

# GRAUE ENERGIE VERSUS BETRIEBSENERGIE: EIN VERGLEICH VON LEICHT- UND MASSIVBAUWEISE

Christiane Wermke

Technische Universität Graz/ Institut für Gebäude und Energie, Rechbauerstraße 12, 8010  
Graz/AT, +43 (0)316 873-4754, [christiane.wermke@tugraz.at](mailto:christiane.wermke@tugraz.at), <http://www.ige.tugraz.at/>

**Kurzfassung:** Die Graue Energie von Materialien gewinnt immer mehr an Bedeutung im Hinblick auf die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden. Die vorliegende Arbeit untersucht die unterschiedlichen positiven wie negativen Auswirkungen von Leichtbau- sowie Massivbaukonstruktionen auf den Energieverbrauch. Der Leichtbau mit seiner niedrigeren grauen Energie schneidet im Experiment am besten im bewohnten Zustand ab, wohingegen der Massivbau aufgrund der thermischen Trägheit im unbewohnten (Co-Heating) Zustand die besten Werte erreicht.

**Keywords:** Holzständerkonstruktion, Hochlochziegel, Nachhaltigkeit, Gesamtenergieverbrauch, Wohnhaus

## 1 Nachhaltiger Einsatz von Baumaterialien und Energieverbrauch von kleinen Wohnhäusern

Energieverbrauch und Energieeffizienz sind ein viel diskutiertes Thema im Bausektor. Insbesondere die Betriebsenergie steht im Fokus des Planungsprozesses. So besteht seit Ende 2018 (Directive (EU) 2018/844) die Forderung seitens der EU nach ‚Nearly Zero- Energy buildings‘ für alle neuen Gebäude der öffentlichen Hand, sowie ab 2020 für private Neubauten. Höhere Energiestandards und verbesserte Planungswerkzeuge erlauben die Umsetzung dieser Forderung in der Planung. Mit immer effizienteren Gebäuden und sinkendem Real-Energieverbrauch gewinnt der Anteil der Energie, die in den Baumaterialien verbaut wurden, wieder mehr Aufmerksamkeit. Oftmals wird lediglich ein energetischer Aspekt betrachtet, entweder die graue Energie oder der Energiebedarf/-verbrauch (Campus360GmbH 2015). Ziel muss es sein, den Gesamtenergieverbrauch zu senken, sowohl im Betrieb als auch die Energie in den Baumaterialien. Nur mit diesem Ansatz können Bauprojekte objektiv und aus energetischer Sicht ganzheitlich betrachtet werden, insbesondere wenn eine Lebenszyklusanalyse Bestandteil der Nachhaltigkeitsbewertung ist. Zur Nachhaltigkeit eines Gebäudes tragen insbesondere die Wahl des Grundstücks und die Orientierung des Gebäudes, die Energieeffizienz und die Nutzung von Tageslicht bei. Da diese Faktoren für diese Studie vorgegeben waren, wird darauf nicht näher eingegangen. Die nachfolgende Studie untersucht ein Prototypenhaus eines Zweifamilienhauses in Glasgow (GB), welches mit identischem Grundriss einmal in Holzständerbauweise (Leichtbau) und einmal mit Hochlochziegeln (Massivbau) als Doppelhaus ausgeführt wurde. Initiiert wurde die Planung durch die lokale Wohnungsgenossenschaft ‚Glasgow Housing Association‘ (GHA). Ziel der Planung war, ein Niedrigenergiehaus zu entwickeln, das flexibel und preislich erschwinglich ist. Zum einen wurde die graue Energie der wesentlichen Konstruktionselemente beider Häuser ermittelt und zum anderen wurde der Energiebedarf durch thermische Simulationen

ermittelt und der Energieverbrauch sowie interne Raumtemperaturen mehrfach in Studien vor Ort gemessen. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen die Komplexität aus dem Zusammenspiel von grauer Energie der Materialien und dem Energieverbrauch sowie der Nutzung des Hauses durch die Bewohner auf. Zwar wurde während der Studie eine auffallende Diskrepanz zwischen den simulierten und den tatsächlichen Energieverbräuchen festgestellt, jedoch soll dies nicht der Fokus der vorliegenden Untersuchung sein.

## 2 Fallstudie: Prototyp eines Zweifamilienhauses in Leichtbau- und Massivbauweise

Bei der Fallstudie handelt es sich um eine Doppelhaushälfte (vgl. Abb. 2) für eine Familie mit insgesamt drei Schlafzimmern und einer Nutzfläche von ca. 100m<sup>2</sup>. Es wurden insgesamt vier Häuser gebaut, beziehungsweise je Konstruktionsart ein Doppelhaus. Jedes Haus umfasst einen Eingangsbereich, einen Flur, ein Wohnzimmer mit Küche und Essbereich und einen Abstellraum im Erdgeschoss sowie drei Schlafzimmern und einem Badezimmer im 1. Obergeschoss und ein Dachgeschoss, welches zum Schlafen genutzt werden kann (vgl. Abb. 1). Die Häuser wurden zum einen entwickelt und gebaut, um energieeffizientere Wohnhäuser zu schaffen und zum anderen um zwei wesentliche Konstruktionsprinzipien miteinander zu vergleichen: die in Schottland traditionelle Holzständerbauweise für Einfamilienhäuser mit jener mit mehr thermischer Masse (Massivbau). Zunächst wurde die graue Energie nach dem „Cradle-To-Gate“-Prinzip ermittelt, d.h. der Materialenergiefluss wurde bis auf die Baustelle hin berücksichtigt. Des Weiteren wurden Fallstudien durchgeführt, bei denen vier Personen für zwei Wochen in den Häusern wohnten und der Gasverbrauch und die Hausinnentemperaturen gemessen wurden. Dabei folgten die Bewohner (Studierende der Mackintosh School of Architecture, Glasgow) einem strikten Zeitplan, um die Vergleichbarkeit der Studie zu gewähren.

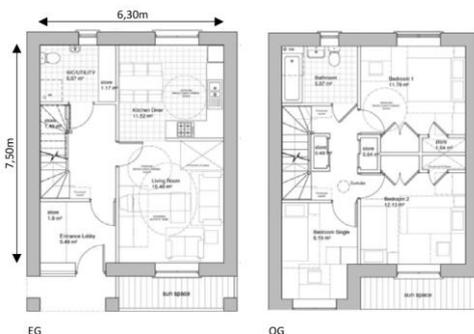


Abb. 1 Grundrisse (Architekten: PRP Architects) (PRPArchitects 2010)



Abb. 2 Foto: links: Massivbau, rechts: Leichtbauweise (CityBuildingGlasgow n.d.)

### 2.1 Baukonstruktionen, Materialien und Technische Anlagen

Ziel der Planung war es, ein Wohnhaus nach dem ‚Stand der Technik‘ zu planen mit einem geringen Gesamtenergieverbrauch, der die jährlichen Energiekosten von £100 (Stand 2009), später auf £200 korrigiert, nicht übersteigen sollte. Die Wohnhäuser sollten für sozial schwache Familien erschwinglich und die technische Bedienbarkeit des Hauses überschaubar sein. Es sollten herkömmliche Materialien verbaut und die regionalen Baustoffe berücksichtigt werden sowie ausschließlich ausreichend getestete Technologien und Materialien genutzt

werden. Obwohl Mehrfamilienhäuser in Glasgow in der Regel in Massivbauweise ausgeführt wurden, hat sich im Ein-/Zweifamilienhausbau die Holzständerkonstruktion durchgesetzt. Um den Energieverlust der Heizwärme zu minimieren wurden neben hohen Dämmstandards eine mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung eingebaut. Am Dach befindet sich ein Solarkollektor, der die Warmwasserbereitung unterstützen soll. Die Gebäude wurden, anders als in Glasgow üblich, in Ost-West-Ausrichtung erbaut, um suboptimale Szenarien zu untersuchen. Ein thermischer Puffer stellt der sogenannte ‚Sun-Space‘ dar, eine Art Wintergarten, der an das Wohnzimmer angrenzt und Energieverluste durch Lüften reduzieren soll beziehungsweise durch die große Glasfläche die solaren Gewinne im Winter erhöhen soll. Das Dach besteht aus vorgefertigten Holzkassetten mit 30cm Wärmedämmung und Kunststoffziegeln für den Massivbau und konventionellen Ziegeln für die Holzkonstruktion. Das Heizen erfolgt über eine konventionelle Gaszentralheizung. Die in die mechanische Lüftung integrierte Wärmerückgewinnung zieht die Luft im Küchenbereich und vom Bad sowie Abstellraum (Boiler) ab.

**LB (Holzständer)**



**MB (Ziegel)**

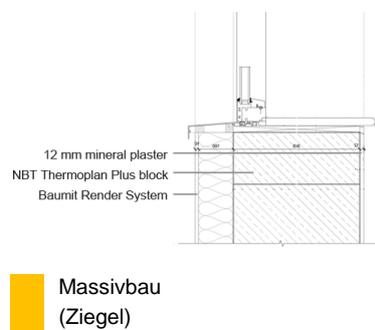


a) Fotos: C. Wermke (Wermke 2011)

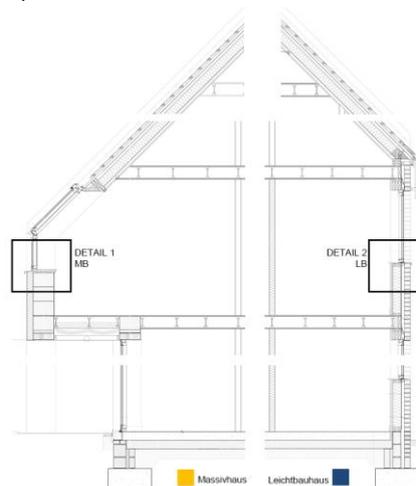
b) Fotos: C.Wermke (Wermke 2011)

Abb. 3 Konstruktionsmaterialien

b)



a)



c)

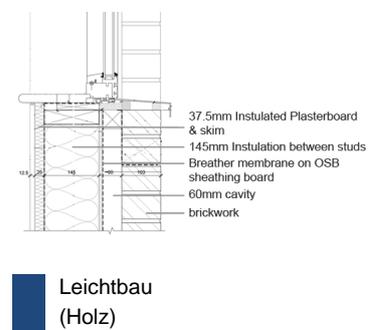


Abb. 4 Schnitt (a) und Fassadendetails (b,c) der Häuser

### 2.1.1 Leichtbau (Holzständerkonstruktion)

Die Leichtbaukonstruktion besteht aus einem konstruktiven Holzständersystem mit integrierter Wärmedämmung (10cm) aus Mineralwolle. Die hinterlüftete Fassade wird nach außen mit Klinker verblendet. Die Außenwand schließt zur Rauminnenseite mit einer zusätzlichen 2,5cm starken Dämmung sowie GK-Bepunktung ab (siehe Abb. 3(a) und Abb. 4).

### **2.1.2 Massivbau (Hochlochziegel)**

Die massive Konstruktion besteht aus einem 36,5cm breiten Hochlochziegel (NBT Thermoplan Plus), 10cm Dämmung und 1cm Mineralputz (siehe Abb. 3 (b) und Abb. 4). Die Einschätzung durch BRE (Building Research Establishment) des NBT Ziegels waren, dass die größten Umwelteinflüsse durch die Rohstoffgewinnung mineralischer Materialien entstehen, gefolgt von der Verarbeitung der Rohstoffe (NBT 2013).

## **3 Baumaterialien und Graue Energie**

Ein Indikator für die Nachhaltigkeit von Baumaterialien ist die graue Energie, also jene Energiemenge, die für die Herstellung, Verarbeitung, Entsorgung und ggf. den Rohstoffabbau benötigt wird (Holm, A.; Kagerer 2019). Bei einer einseitigen Betrachtung von Gebäuden hinsichtlich ihrer nachhaltigen Qualitäten, könnte man schnell zu dem Schluss kommen, dass Naturmaterialien wie Holz per se nachhaltiger sind, im Vergleich zu Materialien mit einem hohen Gehalt an grauer Energie, wie beispielsweise Beton oder Ziegel. Baumaterialien haben einen großen Einfluss auf die Umwelt während der Rohstoffgewinnung, (Weiter-)Verarbeitung, Herstellung und Transport. In Großbritannien beträgt das jährliche Aufkommen an Bauschutt und Abfällen über 70 Mio. Tonnen, davon etwa 5 Mio. Tonnen in Schottland im Jahr 2016 (Scotland 2020). Die Baubranche trägt signifikant zum großen Energieverbrauch und zum CO<sub>2</sub>-Verbrauch bei, welcher als ein wesentlicher Indikator für den Klimawandel und die allgemeine Erderwärmung angesehen wird. Gebäude verbrauchen etwa 40% der weltweiten Ressourcen und der Anteil des Weltenergieverbrauchs liegt für den Bausektor bei über 30% (Graham 2003). 50% der weltweiten Rohstoffe werden jedes Jahr für Bauprojekte verbraucht (Hegger, Fuchs, Stark 2008). Generell sollte auf ressourcenschonendes Bauen mit nachwachsenden Rohstoffen und niedrigem Energiegehalt geachtet werden. Darüber hinaus sollten Bauteile in die Planung einbezogen werden, die den Energiebedarf während der Nutzungsphase signifikant senken können bei konstantem Nutzerkomfort. Baumaterialien haben über ihre konstruktive und schützende Funktion auch bauphysikalischen, mechanischen und chemischen Anforderungen zu genügen. Sie sollen vor Wind, Sonne und Niederschlägen schützen und gleichzeitig Komfort bieten und umweltschonend sein. Die genaueste Methode, Materialien auf ihre Nachhaltigkeit zu bewerten ist zweifelsohne die Life-Cycle-Analysis (LCA), welche sehr ressourcenintensiv und aufwändig ist. Die graue Energie stellt insofern einen guten Vergleichsparameter für die Beurteilung der Nachhaltigkeit dar, als dass sie Hinweise über Umweltbelastungen durch CO<sub>2</sub>, Nitratoxide und andere geben kann (Mahler, Idler, and Gantner 2019).

### **3.1 Berechnung Graue Energie: Cradle-to-Gate**

Der Inhalt an grauer Energie eines Baumaterials bildet die Grundlage für die Bewertung der Gesamtenergieeffizienz beim Vergleich der beiden Prototypenhäuser. Nicht Bestandteil der Analyse sind Umwelteinflüsse und –verschmutzungen, die durch den Rohstoffabbau, die Verarbeitung und Herstellung oder den Rückbau und die Entsorgung entstehen. Der Cradle-To-Gate Ansatz verfolgt die Energieflüsse vom Rohstoffabbau, über die Verarbeitung bis das Material/Bauteil die Fabrik verlässt (IEA 2016). Dieser Ansatz wurde zum einen gewählt, da die Transportwege nicht im Detail zurückverfolgt werden konnten und zum anderen konnten die Materialqualitäten hinsichtlich des Nutzerkomforts und der Energieeffizienz quantitativ

nachvollzogen werden. Die primäre Grundlage für die Berechnung der grauen Energie basiert auf einer Datenbank der University of Bath (Inventory of Carbon and Energy, Version 1.6a, (Geoff and Craig 2008)), welche auf der cradle-to-gate Methode beruht. Die vorliegende Berechnung umfasst etwa 60% der verbauten Materialien, insbesondere der statischen Elemente und der Fassade, da diese Elemente variieren und für den Vergleich der Konstruktionsarten relevant ist.

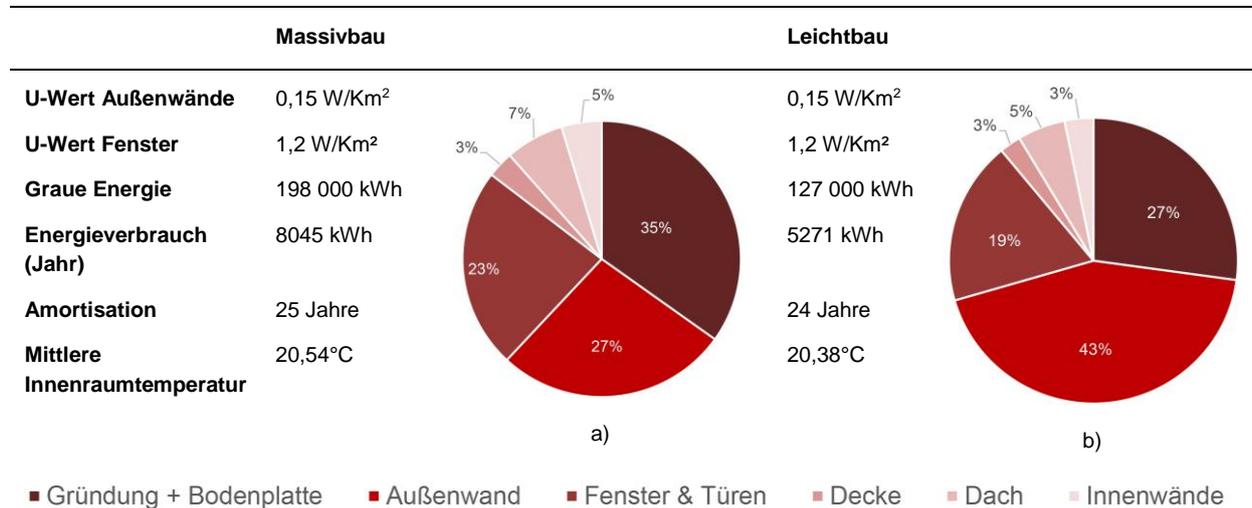


Abb. 5 Prozentuale Verteilung der Grauen Energie für das Leichtbauhaus (a) bzw. Massivbauhaus (b)

#### 4 Betriebsenergie: Computersimulation versus Messdaten

Die Betriebsenergie ist jene Energie für Heizen, Kühlen, Lüftung, Beleuchtung und Geräte, die benötigt wird um ein angenehmes Raumklima herzustellen und/oder aufrechtzuerhalten (Itard 2009). Sie berücksichtigt Energie, die sowohl aus fossilen als auch aus erneuerbaren Ressourcen gewonnen wurde. 58% der Haushaltsenergie in Großbritannien wird der Heizenergie und 25% der Warmwasseraufbereitung (zusammen 83%) zugeschrieben. Wenn das Ziel ist, den Energieaufwand für Heizen und Warmwasser zu reduzieren, spiegelt sich dies in den physikalischen Kennwerten der Gebäudehülle wieder (z.B. niedriger U-Wert für Wände und Fenster, große Dichtigkeit etc.). Bei Gebäuden nach dem Stand-der-Technik übersteigt die Betriebsenergie den Teil der grauen Energie im Laufe der Lebenszeit eines Gebäudes innerhalb von 10 Jahren (Röck et al. 2019), bei konventionellen in etwa 2-5 Jahren (Homes 1999) und beträgt ungefähr das 7-fache der Graue Energie am Ende eines Gebäudes (siehe Abb. 6(a)). Niedrigere Energieverbräuche von Neubauten (Passivhäuser, Niedrigstenergiehäuser, Plusenergiehäuser) ändern dieses Verhältnis und der ‚Break-Even‘ Point wird erst nach 15-20 Jahren (siehe Abb. 6(b)) erreicht. Ein wesentlicher Grund, weshalb sowohl die graue Energie, als auch die Betriebsenergie untersucht wird, sind die unterschiedlichen thermischen und physikalischen Eigenschaften von leichten und schweren Baustoffen. So können Ziegel viel Wärme aufnehmen und zu einem späteren Zeitpunkt wieder abgeben. Diese Eigenschaft von thermischer Masse kann sowohl förderlich für das Raumklima sein (Beispiel sommerliche Nachtauskühlung). Es kann unter Umständen auch zu höheren Energieverbräuchen während der Heizperiode kommen. Im Leichtbau sind die Wände im Innenbereich oft mit Gipskarton beplankt, was zu einer schnellen Erwärmung des Innenraums führt. Auch diese Eigenschaften haben positive Effekte, z.B. lassen sich Räume innerhalb

kurzer Zeit aufheizen, aber auch negative Effekte, die Auskühlung im Sommer wird erschwert. Die Temperaturfluktuationen sind beim Leichtbau i.d.R. größer.

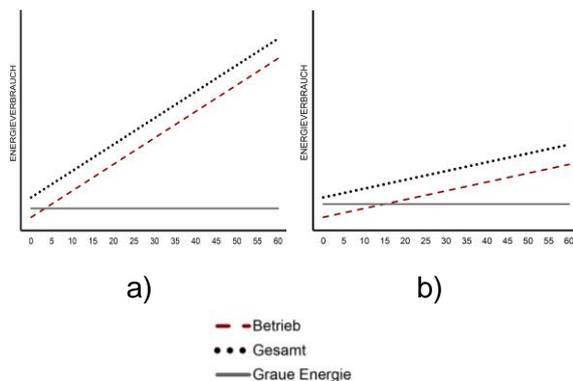


Abb. 6 Verhältnis Grauer Energie zu Betriebsenergie eines konventionellen EFH (a) und eines Niedrigenergie-EFH (b) mit 3 Schlafzimmer

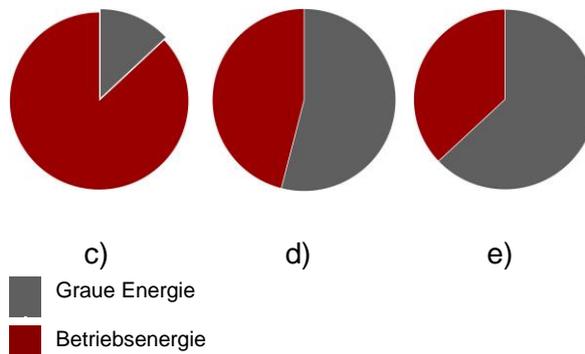


Abb. 7 Vergleich Grauer zu Betriebsenergie eines Konventionellen Hauses (c), des Holzhauses (d) und Ziegelhauses (e) im Vergleich

Abb. 7 zeigt das Verhältnis von Grauer zur Betriebsenergie bei einer Gebäudenutzung von 50 Jahren. Abb. 7 c) beschreibt dieses Verhältnis bei einem konventionellen Gebäude und zeigt, dass der Anteil der Betriebsenergie den größten Teil ausmacht, wohingegen der Anteil der Grauen Energie bei Häusern nach dem Stand-der-Technik wie dem Massivbauhaus (Abb. 7 e) und dem Leichtbauhaus (Abb. 7 d) mehr als die Hälfte des gesamten Energieverbrauchs nach 50 Jahren Betriebszeit ausmachen. Die Materialwahl des Hauses sollte aber nicht allein auf Grundlage der Grauen Energie erfolgen, sondern aus dem Zusammenspiel von Betriebsenergie, grauer Energie, Nutzerkomfort, Nutzerprofil und optimaler Steuerung der Gebäude- und Fassadentechnik.

#### 4.1 Thermische Gebäudesimulation mit TAS/EDSL

Für die computergestützte dynamische thermische Simulation wurde das Programm TAS/EDSL verwendet. Neben dem Energiebedarf wurden auch die internen Raumtemperaturen ermittelt und ausgewertet.

Raum	Min	Max	Heizperiode
Badezimmer	26	27	Mo- Fr: 6Uhr – 9 Uhr und 17Uhr – 23Uhr
WC	19	21	Sa- So: 5- 8 Uhr, 11- 15Uhr, 17-20Uhr,
Schafzimmer	17	19	21-23Uhr
Küche	17	19	
Wohnen	22	23	<b>Kühlung:</b> keine
Treppe/Flur	19	24	

Tab. 1 Setpoints (gemäß CIBSE Guide A), Temperaturen in °C und Heizperiode

#### 4.2 Messdaten aus Nutzungsperioden

Es wurden insgesamt 6 Fallstudien durchgeführt. Dazu wohnten je 4 Studierende der Mackintosh School of Architecture in je einem Haus (LB und MB). Um die Messdaten objektiv betrachten und vergleichen zu können, bekamen die Studierenden ‚schedules‘, also Tagespläne, zu welchen Zeiten geheizt wurde, wann und wie lange geduscht werden konnte und wann und wie oft Geräte wie beispielsweise Wasserkocher und Herd genutzt werden konnten. Während dieser Zeit wurde Daten über den Gasverbrauch, Innen-sowie

Außentemperaturen, Nutzerverhalten, Feuchtigkeit u.a. erhoben. Neben dieser Fallstudie, wurden weitere Messdaten während zwei unbewohnter Zeiträumen erhoben. Diese Messung sollte Aufschluss darüber geben, wie unterschiedlich die Materialien, also LB und MB, sich tatsächlich verhalten, unabhängig vom Nutzerverhalten. Auch der Transmissionswärmeverlust konnte so realistischer ermittelt werden.

## 5 Ergebnisse

Die Berechnung der grauen Energie ergab eindeutig höhere Werte für das Massivbauhaus (198.000 kWh/+55%), was auf die Hochlochziegel in der Außenwand zurückzuführen ist. Das Haus in Holzständerkonstruktion (LB) erscheint aufgrund der geringeren grauen Energie (127.000 kWh) und des geringeren Gasverbrauchs (fast 35% weniger als MB; siehe Abb. 8 b)) nachhaltiger im Vergleich zum Massivbau. Bei der Holzständerkonstruktion machen die Klinker 25%, die EPS-Dämmplatten ca. 20% und die Gründung etwa 16% der gesamten grauen Energie aus, zusammen etwa 2/3 der berechneten grauen Energie der Konstruktionselemente (vgl. Abb. 8. a). Die Dämmung hat neben den Ziegeln den höchsten Anteil an grauer Energie, ist zugleich aber Teil der Gebäudehülle und somit maßgeblich daran beteiligt Heizwärmeverluste durch Transmission zu reduzieren. Beim Massivbau nimmt der NBT Thermoplan Plus den größten Anteil an grauer Energie ein und weist damit auch insgesamt den größten Anteil an grauer Energie von allen untersuchten Baustoffen.

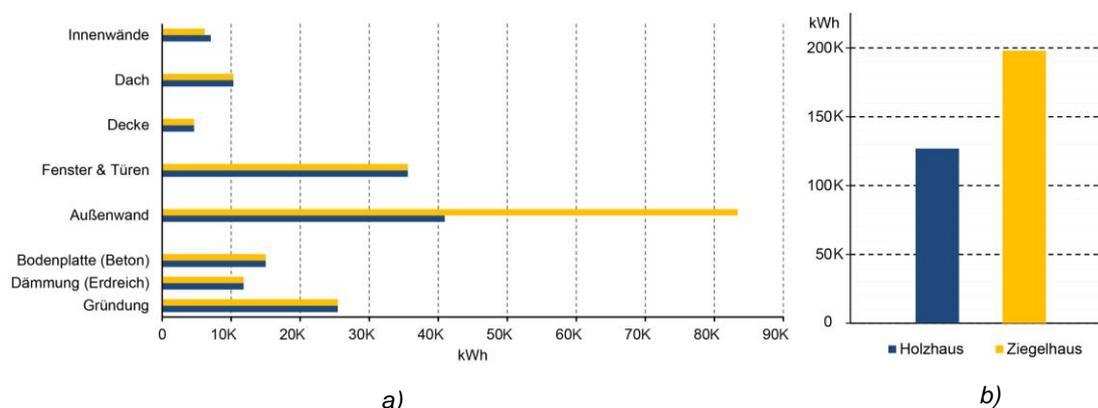


Abb. 8 Graue Energie der wesentlichen Konstruktionselemente im Vergleich (a) (Wermke 2012),(Wermke 2011) und Graue Energie im Vergleich Holzhaus bzw. Ziegelhaus (b)

Die Ergebnisse der dynamisch thermischen Gebäudesimulationen ergaben Werte von 5271 kWh/Jahr (Leichtbau) beziehungsweise 8045 kWh/Jahr für das Haus in Massivbauweise. Die Messwerte der 2-wöchigen (bewohnten) Fallstudien ergab, dass der Massivbau in 3 von 4 Fällen schlechter abschnitt und einen höheren Gasverbrauch aufweist. Dies kann auf die thermische Trägheit der Ziegel (thermische Masse) zurückgeführt werden. In nur einem Fall der Studie übertraf der Gasverbrauch des Leichtbaus den des Massivbaus (Abb. 10/ bewohnt). Rücksprachen mit teilnehmenden Studierenden ergaben, dass die Rauminnentemperaturen im MB teilweise sehr hoch waren. Da die Studierenden keinen Einfluss auf die Thermostatregelung hatten, wurden zwangsläufig die Fenster geöffnet. Die Abkühlung der Raumlufttemperatur führte wiederum zu einer gesteigerten Heizleistung. Eine weitere Studie wurde durchgeführt, in der die Häuser zwar beheizt wurden, aber unbewohnt waren (Co-Heating) (Abb. 10/unbewohnt). Der Zeitraum belief sich über 12 beziehungsweise vier Wochen. Interessanterweise schnitt das Massivhaus hier besser ab und der Gasverbrauch lag

deutlich unter dem des Holzhauses (vgl. Abb. 10 Unbewohnt). Dies kann zum einen daran liegen, dass sich die Studienteilnehmer während der bewohnten Studienzeiträume nicht an die Vorgaben hielten und so Ergebnisse verfälscht wurden.

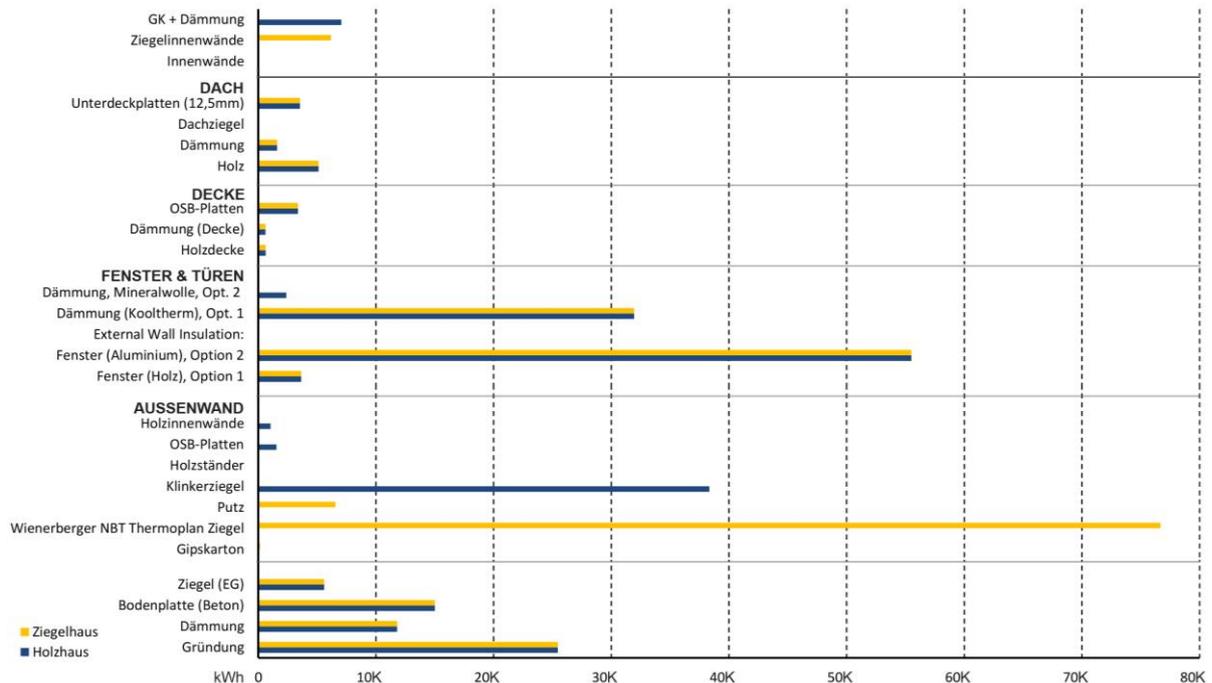


Abb. 9 Graue Energie: Konstruktionselemente

Ein weiterer Grund sind die tendenziell höheren Innenraumtemperaturen des Massivbaus. Die Tatsache, dass das Massivhaus im unbewohnten Zustand besser abschneidet, deutet auch auf eine suboptimale Nutzer-Interaktivität mit dem Haus hin, das heisst die positiven Effekte der thermischen Masse, die diese Wärme abgibt, auch wenn die Heizung keine Wärme produziert, wurde nicht optimal genutzt. Die Temperaturregelung wurde im Ziegelhaus von den Bewohnern durch extremes Lüften selbst übernommen.

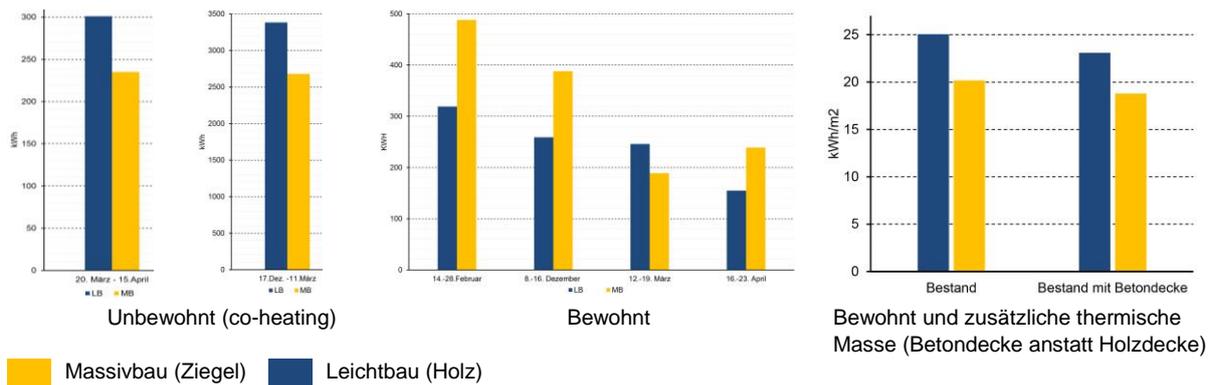


Abb. 10 Heizwärmebedarf (unbewohnt/co-heating)

## 6 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Untersuchungen der grauen sowie der Betriebsenergie zeigen ein inhomogenes Bild. Während die Energieverbräuche der bewohnten Häuser vermeintlich eindeutige Ergebnisse aufzeigten, dass das Leichtbauhaus einen niedrigeren Energieverbrauch als auch graue Energie aufweist, wurde diese Bild durch die Co-Heating

Studien widerlegt. Im unbewohnten Zustand konnte das Massivhaus viel bessere Werte erreichen als im bewohnten Zustand. Insgesamt kann resümiert werden, dass es nicht „die“ nachhaltigere Konstruktionsart gibt. Die Co-Heating Studie zeigt, dass das Massivhaus durchaus in der Lage ist, niedrigere Verbräuche zu erzielen als das Holzhaus. Dies kann zum einen daran liegen, dass die Nutzungszeiten und somit die Zeiten, in denen beheizt wurde nicht optimal waren. Auch sollten die Thermostattemperaturen nachjustiert werden, da es offensichtlich zu warm war im MB und so unnötige und vermeidbare Wärmeverluste durch Lüften resultierten, das den Gasverbrauch durch zusätzliches übermäßiges Heizen erhöhte. Es sollten ergänzend zu den beschriebenen Studien, weitere Untersuchungen durchgeführt werden, die a) die Nutzeraktivität, b) die ideale Heizintervalle und c) die ideale Heizsteuerung (Zeitpunkt und Temperierung) analysieren. Außerdem sollte explizit auf die unterschiedlichen physikalischen Gegebenheiten eingegangen werden, d.h. es erscheint nicht sinnvoll aus Vergleichsgründen, beide Haustypen gleich zu beheizen, da offensichtlich beide Häuser sehr unterschiedlich schnell beziehungsweise träge auf das Beheizen und Abkühlen reagieren. Dieser Effekt der thermischen Masse (Trägheit) oder das schnellere Aufheizen/Abkühlen von Materialien mit geringer thermischer Masse sollte in den Fokus einer Studie rücken. Auch wenn rein rechnerisch die vorliegende Studie Schlussfolgerungen zugunsten einer Materialart schließen lassen, sollten bei zukünftigen Bauprojekten bereits in der Planung des Gebäudes als auch der Gebäudetechnik die zukünftige (zeitliche) Nutzung berücksichtigt werden, bevor eine Auswahl der Materialien erfolgt. Nur eine ganzheitliche, die Nutzungsart und den Nutzungszeitraum berücksichtigende Herangehensweise, die zugleich graue Energie, als auch Betriebsenergie gleichermaßen bewertet, kann zu nachhaltigen Gebäuden und Gebäudetechnik führen. Des Weiteren könnte im Bereich der Decken und Wände zusätzlich thermische Masse von max. 10cm eingebaut werden, um einen positiven Effekt auf das Raumklima und ein schnelles Abkühlen der Innenraumluft während der Heizperiode zu verringern. Der stabilisierende Effekt der thermischen Masse auf die Rauminnentemperaturen konnte im vorliegenden Experiment nicht optimal genutzt werden. Der Zusammenhang zwischen der thermischen Masse und einer optimalen Heiztemperatur und Heizintervallen sollte Gegenstand einer zukünftigen Analyse sein. Auch wenn Materialien mit hoher thermischer Masse einen hohen Anteil an grauer Energie aufweisen, können die thermisch-physikalischen Eigenschaften dieser Materialien einen positiven Einfluss auf die Gesamtenergieeffizienz des Gebäudes haben und aus energetischer Sicht günstiger abschneiden, als Materialien mit einem geringen Anteil an grauer Energie. Dies sollte jeweils immer im Hinblick auf das Nutzerprofil und –verhalten erfolgen.

Die Thermostatregelung, mit welcher Temperatur beheizt wird, wenn die Bewohner im Haus sind sollte insbesondere für das Haus mit hoher thermischer Masse neu bewertet werden. Außerdem scheint es sinnvoll in Zeiten, wenn die Bewohner nicht im Haus sind oder während der Nacht die Heizung mit einer niedrigen Temperatur weiterlaufen zu lassen, als sie gänzlich abzuschalten. Diese Vorgehensweise reduziert größere Energieverbräuche beim Aufheizen der Innenraumluft und kann über längere Sicht zu Energieeinsparungen führen. Passive Maßnahmen, wie beispielsweise die Nutzung des ‚Sun- Space‘ sollten stärker in die Planung und Nutzung eingebunden werden, um die tatsächlichen und realen Nutzen zu ermitteln, z.B. solare Energiegewinne durch Verglasung oder Verringerung des Heizwärmehemissionsverlustes durch die ‚Pufferzone‘. Eine angepasste und optimierte Beheizung kann den Komfort für die Bewohner steigern und unnötige Wärmeverluste durch Lüften reduzieren. Die

Heizintervalle sowohl für den LB als auch den MB muss mit den Nutzerprofilen abgestimmt werden. Das heißt, eine Familie, die den ganzen Tag nicht im Haus ist, könnte von den schnell beheizten Innenräumen einer Leichtbaukonstruktion profitieren, wohingegen der Massivbau für Menschen in Frage kommt, die sich öfter im Haus aufhalten. Abschließend soll erwähnt werden, dass es sehr einseitig ist ein Material als besser geeignet einzustufen gegenüber einem anderen. Auch die Aussage, ein natürliches Material ist nachhaltiger, als ein synthetisches, kann so nicht gelten. Vielmehr sind Planende gefragt, die Planung eines Gebäudes ganzheitlich zu betrachten, d.h. neben der Materialwahl und des Energiebedarfs eines Gebäudes muss unbedingt auch die Steuerung der Heizung (eventuell Kühlung) und Lüftung über die Gebäudetechnik in den Fokus rücken und nicht zuletzt die Fassade als eines der wesentlichen Elemente des Gebäudes mit in die ganzheitliche Planung einbezogen werden. Erst wenn die optimalen Werte für die Fassade und die Regelung der Gebäudetechnik erfolgt ist, sollte die Lebenszyklusanalyse, also die Bewertung von Materialien und Bauteilen hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit, Lebensdauer, Wartung und Rückbaufähigkeit, Wiederverwendbarkeit etc. herangezogen werden.

## 7 Referenzen

- Campus360GmbH. 2015. "Entwicklung von Strategien Zur Implementierung Des Grauen Energieaufwands in Den Iterativen Integrierten Entwurfsprozess von Gebäuden."
- CityBuildingGlasgow. "Foto." <http://www.citybuildingglasgow.co.uk/project/glasgow-house/>.
- "Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018." 2018. *Official Journal of the European Union* 2018: 75–91.
- Geoff, Hammond, and Jones Craig. 2008. The University of Bath *Inventory of Carbon and Energy*.
- Graham, Peter. 2003. *Building Ecology*. Victoria, Australia: Blackwell Science Ltd.
- Hegger, Fuchs, Stark, Zeumer. 2008. *Energie Atlas*. Basel, CH: Birkhäuser.
- Holm, A.; Kagerer, F. 2019. *FIW München*.
- Homes, Sustainable. 1999. *Energy Sustainable Homes: Embodied Energy in Residential Property Development: A Guide for Registered Social Landlords*. <https://www.glidevale.com/> (January 16, 2020).
- IEA. 2016. *Basics for the Assessment of Embodied Energy and Embodied GHG Emissions for Building Construction*.
- Itard, L C M. 2009. "Embodied and Operational Energy Use of Buildings." *Lifecycle Design of Buildings, Systems & Materials*: 77–84.
- Mahler, Boris, Simone Idler, and Johannes Gantner. 2019. *Mögliche Optionen Für Eine Berücksichtigung von Grauer Energie Im Ordnungsrecht Oder Im Bereich Der Förderung Kurztitel: Graue Energie Im Ordnungsrecht / Förderung*.
- NBT. 2013. *NBT ThermoPlan System: Specifications*. <http://www.ecomerchant.co.uk/>.
- PRPArchitects. 2010. "Grundrisse." <https://www.prp-co.uk/>.
- Röck, Martin et al. 2019. "Embodied GHG Emissions of Buildings – The Hidden Challenge for Effective Climate Change Mitigation." *Applied Energy* 258(June): 114107. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>.
- Scotland, Resource Efficient. 2020. "Preventing Waste in Construction." (February 2019): 1–13. <https://www.resourceefficientscotland.com/Construction> (January 16, 2020).
- Wermke. 2011. *How Can Materials Contribute to Sustainable Architecture? Part 1- Embodied Energy*. Glasgow.
- Wermke, Christiane. 2012. "How Can Materials Contribute to Sustainable Architecture? Part 2- Operating Energy." Mackintosh School of Architecture.