

Julian Bischof, Stefan Swiderek

Auf dem Weg zu einem klimaneutralen Gebäudebestand

Die Klimaschutzvorgaben der Bundesregierung und der EU gehen davon aus, dass bis 2050 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen (THGE) von 95 % gegenüber 1990 nötig ist, um den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur entsprechend des Übereinkommens von Paris auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen (United Nations 2015). Mit der Novellierung des Klimaschutzgesetzes in 2021 (Deutscher Bundestag 2021) wurde dieses Ziel noch einmal angepasst und mit Zwischenschritten konkretisiert. Bis zum Jahre 2045 soll eine Netto-Treibhausgasneutralität erreicht werden. Manche Kommunen haben sich in ihrem Einflussbereich noch ehrgeizigere Ziele gesetzt. Durch den Krieg in der Ukraine hat die rasche Abkehr von fossiler Energie zusätzlich an Dringlichkeit gewonnen. Deshalb besteht auf allen Ebenen – Produktion, Mobilität, Gebäude – hoher Handlungsdruck.

Was bedeutet dies für den Gebäudebestand Deutschlands? Welche Maßnahmen müssen im Hinblick auf Energieeffizienz, Energieversorgung und Bauweisen umgesetzt werden, um die hier emittierten Treibhausgase entsprechend drastisch zu verringern?

Zielvorgaben für den Gebäudesektor

Je nach Bilanzierungsmethodik und Annahmen variieren die Zielvorgaben, die sich aus einer Reduktion der Treibhausgasemissionen (THGE) im oben genannten Umfang für den Gebäudesektor ergeben. Nach Ermittlungen des IWU (Großklos et al. 2019) dürfen, um das 95 %ige Reduktionsziel zu erreichen, in der Nutzungsphase von Wohngebäuden nur noch jährlich 2,6 kg CO₂äq pro m² Wohnfläche für Beheizung, Warmwasserbereitung und Klimatisierung emittiert werden. Dazu muss der Energieverbrauch erheblich gesenkt werden und die verbleibende zukünftige Energieversorgung weitgehend regenerativ erfolgen (Großklos et al. 2019; Diefenbach et al. 2019). Denn dieser Wert ist selbst für ein Gebäude mit einem guten KfW-Effizienzhaus-40-Standard und einer Wärmepumpenbeheizung nur zu erreichen, wenn das CO₂-Äquivalent von Strom von heute 505 g/kWh zukünftig auf unter 200 g/kWh reduziert worden ist oder der Strom der Wärmepumpe zu mehr als 60 % lokal mit einer Photovoltaikanlage erzeugt und zeitgleich verbraucht wird.

Mit sinkendem Energieverbrauch in der Nutzungsphase gewinnt der Verbrauch bei der Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäude an Gewicht (Bischof und Duffy 2022). Über den Lebenszyklus des Gebäudes hinweg erreicht der Anteil dieser sog. grauen THG-Emissionen bei geltendem gesetzlichem Gebäudeenergiestandard etwa 20–25 % der gesamten THGE (Röck et al. 2020). Bei hocheffizienten Gebäuden, z. B. im KfW EH 40- bzw. Passivhaus-Standard erreicht dieser Anteil schon 45–50 % und in Extremfällen sogar mehr (Röck et al. 2020; Mirabella et al. 2018).

Entsprechend vorliegender Studien können aktuelle Neubauten für die grauen THG-Emissionen Werte von etwa 450 kg CO₂äq/m² bzw. von 9 kg CO₂äq/(m²·a) und niedriger über eine Gebäudelebenszyklusbetrachtung von 50 Jahren erreichen (Mahler et al. 2019; Idler et al. 2019; Habert et al. 2020; SIA 2040). Für Sanierungen werden 300 kg CO₂äq/m² bzw. 5 bis 6 kg CO₂äq/(m²·a) als derzeit realisierbar angegeben (SIA 2040). Diese Werte beziehen sich auf das gegenwärtige Energiesystem und sollten als Obergrenze eingehalten werden. Sie zeigen auch auf, dass die aktuell angestrebten grauen THGE im Neubau beim Dreifachen dessen liegen, was zur Zielerreichung an THGE für die Nutzungsphase in 2045 zulässig ist und bei der Sanierung noch beim Doppelten. Letztlich kann erst durch die weitere Dekarbonisierung aller Bereiche Klimaneutralität über den gesamten Lebenszyklus der Gebäude erreicht werden.

Zur Zielerreichung sind die gesamten THGE über den Lebenszyklus zu verringern, d. h. sowohl die THGE der Nutzungsphase (nTHGE) als auch die aus der Herstellungs- bzw. Sanierungsphase (gTHGE). Da letztlich auch die Flächeneffizienz ausschlaggebend ist, sollten flächenspezifische Zielwerte zudem durch nutzerbezogene Zielwerte ersetzt werden. Hierbei sollte zur Verwirklichung des Ziels Klimaneutralität im Jahr 2045 der Gebäude-Zielwert von 0,5 t CO₂äq/ (Person · a) für Wohngebäude erreicht werden.

Reduktion der grauen Aufwendungen von Gebäuden

Um graue THGE zu reduzieren sind insbesondere Anstrengungen zur Verminderung des Flächenverbrauchs pro Kopf sinnvoll. Eine große Rolle spielt auch der Haustyp: Im Vergleich zu den Einfamilienhäusern (EFH) weisen

Mehrfamilienhäuser (MFH) aufgrund ihrer kompakten Bauweise geringere gTHGE pro m² Wohnfläche auf. So verursachen bei Bauausführungsarten mit geringen Umweltauswirkungen EFH pro m² fast das Dreifache an gTHGE als MFH. (Wöhrle, Hutter and Weg, 2017).

Weitere Einflussfaktoren sind eine Verlängerung der Nutzungsdauer bzw. der Instandhaltungszyklen durch eine robuste Bauweise (Verwendung langlebiger Produkte, Einplanung von Umnutzungsmöglichkeiten), THGE-sparende Konstruktionsweisen sowie die Verwendung von THGE-armen Materialien wie Mineralwolle oder aus nachwachsenden Rohstoffen.

Die beiden Tabellen auf Seite 3 zeigen den hohen Einfluss, den die Wahl der Ausführungsoption bei verschiedenen Maßnahmen am Gebäude in Bezug auf den grauen Energieeinsatz hat. Die Lage der Maßnahme in der ersten Spalte der Y-Achse gibt qualitativ an, ob sie im Vergleich zu anderen Maßnahmen typischerweise einen größeren oder kleineren grauen Energieaufwand pro m² Bauteilfläche besitzt. Die horizontale Reihung zeigt die Ausführungsoptionen in der Reihenfolge ihres grauen Energieaufwands pro m² Bauteilfläche. Fensterrahmen und Verglasung verursachen z. B. die größten grauen Energieaufwendungen pro m² Bauteilfläche, die je nach Ausführungsoptionen zwischen 10,1 und 23,4 kWh/(m²BTF*a) reichen können. Bei der Dämmung einer Kompaktfassade mit einem U-Wert von 0,20 W/(m²*K) stehen Ausführungsoptionen mit einem Aufwand an grauer Energie zwischen 2,3 kg/m² (EPS-Graphit) und 5,4 kg/m² (XPS) zur Verfügung.

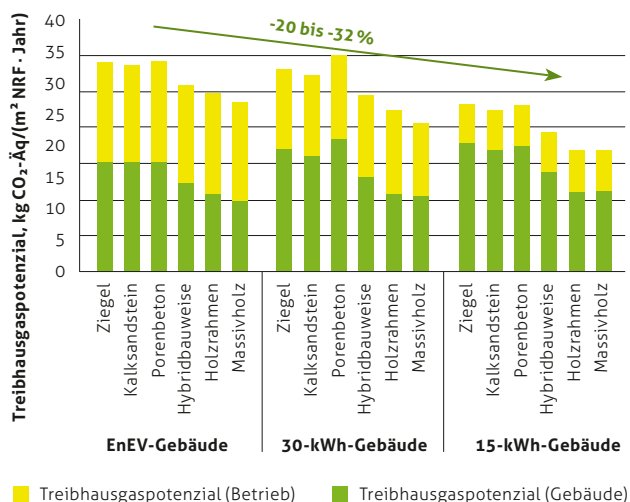
Aber nicht nur die energetisch relevanten Maßnahmen haben einen Einfluss auf die graue Energie, auch die Innenteile, Fassadenbekleidungen, Dacheindeckungen und Bodenbeläge haben erheblichen Einfluss auf die graue Energiebilanz. Einen Überblick über die Auswirkungen von verschiedenen Ausführungsvarianten bietet Tabelle 2.

Hierbei besitzen tendenziell Ausführungen aus nachwachsenden Rohstoffen, welche nur wenig Verarbeitung bzw. Veredelung erfahren haben, die geringeren grauen Aufwendungen. Jedoch müssen letztlich die Lebenszyklusaufwendungen betrachtet und dazu auch die Robustheit bzw. die voraussichtlichen Austauschzyklen in die Bewertung miteinbezogen werden.

In Bezug auf die Konstruktion der Hüllflächen ist bei der Auswahl auch der erhebliche Einfluss auf den Energiebedarf bzw. die THGE der Nutzungsphase abzuwägen. Für die bei einem Neubau erreichbaren gTHGE ist jedoch letztlich die Art der Umsetzung und nicht der Gebäudeenergiestandard ausschlaggebend. Verschiedene Studien zur Außenwandkonstruktion (BLfU 2018; Idler, Mahler and Gantner, 2019; Mahler et al., 2019; Schneider et al. 2015; Wöhrle, Hutter and Weng, 2017) weisen nach, dass die grauen THGE bei demselben Energiestandard je nach Bauweise und Art der Umsetzung sehr unterschiedlich ausfallen. Vor allem der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen kann die Umweltauswirkung deutlich reduzieren und auf ein niedriges Niveau unabhängig vom Gebäude-

energiestandard bringen. Hierbei verliert auch der Einfluss der Dämmstoffdicken auf die grauen THGE an Bedeutung (Wöhrle, Hutter and Weng, 2017). Abbildung 1 zeigt das Zusammenspiel von Nutzungsphase und Nicht-Nutzungsphase am Beispiel eines Einfamilienhauses mit verschiedenen Gebäudeenergiestandards und Bauweisen.

Abbildung 1: Treibhausgasemissionen verschiedener Gebäudeenergiestandards und Bauweisen inklusive der Anlagentechnik, Austausch und Wartung über eine Gebäudelebenszeit von 50 Jahren.



Für die Berechnung verwandtes Versorgungssystem ist eine Luft-Wasser-Wärmepumpe. Quelle: BLfU, 2018, Seite 13, Abb. 13.

Lebenszyklus-Treibhausgasemissionen bei der Wärmebereitstellung

Je effizienter die Gebäudehülle, desto geringer ist der Einfluss der Heiztechniken auf die Lebenszyklusaufwendungen. Ein Vergleich der spezifischen auf die kWh Endenergie bezogenen THGE aus Betrieb und Herstellung, Transport und Entsorgung von Heizungssystemen zeigt weiterhin, dass die fossilen Heizsysteme die höchsten THGE/kWh Endenergie aufweisen. Gefolgt werden diese von den elektrischen Wärmepumpensystemen und schließlich den auf nachwachsenden Brennstoffen basierenden Direktverbrennern Pellet- und Holzhackschnitzelkesseln. Allerdings ist die Biomassenutzung nur beschränkt ausbaubar (siehe unten). Deshalb und da die weitere Erhöhung des erneuerbaren Energieanteils im Stromnetz die Treibhausgasemissionen elektrisch betriebener Wärmeerzeuger stetig senkt, kommt den elektrisch betriebenen Wärmepumpensystemen für eine zukunftsfähige Wärmeerzeugung eine entscheidende Rolle zu.

Die ergänzende Wärmebereitstellung durch eine Solarthermieanlage verringert die spezifischen THGE außer bei Biomasseheizsystemen um weitere 10–25 % (Dunkelberg and Weiß, 2016).

Tabelle 1: Übersicht von energetischen Baumaßnahmen in verschiedenen Ausführungsoptionen mit grauem Energieeinsatz pro m² Bauteilfläche.

Einfluss der Maßnahmen	hoch	min.	max.	Holz, 2-IV	Holz, 2-VSG	Holz, 3-IV	Holz/Metall, 3-IV	Kunststoff, 3-IV	Metall, 3-IV	
				10,1	23,4	10,1	14,5	16,3	18,3	21,3
	niedrig	min.	max.	EPS-Graphit, 15 kg/m ³	Steinwolle, 100 kg/m ³	Weichfaserplatten, 150 kg/m ³	EPS, 20 kg/m ³	PUR/PIR, 33 kg/m ³	XPS, 33 kg/m ³	
				2,3	5,4	2,3	2,5	3,1	3,5	3,9
	niedrig	min.	max.			Glaswolle	EPS	Steinwolle	XPS	
1,7				4,3		1,7	1,8	1,9	4,3	
niedrig	min.	max.	Zellulose (Holz)	Schafwolle (Holz)	Glaswolle (Holz)	Steinwolle (Holz)	EPS (Metall)	PUR/PIR (Metall)		
			0,5	3,5	0,5	0,5	0,7	0,8	2,6	3,5
niedrig	min.	max.	Zelluloseflocken, 60 kg/m ³	Schafwolle, 30 kg/m ³	Steinwolle, 32 kg/m ³	Glaswolle, 22 kg/m ³	Zelluloseflocken mit 10 mm Dreischichtplatte, 60 kg/m ³	Weichfaserplatte, 55 kg/m ³		
			0,3	0,8	0,3	0,4	0,6	0,7	0,8	0,8
		Einfluss der Maßnahmenausführung								
		niedrig			hoch					

Zusammenfassung auf Basis von (EnergieSchweiz 2017a, 2017b). Die Werte beziehen sich auf die jeweilige Bauteilfläche und sind über die im SIA-Merkblatts 2032 aufgeführten Nutzungsdauern aufgeteilt, so dass das ein Vergleichswert in kWh/m²a wie beim Gebäudenutzenergieverbrauch entsteht.

Alle Angaben zur grauen Energie in kWh/m²_(BTF) · a
Alle U-Werte in W/m² · a

Tabelle 2: Übersicht von Baumaßnahmen in verschiedenen Ausführungsoptionen mit grauem Energieeinsatz pro m² Bauteilfläche

Einfluss der Maßnahmen	hoch	min.	max.		Zementstein 12 cm	Kalksandstein 12 cm	Holzständer 10 cm (Beplankung beidseitig 12,5 mm GKB)	Metallständer 10 cm (Beplankung beidseitig 12,5 mm GKB)	Backstein, 12,5 cm	
				1,2	3,7	1,2	2,6	2,8	3,0	3,7
	niedrig	min.	max.	Korkparkett, geölt, versiegelt, 5,3 mm	Laminat 8,5 mm	Parkett, 2-Schicht versiegelt, 11 mm	PVC homogen, 2 mm	Keramik, 9 mm	Naturstein poliert, 15 mm	
				0,4	5,1	0,4	1,4	1,5	1,9	2,3
	niedrig	min.	max.	Holzschalung (Holz)	Keramikplatten (Holz)	Faserzementplatten (Holz)	Faserzementplatten (Metall)	Bronzeblech (Metall)	Glas (Metall)	
0,2				3,6	0,22	1,06	1,26	2,8	3,2	3,6
niedrig	min.	max.	Lehmputz	Weissputz	Kunststoffputz	Weissputz, gestrichen auf Wasserbasis	Weissputz, gestrichen auf Lösungsmittelbasis	Keramik im Dünnbett		
			0	2,3	0	0,1	0,2	0,2	0,3	2,3
niedrig	min.	max.	Faserzement-schindeln	Betonziegel	Tonziegel	Faserzementplatten	Kupferblech	Titanzinkblech		
			0,6	2,2	0,6	0,6	1,1	1,2	1,2	2,2
		Einfluss der Maßnahmenausführung								
		niedrig			hoch					

Zusammenfassung auf Basis von (EnergieSchweiz 2017a, 2017b). Die Werte beziehen sich auf die jeweilige Bauteilfläche und sind über die im SIA-Merkblatts 2032 aufgeführten Nutzungsdauern aufgeteilt, so dass das ein Vergleichswert in kWh/m²a wie beim Gebäudenutzenergieverbrauch entsteht.

Alle Angaben zur grauen Energie in kWh/m²_(BTF) · a
Alle U-Werte in W/m² · a

Obwohl zusätzliche Gebäudetechnik wie Photovoltaik, Solarthermie, Energiespeicher oder Lüftungsanlagen einen Großteil der grauen THGE der Gebäudeanlagentechnik verursacht, ist ihr Einsatz dennoch sinnvoll (Wöhrle, Hutter and Weng, et al. 2017). Sie substituiert direkt fossile Energieträger oder verringert den Energiebedarf und reduziert so die TGHE im Lebenszyklus insgesamt.

Energieversorgung für einen klimaneutralen Gebäudebestand

Der Anteil der erneuerbaren Energien hatte in Deutschland 2019 bei der Stromversorgung bereits 42,1 % erreicht, beim Wärmeverbrauch lag er jedoch erst bei 14,5 %; hier hat sich seit 2012 wenig verändert (Umweltbundesamt 2020). Ein Schlüssel zur Erreichung der Klimaneutralität von Gebäuden ist die lokale Erzeugung erneuerbarer Energie, ein weiterer die Wärmeversorgung durch die Nutzung ortsfern erzeugter erneuerbaren Stroms z. B. aus offshore Windkraftanlagen. Biomasse sollte aufgrund der Nutzungskonkurrenz z. B. für Ernährung, ökologischer Probleme des Energiepflanzenanbaus, Verlust von Kohlenstoffsenken sowie begrenzter Potenziale in Deutschland (Diefenbach et al. 2019) nur im Ausnahmefall eingesetzt werden.

Daraus folgt:

- Bei allen Gebäuden müssen die vorhanden nutzbaren Flächen möglichst vollständig mit Photovoltaikmodulen belegt werden, um den externen Energiebezug zu reduzieren (Wöhrle et al. 2017).
- Im Sommer darf zur Warmwasserbereitung kein direkter oder indirekter Brennstoffverbrauch erfolgen (Diefenbach et al. 2019). Die Warmwasserbereitung kann über thermische Solaranlagen, Photovoltaik mit Wärmepumpen oder ggf. mit Heizstäben in der Regel abgedeckt werden (Großklos et al. 2019).
- Die Wärmeversorgung sollte möglichst über hocheffiziente Wärmepumpen erfolgen, um im Winter über Windstrom heizen zu können und die Sektorkopplung zu gewährleisten (Diefenbach et al. 2019).
- Um kurzzeitige Flauten überbrücken zu können und Lastspitzen im Stromnetz zu begrenzen, sind mittelfristig vor allem Energiespeicher (thermisch oder elektrisch) für den Lastausgleich im Winter erforderlich (Großklos et al. 2019; Diefenbach et al. 2019). Mindestens sollten diese Speicher bei Neubauten einfach nachrüstbar sein.
- Im Bestand spielen bei dichter Bebauung zudem Wärmenetze eine wichtige Rolle, die zusätzlich für den Lastausgleich im Stromnetz genutzt werden können. Durch den Einsatz von großen Solarwärmanlagen, Großwärmepumpen, industrieller Abwärme, Biomasse, „Power to Heat“ Anlagen usw. bieten sie die Möglichkeit, ganze Stadtteile zu dekarbonisieren. Ohne diese Transformation leitungsgebundener Energieversorgung wird es für die versorgten urbanen Gebäude sehr schwer bis unmöglich, klimaneutral zu werden.

Vorgaben für den Neubau

Der Zuwachs beheizter Nutzflächen im Gebäudebestand, insbesondere durch Neubauten, führt – absolut gesehen – zu zusätzlichen THG-Emissionen. Da beim Neubau optimale Rahmenbedingungen vorliegen, sollten die besten Standards und Techniken genutzt werden, um sowohl den Flächenzubau als auch einen Teil der Restriktionen, die bei der Sanierung von Altbauten vorhanden sind, zu kompensieren. Im Hinblick auf die Energieeffizienz bedeutet dies Passivhaus- oder KfW Effizienzhaus 40 Standard im Neubau (Großklos et al. 2019; Idler et al. 2019; Röck et al. 2020).

Tabelle 3 zeigt beispielhaft und stark vereinfacht für ein Einfamilienhaus, mit welchen Kombinationen aus Wärmeschutz (Reduktion des Energieverbrauchs) und Anlagentechnik (Dekarbonisierung der Energieversorgung) die oben genannten Zielvorgaben erreicht oder sogar überschritten werden können. Bei den Varianten mit PV-Anlage wurde pauschal $\frac{1}{3}$ des elektrischen Energiebedarfs durch die PV-Anlage abgedeckt, wodurch sich die THGE je nach Anlagentechnik verringert. In der vorletzten Spalte ist der Zielwert für eine 95%ige Reduktion der THGE angegeben. In der letzten Spalte wird der THGE-Faktor für die verwendeten Energieträger angegeben der erreicht werden muss, um mit der verwendeten Anlagentechnik den Zielwert von 2,6 kg/(m²a) THGE (95 % Ziel) zu erreichen. Die Farbgebung Rot, Hellrot und Grün symbolisiert die zukünftige Erreichbarkeit der Ziele.

Bei einer Wärmeversorgung mittels eines Gas-Brennwertkessel dürfte das verwendete Gas (Variante GEG) nur noch einen THGE-Faktor von 39 g/kWh besitzen. Selbst bei einer Versorgung zu 100 % mit Biogas wäre das Ziel nicht bzw. nur schwer zu erreichen, da Biogas schon einen CO₂-Rucksack aus den Vorketten von 57 bis 426 g/kWh je nach Substrat und Bilanzrahmen mitbringt (Schaede and Großklos, 2013). Wärmeerzeuger mit Gas sollten also nur noch im Ausnahmefall eingebaut werden.

Holzpellets erfüllen schon heute mit einem Emissionsfaktor von 20 g/kWh die für die verschiedenen Gebäudevarianten ermittelten Werte. Die Kombination von Pelletkessel und PV-Anlage (Abdeckung Hilfsstrombedarf) unterschreitet den Zielwert von 2,6 kg/m²a THGE. Da jedoch das Biomassepotential schon weitgehend ausgeschöpft ist, können Pelletheizungen nur einen kleinen Teil zur Dekarbonisierung des Gebäudewärmebedarfs beitragen, daher sind die Pelletkesselvarianten hellgrün hinterlegt.

Auf der Grundlage von THGE-Faktoren von 260 g/kWh (konservativ bewertet) bis 121 bzw. 138 g/kWh für den deutschen Strommix im Jahr 2030 (Fritsche, Uwe R.; Greß, Hans-Werner, 2021) folgt die Aufteilung der Varianten in rote (Zielerreichung schwierig, da höherer Anteil an erneuerbarer Energie im Strommix erforderlich, höherer Spitzenleistungsbedarf) und grüne Varianten (Zielerreichung ist wahrscheinlich, Spitzenleistungsbedarf minimiert).

Beim Neubau rücken die grauen THGE verstärkt in den Fokus und haben mit zunehmender Reduktion des Energieverbrauchs in der Nutzungsphase einen immer größeren Einfluss auf die Lebenszyklusbilanz des Gebäudes. Außer

Tabelle 3: THGE mit und ohne PV-Anlage sowie zukünftig benötigte THGE-Faktoren zur Erreichung des 95 % Reduktionsziels bei einem Einfamilienhaus (Beispiel)

Einfamilienhaus Nutzflächen 121 m ² (An = 148 m ²)			Heute	mit PV-Anlage	Zielwerte 95 % Reduktion	
Energiestandard	Heizungstechnik	Endenergie [kWh/a]	THGE spezifisch [kg/(m ² a)]	THGE spezifisch [kg/(m ² a)]	THGE spezifisch [kg/(m ² a)]	benötigte THGE-Faktoren [g/kWh]
GEG	BW Gaskessel	9.945	20,1	16,4	2,6	39
	Luft Wasser WP	4.561	17,2	11,6	2,6	85
	Sole WP	3.890	14,6	9,9	2,6	99
	Pelletkessel	13.362	3,1	2,7	2,6	29
EH 55	BW Gaskessel	7.331	12,7	12,2	2,6	53
	Luft Wasser WP	4.092	15,4	10,5	2,6	95
	Sole WP	3.541	13,3	9,0	2,6	109
	Pelletkessel	11.525	2,8	2,4	2,6	34
EH 40	Luft Wasser WP	3.288	12,4	8,4	2,6	118
	Sole WP	3.007	11,3	7,7	2,6	129
	Pelletkessel	8.189	3,0	2,4	2,6	47
THGE-Faktoren [g/kWh] (nach GEG)	Strom		560			
	Gas		240	<i>(Aufgrund von Unsicherheiten für die Betrachtung konstant gehalten.)</i>		
	Pellets		20			

Eigene Berechnungen

durch eine Verminderung des Flächenverbrauchs pro Kopf können sie vor allem durch die Verwendung THGE-armer Baumaterialien (z. B. Holzständerbauweise, Dämmung aus Zellulose) verringert werden.

Wird bei Neubauten konsequent auf Energieeffizienz, eine THGE-arme Umsetzung und eine Ausnutzung von Photovoltaikpotenzialen gesetzt, können die THGE in der Lebenszyklusbilanz bis hin zur Klimaneutralität oder sogar ins bilanziell Negative gesenkt werden (Wöhrl, Hutter and Weng, 2017).

Mehr Dynamik für die energetische Gebäudesanierung

Im Bestand sind die bei der Sanierung aufzuwendenden grauen Energien im Gegensatz zum Neubau geringer. Gleichzeitig ist die erreichte Energieeinsparung relativ groß (Mastrucci et al. 2020). Deshalb wirken sich umfassende Gebäudesanierungen grundsätzlich positiv auf die THG-Emissionen während des Lebenszyklus aus (Vilches et al. 2017; Dunkelberg und Weiß 2016) und sind in aller Regel mit geringeren THGE über den Lebenszyklus verbunden als ein Abriss und Ersatzneubau (Idler et al. 2019).

Bei der Gebäudehülle sollte hier das Niveau des KfW Effizienzhaus 55 oder besser angestrebt werden, da damit über den Lebenszyklus in der Regel eine optimale THGE-Reduktion realisiert werden kann (Idler et al. 2019). Dieses Niveau ist jedoch bei einem Teil der Gebäude, z. B. mit erhaltenswerten Fassaden, nur schwer zu erreichen.

Um solche Restriktionen zu kompensieren, gilt ansonsten umso mehr das Prinzip „so gut wie möglich“. Dabei sollten – auch wenn der Einfluss der grauen THGE hier weniger gewichtig ist – möglichst THGE-arme Umsetzungsvarianten gewählt werden.

Bei der Wärmeversorgung gelten die oben beschriebenen Prinzipien. Eine Anlagenerneuerung muss Anlass zum Umstieg auf eine erneuerbare Wärmeversorgung sein. Auch Bestandsgebäude müssen mittelfristig zu einem wesentlichen Anteil über Wärmepumpen versorgt werden (Diefenbach et al. 2019), möglicherweise zu einem Teil bivalent mit einem brennstoffbasierten zweiten Wärmeerzeuger. Häufig bestehen zudem Möglichkeiten, über den verstärkten Einsatz von Photovoltaik ggf. auch an Balkonen, Nebengebäuden, Parkplätzen oder Fassaden Energiebedarfe zu reduzieren und damit THGE zu vermeiden.

Gleichzeitig ist es wichtig, Effizienzverbesserungen und den Umstieg auf erneuerbare Energien sehr schnell voranzutreiben, da nicht nur das Ziel der Klimaneutralität zu einem bestimmten Zeitpunkt wichtig ist, sondern auch die auf dem Weg dahin bereits entstandenen THG-Emissionen. Wesentlich ist es deshalb, die Sanierungsraten im gesamten Gebäudebereich zu erhöhen.

Wenn im Jahr 2035, wie von vielen Kommunen angestrebt, ein klimaneutraler Gebäudebestand bzw. das Reduktionsziel von 95 % erreicht werden soll, müsste unter Berücksichtigung der bereits sanierten Gebäude im Schnitt jährlich etwa 7 % des Gebäudebestandes saniert werden. Bei Klimaneutralität zum Jahr 2045 wäre eine jährliche Sanierungsquote von etwa 4 % notwendig.

Klimaneutrale Kommunen

Für diesen Transformationsprozess ist neben den regulatorischen Rahmenbedingungen und Anreizprogrammen auf internationaler, europäischer und nationaler Ebene die Umsetzung auf kommunaler Ebene von großer Bedeutung. Immer mehr Städte beschließen, in ihrem Handlungsbereich Klimaneutralität schon vor 2045 anzustreben. So möchte z. B. die Stadt Darmstadt ihre Netto-CO₂-Emissionen bis 2035 auf null senken (Beschluss Stadtverordnetenversammlung, SV-2019/0053, 2019), die Stadtverordnetenversammlung der Stadt Kassel hat sich das Ziel gesetzt bis zum Jahr 2030 klimaneutral zu werden (Beschluss vom 26.8.2019, Antrag 101.18.1379), die Stadt Tübingen will laut Beschluss des Tübinger Gemeinderats (Vorlage 214/2019) bis zum Jahr 2030 in Bezug auf die energiebedingten CO₂-Emissionen klimaneutral sein (Netto-Null) und der Rat der Stadt Oldenburg hat am 26.4.2021 beschlossen (Vorlage 21/0249/2), dass Oldenburg bis 2035 klimaneutral werden soll. Auch die Landeshauptstadt München hat sich das Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2035 klimaneutral zu werden.

Welche Maßnahmen müssen diese Städte in Bezug auf die Gebäude, die sich in ihrem Einflussbereich befinden, ergreifen? Und wie können in einem solchen Rahmen eine sinnvolle Gesamtbilanz erstellt und verbleibende Emissionen kompensiert werden?

Als erster Schritt sollte zunächst der Energieverbrauch bestimmt und soweit möglich reduziert werden. Dabei werden bei vermieteten Gebäuden nur der Endenergie-

verbrauch für Heizung und Warmwasser, bei Gebäuden der Stadtwirtschaft auch Strom und Prozessenergien berücksichtigt. Im nächsten Schritt folgt die Optimierung der Energieversorgung und ihre Umstellung auf erneuerbare Energien unter Berücksichtigung von Endenergiebedarf und THGE. Dabei sollten die Potenziale zur lokalen Erzeugung von erneuerbaren Energien möglichst ausgeschöpft werden. Ergänzend können mietende Haushalte oder Unternehmen über Beratung und Förderung zum Energiesparen motiviert werden.

In die Erstellung der jährlichen Gesamtbilanz der betrachteten Gebäude geht ihre Energiebilanz mit den Treibhausgasemissionen der bezogenen Energieträger ein. Die verwendeten Emissionsfaktoren berücksichtigen auch die Emissionen aller zu ihrer Bereitstellung notwendigen Vorketten, auch die der ggf. extern bezogenen erneuerbaren Energien (Werte entsprechend DGNB) (Braune et al. 2020). Bei der gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme wird für die Allokation die finnische Methode angewandt, um eine möglichst ausgeglichene CO₂-Bilanz der Koppelprodukte (Hörner, 2014) zu erhalten und keinen Energieträger unrealistisch zu bevorteilen.

Am Gebäude erzeugte und zeitgleich lokal verbrauchte erneuerbare Energien werden vom Endenergieverbrauch der Gebäude abgezogen und reduziert damit die THGE. In das öffentliche Netz eingespeiste Überschüsse der lokal erzeugten erneuerbaren Energien – z. B. Strom aus Photovoltaik – werden erfasst und mit den THGE-Faktoren des lokalen Netzes verrechnet.

Bilanzierung von klimaneutralen Gebäuden oder Quartieren

1. Energiebilanz der Gebäudenutzung

- Erfassung Endenergieverbrauch für Heizung, Warmwasser, Kühlung sowie ggf. Stromverbrauch nach Energieträger
- Erfassung und direkte Anrechnung der am Gebäude erzeugten und verbrauchten erneuerbarer Energien
- Erfassung der in das Netz eingespeisten Überschüsse von am Gebäude erzeugter erneuerbarer Energie

2. Erfassung der THGE bei Neubau, Sanierung, Instandhaltung und Entsorgung

- Erfassung der grauen THGE-Emissionen des Gebäudes, durch die verwendeten Materialien, Anlagentechnik und Prozesse. Die Berücksichtigung in der Bilanz erfolgt zum Zeitpunkt der Fertigstellung.

3. Gesamtbilanz nTHGE + gTHGE

- Die Treibhausgasemissionen der bezogenen Energieträger werden berechnet. Die verwendeten Emissionsfaktoren berücksichtigen alle Vorkettenemissionen,

auch die der ggf. extern bezogenen erneuerbaren Energien (Werte entsprechend DGNB Rahmenwerk für klimaneutrale Gebäude und Standorte).

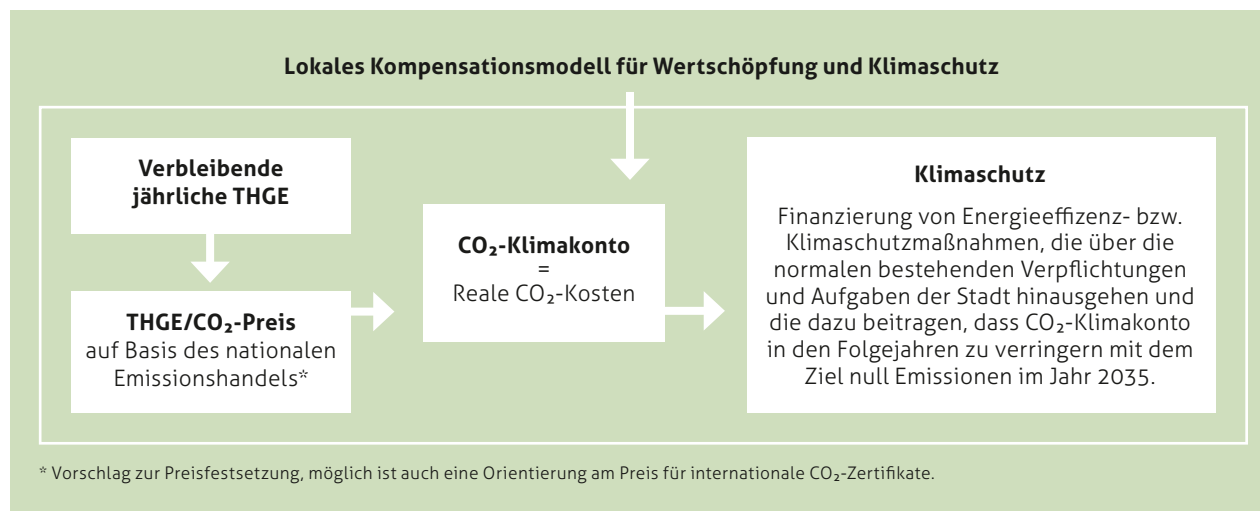
Die grauen Emissionen der lokalen Energieerzeugungsanlagen sind bereits bei 2) berücksichtigt worden.

- Lokal erzeugte und in das öffentliche Netz eingespeiste Überschüsse erneuerbarer Energien (am/im Gebäude oder auf dem Grundstück), werden in der Bilanz mit den THGE-Faktoren des lokalen Netzes verrechnet.
- $THGE_{Gesamt} = nTHGE + gTHGE$

Bilanzausgleich/Kompensation verbleibender jährlicher THGE

- Lokale Maßnahmen zur Bindung von CO₂
- Kauf von Kompensationszertifikaten
- Anrechnung von CO₂-kompensierten Energiebezug (z. B. Klimagas)
- Lokales CO₂-Klimakonto

Abbildung 2: Lokales Kompensationsmodell



Berücksichtigung der grauen Emissionen im THGE-Konto

Zudem werden die grauen THGE für die bei Neubau, Instandhaltungsmaßnahmen und Sanierung verwendeten Materialien, Anlagentechnik und Prozesse ausgewiesen. Hier werden auch die grauen Emissionen der lokalen Energieerzeugung erfasst. Die grauen THGE gehen im Jahr der Fertigstellung in die Bilanz ein. Denn würde dieser CO₂-Rucksack eines Gebäudes über die 50 Jahre Nutzungsdauer in der Bilanz verbleiben, würde das die Auswirkung auf das verbleibende THGE Budget zur wahrscheinlichen Einhaltung des 2 °C Ziels falsch darstellen, da die Emissionen zum Zeitpunkt der Fertigstellung bereits emittiert sind und in der Atmosphäre die Erderwärmung beschleunigen.

Diese Vorgehensweise kann für Einzelgebäude oder auch auf ganze Quartiere oder Versorgungseinheiten angewendet werden.

Lokales Kompensationsmodell

Zur Kompensation der auch nach Effizienz- und Substitutionsmaßnahmen auf absehbare Zeit verbleibenden THGE bietet sich ein lokales Kompensationsmodell an (siehe Abbildung 2). Die verbleibenden Emissionen werden mit einem Preis (z. B. gekoppelt an ein Emissionshandelssystem) belegt, der auf ein Klimakonto der Kommune einbezahlt wird. Damit können dann Klimaschutzmaßnahmen, die ansonsten nicht umgesetzt würden, oder lokale Förderprogramme (für Bürger und Gewerbe) finanziert werden. Dadurch wird der Handlungsrahmen für Klimaschutzmaßnahmen der Kommune auf weitere Akteure im Einflussgebiet ausgedehnt. Ein solches System könnte auch für weitere lokale Akteure (Stadtwirtschaft, Gewerbe, Industrie,

Privatpersonen) geöffnet werden, die freiwillig THGE vor Ort kompensieren wollen.

Auch die Anrechnung des Ertrags von regionalen Projekten zur Bindung von Kohlenstoff, wie z. B. die Wiedervernässung von Mooren, wäre denkbar.

Andere mögliche Kompensationsmaßnahmen sind der Kauf von Kompensationszertifikaten oder der Bezug und die Anrechnung von CO₂-kompensierter Energie z. B. Klimagas. Diese Optionen haben aber den Nachteil, dass Finanzmittel aus dem Einflussbereich der Stadt abfließen ohne, dass dadurch lokale Verbesserungen und damit THGE-Reduktionen verwirklicht werden. Daher sollte die Kompensation über Zertifikate nur als letzte Option betrachtet werden und immer eine lokale THG Kompensation vorgezogen werden.

Ausblick

Die rasche Abkehr von fossiler Energie hat durch den Krieg in der Ukraine zusätzlich an Bedeutung gewonnen. Im Gebäudebestand ist der Verzicht auf die Verbrennung fossiler Energie mit hohen Herausforderungen für die Verbesserung des Wärmeschutzes und die Umstellung der Wärmeversorgung verbunden. Zugleich müssen die Anstrengungen zur Reduktion der bei der Herstellung von Bauteilen verbrauchten „grauen Energie“ erheblich verstärkt werden. Diese wesentlichen Stellschrauben und die hier erforderlichen Abwägungsprozesse wurden skizziert und die Herangehensweise zur Bilanzierung sowie Umsetzung der notwendigen Schritte auf kommunaler Ebene beschrieben. Doch der notwendige Strukturwandel kann nur gelingen, wenn er sowohl auf lokaler als auch auf nationaler und internationaler Ebene durch ambitioniertes politisches Handeln verstärkt vorangetrieben wird.

LITERATUR

Bischof, Julian; Duffy, Aidan (2022): **Life-cycle assessment of non-domestic building stocks: A meta-analysis of current modelling methods**. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 2021 (153 (2022) 111743). DOI: 10.1016/j.rser.2021.111743.

BLfU (2018): **Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden – Kurzfassung**. Bayrisches Landesamt für Umwelt (LfU). Augsburg (2). Online verfügbar unter <https://www.baufachinformation.de/lebenszyklusanalyse-von-wohngebaeuden/bu/2020019000355>, zuletzt geprüft am 02.05.2022.

Braune, Anna; Lemaitre, Christine; Geiselman, Dietmar; Kreißig, Johannes; Jansen, Felix; Gemmingen, Ulrike von (2020): **Rahmenwerk für klimaneutrale Gebäude und Standorte**. Hg. v. DGNB. DGNB. Stuttgart.

Deutscher Bundestag (2021): **Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG)**. KSG, vom 18.08.2021 | 3905 (Nr. 59). In: Bundesanzeiger 2021.

Diefenbach, Nikolaus; Großklos, Marc; Müller, André; Grafe, Michael; Swiderek, Stefan; Rupert, Hann et al. (2019): **Analyse der Energieversorgungsstruktur für den Wohngebäudektor zur Erreichung der Klimaschutzziele 2050**. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt.

Dunkelberg, Elisa; Weiß, Julika (2016): **Gebäude-Energiewende**. Arbeitspapier 4: Ökologische Bewertung energetischer Sanierungsoptionen, S. 64.

EnergieSchweiz (2017a): **Graue Energie von Neubauten**. Ratgeber für Baufachleute. EnergieSchweiz.

EnergieSchweiz (2017b): **Graue Energie von Umbauten**. Ratgeber für Baufachleute. Hg. v. EnergieSchweiz. EnergieSchweiz.

Fritsche, Uwe R.; Greß, Hans Werner (2021). **Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch und THG-Emissionen des deutschen Strommix im Jahr 2020 sowie Ausblicke auf 2030 und 2050**. Kurzstudie. Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalyse und -strategien GmbH, Darmstadt, November 2021.

Großklos, Marc; Diefenbach, Nikolaus; Müller, André; Grafe, Michael; Swiderek, Stefan; Rupert, Hann et al. (2019): **Zukunftsfähige Neubauten als Baustein für einen klimaneutralen Wohngebäudebestand 2050**. Endbericht Teil 2 im Projekt „Energieeffizienz und zukünftige Energieversorgung im Wohngebäudektor: Analyse des zeitlichen Ausgleichs von Energieangebot und -nachfrage (EE-GebäudeZukunft)“. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt.

Habert, Guillaume; Röck, Martin; Steinger, Karl; Lupisek, Antonin; Birgisdottir, Harpa; Desing, Harald et al. (2020): **Carbon budgets for buildings: harmonising temporal, spatial and sectoral dimensions**. In: Buildings and Cities 1 (1), S. 429–452. DOI: 10.5334/bc.47.

Hörner, Michael (2014): **Vorschlag zur Neuregelung der Brennstoff-Allokation bei der Kraft-Wärme-Kopplung**. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt.

Idler, Simone; Mahler, Boris; Gantner, Johannes (2019): **Graue Energie im Ordnungsrecht/Förderung**. Hg. v. BBSR.

Mahler, Boris; Idler, Simone; Nusser, Tobias; Gantner, Johannes (2019): **Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus**. S. 175.

Mastrucci, Alessio; Marvuglia, Antonino; Benetto, Enrico; Leopold, Ulrich (2020): **A spatio-temporal life cycle assessment framework for building renovation scenarios at the urban scale**. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 126, S. 109834. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109834.

Mirabella, Nadia; Röck, Martin; Ruschi Mendes SAADE, Marcella; Spirinckx, Carolin; Bosmans, Marc; Allacker, Karen; Passer, Alexander (2018): **Strategies to Improve the Energy Performance of Buildings**. A Review of Their Life Cycle Impact. In: Buildings 8 (8), S. 105. DOI: 10.3390/buildings8080105.

Röck, Martin; Saade, Marcella Ruschi Mendes; Balouktsi, Maria; Rasmussen, Freja Nygaard; Birgisdottir, Harpa; Frischknecht, Rolf et al. (2020): **Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation**. In: Applied Energy 258, S. 114107. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114107.

Schaede, M.; Großklos, M., (2013): **Passivhäuser mit Energiegewinn**. Teilbericht: Wissenschaftliche Begleitung Cordierstraße 4 in Frankfurt a. M., Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt.

Schneider, Patricia; Pfoh, Sandro; Grimm, Franziska (2015): **Leitfaden 01. Ökologische Kenndaten Baustoffe und Bauteile**. Technische Universität München. SIA 2040, 2017: SIA 2040 – SIA-Effizienzpfad Energie.

Umweltbundesamt (Hg.) (2020): **Erneuerbare Energien in Deutschland**. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

United Nations (2015): **Paris Agreement: United Nations**. Online verfügbar unter https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf, zuletzt geprüft am 02.05.2022.

Vilches, Alberto; Garcia-Martinez, Antonio; Sanchez-Montañes, Benito (2017): **Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment**. A literature review. In: Energy and Buildings 135, S. 286–301. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.11.042.

Wöhrle, Heiko; Hutter, Christina; Weng, Korbinian (2017): **Gutachten über erschließbare Umweltpotenziale von Effizienzhaus Plus Gebäuden**. In: BMUB – ZukunftBau 2017.

Institut Wohnen und Umwelt GmbH

Forschungseinrichtung des Landes Hessen
und der Stadt Darmstadt
Rheinstr. 65, 64295 Darmstadt
Tel.: +49(0)6151/29 04-0
info@iwu.de
www.iwu.de

Redaktion: Kornelia Müller
Ansprechpartner zu diesem Thema:
Julian Bischof (j.bischof@iwu.de),
Stefan Swiderek (s.swiderek@iwu.de)
Stand: 23.06.2022