

Diplomarbeit

Notwendigkeit und Lösungsansätze der Reduzierung von grauer Energie im Lebenszyklus einer Immobilie an einem ausgewählten Beispiel

Vorgelegt am: 16.08.2022

Von: **Max Markstein**
Walther-Rathenau Straße 28 A
08058 Zwickau

Studiengang: Bauingenieurwesen
Studienrichtung: Hochbau

Seminargruppe: HB19-1

Matrikelnummer: S4004396

Praxispartner: RTLL Lewerenz Holding AG
Anton-Günther-Weg 1
08107 Kirchberg

Gutachter: Dipl.-Ing. (FH) Michael Röse
Gutachter (BA): Dipl.-Chem. Elke Meding

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
Formelverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Bearbeitungsanreiz.....	3
2 Theoretische Grundlagen	4
2.1 Forschung und Wissensstand	4
2.2 Notwendigkeit zur Reduzierung von grauer Energie.....	9
2.3 Lösungsansätze der Reduzierung von grauer Energie.....	12
2.3.1 Reduzierung in Herstellungs- und Transportprozessen.....	12
2.3.2 Reduzierung durch Auswahl von Baustoff und Bauweise.....	13
2.3.3 Reduzierung durch Lebenszyklusverlängerung	14
2.4 Projektbeschreibung Bauvorhaben Campus RTLL.....	17
2.5 Vorgehensweise	18
3 Auswirkungen von baustoffbezogenen Herstellungs- und Entsorgungsprozessen.....	19
3.1 Detailausbildung	19
3.1.1 Konventioneller Außenwand- und Warmdachaufbau.....	19
3.1.2 Außenwand- und Flachdachaufbau in Holztafelbauweise	20
3.2 Herstellung, Entsorgung und daraus folgende Auswirkungen des konventionellen Tragwerks	21
3.2.1 Herstellung von Kalksandstein, Stahl und Beton	21
3.2.2 Entsorgung	24
3.2.3 Auswirkungen	24
3.3 Herstellung, Entsorgung und folgende Auswirkungen des Tragwerks der Holztafelbauweise	25
3.3.1 Herstellung	25
3.3.2 Abfallbehandlung/Entsorgung.....	26
3.3.3 Auswirkungen	27
4 Ökobilanzierung mit eLCA	29
4.1 Allgemeines	29
4.1.1 Datenerhebung und Eingabe	30
4.1.2 Berechnung und Bewertung	31
5 Vergleichende Untersuchung an der Beispielimmobilie.....	32

5.1	Vorgehensweise mit dem Ökobilanzierungstool eLCA	32
5.2	Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen	32
5.3	Sachbilanzierung	33
5.3.1	Berechnung Wärmedurchgangskoeffizient	34
5.3.2	Berechnung Dämmstoffdicke.....	39
5.3.3	Durchführung des Wärmeschutznachweises.....	41
5.3.4	Mengenermittlung	42
5.4	Eingabe in das Online-Ökobilanztool eLCA.....	44
5.5	Auswertung und Gegenüberstellung der Bilanzierungsergebnisse.....	45
5.5.1	Vergleich der grauen Energie KG 300	46
5.5.2	Vergleich der grauen Emissionen	49
6	Zusammenfassung.....	53
6.1	Fazit.....	53
6.2	Ausblick	55
	Literaturverzeichnis	57
	Anhangverzeichnis.....	60

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Auswertung des nichterneuerbaren kumulierten Energiebedarfs von MFH (Neubau), aufgegliedert nach Energiekonzept-Varianten.....	6
Abbildung 2	CO ₂ – Bilanz von MFH (Neubau), aufgegliedert nach Energiekonzept-Varianten.....	7
Abbildung 3	Anteile von grauer Energie (links) und GWP (rechts) am Beispiel eines MFH (Neubau) im Plusenergiehausstandard.....	8
Abbildung 4	Auswirkungen des verstärkten Treibhauseffekts auf das Ökosystem Erde.....	11
Abbildung 5	Flurkarte mit Firmengebäude RTLL (1036/1) und Baugrundstück (rot) (1131/3 und 1131/7).....	17
Abbildung 6	HOUSE KIT Stuttgart - Flachdach; Fa. INSTABUILT	18
Abbildung 7	Außenwandaufbau – einschaliges Kalksandstein-Mauerwerk	19
Abbildung 8	Dachaufbau Flachdach	19
Abbildung 9	Außenwandaufbau und Flachdachaufbau Holztafelbauweise.....	20
Abbildung 10	Benutzeroberfläche eLCA	44
Abbildung 11	Benutzeroberfläche CSV/XLS Import für konventionelle Bauweise	44
Abbildung 12	Vergleichsbeispiel zweier importierter Bauteile (oben – konventionell; unten - Holztafelbau).....	45
Abbildung 13	Vergleich der grauen Energie beider Bauweisen, aufgeteilt auf die Phasen Herstellung, Instandhaltung, Entsorgung und Wiederverwertung	46
Abbildung 14	Vergleich der grauen Energie der Bauteilgruppen (KG 300) in konventioneller Bauweise.....	47
Abbildung 15	Vergleich der grauen Energie der Bauteilgruppen (KG 300) in Holztafelbauweise	48
Abbildung 16	Vergleich der Innenwandkonstruktion zwischen tragend (341) und nichttragend (342) in konventioneller Bauweise	49
Abbildung 17	Vergleich der grauen Emissionen der Bauteilgruppen (KG 300) in konventioneller Bauweise.....	49
Abbildung 18	Vergleich der grauen Emissionen der Bauteilgruppen (KG 300) in Holztafelbauweise	50

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Vergleich natürlicher und anthropologischer Treibhauseffekt.....	10
Tabelle 2	Vergleich der Anteile grauer Energie und dem GWP von Beton C20/25, Bewehrungsstahl und Kalksandstein	25
Tabelle 3	Vergleich der Anteile grauer Energie und dem GWP von Konstruktionsvollholz und OSB-Platten.....	28
Tabelle 4	Eingabe der Stammdaten in eLCA.....	33
Tabelle 5	Zuordnung von Wärmedurchgangskoeffizient zu Bauteil	41
Tabelle 6	Importtabelle konventionelle Bauweise	42
Tabelle 7	Importtabelle Holztafelbauweise	43
Tabelle 8	Ergebnisse beider Bauweisen für ein EFH nach dem vereinfachten Verfahren (graue Energie und Treibhauspotenzial)	46
Tabelle 9	Gegenüberstellung von grauer Energie und grauen Emissionen im Variantenvergleich.....	51

Formelverzeichnis

Formel 1	Abspaltung von Kohlendioxid bei der Erhitzung von Calciumcarbonat	21
Formel 2	Reaktion von Wasser und Calciumoxid zu Calciumhydroxid.....	21
Formel 3	Reaktion von Calciumhydroxid und Kieselsäure zu Calciumsilikathydrat	21
Formel 4	Reaktion von Eisenerz und Kohlenmonoxid zu Roheisen und Kohlendioxid.....	22
Formel 5	Reaktion von Kohlenstoff und Sauerstoff zu Kohlendioxid	22
Formel 6	Abspaltung von Kohlendioxid bei der Erhitzung von Calciumcarbonat	23
Formel 7	Berechnung Wärmedurchgangswiderstand R_T	34
Formel 8	Berechnung des oberen (R_T') und unteren (R_T'') Grenzwertes für inhomogene Bauteile.....	35
Formel 9	Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten.....	35

Abkürzungsverzeichnis

äq	-	äquivalent = gleichwertig
BBSR	-	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
EFH	-	Einfamilienhaus
EnEV	-	Energieeinsparverordnung
EPD	-	Umweltproduktdeklaration
EPS	-	expandiertes Polystyrol (Styropor)
GEG	-	Gebäudeenergiegesetz
GWP	-	Treibhauspotential (global warming potential)
KEAne	-	nicht erneuerbaren kumulierten Energieaufwand
KG	–	Kostengruppe
kWh	-	Kilowattstunden
KS	-	Kalksandstein
LC	-	Lebenszyklus (life cycle)
LCA	-	Lebenszyklusanalyse (life cycle assessment)
MFH	-	Mehrfamilienhaus
MJ	-	Megajoule
ODP	-	Ozonabbaupotential (ozon depletion potential)
o.g.	-	oben genannt
PE	-	Primärenergie
PENRT	-	kumulierte, nicht erneuerbare Primärenergie
PLZ	-	Postleitzahl
Str.	-	Straße
TGA	-	technische Gebäudeausrüstung
Wfl.	-	Wohnfläche
WDVS	-	Wärmedämmverbundsystem
z.B.	-	zum Beispiel
°C	-	Grad Celsius

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

„Ein Produkt wird als nachhaltig bezeichnet, wenn selbiges die Bedürfnisse der heutigen Generation befriedigt, ohne die [...] [Lebensqualität] zukünftiger Generationen zu beeinflussen.“¹

In der Theorie der nachhaltigen Entwicklung setzt sich Nachhaltigkeit aus dem Zusammenspiel der Grundprinzipien Ökologie (Umwelt), Ökonomie (Wirtschaft) und dem sozialen Aspekt (Gesellschaft) zusammen, um das Ziel zu verfolgen, das Ökosystem Planet Erde als Lebensgrundlage zu erhalten. (Verweis: 3. Projektarbeit: Theorie der Nachhaltigkeit)

„Die aktuellen ökologischen, ökonomischen und sozialen Herausforderungen machen einen umfassenden gesellschaftlichen Wandel in Richtung Nachhaltigkeit notwendig.“² Dieser Umschwung inkludiert sämtliche „[...] [gemeinschaftliche] Gruppen, Staaten und die Staatengemeinschaft sowie Unternehmen und Wissenschaft“³, um die Umwelt, in der wir leben, zu schützen und diese für unsere Nachkommenschaft bereitzustellen.

Demzufolge ist der richtige Umgang mit den uns vorliegenden Rohstoffen unumgänglich, um einerseits die Eigenregulierung des Ökosystems zu wahren und andererseits mit ressourceneffizienten Produkten den aktuellen Bedarf zu decken. Daraus lässt sich die Notwendigkeit ableiten, zielführendes Energie- und Ressourcenmanagement in jedem Wirtschaftszweig zu integrieren und dieses in allen Wirtschaftsprozessen ganzheitlich zu analysieren und zu optimieren.

Eine allumfassende Betrachtungsweise ermöglicht die Bilanzierung des gesamten Lebenswegs von Produkten, das heißt von der Rohstoffbereitstellungsphase bis zur Entsorgung beziehungsweise zur Wiederverwendung. Der soeben genannte Planungsansatz wird zukünftig eine zentrale Rolle spielen müssen, um sämtliche, am Produkt beteiligte Inputs und Outputs zu dokumentieren und die daraus resultierenden Umweltwirkungen erkennen zu können. Diese sogenannte Lebenszyklusanalyse, besser bekannt unter dem Namen Ökobilanz, ist der Schlüssel zur ganzheitlichen ökologischen Betrachtung von Produkten aller Art.

Am Beispiel der „elektrisch betriebenen Zahnbürste“ wird das Prinzip deutlich. Selbige hat eine bestimmte Lebensdauer. Dieser Lebenszyklus kann grob in vier Abschnitte (Herstellung und Transport, Nutzung, Entsorgung, ggf. Recycling) unterteilt werden. Zu Beginn des Lebenswegs wird das Produkt geplant und die Umsetzung veranlasst.

¹ (Markstein, 2022, S. 11)

² (Umwelt Bundesamt, 2022)

³ (Umwelt Bundesamt, 2022)

Sämtliche Einzelteile werden an verschiedenen Standpunkten produziert, transportiert und schlussendlich zusammengesetzt. Hierbei werden sowohl Rohstoffe und Ressourcen verwendet, um daraus die Produktbestandteile herzustellen und zu formen, als auch, um Transporte und Rohstoffförderung zu gewährleisten. Nach dem letztendlichen Transport der Zahnbürste in den Vertrieb erfolgt der Erwerb und die Benutzung. Bei niedrigem Akkustand wird das Produkt mit Strom geladen und ist wieder betriebsbereit. Es liegt somit ein Energiebedarf in der Nutzungsphase vor, welcher durch die Stromversorgung des Haushalts gedeckt wird. Sobald die Zahnbürste ab einem Zeitpunkt X nicht mehr funktionstüchtig ist, wird diese entsorgt und beseitigt. Dafür entsteht abermals ein Energiebedarf für Transport, Rückbau, Separierung und Abfallbehandlung. Gegebenenfalls können recyclebare Bestandteile der Zahnbürste durch erneute Energiezufuhr wiederverwendet werden und erhalten einen verlängerten Lebenszyklus.

Aus dem Beispiel geht hervor, dass in jeder Phase des Lebenswegs eines Produkts eine bestimmte Menge Energie notwendig ist, um produktbezogene Prozesse durchzuführen. Dieser jeweilige Energiebedarf geht mit dazugehörigen Prozessemissionen einher. Um im gesamten Lebenszyklus die darin verwendeten Energien/Materialien (Inputs) und die ausgestoßenen Abfall- beziehungsweise Nebenprodukte (Outputs) einordnen und bewerten zu können, ist ein komplexer Planungsprozess notwendig. Solch eine detaillierte Aufgliederung ist wiederum unersetzlich, um optimale Materialströme und Prozessabläufe zu erkennen und zu wählen, Herstellung, Rückbau und Recyclingfähigkeit zu gewährleisten und somit ressourcen- und energieeffizient zu produzieren.⁴

Währenddessen diese Ansätze in „anderen Industriezweigen [...] bereits gesetzlich eingefordert werden [...] [, hängt die Baubranche in] selbiger Entwicklung deutlich hinterher.“⁵ Der notwendige Schritt hierzu: Die Verpflichtung zur Verwendung einer integralen Planung von Bauwerken. Die integrale Planung umfasst die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus des Produktsystems Gebäude, von der Projektentwicklung bis zum Abbruch. Hierbei steht ein ganzheitliches, nachhaltigkeitsorientiertes Konzept für Errichtung, Bewirtschaftung und Entsorgung der Immobilie im Vordergrund, um die Symbiose aus geringem Energiebedarf, reduzierter Umweltbelastung (Ökologie) und sowohl hoher Behaglichkeit (Soziales), als auch angemessener Wirtschaftlichkeit (Ökonomie) gewährleisten zu können.

⁴ vgl. (Dr. Michael Bauer, 2007, S. 16)

⁵ (Dr. Michael Bauer, 2007, S. 16)

1.2 Zielsetzung und Bearbeitungsanreiz

„Bauen und Wohnen sind für ca. 65 % der [insgesamt] verbrauchten Energiemenge verantwortlich. Auf den reinen Bau entfallen rund 60 % davon. Das entspricht einem Anteil von 25 % der jährlichen Treibhausgasemissionen. [...] Wir sind auf dem „CO₂ – Auge“ weitgehend blind – und das in der entscheidenden Branche für das GWP insgesamt.“⁶

Appellierend an Bauingenieur: -innen, Bauherren, Bauunternehmen und die Politik soll diese Diplomarbeit Anstoß geben, das alteingesessene Denken zu wandeln, Egoismus abzustreifen und für zukünftige Generationen zu sorgen. Die Verantwortung liegt in der Hand aller am Bau Beteiligten, die Problematik der Klimakrise ist präsenter denn je und der Handlungsbedarf groß. Trotz zahlreicher Studien („Graue Energie im Ordnungsrecht/Förderung“, „Ökobilanz: Punkten mit dem Plusenergiebaustoff Holz“, etc.), Bewertungsorganisationen, Zertifizierungssysteme (DGNB, BNB, BREEAM, LEED, etc.) und umfangreicher, bedeutungsvoller Literatur („Green Buildings“, „Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz“, „Nachhaltiges Planen, Bauen und Wohnen“, etc.) fehlt die Initiative, zu agieren.

Aussagekräftig soll diese Arbeit die Notwendigkeit der Energieeinsparung im gesamten LC einer Immobilie aufzeigen und die relevanten Lösungsmöglichkeiten zusammenfassen, graue Energie zu reduzieren und die grauen Emissionen⁷ zu minimieren. Speziell für die RTLL Lewerenz Holding AG als Praxispartner und als mittelständiges Generalbauunternehmen ist die Lösungsmöglichkeit der Bauweisen-, beziehungsweise der Baustoffauswahl ausschlaggebend, da diese im Neubau klimaschutztechnisch die größte Relevanz besitzt.

Hierbei wird das Bauvorhaben „Campus RTLL“ als vergleichbares Neubauprojekt einer Einfamilienhausgruppe fungieren. Im Folgenden wird solch ein Einfamilienhaus in jene Bauteile aufgegliedert, welche den Großteil der grauen Energie in der Baukonstruktion in Anspruch nehmen. Somit kann die Frage beantwortet werden, wie viel graue Energie in diesen Bauteilen vorhanden ist, wie hoch das Energieeinsparpotential (bezogen auf graue Energie) durch die Baustoffauswahl ist und inwiefern ein Variantenvergleich von Bauweisen die ökologische Bewertung selbiger unterstützt. Dazu erfolgt die Wahl aus konventionell gefertigten Konstruktionen im Gegensatz zu einer alternativen Bauweise, um die Inputs und Outputs der Bauteile gegenüberzustellen.

⁶ (Hauke, 2021)

⁷ Prozessbedingte Emissionen

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Forschung und Wissensstand

Der Energieausweis ist seit 2014 Pflichtdokument einer Immobilie und bietet Einblick in die Energieeffizienz und die Energiekosten während der Gebäudenutzung.⁸ Die gesetzlichen Rahmenbedingungen und Vorgaben zur Erstellung solch eines Dokuments werden seit dem 01.11.2020 durch das Gebäudeenergiegesetz (GEG 2020) vorgeschrieben. Diese Gebäudebewertung verfolgt den Zweck, einen „möglichst sparsamen Einsatz von Energie in Gebäuden einschließlich einer zunehmenden Nutzung erneuerbarer Energien zur Erzeugung von Wärme, Kälte und Strom für den Gebäudebetrieb“⁹ zu gewährleisten. Weiterhin soll das Gesetz im „Interesse des Klimaschutzes [...] [fossile Brennstoffe schonen und] [...] die energie- und klimapolitischen Ziele der Bundesregierung [...]“ unterstützen.

Die Entwicklung des aktuellen GEG's reicht bis ins Jahr 1976 zurück, als das Energieeinspargesetz (EnEG) in Kraft trat. Vor 46 Jahren war die Zielsetzung die Reduzierung von erhöhten Energiekosten, welche durch steigende Energiepreise (Ölkrise 1976) hervorgerufen wurden. Somit mussten erste bauliche Maßnahmen durch Details des Wärmeschutzes gesetzlich verordnet werden, um Energieverluste zu reduzieren. Bis zum jetzigen Zeitpunkt folgten die 1. Wärmeschutzverordnung (WärmeschutzV - 1977), die 2. Wärmeschutzverordnung (1984), die 3. Wärmeschutzverordnung (1995) und die Energieeinsparverordnung (EnEV - 2002). Von da an galt die EnEV als Leitfaden zur energetischen Bewertung von Gebäuden während der Nutzungsphase und wurde bis ins Jahr 2016 perfektioniert. Hierbei erfolgte sukzessiv die Aufnahme der Richtlinien 2002/91/EG (2007) und 2010/31/EU (2013), welche sich mit der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden befassen.¹⁰ Der Begriff Gesamtenergieeffizienz wird definiert als typischer „Energieverbrauch [eines Gebäudes] für Raumheizung, Raumkühlung, Warmwasserbereitung für den häuslichen Gebrauch, Lüftung, eingebaute Beleuchtung und andere gebäudetechnische Systeme“¹¹ Offensichtlich bezieht sich diese „Gesamtenergieeffizienz“ jedoch nur auf die Phase der Nutzung einer Immobilie und demzufolge ausschließlich auf die Phase des Gebäudebetriebs. Laut Definition wird die Gesamtenergieeffizienz nur aus dem „berechneten oder tatsächlichen Energieverbrauch [...] [der oben genannten technischen Gebäudeausrüstung] bestimmt“¹² und vernachlässigt gänzlich das Tragwerk, sämtliche Baukonstruktionen und Fassadenelemente. Es ist offensichtlich, dass diese in der Nutzungsphase einen vergleichsweise geringen Energieaufwand in Anspruch nehmen (Reinigung,

⁸ vgl. (Energieausweis-Vorschau.de - EAV, 2022)

⁹ (Bundesamt für Justiz, 2022)

¹⁰ vgl. (Wikipedia, 2022)

¹¹ (EnEV - online, 2022)

¹² (EnEV - online, 2022)

Instandhaltung, Pflege), jedoch in ihrer Bereitstellungs- und Entsorgungsphase große Mengen an Energie benötigen. Die TGA, welche im Gebäude installiert wird, bindet ebenso Energiemengen in der Herstellung und Entsorgung. Diese sind im Vergleich zu konventionellen Baukonstruktionen wesentlich geringer, dennoch unentbehrlich, um haustechnische Anlagen qualitativ hochwertig zu erstellen, zügige energetische Amortisationszeiträume¹³ zu erzielen und einen angemessenen Wirkungsgrad zu sichern. Die Baukonstruktion hingegen erfüllt in ihrer Lebensphase nach der Errichtung des Bauwerks (Nutzungsphase des Gebäudes) die Funktion, Tragfähigkeit Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit zu gewährleisten. Dabei bleibt die für die Herstellung, den Transport und die zukünftige Beseitigung der Baustoffe notwendige Energie in der Baukonstruktion bis zum Lebensende derer gebunden, ohne sich energetisch zu amortisieren.

Dieser Energieaufwand, genauer gesagt der kumulierte „nichterneuerbarer Primärenergie [-aufwand] [...] zur Herstellung und Entsorgung eines [...] [Produkts] in seinem gesamten LC“¹⁴ wird als graue Energie bezeichnet. Die Beachtung der grauen Energie in der Berechnung der Gesamtenergieeffizienz eines Gebäudes würde diese vervollständigen und die Energieeffizienz der Immobilie über deren gesamten Lebensweg (Bereitstellungs-, Errichtungs-, Nutzungs-, Entsorgungsphase) definieren.

Lösung bietet hier der komplexe Bilanzierungsprozess der Lebenszyklusanalyse (Ökobilanz), welcher die „Qualifizierung von Umweltinformationen durch die Erfassung und Zusammenfassung“¹⁵ selbiger ermöglicht. Somit wird jeder Lebensabschnitt des Produkts (hier die Immobilie) ökologisch betrachtet und analysiert, was nicht nur die graue Energie, sondern auch die damit verbundenen Prozessemissionen (graue Emissionen) inkludiert. Diese international genormte Bilanzierungsmethode (DIN EN ISO 14040; DIN EN ISO 14044; DIN EN 15978) ermöglicht neben der Datengrundlage für die GEG-Berechnung eine ganzheitliche Betrachtung von Gebäuden und die Einsicht in das Recycling-Potenzial der verwendeten Baukonstruktionen. Weiterhin können aussagekräftige, vergleichbare Informationen (Umweltindikatoren) zur Entscheidungsfindung über Bauweisen und Anlagentechniken bei Neubau- und Sanierungsvorhaben zur Verfügung gestellt werden.

¹³Zeitraum, ab dem Anlage mehr Energie erzeugt, als an Primärenergie für Herstellung benötigt wurde

¹⁴ (Markstein, 2022, S. 31)

¹⁵ (Markstein, 2022, S. 25)

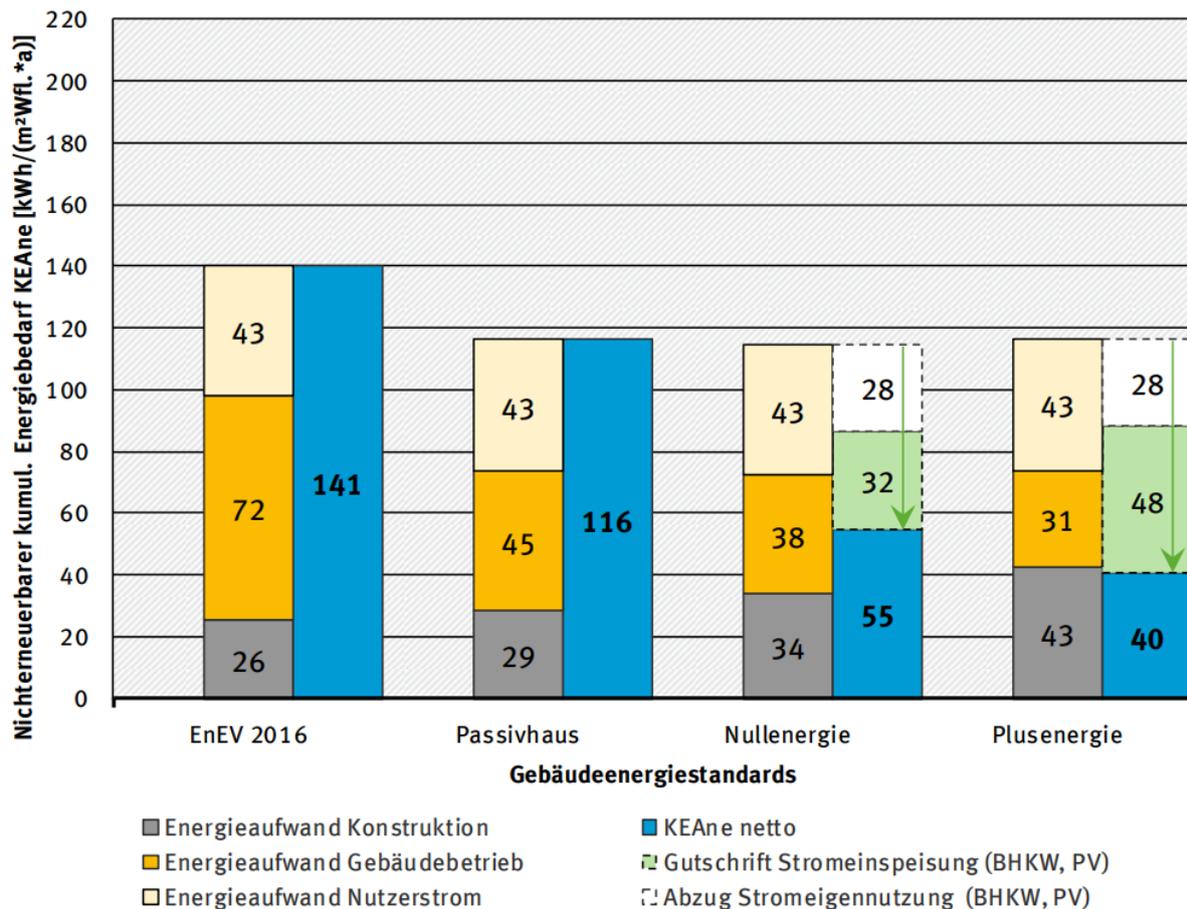


Abbildung 1 Auswertung des nichterneuerbaren kumulierten Energiebedarfs von MFH (Neubau), aufgegliedert nach Energiekonzept-Varianten (Dr. Boris Mahler, 2019, S. 49)

In Abbildung 1 aus dem Bericht „Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus (Anschlussbericht)“¹⁶ des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) erfolgte die energetische Bilanzierung von konventionellen Mehrfamilienhäusern in verschiedenen Energiekonzeptvarianten. Hierbei ist in dem Balkendiagramm erkennbar, dass sich steigende Energieeffizienz im Gebäudebetrieb proportional zum Energieaufwand für die Gebäudekonstruktion verhält. Das bedeutet, je mehr Energie in der Nutzungsphase eingespart wird (gelb), desto mehr Energie muss dafür in der Herstellungsphase/Entsorgungsphase des Gebäudes (grau) aufgewendet werden. Weiterhin ist ersichtlich, dass durch die Verwendung von Energie-/Stromerzeugern wie Blockheizkraftwerken und/oder Photovoltaik-Anlagen (grün/weiß) der Nutzerstrom beziehungsweise der Energieaufwand während der Nutzungsphase reduziert werden kann. Dabei bleibt der nichterneuerbare Primärenergiebedarf zur Baukonstruktionsherstellung jedoch nahezu gleich (Vergleich grau zu blau - Plusenergie). Klar wird, dass die konventionelle Baukonstruktion durch strengere Vorgaben (Null-, Plusenergiestandard) immer energieundurchlässiger werden muss,

¹⁶ (Dr. Boris Mahler, 2019)

um diese Anforderungen überhaupt erfüllen zu können. Somit besteht beispielsweise bei einem Fenster die Notwendigkeit eines geringeren Wärmedurchgangskoeffizienten¹⁷. Zur Realisierung dessen wird mehr Material (hier Glas) benötigt. Daraus folgt die Inanspruchnahme von zusätzlicher grauer Energie um das Bauteil (Fenster) herzustellen und das Gebäude ausschließlich in der Nutzung energieeffizienter zu gestalten. Wird mehr graue Energie aufgewendet, folgt daraus ein Anstieg an grauen Emissionen.

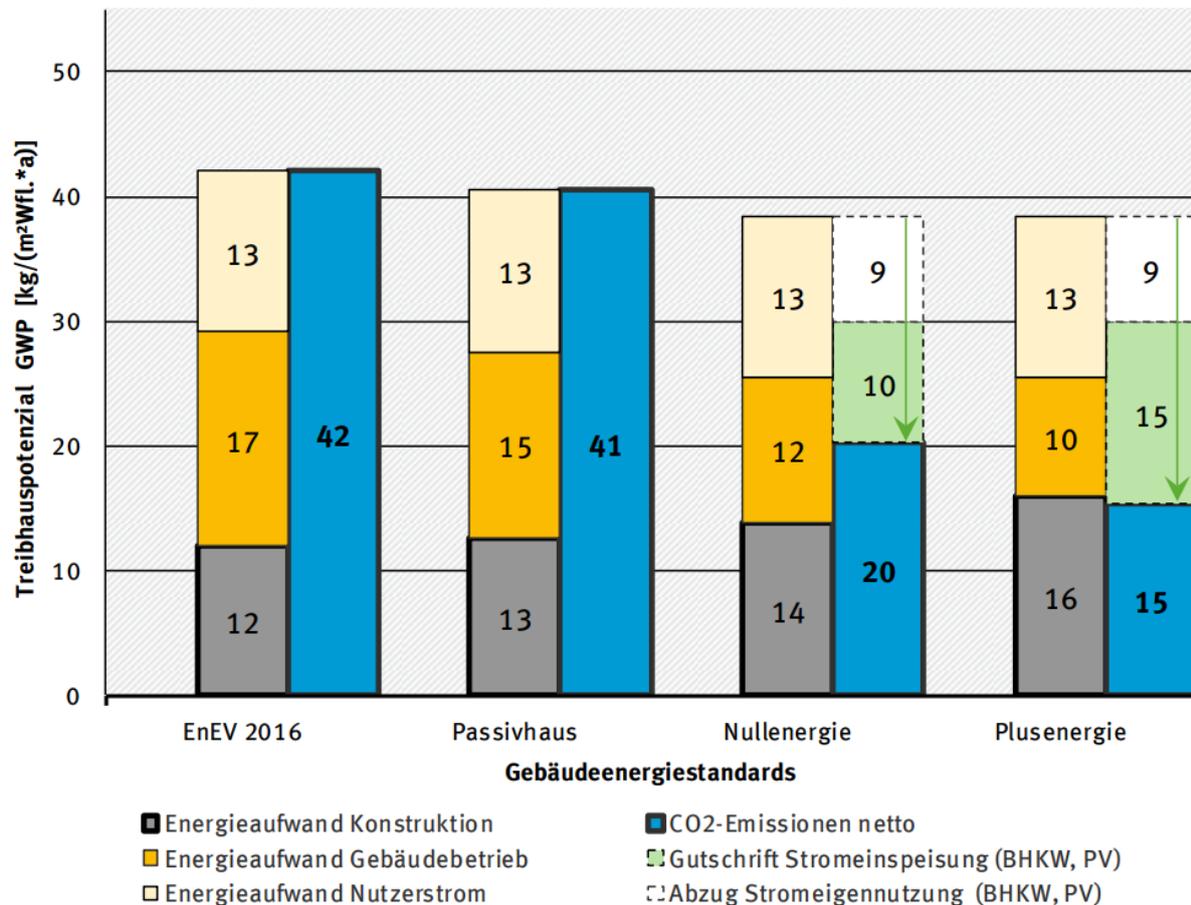


Abbildung 2 CO₂ – Bilanz von MFH (Neubau), aufgliedert nach Energiekonzept-Varianten

(Mahler, Idler, & Gantner, 2019, S. 18)

Ebenso linear abhängig sind diese vom Energieaufwand. Dies wird in Abbildung 2 verdeutlicht. Zu erkennen ist, dass weniger Treibhausgase während des Gebäudebetriebs emittiert werden (gelb), je weniger Energie für die Gebäudenutzung benötigt wird. Beispiele hierfür sind Heizkessel, welche geringere Mengen an Wärmeträgern verbrennen, insofern das Gebäude mehr Wärmeenergie speichern kann. Somit werden geringere Abgasmengen emittiert. Es folgt der resultierende Anstieg an notwendiger Wärmespeicherkapazität, welcher durch die Baukonstruktion gewährleistet werden muss. Davon abhängig ist der Anstieg an nichterneuerbarer

¹⁷ Spezifische Wärmeleitfähigkeit eines Bauteils

Primärenergie zur Bereitstellung der Baustoffe, welcher einen Anstieg an Treibhausgasemissionen mit sich bringt.

Beispielhaft für die Bilanzierung steht 1 m³ verbauter Beton mit einer bestimmten Menge an gebundener nichterneuerbarer Primärenergie (in kWh/a) und einer bestimmten Menge an emittierten Treibhausgasen (in kg CO₂-Äq./a). Wird der gesamte Lebenszyklus des Kubikmeters Beton (in Jahren) berücksichtigt, kann somit eine Ökobilanz dessen erstellt werden. Diese beschreibt die nichterneuerbare Primärenergie und das Treibhauspotential des einen Kubikmeters Betons pro Jahr und schließt daraus auf mögliche Umwelteinwirkungen.

Nun besteht ein Bauwerk nicht nur aus Beton, sondern aus zahlreichen anderen Materialien, Baukonstruktionen, Anlagen und Elementen, welche alle die Phasen des Lebenszyklus beeinflussen und somit anteilig graue Energie binden beziehungsweise graue Emissionen ausstoßen.

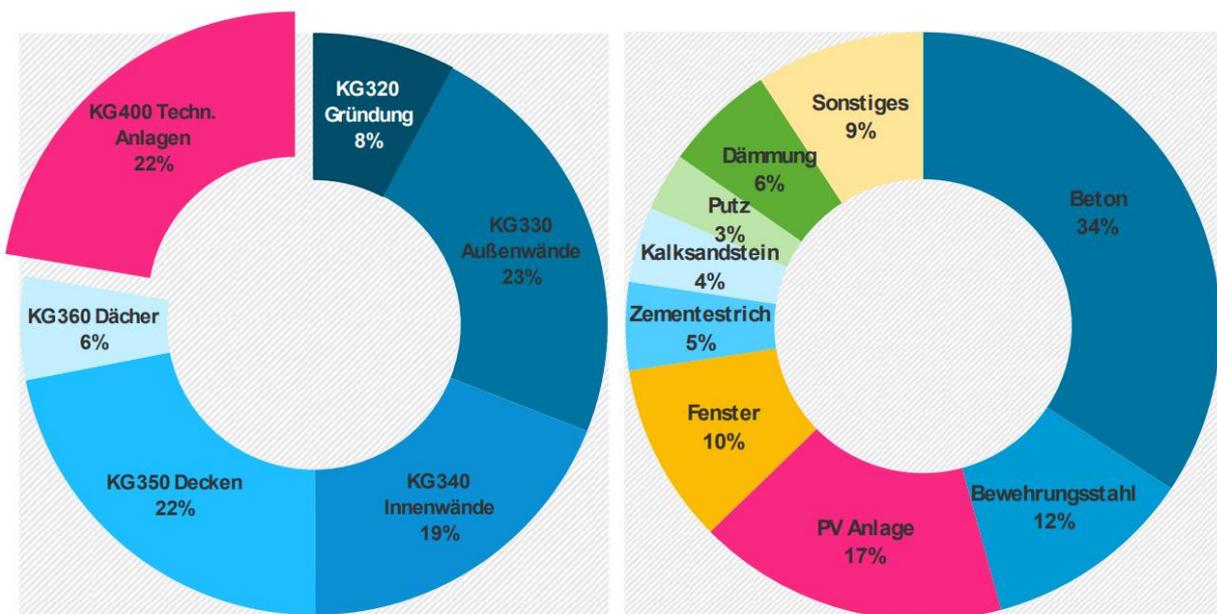


Abbildung 3 Anteile von grauer Energie (links) und GWP (rechts) am Beispiel eines MFH (Neubau) im Plusenergiehausstandard (Mahler, Idler, & Gantner, 2019, S. 21)

Wie sich diese Anteile am Beispiel Neubau eines MFH in Plusenergiehausstandard auf die Bestandteile der Baukonstruktion beziehungsweise auf Baustoffe, Bauelemente und Anlagen zerlegen, ist in Abbildung 3 dargestellt. Das Tortendiagramm (links) zeigt das Verhältnis von grauer Energie in technischen Anlagen zur grauen Energie, gebunden in konventionellen Bauteilen aus Beton, Stahl, Mauerwerk und WDVS (22%: 78%).

Die Baukonstruktion vereinigt hierbei knapp 90% der grauen Energie, davon 64% in Wänden und Decken. Demzufolge sind diese, soeben genannten Bauteile

verantwortlich für die überwiegende Menge an grauer Energie im Gebäude und ausschlaggebend für das Ergebnis einer Ökobilanz.

Im Tortendiagramm rechts wurde das GWP prozentual auf die jeweiligen Baustoffe, Anlagen und Bauelemente aufgespalten. Hierbei muss das Hauptaugenmerk auf den zur Herstellung der Baukonstruktion benötigten Baustoffen (Beton, Stahl, Kalksandstein, Dämmung) und Bauelementen (Fenstern) liegen. Diese nehmen, wie im Diagramm links, den Großteil an grauen Emissionen (hier mit 74%) ein und sind Hauptgrund für das hohe Treibhauspotential des untersuchten Objekts.

2.2 Notwendigkeit zur Reduzierung von grauer Energie

Das Treibhauspotential (GWP), auch als CO₂-Äquivalent bezeichnet, stellt die Erwärmungswirkung beziehungsweise den Beitrag einer chemischen Verbindung zum Treibhauseffekt dar.¹⁸ Die Maßzahl gibt die Menge an Treibhausgas¹⁹ an, welche im Vergleich „zur [...] [selben] Menge Kohlendioxid (CO₂) über einen Zeitraum von [...] [100] Jahren zum Treibhauseffekt beiträgt.“²⁰

Der Treibhauseffekt ist ein natürlicher Vorgang und beschreibt „die Wechselwirkung der Erdatmosphäre auf den Wärmehaushalt der Erde“²¹. Hierbei werden durch natürliche/menschenhandgeschaffene Prozesse strahlungswirksame Gase (Kohlendioxid, Ozon, Methan, Fluorchlor-Kohlenwasserstoffe, Distickstoffmonoxid) in die Atmosphäre emittiert.

Kurzweilige Sonnenstrahlen werden von der Sonne emittiert und erreichen durch das Durchdringen der Atmosphäre die Erdoberfläche. Auf dem Planeten Erde wird ein Teil der Strahlungsenergie in langwellige Wärmestrahlung (Infrarotstrahlung) umgewandelt, partiell von Objekten und der Erdoberfläche aufgenommen und teilweise wieder Richtung All reflektiert. Trifft diese reflektierte Wärmestrahlung auf die Treibhausgase in der Atmosphäre, wird sie dort absorbiert. Diese Absorption wird ermöglicht durch das Vorliegen symmetrischer Treibhausgasatome, welche die elektromagnetische Infrarotstrahlung aufnehmen können. Infolgedessen findet ein vermindertes Austreten von Wärmestrahlung in den kosmischen Raum statt und die untere Atmosphäre beziehungsweise die Erdoberfläche wird weiter erwärmt.

Da der Treibhauseffekt sowohl natürlich als auch menschengemacht ist, muss dieser in den natürlichen und den anthropogenen Treibhauseffekt untergliedert werden. Folgende Tabelle vergleicht die Ursachen, die emittierten Treibhausgase und die Auswirkungen des natürlichen und des anthropologischen Treibhauseffektes. Weiterhin ist deren Beitrag zum Treibhauseffekt in Prozent angegeben.

¹⁸ vgl. (Baunetz_Wissen_, 2022)

¹⁹ beispielsweise Methan, Kohlendioxid, Lachgas

²⁰ (Baunetz_Wissen_, 2022)

²¹ (Markstein, 2022, S. 15)

	Natürlicher Treibhauseffekt	Anthropogener Treibhauseffekt
hervorgerufen durch:	Pflanzen Tiere Eruptionen ²² Ausgasungen	Emissionen aus menschlicher Aktivität aus: Industrie Verkehr Verbrennung fossiler Brennstoffe Abholzung von Wäldern
Treibhausgase:	CO ₂ – Kohlendioxid CH ₄ – Methan O ₃ – Ozon	CO ₂ - Kohlendioxid CH ₄ – Methan FCKW – Fluorchlor-Kohlenwasserstoffe (20%) N ₂ O – Lachgas (15%)
Beitrag zum Treibhauseffekt in %	CO ₂ – Kohlendioxid (50%) FCKW – Fluorchlor-Kohlenwasserstoffe (20%) CH ₄ – Methan (15%) O ₃ – Ozon (10%) N ₂ O – Lachgas (5%) ²³	
Folgen:	Verhinderung des vollständigen Entweichens der reflektierten Wärmestrahlung	Verstärkung des nat. Treibhauseffekts

Tabelle 1 Vergleich natürlicher und anthropologischer Treibhauseffekt
(eigene Darstellung in Anlehnung an Klett / Kai Zimmermann, 2022)

Die Verhinderung des vollständigen Entweichens von reflektierter Wärmestrahlung durch den natürlichen Treibhauseffekt ist Grundlage allen Lebens auf unserem Planeten. Es verbleibt dabei in Summe mehr Wärme an der Erdoberfläche. Ohne den natürlichen Treibhauseffekt würden auf der Erde anstatt durchschnittlich +15°C, konstante Minustemperaturen von rund -18°C herrschen. Kommt zu diesen

²² Vulkanausbruch

²³ (Klett / Kai Zimmermann, 2022)

natürlichen Entwicklungen der anthropologische Treibhauseffekt hinzu, erhöht sich die Menge an Treibhausgasen in der Atmosphäre und somit auch die Absorptionskapazität derer. Das bedeutet, es dringt weniger Wärmestrahlung ins All.

Da nun die Sonne konstant die Erde bestrahlt, liegt immer mehr Wärmestrahlung an der Erdoberfläche vor, was gravierende Veränderungen am Ökosystem Erde zur Folge hat.

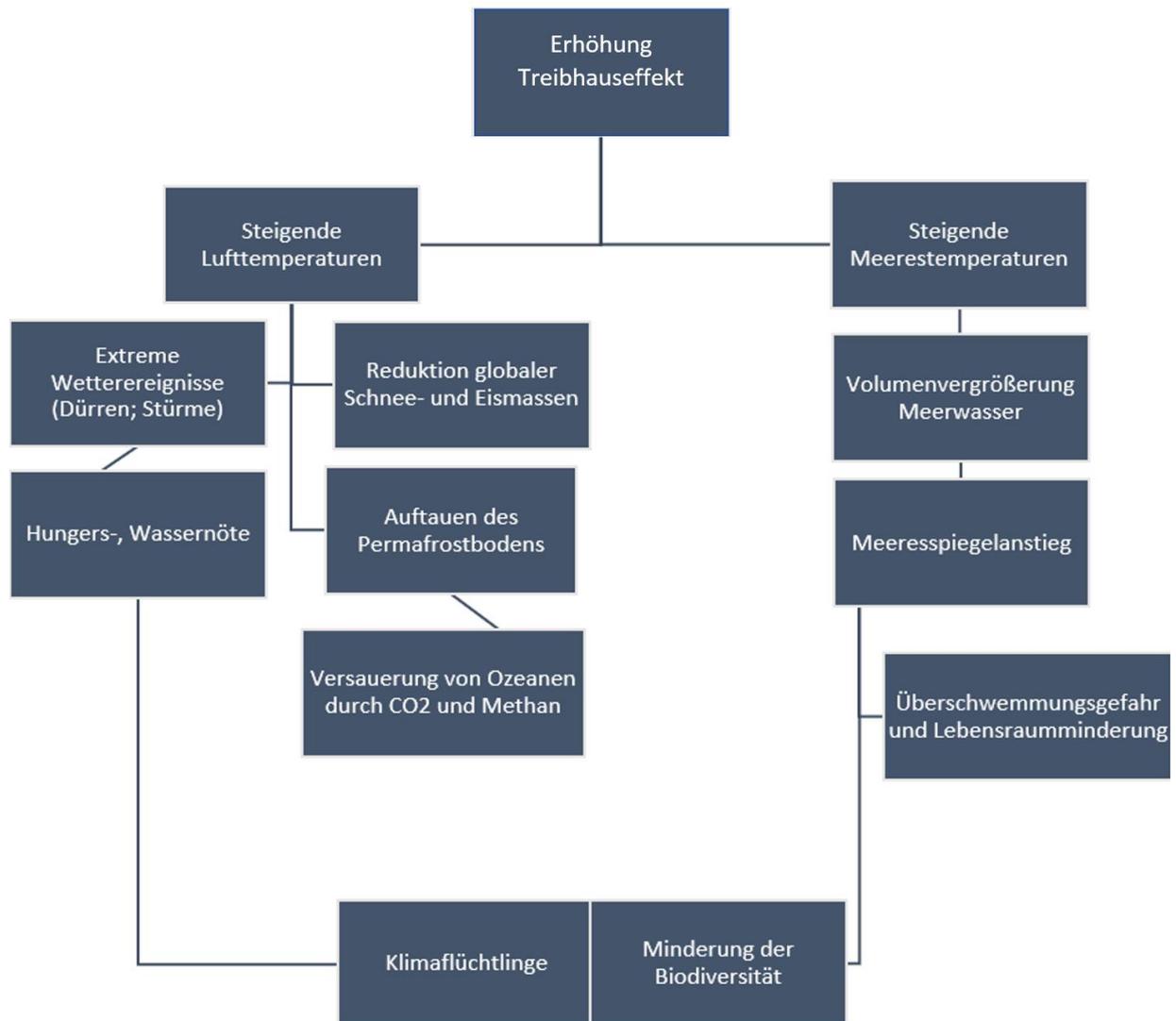


Abbildung 4 Auswirkungen des verstärkten Treibhauseffekts auf das Ökosystem Erde

(eigene Darstellung in Anlehnung an studyfix, 2022)

Die in Abbildung 4 aufgeführten Veränderungen (steigende Luft- und Meerestemperatur) aus ansteigender Durchschnittstemperatur bringen irreversible und drastische Folgen mit sich, welche auf sämtliche Lebensformen der Erde Einfluss nehmen. Demzufolge muss zukünftig mehr Aufmerksamkeit auf die Problematik Erderwärmung und ebenso auf verantwortliche Treibhausgasemissionen gerichtet werden, um den Ausstoß in sämtlichen Emissionsprozessen zu reduzieren.

Speziell für den Bausektor als einer der hauptverantwortlichen Wirtschaftszweige für Treibhausgasausstoß wird diese Diplomarbeit Lösungsmöglichkeiten zur Reduzierung jener Emissionen und der damit verbundenen grauen Energie erläutern. Hierbei handelt es sich, wie in Teilabschnitt 2.1 (Forschung und Wissensstand) benannt, um die notwendige Dekarbonisierung²⁴ der Baustoffherstellung und -entsorgung. Diese Treibhausgasemissionen sind Abfallprodukte (Outputs) und folgen sowohl aus der Baustoffbereitstellung und Baustoffentsorgung selbst, als auch aus der Erzeugung der dafür benötigten Energie (graue Energie). Wird die graue Energie gemindert, erfolgt eine Reduzierung von grauen Emissionen. Diese Verminderung und der daraus reduzierte Beitrag zum Treibhauseffekt haben, wie in Abbildung 4 dargestellt, klimaschutztechnische Relevanz.

2.3 Lösungsansätze der Reduzierung von grauer Energie

Um Lösungsmöglichkeiten zur Reduzierung von grauer Energie und grauen Emissionen zu finden, müssen deren Entstehungsprozesse beleuchtet und optimiert werden. Da ausschließlich die Prozesse Rohstoffbereitstellung, Herstellung, Transport, Entsorgung und Wiederverwertung graue Energie in Anspruch nehmen, muss dort das Optimierungspotential geprüft werden.

2.3.1 Reduzierung in Herstellungs- und Transportprozessen

Die Reduzierung von grauer Energie und die Dekarbonisierung der Herstellungs- und Transportprozessen konventioneller Baustoffe kann direkt in dieser Lebenszyklusphase erfolgen. Die erste Möglichkeit ist die

- graue Energie- und Emissionsreduzierung durch Optimierung der Herstellungs- und Lieferlogistik (örtliche Rohstoffgewinnung und geringe Transportwege).

Sämtliche Baustoffe werden aus Rohstoffen gefertigt, welche im Werk für den jeweiligen Baustoff zur Verfügung stehen müssen. Insofern eine Optimierung im Antransport der Rohstoffe, aber auch im Abtransport der Baustoffe in den Handel oder zur Baustelle erfolgt, kann in der Logistik der Energieverbrauch und die Emittierung von Treibhausgasen gesenkt werden. Weiterhin werden industrielle Produktionsanlagen stetig auf Wirtschaftlichkeit geprüft und demnach verbessert (Senkung von Energieverbrauch). Das Reduzierungspotential ist hierbei jedoch verhältnismäßig gering, da die Herstellungsprozessoptimierung nahezu ausgeschöpft, beziehungsweise die Forschung weit vorangeschritten ist.

Eine andere Reduzierungsmöglichkeit besteht in der

²⁴ Reduzierung von CO₂-Emissionen

- grauen Energie- und Emissionsreduzierung durch Verwendung erneuerbarer Primärenergien (aus Nutzung von Solarenergie, Wind- und Wasserkraft).

Unter Verwendung von Solarenergie, Windkraft und Wasserkraft scheint die soeben genannte Reduzierungsmöglichkeit sich ausschließlich auf die Emissionsreduzierung zu beziehen und den Bedarf an grauer Energie zu decken. Die nachhaltigen Energieerzeuger zielen darauf ab, Energie bereitzustellen, ohne dabei Treibhausgas zu emittieren. Unter Berücksichtigung der Definition von grauer Energie wird selbige nicht nur frei von Emissionen zur Verfügung gestellt, sondern geht bei der Nutzung von erneuerbaren Primärenergieträgern gegen Null. Graue Energie, definiert als „kumulierte[r] Aufwand an nicht erneuerbarer Primärenergie“, ist somit nicht an der Herstellung, an dem Transport, an der Entsorgung und am Recyclingprozess beteiligt.

Diese theoretische Vorgehensweise zur Reduzierung der grauen Energie und der grauen Emissionen auf den Grenzwert Null ist aktuell kaum umsetzbar, geschweige denn wirtschaftlich. Ansätze dafür wurden jedoch geschaffen, welche teilweise in Unternehmen aufgegriffen werden (Rockwool – Nutzung erneuerbarer Energie zur Herstellung von Dämmstoffen²⁵). Ein vollumfänglicher Verzicht auf nichterneuerbare Primärenergie (z.B. aus Steinkohle, Braunkohle, Erdöl oder Erdgas) ist allerdings, zumindest im Moment, unmöglich.

2.3.2 Reduzierung durch Auswahl von Baustoff und Bauweise

Weiterhin besteht die Option, mit der Baustoffauswahl nicht nur graue Energie und graue Emissionen zu reduzieren, sondern auch ressourceneffizienter zu Bauen. Dies geht einher mit der zu wählenden Architektur, da die richtige Bauweise ähnliches Optimierungspotential aufweist. Zwei Möglichkeiten sind zu nennen. Einerseits die

- graue Energie- und Emissionsreduzierung und Ressourceneffizienz durch die Auswahl nachhaltiger und natürlicher Baustoffe (z.B. Holz, Hanf, Stroh, Lehm, Naturstein).

Vorteilig daran ist die Verwendung von Baustoffen, welche schon natürlich „hergestellt“, also gewachsen sind und nur noch von Menschenhand verarbeitet werden müssen. Demnach liegt hier ein geringerer Energieaufwand zur Baustoffbereitstellung vor. Zudem fungieren nachwachsende Baustoffe gleichzeitig als Kohlenstoffspeicher, da Kohlenstoffdioxid im Stoffwechselprozess (Photosynthese) von Pflanzen inkludiert ist. Kohlenstoffdioxid wird dabei unter der Verwendung von Sonnenenergie und Wasser (Inputs) zu Kohlenhydraten (z.B. Glucose) und Sauerstoff (Outputs) umgewandelt. Somit bildet die Pflanze Energieträger zum Aufbau von Biomasse und emittiert dabei das Abfallprodukt Sauerstoff.²⁶

²⁵ vgl. (Rockwool, 2022)

²⁶ vgl. (Pflanzenforschung.de, 2022)

Die Speicherung von Kohlenstoffdioxid durch die Verwendung nachwachsender Baumaterialien und die folgende Rohstoffeinsparung von mineralischen und metallischen Konstruktionswerkstoffen sind erhebliche Vorteile, die sich sowohl auf den Klimawandel, als auch auf den Ressourcenhaushalt der Erde positiv auswirken.

In Kombination mit der

- grauen Energie- und Emissionsreduzierung und Ressourceneffizienz durch die Verwendung von Leichtbauweisen (z.B. Fachwerkbau)

kann das volle Einsparpotential ausgenutzt werden.

Die Reduzierung der eingesetzten Masse eines Baustoffs, um die maximale Gewichtseinsparung zu erlangen, stellt den größten Vorteil des Leichtbaus dar. Dies geschieht in Symbiose mit der Baustoffauswahl beziehungsweise Baustoffoptimierung. Neben bestehenden Leichtbauweisen wie Skelettbauweisen (z.B. Fachwerkbau; Holzständerbau) wird beispielsweise der Ersatz von Bewehrungsstahl im Stahlbeton durch Fasern (Glasfasern/Carbonfasern) erforscht, was leichtere, energieeffizientere und damit ressourcensparendere Konstruktionen ermöglichen soll.

2.3.3 Reduzierung durch Lebenszyklusverlängerung

Eine andere Lösungsmöglichkeit bietet die Verlängerung der Lebenszeit eines Bauprodukts (sowohl eines Bauwerks als auch eines Bauelements). Da die graue Energie und die grauen Emissionen anteilig pro Jahr berechnet werden ($\text{kWh/m}^2\text{NGF a}$; $\text{CO}_2 \text{ äq. /m}^2\text{NGF a}$), können diese mit erhöhter Lebenszeit gesenkt werden.

Dafür gibt es mehrere Ansätze. Manche haben sich schon in der Praxis bewährt, andere werden in Pionierprojekten untersucht und auf Plausibilität geprüft.

Die ausschlaggebendste Reduzierungsmöglichkeit ist die

- graue Energie- und Emissionsreduzierung durch die Sanierung eines Produkts/Produktsystems.

Sanierungsvorgänge sind projektspezifisch und demzufolge sehr unterschiedlich zu einander. Meist ist eine energetische Sanierung/thermische Sanierung notwendig. Dabei wird sich auf die Analyse des Bauelements (Fenster aus einem Altbau) beziehungsweise auf die Gebäudehülle und die damit verbundene Modernisierung bezogen. Das Sanierungsziel ist die Reduzierung des Energiebedarfs in der Nutzungsphase, also für Heizung, Lüftung und Warmwasserbereitstellung. Die Einsparung von grauer Energie und grauen Emissionen bezieht sich somit einerseits auf den Austausch veralteter Bauteile/technischen Gebäudeausrüstung (TGA) durch effizientere Bauteile oder Anlagentechnik, andererseits auf die instand zuhaltende und zu optimierende Baukonstruktion. Hierbei erfolgt eine Minderung des Wärmedurchgangskoeffizienten durch Bauteil-/Gebäudeoptimierung, um heutige

gesetzlich vorgegebene Standards einzuhalten. Die für die damalige Herstellung verwendete Energie und die Emissionen bleiben demnach gebunden und werden durch die Lebenszyklusverlängerung reduziert.

Eine andere Lösungsmöglichkeit bietet die

- graue Energie- und Emissionsreduzierung durch Wiederverwendung von Abbruchmaterialien.

Es erfolgt die Lebenszyklusverlängerung durch Recycling²⁷/Downcycling²⁸, was einen geringen Energieaufwand inkludiert, um beispielsweise aus Abbruchmaterialien wiederverwendbares Schüttgut herzustellen. Zu Beginn erhöhen sich dabei die graue Energie beziehungsweise die grauen Emissionen des Bauprodukts. Dies wird durch Verarbeitungsprozesse hervorgerufen, welche das Abfallprodukt wiederaufbereiten. In der verlängerten Lebenszeit hingegen rentiert sich das Recycling-/Downcycling-Material sowohl energetisch als auch klimaschutztechnisch.

Insofern Bauelemente jedoch noch voll in Takt sind, ist ein Recycling-/Downcycling-Prozess unnötig. Dieser Ansatz bringt die Lösungsmöglichkeit der

- grauen Energie- und Emissionsreduzierung durch die flexible und direkte Weiterverwendung von Bauteilen mithilfe reversibler Verbindungen (zirkuläres Bauen) mit sich.

„Wenn Bauelemente, die noch jahrzehntelang halten, nicht zerstört, sondern für neue Bauten wiederverwendet werden, spart das nicht nur Ressourcen. Es reduziert auch drastisch den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen in der Erstellungsphase von Bauten.“²⁹ Hierbei liegt das Hauptaugenmerk auf Konstruktionen aus Stahlbeton oder Stahl, da bei diesen Bauteilen eine Lebensdauer von 80-150 Jahren (Stahl 80-100 Jahre; Beton 100-150 Jahre³⁰) angesetzt werden kann. Somit können selbige Bauteile bis zu zweimal wiederverwendet werden, was einen Einsatz in zwei bis drei Immobilien ermöglicht.

Notwendig für das zirkuläre Bauen ist eine weitreichende Infrastruktur, welche Architekten und Ingenieure über digitale Austausch-Plattformen vereint, um bauteilspezifische Informationen von Abrissimmobilien darzustellen und deren Demontierbarkeit bekannt zu geben. Hierbei sind Themen wie Logistik und Organisation, Finanzierung, legislative Fragen bezüglich Bauprodukt-, Abfallrecht, aber auch Haftungsverfahren zu untersuchen, um solch eine Alternative zu realisieren.³¹

²⁷ Stoffliche Verwertung – Zufuhr von gebrauchtem Material in den Kreislauf

²⁸ Kaskadierung – verschlechtertes Wertniveau des recycelten Produkts

²⁹ (architekturbuch.de, 2022)

³⁰ vgl. (Fertighaus.de, 2022)

³¹ vgl. (Stumm, 2022, S. 67)

Zusammengefasst bringt jede einzelne Lösungsmöglichkeit Reduzierungsoptionen mit sich. Jedoch nur in Kombination erfolgt ein hohes Einsparpotential an grauer Energie und grauen Emissionen, was Klimaschutztechnisch gefordert werden muss.

Beispielsweise soll die Umplanung eines Bauwerks nach seiner Nutzungsphase von 40 Jahren erfolgen, was Grundrissänderungen und Umbauten mit sich bringt. Hierfür entfällt die tragende Funktion mehrerer Elemente, darunter auch eines vorgefertigten Unterzugs aus Carbon-Beton. Selbiger muss aus dem Gebäude entnommen werden.

Der Unterzug kann bezüglich seiner reversiblen Anschlüsse im Gebäude simpel ausgebaut und geprüft werden. Nach der Überprüfung der noch vorliegenden Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit erfolgt eine Inkludierung in Austausch-Plattformen und eine anschließende Lagerung. Bei dem geplanten Neubau einer Immobilie entscheidet sich die Bauherrenschaft für die klimafreundliche Wiederverwendung von Bauteilen, woraufhin das Gebäude unter Beachtung der Parameter geplant und der Unterzug in die Planung einbezogen wird. Verbaut in dem Neubau erlangt dieser im Folgenden eine Lebenszyklusverlängerung und trägt zu einer Energieeinsparung während der Gebäudeherstellung bei.

Ebenso gut vorstellbar ist das Beispiel eines neuzubauenden Einfamilienhauses aus Holz in rohstoffsparender Leichtbauweise. Dabei wird sich für die Holztafelbauweise entschieden, wodurch nicht nur Ressourcen eingespart, sondern auch die Energie in der Baustoffbereitstellung reduziert wird. Neben dem Vorteil der Minderung von grauer Energie und der Dekarbonisierung folgt zudem noch die CO₂-Speicherung im verbauten Holz über den gesamten Lebenszyklus der Immobilie.

2.4 Projektbeschreibung Bauvorhaben Campus RTLL

Genau solch ein vorgefertigtes Einfamilienhaus in Holztafelbauweise soll in zweifacher Ausführung auf den Flurstücken 1131/1 und 1131/7 nahe dem Firmengebäude der RTLL entstehen. Das Grundstück befindet sich, abgelegen von der Straße, nahe des Kirchberger Forsts am Anton-Günther-Weg und bietet Platz für zwei standardisierte Einfamilienhäuser.



Abbildung 5 Flurkarte mit Firmengebäude RTLL (1036/1) und Baugrundstück (rot) (1131/3 und 1131/7)
(geoportal.sachsen.de)

Da sowohl der Waldabstand, als auch die Abstände zu Nachbargebäuden eingehalten werden müssen, sind beide EFH auf dem 1866 m² großen Baugrundstück in einem Baufenster von 10 m mal 30 m zu realisieren.

Als Pionierprojekt der RTLL Lewerenz Holding AG soll ein Einfamilienhaus zur Vermietung bereitstehen und das andere intern als Wohn-, Übernachtungs-, Versammlungs- und Lagerstätte genutzt werden.

Dieses Bauvorhaben wird als Beispielimmobilie der Diplomarbeit dienen und Ausgangspunkt für den Variantenvergleich zweier Bauten in unterschiedlicher Bauweise sein.

Hierfür wird das Einfamilienhaus „HOUSE KIT Stuttgart - Flachdach“ (Abbildung 6) des Unternehmens INSTABUILT herangezogen, welches zur näheren Auswahl steht. Unter Berücksichtigung des Grundrisses und der Bauteilaufbauten wird das Modell als Grundlage für die Dimensionierung, für die Ökobilanzierung der Bauteile und für den letztendlichen Vergleich dienen.



Abbildung 6 HOUSE KIT Stuttgart - Flachdach; Fa. INSTABUILT
(intern (siehe Anhang 4))

2.5 Vorgehensweise

Bei dem in dieser Diplomarbeit, angestrebten Variantenvergleich werden im Folgenden die Herstellung und die energetischen beziehungsweise klimarelevanten Auswirkungen konventionell gefertigter Tragwerke (Außenwände und Dach) und Tragkonstruktionen (Außenwände und Dach) in Holztafelbauweise gegenübergestellt. Daraufhin erfolgt die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) der gegebenen Holztafelbauelemente (INSTABUILT), um die konventionell gefertigten Bauteile vergleichbar zu dimensionieren. Nach dem Vorgang wird das Gebäudemodell erstellt, um die Mengenermittlung so einfach wie möglich zu gestalten. Hierbei wird ebenso der Aufbau der Innenwände und Decken beider Bauweisen übernommen beziehungsweise festgelegt, um alle ökologisch ausschlaggebenden Bauteile auf die Menge an grauer Energie und grauen Emissionen hin zu untersuchen. Selbiger Vorgang wird Mithilfe des Online-Ökobilanzierungstools eLCA (Lebenszyklusanalyse) bewältigt. Schlussendlich soll das Ergebnis der Bauteilanalyse und des Gebäudevergleichs (Rohbau) eine Aussage darüber geben, wie viel kWh graue Energie beziehungsweise wie viel kg graue Emissionen durch die Baustoff- und Baukonstruktionsauswahl eingespart werden können.

3 Auswirkungen von baustoffbezogenen Herstellungs- und Entsorgungsprozessen

3.1 Detailausbildung

3.1.1 Konventioneller Außenwand- und Warmdachaufbau

Für das konventionell hergestellte Gebäude wird ein simpler Außenwand- beziehungsweise Dachaufbau gewählt:

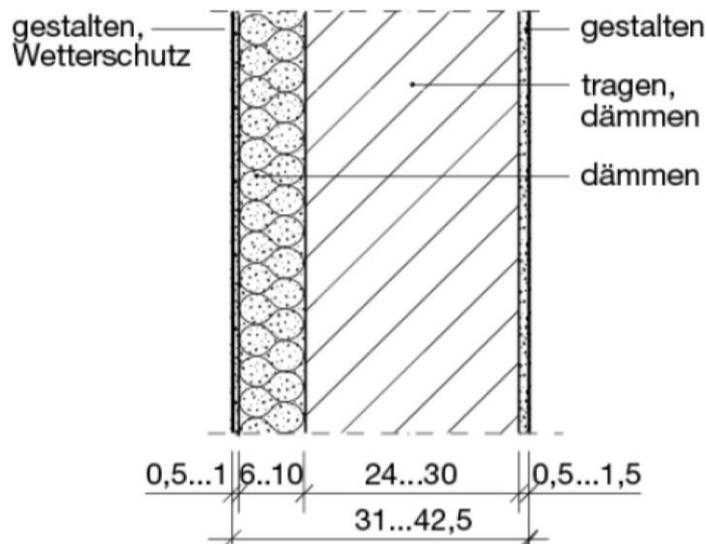


Abbildung 7 Außenwandaufbau – einschaliges Kalksandstein-Mauerwerk
(Skript Baukonstruktionslehre (BA-Glauchau))

Das Detail zeigt den Wandaufbau mit Innenputz, Kalksandstein-Mauerwerk, Klebemörtel, Wärmedämmschicht, Armierungsschicht und dem Außenputz.

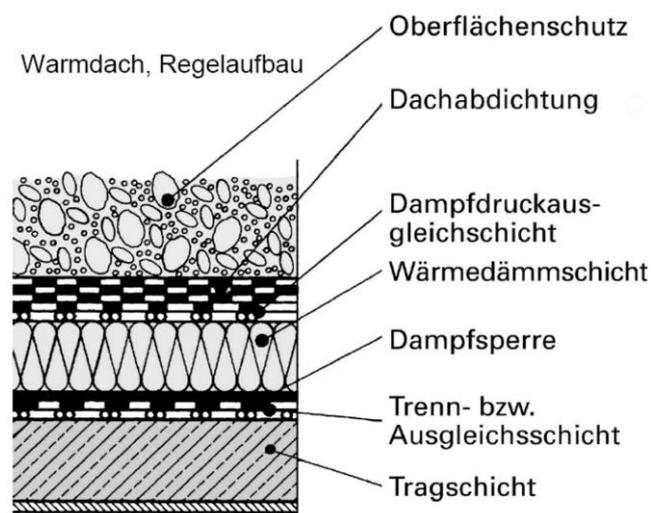


Abbildung 8 Dachaufbau Flachdach
(Skript Baukonstruktionslehre (BA-Glauchau))

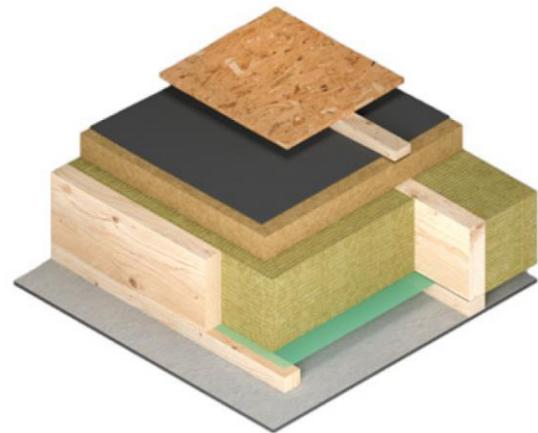
Da das Dach der Einfamilienhäuser in Holztafelbauweise als Flachdach ausgebildet wird, muss das konventionell gefertigte Dach diese Anforderungen ebenso erfüllen. Demzufolge wird ein Dachaufbau, wie in Abbildung 8 aufgezeigt, gewählt. Hierbei setzt sich das nicht begrünte Flachdach aus Innenputz, Stahlbetondecke, Bitumenschicht als Ausgleichsschicht, Dampfsperre, Wärmedämmschicht, Trennschicht, Dachabdichtung und einer Kiesschüttung zusammen.

3.1.2 Außenwand- und Flachdachaufbau in Holztafelbauweise



Exterior Wall

OSB 15mm
60x160 mm Timber of wooden frame; C24
Mineral stone wool 160mm
Vapour barrier
OSB 15mm



Roof construction

OSB 15mm
Timber battens 60x60mm
Vapour permeable membrane
Wood fiberboard 80mm
Rafters 60x240mm; C24
Timber Beam 180x300mm; C20
Mineral stone wool 240mm
Vapour barrier
Timber battens 60x50mm; C24

Abbildung 9 Außenwandaufbau und Flachdachaufbau Holztafelbauweise
(intern (siehe Anhang 4))

Die Außenwand im Rohbauzustand setzt sich aus einer OSB-Platte³², einer PE-Folie als Dampfbremse, einem Traggerüst aus Kanthölzern mit dazwischen befindlicher Wärmedämmung (Mineralwolle) und einer zweiten OSB-Platte zusammen.

Das Dach ist als zweischaliges Flachdach mit Zwischensparrendämmung ausgebildet und setzt sich aus einer Lattung, einer PE-Folie als Unterspannbahn, einem Traggerüst aus Sparren mit dazwischen befindlicher Mineralwolle, einer

³² Oriented Strand Board – aus langen Spänen hergestellte Mehrschichtplatten

Holzfaserverplatte, einer dampfdiffusionsoffenen Membran (Polypropylen-Membran), einer Luftschicht mit Lattung und einer OSB-Platte zusammen. Darauf wird durch Dachdeckerarbeiten eine Kunststoff-Dichtungsbahn zur Abdichtung aufgebracht.

Um die soeben genannten Baukonstruktionen vergleichen zu können, besteht die Notwendigkeit, die energetisch aufwendigsten und klimaschutztechnisch relevantesten Herstellungsmethoden der tragenden Bauteilbestandteile aufzugliedern.

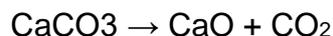
3.2 Herstellung, Entsorgung und daraus folgende Auswirkungen des konventionellen Tragwerks

3.2.1 Herstellung von Kalksandstein, Stahl und Beton

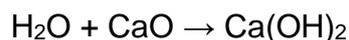
Kalksandstein:

Kalksandsteine nach DIN EN 771-2 sind ungebrannte Steine aus Wasser, Quarzsand und Branntkalk. Um die Fertigung von Kalksandstein nachzuvollziehen und diese zu bewerten, wird im Folgenden aufgezeigt, wie Brandkalk hergestellt wird.

Bei der Branntkalkherstellung wird Kalkstein (CaCO_3) und kohlenstoffhaltiger Kalk (pH-Wert = 5-6), in einem Hochofen ($800\text{-}1200^\circ\text{C}$) erhitzt. Dabei wird durch die thermische Einwirkung der Kalkstein entsäuert und CO_2 emittiert.

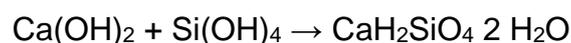


Formel 1 Abspaltung von Kohlendioxid bei der Erhitzung von Calciumcarbonat
Der entstandene Brandkalk (CaO) (pH-Wert = 13-15) wird im Weiteren mit Wasser vermengt und es erfolgt eine chemische Reaktion zwischen den Bestandteilen. Hierbei reagiert Wasser mit Brandkalk zu Calciumhydroxid.



Formel 2 Reaktion von Wasser und Calciumoxid zu Calciumhydroxid

Unter der Beimischung des Quarzsandes (SiO_2) entsteht eine Mörtelmasse, welche anschließend zu Steinrohlingen geformt und unter hohem Druck (16 bar), hohen Temperaturen (200°C) und in Wasserdampf vier bis acht Stunden hydrothermal aushärtet. In dieser mit Kalkhydrat (Ca(OH)_2) angereicherten Umgebung löst sich durch Hitze, Hochdruck und hohe Alkalität³³ die Kieselsäure (Si(OH)_4) von der äußeren Schicht der Sandkörner und reagiert mit dem Calciumhydroxid (Ca(OH)_2) zu Calciumsilikathydrat ($\text{CaH}_2\text{SiO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$).³⁴



Formel 3 Reaktion von Calciumhydroxid und Kieselsäure zu Calciumsilikathydrat

³³ basisch, hoher pH-Wert

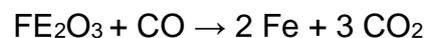
³⁴ puzzolanische Reaktion

Nachdem diese Reaktion erfolgt ist, muss der künstliche Stein abkühlen und ist danach direkt verwendbar.³⁵

Stahlbeton:

Stahlbeton ist ein Verbundwerkstoff aus Stahl und Beton. Dieser vereint die besten Eigenschaften beider Baustoffe, nämlich die Zugfestigkeit des Stahls und die Druckfestigkeit des Betons.

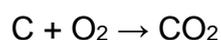
Zur Herstellung des zugfesten Bewehrungsstahls wird im ersten Schritt in einem Hochofen aus Eisenerz (Fe_2O_3) und Koks (C)³⁶ Roheisen gewonnen. Bei dem Prozess beginnt das Koks durch die im Hochofen herrschenden Temperaturen (1200-1300°C) zu brennen und es entsteht Kohlenmonoxid (CO). Daraufhin reagiert das entstandene Kohlenmonoxid mit dem Eisenerz und selbiges wird reduziert. Es wird Kohlendioxid freigesetzt.



Formel 4 Reaktion von Eisenerz und Kohlenmonoxid zu Roheisen und Kohlendioxid

Durch die Reduktion werden weitere, nichtmetallische Bestandteile des Eisenerzes (Schlacke) abgespalten, welche aufschwimmen und regelmäßig abgestochen werden.

Da das Roheisen immer noch zu viel Kohlenstoff enthält, um die gewünschten Festigkeiten zu erlangen, wird dieses im Anschluss mit Sauerstoff angereichert, sodass die Reaktion mit dem im Roheisen enthaltenen Kohlenstoff zu Kohlenstoffdioxid erfolgen kann.



Formel 5 Reaktion von Kohlenstoff und Sauerstoff zu Kohlendioxid

Bei diesem Prozess werden Stahlschrott aus Recycling-Prozessen beigefügt und ausgewählte Zusatzstoffe (Ferro-Legierungen) inkludiert, um die gewünschten Eigenschaften zu erhalten. Das Endprodukt ist basischer Stahl.³⁷ Selbiger wird durch weitere Bearbeitungsverfahren (warmgewalzt, kaltgewalzt, ...) in Form gebracht und steht nach dem Abkühlen zur Verwendung bereit.

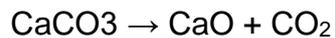
Der zweite Bestandteil des Verbundwerkstoffs Stahlbeton ist der Beton, welcher ein Stoffgemisch aus Wasser, Gesteinskörnung, Zement, Zusatzstoffen und Zusatzmitteln ist. Diese werden im bestimmten Verhältnis vermengt, um die gewünschten Eigenschaften hervorzurufen. Um Beton ökologisch zu betrachten, ist der Herstellungsprozess des Bindemittels (Zement) aufzuschlüsseln.

³⁵ vgl. (ökologisch-bauen, 2022)

³⁶ Fast reiner Kohlenstoff, dient als Reduktionsmittel

³⁷ vgl. (FUTURA, 2022)

Die Zementklinkerherstellung setzt sich aus drei Prozessen zusammen. Der Beschaffung und Aufbereitung des Rohmaterials, dem Brennprozess und dem Mahlprozess. Zementklinker wird aus dem Rohstoff Mergel (Gemisch aus Kalkstein und Ton). Diese Rohstoffe liefern Calciumcarbonat (CaCO_3 – Bestandteil von Kalkstein), Siliciumdioxid (SiO_2 – Bestandteil von Ton), Aluminiumoxid (Al_2O_3 – Bestandteil von Ton) und Eisenoxid (Fe_2O_3 – Bestandteil natürlicher Gesteine). Die Gesteine, welche in der Erdkruste vorkommen, werden durch Sprengverfahren abgebaut, transportiert und zu Schotter gebrochen. Anschließend erfolgt eine Zugabe von Korrekturstoffen wie Sand, Lös oder Eisenoxid, um das gewünschte Mischverhältnis zu erreichen. In Mahltrocknungsanlagen wird die Rohmischung getrocknet und weiter zerkleinert. Das entstandene Rohmehl wird im Folgenden homogenisiert³⁸ und steht danach für den Brennprozess zur Verfügung. Hierbei wird in Drehöfen das Mahlgut auf bis zu 1450°C erhitzt. Das enthaltene Calciumcarbonat wird zu Beginn durch die hohen Temperaturen (830°C) entsäuert und zu Calciumoxid (CaO) umgewandelt.



Formel 6 Abspaltung von Kohlendioxid bei der Erhitzung von Calciumcarbonat
In der Sinterzone (Temperaturen von $1400\text{-}1450^\circ\text{C}$) erfolgt die Sinterung des Materials, wodurch sich Klinkerphasen bilden. Selbige sind Calciumaluminat und Calciumsilicate, welche bei der Hydratation³⁹ mit Wasser reagieren und für die hohe Festigkeit des Betons verantwortlich sind.

Das Endprodukt, welches letztendlich den Brennprozess verlässt, ist der gewünschte Zementklinker. Anschließend erfolgt eine Vermengung mit weiteren Zusatzstoffen (z.B. Hüttensand, Silicastaub, Kalkstein, Anhydrit) um spezifische Eigenschaften hervorzurufen.

Unter der Beimischung von Wasser, Gesteinskörnung, Zusatzstoffen und Zusatzmitteln wird im Weiteren der eigentliche Beton im Betonwerk hergestellt, welcher für die Fertigteilherstellung, für Sackware (Trockenmischung ohne Wasser) oder als Transportbeton benötigt wird.⁴⁰

Erfolgt letztendlich auf der Baustelle das Umschließen des verlegten Bewehrungsstahls mit Transportbeton, passiviert⁴¹ der Beton den Bewehrungsstahl und der Verbundbaustoff Stahlbeton ist nach dem Aushärtungszeitraum belastbar.

³⁸ ausgiebig zu einer homogenen Masse vermischt

³⁹ Hydraulische Erhärtung

⁴⁰ vgl. (Beton Wiki, 2022)

⁴¹ Korrosionsbeständigkeit durch nichtmetallische Schutzschicht

3.2.2 Entsorgung

Wird eine Immobilie abgerissen, werden die Bauteile/Bauteilbestandteile nach Baustoff sortiert und zerkleinert. Hierbei entsteht für o.g. Baustoffe ein Kalksandstein-, ein Beton- und ein Stahlaufwerk.

Der Stahlanteil aus dem Stahlbeton kann anschließend wieder zum Stahlwerk transportiert und eingeschmolzen werden. Daraus können im Nachgang neue Stahlprodukte gefertigt werden. Dieser Prozess wird als Recycling⁴² bezeichnet. Dabei wird erneut Energie hinzugefügt, um ein gleichwertiges Produkt zu erzeugen.

Der Beton und das gebrochene Kalksandsteinmauerwerk werden separiert und zerkleinert. Somit besteht die Möglichkeit, selbiges beispielsweise unter Neubauten oder Straßen als Tragschicht einzubauen. Bei diesem Prozess wird Downcycling betrieben. Das bedeutet, dass Abfallprodukte durch erneute Energiezufuhr eine Lebenszyklusverlängerung erhalten, jedoch an stofflichem Wert verlieren.

3.2.3 Auswirkungen

Aus den in 3.2.1 und 3.2.2 aufgezeigten Prozessen wird deutlich, dass sowohl die Kalksandstein-, als auch die Stahl- und Zementherstellung Kohlenstoffdioxid abspalten und emittieren. Weiterhin sind bei den soeben erläuterten Herstellungs- und Entsorgungsabläufen hohe Energieaufwendungen notwendig, um die Prozesstemperaturen zur Stoffumwandlung zu gewährleisten beziehungsweise zu halten.

Genau Vergleichswerte bietet hierzu eine EPD (Environmental Product Declaration), übersetzt „Online-Datenbank mit Ökobilanz-Datenansätzen zu Baumaterialien, Bau-, Transport-, Energie- und Entsorgungsprozessen.“⁴³ Die sogenannte Ökobaudatenbank listet zahlreiche Bauprodukte auf und gibt die jeweiligen Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und die Indikatoren für Umwelteinwirkungen, aufgeteilt auf die einzelnen Phasen des Lebenszyklus, wieder.

Um die aufgeführten Baustoffe vergleichen zu können, muss die Summe der grauen Energie und des GWP auf den gleichen Nenner gebracht werden. Hierfür werden bei Beton, Bewehrungsstahl und Kalksandstein 1000 kg angesetzt.

⁴² Rezyklierung, Müllverwertung

⁴³ (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2022)

	Beton C20/25 (Masse = 2400 kg/m ³)		Bewehrungsstahl		Kalksandstein
Einheit:	[1m ³]	[1000 kg]	[1 kg]	[1000 kg]	[1000 kg]
PENRT [MJ pro ...]	983	410	8799	8799000	997
GWP [kg CO₂ - Äq.]	169,6	70,66	0,6834	683,4	136

Tabelle 2 Vergleich der Anteile grauer Energie und dem GWP von Beton C20/25, Bewehrungsstahl und Kalksandstein
(eingene Darstellung iun Anlehnung an Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2022)

Aus Tabelle 2 wird deutlich, dass die Herstellung von Bewehrungsstahl eine verhältnismäßig große Menge an Energie benötigt. Ebenso werden durch diesen Prozess auf 1000 kg Bewehrungsstahl knapp 700 kg CO₂ emittiert. Betrachtet man jedoch ein explizites Stahlbetonbauteil wird deutlich, dass nur ein gewisser, bauteilspezifischer Prozentsatz an Bewehrungsstahl in dem Element inkludiert ist. Dieser Bewehrungsgrad ist von Bauteil zu Bauteil unterschiedlich. Der Maximalwert des Bewehrungsgrads (Höchstbewehrungsgrad) für Biegebauteile beträgt 8%⁴⁴ des Bauteilquerschnitts (A_c), für Druckbauteile 9%⁴⁵. Diese Angaben sind jedoch Höchstwerte und werden in den seltensten Fällen vollumfänglich in Bauteilen umgesetzt (meist Teilabschnitten wie in Übergreifungsstößen auffindbar). Das Treffen einer Aussage über pauschale Prozentsätze für die Menge an Bewehrungsstahl in Stahlbetonbauteilen ist auf Grund der Bauteilindividualität zu ungenau. Demzufolge kann graue Energie und graue Emissionen für selbige Bauteile nur projektspezifisch ermittelt werden.

3.3 Herstellung, Entsorgung und folgende Auswirkungen des Tragwerks der Holztafelbauweise

3.3.1 Herstellung

Die Herstellung sämtlicher Holzwerkstoffe beginnt mit dem Fällen von Bäumen im Forst. Dort werden die Baumstämme von Astwerk befreit, auf Länge geschnitten und gestapelt. Vom Wald aus wird das Holz anschließend mit Lastkraftwägen zu Sägewerken transportiert, um dort verarbeitet zu werden.

⁴⁴ Schneider Bautabellen 23. Auflage: S. 5.115

⁴⁵ Schneider Bautabellen 23. Auflage: S. 5.123

Schnittholz (Sparren, Konstruktionsvollholz):

Nach dem Abladen der Stämme werden diese auf dem Holzplatz qualitativ eingeteilt und auf die richtige Länge zurecht gesägt. Hierbei fällt Verschnitt (Sägespäne, Rinde) an, welcher im Sinne der Ressourceneffizienz direkt zum Beheizen von Trockenkammern verwendet wird. Anschließend werden die Holzstämme zuerst zu Quadern zurechtgeschnitten, dann in die gewünschten Querschnitte unterteilt. Nach dem Sägeprozess erfolgt das Sortieren der Hölzer nach Qualität⁴⁶ und das Stapeln zwischen sogenannten Stapelhölzern. Dies dient zur ausreichenden Entlüftung. Im Folgenden wird das Schnittgut in Trockenkammern gelagert (3-4 Wochen), um die Restfeuchte von 50% auf 10% zu reduzieren. Nach dem Trocknungsvorgang werden alle Schnitthölzer geprüft und vermessen und stehen anschließend für den Export bereit.⁴⁷

Holzwerkstoff OSB-Platte:

Holzwerkstoffe werden aus zerkleinertem Holz zusammengefügt. Dabei entscheiden die Dimensionen der Holzbestandteile über die Art des Holzwerkstoffs. Bei OSB-Platten, übersetzt gerichtete Grobspanplatten, werden Langspäne (ca. 75 mm lang, 35 mm breit und 0,6 mm dick) parallel zur Ebene verpresst. Dies geschieht unter der Verwendung von Kiefernholz, welches eine „minderwertigere“ Holzart darstellt. Nach der Entrindung der Hölzer und dem Zerspanen im Messerring-Zerspaner werden die Holzspäne pneumatisch⁴⁸ durch eine Trocknungs- und Siebanlage bis hin zur Beleimung transportiert, wo diese mit Leim benetzt werden. Die Langspäne werden anschließend lagenweise auf ein Förderband aufgebracht und gepresst. Nach der Trocknung wird der Holzwerkstoff geschliffen und formatiert⁴⁹. Schlussendlich verlassen die OSB-Platten gestapelt und verpackt das Fertigungswerk und stehen für den Export zur Verfügung.⁵⁰

3.3.2 Abfallbehandlung/Entsorgung

Holz beziehungsweise Holzwerkstoffe können stofflich⁵¹ oder thermisch⁵² verwertet werden. Bei der Holzbehandlung/-entsorgung spielt primär die jeweilige Holzbehandlung (in A1-A3) eine Rolle. Diese Beschaffenheit des Holzes wird in fünf Kategorien eingeteilt, welche durch die Altholzverordnung und die PCB/PCT⁵³-Abfallverordnung definiert werden:

⁴⁶ Abhängig von Asten, Rissen, Verfärbungen, Baumkanten

⁴⁷ vgl. (Landesforsten, 2014)

⁴⁸ Verwendung von Druckluft zur Ausführung mech. Arbeit

⁴⁹ mit Nut und Feder versehen

⁵⁰ vgl. (Heiligengrabe, 2019)

⁵¹ Recycling – Zufuhr von gebrauchtem Material in den Kreislauf

⁵² Energiegewinnung und anschließende Deponierung durch Verbrennung

⁵³ Polychlorierte Biphenyle/polychlorierter Terphenyle

- AI - unbehandeltes, naturbelassenes Holz (Vollholz, Verschnitt, Schnittholz)
Stoffliche Verwertung - Aufbereitung: Holzwerkstoffherstellung aus Hackschnitzeln und Holzspänen nach AltholzV⁵⁴
- AII - behandeltes Holz ohne halogenorganische Verbindung
(Leimholzplatten, Dielen, Türblätter)
Stoffliche Verwertung - Aufbereitung: Holzwerkstoffherstellung aus Hackschnitzeln und Holzspänen nach AltholzV
- AIII - behandeltes Holz mit PVC oder Schwermetallen in der Beschichtung
(Kisten, Möbel, Holzspielzeug, Parkett)
Stoffliche Verwertung/Beseitigung: Holzwerkstoffherstellung nur nach Reinigung, thermische Verwertung nach AltholzV
- AIV - mit Holzschutzmitteln behandeltes Holz
(Fenster, Außentüren, Konstruktionshölzer, Sparren, Bahnschwellen)
Stoffliche/thermische Verwertung: Synthesegas-, Aktiv- und Holzkohleherstellung in genehmigten Anlagen nach AltholzV⁵⁵
- PCB-Altholz mit polychlorierten Biphenylen behandeltes Holz (Dämmplatten, Schallschutzplatten)
thermische Verwertung/Beseitigung: Sonderabfall-Deponierung nach PCB/PCT-Abfallverordnung⁵⁶

Die hier verwendeten Holzbauteile können in die Kategorie AII (OSB-Platten) und AIV (tragendes Vollholz) eingegliedert werden und demzufolge zur Holzwerkstoffherstellung beziehungsweise zur Synthesegas-, Aktiv-, oder Holzkohleherstellung verwendet werden.

3.3.3 Auswirkungen

Die vorangegangenen Abschnitte 3.3.1 und 3.3.2 zeigen auf, dass für die Schnittholz- und Holzwerkstoffherstellung hauptsächlich Transport- und Verarbeitungsprozesse notwendig sind. Laut Ökobaudatenbank wirken sich die Prozesse Herstellung, Recycling und Entsorgung, zuvor beschriebener Holzbauteile wie folgt auf die Summe von Energieverbrauch (PERNRT) und Treibhauspotential (GWP) aus:

⁵⁴ Altholzverordnung

⁵⁵ vgl. (Bundesministerium der Justiz, 2022)

⁵⁶ vgl. (Bundesministerium der Justiz, 2022)

	Konstruktionsvollholz [1 m³]	OSB-Platten [1 m³]
PENRT [MJ pro ...]	-3519,3	-5212,4
GWP [kg CO₂ - Äq.]	-257,34	-335

Tabelle 3 Vergleich der Anteile grauer Energie und dem GWP von Konstruktionsvollholz und OSB-Platten
(eigene Darstellung in Anlehnung an Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2022)

In Tabelle 3 werden für die Parameter graue Energie und GWP sehr kleine Werte aufgezeigt, sowohl für Konstruktionsvollholz, als auch für OSB-Platten. Dies geht aus der Summierung der Energieaufwendungen beziehungsweise Treibhausgasemissionen hervor, welche vor allem in der LC-Phase D, dem Recyclingpotential, hohe Negativwerte aufweisen.

Einerseits wird das durch die kaum behandelte OSB-Platte hervorgerufen. Selbige kann durch geringen Energieaufwand (Zerkleinern und erneut Kleben) recycelt werden. Die behandelte Tragkonstruktion aus Konstruktionsvollholz hingegen wird in der Regel ressourcenineffizienter wiederverwertet (Downcycling). Dennoch spiegeln die Negativwerte aus Tabelle 3 die Klimafreundlichkeit der verwendeten Holzbaustoffe wieder.

4 Ökobilanzierung mit eLCA

Um die vorangegangenen Baukonstruktionen ganzheitlich, ökologisch und mit angemessenem Aufwand zu bilanzieren, ist die Verwendung eines Ökobilanzierungstools erforderlich. Dieses bestimmt die Umwelteinwirkungen eines Gebäudes unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus und stellt im Folgenden die Analyseergebnisse dar.

Hierbei wird auf die Online-Bilanzierungssoftware eLCA zurückgegriffen, welche durch das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Internet kostenlos zur Verfügung gestellt wird.

4.1 Allgemeines

Das LCA-Tool eLCA ermöglicht es, ein Bauprodukt (Gebäude) anzulegen oder zu importieren, Rahmenbedingungen einzupflegen, Bauteile zu modellieren und die Ergebnisse in grafischer Darstellung auszugeben. Dabei steht dieses Bilanzierungstool im digitalen Datenaustausch mit Datenbanken (ÖKOBAUDAT), EnEV-Tools (BKI, Dämmwerk, Hottgenroth), Architektur-Programmen (Revit, ALLPLAN) und Bewertungssoftware (DGNB, BNB, LEED). (siehe Anhang 1)

Laut DIN EN 15978, welche die Vorgehensweise der LCA von Gebäuden beschreibt (Verweis: 3. Projektarbeit - Einordnung der grauen Energie in die LCA von Gebäuden - Abschnitt 5.1.3 - Zuordnung der Vorgehensweise der LCA von Gebäuden nach DIN EN 15978 zu den Phasen der Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040/DIN EN ISO 14044 – Tabelle 3), müssen im Verlauf der LCA folgende Schritte abgearbeitet werden:

- Ziel und Untersuchungsrahmen
- Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung
- Auswertung.⁵⁷

Zu Beginn sind der Zweck der Bewertung, der Betrachtungszeitraum, die Systemgrenzen und das Produktsystem anzugeben. Dies wird im eLCA durch eine vorgefertigte Benutzeroberfläche gewährleistet, in der die geforderten Angaben einzutragen sind. Nachfolgend muss das Produktsystem modelliert und die Systemgrenzen festgelegt werden. Hierfür gibt es mehrere Möglichkeiten. Da die Modellierung des Produktsystems mit der Dimensionierung der Gebäudebestandteile in Verbindung steht, wird dieser Aspekt im Folgenden (Abschnitt 4.1.1) näher thematisiert.

⁵⁷ vgl. (Markstein, 2022, S. 29)

4.1.1 Datenerhebung und Eingabe

Sobald die Rahmenbedingungen (Ziel und Untersuchungsrahmen) definiert sind, folgt die Sachbilanzierung, welche die Datenerhebung und die Qualifizierung des Gebäudes umfasst. Hierbei müssen gebäudespezifische Daten inkludiert werden (Flächen, Mengen, Baustoffe, Bauteile). In dem Online-Ökobilanzierungstool eLCA bestehen dafür drei Möglichkeiten:

- Neues Projekt anlegen

Es erfolgt die Erstellung eines neuen Projekts durch das Bearbeiten der zu Beginn angesprochenen Benutzervorlage. Nachfolgend sind die Baukonstruktionen zu wählen (neu erstellbar/Wahl aus Vorlage) und die jeweiligen verbauten Mengen anzugeben.

- EnEV Projekt importieren

Bei dem Import einer EnEV-Berechnung werden die projektbezogenen Daten aus dem Wärmeschutznachweis (XML-Format) übernommen und ebenso die Baukonstruktionsaufbauten inklusive verbauter Mengen aus der XML⁵⁸-Datei erfasst. Insofern kann, wenn der Wärmeschutznachweis angefertigt wurde, dies die Grundlage für die LCA sein und der Arbeitsaufwand reduziert werden.

- CSV/XLS⁵⁹ Import

Das Verfahren des CSV/XLS-Imports ermöglicht, die baukonstruktionsbezogenen Daten in eine Excel-Datei einzupflegen und diese zu importieren. Hierbei liegt für die Struktur des Datensatzes eine Vorlage im Bilanzierungstool vor, welche mit gebäudebezogenen Daten bestückt werden muss.

Die Wahl zur Bearbeitung der LCA für das Bauvorhaben Campus RTLL fällt auf den XLS Import, da dieser sowohl eine zügige und übersichtliche Aufstellung der Baukonstruktionen ermöglicht, als auch das Inkludieren eigens im eLCA erstellter Bauteile gewährleistet. Die Baukonstruktionen werden bei dem Verfahren zuerst im Programm erstellt, wodurch jeweils eine Kennzahl pro Bauteil kreiert wird.

Beispiel: Exterior Wall [2197056]

Im Folgenden werden die Kennzahlen der Bauteile in der Excel-Tabelle hinterlegt und somit verknüpft. Durch den Upload in eLCA bilden die Bauteile mit ihren Aufbauten, ihren Eigenschaften und ihren Mengen Grundlage zur Ökobilanzierung.

Anschließend erfolgt die Wirkungsabschätzung. Dabei werden in Kombination mit den Datensätzen der Sachbilanzierung die umweltbezogenen Daten berechnet. Dies geschieht unter Verwendung von EPD`s⁶⁰, welche aus der Ökobaudatenbank zur Berechnung hinzugezogen werden. Die Daten der ÖKOBAUDAT (deutsch

⁵⁸ Dateiformat

⁵⁹ Dateiformat

⁶⁰ environmental product declaration (Umweltproduktdeklaration)

Baustoffdatenbank), welche in allen deutschen Zertifizierungssystemen Verwendung finden, basieren auf Prozessanalysen, die Rohstoffgewinnung, Transporte, Fertigungs-, Verwertungs- und Entsorgungsprozesse dokumentieren und zusammenfassen. Somit können alle Umweltaspekte, resultierend aus In- und Outputs kumuliert und von einem Bilanzierungstool wie eLCA abgerufen werden.

4.1.2 Berechnung und Bewertung

Wie in der Vorarbeit zu dieser Diplomarbeit (Verweis: 3. Projektarbeit: Einordnung der grauen Energie in die LCA von Gebäuden – Abschnitt: 5.1.2 - Vorgehensweise) beschrieben, erfolgt anschließend die Berechnung der Umweltindikatoren (GWP, PENRT, ODP, ...), um das Gebäude zu bilanzieren. Aufbauend auf der Berechnung wird das Analyseergebnis/die Analyseergebnisse sowohl graphisch, als auch tabellarisch dargestellt. Zudem erfolgt eine detaillierte Aufteilung der Umweltindikatoren auf die einzelnen Bauteile, welche ebenso die Bewertung der Konstruktionselemente im Einzelnen ermöglicht.

5 Vergleichende Untersuchung an der Beispielimmobilie

5.1 Vorgehensweise mit dem Ökobilanzierungstool eLCA

Der nachfolgende Variantenvergleich wird unter der Verwendung des vereinfachten Verfahrens im eLCA durchgeführt. Hierbei „werden nur die Bauteile der KG 300⁶¹ erfasst. [Dabei wird sich ausschließlich auf die thermische Hülle, die Zwischendecken und die Innenwände bezogen.] Die Bauteile der KG 400⁶² sind nicht zu erfassen. Um die fehlende Erfassung zu kompensieren werden, je Indikator, die errechneten Umweltwirkungen aus der KG 300 pauschal mit 20% beaufschlagt.“⁶³

Im Weiteren sind alle notwendigen Rahmenbedingungen festzulegen und in das Bilanzierungstool einzupflegen. Anschließend ist die Sachbilanzierung durchzuführen. Hierbei wird sich an den Baukonstruktionen des Holztafelbauherstellers orientiert, um den Wärmedurchgangskoeffizienten zu errechnen. Dieser wird notwendig sein, um die Bauteildimensionierung des Referenzgebäudes in konventioneller Bauweise durchzuführen, aber auch um die Nutzungsgrundfläche nach EnEV anzugeben. Daraufhin kann die Mengenermittlung in einer geeigneten Excel-Tabelle und die Verknüpfung der Bauteile erfolgen, um diese im Weiteren in eLCA zu importieren.

Das Ökobilanzierungstool bietet beste Voraussetzungen, kann auf Grundlage soeben genannter Angaben die Berechnung der Umweltindikatoren der Vergleichsgebäude durchführen und die Analyseergebnisse sowohl tabellarisch, als auch graphisch aufzeigen.

5.2 Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen

Zu Beginn des Variantenvergleichs ist Ziel und Untersuchungsrahmen zu definieren. Ziel des Vergleichs zweier EFH in unterschiedlichen Bauweisen wird sein, die Höhe des Energieeinsparpotenzials und des Treibhauspotenzials festzustellen. Weiterhin soll die Notwendigkeit der Minderung von grauer Energie und grauen Emissionen untermauert und die Vorteile von nachhaltigen Baukonstruktionen dargestellt werden. Der Vergleich soll die Problemlosigkeit der Verwendung des eLCA verdeutlichen und aufzuzeigen, dass die Lösungsmöglichkeiten der Baustoffauswahl bei Neubau und Sanierung über das Planungsinstrument eLCA sowohl nachweisbar, transparent als auch vergleichbar sind.

Der Untersuchungsrahmen umfasst das Gebäude selbst. Demzufolge kann dieser als „zwei mal zwei Einfamilienhäuser im Variantenvergleich (2-mal Holztafelbau – 2-mal

⁶¹ Baukonstruktion

⁶² Haustechnikkomponenten

⁶³ (Rössig, 2022)

konventionell) auf einem Baugrundstück in Kirchberg (Sachsen)“ beschrieben werden. Die Lebensdauer der Immobilien wird auf den Standardwert von 50 Jahren festgelegt.

Die zu definierende Systemgrenze setzt das Programm selbst. Sie entspricht den bewertbaren Phasen des LC, welche durch die eLCA analysiert werden. Die Systemgrenze umfasst folgende Phasen:

- A1-A3 - Herstellungsphase
- B2 - Instandhaltung mit (A1-A3, C3, C4)
- C3 - Abfallbehandlung
- C4 - Beseitigung

Die Lebenszyklusphase D (Recycling-Potenzial) steht hierbei außerhalb der Systemgrenze. Demzufolge ist diese nicht mit in der Bilanzierung integriert, wird aber von eLCA ausgegeben und kann bei Bedarf energetisch berücksichtigt werden.

Im Ökobilanzierungstool eLCA werden im ersten Schritt der Lebenszyklusanalyse folgende Stammdaten gefordert:

Untersuchungsrahmen	Stammdaten
Projektname	Campus RTLL (<i>jeweilige Bauweise</i>)
Gebäudenutzungsdauer	50 Jahre
Bauwerkszuordnung	6111 – Einfamilienhaus nur für Wohnzwecke
Benchmarksystem ⁶⁴	BNB – BNB_BN_2015
PLZ/Stadt	08107/Kirchberg
NGF	Abschnitt 5.3.3/5.3.4 Mengenermittlung
BGF	Abschnitt 5.3.3/5.3.4 Mengenermittlung

Tabelle 4 Eingabe der Stammdaten in eLCA
(intern)

5.3 Sachbilanzierung

Bei der Sachbilanzierung erfolgt die Dimensionierung des Gebäudes. Dies umfasst die Ermittlung der Netto- und Bruttoflächen von Bauteilen und die Modellierung selbiger. Die Fläche der Gebäude ist ausschlaggebend für die Bewertung, da die Umweltindikatoren letztendlich, bezogen auf die funktionelle Einheit (hier auf 1 m²) angegeben werden. Somit wird die Vergleichbarkeit gewährleistet, egal wie sehr sich die Dimensionen der Projektsysteme unterscheiden.

Durch den Zugriff des Bilanzierungstools auf die EPD`s über die ÖKOBAUDAT erfolgt die Entnahme der Umweltindikatoren, welche die Sachbilanzierung vervollständigen.

⁶⁴ BNB-Bewertungssystem für Immobilien

Bei der Ermittlung der gebäudebezogenen Daten wurden Annahmen getroffen, welche in Anhang 2 aufgeführt sind.

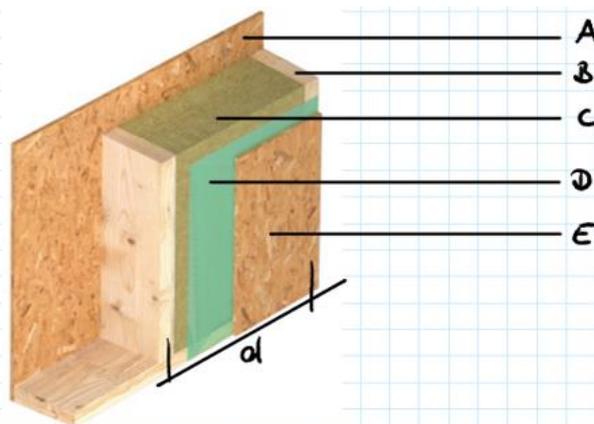
Um das konventionelle Gebäudemodell zu erstellen, ist die Angabe der Dämmstoffdicke der Bauteile Außenwand und Flachdach erforderlich. Da diese vergleichbar mit den Bauteilen der Holztafelbauweise sein sollen, wird der jeweilige Wärmedurchgangskoeffizient der Bauteile ermittelt und anschließend die Dämmstoffdicke bestimmt.

5.3.1 Berechnung Wärmedurchgangskoeffizient

Berechnung Wärmedurchgangskoeffizient Außenwand Holztafelbauweise:
(inhomogenes Bauteil)

$$R_{Tb} = R_{si} + \sum d/\lambda + R_{se}$$

Formel 7 Berechnung Wärmedurchgangswiderstand R_T
Schneider Bautabellen 23. Auflage S.10.3



- Achsabstand Konstruktionsholz
 $d = 62,5 \text{ cm}$

	Bezeichnung	d [m]	λ	d/λ
	Wärmeübergangsw. (außen)			(0,04)
A	OSB-Platte	0,015	0,13	0,12
B	Konstruktionsholz (60x160)	0,16	0,12	1,33
C	Stenwolle	0,16	0,033	4,85
D	Dampfsperre (PE-Folie)	0,0001	-	0
E	OSB-Platte	0,015	0,13	0,12
	Wärmeübergangsw. (innen)			(0,13)

Flächenaufteilung f_m

Fläche (B) $f_b = \frac{6}{62,5} = 0,096 \hat{=} 9,6 \%$
 Fläche (C) $f_c = (62,5-6)/62,5 \hat{=} 90,4 \%$

Fläche (B) $\varepsilon d/\lambda = 1,57 \text{ m}^2\text{K/W}$

Fläche (C) $\varepsilon d/\lambda = 5,09 \text{ m}^2\text{K/W}$

Abschnitt b:

$$f_b = 0,096$$

$$\begin{aligned} R_{Tb} &= R_{si} + \varepsilon \frac{d}{\lambda} + R_{se} \\ &= 0,13 + 1,74 + 0,04 \\ &= \underline{1,74 \text{ m}^2\text{K/W}} \end{aligned}$$

Abschnitt c:

$$f_c = 0,94$$

$$\begin{aligned} R_{Tc} &= 0,13 + 6,53 + 0,04 \\ &= \underline{5,26 \text{ m}^2\text{K/W}} \end{aligned}$$

$$R_T' = 1 / \sum f_m / R_{Tm}$$

$$R_T'' = R_{si} + \sum R_j + R_{se}$$

Formel 8 Berechnung des oberen (R_T') und unteren (R_T'') Grenzwertes für inhomogene Bauteile

Schneider Bautabellen 23. Auflage Seite 10.4

Oberer Grenzwert R_T'

$$R_T' = 1 / \sum_{m=a}^n f_m / R_{Tm}$$

$$R_T' = 1 / \left(\frac{0,096}{1,74} \right) + \left(\frac{0,94}{5,26} \right) = \underline{4,28 \text{ m}^2\text{K/W}}$$

Unterer Grenzwert R_T''

$$R_T'' = R_{si} + \sum R_j + R_{se}$$

$$R_{3/c} = 1 / \left(\frac{0,096}{1,33} \right) + \left(\frac{0,94}{4,85} \right)$$

$$= 3,76 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R_T'' = 0,13 + 3,76 + 0,12 + 0,12 + 0,4$$

$$= \underline{4,17 \text{ m}^2\text{K/W}}$$

$$U = 1/R$$

Formel 9 Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten

$$R = (4,17 + 4,28) / 2 = 4,23 \text{ m}^2\text{K/W}$$

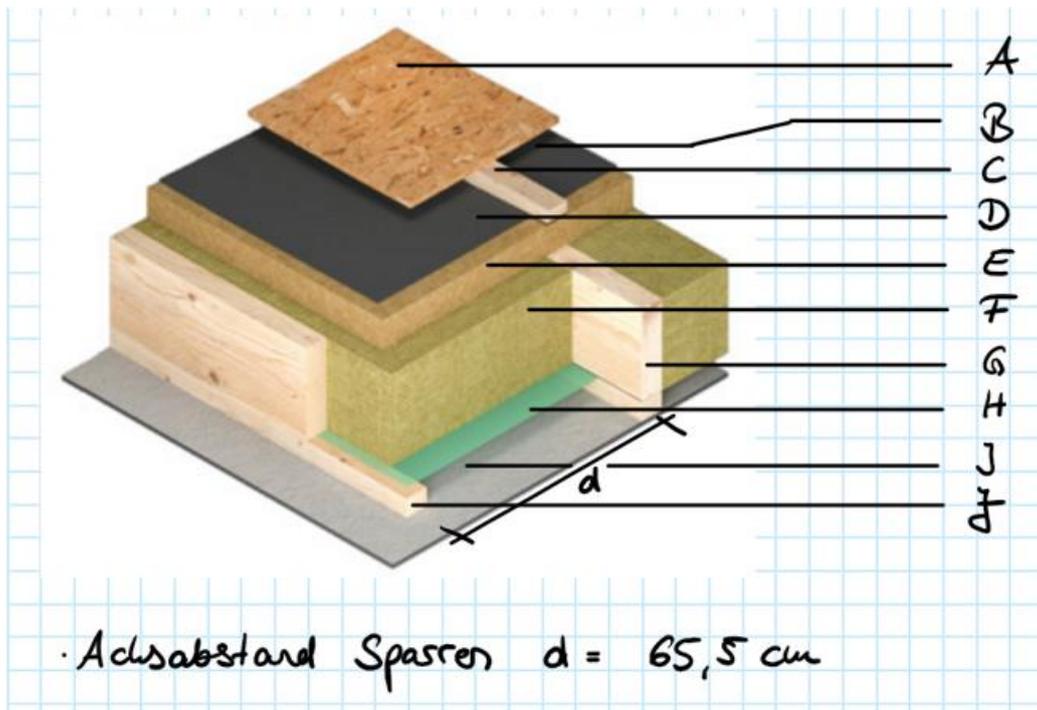
$$u = 1/R$$

$$= 1/4,23 = \underline{\underline{0,237 \text{ W/m}^2\text{K}}}$$

Anforderung nach GEG: Außenwand : 0,24 W/m²K
Dach : 0,24 W/m²K

$$0,237 < 0,24 \quad \Rightarrow \quad \text{NW erfüllt?}$$

Berechnung Wärmedurchgangskoeffizient Warmdach Holztafelbauweise:
(inhomogenes Bauteil)



	Bezeichnung	d [m]	λ	d/ λ
	Wärmeübergangsw. (außen)			0,04
A	OSB - Platte	0,015	0,13	0,12
B	Luftschicht	0,06		0,12
C	Holzlatting	0,06	0,12	0,5
D	Dampfdiffusionsdichte Membran	0,0075	-	0
E	Holzfasersplatte	0,08	0,045	1,78
F	Steinwolle	0,24	0,033	7,27
G	Sparren (KUH)	0,24	0,12	2,0
H	Unterspannbahn	0,0002	-	0
J	Luftschicht	0,05		0,11
j	Latting	0,05	0,12	0,42
	Wärmeübergangsw. (innen)			0,13

Flächenanteile: $\frac{\text{Fläche}(C;G;j)}{\text{Fläche}(B;F;J)} \quad f = 6/65,5 = 0,092 = 9,2\%$
 $f = 100\% - 9,2\% = 90,8\%$

oberer Grenzwert

$$R_T = R_{si} + R + R_{se}$$

$$R_T(C;G;j) = 0,13 + 0,12 + 0,5 + 1,78 + 2,0 + 0,42 + 0,04$$

$$= 4,99 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R_T(B;F;J) = 0,13 + 0,12 + 0,12 + 1,78 + 7,27 + 0,11 + 0,04$$

$$= 9,57 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R_T' = 1 / \varepsilon \frac{f_{in}}{R_{in}}$$

$$R_T' = 1 / (0,092 / 4,99 + 0,908 / 9,57)$$

$$= \underline{\underline{8,82 \text{ m}^2\text{K/W}}}$$

unterer Grenzwert:

$$R_j = 1 / \varepsilon \cdot f_{\text{inj}} / R_{\text{inj}}$$

$$R_{30} = 1 / (0,092 / 0,5 + 0,908 / 0,12) = 0,13$$

$$R_{FG} = 1 / (0,092 / 2,0 + 0,908 / 7,27) = 5,85$$

$$R_{J7} = 1 / (0,092 / 0,42 + 0,908 / 0,11) = 0,12$$

$$R_A = 0,12$$

$$R_E = 1,78$$

$$R_j = 8,0$$

$$R_T'' = 0,13 + 8,0 + 0,04 = \underline{8,17 \text{ m}^2\text{K/W}}$$

$$R = 0,5 \cdot (R_T' + R_T'')$$

$$= 0,5 \cdot (8,82 + 8,17)$$

$$= 8,495 \sim \underline{8,5 \text{ m}^2\text{K/W}}$$

$$u = 1/R = 1/8,5$$

$$= \underline{0,118 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

$$0,12 \text{ W/m}^2\text{K} \leq 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$$

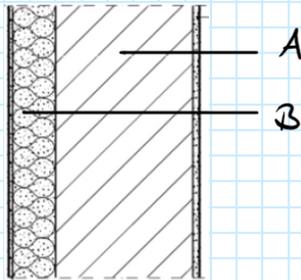
↪ Nachweis erfüllt!

5.3.2 Berechnung Dämmstoffdicke

Berechnung Dämmstoffdicke Außenwand konventionell:

(homogenes Bauteil)

Beachtung: Bauteilberechnung ohne Putz, da diese Komponente in den Vorgaben der Holztafelbauweise nicht inkludiert ist.



A: Mauerwerk KS $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$

$d_A = 20 \text{ cm}$

$\lambda_A = 0,99 \text{ W/mK}$

$d_A/\lambda_A = 0,202 \text{ m}^2\text{K/W}$

B: Wärmedämmung Steinwolle

$\lambda_B = 0,033 \text{ W/mK}$

$d \rightarrow$ gesucht

U-Wert (Außenwand Holztafelbau) = $0,237 \text{ W/m}^2\text{K}$

$$R_T = 1/u$$

$$R_T = 4,23 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$\begin{aligned} R &= R_T - (R_{si} + R_{se}) \\ &= 4,23 - (0,04 + 0,13) \\ &= 4,06 \text{ m}^2\text{K/W} \end{aligned}$$

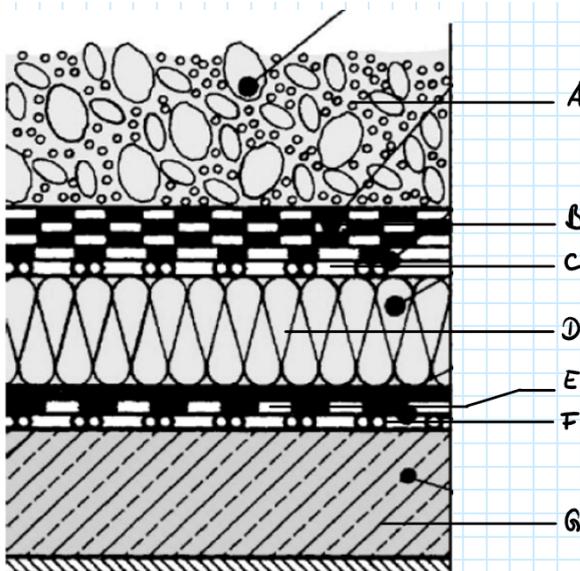
$$\begin{aligned} d_B &= \left(R - \frac{d_A}{\lambda_A} \right) \cdot \lambda_B \\ &= (4,06 - 0,202) \cdot 0,033 \end{aligned}$$

$$\underline{\underline{= 0,127 \text{ m}}} \quad \Rightarrow \text{gewählt: } 14 \text{ cm} \text{ Dämmstoffdicke}$$

Berechnung Dämmstoffdicke Warmdach konventionell:

(homogenes Bauteil)

Beachtung: Bauteilberechnung ohne Dachabdichtungsbahn und Putz, da diese Komponenten in den Vorgaben der Holztafelbauweise nicht inkludiert ist.



- A: Kiesschüttung
wird nicht angesetzt, da wasserführende Schicht
- B: Bitumendachbahn
wird nicht angesetzt, da ebenso nicht in Holztafelbau enthalten
- C: Dampfschutzschicht
Lochglasulies
 $d/\lambda = 0 \text{ m}^2\text{K/W}$
- D: EPS-Wärmedämmung (Geffelltdämmung)
 $d \rightarrow$ gesucht
 $\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$
- E: Dampfsperre
 $d/\lambda = 0 \text{ m}^2\text{K/W}$
- F: Voranstrich (Silikat-Dispersion)
 $d/\lambda = 0 \text{ m}^2\text{K/W}$
- G: Stahlbetondecke
 $d = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$
 $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$
 $\lambda = 2,3 \text{ W/mK}$

$$u_{\text{Dachaufbau Holztafelbau}} = 0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$R_T = 1/u$$

$$R_T = 8,5 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$R = R_T - (R_{si} + R_{se})$$

$$= 8,5 - (0,04 + 0,13)$$

$$= 8,33 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$d_D = \left(R - \frac{d_G}{\lambda_G} \right) \cdot \lambda_C$$

$$= \left(8,33 - \frac{0,2}{2,3} \right) \cdot 0,035$$

$$= \underline{\underline{0,289 \text{ m}}} \rightarrow \text{gewählt: } 30 \text{ cm}$$

Dämmstoffdicke

Sowohl die soeben berechneten Dämmstoffdicken als auch die berechneten Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile wurde im Anschluss mit der Software „Energieberater 18559 3D“ (Hotgenroth Software) überprüft und bestätigt. (siehe Anhang 3)

Nun kann die Dimensionierung der Gebäudehülle erfolgen und der Wärmeschutznachweis durchgeführt werden. Aus dem Energienachweis kann anschließend die berechnete Nutzungsgrundfläche (NGF-EnEV) entnommen werden.

5.3.3 Durchführung des Wärmeschutznachweises

Der Wärmeschutznachweis erfolgt unter der Verwendung des Programms „Energieberater 18559 3D“ (Hotgenroth Software). Hierbei wird das Gebäude im Programm angelegt, dreidimensional modelliert und die einzelnen Bauteile definiert.

Da im Voraus die Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten erfolgt ist, besteht die Möglichkeit, anstatt die thermische Hülle schichtenweise in die Software einzuarbeiten, nur die Wärmedurchgangskoeffizienten den entsprechenden Bauteilen (Außenwand, Flachdach) zuzuordnen. Für die Fenster- und Türflächen wurden die durch INSTABUILT angegebenen Elemente (siehe Anhang 4) eingesetzt und ein passender Wärmedurchgangskoeffizient angenommen. (siehe Anhang 5)

Folgende Tabelle stellt die soeben genannte Zuordnung der Wärmedurchgangskoeffizienten zu den entsprechenden Bauteilen und die berechnete Fläche selbiger in Quadratmeter [m²] dar.

Nr.	Bauteil	Orientierung Neigung	Fläche A m ²	U _f -Wert W/(m ² K)
1	Boden DG-1 + Dach 001-6 + Dach 001-5 + Dach... Dach 001-3 + Dach 001-2 + Dach 001-1	0,0°	92,97	0,120
2	AW 008-4 + AW 008-3 + AW 008-2 + AW 002 + ... AW 012-4 + AW 012-3 + AW 012-2 + AW 012	N 90,0°	61,79	0,240
3	AW 001-2 + AW 003 + AW 001 + AW 009-2 + AW 009	W 90,0°	38,98	0,240
4	AW 004 + AW 006 + AW 010-2 + AW 010	S 90,0°	40,51	0,240
5	AW 007-2 + AW 005 + AW 007 + AW 011-2 + AW 011	O 90,0°	40,54	0,240
6	F 002	N 90,0°	2,50	0,800
7	F 009 + F 010	N 90,0°	1,98	0,800
8	F 001	W 90,0°	2,29	0,800
9	F 013	W 90,0°	4,50	0,800
10	F 008	W 90,0°	4,11	0,800
11	F 006	S 90,0°	2,07	0,800
12	F 007	S 90,0°	4,17	0,800
13	F 005	S 90,0°	4,19	0,800
14	F 016	S 90,0°	4,49	0,800
15	F 015 + F 014	S 90,0°	10,80	0,800
16	F 003	O 90,0°	2,29	0,800
17	F 012 + F 004	O 90,0°	4,57	0,800
18	AT 001	O 90,0°	2,49	1,100
19	Boden EG-4 + Boden EG-3 + Boden EG-2 + Boden EG-1	0,0°	92,91	0,240

Legende	
AT	- Außentür
AW	-Außenwand
F	-Fenster

Tabelle 5 Zuordnung von Wärmedurchgangskoeffizient zu Bauteil
Energieberater 18559 3D

Schlussendlich berechnet das Programm aus dem Gebäudemodell und den zugeordneten Parametern neben dem Jahres-Primärenergiebedarf, den

Wärmeverlusten, und der Gebäudegeometrie die NGF nach EnEV für die Lebenszyklusanalyse der Immobilie. (siehe Anhang 5)

NGF-EnEV [m²] = 167,6 m²

5.3.4 Mengenermittlung

Ab dem Zeitpunkt des fertiggestellten Wärmeschutznachweises sind die Stammdaten komplettiert und die Mengenermittlung muss erfolgen, um die Datensätze der Sachbilanzierung zu vervollständigen. Die Mengenermittlung umfasst die Flächenberechnung sämtlicher Wandflächen (Innenwände und Außenwände abzüglich Öffnungen), Deckenflächen und Dachflächen. Da selbige Daten nur teilweise durch das Programm „Energieberater 18559 3D“ (Hotgenroth Software) ausgegeben werden können (Gebäudehülle), müssen die fehlenden Mengen durch das Herausmessen und/oder durch eine Mengenaufstellung über ein Architektur-Zeichen-Programm (Allplan) ermittelt werden. (siehe Anhang 6 bzw. Anhang 7)

Da im Holztafelbau alle Innenwände als tragfähig ausgeführt sind, der Informationsumfang über den Anteil der nichttragenden Innenwände jedoch nicht vorliegt, wurde für beide Varianten der tragende Anteil mit 50 % angenommen. Hierfür wurde für die konventionelle Bauweise eine Innenwand aus Kalksandstein-Mauerwerk, Stärke 20cm geplant und in die Importtabelle inkludiert. Folgende Tabellen, welche den Importanforderungen von eLCA entsprechen, zeigen die Flächen der einzelnen Bauteile auf.

Name	KG DIN 276	Fläche	Bezugsgröße	eLCA BT ID
Gründung	320	93 m ²		2208611
Fassade	330	191,53 m ²		2197056
Innenwand KS	340	43,85 m ²		2208623
Innenwand Trockenbau	340	43,85 m ²		2197057
Decke über EG	350	84,81 m ²		2208612
Flachdach	360	93 m ²		2197060

Tabelle 6 Importtabelle konventionelle Bauweise
(intern)

Name	KG DIN 276	Fläche	Bezugsgröße	eLCA BT ID
Gründung	320	93	m ²	2210589
Fassade	330	181,83	m ²	2198160
Innenwand EG	340	35,241	m ²	2197076
Innenwand OG	340	52,4535	m ²	2197076
Decke über EG	350	84,81	m ²	2197077
Flachdach	360	93	m ²	2197078

Tabelle 7 Importtabelle Holztafelbauweise
(intern)

Bei Vergleich der Fassadenflächen (konventionell: 191,53 m²; Holztafelbau: 181,83 m²) fällt auf, dass das konventionelle EFH rund 10 m² mehr Fassadenfläche besitzt. Grund dafür ist die Außenwandstärke, welche im Vergleich zum Holztafelbaugebäude um 15 cm (konventionell: 34 cm; Holztafelbau: 19 cm) höher ist (siehe Anhang 2) und die ungenaue Bemaßung des Holztafelbaugrundrisses, wodurch Abweichungen bei der Dimensionierung des Erkers⁶⁵ aufgetreten sind. Demzufolge entfällt durch das Vorhandensein unterschiedlicher Bauteilflächen die Option des Variantenvergleichs in einem Projekt und die Notwendigkeit besteht, zwei Projekte anzulegen.

Weiterhin inkludiert die Mengenermittlung die Berechnung der notwendigen Bewehrungsstahlmenge, um die Genauigkeit der Ökobilanzierung (erläutert in Abschnitt 3.2.3) zu gewährleisten. Diese Berechnung wird in der LCA der Beispielimobilie „Campus RTLL“ ausgeklammert und durch das Zurückgreifen auf vorliegende Bauteilvorlagen (eLCA) ersetzt. Dabei wird für die Baukonstruktionen Bodenplatte, Decke und Dach (konventionell) auf die Werte der Bauteilvorlagen/Konstruktionsvorlagen (3190; 450150; 450170) zurückgegriffen. Bei der Erstellung der Bauteile werden Bewehrungsstahlanteile von 2% (Bodenplatte), 5% (Decke) und von 4% (Flachdach) angesetzt. Diese Werte überschreiten den Höchstbewehrungsgrad (8%) von Biegebauteilen nicht und erfüllen somit die Anforderungen nach EC 2⁶⁶.

⁶⁵ Geschlossener und bedachter Vorbau eines Gebäudes

⁶⁶ Eurocode 2

5.4 Eingabe in das Online-Ökobilanztool eLCA



Abbildung 10 Benutzeroberfläche eLCA

(Ausschnitt aus dem internen Projekt (www.bauteileditor.de))

Mit der Wahl des CSV/XLS-Imports erfolgt das Einlesen der Daten in das Ökobilanzierungstool. Anschließend öffnet sich die Benutzeroberfläche zur Eingabe der Stammdaten.

Nettogrundfläche (NGF) nach DIN 277 = 154,55 m² (siehe Anhang 2)

Bruttogrundfläche (BGF) nach DIN 277 = 186 m² (siehe Anhang 2)

Projektdaten

Projektname*

Baumaßnahme* PLZ*

Bauwerkszuordnung*

Benchmarksystem

Netto-Grundfläche NGF* m² Brutto-Grundfläche BGF* m²

Importdatei laden [Download CSV-Vorlage](#) [Download Excel-Vorlage](#)

Datei (.csv, semikolon-separiert, UTF-8 // .xls, .xlsx)
 Importtabelle konventionell.xlsx

Die erste Zeile der Importdatei wird ignoriert!

Abbildung 11 Benutzeroberfläche CSV/XLS Import für konventionelle Bauweise

(Ausschnitt aus dem internen Projekt (www.bauteileditor.de))

Nach dem Absenden der Stammdaten werden die eingelesenen Daten aus der Importtabelle modifiziert und den in Tabelle 8, Spalte eLCA BT ID, angegebenen Bauteilen zugeordnet.

5.	<input type="text" value="350 - Decken"/> <input type="text" value="351 - Deckenkonstruktionen"/>	Decke über EG	84,81 m ²		IBO_GDm_01
6.	<input type="text" value="360 - Dächer"/> <input type="text" value="361 - Dachkonstruktionen"/>	Flachdach	93 m ²		Flachdach
5.	<input type="text" value="350 - Decken"/> <input type="text" value="351 - Deckenkonstruktionen"/>	Decke über EG	84,81 m ²		Decke über EG
6.	<input type="text" value="360 - Dächer"/> <input type="text" value="361 - Dachkonstruktionen"/>	Flachdach	93 m ²		Flachdach

Abbildung 12 Vergleichsbeispiel zweier importierter Bauteile (oben – konventionell; unten - Holztafelbau)

(Ausschnitt aus dem internen Projekt (www.bauteileditor.de))

Anschließend erfolgt die Überprüfung der bauteilbezogenen und eingelesenen Daten. Danach wird die NGF-EnEV aus dem Wärmeschutznachweis inkludiert und die Ergebnisse können berechnet und ausgewertet werden.

5.5 Auswertung und Gegenüberstellung der Bilanzierungsergebnisse

Die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse werden in einer Gesamtbilanz (siehe Anhang 8, Anhang 9) und einer Bilanz nach Baugruppen dargestellt. Weiterhin kann die Erfüllung der Bewertungsmaßstäbe nach BNB 2015 (Benchmarks) abgerufen und ein Bauteilkatalog (siehe Anhang 10, Anhang 11) ausgegeben werden.

Um das vereinfachte Verfahren zu vervollständigen, werden die Indikatoren (Analyseergebnisse der KG 300), wie im Handbuch⁶⁷ beschrieben, mit 1,2 multipliziert, um die KG 400 (Bauwerk – technische Anlagen) in die Ökobilanz zu integrieren. Die modifizierten Werte für PENRT und GWP sind in folgender Tabelle dargestellt.

⁶⁷ vgl. (Rössig, 2022)

	Konventionelle Bauweise	Holztafelbauweise
PENRT (Systemgrenze)	72,91 MJ/m ² _{NGF a}	39,12 MJ/m ² _{NGF a}
GWP (Systemgrenze)	7,4 kg CO ₂ -äq/m ² _{NGF a}	3,11 kg CO ₂ -äq/m ² _{NGF a}
Masse gesamt Rohbau	230,8 t	64,73 t

Tabelle 8 Ergebnisse beider Bauweisen für ein EFH nach dem vereinfachten Verfahren (graue Energie und Treibhauspotenzial)
(Ausschnitt aus dem internen Projekt (www.bauteileditor.de))

Die Tabelle 8 zeigt die Ergebnisse aus der Gesamtbilanz (PENRT; GWP für KG 300 und KG 400 (pauschale Erhöhung um 20%)) auf. Deutlich wird, dass graue Energie und graue Emissionen bei der konventionellen Bauweise mit Kalksandstein und Stahlbeton im Schnitt zwei Mal so hoch sind (Faktor 1,86 bzw. 2,39), wie bei der Holztafelbauweise. Weiterhin geht aus der Gesamtbilanz hervor, dass der herkömmliche Baukörper (Rohbau) 3,5 Mal so viel Masse mit sich bringt als der der Leichtbauweise (Rohbau Holztafelbauweise).

5.5.1 Vergleich der grauen Energie KG 300

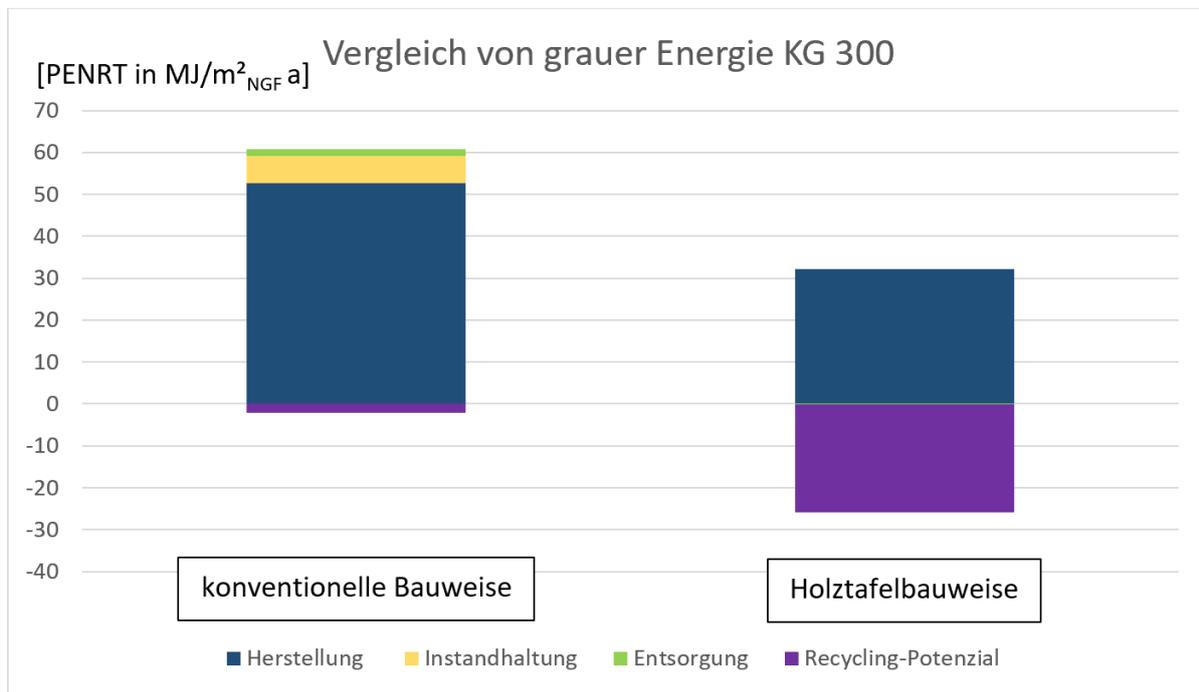


Abbildung 13 Vergleich der grauen Energie beider Bauweisen, aufgeteilt auf die Phasen Herstellung, Instandhaltung, Entsorgung und Wiederverwertung
(eigene Darstellung in Anlehnung an internes Projekt in (www.bauteileditor.de))

Die Abbildung 13 vergleicht die graue Energie (PENRT in MJ/m²_{NGF a}) beider Bauweisen, untergliedert den nicht erneuerbaren Primärenergieaufwand in die LC-Phasen Herstellung, Instandhaltung, Entsorgung und Recycling-Potenzial und stellt diese Werte graphisch dar. Hierbei ist zu erkennen, dass der nicht erneuerbare Primärenergieaufwand zur Herstellung der konventionellen Baustoffe (dunkelblau) knapp doppelt so hoch ist gegenüber der Holztafelbauweise. Ebenso liegt bei der Massivbauweise ein höherer Energiebedarf in der Instandhaltung und in der Entsorgung vor. Vergleicht man die Recycling-Potentiale beider Bauweisen wird ersichtlich, dass die Holztafelbauweise knapp das 12-fache an Energierückgewinnung im Recycling-Potential aufweist als das EFH in Massivbauweise. (Vergleich siehe Anhang 8, Anhang 9)

Um diese energetischen Aufwendungen erklären zu können, besteht die Notwendigkeit, die Bilanzierung in Bauteilgruppen zu untergliedern. Hierfür werden die, durch die Software eLCA graphisch dargestellten, Analyseergebnisse hinzugezogen.

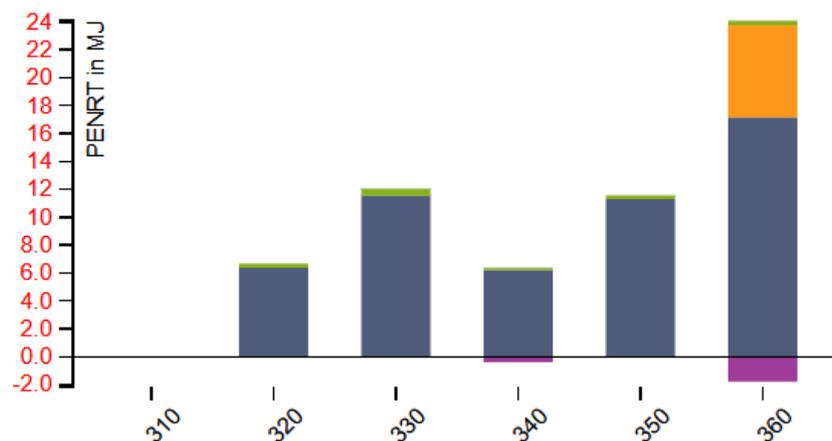


Abbildung 14 Vergleich der grauen Energie der Bauteilgruppen (KG 300) in konventioneller Bauweise

(Ausschnitt aus dem internen Projekt (www.bauteileditor.de))

Abbildung 14 vergleicht die graue Energie der konventionellen Bauteile, aufgeteilt in die Bauteilgruppen der Kostengruppe 300 und die Phasen der Systemgrenze (Herstellung - dunkelblau, Instandhaltung - orange, Abfallbehandlung/Entsorgung - grün, Recycling-Potenzial - violett). Ersichtlich ist, dass sich bei den Bauteilen Bodenplatte (KG 320), Außenwänden (KG 330), Innenwänden (KG 340), Decke (KG 350) und Flachdach (KG 360) die energetische Aufwendung an nicht erneuerbarer Primärenergie hauptsächlich auf die Herstellung der Baustoffe bezieht. Hierbei schlägt in der Bilanzierung das Flachdach, die Geschossdecke und die Bodenplatte (Verwendung von Stahlbeton) mit rund 43,2 MJ/m²_{NGF a} (59% der grauen Energie (KG 300 und KG 400)) zu Buche. Auffällig ist der hohe Anteil an grauer Energie zur Instandhaltung des Daches. Dies kann durch die Lebensdauer einzelner

Bauteilkomponenten begründet werden. Da sowohl die Dampfbremse, die EPS-Dämmung, als auch das Lochglas-Vlies eine geringere Lebensdauer als 50 Jahre aufweisen, wird in der LCA ein Austausch selbiger Bauteilkomponenten berücksichtigt.

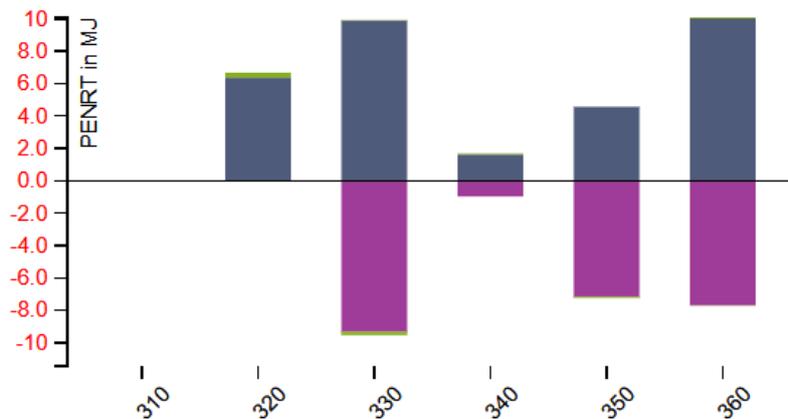


Abbildung 15 Vergleich der grauen Energie der Bauteilgruppen (KG 300) in Holztafelbauweise

(Ausschnitt aus dem internen Projekt (www.bauteileditor.de))

Werden die Holztafelbauteile der Kostengruppe 300 in ihrem Lebenszyklus gegenüber gestellt (Abbildung 16), ist erkennbar, dass die Baukonstruktionen Außenwände (KG 330) und das Flachdach (KG 360) die größten Anteile an grauer Energie in der Herstellungsphase des Einfamilienhauses in Anspruch nehmen (KG 330: 9,88 MJ/m²_{NGFA}; KG 360: 9,98 MJ/m²_{NGFA}).

Im Vergleich zur konventionellen Außenwandkonstruktion (KG 330) aus Abbildung 14 (Herstellungsphase A1-A3), ist die Differenz der in Anspruch genommenen nicht erneuerbaren Primärenergie gering. ($11,54 \text{ MJ/m}^2_{\text{NGFA}} - 9,88 \text{ MJ/m}^2_{\text{NGFA}} = 1,66 \text{ MJ/m}^2_{\text{NGFA}}$). Wird jedoch das Recycling-Potenzial hinzugezogen, weist die Außenwand (herkömmlich) mit $12,05 \text{ MJ/m}^2_{\text{NGFA}}$ im Vergleich zur Holztafel-Außenwand mit $0,38 \text{ MJ/m}^2_{\text{NGFA}}$ das 31,7-fache an grauer Energiemenge auf. Alle betrachteten Bauteile des geplanten Holztafelbauwerks (ausgenommen Gründung) besitzen großes Recycling-Potenzial (in Summe: $-25,16 \text{ MJ/m}^2_{\text{NGFA}}$), was für eine hohe Energierückgewinnung nach dem Lebensweg des Holztafelbauwerks spricht.

Im Endergebnis der Gegenüberstellung beider Bauweisen, bezogen auf die graue Energie, ist zu erwähnen, dass die Summe an nicht erneuerbarem Primärenergieaufwand bei der Holztafelbauweise wesentlich geringer ist. Dies resultiert aus der geringeren Energieaufwendung bei den Herstellungsprozessen der Bauprodukte (konventionell: $\text{PENRT}_{\text{A1-A3}} = 52,58 \text{ MJ/m}^2_{\text{NGFA}}$; Holztafelbau: $\text{PENRT}_{\text{A1-A3}} = 32,41 \text{ MJ/m}^2_{\text{NGFA}}$)⁶⁸. Wird im Nachgang das Recycling-Potenzial beider Bauweisen hinzugezogen, schneidet die Holztafelbauweise mit $7,44 \text{ MJ/m}^2_{\text{NGFA}}$ noch

⁶⁸ vgl. Gesamtbilanz Auswertung A1-A3

besser ab (Holztafelbau: $\text{PENRT}_{\text{gesamt}} = 32,6 \text{ MJ/m}^2_{\text{NGFA}} - 25,16 \text{ MJ/m}^2_{\text{NGFA}} = 7,44 \text{ MJ/m}^2_{\text{NGFA}}$).

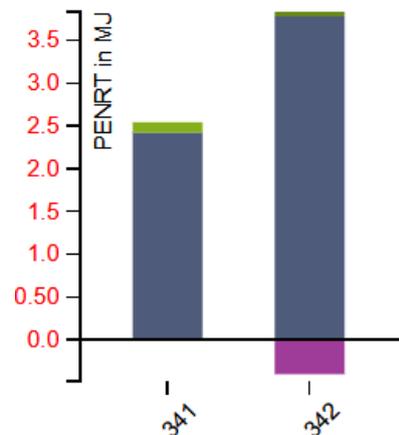


Abbildung 16 Vergleich der Innenwandkonstruktion zwischen tragend (341) und nichttragend (342) in konventioneller Bauweise
(Ausschnitt aus dem internen Projekt (www.bauteileditor.de))

Interessant ist der Vergleich der Innenwandkonstruktionen im Einfamilienhaus in herkömmlicher Bauweise (Abbildung 15). Werden diese gegenübergestellt, so ist zu erkennen, dass die nichttragenden Innenwandkonstruktion (Trockenbau) einen höheren Anteil an nicht erneuerbarem Primärenergieaufwand in der Herstellungsphase ($2,42 \text{ MJ/m}^2_{\text{NGFA}}$ zu $3,78 \text{ MJ/m}^2_{\text{NGFA}}$) bindet (hervorgerufen durch das Ständerwerk aus Stahlprofilen). Demzufolge ist, trotz der energetischen Rückgewinnung durch das Recycling-Potenzial der Trockenbaukonstruktion ($0,4 \text{ MJ/m}^2_{\text{NGFA}}$), der Einsatz von Kalksandsteinwänden im Innenbereich ökologisch vorteilhafter als die Verwendung von Trockenbauelementen.

5.5.2 Vergleich der grauen Emissionen

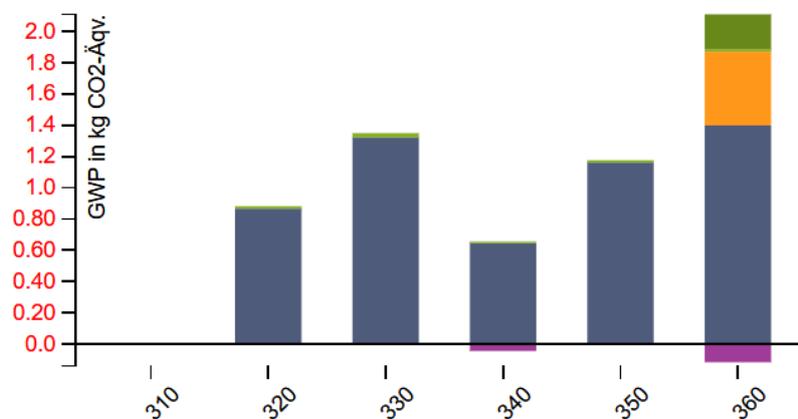


Abbildung 17 Vergleich der grauen Emissionen der Bauteilgruppen (KG 300) in konventioneller Bauweise
(Ausschnitt aus dem internen Projekt (www.bauteileditor.de))

Abbildung 17 stellt die grauen Emissionen der konventionellen Bauweise, aufgegliedert auf die Bauteilgruppen der Kostengruppe 300 und die Phasen der Systemgrenze (Herstellung, Instandhaltung, Abfallbehandlung/Entsorgung, Recycling-Potenzial), dar. Im Vergleich zur Abbildung 14 sind diese Balkendiagramme sehr ähnlich. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass bei konventioneller Bauweise in der energieaufwendigsten Phase der Systemgrenze auch der Großteil an grauen Emissionen ausgestoßen wird. Diese ist hierbei die Phase der Baustoffherstellung. Es bestätigt sich die in Abschnitt 2.1 (S. 14) angesprochene Proportionalität zwischen der energetischen Aufwendung im Herstellungsprozess und den emittierten Treibhausgasen.

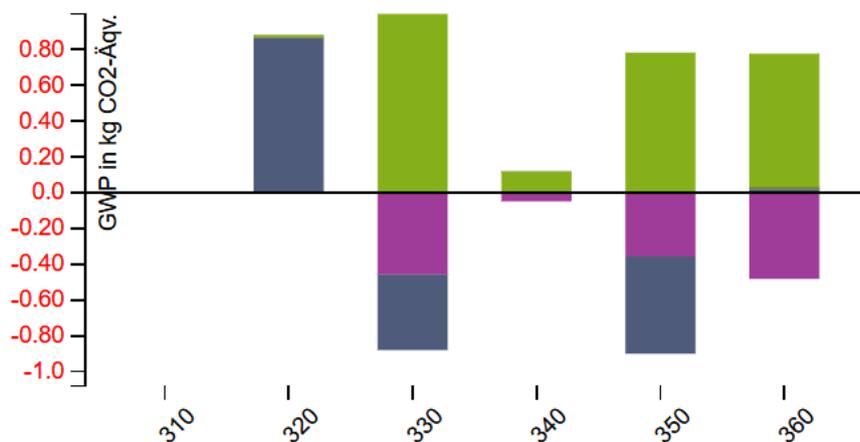


Abbildung 18 Vergleich der grauen Emissionen der Bauteilgruppen (KG 300) in Holztafelbauweise

(Ausschnitt aus dem internen Projekt (www.bauteileditor.de))

Werden im Gegensatz dazu die Balkendiagramme der Holztafelbauweise für graue Energie und graue Emissionen (Abbildung 15 und Abbildung 18) gegenübergestellt, so liegt diese Proportionalität nicht vor (ausgenommen KG 320 - Gründung). Offensichtlich ist, dass der Herstellungsprozess der Holzelemente/Holzwerkstoffe zwar Energie in Anspruch nimmt, jedoch Treibhausgase speichert (indirekte Proportionalität). Dies geht aus dem Prozess der Rohstoffbereitstellung (A1) hervor, welcher die Speicherung von CO₂ im Holz inkludiert.⁶⁹

Ausschlaggebend für das GWP des EFH in Holztafelbauweise ist die Phase der Abfallbehandlung/Entsorgung (C3/C4). Hierbei ist die Energieaufwendung nahezu null, das GWP jedoch vergleichsweise hoch. Selbiger Aspekt wird durch die thermische Verwertung der Holzkonstruktionen hervorgerufen, woraus einerseits positive Outputs (thermische Energie, Synthesegas, Holz-, Aktivkohle) entstehen. Weiterhin fällt „bei der Verbrennung aus dem Kohlenstoff (C) des Holzes in Verbindung

⁶⁹ vgl. Abschnitt 2.3.2 – Photosynthese: Kohlenstoffspeicherung

mit dem Sauerstoff (O) aus der Atmosphäre Kohlendioxid (CO₂)⁷⁰ an, welches emittiert wird.

Neben der grauen Energie und dem GWP berechnet das Bilanzierungs-Tool eLCA ebenso das aus dem Lebenszyklus der Immobilie resultierende Ozonabbaupotenzial (ODP), die bodennahe Ozonbildung (POCD), das Versauerungspotenzial (AP) und das Eutrophierungspotenzial⁷¹ (EP). Diese Umweltindikatoren werden in der Auswertung nicht näher betrachtet, sind jedoch der Vollständigkeit halber zu erwähnen und im Anhang 8 beziehungsweise im Anhang 9 aufgeführt.

Aus dem Vergleich beider Bauweisen, bezogen auf das GWP derer geht hervor, dass die konventionelle Bauweise wesentlich mehr Treibhausgasemissionen mit sich bringt. Diese werden durch die chemischen Prozesse in der Herstellungsphase, aber auch durch die Verwendung von bereitgestellter Energie aus nicht erneuerbaren Energieträgern (Erdgas, Erdöl, Braun-, Steinkohle) hervorgerufen. Die Holzbaukonstruktion hingegen benötigt weniger Energie in der Baustoffherstellung, währenddessen dabei sogar das Treibhauspotenzial verringert wird. Über den gesamten LC betrachtet wird dieses jedoch in der Abfallbehandlung wieder ausgeglichen, da dort der gespeicherte Kohlenstoff als Kohlenstoffdioxid emittiert wird.

Um den Variantenvergleich zu vervollständigen, besteht die Notwendigkeit, graue Energie und graue Emissionen für beide Einfamilienhäuser in verschiedenen Bauweisen zu ermitteln.

	2 EFH in konventioneller Bauweise	2 EFH in Holztafelbauweise
PENRT (Systemgrenze)	22,5 GJ	12,1 GJ
GWP (Systemgrenze)	2,3 t CO ₂ -äq	0,96 t CO ₂ -äq

Tabelle 9 Gegenüberstellung von grauer Energie und grauen Emissionen im Variantenvergleich
(intern)

Tabelle 9 zeigt auf, dass die graue Energie der beiden Einfamilienhäuser in herkömmlicher Bauweise 22,5 Gigajoule graue Energie binden. Das ist nahezu doppelt so viel, wie die Holztafelgebäude in Anspruch nehmen. Mit dem Mehrenergieaufwand (10,4 GJ) für die konventionellen EFH könnte im Vergleich ein Zwei-Personen-Haushalt knapp ein Jahr mit elektrischer Energie versorgt werden.⁷²

Ausschlaggebend für die klimatischen Bedingungen auf dem Planeten Erde ist das emittierte CO₂-Äquivalent, welches bei den konventionellen Einfamilienhäusern 2,3 t

⁷⁰ (Rössig, 2022)

⁷¹ Zunahme von Nährstoffen in Gewässer; verbundenes, schädliches Pflanzenwachstum

⁷² vgl. (Wikipedia, 2022)

CO₂-Äq beträgt. Diese Masse ist 2,4-mal so hoch wie die der Holztafelbaugebäude und ist vergleichbar mit dem CO₂ Ausstoß eines Durchschnitts-PKW bei einer Fahrtstrecke von 11.500 km.⁷³

Die in Anspruch genommene graue Energie und die ausgestoßenen grauen Emissionen sind bei dem oben geführten Variantenvergleich verhältnismäßig gering (Durchschnittswert: GWP: 8,93 CO₂-Äq/m²_{NGF} a; PENRT: 106,83 MJ/m²_{NGF} a). Grund dafür sind vernachlässigte Parameter aufgrund nicht vorhandener Informationen. Dazu zählen Eingabedaten des Innenausbaus (Estrich, Bodenbeläge, Anstriche, Putz, Türen, elektronische Verlegung, etc....) und der Außenanlagen (Zuwegungen, Erdbewegung), aber auch die Verwendung des vereinfachten Verfahrens zur Berechnung der KG 400.

⁷³ vgl. (ethify.org, 2022)

6 Zusammenfassung

6.1 Fazit

Aus der vorangegangenen Ökobilanz herkömmlicher Konstruktionsarten (Stahlbeton, Kalksandstein) wird deutlich, dass tragende Wände, Decken und Flachdächer in ihrer Lebenszyklusphase Herstellung (A1-A3) den Großteil an grauer Energie (86 %) in Anspruch nehmen. Erklärung dafür sind die Herstellungsprozesse von Stahl, Beton und Kalksandstein, welche einen hohen Energiebedarf aufweisen. Im Gegensatz dazu stellt das Recycling-Potenzial (D) der Kostengruppe 300 (konventionell) einen sehr geringen Anteil dar (3,6 %), da die Bauprodukte einem Downcycling-Prozess unterzogen und nicht auf gleichem Wertniveau weiterverwendet werden.

Die Holztafelbaukonstruktion hingegen bindet nicht nur eine geringere Menge an nicht erneuerbarem Primärenergiebedarf in der Phase der Herstellung (A1) ($64,8 \text{ MJ/m}^2_{\text{NGF a}}$), sondern weist ebenso ein vergleichsweise hohes Recycling-Potential (D) mit 77,2 % auf. Dies wird erstens durch den Recycling-Prozess von Holz/Holzwerkstoffen zu Holzwerkstoffen begründet, ebenso durch die Outputs bei Downcycling-Prozessen wie der Holzkohleherstellung ($D_{\text{STOFFLICH}}$).

In Summe wird für den Lebenszyklus der Leichtbaukonstruktion, verglichen mit der konventionellen Bauweise, ein Bruchteil (14%) an grauer Energie gebunden. Diese Voraussetzungen bringen ein Energieeinsparpotenzial (bezogen PE – Primärenergie gesamt, LC-Phasen A1-A3, C3, C4) von 35% mit sich.

Wird das GWP der Massivbauweise betrachtet, geht hervor, dass die größte Menge an CO_2 -äq. in der Herstellungsphase (A1-A3) der Baustoffe emittiert wird (87,5 %). Anteil an der Quantität des CO_2 -äq. hat einerseits die Energiebereitstellung durch nicht erneuerbare Primärenergieträger, andererseits die durch den Herstellungsprozess emittierten Treibhausgase. Den Phasen Instandhaltung (B2), Abfallbehandlung (C3) und Entsorgung (C4) wird bei den konventionell geplanten Einfamilienhäusern ein Anteil an emittierten Treibhausgasen von 12,5 % zugeschrieben.

Im Vergleich dazu zeigt die Analyse auf, dass im LC der Holztafelbaukonstruktion das gesamte Treibhauspotenzial in der Phase Abfallbehandlung emittiert wird. Da das hohe Recycling-Potential ($2,7 \text{ kg CO}_2\text{-äq/m}^2_{\text{NGF a}}$) von Holz/Holzwerkstoffen vorliegt, kann in dem Lebenszyklus der Holztafelbauten weiterhin ein Anteil von 52 % an Treibhausgasemissionen gespeichert werden. Es besteht die Möglichkeit, die Hälfte der Holzwerkstoffe stofflich zu verwerten (Recycling-Potenzial).

Im Endeffekt zeigt die Ökobilanz auf, dass die fortlaufende und unverhältnismäßige Verwendung konventioneller Baustoffe (Kalksandstein, Stahlbeton) zu weiterem, viel zu hohem Energieaufwand bei der Herstellung selbiger Materialien und einem, mit

diesen verbundenen CO₂-Austoß führt, welcher erheblich zum Treibhauseffekt beiträgt.

Die Notwendigkeit der Energieeinsparung und die daraus folgende Dekarbonisierung im Lebenszyklus einer Immobilie ist somit keine geringere, als die Eingrenzung des Treibhauseffekts zum Erhalt des Lebensraums Erde und der Wahrung der Lebensqualität nachfolgender Generationen.

Wie schon in der Vorarbeit zu dieser Diplomarbeit beschrieben, ist der Treibhauseffekt die Erwärmung des Bodens und der unteren Atmosphäre durch strahlungswirksame Gase wie Kohlenstoffdioxid, Methan oder Ozon. Die Erwärmung jener Bereiche löst unvorstellbare und irreversible Folgen wie Eisschmelze, daraus resultierende Treibhausgasemissionen, Meeresspiegelanstieg, Wetterextreme und die Schädigung des Ökosystems aus.

Der Einsatz der relevanten Lösungsmöglichkeiten und immenses Durchsetzungsvermögen sind notwendig, um die Wandlung der Bauwirtschaft zu fördern und graue Energie zu reduzieren. Neben Sanierungsmaßnahmen zur Lebenszyklusverlängerung von Immobilien und Forschungsprojekten zur Minderung der ökologischen Schädlichkeit konventioneller Baustoffe muss, speziell für den Neubausektor, die Verwendung nachwachsender und ökologischer Rohstoffe der Lösungsansatz sein. Ein Resultat muss der reduzierte Energieaufwand bei Herstellungsprozessen sein. Im Zuge dessen muss der Einsatz von nicht erneuerbaren Primärenergieträgern minimiert werden, um graue Energie zu reduzieren und Treibhausgasemissionen zu vermeiden.

Der Variantenvergleich des expliziten Beispiels „Campus RTLL“ zeigt auf, dass allein durch die Entscheidung für die zur Holztafelbauweise (Rohbau) die graue Energie und die grauen Emissionen um 46 % (graue Energie) beziehungsweise um 58 % (graue Emissionen) reduziert werden können. Ein ökologischer Bauteilvergleich zahlt sich eindeutig aus und sollte bei der Abwägung und Entscheidungsfindung berücksichtigt werden. Denn das Einsparpotential nachhaltiger Bauweisen/Baustoffe befürwortet die wohlüberlegte und lebenszyklusorientierte Planung von Gebäuden immens, um dem Ökosystem Erde Regeneration zu ermöglichen.

„[...] [Doch] während wir von einem Termin zum nächsten hetzen, wer hat da noch Zeit auf Mutter Erde zu achten?“⁷⁴

Wir, die am Bau Beteiligten, müssen diese Zeit aufwenden und einander bewusst über unsere Entscheidungen sein. Wir müssen uns im Klaren sein, welche Auswirkungen aus unseren Handlungen, sowohl morgen, als auch in ferner Zukunft resultieren.

⁷⁴ (Hackford, 1997)

Die Notwendigkeit, eine neue Baukultur zu schaffen liegt vor, kann jedoch keinesfalls allein durch Organisationen und Zertifizierungssysteme hervorgerufen werden. Unentbehrlich ist hierfür die Legislative, um Konzernen, Bauunternehmen und Bauherrn Vorgaben zur Verwendung nachhaltigerer Baustoffe zu machen, die Weiternutzung von Bestand zu unterstützen, das Angebot einer Förderung für die nachhaltige Bauwerkerrichtung und -sanierung zu schaffen und somit den Klimaschutz „aufzuzwingen“. Ein vollumfängliches, selbstständiges „Umdenken“ ist mit wirtschaftlichem Verlust verbunden und demzufolge nahezu ausgeschlossen. Somit muss Veränderung gesetzlich vorgegeben werden, um klimaschutzrelevante Ziele zu erreichen.

6.2 Ausblick

Anstatt sich weiterhin, wie die vergangenen viereinhalb Jahrzehnte mit der Perfektionierung der Energieeinsparung während der Nutzungsphase zu beschäftigen, besteht die Notwendigkeit, sich allmählich mit dem ist-Stand dieser Phase zufrieden zu geben. Es ist richtig, sich zuerst mit dem längsten und ebenso dem energetisch aufwendigsten Abschnitt des LC zu befassen und durch Energieeinsparverordnung (EnEV) und Gebäudeenergiegesetz (GEG) gesetzliche Rahmenbedingungen zur energetischen Verbesserung von Immobilien zu schaffen. Dieses Optimierungspotential ist jedoch fast vollständig ausgeschöpft.

Dem hinzuzufügen ist die zu befürwortende Förderung der Optimierung der Gebäudenutzungsphase („Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG)“; „Energieeffizient Sanieren: die Bundesförderung für effiziente Gebäude“; „Energetische Modernisierung“; „Erneuerbare Wärme“; ...), wodurch Zuschüsse für die Erneuerung der Gebäudehülle (Fassadendämmung), die Optimierung der Heizungsanlage oder die Verbesserung der Lüftungsanlage bereitgestellt werden. Bedauerlicherweise liegt jedoch, im Gegensatz zur Vielzahl der bundesweiten Förderprogramme für die Gebäudenutzung nur ein Bruchteil an Fördermöglichkeiten vor, welche die Herausforderung - Gebäudeenergieeffizienz über den gesamten Lebenszyklus - betrachten. Hierzu zählen beispielsweise das „Münchner Förderprogramm Energieeinsparung (FES)“ und das „Zusatzdarlehn Bauen mit Holz“. Diese Förderprogramme unterstützen den Einsatz nachhaltiger, kohlenstoffspeichernder Baustoffe und die Verwendung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen, sind jedoch ortsgebunden (München, Nordrhein-Westfalen). Unter der geringen Anzahl und der Ortsgebundenheit der zur Verfügung stehenden Unterstützungsmöglichkeiten leidet die Attraktivität nachhaltigerer Baustoffe.

Die Finanzierbarkeit und das zur Verfügung stehen ökologischer Baustoffe in Kombination mit einem einheitlichen Planungsinstrument unter gesetzlich genormter Vorgabe, aufbauend auf einer ökologischen und ökonomischen Bewertung von

Immobilien in deren Lebenszyklus, sowohl für Neubau- oder Sanierungsprojekt, stellt eine klimaschutzrelevante Lösung dar. Grundlagen bieten fortschrittliche Prozessentwürfe zur Bewertung und Zertifizierung von Gebäuden, Datenbanken mit diversen umweltbezogenen Baustoffinformationen und Softwareentwicklungen zur Eingabe und zur Bewertung der klimarelevanten Auswirkungen eines Bauvorhabens. Die Vereinigung der soeben genannten Bewertungsbestandteile, die Berücksichtigung der einheitlich definierten grauen Energie in der Gebäudegesamtbilanzierung und die Förderung der Bauwirtschaft durch die Politik bringt eine einheitliche und ökologische Gebäudebewertung mit sich, welche die Verwendung nachhaltiger Baustoffe lukrativer macht. Diese Innovation im Wirtschaftssektor Bau und das anschließende, nachhaltige Handeln ermöglichen es uns heute, nicht nur für das Wohlbefinden unserer Nachfahren zu sorgen, sondern ihnen ein Andenken zu schaffen, welches nicht in Vergessenheit geraten kann.

Literaturverzeichnis

- architekturbuch.de. (04. 07 2022). *medienservice architektur & bauwesen*. Von Bauteile wiederverwenden: <https://www.architekturbuch.de/architekturplanen/altbau-umbau/bauteile-wiederverwenden.html> abgerufen
- Baunetz_Wissen_. (30. 06 2022). *Baunetz_Wissen_Gebäudetechnik*. Von Treibhauspotential: <https://www.baunetzwissen.de/glossar/t/treibhauspotenzial-6305134> abgerufen
- Beton Wiki. (07. 07 2022). *www.beton.wiki.de*. Von Zementherstellung: <https://www.beton.wiki/index.php?title=Zementherstellung> abgerufen
- Bundesamt für Justiz. (28. 06 2022). *Bundesministerium für Justiz*. Von gesetz-im-internet: https://www.gesetze-im-internet.de/geg/___1.html abgerufen
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. (07. 07 2022). *www.oekobaudat.de*. Von Ökobaudat - Informationsportal Nachhaltiges Bauen: <https://www.oekobaudat.de/> abgerufen
- Bundesministerium der Justiz. (01. 07 2022). *Gesetze im Internet*. Von Verordnung über die Entsorgung polychlorierter Biphenyle, polychlorierter Terphenyle und halogener Monomethyldiphenylmethane (Artikel 1 der Verordnung über die Entsorgung polychlorierter Biphenyle, polychlorierter Terphenyle sowie halogener Monome: <https://www.gesetze-im-internet.de/pcbabfallv/BJNR093210000.html> abgerufen
- Bundesministerium der Justiz. (08. 07 2022). *www.gesetze-im-internet.de*. Von Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz: <https://www.gesetze-im-internet.de/altholzv/> abgerufen
- Dipl.-Ing. T. Ebert, D.-I. N.-E.-I. (2010). *Zertifizierungssysteme für Gebäude*. Werding: Firmengruppe APPL.
- Dr. Boris Mahler, S. I. (2019). *Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus*. Dessau-Rosslau: Umweltbundesamt.
- Dr. Michael Bauer, P. M. (2007). *Green Building - Konzepte für nachhaltige Architektur*. Hamburg: Georg D.W.Callwey GmbH & Co. KG.
- Energieausweis-Vorschau.de - EAV. (28. 06 2022). *energieausweis-vorschau.de*. Von energieausweis-vorschau.de: https://www.energieausweis-vorschau.de/energieausweis.html?reseller=adwords-energieausweis%20verbrauchsausweis&gclid=CjwKCAjwzeqVBhAoEiwAORe mzWkzzVE07vNre_I5gyUBQ1kxCEdp7KDxrKISsytRMfPT24Bc7tP51xoCH9Y QAvD_BwE abgerufen

- EnEV - online. (30. 06 2022). *EnEV - online*. Von Europäische Gebäuderichtlinie: https://enev-online.de/epbd/2018/epbd_2018_anhang_1_rahmen_berechnung_gesamtenergieeffizienz_gebaeuden.htm#:~:text=Die%20Gesamtenergieeffizienz%20eines%20Geb%C3%A4udes%20wird,und%20andere%20geb%C3%A4udetechnische%20Systeme%20wider. abgerufen
- ethify.org. (21. 07 2022). *Einfach besser leben*. Von Wie viel ist eine Tonne CO₂: <https://ethify.org/content/wie-viel-ist-tonne-co2#:~:text=Das%20Volumen%20einer%20Tonne%20CO2,1%2C5%20m3%20zu.> abgerufen
- Fertighaus.de. (04. 07 2022). *Lebensdauer von Bauteilen und Bauteilschichten*. Von [fertighaus.de/ratgeber/finanzierung-kosten-foerderung/lebensdauer-von-bauteilen-und-bauteilschichten/](https://www.fertighaus.de/ratgeber/finanzierung-kosten-foerderung/lebensdauer-von-bauteilen-und-bauteilschichten/) abgerufen
- FUTURA. (07. 07 2022). *www.futura-sciences.com*. Von Die Herstellung von Stahl: https://www.futura-sciences.com/de/die-herstellung-von-stahl_1776/#:~:text=Stahl%20kann%20in%20zwei%20Arten,denen%20das%20Erz%20geschmolzen%20wird. abgerufen
- Hackford, T. (Regisseur). (1997). *Im Auftrag des Teufels* [Kinofilm].
- Hauke, B. (2021). *Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz*. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG.
- Heiligengrabe, S. K. (Regisseur). (2019). *Werksbesichtigung OSB-Produktion* [Kinofilm].
- Klett / Kai Zimmermann. (01. 07 2022). *Klett*. Von Infoblatt Treibhauseffekt: <https://www.klett.de/alias/1016053> abgerufen
- Klett. (20. 06 2022). *Infoblatt Treibhauseffekt*. Von Natürlicher und anthropogener Treibhauseffekt - ein Überblick: <https://www.klett.de/alias/1016053> abgerufen
- Landesforsten, N. (Regisseur). (2014). *Vom Stamm zum Brett* [Kinofilm].
- Mahler, D. B., Idler, M. S., & Gantner, D. J. (2019). *Mögliche Optionen für eine Berücksichtigung von grauer Energie im Ordnungsrecht oder im Bereich der Förderung*. Stuttgart: Fraunhofer IBP.
- Markstein, M. (04. 04 2022). 3. Projektarbeit. *Einordnung der grauen Energie in die Lebenszyklusanalyse von Gebäuden*. Kirchberg, Sachsen, Deutschland.
- ökologisch-bauen. (07. 07 2022). *www.oekologisch-bauen.info*. Von Kalksandstein: Herstellung, Eigenschaften und Verwendung: <https://www.oekologisch-bauen.info/baustoffe/massivbaustoffe/kalksandstein/#:~:text=Kalksandstein%2>

- 0 wird aus Branntkalk (Kalziumoxid, dem Branntkalk entsteh
t Kalkhydrat Calzimidhydroxid). abgerufen
- Pflanzenforschung.de. (01. 07 2022). *Wo bleibt der Kohlenstoff?* Von Globale
Umsetzung von gespeichertem Kohlenstoff zu CO₂ aus terrestrischen
Ökosystemen neu berechnen:
[https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/journal/wo-bleibt-der-
kohlenstoff-globale-umsetzung-von-gespeic-
10324#:~:text=Kohlenstoff%20auf%20der%20Erde&text=Eine%20h%C3%A4
ufige%20Verbindung%20des%20Kohlenstoffs,%2C%20Holz%2C%20Wurzeln
%20und%20Fr%C](https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/journal/wo-bleibt-der-kohlenstoff-globale-umsetzung-von-gespeic-10324#:~:text=Kohlenstoff%20auf%20der%20Erde&text=Eine%20h%C3%A4ufige%20Verbindung%20des%20Kohlenstoffs,%2C%20Holz%2C%20Wurzeln%20und%20Fr%C) abgerufen
- Rockwool. (04. 07 2022). *Nachhaltigkeitsbericht 2021*. Von
[https://www.rockwool.com/de/unternehmen/pressemitteilungen/nachhaltigkeits
bericht-2021/](https://www.rockwool.com/de/unternehmen/pressemitteilungen/nachhaltigkeitsbericht-2021/) abgerufen
- Rössig, S. (11. 07 2022). *eLCA Online Handbuch*. Von Verfahren: [https://www.r-i-
g.de/Handbuch/Verfahren.html](https://www.r-i-g.de/Handbuch/Verfahren.html) abgerufen
- studyfix. (07. 07 2022). *Anthropogener Treibhauseffekt*. Von Anthropogener
Treibhauseffekt: [https://studyflix.de/erdkunde/anthropogener-treibhauseffekt-
4016](https://studyflix.de/erdkunde/anthropogener-treibhauseffekt-4016) abgerufen
- Stumm, A. (06 2022). Re-Use. *Stadt Bauwelt*, S. 67. Von Bauteile wiederverwenden.
abgerufen
- Tagesschau. (21. 07 2022). *Tagesschau*. Von Bilder:
[https://www.tagesschau.de/multimedia/bilder/grafik-co2-
101.html#:~:text=Eine%20Tonne%20CO2%20entspricht%20etwa,Kilometer%
20mit%20einem%20Mittelklasse%20Benziner.](https://www.tagesschau.de/multimedia/bilder/grafik-co2-101.html#:~:text=Eine%20Tonne%20CO2%20entspricht%20etwa,Kilometer%20mit%20einem%20Mittelklasse%20Benziner.) abgerufen
- Umwelt Bundesamt. (13. 06 2022). *Umweltbundesamt*. Von Gesellschaft erfolgreich
verändern: [https://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-
strategien-internationales/gesellschaft-erfolgreich-veraendern](https://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-strategien-internationales/gesellschaft-erfolgreich-veraendern) abgerufen
- Wikipedia. (30. 06 2022). *Energieeinsparverordnung*. Von Geschichte:
<https://de.wikipedia.org/wiki/Energieeinsparverordnung> abgerufen
- Wikipedia. (21. 07 2022). *Liste von Größenordnungen der Energie*. Von
[https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Gr%C3%B6%C3%9Fenordnungen_de
r_Energie](https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Gr%C3%B6%C3%9Fenordnungen_der_Energie) abgerufen

Anhangverzeichnis

- Anhang 1 - Broschüreausschnitt Ökobaudatenbank
- Anhang 2 - Annahmen und Berechnungsgrundlagen
- Anhang 3 - Bauteilüberprüfung Hottgenroth
 - Hlz24MiWo24 - Flachdach Holztafelbau
 - Hlz16MiWi16 – Außenwand Holztafelbau
 - KS20MiWo16 – Außenwand Kalksandstein
 - STB20EPS30 - Stahlbetondecke
- Anhang 4 - INSTABUILT HouseKit Stuttgart
- Anhang 5 - Wärmeschutznachweis
- Anhang 6 - Mengenermittlung ALLPLAN
- Anhang 7 - Mengenermittlung Innenwände
- Anhang 8 - Gesamtbilanz Campus RTLL Holztafelbauweise (eLCA)
- Anhang 9 - Gesamtbilanz Campus RTLL konventionell (eLCA)
- Anhang 10 - Bauteilkatalog Holztafelbauweise (eLCA)
- Anhang 11 - Bauteilkatalog konventionell (eLCA)

