die nicht nur kriegsbedingten, sondern auch für die Absicherung des zukünftigen Arbeitsmarkts erforderlichen Zuwanderer aus anderen Ländern sollen in Deutschland eine Wohnung erhalten können. Daher ist ein Ersatz dieser Wohnungen bis 2045 ebenfalls notwendig.

Insgesamt resultiert daraus ein längerfristig erforderlicher Wohnungsneubau von über 350 000 Wohnungen je Jahr, um den demografischen Bedarf abzudecken und den technisch sowie wirtschaftlich nicht mehr sinnvoll sanierbaren Teil des Bestands zu ersetzen. Wie Bild 3 zeigt, liegt das Wohnungsbauziel der Bundesregierung gemäß Koalitionsvertrag, also der Bau von 400 000 neuen Wohnungen je Jahr, sehr nah am Bedarf der tatsächlichen Bautätigkeit in Deutschland.

Viel diskutiert wird Anfang des Jahres 2023, ob die Bundesregierung an der Umsetzung der Wohnungsbauziele gemäß Koalitionsvertrag festhält und auch wirklich alles dafür tut, pro Jahr 400 000 neue Wohnungen, davon 100 000 Sozialmietwohnungen, neu zu bauen. In den letzten 4 Jahren wurde der Beweis erbracht, dass die gesamte Prozesskette Bau in der Lage ist, mindestens 300 000 Wohnungen jährlich neu zu bauen. Ohne Corona und die Auswirkungen des Ukraine-Kriegs wäre es nach Expertenmeinung auch möglich gewesen, die Neubauzahlen im Wohnungsbau nochmals auch 330 000 Wohnungen und mehr zu steigern. Leider ist infolge der Preissteigerungen, der Baukostenentwicklung, der Lieferprobleme, des Zinsanstiegs

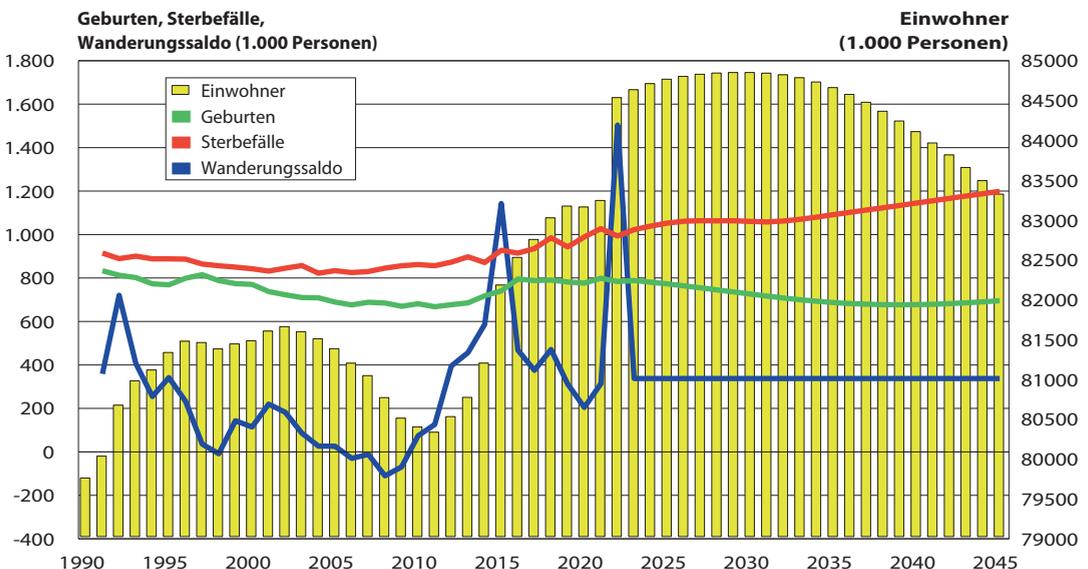


Bild 1. Bevölkerungsentwicklung in Deutschland von 1990 bis 2022 und im Szenario bis 2045 (Quelle: Statistisches Bundesamt, eigene Berechnungen Pestel Institut [1])

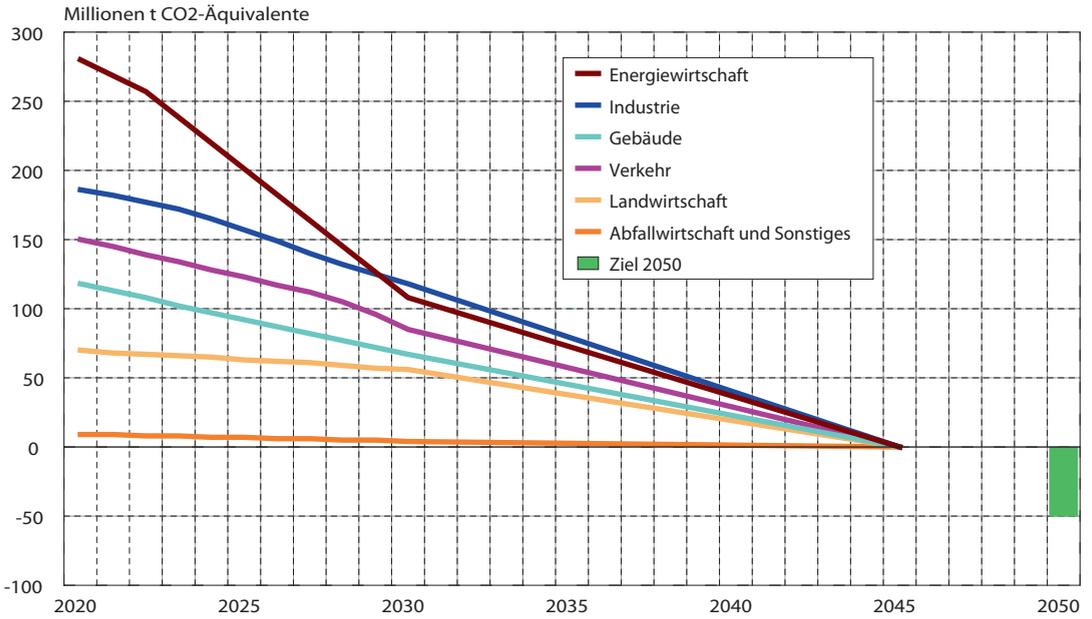


Bild 2. Emissionsminderungsziele des Klimaschutzgesetzes (Quelle: Klimaschutzgesetz des Bundes [1])

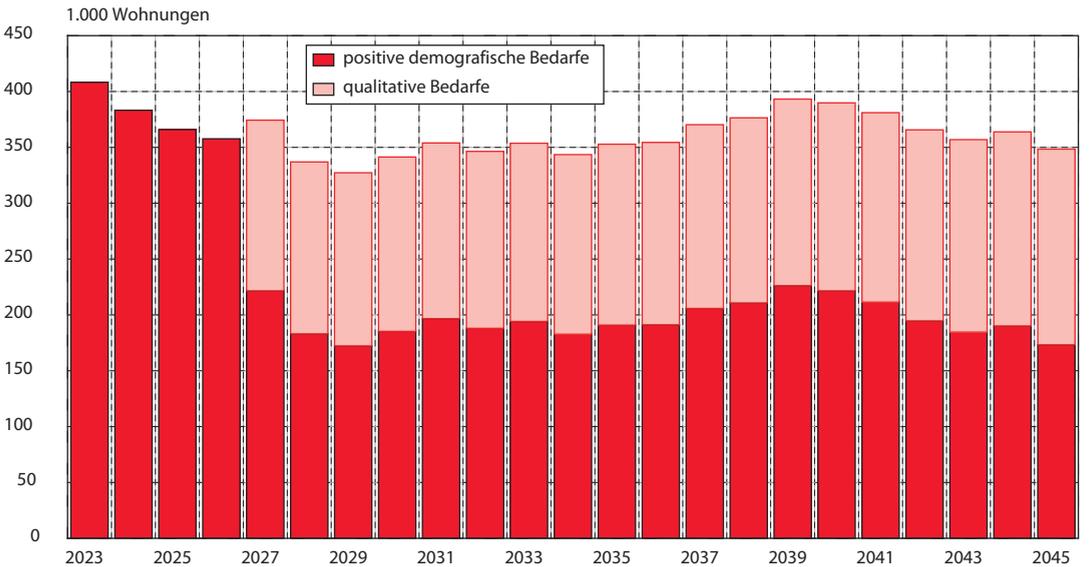


Bild 3. Wohnungsbedarfsentwicklung in Deutschland ab 2023 bei einem Abbau des „Zusatzdefizits 2022“ bis 2026 (Quelle: Berechnungen Pestel Institut [1])

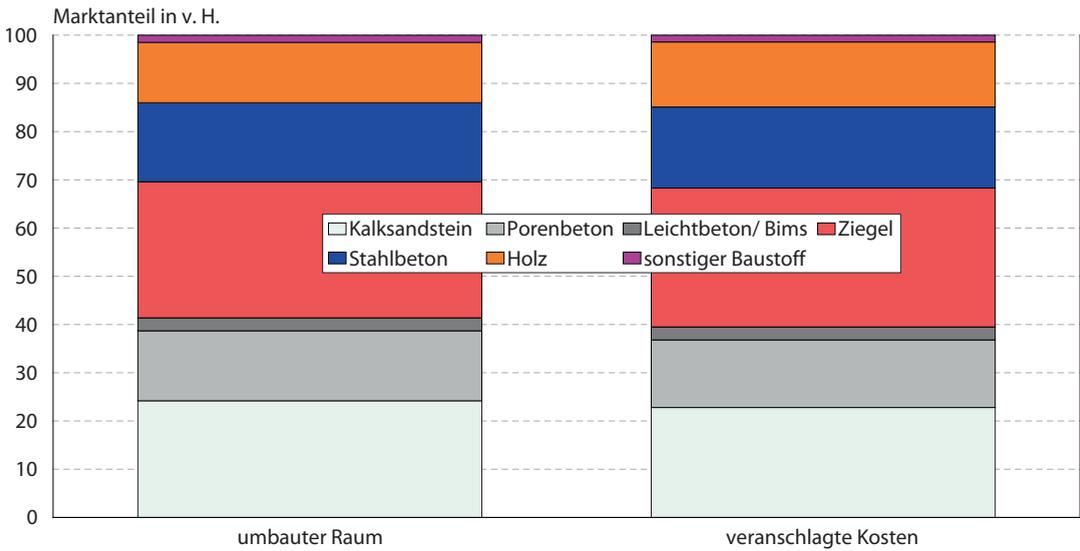


Bild 4. Marktanteil der verschiedenen Wandbaustoffe am Wohnungsneubau (Errichtung neuer Gebäude)
(Quelle: Statistisches Bundesamt, eigene Berechnungen Pestel Institut [2])

Tabelle 1. Umsatz, Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte der Herstellung von Mauerwerksprodukten sowie durch den Neubau von Gebäuden mit Mauerwerk (Quelle: Statistisches Bundesamt, Berechnungen Pestel Institut Hannover in [2])

Aktivität	Umsatz bzw. Produktionswert (Mrd. €)	Wertschöpfung direkt (Mrd. €)	Wertschöpfung indirekt und induziert (Mrd. €)	Wertschöpfung gesamt (Mrd. €)	Erwerbstätige direkt	Erwerbstätige indirekt und induziert	Erwerbstätige insgesamt
Herstellung von Handwerksprodukten	1,931	0,862	1,928	2,79	10 000	29 600	39 600
Bau von Gebäuden mit Mauerwerk ^{*)}	59,7	29,9	57,6	87,5	344 000	835 000	1 179 000

^{*)} Mauerwerksprodukte sind als Vorleistungsbezug in den Berechnungen zum Bau von Gebäuden enthalten

und der Fehler in der staatlichen Förderpolitik die Bereitschaft vieler privater und institutioneller Investoren zum Neubau von Wohnungen deutlich gesunken, sodass anstelle von mehr Wohnungen wahrscheinlich zumindest temporär die Baugenehmigungs- und Baufertigstellungszahlen im zweistelligen Prozentbereich rückläufig sein werden. Das ist nicht bedarfsgerecht und führt zu neuen sozialen Problemen in der Wohnraumversorgung.

In diesem Zusammenhang ist insbesondere mit Blick auf die Klimaschutzziele und den Anteil des Gebäudebereichs daran auch interessant, mit welchen Baustoffen die Wohnungen in Deutschland überwiegend errichtet werden. Die aktuellen Marktanteile dazu wurden in einer Studie des Pestel Instituts Hannover mit dem Titel „Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte des Mauerwerks- und Massivbaus“ zuletzt im Herbst 2022 ermittelt [2]. Grafisch sind die Ergebnisse dazu in Bild 4 ausgewiesen.

Daraus ist erkennbar, dass insgesamt über 70% aller Wohnungen mit Mauersteinen und anteilig über 40% aller neu gebauten Wohnungen gegenwärtig mit zement- und kalkgebundenen Mauersteinen, also Kalksand-, Porenbeton- und Leichtbetonsteinen errichtet werden.

Zur Bewertung der volkswirtschaftlichen Bedeutung des Mauerwerksbaus wurden in der aktuellen Untersuchung des Pestel Instituts Hannover in [2] der Umsatz sowie die Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte ermittelt, die durch die Herstellung von Mauerwerksprodukten sowie durch den Neubau von Gebäuden mit Mauerwerk direkt und indirekt induziert werden. Die genauen Ergebnisse sind Tabelle 1 zu entnehmen. Danach wird mit der Herstellung und Verarbeitung von Mauerwerksprodukten jährlich ein Umsatz von 59,7 Mrd. €, eine direkte Wertschöpfung von 29,9 Mrd. € und eine direkte Beschäftigung von 344 000 Erwerbstätigen induziert. Das sind bereits

volkswirtschaftliche Größenordnungen, die nicht nur aus Klimaschutzgründen eine nähere Betrachtung des Mauerwerksbaus als sinnvoll erscheinen lassen. Das gilt erst recht, wenn man gemäß Tabelle 1 die direkte und indirekte Wertschöpfung und Beschäftigung betrachtet.

2 Ziele der Untersuchung

Der Einsatz von mineralischen Baustoffen in Gebäuden und deren Nutzung hat viele Vorteile. Das erklärt auch, warum über 40 % aller Wohnungsbauten in Deutschland mit zement- und kalkgebundenen Mauersteinen gebaut werden. Dabei handelt es sich konkret um Kalksand-, Porenbeton- und Leichtbetonsteine. Die Außen- und Innenwände aus den genannten Mauersteinen gehören zu den kostengünstigsten Wandkonstruktionen und verfügen je nach Material über sehr gute Eigenschaften bezüglich Wärmedämmung, Wärmespeicherung, Brandschutz und Tragfähigkeit. Sie sind sehr flexibel einsetzbar, weisen eine sehr lange Lebensdauer auf und können auch vergleichsweise einfach während des gesamten Lebenszyklus an Nutzungsänderungen durch veränderte Leitungsführungen sowie Fenster- und Türöffnungen angepasst werden.

Ein jedoch häufig übersehener Aspekt bei Bauteilen aus zement- und kalkgebundenen Mauersteinen ist deren Fähigkeit, über den Lebenszyklus des Gebäudes durch Recarbonatisierung Kohlenstoffdioxid (CO_2) aus der Luft aufnehmen zu können. Diese chemische Reaktion ist ein natürlicher Prozess, der bei zement- und kalkgebundenen Mauersteinen auftritt und zu einer dauerhaften Speicherung von CO_2 in den Wandkonstruktionen des Gebäudes führt. Selbst nach dem Rückbau des Gebäudes bleibt diese CO_2 -Speicherung bei der Wieder- bzw. Weiterverwendung in Recyclingbaustoffen erhalten.

Für Immobilien als Lebensgrundlage und Wirtschaftsgüter mit extrem langen Nutzungsdauern ist es essenziell, dass bei Treibhausgasbilanzen (sog. Ökobilanzen; engl.: Life Cycle Assessments, kurz: LCA) als ein wichtiges Steuerungsinstrument ganzheitlich über den gesamten Lebenszyklus alle Quellen und Senken für Treibhausgasemissionen berücksichtigend und bilanziert werden können. Bei bestimmten Baumaterialien und Konstruktionsweisen, zum Beispiel für biobasierte Baustoffe wie etwa Holz bzw. Gebäude in Holzbauweise, wird dies seit Jahren umgesetzt, indem die temporäre Speicherwirkung für biogen gebundenes CO_2 ökobilanziell abgebildet wird.

Auch bei mineralisch basierten, bindemittel-gebundenen Baustoffen wie Kalksand-, Porenbeton- oder Leichtbetonsteinen sind Prozesse der dauerhaften CO_2 -Speicherung chemisch als sog. Recarbonatisierung seit Jahrzehnten bekannt, standen aber bisher nicht im Fokus bei der Analyse von Bauprodukten und Bauweisen hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeits- und

Klimaschutzqualität über den gesamten Lebenszyklus und konnten auch quantitativ aufgrund fehlender wissenschaftlicher Forschungsergebnisse noch nicht bewertet werden.

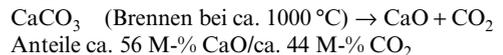
Erst in den letzten drei Jahren haben alle Mauersteinhersteller und ihre Verbände unter Beachtung der politischen Vorgaben des Klimaschutzgesetzes begonnen, derartige Untersuchungen voranzutreiben und daraus in sogenannten Roadmaps [4, 5, 13] Pfade zur Erreichung der Klimaschutzziele sowie zur Herstellung klimaneutraler Mauersteine bis zum Jahr 2045 abgeleitet. Die dabei vorhandenen Potenziale für das Mauerwerk wurden umfassend wissenschaftlich durch das Fraunhofer IBP und die TU München untersucht [6–8]. Der Beitrag gibt dazu einen Überblick und definiert sowie quantifiziert die Recarbonatisierung zement- und kalkgebundener Mauersteine auf dem Weg in die Klimaneutralität.

3 Recarbonatisierung von Mauersteinen

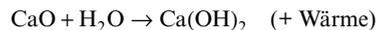
Wenn Wandkonstruktionen aus Kalksand-, Porenbeton- und Leichtbetonsteinen während ihrer Nutzungsphase mit dem CO_2 der Umgebungsluft in Berührung kommen und das CO_2 in das Gefüge des Mauerwerks eindringt, reagiert es dort mit dem Calciumoxid (CaO), das über das Abbinden des Bindemittels beim Autoklavieren oder auch einfachen Lufttrocknen in den sog. CSH-Phasen entstanden ist, und bildet (wieder) Calciumcarbonat (CaCO_3), in dem das aufgenommene CO_2 dauerhaft chemisch gebunden wird, was gleichzeitig auch zu einer gewissen Festigkeitszunahme des Mauersteins führt. Dieser Vorgang wird als Recarbonatisierung bezeichnet.

Die chemischen Grundlagen der Carbonatisierung von Beton und der Recarbonatisierung von zement- und kalkgebundenen Mauersteinen sind schon seit Jahrzehnten in der Baustoffwissenschaft bekannt und wurden u. a. von Prof. *Wesche* in seinem Buch „Baustoffe für tragende Bauteile – Band 2“ aus 1981 [3] als Reaktionsgleichungen wie folgt beschrieben:

– Kalkbrennen



– Kalklöschchen



Heftige chemische Reaktion durch Wasserzugabe

– Recarbonatisierung



Aufnahme von CO_2 aus der Umgebungsluft

Auf diese Weise entsteht ein chemisch bedingter CO_2 -Kreislauf in zement- und kalkgebundenen Baustoffen, der auch gemäß Bild 5 dargestellt werden kann [16].

Umweltwirkungen von Bauprodukten werden z. B. in sog. Umweltproduktdeklarationen (engl.: Environmental Product Declaration, kurz: EPD) dokumentiert. Gemäß vorliegenden Untersuchungen sind

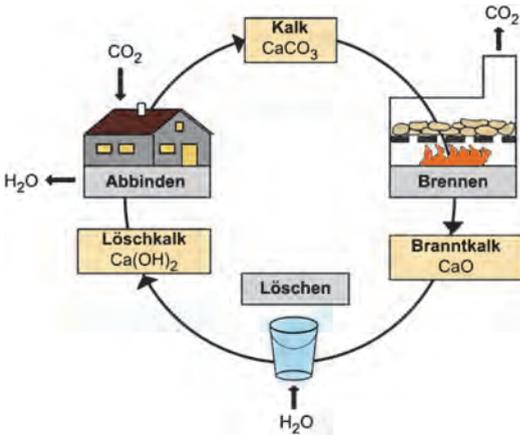


Bild 5. CO₂-Kreislauf in zement- und kalkgebundenen Baustoffen (Quelle: Kurzstudie LCEE [16])

Kalksand-, Porenbeton- und Leichtbetonsteine bis zum Abschluss ihrer Nutzungsphase über 50 Jahre sehr weit bzw. über 80 Jahre nahezu vollständig recarbonatisiert [13]. In unabhängig verifizierten EPDs beispielsweise für Kalksandstein- [14] bzw. Porenbeton [15] wird konservativ von einem Recarbonatisierungsgrad bis maximal 85% ausgegangen, was beim Porenbeton gemäß [15] exemplarisch zu einer CO₂-Aufnahme von ca. 77 kg CO₂ pro m³ Porenbeton führt.

Mit den materialtechnologischen und prozessualen Hintergründen lässt sich nachfolgende **Definition für die Recarbonatisierung** ableiten:

Die Recarbonatisierung ist ein natürlicher Prozess der CO₂-Aufnahme und dauerhaften CO₂-Speicherung in mineralischen, zement- und kalkgebundenen Baustoffen (z. B. Kalksand-, Porenbeton- und Leichtbetonsteinen) über deren gesamten Lebenszyklus, in dem das CO₂ aus der Umgebungsluft in das Baustoffgefüge eindringt und mit dem beim Abbinden des Bindemittels entstandenen Calciumoxids (CaO) unter Zunahme der Festigkeit des Baustoffgefüges wieder zu Calciumcarbonat (CaCO₃) reagiert. Dabei wird der CO₂-Kreislauf für zement- und kalkgebundene Baustoffe teilweise wieder geschlossen, da das bei der Herstellung des Bindemittels stofflich abgespaltene Prozess-CO₂ (bei der sog. Kalzinierung/Entsäuerung) wieder chemisch stabil und dauerhaft im Baustoffgefüge eingelagert wird.

4 Ökobilanzen und CO₂-Kreislauf

Wegen ihrer volkswirtschaftlichen Bedeutung und ihren ermittelten Anteilen an der Emission von Treibhausgasen ist unstrittig, dass die Bau- und Immobilienwirtschaft eine zentrale Rolle bei der angestrebten Klimawende mit dem Ziel einer Netto-Null-Treibhausgasbilanz bis zum Jahr 2045 spielen wird.

Für Immobilien als Lebensgrundlage und Wirtschaftsgüter mit extrem langen Nutzungsdauern ist es dabei essenziell, dass Treibhausgasbilanzen (sog. Ökobilanzen; engl.: Life Cycle Assessments, kurz: LCA) als wichtiges Steuerungsinstrument ganzheitlich, d. h. lebenszyklusorientiert dargestellt und alle Quellen wie Senken für Treibhausgasemissionen berücksichtigt werden.

Umweltwirkungen von Bauprodukten und Gebäuden im Allgemeinen und deren Treibhausgasemissionen bzw. CO₂-Äquivalente im Speziellen werden gemäß normativen Vorgaben der DIN EN 15804 [10] strukturiert nach sog. Modulen (als Repräsentant abgrenzbarer Lebenszyklusphasen) analysiert, berechnet und z. B. in sog. Umweltproduktdeklarationen dokumentiert. An dieser Lebenszyklusphasen-Struktur lassen sich auch Zusammenhänge der Auslösung, Speicherung und etwaigen erneuten Entspeicherung von Treibhausgasemissionen darstellen.

In Lebenszyklusmodulen strukturiert stellt sich der Prozess der Recarbonatisierung und des geschlossenen CO₂-Kreislaufs wie am Beispiel einer aktuellen EPD für Porenbetonsteine in Tabelle 2 quantifiziert und visualisiert dar. Dabei werden in den Modulen A1 bis A3 die durch die Bereitstellung der Rohstoffe (insbesondere Verbrennungs- und Prozess-CO₂ für Zement und Branntkalk) und die durch die Herstellung des Mauerwerks freigesetzten CO₂-Emissionen abgebildet, die im Zuge der Nutzungsphase teilweise durch Recarbonatisierung wieder gebunden und dauerhaft gespeichert werden. Dieser Prozess der Recarbonatisierung wird bei der Betrachtung der Lebenszyklusphasen in Modul B1 unter Nutzung ausgewiesen. Weitere Module im Nutzungsstadium sind

- B2 Instandhaltung,
- B3 Reparatur,
- B4 Ersatz,
- B5 Erneuerung,
- B6 Energieeinsatz für das Betreiben,
- B7 Wassereinsatz für das Betreiben.

Mit dem heutigen Energiemix und einem immer noch hohen Anteil an fossilen Energieträgern kommt dem Modul B6 in der Lebenszyklusanalyse für das gesamte Gebäude noch eine hohe Bedeutung zu – bis zu 2 Drittel der CO₂-Emissionen werden durch den Energieverbrauch für Warmwasser und Heizung während der Gebäudenutzung verursacht. Die Module C1 bis C4 beschreiben das Entsorgungsstadium. Im Gegensatz zum Lebenszyklus holzbasierter Baustoffe wird im Entsorgungsstadium durch mineralische Baustoffe praktisch kein CO₂ wieder in die Atmosphäre emittiert.

B Gestaltung und Konstruktion (Neubau)
Geschosswohnungsbau/Kostengünstiges Bauen
B 6 Kostenoptimiertes Bauen im Wohnungsbau

Dietmar Walberg

Inhaltsverzeichnis

1	Vorbemerkung	157	3	Rationelles Bauen – Kostenoptimiertes Bauen	167
2	Ausgangslage und Rahmenbedingungen für kostenoptimiertes Bauen und bezahlbaren Wohnraum	157	3.1	Grundlagen des kostenoptimierten Bauens	167
2.1	Aktuelle Kostenentwicklung; Baupreise, Bau(werks)kosten und Kostenstand im deutschen Wohnungsbau	157	3.2	Entwicklung der Produktivität im Bauhauptgewerbe	168
2.2	Materialpreise und Verfügbarkeit	160	3.3	Nachhaltigkeit der Konstruktionen	170
2.3	Gestehungskosten für den Wohnungsbau in deutschen (Groß-)Städten und Detailbetrachtung (Fortschreibung) am Beispiel der Freien und Hansestadt Hamburg	163	3.4	Rationalisierungspotenzial	170
2.4	Im Jahr 2017: Bauen für 1800 €/m ² – Im Jahr 2022: 2800 €/m ² !	166	3.5	Gebäudetyp „E“	172
			4	Possible Practice – Best Practice	173
			5	Fazit	174
				Literatur	176

1 Vorbemerkung

Die Schaffung von bezahlbarem und sozialem Wohnraum in bedarfsgerechter Größenordnung ist weiterhin eine der größten Herausforderungen, die an Politik, Bau- und Wohnungswirtschaft derzeit gestellt ist. Die Auswirkungen auf den – den Wohnungsbau dominierenden – Mietwohnungsmarkt sind allerdings derzeit einzigartig schlecht, bedingt durch die besondere ökonomische Gesamtsituation, die es in dieser Form so noch nicht gegeben hat:

Steigende Zinsen bei gleichzeitig steigendem Wohnungsbedarf, sinkender Nachfrage vor allem im Eigentumssektor und zusätzlich stark gestiegenen Herstellungs- und Grundstückpreisen und – dem folgend – stetig anwachsende Bau- und Investitionskosten.

Die Wohnungspreise (Verkauf von Eigentumswohnungen/Bestandshäusern) bewegen sich durch diese finanzierungsbedingt erschwerten Nachfragebedingungen deutlich nach unten, die Mieten allerdings steigen – seit 2021 sogar stark – an [1].

Schon immer war es wichtig, möglichst rationell und damit kostenoptimiert zu bauen. Die schwierigen Rahmenbedingungen aktuell machen dies aber zu einer für den Wohnungsbau, damit für die Bauwirtschaft insgesamt, zu einer existenziellen Notwendigkeit. Es gibt keine ökonomischen Spielräume mehr, die eine andere als die möglichst am Kostenoptimum orientierte Bauweise zulassen.

2 Ausgangslage und Rahmenbedingungen für kostenoptimiertes Bauen und bezahlbaren Wohnraum

Die Bundesregierung hat sich das Ziel gesetzt 400 000 Wohnungen pro Jahr zu bauen, davon 100 000 WE sozial gefördert. Letzteres ist angesichts des dramatischen Rückgangs beleggebundener Wohnungen eigentlich die wichtigere Zielgröße. Allerdings sind diese Zielzahlen weit von der Realität entfernt: Im Jahr 2021 wurden gerade 293 000 Wohnungen gebaut, 2022 werden es (nach Prognose der ARGE//eV¹⁾) ca. 280 000

1) Die Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. (ARGE//eV) ist, gegründet am 21. Februar 1946, die dienstälteste bundesdeutsche Bauforschungseinrichtung im öffentlichen Auftrag und als Wohnungsbauinstitut im Landesauftrag Schleswig-Holsteins zur Begleitung und Qualifizierung der Sozialen Wohnraumförderung tätig. Darüber hinaus ist die ARGE//eV Netzwerk des Bauwesens sowie Fort- und Weiterbildungsträger mit eigenem Fachverlag. Schwerpunkt der Bauforschung ist die permanente Beobachtung der bundesdeutschen Marktsituation im Wohnungsbau hinsichtlich der Bau- und Bauwerkskostenentwicklung sowie der baulichen und qualitativen Standards und deren Angemessenheit. Weiterhin gehören die gemeinnützigen Satzungszwecke, wie Erprobung und Erforschung neuer Bauarten und Baumethoden und die Schaffung von Grundlagen für bezahlbaren Wohnraum zu ihren Kernaufgaben. Die

sein, für 2023 wird davon ausgegangen, dass es noch mal deutlich weniger Wohnungen sein werden. Die aktuellen Baukosten sowie Material- und Energiepreisentwicklungen gelten als eine der Hürden für eine entsprechende Umsetzung in höherer Schlagzahl. Unter anderem gestiegene Qualitätsansprüche an die baulichen Standards (und fortlaufende Verschärfung des Ordnungsrechts), z. B. für die Energieeffizienz und das barrierefreie Bauen, Kfz-Stellplätze und weitere kommunale oder behördliche Auflagen sowie das innerstädtische Bauen mit seinen erhöhten logistischen Anforderungen, haben das kostengünstige Bauen in den letzten Jahren immer weiter erschwert [2].

2.1 Aktuelle Kostenentwicklung; Baupreise, Bau(werks)kosten und Kostenstand im deutschen Wohnungsbau

In mehreren umfassenden Untersuchungen und Umsetzungsbetrachtungen zum bautechnischen und kostenoptimierten Mietwohnungsbau und zu den aktuellen Kostentreibern für den Wohnungsbau [3] in Deutschland hat sich die Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. eingehend mit der systematischen Daten- und Baukostenanalyse von fertiggestellten Neubauvorhaben [4–8] beschäftigt.

Die Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Untersuchungen beziehen sich in dieser Stellungnahme auf den optimierten Wohnungsbau im mittleren Preissegment mit gutem Wohnkomfort (Geschosswohnungsneubau) in Deutschland. Um Baukosten vergleichbar ermitteln und darstellen zu können, ist unter anderem eine ein-

ARGE//eV ist Rationalisierungsinstitut für den Wohnungsbau auf der Basis des Rationalisierungserlasses des Landes Schleswig-Holstein „Förderung des sozialen Wohnungsbaus in Schleswig-Holstein; hier Förderungsmöglichkeiten von Bauvorhaben, Baukostensenkung, bauwirtschaftliche Überprüfungen, Rationalisierung des Baugeschehens und Einschaltung eines Rationalisierungsinstituts“ vom 11. Januar 1972 auf der Basis des „Rationalisierungskatalogs“ des Bundesministers für Städtebau und Wohnungswesen vom 2. Juni 1971. Auf dieser Grundlage basieren auch die Tätigkeiten für andere, primär öffentliche Auftraggeber, wie die Bundesregierung oder den Senat der Freien und Hansestadt Hamburg sowie interessenübergreifenden Netzwerke wie Verbändebündnisse im Rahmen der „Impulse für den Wohnungsbau“ etc. Die ARGE//eV ist eine Konsenseinrichtung, die interessenunabhängig arbeitet und deren ca. 460 weitgehend institutionelle Mitglieder als Architekten und Ingenieure, Rechtsanwälte, die Wohnungsunternehmen Schleswig-Holsteins, Hamburgs und Mecklenburg-Vorpommerns, Kommunen und Landkreise, die Bauwirtschaft und die Verbände der Bau- und Wohnungswirtschaft deutschlandweit, der Bauindustrie, Baustoffindustrie, Baustofffachhandel, die Hochschulen, die Verbraucherzentrale, die Investitionsbank Schleswig-Holstein, das gesamte Spektrum des Bauwesens abbilden sollen. Die ARGE//eV verfolgt satzungsgemäß ausschließlich und unmittelbar gemeinnützige Zwecke im Sinne der Abgabenordnung. Sie ist selbstlos tätig und verfolgt nicht in erster Linie wirtschaftliche Zwecke.



Bild 1. Entwicklung der Bauwerkskosten im Wohnungsneubau (Destatis-Preisindex/ARGE-Kostenindex, Bezug: Typengebäude^{MFF} [9]) unter Berücksichtigung der Mehrwertsteuer im Vergleich zu den allgemeinen Lebenshaltungskosten; Zeitraum: 1. Quartal 2000 bis 1. Quartal 2023 sowie prognostiziert für das 4. Quartal 2023 (Quelle: Statistisches Bundesamt, Controlling und Datenarchiv ARGE//eV sowie Erhebungen im öffentlichen Auftrag in Zusammenarbeit mit der Wohnungswirtschaft)

heitliche Betrachtungsbasis wichtig. Zu diesem Zweck hat die Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e. V. in einer Grundlagenstudie [9] ein modellhaftes Gebäude definiert, das für Mehrfamilienhäuser im Geschosswohnungsbau typisch ist.

In Bild 1 ist vor allem für den Betrachtungszeitraum der letzten zehn bis zwölf Jahre (besonders ersichtlich seit 2021) eine im Vergleich deutlich stärker ausgeprägte Preis- und Kostenentwicklung bei den Bauwerkskosten im Wohnungsneubau zu erkennen.

In diesem Zusammenhang ebenfalls auffallend ist das höhere Niveau des Bauwerkskostenindex und damit verbunden die insbesondere im vergangenen Jahrzehnt angestiegene Differenz zum Baupreisindex einschließlich markanter Sprünge im Verlauf der Bauwerkskostenentwicklung. Zum Kostenstand des 1. Quartals 2023 befindet sich der Kostenindex gegenüber dem Bezugszeitpunkt des 1. Quartals 2000 bei 240 Indexpunkten und liegt somit um 34 Punkte über dem Baupreisindex. Die Differenz gegenüber dem Index für die Lebenshaltungskosten fällt allerdings mit 87 Punkten noch deutlich höher aus. Beachtenswert ist hierbei auch der vorhandene Abstand des Lebenshaltungskostenindex zum Baupreisindex. Seit den Jahren 2010/2011 entwickeln sich die Baupreise in einer höheren Intensität als die allgemeine Teuerung – seit 2015 mit einer immer stärkeren (beschleunigten) Ausprägung.

Von einem „Explodieren“ der Baupreise kann aber grundsätzlich keine Rede sein, da sich diese viele Jahre analog zur Inflations- oder Preissteigerungsrate entwickelt haben, und jetzt auch die Ergebnisse von unter anderem außerordentlichen Preissteigerungen für bestimmte Materialien bemerkbar werden. Dramatischer und tiefgreifender ist hingegen die Entwicklung bei den

Bauwerkskosten. Sie kennzeichnen die Kosten, die zum jeweiligen Zeitpunkt entstehen, wenn ein Quadratmeter Wohnraum in einem Mehrfamilienhaus nach den gesetzlichen, normativen und sonstigen Mindeststandards, die in Deutschland gelten, geschaffen wird.

Eine Sondersituation stellt der vorhandene „Knick“ in der Indexentwicklung vom 2. Quartal 2020 zum 3. Quartal 2020 dar. Für diesen Zeitraum wurde vor dem Hintergrund der Corona-Pandemie und ihrer u. a. wirtschaftlichen Folgen in Verbindung mit der auf die Dauer von Juli 2020 bis Dezember 2020 begrenzten Mehrwertsteuersenkung eine verstärkte Dynamik mit tendenziell negativen Entwicklungen bei den Baupreisen und -kosten festgestellt.

Hingegen sind die Baupreise und Baukosten seit dem 1. Quartal 2021 unter anderem aufgrund von instabilen globalen Lieferketten und der damit verbundenen Materialknappheit bei bestimmten Bauprodukten in einen stark ansteigenden Entwicklungstrend übergegangen, welcher in seiner Intensität durch den russischen Überfall auf die Ukraine am 24. Februar 2022 und die damit einhergehenden Schwierigkeiten und Einschränkungen für die Bauwirtschaft nochmals beschleunigt wurde.

Ferner hinzugekommen ist, dass bei den Baukosten (Ausbau technisch) durch die Änderung des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) zum 1. Januar 2023 und den damit verbundenen erhöhten Anforderungen im Neubau (weitere Reduzierung des zulässigen Jahres-Primärenergiebedarfs) diese bereits sehr schwierige Situation zusätzlich verschärft wurde – weshalb sich Baukosten und Baupreise im 1. Quartal 2023 weiter *auseinanderentwickelt* haben.

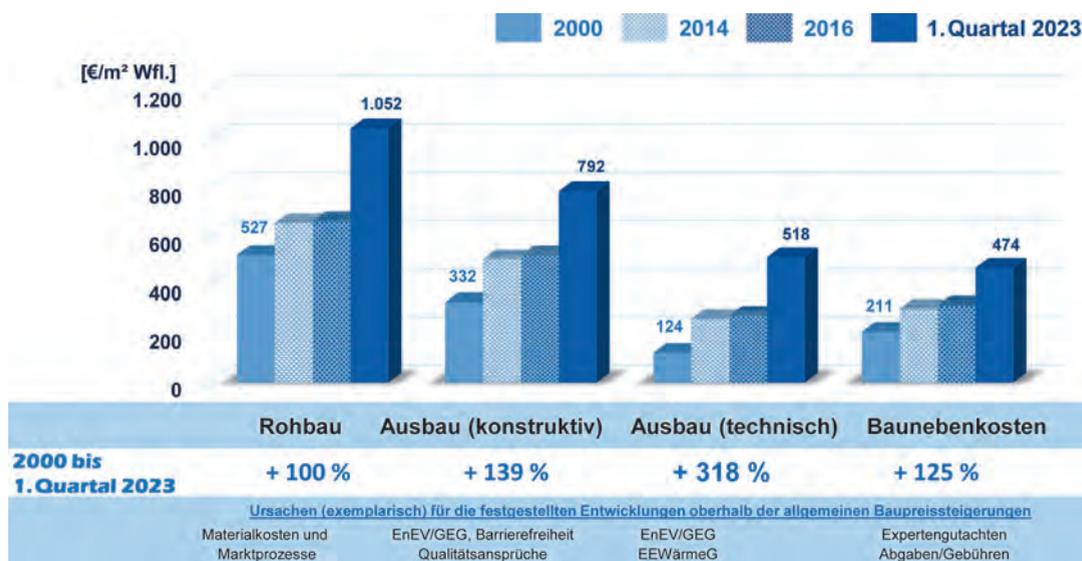


Bild 2. Entwicklung der Bauwerkskosten im Wohnungsneubau (ARGE-Kostenindex, Bezug Typengebäude^{MFH} [9]) unter Berücksichtigung der Mehrwertsteuer, differenziert nach übergeordneten Leistungsbereichen unter Nennung der Baunebenkosten; Zeitraum: 1. Quartal 2000 bis 1. Quartal 2023; Kostenangaben in €/m² Wohnfläche (Quelle: Controlling und Datenarchiv ARGE//eV sowie Erhebungen im öffentlichen Auftrag in Zusammenarbeit mit der Wohnungswirtschaft)

Vor dem Hintergrund der Auswirkungen der Corona-Pandemie sowie des andauernden Ukraine-Krieges mit teilweise massiven Preisanstiegen für Brennstoffe, erdölbasierte Baustoffe sowie bestimmter Bauprodukte, ist prognostisch für den Verlauf des Jahres 2023 nicht von einer schnellen Normalisierung der Baupreis- und Baukostenentwicklung auszugehen.

Die mit Abstand stärkste Kostenentwicklung ist im Bereich der Bauwerkskosten im technischen Ausbau festzustellen: Gegenüber dem Basisjahr 2000 wird im 1. Quartal 2023 eine Kostensteigerung in Höhe von 318 % deutlich (Bild 2). Auch der konstruktive Bereich des Ausbaus weist eine verhältnismäßig hohe Kostenentwicklung in Höhe von 139 % gegenüber dem Jahr 2000 auf. Dies ist unter anderem auf höhere Anforderungen und Ansprüche im Zusammenhang mit der Energieeffizienz [6], der Barrierefreiheit sowie den sich veränderten Qualitätsansprüchen im Wohnungsbau zurückzuführen. Die niedrigste Kostensteigerung mit 100 % entfällt auf den Rohbau. Hier liegt die Entwicklung über der allgemeinen Teuerung, aber noch knapp unter den Veränderungen bei den Baupreisen (Bild 3).

Die Tatsache einer sich ändernden Verteilung bei den Bauwerkskosten hat nicht nur Einfluss auf die Höhe der Rohbau- und Ausbaupreisen, sondern auch auf die Nutzungsdauer von Wohngebäuden.²⁾ Die mittlere Nutzungsdauer von Gebäuden ergibt sich aus den anteiligen Kosten von Bauteilen in Verbindung mit den entsprechenden Nutzungsdauern und der damit verbundenen Ersatzhäufigkeit und liegt damit heute bei dieser Betrachtungsart eines repräsentativen (Referenz-)Wohngebäudes nur noch bei ca. 36 Jahren. **Die Untersuchungen zeigen, dass die Entwicklung von Qualitätsstandards im Wohnungsbau im Hinblick auf die Bauwerkskosten insbesondere zur Realisierung bezahlbaren Wohnraums inzwischen ausgereizt ist [7, 8, 10–12].**

2) Definition aus „Nutzungsdauertabellen für Wohngebäude“ (Pfeifer, Bethe, Fanslau-Görlitz, Zedler): „Die Nutzungsdauer von Bau- und Anlagenteilen von Wohngebäuden ist der Zeitraum der geplanten Nutzung bei gleichbleibend dauernden Ansprüchen, Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit und Nutzungsgerechtigkeit“, die Nutzungsdauer kann sich somit teilweise deutlich von der Lebensdauer unterscheiden.