

Handlungsansätze zur Dekarbonisierung von Baustellenlogistik und -prozessen anhand zweier typischer Bauweisen für Wohnbauten

DecarbBaustelle - Ein Baustein auf dem Weg zum klimaneutralen Wohnungsbau

Abschlussbericht

Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt
Förderkennzeichen: AZ 38075/01-25

Antragstellende Institution

Münchner Wohnen Service GmbH
Gustav-Heinemann-Ring 111
81739 München

Projektpartner

Anna Kirschstein, M.Sc., Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Technische Universität München

Bearbeitung

Anna Kirschstein, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TU München
Lena Tschakert, Referentin Nachhaltigkeit und Klimaschutz, Münchner Wohnen Service GmbH
Michael Höck, Projektleiter des Bauvorhabens, Münchner Wohnen Service GmbH

München, 17.07.2024

Kooperationspartner

Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V.
Holzbau Deutschland Institut

Unterauftragnehmende

oculai GmbH

Mitarbeit

Marie Meyer-Sternberg, B. Sc. (wissenschaftliche Hilfskraft, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion)

Das Forschungsprojekt *DecarbBaustelle* hatte eine Laufzeit von 18 Monaten und startete Anfang Februar 2022. Aufgrund eines verzögerten Bauablaufes und dadurch verzögerter Datenaufnahme und -auswertung, wurde das Projekt bis zum 31.03.2024 verlängert. Der Abschlussbericht wurde am 17.07.2024 bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt eingereicht und ist auf der Website des Lehrstuhls für Holzbau und Baukonstruktion verfügbar.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Abkürzungen.....	iii
Begriffe und Definitionen	iv
Kurzfassung.....	v
1. Hintergrund und Ziele	1
1.1. Hintergrund.....	1
1.2. Projektziele	4
2. Methodisches Vorgehen	6
3. Untersuchungsgegenstand.....	8
3.1.1. Bauvorhaben	8
3.1.2. Bauablauf.....	9
4. Ziel und Untersuchungsrahmen	10
4.1. Ziel.....	10
4.2. Funktionelle Einheit	10
4.3. Produktsystem, funktionales Äquivalent und Systemgrenzen	10
4.4. Datenermittlung für die Sachbilanz	11
4.5. Datenquellen für die Wirkungsabschätzung und Wirkungsindikatoren.....	13
5. Sachbilanz.....	14
5.1. Nettoraumflächen der Gebäude und Materialmengen	14
5.2. Allgemeine Transport- und Baustellenprozesse	14
5.2.1. Transportprozesse.....	14
5.2.2. Aushub der Baugrube.....	16
5.2.3. Stromverbrauch der Baustelle	16
5.2.4. Abfallmengen.....	17
5.3. Hilfsmittel	18
5.3.1. Bauheizung.....	18
5.3.2. Begleitheizung Bauwasser	18
5.3.3. Bauholz.....	19
5.4. Stahlbetonbauteile.....	19
5.5. Mauerwerkswände	20
5.6. Holztafelwände	20
5.7. Brettsperrholzelemente	21
6. Ergebnisse und Auswertung.....	22

6.1.	Globales Erwärmungspotential der Errichtungsphase (Modul A4-5)	22
6.1.1.	Globales Erwärmungspotential der gesamten Baustelle.....	22
6.1.2.	Globales Erwärmungspotential je Haus je Modul.....	22
6.1.3.	Globales Erwärmungspotential separat je Aktivität und je Bauweise	23
6.1.4.	Globales Erwärmungspotential je Bauweise und Verursacherkategorie	24
6.2.	Globales Erwärmungspotential des Moduls A4	24
6.2.1.	Globales Erwärmungspotential je Bauweise	24
6.2.2.	Globales Erwärmungspotential je Bauweise und Verursacherkategorie	26
6.3.	Globales Erwärmungspotential des Moduls A5	26
6.3.1.	Globales Erwärmungspotential je Aktivität	26
6.3.2.	Globales Erwärmungspotential je Verursacherkategorie	27
6.3.3.	Globales Erwärmungspotential je Bauweise und Verursacherkategorie	28
7.	Fazit und Handlungsempfehlungen	31
7.1.	Fazit Modul A4 - Transport.....	31
7.2.	Fazit Modul A5 – Errichtung/Einbau.....	32
7.3.	Hinweise für die Ausschreibung und Handlungsempfehlungen.....	33
8.	Zusammenfassung und Ausblick	37
	Abbildungsverzeichnis	39
	Tabellenverzeichnis	41
	Literaturverzeichnis	42
	Anhang 1 – Verwendete Datensätze.....	45
	Anhang 2 – Data Management Plan.....	46

Abkürzungen

a	Jahr
CW-Profil	C-förmiges Wandprofil
CSRD	Corporate Sustainability Reporting Directive
EH40	Effizienzhaus-Stufe-40
EH70	Effizienzhaus-Stufe-70
GWP	Globales Erwärmungspotential
KVH	Konstruktionsvollholz
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Inventory Analysis
m²	Quadratmeter
m²-NRF	Quadratmeter Nettoraumfläche
NFRD	Non Financial Reporting Directive
NRF	Nettoraumfläche
OSB	Oriented Strand Board
PE	Polyethylen

Begriffe und Definitionen

Dekarbonisierung

Als Dekarbonisierung wird in diesem Projekt die Reduktion der äquivalenten Treibhausgasemissionen bezeichnet.

Globales Erwärmungspotential - GWP

Das Globale Erwärmungspotential (englisch: Global Warming Potential) stellt den Indikator für das Treibhauspotential der Wirkungskategorie Klimawandel dar und wird in der Einheit kgCO₂-eq. je funktioneller Einheit angegeben. [1]

Nettoraumfläche - NRF

Die Nettoraumfläche setzt sich zusammen aus der Nutzungsfläche, der Technikfläche und der Verkehrsfläche eines Gebäudes. [2]

Kurzfassung

Für die Dekarbonisierung des Gebäudesektors ist es nicht nur notwendig die Treibhausgasemissionen im Gebäudebetrieb zu reduzieren, sondern auch diejenigen Emissionen zu verringern, die bei der Herstellung, der Errichtung, dem Austausch und der Entsorgung durch beteiligte Unternehmen der Lieferketten hervorgerufen werden.

Zur Errichtungsphase im Gebäudelebenszyklus gehören nach DIN EN 15978:2012-10 der Transport vom Werk über mögliche Zwischenstationen zur Baustelle sowie alle Baustellenaktivitäten. Die Errichtungsphase findet derzeit kaum Berücksichtigung in Ökobilanzen. Zur Emissionsreduktion der gesamten Lieferkette ist es jedoch notwendig diese Emissionen zu quantifizieren und Möglichkeiten zur Dekarbonisierung aufzuzeigen. Die Umsetzung kann beispielsweise durch nachhaltige Ausschreibungs- und Vergabekriterien unterstützt werden, was insbesondere Einfluss auf das Handeln beteiligter Unternehmen mit sich bringt.

Im Forschungsprojekt *DecarbBaustelle* wurden die Treibhausgasemissionen (Globales Erwärmungspotential) einer Baustelle mittels einer Lebenszyklusanalyse ermittelt. Darauf aufbauend wurden Stellschrauben identifiziert sowie erste Handlungsempfehlungen zur Dekarbonisierung der Baustelle gegeben. Untersucht wurde ausschließlich der Rohbau von vier Baukörpern, die auf einer Baustelle nahe München errichtet wurden. Hierbei handelte es sich um vier Wohngebäude, wobei zwei davon in Holzbauweise und zwei davon in Massivbauweise errichtet wurden. Zur Ermittlung der Umweltwirkungsdaten fand eine ausführliche baubegleitende Datenaufnahme statt. Hier kamen unter anderem zwei auf der Baustelle installierte Videokameras zum Einsatz. Aus den Ergebnissen lassen sich erste Hinweise für eine nachhaltige Ausschreibung und Vergabe ableiten. Erste Handlungsempfehlungen zur Dekarbonisierung von Baustellenlogistik und -prozessen können so getrennt für Projektplanung und Projektsteuerung sowie das Baugewerbe gegeben werden.

Auf Basis der Ergebnisse dieses Projektes, können weitere Untersuchungen zur Treibhausgasemissionsreduktion der Errichtungsphase durchgeführt werden. Auch eine Validierung der Ergebnisse durch Untersuchungen weiterer Baustellen und der Überprüfung der Robustheit der verwendeten Daten sind notwendig. Weitere Untersuchungen können beispielsweise die praktische Umsetzung der identifizierten Reduktionsmöglichkeiten beinhalten, um deren Einfluss quantifizierbar zu machen.

1. Hintergrund und Ziele

1.1. Hintergrund

Politische Zielvorgaben, die zum Beispiel im Bundes-Klimaschutzgesetz [3] zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen gegeben werden, spielen auch für die Baubranche eine relevante Rolle. Denn allein die Treibhausgasemissionen durch den Gebäudebetrieb machen 33% der Gesamttreibhausgasemissionen in Deutschland aus [4]. Auf Basis des Europäischen *Green Deals* [5], der die Umsetzung eines klimaneutralen Europa bis 2050 voranbringen soll, wurde die Taxonomieverordnung eingeführt [6]. Hier wird definiert inwieweit eine „[...] *Wirtschaftstätigkeit als ökologisch nachhaltig einzustufen ist* [...]“, was folglich für nachhaltiges Investieren relevant ist [6].

Durch die Taxonomieverordnung [6] und zugehörige delegierte Verordnungen [z.B. 7] sowie die Pflicht großer Unternehmen zur Nachhaltigkeitsberichterstattung, müssen Unternehmen bestimmter Größe jährlich Bericht über deren Nachhaltigkeitsziele ablegen [6, 8, 9]. Zur Berichterstattung des Umweltziels Klimaschutz gehört auch die Quantifizierung der Treibhausgasemissionen. Es wird eine Unterteilung in Scope 1, Scope 2 und Scope 3 Emissionen vorgenommen [6, 10] (Abbildung 1-1).

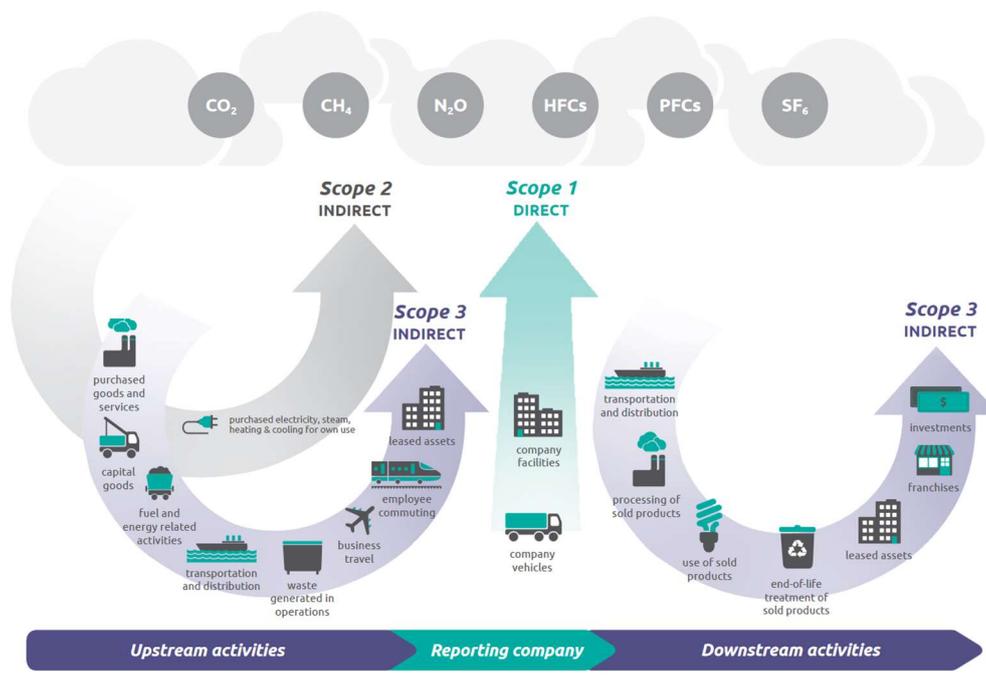


Abbildung 1-1 Scope 1, Scope 2 und Scope 3 Emissionen in der Lieferkette von Unternehmen [10]

Zwingend zu berichten sind die *direkten* CO₂-Emissionen des Unternehmens aus Quellen, die das Unternehmen selbst besitzt oder kontrolliert (Scope 1) [9, 11, 12]. Das sind zum Beispiel die Treibhausgasemissionen aus der Strom- Dampf- oder Wärmeerzeugung, chemischer oder physikalischer Prozesse oder Treibhausgasemissionen der Transportprozesse der unternehmenseigenen Flotte [9, 11, 12]. Auch die *indirekt* durch die Erzeugung von gekauftem Strom verursachten Treibhausgasemissionen, der vom berichtenden Unternehmen zugekauft wird, müssen verpflichtend berücksichtigt werden (Scope 2) [9, 11, 12]. Die Emissionen aus vor- und nachgelagerten Prozessen aus der Lieferkette (Scope 3) sind heute noch nicht zwingend zu

berichten [9, 11, 12]. Die Treibhausgasemissionen der Lieferkette von Gebäuden können jedoch etwa 30% der Gesamtemissionen ausmachen [13, 14]. Deshalb, und auch weil *Scope 3* Emissionen zukünftig berichtspflichtig werden könnten, spielen *Scope 3* Emissionen eine nicht zu vernachlässigende Rolle, um Treibhausgasemissionen zu reduzieren und Klimaziele zu erreichen. Folglich können auch kleinere, nicht berichtspflichtige Unternehmen der Lieferkette indirekt von der Berichtspflicht betroffen sein.

Im Bausektor können die direkten *Scope 1* und *Scope 2* Emissionen von Neubauten und Bestandsgebäuden durch das Umsetzen von Energieeffizienzmaßnahmen während des Gebäudebetriebs reduziert werden [14]. Das Umsetzen von Maßnahmen zur Minderung von vor- und nachgelagerten Treibhausgasemissionen (*Scope 3*) ist hierbei von den Beteiligten der Lieferkette abhängig.

Die Ökobilanz stellt eine robuste Methode dar, um neben den *Betriebsemissionen* (*Scope 1* und *Scope 2*) auch die Auswirkungen von *grauen Emissionen* (*Scope 3*) auf die Umwelt quantifizierbar, analysierbar und vergleichbar zu machen [15, 16]. Bei Gebäudeökobilanzen können unter *Scope 3* die Treibhausgasemissionen über den Gebäudelebenszyklus, verursacht durch die Herstellung der Baustoffe (Module A1-3, B4), die Errichtung des Gebäudes (Module A4-5), den Austausch von Bauprodukten (B4) sowie die Entsorgung am Lebensende (Module C1-4) verstanden werden (Abbildung 1-2). Die Emissionen durch den Gebäudebetrieb (Module B1-3 und B5-7) sind der Nutzungsphase zuzuordnen.

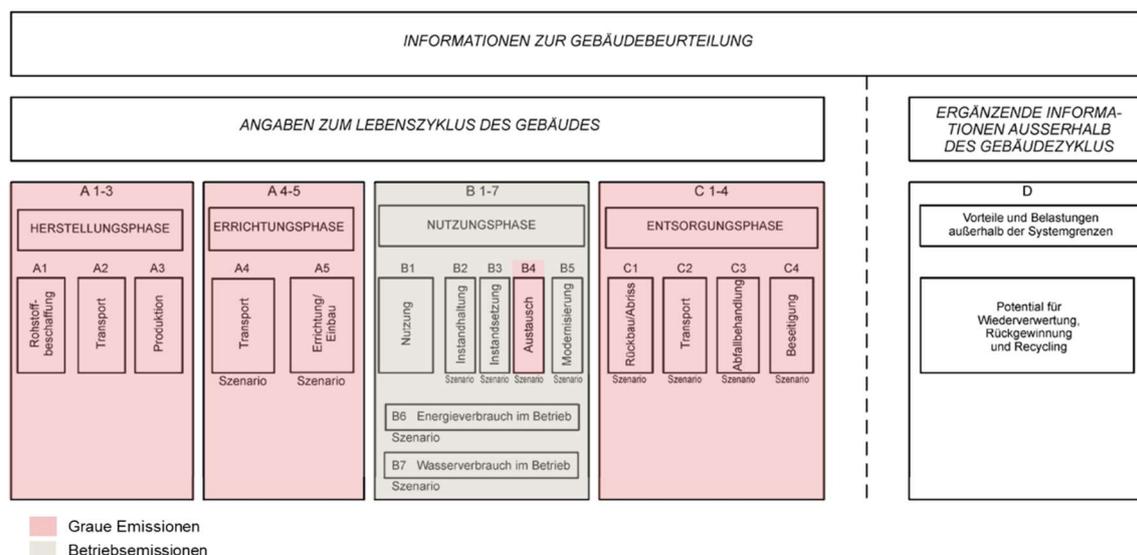


Abbildung 1-2 Der Gebäudelebenszyklus und die damit in Verbindung stehenden grauen Emissionen (*Scope 3*) und Betriebsemissionen (*Scope 1* und *Scope 2*) [17]

Insbesondere für die Herstellung von Bauprodukten existieren bereits Ökobilanzdaten in Umweltproduktdeklarationen [z.B. 18] und es können Zertifikate für *klimaneutrale Produkte* erworben werden [19]. Die Errichtungsphase, die den Transport der Bauprodukte auf die Baustelle (Modul A4) sowie die Errichtung des Gebäudes (Modul A5) beinhaltet [17], wird in der Ökobilanzierung derzeit kaum berücksichtigt [20]. Es wird davon ausgegangen, dass die Emissionen der Errichtungsphase im Vergleich zu den anderen Lebenszyklusphasen gering ist und deshalb vernachlässigt werden kann [z.B. 21]. Allein um die Klimaziele zu erreichen und die Lieferketten dekarbonisieren zu können, ist es jedoch notwendig auch die Treibhausgasemissionen der Errichtungsphase genauer zu untersuchen.

Innerhalb der Systemgrenzen des Moduls A4 (Transport) der Errichtungsphase liegen:

„[...]“

- *Transport von Materialien und Produkten ab Werk bis zur Baustelle, einschließlich Transport, Zwischenlagerung und Verteilung;*
- *Transport von Baugerät (Kräne, Rüstmaterialien usw.) zum und vom Standort.*
- *alle Auswirkungen und Aspekte in Bezug auf transportbedingte Verluste (d. h. Produktion, Transport und Abfallmanagement der Produkte und Materialien, die während des Transports beschädigt werden oder auf andere Weise verloren gehen). [...]“ [17]*

Innerhalb der Systemgrenzen des Moduls A5 (Errichtung/Einbau) der Errichtungsphase liegen:

„[...]“

- *Erdarbeiten und Freiflächenplanung;*
- *Lagerung von Produkten, einschließlich Heizung, Kühlung, Luftfeuchteregelung usw.;*
- *Transport von Materialien, Produkten, Abfall und Gerät innerhalb des Standorts;*
- *Behelfsarbeiten einschließlich für den Bau benötigten Behelfsarbeiten, die nicht vor Ort stattfinden;*
- *Produktherstellung und -umwandlung vor Ort;*
- *Heizung, Kühlung, Belüftung, Luftfeuchteregelung usw. während der Bauphase;*
- *Einbau der Produkte in das Gebäude einschließlich Zusatzprodukte, die nicht in der EPD der Produkte berücksichtigt sind, z. B. Trennmittel in Schalungen für Beton, bei Abschluss des Projekts zu entsorgende Schalungen;*
- *Wasserverbrauch für die Kühlung der Baumaschinen oder Reinigung vor Ort;*
- *Abfallmanagementprozesse anderer auf der Baustelle erzeugter Abfälle. Dazu gehören alle Prozesse (einschließlich Abtransport von der Baustelle) bis zur endgültigen Beseitigung oder bis zum Ende des Abfallstatus;*
- *Herstellung, Transport und Abfallmanagement von Produkten und Materialien, die während der Einrichtungs- und Einbauphase verloren gehen.“ [17]*

Auftraggebenden ist mit einer umweltorientierten Vergabe (englisch: *Green Procurement*) ein Hilfsmittel gegeben, Interessen und Pflichten zur Reduzierung der Unternehmensemissionen nachkommen zu können [22]. So kann es beispielsweise für auftraggebende Unternehmen dadurch möglich werden Kriterien in die Ausschreibung mit aufzunehmen, durch die der Einsatz umweltfreundlicher Produkte bevorteilt wird [22]. Auch für die Reduktion der Treibhausgasemissionen der Errichtungsphase könnte dies ein hilfreiches Mittel sein [23]. Um die Reduktion von Treibhausgasemissionen bei der Errichtung von Gebäuden auf auftraggebender und auftragnehmender Seite (insbesondere Baufirmen) umsetzen zu können, ist es zunächst notwendig herauszufinden, welche Transport- und Baustellenaktivitäten Treibhausgasemissionen hervorrufen, welche Relevanz diese haben und anhand welcher Stellschrauben zur Dekarbonisierung diese letzten Endes reduziert werden können.

Derzeit gibt es nur wenige Studien, die sich mit der Ermittlung der Umweltwirkungen von Baustellen beschäftigen [z.B. 24–27]. In einer Studie der Technischen Universität Wien und der Ressourcen Management Agentur zur CO₂-neutralen Baustelle [26], geht es unter anderem darum, die durch Transporte, Strom- und Kraftstoffverbrauch entstandenen CO₂-Emissionen unterschiedlicher fiktiver Baustellen (Wohnungsbau, Straßenbau) zu ermitteln und eine Kostenanalyse durchzuführen. Anhand eines Zukunftsszenarios, das organisatorische

Maßnahmen, technologische Entwicklungen, die Erzeugung von erneuerbaren Energien und den Einsatz und Zukauf von erneuerbaren Energien beinhaltet, werden Reduktionspotentiale aufgezeigt. Für die fiktive Baustelle *Neubau eines typischen Wohnbaus* können durch die unterschiedlichen Szenarien Einsparungen von 38 bis 52% erzielt werden. Die Sachbilanzdaten dieser Studie stammen aus zwei Masterarbeiten, in deren Rahmen Daten spezifischer Baustellen gesammelt und diese mit Literaturdaten ergänzt wurden. Hierbei fand keine Datenerhebung vor Ort statt. Die darauf aufbauende Studie zur *Sondierung zur Durchführbarkeit CO₂-neutraler Demonstrationsbaustellen* [28] zielt dann darauf ab ein Demonstrationsprojekt mit ausgewählten Maßnahmen aus dem Vorgängerprojekt genauer zu untersuchen. Es wurden unter anderem eine Umfrage zur praktischen Umsetzbarkeit der Maßnahmen durchgeführt und die grundsätzliche Umsetzbarkeit zur Berücksichtigung ökologischer Vergabe- und Ausschreibungskriterien bestätigt.

Für den Transport werden anhand der beiden Studien Möglichkeiten bezüglich der Erlangung der CO₂-Neutralität von Baustellen aufgezeigt. Diese beinhalten das Reduzieren des Transportgewichts und der -distanz, was z.B. durch das Bevorzugen von Lieferanten und Entsorgungsbetrieben, die die geringste Distanz zur Baustelle aufweisen, umgesetzt werden kann. Auch der Einsatz von Fahrzeugen mit geringeren Emissionen wie beispielsweise wasserstoffbetriebene oder elektrisch betriebene LKWs kann hier vorteilhaft sein. Auf der Baustelle kann die Reduktion der Einsatzmenge von Energieträgern wie Strom und Diesel, die Reduktion der Einsatzzeit von Baumaschinen und der Einsatz von Maschinen mit geringeren Emissionen zu geringeren Treibhausgasemissionen auf Baustellen führen. Konkrete Maßnahmen hierfür können beispielsweise der Einsatz hybrider Bagger, der Einsatz mit Strom betriebener Mischertrommeln oder das Verwenden von Wasserstoff, E-Fuels oder Bio-Fuels sein. Auch das Reduzieren der Zeiträume während Inaktivität von Baugeräten, das Optimieren der Logistik von Baugeräten auf der Baustelle oder das Anpassen des Startzeitpunktes der Baustellentätigkeiten sind mögliche Maßnahmen, um einen Schritt weiter hin zu klimaneutralen Baustellen zu machen. Auch der Einsatz von Photovoltaik am Gerüst oder auf Containern und der Einsatz von Strom aus erneuerbaren Ressourcen stellen mögliche Maßnahmen dar. [26, 28]

Die Datenaufnahme in den existierenden Studien erfolgte meist durch die globale Datenerfassung von z.B. Diesel- und Stromverbräuchen der gesamten Baustelle [z.B. 25] oder durch die Betrachtung fiktiver Baustellen [z.B. 26]. Um sowohl Auftraggebenden als auch Auftragnehmenden konkrete Handlungsempfehlungen zur Dekarbonisierung von Baustellenlogistik und -prozessen für zukünftige Bauvorhaben geben zu können, ist eine detaillierte Datenaufnahme auf einer realen Baustelle notwendig. Durch die Untersuchung der Treibhausgasemissionen der Errichtung von Gebäuden unterschiedlicher Bauweisen soll sichergestellt werden bauweisenspezifische Handlungsempfehlungen geben zu können. Aus diesem Grund wurde dieses Forschungsprojekt durchgeführt, das anhand eines realen Projekts *Handlungsansätze zur Dekarbonisierung von Baustellenlogistik und -prozessen anhand zweier typischer Bauweisen für Wohnbauten* aufzeigen soll.

1.2. Projektziele

Ziel des Projektes *DecarbBaustelle* ist es auf Basis einer realen Baustelle bauweisenspezifische Handlungsansätze zur Dekarbonisierung der Errichtungsphase dieser und zukünftiger Baustellen zu geben. Dafür sollen anhand einer realen Baustelle, die für einzelne Baustellenaktivitäten entstehenden Aufwendungen zu quantifizieren und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen zu ermitteln. Um die Emissionsquellen identifizieren und deren

Relevanz gegenüber anderer Emissionsquellen einschätzen zu können, soll eine möglichst präzise und prozessgenaue Datenaufnahme vor Ort stattfinden. Die prozessgenauen Untersuchungen sollen mittels auf der Baustelle installierter Kameras unterstützt werden. Ziel ist es in diesem Projekt die Treibhausgasemissionen derjenigen Errichtungsaktivitäten zu ermitteln und zu analysieren, die mit dem Rohbau in Verbindung stehen. Dabei soll insbesondere auf die Treibhausgasemissionen unterschiedlicher typischer Bauweisen für Wohnbauten (Massivbauweise und Holzbauweise) eingegangen werden. Auf Basis der baustellenspezifischen Ergebnisse sollen dann durch eine Analyse der Ergebnisse der Treibhausgasemissionen dieser Baustelle die (haupt-) verursachenden Aufwendungen identifiziert und Stellschrauben zur Reduzierung der Emissionen für die betrachtete Baustelle aufgezeigt werden. Daraus sollen dann generelle, auf andere Bauvorhaben übertragbare erste Handlungsempfehlungen für eine Emissionsreduktion abgeleitet werden. Dadurch soll es ausführenden Unternehmen und Auftraggebern ermöglicht werden die Treibhausgasemissionen in der Lieferkette von Gebäuden erfassen und reduzieren zu können. Auch sollen somit erste grundlegende Entscheidungen bereits im Vergabe- und Planungsprozess getroffen werden können, die möglichst geringe Treibhausgasemissionen der Baustelle mit sich bringen. Des Weiteren soll auf Basis der Durchführung der Ökobilanz zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen der realen Baustelle ein Teil der Grundlage dafür geschaffen werden, dass die bis jetzt in Ökobilanzen kaum berücksichtigte Errichtungsphase zukünftig fester Bestandteil bei der Durchführung von Gebäudeökobilanzen wird. Durch die Ergebnisse und deren Kommunikation nach außen sollen ein Stück weit dazu beitragen, dem Ziel der Treibhausgasneutralität im Gebäudesektor einen Schritt näherzukommen.

2. Methodisches Vorgehen

Das Vorgehen zur Ermittlung der Umweltwirkungen der Errichtungsphase einer Baustelle für Wohngebäude in zwei unterschiedlichen typischen Bauweisen (Holzbau und Massivbau) wird anhand der Methodik der Ökobilanzierung durchgeführt. Diese beinhaltet die folgenden vier Phasen, die in einem iterativen Prozess zu durchlaufen sind: Ziel und Untersuchungsrahmen, Sachbilanz (Life Cycle Inventory – LCI), Wirkungsabschätzung (Life Cycle Inventory Analysis – LCIA) und Auswertung und Interpretation [15].

Zur Ermittlung der Umweltwirkungen der Baustelle ist es notwendig diese Phasen als methodische Grundlage heranzuziehen. Genauer enthalten diese die Grundlagenermittlung, die Datenaufnahme, die Sachbilanz und das Ermitteln der Treibhausgasemissionen bis hin zur Ergebnisauswertung und deren Interpretation. Ein kontinuierliches Einarbeiten gewonnener Erkenntnisse sowie der Umgang mit Datenlücken machen es hierbei immer wieder notwendig das methodische Vorgehen iterativ anzupassen (Abbildung 2-1).



Abbildung 2-1 Iteratives Vorgehen im Forschungsprojekt zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen der Baustelle, basiert auf [15, 16]

Zunächst müssen die **Grundlagen** ermittelt und die Vorgehensweise festgelegt werden, um das Ziel zu erreichen die Treibhausgasemissionen der Errichtungsphase der Wohnbauten unterschiedlicher Bauweisen zu bestimmen. Durch ein iteratives Anpassen der Grundlagen können dann Wege zur Reduzierung der Emissionen aufgezeigt werden, die auch auf andere Baustellen von Wohngebäuden dieser Bauweisen übertragen werden können. Für die Grundlagenermittlung muss zunächst eine Auseinandersetzung mit dem Untersuchungsgegenstand erfolgen. Dabei wird sowohl ein Überblick über den Bauablauf sowie die vorhandene Baustelleneinrichtung gegeben, um darauf aufbauend Ziel und Untersuchungsrahmen genauer zu definieren und das Vorgehen bei der Datenerhebung vorzubereiten.

Die Vorbereitung der **Datenerfassung** wird basierend auf dem festgelegten Ziel und Untersuchungsrahmen durchgeführt. Es werden für die Ökobilanz notwendige Aufwandswerte definiert, die aus zuvor identifizierten Baustellenaktivitäten resultieren. Um diese Aufwandswerte dann für die Sachbilanz erfassen zu können, müssen die Möglichkeiten zur Datenerhebung untersucht und geeignete Methoden ausgewählt werden. Zu diesen Methoden kann zum Beispiel das Anfordern und Auswerten von Baustellentagebüchern, Plänen und Leistungsverzeichnissen gehören oder das Installieren und Auswerten von Stromzählern. Zur Datenerfassung müssen die ausgewählten Methoden dann angewandt und gegebenenfalls angepasst werden. Anschließend findet die **Datenauswertung** statt, indem die ermittelten Daten den zuvor definierten Aufwandswerten zugeordnet werden. Hier ist ein iteratives Vorgehen innerhalb und zwischen der Definition des Ziels und des Untersuchungsrahmens, sowie der Datenerfassung und -ermittlung gegebenenfalls mehrmals notwendig, um letzten Endes Aufwandswerte für die definierten Baustellenaktivitäten zu erhalten.

Die Ermittlung der **Umweltdaten** erfolgt dann, indem Sachbilanzdaten mit dazugehörigen Umweltwirkungsdaten aus geeigneten Datensätzen verknüpft werden. Die Ermittlung und Berechnung der Sachbilanzdaten und die Methodik zur Berechnung der Treibhausgasemissionen basieren auf den in [30] durchgeführten Untersuchungen. Im Anschluss an die Wirkungsabschätzung erfolgen die **Auswertung und Interpretation** der Ergebnisse. Hier werden die Emissionsquellen den Baustellenaktivitäten zugeordnet, Reduktionsmöglichkeiten auf Basis der Identifikation emissionsrelevanter Aktivitäten aufgezeigt, sowie Handlungsempfehlungen für die zukünftige Treibhausgasemissionen von Baustellenprozessen und -logistik gegeben.

Haus D weist die vergleichsweise kleinste Bruttogeschossfläche von 1.616m² auf (Bruttorauminhalt 4.912m³). Hier sind das gesamte Kellergeschoss, die tragenden Innenwände sowie die Decken und das Dach in Stahlbetonbauweise ausgeführt. Die Außenwände sind gemauert. Nichttragende Innenwände sind in Trockenbauweise errichtet.

Die in Energieeffizienzstandard EH40 erbauten Gebäude B und C sind jeweils dreigeschossig (Abbildung 3-3). Diese beiden Gebäude sind baugleich und besitzen dieselbe Bruttogeschossfläche von 1.769m² (Bruttorauminhalt: 5.435m³).

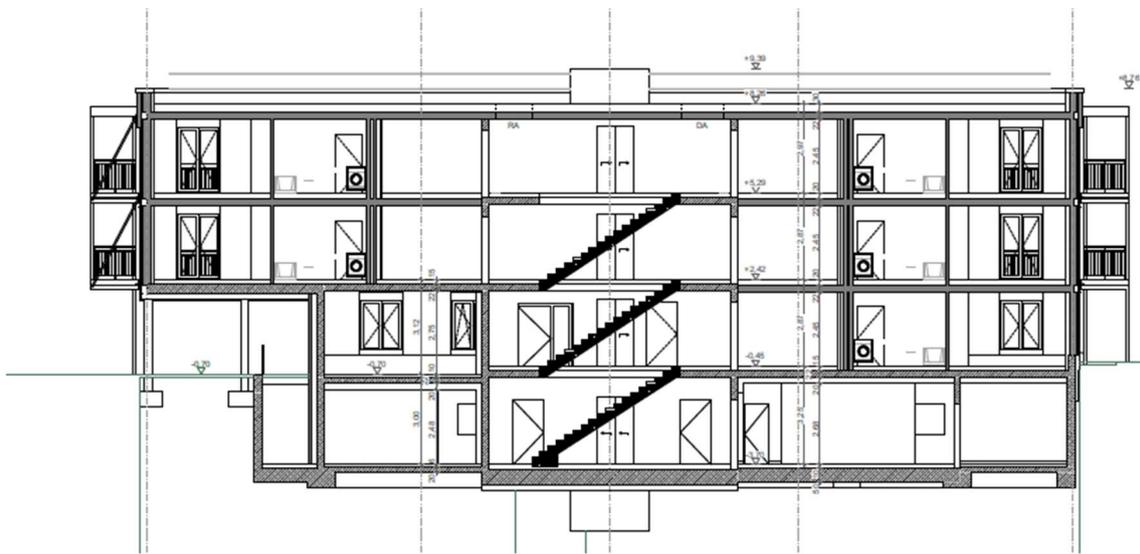


Abbildung 3-3 Gebäudelängsschnitt von Haus B - beispielhaft für die Holzbauweise

Hier sind das Kellergeschoss und ein Teil des Erdgeschosses in Stahlbetonbauweise ausgeführt. Der andere Teil des Erdgeschosses, sowie das erste und zweite Obergeschoss sind in Holzbauweise konstruiert, wobei die Außenwände als tragender Holzständerbau und die Innenwände und Decken in Brettsperrholzbauweise ausgeführt sind. Die tragenden Innenwände aus Brettsperrholz bestehen, in Abhängigkeit ihrer Funktion, entweder aus einschaligen Elementen oder aus zweischaligen Elementen, die einen Kern aus Mineralfaserdämmung besitzen. Auch beim Holzbau sind die nichttragenden Innenwände Trockenbauwände. Der Treppenhauskern wurde über alle Stockwerke hinweg in Stahlbetonbauweise ausgeführt.

3.1.2. Bauablauf

Das Bauvorhaben startete im Herbst 2021 und wird voraussichtlich im Sommer 2024 vollständig abgeschlossen sein. Das Forschungsprojekt startete einige Monate nach Baubeginn am 08.02.2022 und wurde am 31.03.2024 offiziell beendet. Der Endbericht wurde dann Mitte Juli 2024 eingereicht.

Mit dem Ausheben der Baugrube wurde Anfang November 2021 begonnen. Die Baugrube wurde kurz vor Weihnachten übergeben. Ab Anfang Januar 2022 begann die Rohbaufirma mit der Baustelleneinrichtung und dann auch mit den Stahlbetonarbeiten vor Ort. Ab Mitte Mai wurden die ersten Mauerwerksaußenwände (Haus A) errichtet. Die Rohbauarbeiten für die beiden Massivgebäude (Haus A und Haus D) wurden im November 2022 beendet. Mitte September 2022 wurde dann mit den Holzbauarbeiten begonnen. Diese waren im Januar 2023 nahezu beendet.

4. Ziel und Untersuchungsrahmen

4.1. Ziel

Ziel der in diesem Forschungsprojekt durchgeführten Ökobilanz ist es die Treibhausgasemissionen der Errichtungsphase des Rohbaus des in Kapitel 3 beschriebenen Bauvorhabens zu ermitteln. Dabei werden zwei Wohngebäude in Massivbauweise und zwei Gebäude in Holzbauweise betrachtet. Die Ökobilanz muss alle relevanten Transporte vom Werk zur Baustelle und die Baustellenaktivitäten an sich beinhalten. Basierend auf den Ergebnissen sollen dann bauweisenspezifische verursachende Aktivitäten identifiziert werden. Die für die Analyse ermittelten Daten müssen so aufbereitet sein, dass die treibhausgasverursachenden Stellschrauben identifiziert werden können und erste Empfehlungen für zukünftige Bauvorhaben für Wohnbauten gegeben werden können.

4.2. Funktionelle Einheit

Als Funktionelle Einheit wird 1m^2 Nettoraumfläche pro Jahr (m^2a) gewählt. Die Nettoraumfläche umfasst die Verkehrs-, die Nutzungs- und die Technikflächen, nicht aber die Konstruktionsgrundflächen [2]. Für die Ökobilanz wird davon ausgegangen, dass die Wohngebäude alle dieselbe Lebensdauer von 50 Jahren (50a) haben.

4.3. Produktsystem, funktionales Äquivalent und Systemgrenzen

Betrachtet werden die zu den in Abbildung 4-1 abgebildeten Bauteilen und Baustoffen zugehörigen Prozesse zur Errichtung des Rohbaus des jeweiligen Gebäudes in unterschiedlicher Bauweise. Auch die Baustelleneinrichtung, wie die Baucontainer, die Bauheizung und die Begleitheizung für das Bauwasser, wird berücksichtigt und ist in untenstehender Abbildung dargestellt.

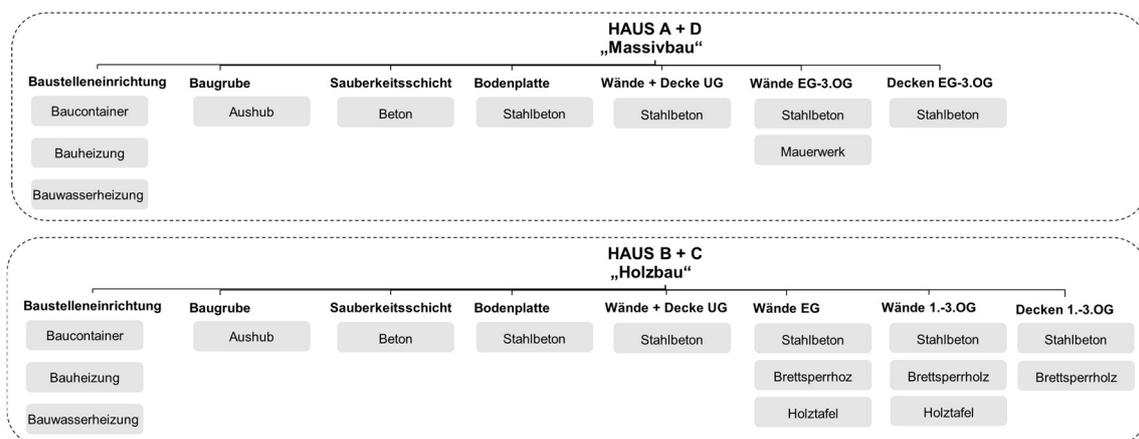


Abbildung 4-1 Untersuchtes Produktsystem für die Ökobilanz der Rohbauarbeiten der Baustelle

Für die Hebearbeiten auf der Baustelle kamen drei Kräne zum Einsatz. Zwei der beiden Kräne waren hauptsächlich für die Stahlbeton- und Mauerarbeiten vorgesehen, ein Kran hauptsächlich für die Holzbauarbeiten. Neben der Baustelleneinrichtung beinhalten die in diesem Projekt berücksichtigten Errichtungsprozesse der vier betrachteten Häuser das Ausheben der Baugrube und das Herstellen der Sauberkeitsschicht. Auch das Herstellen der Bodenplatte, der tragenden Innen- und Außenwände sowie der Decken und des Dachs sind Bestandteil der Betrachtung. Für diese Prozesse sind sowohl die Transporte der zugehörigen Geräte und Baustoffe von und zum Einbauort als auch alle energetischen und stofflichen In- und Outputs inklusive der Entsorgung und Verwertung des Abfalls berücksichtigt.

Die zeitliche **Systemgrenze** bezieht sich auf die in der Errichtungsphase enthaltenen Module A4 (Transport) und A5 (Errichtung/Einbau). Die Holztafelelemente wurden in der Holzbaufirma teilweise vorgefertigt. Hier wurde das Konstruktionsvollholz zu einer Ständerkonstruktion gefügt und anschließend wurde diese Konstruktion einseitig mit OSB-Platten beplankt. Diese Elemente wurden dann in Folie verpackt und zur Baustelle transportiert. Um die Vergleichbarkeit zwischen der Holzbau- und der Massivbauweise zu gewährleisten, werden auch alle der Vorfertigung der Holztafelwände zuzuordnenden Prozesse berücksichtigt.

Für den ökobilanziellen Vergleich der Errichtungsprozesse **funktional äquivalenter** Gebäude wird angenommen, dass die Massivgebäude, analog zu den Holzgebäuden, dreigeschossig sind und ein Kellergeschoss besitzen. Um die Vergleichbarkeit zwischen den Gebäuden mit verschiedenen Energieeffizienzstandards gewährleisten zu können, wurden außerdem die in Energieeffizienzstandard EH70 geplanten und errichteten Gebäude A und D (Massivbau) für die Berechnung an den Energieeffizienzstandard EH40 der Gebäude B und C (Holzbauweise) angepasst. Es werden ausschließlich die Rohbauarbeiten inklusive des Herstellens der Baugrube betrachtet. Um funktionale Äquivalenz zu gewährleisten, wird jedoch bei der Außenwandkonstruktion anders vorgegangen. Für die Massivgebäude kamen Hochlochziegel mit integrierter Dämmung zum Einsatz, die dann beidseitig verputzt wurden. Um eine Vergleichbarkeit mit den Gebäuden mit Holztafelaußenwänden gewährleisten zu können, wird für die Holztafelwände die Konstruktion, inklusive Dämmung bis hin zur Schalung auf der Außenseite und den Trockenbauplatten (innere Beplankung) berücksichtigt.

Analog zur Schalung wird vereinfachend auch für das Gerüst davon ausgegangen, dass die Einsatzhäufigkeit des Gerüsts dazu führt, dass das Gerüst als Hilfsmittel unter das Abschneidekriterium fällt und folglich vernachlässigt werden kann. Dies wurde auf Basis der in der Umweltproduktdeklaration für Beton gemachten Bemerkung zur Nichtberücksichtigung der Schalung aufgrund deren Einsatzhäufigkeit so festgelegt [18]. Die Treibhausgasemissionen resultierend aus dem Wasserverbrauch liegen in dieser Studie außerhalb der Systemgrenzen und wurden nicht berücksichtigt.

4.4. Datenermittlung für die Sachbilanz

Durch die **Datenaufnahme und Dokumentation vor Ort**, konnte eine gute Datengrundlage geschaffen werden, um die notwendigen Sachbilanzdaten für die Ökobilanz der Rohbauaktivitäten der untersuchten Baustelle zu ermitteln. Auch die relevanten Prozessdaten der Herstellung der Holztafelelemente im Holzbauunternehmen wurden durch eine Besichtigung während der Produktion der Wandelemente aufgenommen. Das Lebenszyklusinventar zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen der Errichtungsphase der betrachteten Gebäude umfasste zu den relevanten Prozessen zugehörige Dauern, Energie- und Stoffflüsse.

Für die Abrechnung des Stromverbrauchs der Baustelle wurden **15-minütig gemittelte Wirkleistungsdaten** der gesamten Baustelle ermittelt. Diese Daten konnten für die Auswertung des Stromverbrauchs hinzugezogen werden. Vor Ort wurden analoge **Stromzähler** installiert. Die Stromzähler wurden an unterschiedlichen Zeitpunkten angebracht und demontiert. Das Auslesen der Stromzähler erfolgte in Abhängigkeit der ablaufenden Tätigkeiten in unterschiedlichen Zeitabständen.

Anzumerken ist an dieser Stelle, dass zunächst digitale Stromzähler an den Kränen und mindestens an jedem Verteilerkasten hätten installiert werden sollen, um die Verbrauchsdaten an bestimmten Zeitpunkten automatisiert auslesen zu können. Auch ein Abgleich mit den, mit

Hilfe der Kameras festgehaltenen Prozessen hätte so stattfinden sollen. Aufgrund fehlender technischer Voraussetzungen beteiligter Firmen, erfolgte die Aufnahme der Stromdaten dann mittels analoger Zähler.

Um die Aktivitäten auf der Baustelle und die erhobenen Energie- und Stoffflüsse möglichst genau identifizieren und zuordnen zu können, wurden **zwei Videokameras** auf der Baustelle installiert. Diese wurden so positioniert, dass möglichst das gesamte Baufeld aufgenommen werden konnte. Der Blick von Kamera 1 und Kamera 2 auf die Baustelle wird in Abbildung 4-2 beispielhaft gezeigt.

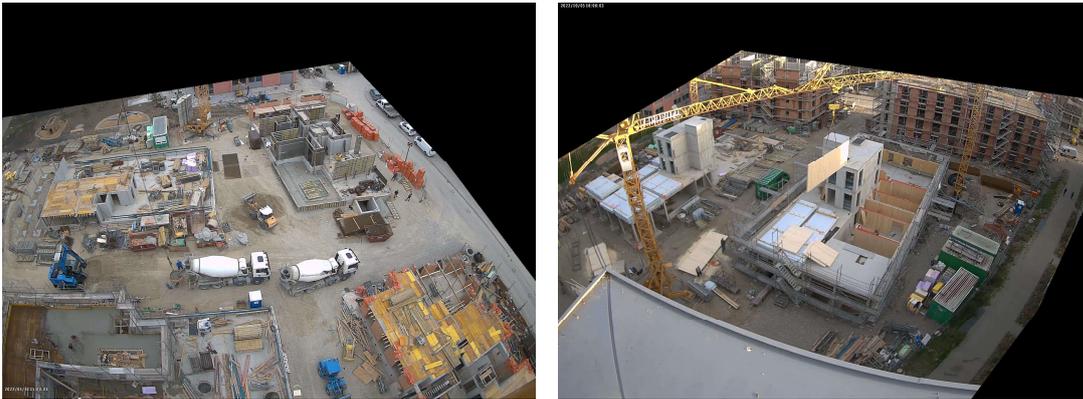


Abbildung 4-2 Blick von Kamera 1 (Bild links) und Kamera 2 (Bild rechts) auf die Baustelle

Zusätzlich zu den Videoaufnahmen standen anhand des Onlinezugangs zu den Kameradaten auch Berichte, Prozessdaten und ein Terminplan mit Soll-Ist-Vergleich zur Verfügung. Hilfreich waren auch täglich bereitgestellte *Heatmaps* und Laufwege, die die Nachvollziehbarkeit der abgelaufenen Aktivitäten positiv unterstützten (Abbildung 4-3).

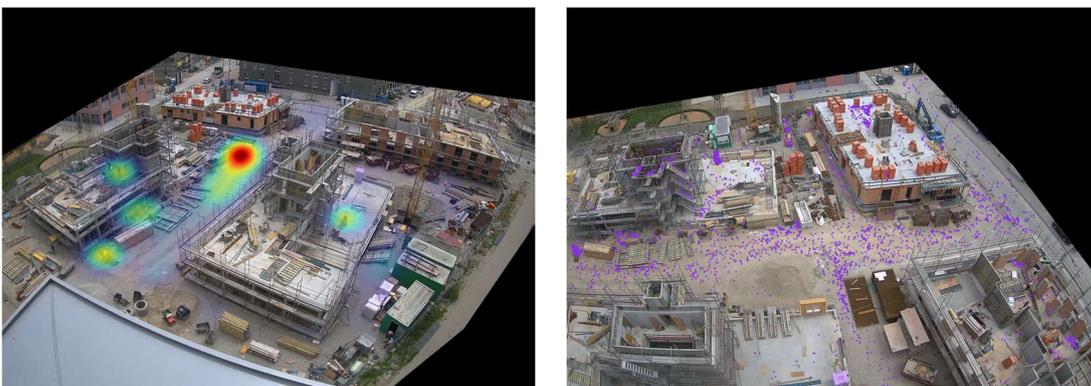


Abbildung 4-3 Mittels Software der Kamerafirma dargestellte tägliche Heatmap (Bild links) und Laufwege (Bild rechts) für die bessere Nachvollziehbarkeit der stattgefundenen Tätigkeiten

Um die Sachbilanzdaten für die **Transportprozesse** ermitteln zu können, wurden, neben den beteiligten Bauunternehmen, die zuliefernden Firmen und herstellenden Unternehmen kontaktiert. Auch die Videoaufnahmen der beiden Baustellenkameras wurden verwendet, um die Sachbilanzdaten für die Transporte zu vervollständigen.

Nicht direkt auf der Baustelle ermittelbare oder fehlende Daten für die Ökobilanz der Errichtungsphase wurden durch unterschiedliche Herangehensweisen ermittelt. Neben der Auswertung von Unterlagen, die von den bei der Planung beteiligten Unternehmen unterschiedlicher Disziplinen wie Architektur und Statik zur Verfügung gestellt wurden, waren dies zum Beispiel auch Unterlagen beteiligter Bauunternehmen. Hierzu zählten beispielsweise

Produktdatenblätter, Plan- und Ausführungsunterlagen. Durch den Datenaustausch (Bautagebücher, Rechnungen, Lieferscheine, etc.) und Interviews mit der Bauleitung und Projektsteuerung der untersuchten Baustelle und weiterer am Bau beteiligter Personen konnten baustellenspezifische Daten und Erfahrungswerte gesammelt werden. Erfahrungswerte von Expertinnen und Experten konnten darüber hinaus durch die Unterstützung der beteiligten Verbände und zugehörigen Unternehmen bereitgestellt werden. Waren keine Daten vorhanden, wurden auch Literaturquellen für die Datenermittlung herangezogen. Beispielsweise wurde zur Ermittlung der Verwertungswege der Abfälle auf Literaturquellen [29, 30] zurückgegriffen.

Wie bereits erwähnt sind die Erhebung und Berechnung der Daten für die Sachbilanz und die Vorgehensweise zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen auf die in [31] beschriebenen Untersuchungen zurückzuführen. Zur besseren Nachvollziehbarkeit und für die Verwendung von Forschungsdaten über das Projektende hinaus wurde ein Data Managementplan erstellt. Dieser ist in Anhang 2 zu finden und beinhaltet Hinweise zu den erhobenen Daten für die Sachbilanz sowie zu den für die Wirkungsabschätzung verwendeten Datensätzen.

4.5. Datenquellen für die Wirkungsabschätzung und Wirkungsindikatoren

Die Datensätze der *LCA for Experts* Software und Datenbank (*Sphera Solutions Inc.*) wurden für die Ermittlung der Umweltwirkungsdaten verwendet. Standen keine exakt passenden Datensätze zur Verfügung, wurden alternative Datensätze möglichst äquivalenter Produkte beziehungsweise Prozesse ausgewählt. Die verwendeten Datensätze sind in Anhang 1 zu finden.

Im Vordergrund dieses Forschungsprojekts stand die Dekarbonisierung von Baustellenprozessen und -logistik. Folglich geht es primär darum die äquivalenten Kohlenstoffdioxidemissionen der Errichtungsphase der betrachteten Baustelle zu ermitteln. Deshalb wird das Globale Erwärmungspotential (*GWP*) betrachtet. Nach DIN EN 15804+A2 [1] wird das gesamte Treibhauspotential (*GWP-gesamt*) unterteilt in fossiles Treibhauspotential (*GWP-fossil*), Biogenes Treibhauspotential (*GWP-biogen*) und Treibhauspotential aufgrund von Landnutzung und Landnutzungsänderung (*GWP-luluc*). Aufgrund des Ziels dieses Projektes, wird im Folgenden nur das gesamte Globale Erwärmungspotential (hier bezeichnet als *GWP*) ermittelt.

5. Sachbilanz

5.1. Nettoraumflächen der Gebäude und Materialmengen

Unter Vernachlässigung des vierten Obergeschosses von Haus A und Haus D ergeben sich die folgenden **Nettoraumflächen** für die vier Gebäude:

- Haus A: 1.531m²
- Haus B: 1.338m²
- Haus C: 1.338m²
- Haus D: 1.078m²

Die Nettoraumfläche von Haus A ist am größten, die Nettoraumfläche von Haus D am kleinsten. Die baugleichen Holzgebäude, Haus B und Haus C, besitzen dieselbe Nettoraumfläche.

Um den Anteil der Bauweisen am jeweiligen Gebäude nachvollziehen zu können, zeigt Abbildung 5-1 den prozentualen volumenmäßigen Anteil der einzelnen Bauweisen je Haus.

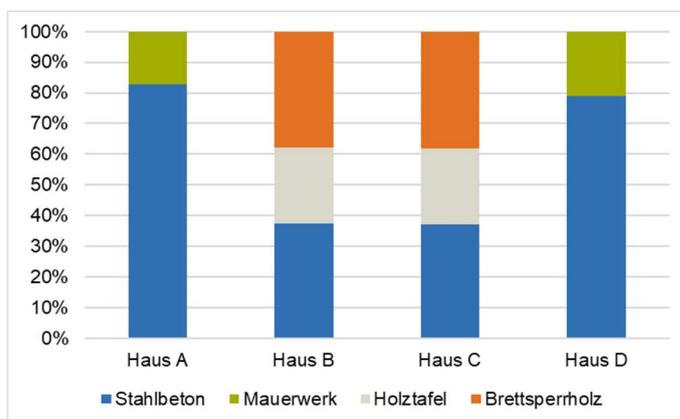


Abbildung 5-1 Volumenanteil [%] Bauweise der errichteten Häuser

Bei Haus A und D wird deutlich, dass das Volumen der Mauerwerksaußenwände im Vergleich zu den Stahlbetonbauteilen recht gering ist. Zu erkennen ist außerdem, dass die Stahlbetonbauteile (Kellergeschoss, Teilbereich des Erdgeschosses, Treppenhauskern) in den beiden Holzgebäuden in Summe knapp 40% des gesamten Volumens ausmachen. Der Volumenanteil der Brettsperrholzelemente ist mit etwa 36% größer als der Anteil der Holztafelelemente (24%).

5.2. Allgemeine Transport- und Baustellenprozesse

5.2.1. Transportprozesse

Für die Sachbilanz der Transportprozesse wurden die Anzahl der Transporte sowie die Distanzen und die zugehörigen Transportmittel vom Produktionsstandort des jeweiligen Materials bis zur Baustelle ermittelt. Auch die Transporte zur Holzbaufirma, in der die Holztafelwände teilweise vorgefertigt wurden, sind hier berücksichtigt. Abbildung 5-2 zeigt die Anzahl an Transporten zur Baustelle je Bauweise bezogen auf die Nettoraumfläche des jeweiligen Gebäudes.

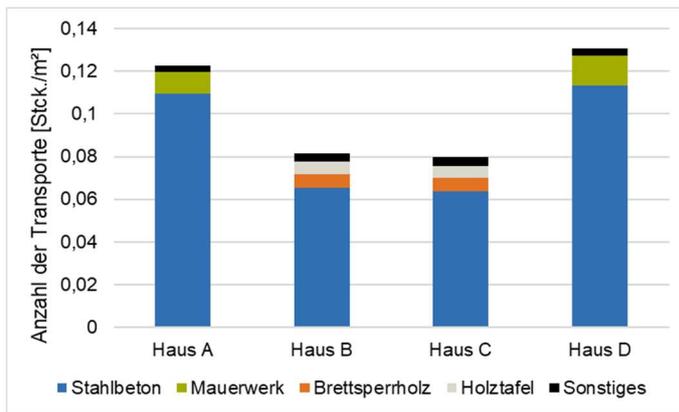


Abbildung 5-2 Anzahl der Transporte (nur Hinfahrt) je Bauweise je m² Nettoraumfläche

Zu erkennen ist, dass die Anzahl der Transporte für das Errichten der Stahlbetonbauteile der Anzahl der Transporte für das Herstellen der anderen Bauteile deutlich überwiegt. Auch für die beiden Holzgebäude machen die Transporte für die Stahlbetonbauteile einen sehr großen Anteil aus. Grund für die hohe Zahl an Transporten für die Stahlbetonarbeiten sind die Transporte des Betons mit Betonmischern auf die Baustelle.

Die für die jeweiligen Häuser zurückgelegten Distanzen der Transporte zur Baustelle je m² Nettoraumfläche sind in Abbildung 5-3 zusammengefasst.

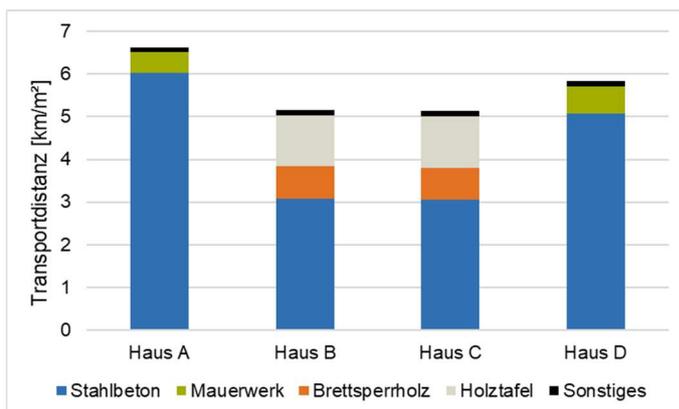


Abbildung 5-3 Distanzen der Transporte zur Baustelle je Bauweise je m² Nettoraumfläche

Die insgesamt zurückgelegten Transportdistanzen sind insbesondere auf die, zwar distanzmäßig kurzen, aber anzahlmäßig vielen Betontransporte sowie auf die teilweise aus europäischen Nachbarländern importierten Bewehrungsstahl zurückzuführen. Den größten Einfluss auf die Summe der für das Errichten der Holztafelelemente zurückgelegten Transportdistanzen haben die Transporte der teilvorgefertigten Holztafelelemente von der Holzbaufirma zur Baustelle (ca. 60%) und die Transporte der Holzfaserdämmplatten, der Gipskartonplatten und der Einblasdämmung (ca. 30%). Die Transportdistanzen für die Errichtung der Brettsperrholzelemente sind nahezu ausschließlich (ca.95%) auf den Transport der Brettsperrholzelemente zum Einbauort zurückzuführen. Für die Mauerwerksaußenwände der Häuser A und D machen die Transportdistanzen für die Mauersteine und den Mauer Mörtel fast 50% der Transportkilometer je m² Nettoraumfläche aus, die anderen 50% resultieren fast ausschließlich aus dem Abtransport der Baustellenabfälle.

Durch das Einbeziehen der Distanzen und die Anzahl an Fahrten je Haus, ergeben sich für den Beton, die Bewehrung, die Mauersteine, die Holztafelelemente und die Brettsperreholzelemente durchschnittlich zurückgelegte einfache Fahrdistanzen je Haus je m² Nettoraumfläche von:

- Beton: ca. 0,1km/m² (Distanz: 16km, Anzahl für alle Häuser: ca. 327Stck.),
- Bewehrung: ca. 1,8km/m² (Einfache Fahrt: 625km, Anzahl für alle Häuser: ca. 16Stck.),
- Mauersteine: ca. 0,05km/m² (Einfache Fahrt: 70km, Anzahl für alle Häuser: ca. 4Stck.),
- Holztafelelemente (teilvorgefertigt): 0,3km/m² (Einfache Fahrt: 185km, Anzahl für alle Häuser: ca. 9Stck.),
- Brettsperreholzelemente: 0,3km/m² (Einfache Fahrt: 100km, Anzahl für alle Häuser: ca. 17Stck.)

5.2.2. Aushub der Baugrube

Abbildung 5-4 zeigt die fertig ausgehobenen Baugruben für die vier Baukörper:



Abbildung 5-4 Fertig ausgehobene Baugruben auf der Baustelle (Blick von Kamera 1)

Neben dem Aushub der Baugruben für das jeweilige Gebäude, wurde der Transport des Aushubs mittels LKW zu einem 750m entfernten Zwischenlager berücksichtigt. Zum Abdecken der Böschung wurde PE-Folie (0,047 [m²/m²-NRF]) eingesetzt. Das Aushubvolumen je Gebäude betrug durchschnittlich 0,50m³ je m² Nettoraumfläche.

5.2.3. Stromverbrauch der Baustelle

Auch zu Zeiten, an denen keine Aktivitäten auf der Baustelle stattfinden, wurde Strom verbraucht. Diese Stromverbräuche werden hier als *indirekte* Stromverbräuche bezeichnet. Wie bereits in [26, 32] untersucht, ist davon auszugehen, dass diese Verbräuche hauptsächlich auf die Stromverbräuche der auf der Baustelle installierten Baucontainer zurückzuführen sind. Aufgrund des fließenden Übergangs zwischen den Rohbau- und Ausbauarbeiten der vier Gebäude auf der Baustelle ist keine eindeutige Zuteilung des Stromverbrauches möglich. Deshalb wird überschlägig angenommen, dass die Rohbauarbeiten innerhalb eines Jahres stattfanden. Daraus ergibt sich ein Stromverbrauch von 16kWh je m² Nettoraumfläche für jedes Gebäude [31]. Dieser Verbrauch wird hier als *indirekter* Stromverbrauch bezeichnet. Die *direkten Stromverbräuche* sind diejenigen Verbräuche, die direkt einzelnen Errichtungsprozessen zugewiesen werden können und sind für die Rohbauarbeiten in den Kapiteln 5.4, 5.5, 5.6 und 5.7 angegeben.

5.2.4. Abfallmengen

Für die Stahlbeton- und Mauerarbeiten sind die in Abbildung 5-5 dargestellten Abfallmengen in Tonnen je Haus und m² Nettoraumfläche angefallen.

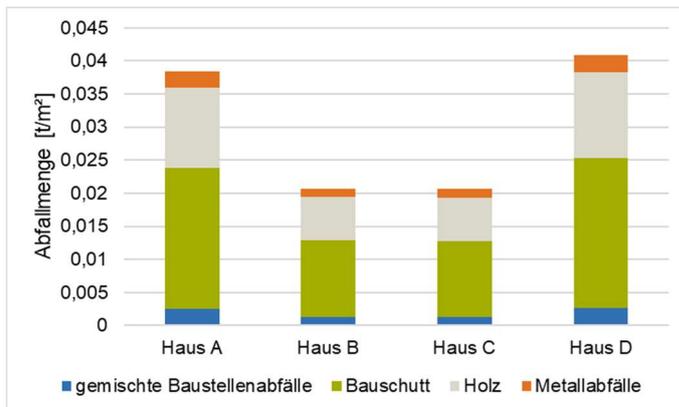


Abbildung 5-5 Abfallmengen je Abfallkategorie je m² Nettoraumfläche der vier betrachteten Gebäude

Das Abfallaufkommen der Rohbauarbeiten für die Stahlbeton- und Mauerarbeiten gliedert sich in gemischte Bauabfälle, Bauschutt, Holz- und Metallabfälle. Es ist zu erkennen, dass der Bauschutt und die Bauholzabfälle den massenmäßig größten Anteil am Abfallaufkommen besitzen. Die Abfallmasse aus Metall- und gemischten Bauabfällen ist verhältnismäßig gering.

Für die Abfälle der werk- und baustellenseitigen Errichtung der Holztafelelemente ergeben sich die Verwertungswege in Abbildung 5-6.

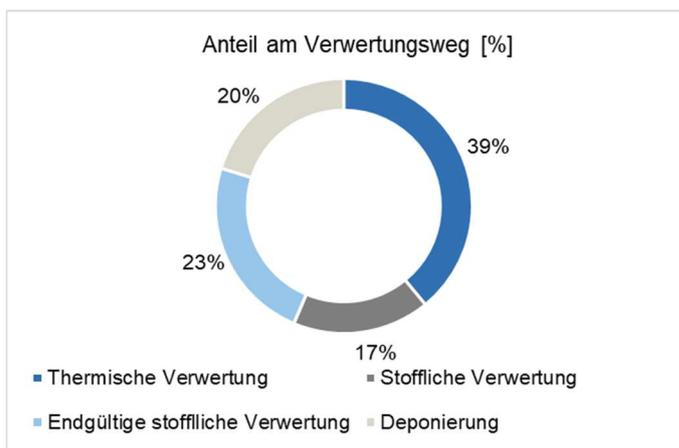


Abbildung 5-6 Prozentualer Anteil der Abfälle der vier betrachteten Gebäude des Holztafelelemente an jeweiligen Verwertungsweg

Der für die Herstellung der Brettsperrholzelemente im Werk anfallende Abfall liegt außerhalb der Systemgrenze und wird folglich hier nicht berücksichtigt. Aufgrund des werkseitig stattfindenden Abbaus wird davon ausgegangen, dass auf der Baustelle, mit Ausnahme der Verpackung und der Abfälle der Mineralfaserdämmung, kein weiterer Abfall für das Errichten der Brettsperrholzbauteile anfällt. Die Menge an Folie und Folienabfall für den Transport der Brettsperrholzbauteile zur Baustelle wurde überschlägig zu 1,84m² Folie je m² Nettoraumfläche für Haus B beziehungsweise Haus C angenommen. Die Abfälle für die Dämmung der zweischaligen Brettsperrholzinneiwände betragen 0,00023t je m² Nettoraumfläche. Insgesamt sind für jeweils ein Holzgebäude (Haus B bzw. Haus C) je m² Nettoraumfläche etwa 0,003 Tonnen Gipsabfälle angefallen.

5.3. Hilfsmittel

5.3.1. Bauheizung

Die je Haus für die Bauheizung benötigte Heizölmenge ist Abbildung 5-7 zu entnehmen.

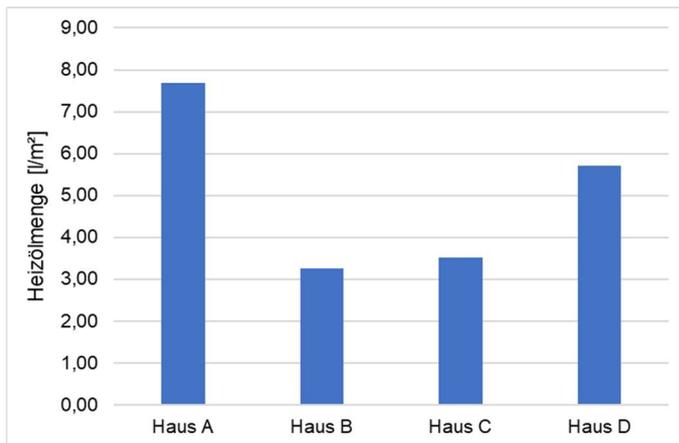


Abbildung 5-7 Menge des verbrauchten Heizöls für die Bauheizungen je Gebäude je m² Nettoraumfläche

Zu erkennen ist, dass für die beiden Massivgebäude deutlich mehr Heizöl je m² Nettoraumfläche verbraucht wurde als für die Holzgebäude. Für Haus B wurde je m² Nettoraumfläche die geringste Heizölmenge verbraucht. Haus A benötigte das meiste Heizöl je m²-NRF und in etwa die doppelte Heizölmenge von Haus B. Das ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass Haus A ein deutlich größeres Bauteilvolumen als die anderen Gebäude aufweist und deshalb zwei Bauheizungen für Haus A installiert wurden.

5.3.2. Begleitheizung Bauwasser

Um das Bauwasser vor Frost zu schützen, wurde eine Begleitheizung installiert. Der aus den Untersuchungen ermittelte Stromverbrauch je Nettoraumfläche je Haus ist in Abbildung 5-8 dargestellt.

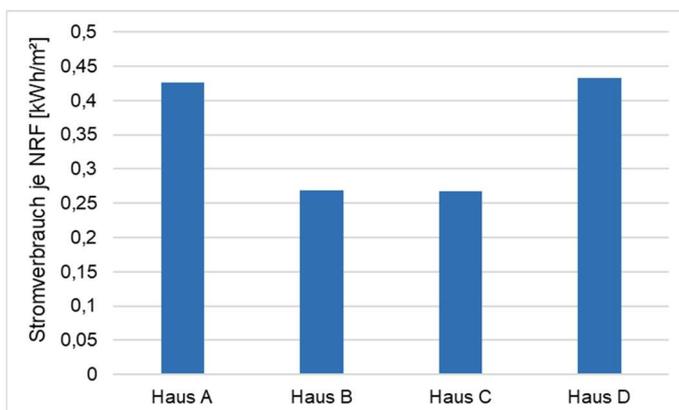


Abbildung 5-8 Stromverbrauch der Begleitheizung für das Bauwasser je Gebäude je m² Nettoraumfläche

Vereinfachend wurde angenommen, dass ausschließlich für die Massivbauarbeiten Wasser verbraucht wurde (Mauermörtel anmischen, Reinigungsarbeiten nach dem Betoniervorgang). Folglich ist der Stromverbrauch für die beiden Massivgebäude aus Mauerwerk und Stahlbeton höher als der Stromverbrauch für die Holzgebäude.

5.3.3. Bauholz

Die Menge an Bauholz wurde anteilig nach Bauteilflächen den Bauteilen Bodenplatte, Wände und Decke aus Stahlbeton bzw. Mauerwerk zugeteilt (Abbildung 5-9).

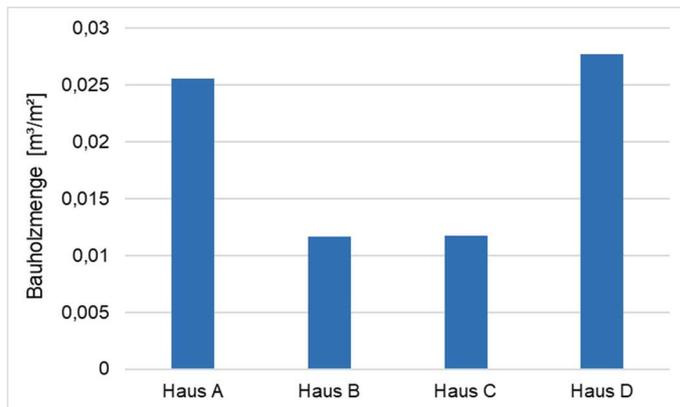


Abbildung 5-9 Bauholzmenge je Gebäude je m² Nettoraumfläche

Aufgrund des geringeren Anteils an Stahlbetonbauteilen in den Häusern B und C ist auch die Bauholzmenge je m² Nettoraumfläche für diese beiden Häuser geringer als diejenige für die Häuser A und D. Durch die unterschiedliche Grundrissform und Größe der beiden Massivgebäude, wurde für Haus D eine etwas größere Menge an Bauholz je m² Nettoraumfläche verbraucht als für Haus A.

5.4. Stahlbetonbauteile

Neben den bereits in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Sachbilanzdaten wie beispielsweise zum Bauholz, den Abfallmengen der Stahlbeton- und Mauerarbeiten, sind die in Tabelle 5-1 dargestellten Sachbilanzdaten relevant, um daraus das Globale Erwärmungspotential der Errichtungsprozesse der Bodenplatten der vier Häuser zu ermitteln.

Tabelle 5-1 Aufwendungen für die Baustellenaktivitäten zur Errichtung der Stahlbetonbauteile je Haus je m² Nettoraumfläche

Bezeichnung	Menge	Einheit
Haus A		
Strom	0,74	[kWh/m²]
Gepumpte Betonmenge	0,32	[m³/m²]
Betonmenge Kran und Kübel	0,15	[m³/m²]
Folie gegen Austrocknen	0,26	[m²/m²]
Flügelglätten	0,01	[l/m²]
Schalöl	0,27	[l/m²]
Haus D		
Strom	0,75	[kWh/m²]
Gepumpte Betonmenge	0,34	[m³/m²]
Betonmenge Kran und Kübel	0,14	[m³/m²]
Folie gegen Austrocknen	0,28	[m²/m²]
Flügelglätten	0,01	[l/m²]
Schalöl	0,27	[l/m²]
Haus B bzw. C		
Strom	0,50	[kWh/m²]
Gepumpte Betonmenge	0,20	[m³/m²]
Betonmenge Kran und Kübel	0,43	[m³/m²]
Folie gegen Austrocknen	0,00	[m²/m²]
Flügelglätten	0,01	[l/m²]
Schalöl	0,16	[l/m²]

Zum Einbringen des Betons in die Schalung der Wände kam der Kran in Kombination mit Betonkübeln zum Einsatz. Zum Einbringen des Betons in Bodenplatten und Decken wurden hauptsächlich Betonpumpen verwendet. Der Stromverbrauch setzt sich aus den Kranarbeiten, dem Einsatz des Rüttlers und dem Verbrauch sonstiger elektrisch betriebener Kleingeräte zusammen. Für die Flügelglätter, die die Betonoberfläche der Stahlbetonbodenplatten glätten, wird Kraftstoff benötigt. Die Decke über dem zweiten Obergeschoss von Haus A und die Decke über dem ersten Obergeschoss von Haus D wurde mittels einer Folie nach dem Betonieren zum Schutz gegen zu schnelles Austrocknen abgedeckt. Dies ist ebenfalls in den Aufwandswerten enthalten.

Der Einsatz der Schalung an sich (Modul A1-3) wird, mit Ausnahme des Schalöls, vernachlässigt, da davon ausgegangen wird, dass durch die Einsatzhäufigkeit der Schalung die Umweltwirkungen vernachlässigbar gering sind. So wird auch in Umweltproduktdeklarationen aufgrund des Abschneidekriteriums vorgegangen [18].

5.5. Mauerwerkswände

Die Aufwandswerte für die Errichtung der Mauerwerkswände der Häuser A und D inklusive des Herstellens der zugehörigen Putzschicht auf der Innen- und Außenseite der Mauerwerkswände sind in Tabelle 5-2 zu finden.

Tabelle 5-2 Aufwendungen für die Baustellenaktivitäten zur Errichtung der Mauerwerkswände der Häuser A und D je m² Nettoraumfläche

Bezeichnung	Menge	Einheit
Haus A		
Strom	0,20	[kWh/m ²]
Folie	0,71	[m ² /m ²]
Haus D		
Strom	0,28	[kWh/m ²]
Folie	0,86	[m ² /m ²]

Die stromverbrauchenden Baustellenaktivitäten zum Errichten der Mauerwerkswände umfassen das Heben der für die Errichtung notwendigen Materialien zum Einbauort mit einem Kran, das Anrühren des Mauermörtels und das Auftragen des Putzes. Wenn notwendig, mussten die Mauersteine mit einer Steinsäge zugeschnitten werden. Zum Einbauen der Mauersteine und für das Auftragen des Mörtels kamen teilweise Hubtische zum Einsatz.

5.6. Holztafelwände

Die innerhalb der Systemgrenzen liegenden Prozesse für die Errichtung der Holztafelbauwände gliedern sich in die Aktivitäten in der Holzbaufirma und die auf der Baustelle stattfindenden Aktivitäten. Für die werk- und baustellenseitig stattfindenden Aktivitäten sind die Aufwandswerte in Tabelle 5-3 zusammengestellt.

Tabelle 5-3 Aufwendungen für die Errichtungsprozesse der Holztafelelemente von Haus B bzw. C je m² Nettoraumfläche

Bezeichnung	Menge	Einheit
Haus B bzw. C		
Strom	0,24	[kWh/m ²]
Dieselverbrauch	1,12E-03	[l/m ²]
Gabelstapler	3,71E-03	[tkm/m ²]
Verpackung - Folie	1,01	[m ² /m ²]

Die werkseitigen Aufwandswerte beinhalten den Stromverbrauch beim Herstellen des Ständerwerks und der Beplankung mit OSB-Platten. Auch der Transport der Baustoffe mit dem Gabelstapler über das Firmengelände ist Bestandteil dieser Aufwandswerte. Für die Baustelle werden die Strom- und Dieserverbräuche zum Bearbeiten und Anbringen aller weiteren Komponenten der Holztafelelemente berücksichtigt. Dies beinhaltet außenseitig das Anbringen der Holzfaserdämmplatten, der Lattung und der Fassadenschalung. Auch das Einbringen der Gefachdämmung, sowie das Anbringen der Holzfaserdämmplatten, der Trockenbauprofile und -platten auf der Innenseite ist hier berücksichtigt.

5.7. Brettsperrholzelemente

Tabelle 5-4 stellt die Aufwendungen für das Errichten der ein- und zweischaligen Brettsperrholzinneiwände und der Brettsperrholzdecken dar.

Tabelle 5-4 Aufwendungen für die Errichtungsprozesse der Brettsperrholzelemente für Haus B bzw. C je m² Nettoraumfläche

Bezeichnung	Menge	Einheit
Haus B bzw. C		
Strom	0,23	[kWh/m ²]
Verpackung - Folie	3,77	[m ² /m ²]

Der Abbund der Brettsperrholzwand- und Deckenelemente erfolgt werkseitig. Dieser Prozess ist deshalb Teil der Herstellungsphase (Module A1-3) und wird folglich für die Errichtungsphase nicht berücksichtigt. Die Herstellung der Verpackung des Brettsperrholzes als Witterungsschutz für dessen Transport vom Werk zur Baustelle wird ebenso berücksichtigt wie deren Entsorgung. Für das Errichten der Brettsperrholzwände muss der Stromverbrauch für den Kran, für das Befestigen der Mineralfaserdämmung (zweischalige Brettsperrholzelemente) sowie für das Anbringen der Trockenbauplatten berücksichtigt werden. Auch der daraus resultierende Abfall geht in die Betrachtung mit ein (siehe Kapitel 5.2.4). Die Aufwandswerte für die zu den Brettsperrholzdecken zugehörigen Baustellenaktivitäten setzen sich aus dem Stromverbrauch für die Errichtung sowie aus der Herstellung und der Entsorgung der Schutzfolie zusammen.

6. Ergebnisse und Auswertung

6.1. Globales Erwärmungspotential der Errichtungsphase (Modul A4-5)

6.1.1. Globales Erwärmungspotential der gesamten Baustelle

Das Globale Erwärmungspotential der Baugruben- und Rohbauarbeiten für die **gesamte Baustelle** der vier Wohngebäude in zwei unterschiedlichen Bauweisen ist in Abbildung 6-1 zu sehen.

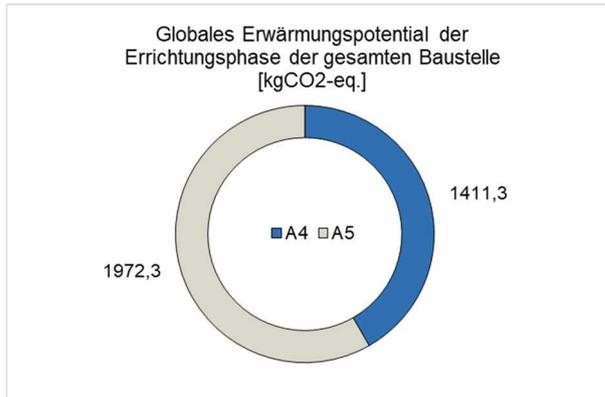


Abbildung 6-1 Globales Erwärmungspotential der Errichtungsphase der betrachteten Baustelle aufgeteilt in die Ergebnisse für das Modul A4 und das Modul A5

Insgesamt werden durch die Errichtungsphase 3.383,6kgCO₂-eq verursacht. Dies beinhaltet das GWP, das durch die Module A4 und A5 verursacht wird, die auch die Herstellungsprozesse der Holztafelelemente in der Holzbaufirma beinhalten. Das Modul A5 (Errichtung/Einbau) macht etwa 60% der gesamten GWPs aus, das Modul A4 entsprechend 40%. Anhand dieser Darstellung wird deutlich, dass sowohl die Transporte von und zur Baustelle als auch die Baustellenprozesse an sich einen relevanten Anteil an den Treibhausgasemissionen der Errichtungsphase ausmachen.

6.1.2. Globales Erwärmungspotential je Haus je Modul

Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse der einzelnen Häuser und Bauweisen werden diese auf die funktionelle Einheit (m² Nettoraumfläche pro Jahr [m²a]) bezogen. Abbildung 6-2 zeigt die Ergebnisse für die vier Gebäude (Massivbau: Haus A, Haus D; Holzbau: Haus B, Haus C). Die Ergebnisse werden dem Modul A4 (Transport) und dem Modul A5 (Errichtung/Einbau) zugeteilt.

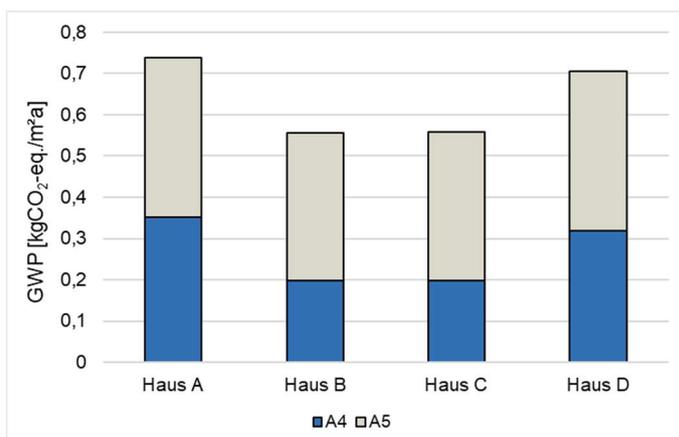


Abbildung 6-2 GWP-Ergebnisse der Module A4 und A5 je m² Nettoraumfläche und Jahr für die Gebäude in Massivbauweise (Haus A, Haus D) und die Gebäude in Holzbauweise (Haus B, Haus C)

Die Module A4 und A5 haben nicht nur für die gesamte Baustelle, sondern auch für alle vier Häuser, unabhängig von der Bauweise, einen nicht zu vernachlässigenden Anteil am GWP der Errichtungsphase. Für das Modul A4 beträgt dieser je nach Bauweise circa 35 bis 45%, für das Modul A5 folglich 55 bis 65%. Zu erkennen ist außerdem, dass das GWP der Massivbauweisen um durchschnittlich 22% höher ist als dasjenige der Holzbauweisen.

6.1.3. Globales Erwärmungspotential separat je Aktivität und je Bauweise

Eine Unterteilung der Ergebnisse zu den zugehörigen **Aktivitäten**, die den Transport zur Baustelle sowie alle Baustellenaktivitäten enthält, ist für die gesamte Errichtungsphase in Abbildung 6-3 dargestellt.

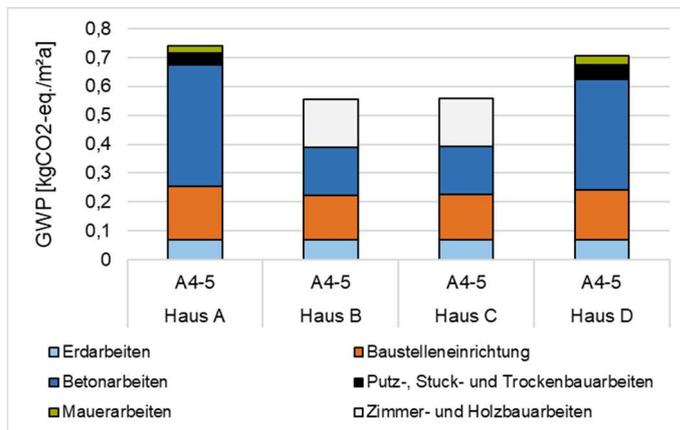


Abbildung 6-3 GWP-Ergebnisse der Module A4 und A5 je m² Nettoraumfläche und Jahr für die Gebäude in Massivbauweise (Haus A, Haus D) und die Gebäude in Holzbauweise (Haus B, Haus C) je Aktivität

Ein Anteil von 25% (Haus A, D) bzw. 27% (Haus B, C) des GWP wird durch die Baustelleneinrichtung hervorgerufen. Die Betonarbeiten machen einen großen Anteil (Haus A, D: 55%, Haus B, C: 30%) aus. Die Mauerarbeiten machen für die Massivbauweise nur einen geringen Anteil aus (ca. 3,5%). Für die Holzgebäude spielen die Holzbauarbeiten eine etwa ebenso große Rolle wie die Betonarbeiten. Das GWP der Erdarbeiten ist für etwa 10% des GWPs verantwortlich.

Um den Anteil der **Bauweisen** am globalen Erwärmungspotential der zugehörigen Aktivitäten der Errichtungsphase untersuchen zu können, werden die Ergebnisse in Abbildung 6-4 je Bauweise dargestellt.

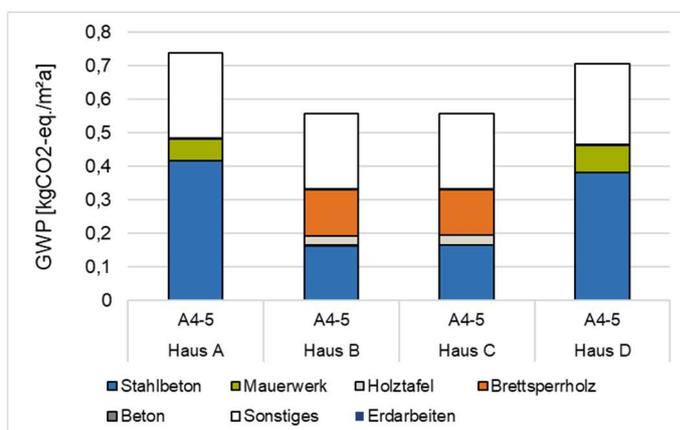


Abbildung 6-4 GWP-Ergebnisse der Module A4 und A5 je m² Nettoraumfläche und Jahr für die Gebäude in Massivbauweise (Haus A, Haus D) und die Gebäude in Holzbauweise (Haus B, Haus C) je Bauweise

Wie bereits in Abbildung 6-3 zu erkennen ist, machen die Transport- und Errichtungsprozesse für die Stahlbetonarbeiten sowie die sonstigen Aktivitäten im Vergleich zur Mauerwerksbauweise einen großen Anteil an den Treibhausgasemissionen der Massivgebäude aus. Bei der Betrachtung der Ergebnisse für die Holzbauweise ist festzustellen, dass das GWP je m² Nettoraumfläche für die Holztafelaußenwände deutlich geringer ist (ca. 75%) als das GWP der Brettspertholzinneiwände und -decken.

6.1.4. Globales Erwärmungspotential je Bauweise und Verursacherkategorie

Für die Auswertung des GWP der Module A4-5 je Bauweise und Verursacherkategorie, sind die Ergebnisse separat für die Transporte des Moduls A4 und die durch Hilfsmittel, Abfall, Strom und Kraftstoff verursachten GWP-Ergebnisse der Baustellenaktivitäten des Moduls A5 in Abbildung 6-5 dargestellt.

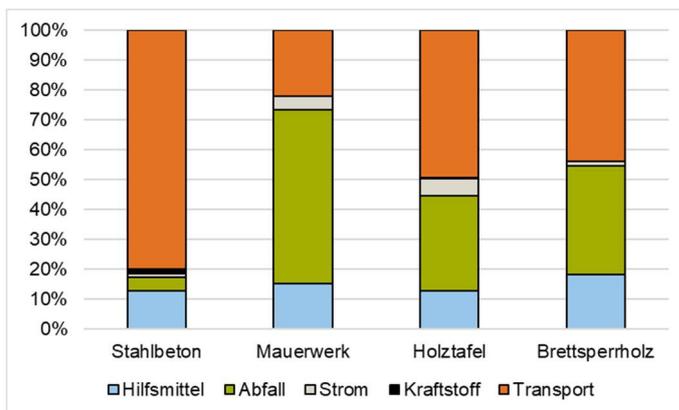


Abbildung 6-5 GWP-Ergebnisse der Module A4 und A5 je m² Nettoraumfläche und Jahr für die Gebäude in Massivbauweise (Haus A, Haus D) und die Gebäude in Holzbauweise (Haus B, Haus C) je Bauweise und zugehöriger Verursacherkategorie

Es ist zu erkennen, dass die Transportprozesse des Moduls A4 für die Stahlbetonbauteile im Vergleich zu den im Modul A5 verursachenden Aktivitäten knapp 80% des GWP verursachen. Für die Mauerwerksbauteile machen die Transportprozesse etwa 20% des GWP aus. Der größte Anteil (knapp 60%) wird hier durch die anfallenden Abfälle (v.a. Bauschutt, Bauholz und Folien) verursacht. Sowohl für die Holztafel-, als auch für die Brettspertholzelemente sind die Transportprozesse für knapp die Hälfte des GWP verantwortlich. Die andere Hälfte resultiert aus Abfällen (v.a. Folien als Verpackungsmaterial, Abfälle bei der Vorfertigung wie z.B. Abschnitte). Die Strom- und Kraftstoffverbräuche spielen für alle vier Bauweisen eine untergeordnete Rolle. Hilfsmittel machen für alle vier Bauweisen zwischen 12% und 18% des GWP aus.

Um die für diese Ergebnisse verantwortlichen Stellschrauben genauer identifizieren zu können, wird in den folgenden Kapiteln eine separate Betrachtung der Ergebnisse für die Module A4 und A5 vorgenommen. Auch eine gesonderte Betrachtung je Bauweise wird durchgeführt, um bauweisenspezifische Stellschrauben identifizieren und Handlungsempfehlungen geben zu können.

6.2. Globales Erwärmungspotential des Moduls A4

6.2.1. Globales Erwärmungspotential je Bauweise

Um die Ergebnisse für das globale Erwärmungspotential spezifischen Verursachenden zuordnen zu können, wurde eine Untergliederung der Ergebnisse des Moduls A4 unter anderem in die unterschiedlichen Bauweisen vorgenommen (Abbildung 6-6). Zur Gewährleistung der

Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde hier nicht nur die Transporte von und zur Baustelle, sondern auch die Transporte zur Herstellung der Holztafelelemente zur Holzbaufirma berücksichtigt.

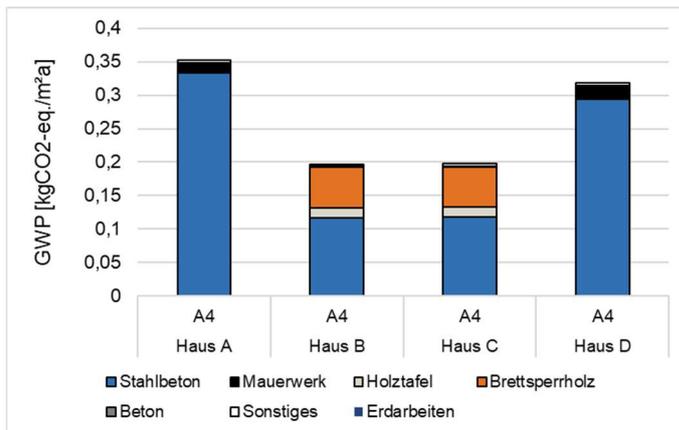


Abbildung 6-6 GWP-Ergebnisse des Moduls A4 je m² Nettonraumfläche und Jahr für die Gebäude in Massivbauweise (Haus A, Haus D) und die Gebäude in Holzbauweise (Haus B, Haus C) je Bauweise

Das GWP für die Transportprozesse liegt für die Gebäude in Massivbauweise bei 0,35 (Haus A) bzw. 0,32kgCO₂-eq./m²a (Haus D) und für die beiden Gebäude in Holzbauweise bei 0,20kgCO₂-eq./m²a (Haus B und Haus C).

Für die Gebäude A und D weisen die Transporte, die in Zusammenhang mit dem Errichten der Stahlbetonbauteile stehen, die größten Umweltwirkungen auf. Bei der Betrachtung der Massivgebäude wird deutlich, dass das GWP für die Transporte der Mauerwerksbauteile und der sonstigen Ausstattung (z.B. Transport von Kleingeräten oder Hilfsmitteln zur Baustelle) verhältnismäßig gering ist. Wie bei der Sachbilanz der Transporte erläutert (siehe Kapitel 5.2.1), ist ein Großteil der Transporte auf den Beton zurückzuführen. Unter Berücksichtigung der Distanzen ist festzustellen, dass die Häufigkeit der Betontransporte, trotz geringer Distanzen, sowie die Stahltransporte, die eine große Transportdistanz mit sich bringen, hauptverantwortlich für das GWP der Massivgebäude sind.

Durch den Stahlbetonanteil in Keller, Erdgeschoss und Kern der Holzgebäude, ist der Anteil des durch die Transportprozesse für die Errichtung der Stahlbetonbauteile verursachten GWP mit etwa 60% nicht zu vernachlässigen. Die Transporte für die Brettsperrholzbauteile machen einen Anteil am GWP von knapp 30% aus, diejenigen für die Holztafelelemente knapp 8%. Ausschlaggebend für dieses Ergebnis ist das große Gewicht beim Transport der Brettsperrholzelemente gegenüber der vergleichsweise leichten Holztafelelementen.

Das GWP der Transporte für die Erdarbeiten ist im Verhältnis eher gering. Dies ist mit den sehr geringen Distanzen von 750m für den Transport des Baugrubenaushubs zu einem Zwischenlager nahe der Baustelle zu begründen.

6.2.2. Globales Erwärmungspotential je Bauweise und Verursacherkategorie

Um die hauptverursachenden Transporte je Bauweise identifizieren zu können, wurde eine Untergliederung in Verursacherkategorien je Bauweise für die Stahlbeton- und Mauerwerksbauweise am Beispiel von Haus A und für die Brettsperrholz- und Holztafelbauweise am Beispiel von Haus B vorgenommen (Abbildung 6-7). Hier wird zwischen den Kategorien *Hilfsmittel*, *Abfall*, *Geräte* und *Bauprodukte* unterschieden.

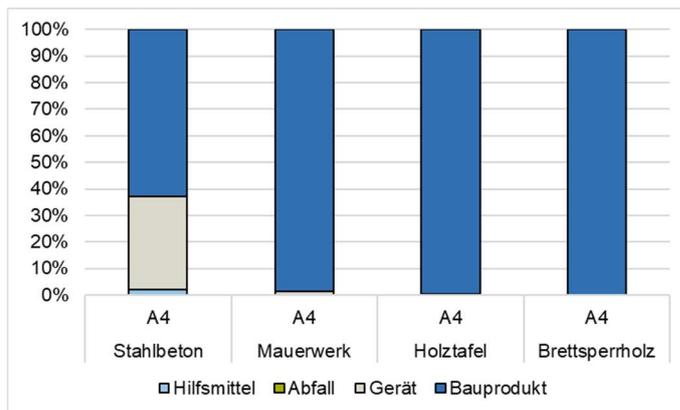


Abbildung 6-7 GWP-Ergebnisse des Moduls A4 je m² Nettoraumfläche und Jahr für die Gebäude in Massivbauweise (Haus A, Haus D) und die Gebäude in Holzbauweise (Haus B, Haus C) je Verursacherkategorie

Für die **Stahlbetonbauweise** resultiert das GWP hauptsächlich aus den Transporten der Bauprodukte und Geräte zur Baustelle, der Anteil des GWP der Hilfsmittel sowie des Abfalls ist sehr gering. Für das GWP des Gerätetransports sind die für die Bodenplatte und die Decken zum Einsatz kommenden Betonpumpen hauptverantwortlich. Wie bereits erwähnt haben das GWP der Fahrten der zum Betontransport eingesetzten Betonmischer von und zur Baustelle und die Stahltransporte den größten Einfluss auf die Treibhausgasemissionen der Bauprodukte zur Baustelle.

Für die Transportprozesse der **Mauerwerks-** der **Brettsperrholz-** und der **Holztafelbauweise** resultiert das GWP fast ausschließlich aus dem Transport der Bauprodukte. Ausschlaggebend für dieses Ergebnis sind die Transporte der Mauersteine für die Mauerwerkswände, die Transporte des Brettsperrholzes für die Brettsperrholzelemente und die Transporte der Holztafelelemente.

6.3. Globales Erwärmungspotential des Moduls A5

6.3.1. Globales Erwärmungspotential je Aktivität

Abbildung 6-8 zeigt die dem Modul A5 zugehörigen GWP-Ergebnisse. Die Ergebnisse der Aktivitäten auf der Baustelle wurden in unterschiedliche Leistungsbereiche, wie beispielsweise *Erdarbeiten*, *Baustelleneinrichtung* oder *Mauerarbeiten* unterteilt. Wie bereits für die Transportprozesse des Moduls A4, wurden auch für das Modul A5 die Prozesse der Herstellung der Holztafelelemente in der Holzbaufirma berücksichtigt.

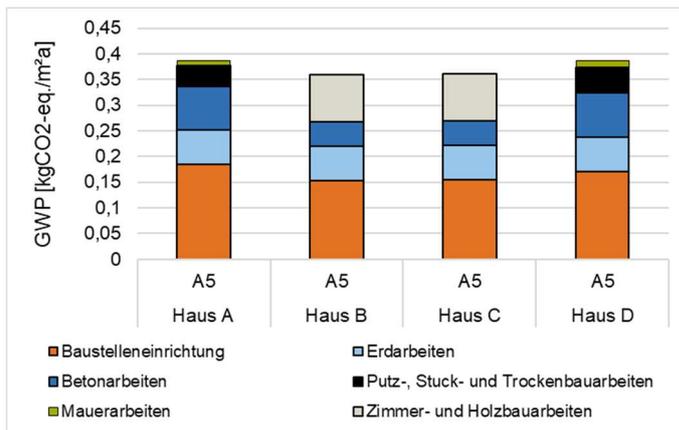


Abbildung 6-8 GWP-Ergebnisse des Moduls A5 je m² Nettoraumfläche und Jahr für die Gebäude in Massivbauweise (Haus A, Haus D) und die Gebäude in Holzbauweise (Haus B, Haus C) je Aktivität

Das GWP je m² Nettoraumfläche und Jahr für die Errichtung (Modul A5) der Massivgebäude (Haus A und Haus D) ist mit circa 0,38kgCO₂-eq./m²a um 5% höher, als das GWP der Holzgebäude (Haus B und Haus C), deren GWP circa 0,36kgCO₂-eq./m²a beträgt.

Die Baustelleneinrichtung macht je Gebäude ca. 45% des gesamten GWP des Moduls A5 aus. Diese beinhaltet den *indirekten* Stromverbrauch, der vermutlich größtenteils durch die Baustellencontainer verursacht wird (siehe Kapitel 5.2.3). Auch der Verbrauch des für die Baueheizungen benötigten Heizöls ist in den GWP-Ergebnissen der einzelnen Häuser für die Baustelleneinrichtung enthalten und macht etwa 15% des GWP der Baustelleneinrichtung aus. Der Kraftstoffverbrauch beim Herstellen der Baugrube ist je Haus für ca. 18% des GWP je Gebäude verantwortlich.

Das durch die Betonarbeiten verursachte GWP hat einen Anteil von 22% am Ergebnis der Massivgebäude und beträgt für Haus A und Haus D gemittelt 0,08kgCO₂-eq./m²a. Für Haus B und Haus C machen die Betonarbeiten mit 0,05kgCO₂-eq./m²a 13% des Ergebnisses aus. Das baustellenseitige GWP der Mauerarbeiten ist sehr gering (je Haus ca. 0,01kgCO₂-eq./m²). Grund dafür ist, dass im Vergleich zu beispielsweise den Betonarbeiten eine geringe Menge an Abfall, Bauholz, Folie und Strom für die Errichtung anfallen. Das durch das Verputzen der Mauerwerkswände verursachte GWP der beiden Massivgebäude wird hauptsächlich durch das Verwenden der Folie zum Abkleben der Fenster und Türen verursacht und macht etwa 11% des gesamten GWP je Haus aus. Etwa 25% des gesamten GWPs von Haus B bzw. Haus C sind auf die Zimmer- und Holzbauarbeiten zurückzuführen.

6.3.2. Globales Erwärmungspotential je Verursacherkategorie

Um genauer nachvollziehen zu können, welche In- und Outputs welchen Anteil an den GWP-Ergebnissen der vier Gebäude in den beiden unterschiedlicher Bauweisen haben, wurden die Ergebnisse anhand der Kategorien *Hilfsmittel*, *Abfall*, *Strom* und *Kraftstoff* ausgewertet (Abbildung 6-9). Diese wurden jedem einzelnen definierten Prozessmodul zugeteilt. Die Kategorie *Strom* wurde unterteilt in *Strom (direkter Stromverbrauch)* *Strom-indirekt (indirekter Stromverbrauch)*, um das aus dem *indirekten* Verbrauch resultierende GWP separat betrachten zu können.

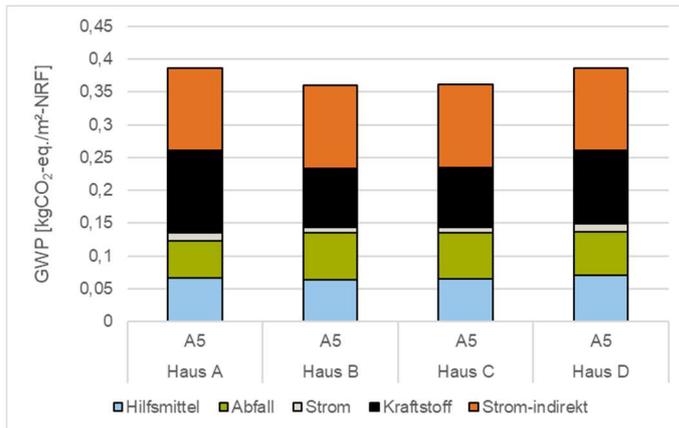


Abbildung 6-9 GWP-Ergebnisse des Moduls A5 je m² Nettoraumfläche und Jahr für die Gebäude in Massivbauweise (Haus A, Haus D) und die Gebäude in Holzbauweise (Haus B, Haus C) je Verursacherkategorie

Das GWP resultierend aus dem indirekten Stromverbrauch, dessen Zusammensetzung in Kapitel 5.2.3 genauer erläutert wird, macht circa 33% des GWP je Nettoraumfläche und Jahr für jedes Haus aus. Der Strom, der direkt durch Aktivitäten auf der Baustelle bzw. in der Holzbaufirma zur Errichtung der vier Gebäude verbraucht wurde, macht je Haus circa 3% des gesamten GWPs aus. Die verbrauchten Kraftstoffe, die hauptsächlich auf die Baueheizung und die Erdarbeiten zurückzuführen sind, sind je Haus für 25 bis 30% des GWPs verantwortlich. Das GWP der verwendeten Hilfsmittel und des Abfalls besitzt in Summe je Haus etwa einen Anteil von etwa 35% am gesamten GWP. Dies ist vor allem auf die Folien, das Bauholz und die anfallenden Baustellenabfälle zurückzuführen.

6.3.3. Globales Erwärmungspotential je Bauweise und Verursacherkategorie

Die Ergebnisse für das GWP verursacht durch die auf der Baustelle stattfindenden Prozesse je Bauweise (Abbildung 6-10) sollen dazu dienen einen Überblick darüber zu erhalten durch welche Bauweise welcher Anteil an GWP verursacht wird. Nicht dargestellt ist in diesem Kapitel das den *indirekten* Stromverbräuchen und den Erdarbeiten zuordenbare GWP, da hier der Betrachtungsschwerpunkt auf die Ergebnisse der unterschiedlichen Bauweisen und der zugehörigen Verursacherkategorien gelegt wird.

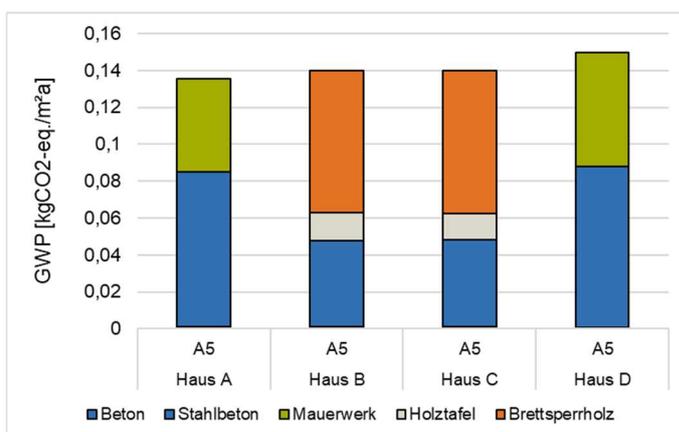


Abbildung 6-10 GWP-Ergebnisse des Moduls A5 je m² Nettoraumfläche und Jahr für die Gebäude in Massivbauweise (Haus A, Haus D) und die Gebäude in Holzbauweise (Haus B, Haus C) je Bauweise

Wie bereits im vorherigen Kapitel erläutert, sind die Errichtungsprozesse der Stahlbetonbauteile Hauptanteil am GWP der Massivgebäude aus. Es werden etwa 40% der

Treibhausgasemissionen der Massivgebäude durch die Mauerarbeiten hervorgerufen. Die Stahlbetonarbeiten verursachen für die Massivgebäude circa 60%, für die Holzgebäude knapp 33% der gesamten äquivalenten Treibhausgasemissionen. Am GWP der Holzgebäude machen die Holztafelwände circa 11% aus. Die Brettsperrholzelemente weisen mit etwa 56% einen größeren Anteil am Gesamtergebnis des GWP für das jeweilige Haus auf, als die Holztafelelemente.

Der Einfluss der jeweiligen Verursacherkategorie auf die unterschiedlichen Bauweisen ist im Folgenden genauer beschrieben. Analog zu Kapitel 6.2.2 werden die Ergebnisse beispielhaft für die Massivbauweise anhand Haus A und für Holzbauweise anhand der Ergebnisse für Haus B erläutert (Abbildung 6-11).

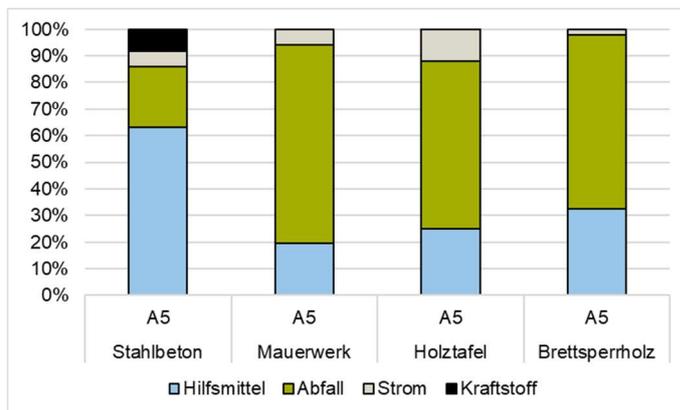


Abbildung 6-11 GWP-Ergebnisse des Moduls A5 je m² Nettoraumfläche und Jahr für die Gebäude in Massivbauweise (Haus A, Haus D) und die Gebäude in Holzbauweise (Haus B, Haus C) je Bauweise und zugehöriger Verursacherkategorie

Den mit 63% größten Anteil am GWP der Errichtung der **Stahlbetonbauteile** haben die Hilfsmittel. Dies ist auf das verwendete Bauholz sowie auf die zum Abdecken der Stahlbetondecken zum Einsatz kommenden Folien zurückzuführen. Die beim Errichten der Stahlbetonbauteile entstehenden unterschiedlichen Baustellenabfälle sind für rund 23% des GWP der Stahlbetonarbeiten je Haus verantwortlich. Der Stromverbrauch macht einen Anteil von 6% des GWP für die Stahlbetonarbeiten aus. Das durch den Kraftstoffverbrauch für den Einsatz des Flügelglätters verursachte GWP besitzt einen Anteil von ca. 8% am GWP für die Stahlbetonbauweise.

Abfall und Hilfsmittel machen zusammen 94% des GWP für die **Mauerarbeiten** aus. Hilfsmittel sind hier die Folien, die als Witterungsschutz verwendet werden, sowie das Bauholz. Neben diesen beiden Einflussgrößen spielt der Stromverbrauch für die zum Einsatz kommenden Kleingeräte mit 6% des gesamten GWP für die Mauerarbeiten eine verhältnismäßig geringe Rolle.

Die Hilfsmittel für die **Holztafelelemente** (auf der Baustelle und in der Holzbaufirma) sowie die anfallenden Abfälle sind die Hauptverursacher des GWP der Holztafelbauweise. Diese sind gemeinsam für etwa 88% des gesamten GWP für das Errichten der Holztafelelemente verantwortlich. Die Abfälle setzen sich aus überschüssigem, entsorgtem Material, sowie Folien zum Transport der Holztafelelemente zur Baustelle zusammen. Das GWP der Hilfsmittel wird durch das Herstellen der Folie verursacht, die als Verpackung für den Transport der Elemente zur Baustelle verwendet wird. Der Stromverbrauch zum Herstellen ist für 12% des GWP der Errichtung der Holztafelelemente verantwortlich.

Das durch die Herstellung der Verpackung der **Brettsperrelemente** zur Anlieferung auf die Baustelle und die Entsorgung der Abfälle (Verpackung) verursachte GWP macht circa 97% des gesamten für die Errichtung der Elemente anfallenden GWPs aus. Außerdem werden 3% der Treibhausgasemissionen durch den für die Errichtung der Elemente nötigen Strom verursacht.

7. Fazit und Handlungsempfehlungen

7.1. Fazit Modul A4 - Transport

In diesem Kapitel werden die anhand der durchgeführten Lebenszyklusanalyse ermittelten Erkenntnisse bezüglich des GWP des Moduls A4 der betrachteten Baustelle zusammengefasst. Basierend auf den relevanten Verursachenden werden mögliche Maßnahmen zur Dekarbonisierung der untersuchten Baustelle vorgeschlagen. Die folgenden Maßnahmen sollen Planenden, Auftraggebenden und dem Baugewerbe erste Möglichkeiten zur Dekarbonisierung der Baustelle aufzeigen.

Insgesamt ist zu erkennen, dass aus den Transporten des Massivgebäudes mehr Treibhausgasemissionen resultieren, als aus den Transporten für die Holzbauweise und, dass diese hauptsächlich auf die Transporte für die Stahlbetonarbeiten zurückzuführen sind. Die hohen Treibhausgasemissionen der Stahlbetonarbeiten der betrachteten Baustelle werden durch den Transport des Stahls und des Betons verursacht. Aufgrund der in Summe sehr großen Transportdistanzen des Stahls, der teilweise aus dem europäischen Ausland angeliefert wurde, sowie der hohen Zahl an Betontransporten mit Mischern über im Vergleich geringe Transportdistanzen, wird hierbei ebenfalls ein hohes GWP verursacht. Auch der Transport der Betonpumpen auf die Baustelle macht einen nicht zu vernachlässigenden Anteil aus.

Die Betrachtung der Ergebnisse des Globalen Erwärmungspotentials des Moduls A4 (Transport) für alle vier Gebäude zeigt, dass der Transport der Bauprodukte an sich nicht nur für die Stahlbetonarbeiten (Beton und Stahl) sondern auch für die Mauer- und Holzbauarbeiten das größte GWP für den Transport insgesamt sowie für die jeweilige Bauweise mit sich bringt. Das hängt damit zusammen, dass diese im Vergleich zu den anderen Verursachern sowohl eine große Masse aufweisen als auch in Summe verhältnismäßig große Distanzen zurücklegen und viele Transporte dafür notwendig sind. Das GWP der Transporte der Holztafelbau- Brettsperrholz- und Mauerwerksbauweise wird hauptsächlich durch die Anlieferung der zugehörigen Bauprodukte (Holztafelelemente, Brettsperrholzelemente, Mauersteine) verursacht. Die benötigte hohe Menge an diesen Bauprodukten spiegelt sich in Summe in der verhältnismäßig großen Transportdistanz wider und ist auch für die zugehörige verhältnismäßig große Masse verantwortlich. Für die Holzbauweise macht das GWP der Transporte für die Brettsperrholzelemente im Vergleich zum GWP der Transporte für die Holztafelelemente einen sehr großen Anteil aus. Dies liegt insbesondere an der größeren Masse der transportierten Brettsperrholzelemente im Vergleich zur Masse der Holztafelelemente.

Wie bereits in [26] beschrieben, stellen eine Reduktion des Transportgewichts- und der Transportdistanzen sowie der Einsatz von Fahrzeugen und Antrieben geringerer Emissionen Stellschrauben dar, um die Treibhausgasemissionen der Transporte in der Errichtungsphase zu reduzieren. Auch eine effizientere Auslastung der Transportmittel kann zu einer Reduktion der zugehörigen Treibhausgasemissionen führen. Eine Anwendung dieser Maßnahmen wäre auch für die in dieser Studie betrachteten Transportprozesse sinnvoll und wären insbesondere für die Beton-, Bewehrungs-, Mauerstein-, Holztafel- und Brettsperrholztransporte erforderlich. Gegebenenfalls könnten die Transporte der Betonpumpe zur Baustelle durch optimierte logistische Konzepte, die beispielsweise eine Zwischenlagerung der Betonpumpe vor Ort oder einen Mehrfacheinsatz der angelieferten Betonpumpe für unterschiedliche Bauteile oder unterschiedliche Baustellen zulassen. Hierfür könnte auch ein Anpassen des Bauablaufs einer Baustelle oder das angleichen des Ablaufs mehrerer nicht weit voneinander entfernter Baustellen, hilfreich sein.

Die Transportdistanz für den Aushub der Baugrube war in diesem Projekt im Vergleich zu anderen Untersuchungen [z.B. 26] äußerst gering, da sich in 750m Entfernung ein Zwischenlager für den Aushub befand. Hier konnte der Aushub vorübergehend gelagert und zu einem späteren Zeitpunkt wieder zur selben oder zu anderen Baustellen in direkter Umgebung geliefert werden. Folglich machen die Treibhausgasemissionen der Transporte für die Erdarbeiten hier einen verhältnismäßig geringen Anteil aus. Dies ist ein Positiv-Beispiel wie die Emissionen für die Erdarbeiten auch bei anderen Baustellen, deren Standort dies zulässt, geringgehalten werden könnten.

7.2. Fazit Modul A5 – Errichtung/Einbau

Analog zu Kapitel 7.1 für das Modul A4, werden im Folgenden die für das Modul A5 identifizierten Stellschrauben erläutert und erste Maßnahmen zur Reduktion des GWP der Errichtungsphase der betrachteten Baustelle und folglich zu deren Dekarbonisierung gegeben. Die hier aufgezeigten Maßnahmen dienen anhand der projektspezifischen Ergebnisse als Grundlage für die Emissionsreduktion in der Errichtungsphase aus Sicht Planender, Auftraggebender und des Baugewerbes (siehe Kapitel 7.3).

Aus den Ergebnissen der Wirkungsabschätzung für das Modul A5 geht hervor, dass die Baustelleneinrichtung einen nicht zu vernachlässigenden Anteil an den Treibhausgasemissionen der Errichtung der vier Gebäude in den beiden unterschiedlichen Bauweisen ausmacht. Die Treibhausgasemissionen für die Baustelleneinrichtung werden neben den Bauheizungen, hauptsächlich durch das GWP der *indirekten* Stromverbräuche verursacht. Es ist davon auszugehen, dass der *indirekte* Stromverbrauch insbesondere auf die hohen Verbräuche der Baucontainer zurückzuführen ist [26, 32]. Eine Reduktion dieser Verbräuche ist durch eine Reduktion des Stromverbrauchs der Baucontainer anhand zum Beispiel effizienterer oder alternativer Geräte in den Containern möglich. Auch das Anpassen des Startzeitpunktes der Bauarbeiten zur Reduktion des Stromverbrauchs insbesondere zum Heizen und Kühlen, oder die Verbrauchsreduktion zu Zeiten ohne Baustellenaktivitäten (Sonntage, Nachts, Feiertage), kann zu einer Reduktion des *indirekten* Stromverbrauchs führen. Geringere Bauzeiten durch Methoden wie Lean Construction [33] könnten den indirekten Stromverbrauch der Baustelle verringern. Beim Holzbau könnte ein höherer Vorfertigungsgrad als bei der hier untersuchten Baustelle, der eine geringere Bauzeit auf der Baustelle mit sich bringt, eine Maßnahme zu einer Reduktion des indirekten Stromverbrauchs sein. Grund dafür ist, dass durch die geringere Bauzeit auf der Baustelle zum Beispiel ein geringerer Stromverbrauch durch in Baucontainer verbaute Geräte oder die Beleuchtung verursacht werden könnte. Dies wäre allerdings nur der Fall, wenn beispielsweise die Energieverbräuche in der Werkhalle der Holzbaufirma geringer wären. Zur Reduktion des Stromverbrauchs der gesamten Baustelle könnten die Wahl eines Strommixes mit geringerem GWP je kWh und der Einsatz von mit Photovoltaik ausgestatteten Baucontainern aufgrund der Verwendung erneuerbarer Energiequellen dazu beitragen die Treibhausgasemissionen der gesamten Baustelle zu reduzieren [26, 28, 34]. Zur Verringerung der durch das verwendete Heizöl für die Bauheizung hervorgerufenen Treibhausgasemissionen könnten grundsätzlich längere kältebedingte Heizperioden vermieden werden und zum Beispiel alternative, elektrifizierte Geräte eingesetzt werden. Auch Energieträger mit geringerem GWP könnten eingesetzt werden. Zu überprüfen wäre beim Umstieg auf elektrische Geräte, wie der Bauheizung, ob die Anschlussleistung auf der Baustelle ausreichend wäre, um solche strombetriebene Geräte einsetzen zu können [26].

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung des Moduls A5 *Errichtung/Einbau*, zeigen, dass das GWP für die beiden Gebäude in Massivbauweise je m²-NRF und Jahr etwas größer ist als dasjenige der beiden Holzgebäude. Zurückzuführen ist dies für die Massivbauweise auf die im Vergleich zu den Holzbauarbeiten und Mauerarbeiten, hohen Treibhausgasemissionen, die durch die Stahlbetonarbeiten verursacht werden.

Für die Stahlbeton- und Mauerarbeiten machen die verwendeten Hilfsmittel und der Abfall den größten Anteil am GWP aus. Insbesondere die Herstellung des Bauholzes ist hauptverantwortlich für das GWP der Hilfsmittel. Ansätze zur Reduktion der Abfälle auf der Baustelle [z.B. 35] sind notwendig, um die Treibhausgasemissionen bei deren Entsorgung möglichst gering zu halten. Der Einsatz wiederverwendbarer Hilfsmittel, anstatt von einweg-Materialien könnte hier helfen das GWP der Herstellung der Hilfsmittel sowie des Abfallaufkommens zu reduzieren.

Wie in [26] diskutiert, wäre es durch den Einsatz von Maschinen mit geringeren Emissionen oder die Reduktion deren Einsatzzeit und -menge möglich den Kraftstoff- und Stromverbrauch zu reduzieren. Sowohl bei der Errichtung der Stahlbeton- und Mauerwerks-, als auch der Holztafel- und Brettsperrholzbauteile wurden mit Strom betriebene Geräte verwendet. Das durch den Kraftstoffverbrauch hervorgerufene GWP könnte durch das Verwenden alternativer Kraftstoffe mit geringerem GWP oder durch den Einsatz alternativer Geräte verringert werden. Auch für die Erdarbeiten könnte der Einsatz elektrifizierte Bagger anstatt dieselbetriebener Geräte zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen führen. Dies zeigt beispielsweise die Strategie, durch die die Stadt Oslo klimaneutrale Baustellen umsetzen will [36]. Wie bereits für die indirekten Stromverbräuche erläutert, können die *direkten* Stromverbräuche für die Massivbauweise und die Holzbauweise durch Maßnahmen wie den Einsatz effizienterer Geräte oder einen Strommix mit einem höheren Anteil erneuerbarer Energien verringert werden. Es ist anzumerken, dass diese Maßnahmen nicht nur für die Baustelle, sondern auch für die Vorfertigungsprozesse in der Holzbaufirma gelten.

Auch für das Errichten der Holztafelelemente und der Brettsperrholzelemente sind das GWP der Abfälle sowie das GWP der Hilfsmittel die größten Verursachenden. Das durch die Verwertung des Abfalls resultierende GWP für die Holztafelelemente ist zum einen auf die beim Herstellen der Elemente entstehenden Abfälle zurückzuführen, zum anderen auf die für den Transport der Elemente zum Einsatz kommenden Folien. Eine Reduktion der Abfälle und Hilfsmittel während der Produktion der Holztafelelemente könnte gegebenenfalls seitens der ausführenden Holzbaufirma realisiert werden. Eine Reduktion des GWP der Herstellung und Entsorgung der Folien, die für das Verpacken der Holztafelelemente und der Brettsperrholzelemente zum Einsatz kommen, ist eine wichtige Stellschraube zur Dekarbonisierung der Holzbauweise. Maßnahmen wie effizienteres Verpacken der Elemente, verpackungslose Transporte zur Baustelle, wiederverwendbare Verpackungen oder das Verwenden von Folien mit geringeren Umweltwirkungen können Möglichkeiten zur Hilfsmittel- und Abfallreduktion darstellen.

7.3. Hinweise für die Ausschreibung und Handlungsempfehlungen

Um die Klimaziele erreichen zu können und die damit einhergehende Dekarbonisierung im Bauwesen voranbringen zu können, müssen auch die Treibhausgasemissionen von Baustellen erfasst und reduziert werden. In den vorherigen Kapiteln wurden Möglichkeiten zur Dekarbonisierung der Baustellenlogistik und -prozesse anhand der Ökobilanzergebnisse für eine spezifische Baustelle gegeben. Auf Basis dessen können für Auftraggebende in diesem Kapitel erste Hinweise für die Dekarbonisierung der Baustelle in Ausschreibung und Vergabe vorgeschlagen werden. Dadurch können erste allgemeine Hinweise zur Dekarbonisierung von

Errichtungsprozessen bei den beteiligten Rohbauunternehmen und in der Projektplanung und -steuerung gegeben werden.

Umweltfreundliche Vergabekriterien bilden eine Möglichkeit, um emissionsreduzierende Maßnahmen auf der Seite der ausführenden Baufirmen zu fördern (siehe Kapitel 1). Zur Umsetzung der in den vorherigen Kapiteln erläuterten Stellschrauben und Dekarbonisierungsmöglichkeiten gibt es zum Beispiel aus Sicht der Auftraggebenden folgende Hinweise für Ausschreibung und Vergabe:

- Effizienter Bauzeitenplan mit Vermeidung von Bauzeiten in den Kälteperioden (z.B. Vermeidung Heizen)
- Effiziente Lieferkette und Logistik auf der Baustelle (z.B. Vermeidung von Leerfahrten)
- Nachhaltige Baustelleneinrichtung z.B. Einsatz Zeitschaltuhren für Heizungen/ Strom/ Wasser
- Verpflichtender Abschluss von Ökostromverträgen beim Baustrom
- Effizienzvorgaben für Transportfahrzeuge und Baumaschinen (z.B. Elektroantrieb)
- Vermeidung von Abfall, Verwendung alternative Verpackungsmöglichkeiten, sortenreine Trennung von Abfällen (z.B. unterschiedliche Altholzklassen) um stoffliche Verwertung zu fördern
- Generelle Dokumentationspflichten zu Umweltwirkungen (beispielsweise als Position im Angebot)

Aus diesen Kriterien und den Ergebnissen der Wirkungsabschätzung können sich für die Projektplanung und -steuerung sowie für die beteiligten Rohbauunternehmen, die diesen Kriterien nachkommen wollen, folgende allgemeine Handlungsfelder zur Dekarbonisierung des Ist-Zustandes ergeben:

- Treibhausgasemissionsarme Transporte
- Dekarbonisierung der Baustelleneinrichtung, insbesondere Baucontainer
- Reduktion der Treibhausgasemissionen der für die Erdarbeiten eingesetzten Geräte, insbesondere der Bagger für das Ausheben der Baugrube
- Verringerung des Kraftstoff- und des Stromverbrauchs auf der Baustelle
- Einsatz von Geräten, die geringere Treibhausgasemissionen hervorrufen
- Einsatz von Hilfsmitteln mit geringeren Treibhausgasemissionen
- Reduktion der durch die Verwertung der Abfälle hervorgerufenen Treibhausgasemissionen
- Dekarbonisierung weiterer bauweisenspezifischer Baustellenaktivitäten

Durch die im vorherigen Kapiteln erarbeiteten Möglichkeiten zur Dekarbonisierung und die identifizierten Handlungsfelder werden in den nachfolgenden Tabellen erste Handlungsempfehlungen getrennt für die Projektplanung und -steuerung (Tabelle 7-1) sowie das Baugewerbe (Tabelle 7-2) zusammengefasst.

Tabelle 7-1 Zusammenfassung der Handlungsfelder und zugehöriger Handlungsempfehlungen für die Projektplanung- und Steuerung

Handlungsfeld	Handlungsempfehlungen
Projektplanung und Projektsteuerung	
Transporte	<ul style="list-style-type: none"> - Bauweisen mit Materialien, die möglichst geringes Transportgewicht aufweisen bereits in der Planung bevorzugen - Transportlogistik optimieren (Möglichkeiten zur Zwischenlagerung von Baustoffen, Hilfsmitteln, Geräten, Aushub etc. nahe der Baustelle schaffen, Vermeiden von Leerfahrten, etc.)
Baustelleneinrichtung	<ul style="list-style-type: none"> - Startzeitpunkt und Taktung der Baustelle ggf. anpassen (Stromverbrauchsreduktion von Baustellencontainern, Beleuchtung, Bauheizung etc.) - Allgemeine Anweisungen zum umweltfreundlichen Betrieb von der Baustelleneinrichtung Verfügung stellen (insbesondere Baustellencontainer)
Errichtung – bauweisenunabhängige Empfehlungen	<ul style="list-style-type: none"> - Baustrommixes mit geringen Treibhausgasemissionen verwenden - Durch Ansätze wie Lean Management zusätzliche Abfälle (und Hilfsmittel) vermeiden
Massivbau	<ul style="list-style-type: none"> - Gewerkebündelung bei der Vergabe - Hoher Vorfertigungsgrad bei Einbauten - Modul- /Elementbauweise auch bei Massivwänden und -decken
Holzbau	<ul style="list-style-type: none"> - Frühe Planung des Gebäudes und der Baulogistik im Kontext einer optimierten Lieferkette und schnellen Bauzeit - Reduktion der Stahlbetonanteile im Holzbau - Holzabfälle stofflich verwerten oder Wiederverwendung anstreben

Tabelle 7-2 Zusammenfassung der Handlungsfelder und zugehöriger Handlungsempfehlungen für das Baugewerbe

Handlungsfeld	Handlungsempfehlungen
Baugewerbe	
Transporte – bauweisenunabhängige Maßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> - Dekarbonisierung der firmeneigenen Flotte (z.B. optimierte Logistik, Fahrgemeinschaften, vermeiden von Leerfahrten, optimale Auslastung, Einsatz von Fahrzeugen mit reduzierten Treibhausgasemissionen durch z.B. alternative Antriebe, etc.) - Wahl von zuliefernden und produzierenden Unternehmen die für den Transport der Bauprodukte vom Werk zur Baustelle möglichst geringe Treibhausgasemissionen verursachen
Baustelleneinrichtung	<ul style="list-style-type: none"> - Einsatz von Baucontainern mit möglichst geringen Treibhausgasemissionen im Betrieb (Wahl von Containern mit geringen Energieverbräuchen, Ausstattung der Baucontainer mit umweltfreundlichen Geräten, automatischen Abschaltvorrichtungen (Nacht, Wochenende), Dämmung der Außenwände, etc.) - Unterweisung des Personals zur umweltfreundlichen Arbeitsweise auf der Baustelle (Betrieb von Baustellencontainern, Geräten, Vermeiden von Abfällen, etc.) - Einsatz von Bauheizungen mit geringen Treibhausgasemissionen (z.B. durch treibhausgasemissionsarme/alternative Antriebe/Energieträger) - Möglichst geringe aber effiziente Bauzeit auf der Baustelle zur Reduktion der Treibhausgasemissionen der Baustelleneinrichtung
Errichtungsprozesse – bauweisenunabhängige Empfehlungen	<ul style="list-style-type: none"> - Einsatz von Geräten mit möglichst geringen Treibhausgasemissionen im Betrieb (Reduzierter Kraftstoff-/Stromverbrauch, alternative Antriebe/Geräte, etc.) - Vermeiden von durch Hilfsmittel und Abfall verursachten Treibhausgasemissionen (Wiederverwendbare Hilfsmittel, Hilfsmittel mit geringen Treibhausgasemissionen, effizienterer Einsatz von Hilfsmitteln, Effizientere Prozesse zum Vermeiden von Abfall, etc.)
Massivbau	<ul style="list-style-type: none"> - Reduktion der Treibhausgasemissionen der Transporte insbesondere von Beton und Stahl durch effiziente Logistik, Verwendung von Mischern mit größerem Volumen zur Reduktion der Transportanzahl, effiziente Auslastung bei Stahltransporten, etc.) (weitere Maßnahmen siehe: <i>Transporte – bauweisenunabhängige Maßnahmen</i>) - Dekarbonisierung der zum Einsatz kommenden Abfälle und Hilfsmittel (mögliche Maßnahmen siehe <i>Errichtungsprozesse – bauweisenunabhängige Empfehlungen</i>)
Holzbau	<ul style="list-style-type: none"> - Reduktion der Treibhausgasemissionen der Transporte insbesondere von Brettsperrholz- und Holztafelementen (weitere Maßnahmen siehe: <i>Transporte – bauweisenunabhängige Maßnahmen</i>) - Treibhausgasemissionsarme Verpackung von Holztafel- oder Brettsperrholzelementen (Anforderung an Holzbaufirma und z.B. Brettsperrholzfirma), Verwendung wiederverwendbarer Folien oder von Folien mit geringen Umweltwirkungen, Einsparen von Verpackungsmaterialien durch effizienteres Verpacken, Rücknahme der Verpackung durch das verpackende Unternehmen anfragen anstatt Entsorgung, etc.) - Etablieren von Strategien zur Minimierung der durch sonstige Hilfsmittel und Abfälle hervorgerufenen Treibhausgasemissionen in der Holzbaufirma und auf der Baustelle (vgl. Handlungsfeld: <i>Errichtungsprozesse – bauweisenunabhängige Empfehlungen</i>) - Überprüfen von Dekarbonisierungsmöglichkeiten durch höhere Vorfertigungsgrade (ggf. Reduktion der Bauzeit auf der Baustelle, und Reduktion von Hilfsmittel, Abfall und Energieverbrauch etc. möglich)

8. Zusammenfassung und Ausblick

Auf einer Baustelle auf der vier Wohngebäude in unterschiedlicher Bauweise errichtet wurden, wurden Sachbilanzdaten zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen der zugehörigen Rohbauarbeiten ermittelt. Zwei der errichteten Gebäude wurden in Stahlbetonbauweise mit einschaligen Außenwänden aus Mauerwerk errichtet (Massivbauweise). Für die anderen beiden Gebäude kam im Kellergeschoss und einem Teil des Erdgeschosses Stahlbeton zum Einsatz, die Außenwände bestanden aus Holztafelelementen, die Innenwände und Decken aus Brettsperrholzelementen (Holzbauweise).

Zur Datenaufnahme wurden vor-Ort Untersuchungen durchgeführt, die auch die Installation von Stromzählern auf der Baustelle beinhalteten. Die Installation zweier Videokameras auf der Baustelle und das Speichern der Aufnahmen ermöglichten eine Nachverfolgung einzelner Baustellenaktivitäten auch im Nachhinein. Mittels Interviews und baurelevanter Unterlagen wie Pläne, Leistungsverzeichnisse oder Liefer- und Wiegescheine wurden die Daten erfasst und, wenn notwendig mit Literaturdaten ergänzt. Erfasst wurden die zum Modul A4 zugehörigen Transportprozesse, sowie die Baustellenaktivitäten des Moduls A5. Die Sachbilanzdaten wurden dann mit Umweltwirkungsdaten verknüpft, um das Globale Erwärmungspotential ermitteln zu können. Anhand der durchgeführten Untersuchungen konnten die hauptverursachenden Stellschrauben für das GWP der Errichtungsphase (Modul A4 und Modul A5) der vier Häuser in zwei unterschiedlichen Bauweisen identifiziert werden. Durch die projektspezifischen Ergebnisse der Wirkungsabschätzung konnten erste Maßnahmen für die Ausschreibung und Vergabe für umweltfreundliche Baustellen von Wohnbauten vorgeschlagen werden. Auch erste allgemeine Handlungsfelder konnten identifiziert und damit in Zusammenhang stehende Empfehlungen zur Dekarbonisierung der Treibhausgasemissionen der Errichtungsphase gegeben werden. Diese sollen sowohl der Projektplanung und -steuerung als auch den beteiligten Baufirmen als Hilfestellung dienen, die mit Baustellen von Wohnbauten in Zusammenhang stehenden Treibhausgasemissionen zu reduzieren.

Die Auswertung zeigt, dass es für eine Dekarbonisierung des Bausektors notwendig ist, auch die Treibhausgasemissionen der Errichtungsphase zu verringern und bestenfalls ganz zu vermeiden. Für die untersuchten Wohnbauten besteht sowohl für die Holzbau- als auch die Massivbauweise Potential zur Dekarbonisierung der Errichtungsphase. Handlungsbedarf ist hier sowohl in der Planung als auch von Auftraggeberseite und Baugewerbeseite zu erkennen. Anzumerken ist, dass die Erkenntnisse auf den erhobenen Daten einer einzigen Baustelle basieren. Anhand weiterer Untersuchungen und durch Sensitivitätsanalysen ist im nächsten Schritt eine kritische Überprüfung der Ergebnisse und zugehöriger Daten notwendig. Außerdem ist eine detaillierte quantitative Untersuchung des Einflusses der identifizierten Handlungsfelder und zugehörigen Empfehlungen bezüglich der Reduktion des GWP notwendig, um deren Relevanz einschätzen zu können. Dies wäre zum Beispiel durch vorbereitende und begleitende Untersuchungen der praktischen Umsetzung der Handlungsempfehlungen möglich.

Betrachtet wurde in diesem Forschungsprojekt rein die Rohbauarbeiten. Weitere Untersuchungen müssten auch bezüglich der Treibhausgasemissionen der Ausbauarbeiten durchgeführt werden. Auch müssten weitere Baustellen untersucht werden, um die Allgemeingültigkeit der getroffenen Aussagen und gegebenen Handlungsempfehlungen aus diesem Projekt überprüfen und gegebenenfalls anpassen zu können. Die Datenaufnahme auf der Baustelle erfolgte in diesem Projekt aufgrund der gegebenen Randbedingungen mit analogen Stromzählern. Um die Stromverbräuche genauer unterschiedlichen Verbräuchen über die Zeit

zuordnen zu können, wäre es sinnvoll dies anhand digitaler Zähler umzusetzen. Da vier Gebäude auf der betrachteten Baustelle errichtet wurden, war eine bottom-up Zuteilung der Aufwandswerte teilweise schwer möglich. Die Betrachtung einer Baustelle auf der nur ein Gebäude errichtet wird, könnte helfen die Datenaufnahme präziser gestalten zu können. Genauere Betrachtungen bezüglich der mit der Vorfertigung verbundener möglicher Einsparpotentiale von Treibhausgasemissionen müssen ebenfalls durchgeführt werden. Um die Errichtungsphase zukünftig in Ökobilanzen integrieren zu können, ist weitere Forschung zu den Umweltwirkungen von der Errichtungsphase notwendig. So ist es, wie auch bereits von [26] festgestellt, beispielsweise notwendig, nicht nur das in dieser Studie betrachtete Globale Erwärmungspotential zu ermitteln, sondern auch andere Umweltwirkungsindikatoren in Bezug auf Umweltwirkungen von Baustellen zu untersuchen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass durch die in diesem Projekt durchgeführte Datenaufnahme vor Ort, die Treibhausgasemissionen der Errichtungsphase für vier reale Wohnbauten in zwei unterschiedlichen Bauweisen ermittelt werden konnten. Auf Basis dieser Ergebnisse war es möglich bauweisenspezifische Stellschrauben zur Dekarbonisierung zu identifizieren und erste Hinweise für die Ausschreibung und Vergabe zu geben. So konnten erste Handlungsempfehlungen zur Dekarbonisierung von Baustellenlogistik und Prozessen ausgesprochen werden. Weitere Untersuchungen der Errichtungsphase in der Ökobilanzierung sind notwendig, um den Gebäudesektor und die zugehörigen Lieferketten in der Praxis Dekarbonisieren und so einen Beitrag zur Senkung der Treibhausgasemissionen liefern zu können.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Scope 1, Scope 2 und Scope 3 Emissionen in der Lieferkette von Unternehmen [10].....	1
Abbildung 1-2 Der Gebäudelebenszyklus und die damit in Verbindung stehenden grauen Emissionen (Scope 3) und Betriebsemissionen (Scope 1 und Scope 2) [17]	2
Abbildung 2-1 Iteratives Vorgehen im Forschungsprojekt zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen der Baustelle, basiert auf [15, 16]	6
Abbildung 3-1 Links: Übersicht über die vier Wohngebäude [©Münchner Wohnen], rechts: nahezu fertiggestellte Gebäude (links: Teil von Haus B, rechts vorne: Haus A, rechts hinten: Haus D).....	8
Abbildung 3-2 Gebäudelängsschnitt von Haus A - beispielhaft für die Massivbauweise	8
Abbildung 3-3 Gebäudelängsschnitt von Haus B - beispielhaft für die Holzbauweise	9
Abbildung 4-1 Untersuchtes Produktsystem für die Ökobilanz der Rohbauarbeiten der Baustelle	10
Abbildung 4-2 Blick von Kamera 1 (Bild links) und Kamera 2 (Bild rechts) auf die Baustelle.....	12
Abbildung 4-3 Mittels Software der Kamerafirma dargestellte tägliche Heatmap (Bild links) und Laufwege (Bild rechts) für die bessere Nachvollziehbarkeit der stattgefundenen Tätigkeiten	12
Abbildung 5-1 Volumenanteil [%] Bauweise der errichteten Häuser	14
Abbildung 5-2 Anzahl der Transporte (nur Hinfahrt) je Bauweise je m ² Nettoraumfläche	15
Abbildung 5-3 Distanzen der Transporte zur Baustelle je Bauweise je m ² Nettoraumfläche	15
Abbildung 5-4 Fertig ausgehobene Baugruben auf der Baustelle (Blick von Kamera 1)	16
Abbildung 5-5 Abfallmengen je Abfallkategorie je m ² Nettoraumfläche der vier betrachteten Gebäude.....	17
Abbildung 5-6 Prozentualer Anteil der Abfälle der vier betrachteten Gebäude des Holztafelelemente an jeweiligen Verwertungsweg	17
Abbildung 5-7 Menge des verbrauchten Heizöls für die Bauheizungen je Gebäude je m ² Nettoraumfläche	18
Abbildung 5-8 Stromverbrauch der Begleitheizung für das Bauwasser je Gebäude je m ² Nettoraumfläche	18
Abbildung 5-9 Bauholzmenge je Gebäude je m ² Nettoraumfläche.....	19
Abbildung 6-1 Globales Erwärmungspotential der Errichtungsphase der betrachteten Baustelle aufgeteilt in die Ergebnisse für das Modul A4 und das Modul A5.....	22
Abbildung 6-2 GWP-Ergebnisse der Module A4 und A5 je m ² Nettoraumfläche und Jahr für die Gebäude in Massivbauweise (Haus A, Haus D) und die Gebäude in Holzbauweise (Haus B, Haus C)	22
Abbildung 6-3 GWP-Ergebnisse der Module A4 und A5 je m ² Nettoraumfläche und Jahr für die Gebäude in Massivbauweise (Haus A, Haus D) und die Gebäude in Holzbauweise (Haus B, Haus C) je Aktivität.....	23
Abbildung 6-4 GWP-Ergebnisse der Module A4 und A5 je m ² Nettoraumfläche und Jahr für die Gebäude in Massivbauweise (Haus A, Haus D) und die Gebäude in Holzbauweise (Haus B, Haus C) je Bauweise	23
Abbildung 6-5 GWP-Ergebnisse der Module A4 und A5 je m ² Nettoraumfläche und Jahr für die Gebäude in Massivbauweise (Haus A, Haus D) und die Gebäude in Holzbauweise (Haus B, Haus C) je Bauweise und zugehöriger Verursacherkategorie.....	24

Abbildung 6-6 GWP-Ergebnisse des Moduls A4 je m ² Nettoraumfläche und Jahr für die Gebäude in Massivbauweise (Haus A, Haus D) und die Gebäude in Holzbauweise (Haus B, Haus C) je Bauweise	25
Abbildung 6-7 GWP-Ergebnisse des Moduls A4 je m ² Nettoraumfläche und Jahr für die Gebäude in Massivbauweise (Haus A, Haus D) und die Gebäude in Holzbauweise (Haus B, Haus C) je Verursacherkategorie.....	26
Abbildung 6-8 GWP-Ergebnisse des Moduls A5 je m ² Nettoraumfläche und Jahr für die Gebäude in Massivbauweise (Haus A, Haus D) und die Gebäude in Holzbauweise (Haus B, Haus C) je Aktivität.....	27
Abbildung 6-9 GWP-Ergebnisse des Moduls A5 je m ² Nettoraumfläche und Jahr für die Gebäude in Massivbauweise (Haus A, Haus D) und die Gebäude in Holzbauweise (Haus B, Haus C) je Verursacherkategorie.....	28
Abbildung 6-10 GWP-Ergebnisse des Moduls A5 je m ² Nettoraumfläche und Jahr für die Gebäude in Massivbauweise (Haus A, Haus D) und die Gebäude in Holzbauweise (Haus B, Haus C) je Bauweise	28
Abbildung 6-11 GWP-Ergebnisse des Moduls A5 je m ² Nettoraumfläche und Jahr für die Gebäude in Massivbauweise (Haus A, Haus D) und die Gebäude in Holzbauweise (Haus B, Haus C) je Bauweise und zugehöriger Verursacherkategorie.....	29

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1 <i>Aufwendungen für die Baustellenaktivitäten zur Errichtung der Stahlbetonbauteile je Haus je m² Nettoraumfläche</i>	19
Tabelle 5-2 <i>Aufwendungen für die Baustellenaktivitäten zur Errichtung der Mauerwerkswände der Häuser A und D je m² Nettoraumfläche</i>	20
Tabelle 5-3 <i>Aufwendungen für die Errichtungsprozesse der Holztafelelemente von Haus B bzw. C je m² Nettoraumfläche</i>	20
Tabelle 5-4 <i>Aufwendungen für die Errichtungsprozesse der Brettsperrholzelemente für Haus B bzw. C je m² Nettoraumfläche</i>	21
Tabelle 7-1 <i>Zusammenfassung der Handlungsfelder und zugehöriger Handlungsempfehlungen für die Projektplanung- und Steuerung</i>	35
Tabelle 7-2 <i>Zusammenfassung der Handlungsfelder und zugehöriger Handlungsempfehlungen für das Baugewerbe</i>	36

Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 15804:2020-03: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte. Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [2] DIN 277:2021-08: Grundflächen und Rauminhalte im Hochbau. Deutsches Institut für Normung e.V. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
- [3] Deutscher Bundestag (2021): Bundes-Klimaschutzgesetz. KSG, <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/>
- [4] Ramseier L., Frischknecht R. (2020): BBSR-Online-Publikation Nr. 17/2020, Umweltaußendruck von Gebäuden in Deutschland. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Referat II 5 – Nachhaltiges Bauen
- [5] Europäische Kommission (2019): Der europäische Grüne Deal. COM(2019) 640 final
- [6] Europäisches Parlament und Rat (2020): Verordnung EU 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18 Juni 2020 über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/2088. EU 2020/852, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0852>
- [7] Europäische Kommission (2021): Delegierte Verordnung (EU) 2021/2139 der Kommission vom 4. Juni 2021 zur Ergänzung der Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates durch Festlegung der technischen Bewertungskriterien, anhand deren bestimmt wird, unter welchen Bedingungen davon auszugehen ist, dass eine Wirtschaftstätigkeit einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz oder zur Anpassung an den Klimawandel leistet, und anhand deren bestimmt wird, ob diese Wirtschaftstätigkeit erhebliche Beeinträchtigungen eines der übrigen Umweltziele vermeidet. EU 2021/2139, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R2139>
- [8] Europäisches Parlament und Rat (2013): Richtlinie 2013/34/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Juni 2013 über den Jahresabschluss, den konsolidierten Abschluss und damit verbundene Berichte von Unternehmen bestimmter Rechtsformen und zur Änderung der Richtlinie 2006/43/EG des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Aufhebung der Richtlinien 78/660/EWG und 83/349/EWG des Rates. 2013/34/EU, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013L0034>
- [9] Europäisches Parlament und Rat (2022): Richtlinie (EU) 2022/2464 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Dezember 2022 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 537/2014 und der Richtlinien 2004/109/EG, 2006/43/EG und 2013/34/EU hinsichtlich der Nachhaltigkeitsberichterstattung von Unternehmen. (EU) 2022/2464, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022L2464>
- [10] World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development: Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard
- [11] World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development (2004): The Greenhouse Gas Protocol
- [12] Barrow M, Buckley B, Caldicott T et al. (2013): Technical Guidance on Calculating Scope 3 Emissions (version 1.0)
- [13] Kim K.-T., Kim I. (2021): The Significance of Scope 3 GHG Emissions in Construction Projects in Korea: Using EIA and LCA. Climate. 9

- [14] Onat N., Kucukvar M. et al. (2014): Scope-based carbon footprint analysis of U.S. residential and commercial buildings: An input–output hybrid life cycle assessment approach. *Build Environ.* 72
- [15] DIN EN ISO 14040:2021-02: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [16] DIN EN ISO 14044:2021-02: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen. Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [17] DIN EN 15978:2012-10: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode. Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [18] Institut Bauen und Umwelt e.V. (2023): Umwelt-Produktdeklaration. Beton der Druckfestigkeitsklasse C20/25
- [19] Wieneberger GmbH: Fühle den Wandel, https://www.wienerberger.de/informationen/wand/klimaneutrale_ziegel.html
- [20] Slosarek B, Dlouhy J et al. (2021): Tackling the Sustainability of Construction Processes: An Environmental Assessment Method
- [21] Vacek P., Struhala K. et al. (2017): Life-cycle study on semi intensive green roofs. *J Clean Prod.* 154
- [22] Schneider T. (2022): Rechtsgutachten umweltfreundliche öffentliche Beschaffung
- [23] Österreichische Gesellschaft für Nachhaltige Immobilienwirtschaft – ÖGNI GmbH, Austrian Sustainable Building Council (2024): Die nachhaltige Baustelle - Status Quo und Science-Fiction, Wien
- [24] Kanafani K., Magnes J. et al. (2023): Carbon Emissions during the Building Construction Phase: A Comprehensive Case Study of Construction Sites in Denmark. *Sustainability.* 15
- [25] Hong J., Shen G. et al. (2015): Greenhouse gas emissions during the construction phase of a building: a case study in China. *J Clean Prod.* 103
- [26] Obernosterer R., Lepuschitz B. et al. (2021): Die CO₂ neutrale Baustelle. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), Villach (Austria)
- [27] Ays I. (2019): Validierung und Optimierung einer praxisgerechten Methode zur Quantifizierung der CO₂-Emissionen für eine Nachhaltigkeitsbewertung von Bauprozessen. Institut für Fahrzeugsystemtechnik FAST, Karlsruhe
- [28] Weigert M., Raab J. et al. (2023): Sondierung zur Durchführbarkeit CO₂-neutraler Demonstrationsbaustellen. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), Wien
- [29] Steger S., Ritthoff M. et al. (2018): Stoffstromorientierte Ermittlung des Beitrags der Sekundärrohstoffwirtschaft zur Schonung von Primärrohstoffen und Steigerung der Ressourcenproduktivität. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Wuppertal. Öko-Institut e.V., Darmstadt. Umwelt- und Energie-Consult GmbH, Dessau-Roßlau
- [30] Frederichs M (2023): Kreislaufwirtschaft Bau
- [31] Kirschstein A. (2025). Dissertation, unveröffentlicht, Technische Universität München
- [32] Krištofič S (2023): Forschung zum Thema Elektrizität auf Baustellen, https://www.h2.de/fileadmin/user_upload/Fachbereiche/WKW/Daten_Mitarbeiter/Harborth/Kristofic_-_Poster_Forschung_28.6.2023.pdf
- [33] Erol H., Dikmen I. et al. (2016): Measuring the impact of lean construction practices on project duration and variability: A simulation-based study on residential buildings. *Journal of Engineering and Management.* 23

- [34] Baublatt Österreich (2022): Pilotprojekt für Energie-autarke Baustelle,
<https://baublatt.at/pilotprojekt-fuer-energie-autarke-baustelle/>
- [35] Fikri Hasmori M., Faizul Md Zin A. et al. (2020): The on-site waste minimization practices for construction waste. IOP Conf Ser.: Mater Sci Eng. 713
- [36] Bee Smart City (2023): Zero-Emission Construction Sites,
<https://www.beesmart.city/en/smart-city-blog/zero-emission-construction-sites>

Anhang 1 – Verwendete Datensätze

Tabelle 1 – Anhang 1 zeigt die für die Wirkungsabschätzung in dieser Studie verwendeten Datensätze.

Tabelle 1 – Anhang 1 Für die Wirkungsabschätzung verwendete Datensätze

Beschreibung	Datensatz	Quelle
Abfall		
Bauschutt Betonabfälle Gemischte Baustellenabfälle	DE: Construction waste processing (EN15804 C3) DE: Construction waste dumping (EN15804 C4)	Sphera Solutions, Inc.
Holzabfälle- Abfallbehandlung	DE: Municipal waste landfill (EN15804 C4)	Sphera Solutions, Inc
Holzabfälle- Abfalldeponierung	DE: Municipal waste landfill (EN15804 C4)	Sphera Solutions, Inc
Metallabfälle	End of Life of steel profiles	Sphera Solutions, Inc
Folie	Plastic incineration	Sphera Solutions, Inc
Dieselbetriebene Geräte (oder Heizöl)		
Baugrubenaushub	DE: Excavator (100kW sandy soil)	Sphera Solutions, Inc
Dieselbetriebene Geräte	DE: Diesel mix at filling station	Sphera Solutions, Inc
Bauheizung	DE: Light fuel oil at refinery (EN15804 B6)	Sphera Solutions, Inc
Betonpumpe	DE: Pumping of concrete (EN 15804 A5)	Sphera Solutions, Inc
Strom		
Stromverbrauch auf der Baustelle	Electricity grid Mix 2021	Sphera Solutions, Inc
Transport		
Klein-LKW	Small-Truck	Sphera Solutions, Inc
LKW	Truck	Sphera Solutions, Inc
LKW-Zug	Truck-Trailer	Sphera Solutions, Inc
Hilfsmittel		
Bauholz-Herstellung	DE: Solid construction timber (softwood) (EN15804 A1-A3) (15% moisture; 13% H2O content) 1kg DE: Chipboard P5 (8.5% moisture) 1m3	Sphera Solutions, Inc
Folie	DE: Underroofmembrane PP	Sphera Solutions, Inc
Schalöl	DE: Crude oil mix Sphera	Sphera Solutions, Inc

Anhang 2 – Data Management Plan

Informationen zum durchgeführten Forschungsprojekt sind untenstehender Tabelle 1 – Anhang 2 zu entnehmen.

Tabelle 1 – Anhang 2 Allgemeine Informationen zum durchgeführten Forschungsprojekt

Information	Beschreibung
Name des Forschungsprojektes	DecarbBaustelle: Handlungsansätze zur Dekarbonisierung von Baustellenlogistik und -prozessen anhand zweier typischer Bauweisen für Wohnbauten Ein Baustein auf dem Weg zum klimaneutralen Wohnungsbau
Förderung durch	Deutsche Bundesstiftung Umwelt An der Bornau 2 49090 Osnabrück
Förderkennzeichen	AZ 38075/01-25
Projektlaufzeit	Februar 2022 bis März 2024
Ansprechperson	Anna Kirschstein Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion School of Engineering and Design Technische Universität München Email: anna.kirschstein@tum.de Wissenschaftliche Mitarbeitende

Im Forschungsprojekt *DecarbBaustelle*, das von der Deutschen Bundesstiftung unter dem Förderkennzeichen AZ 38075/01-25 gefördert wurde, kamen unterschiedliche Datenquellen zum Einsatz. Ziel dieses Forschungsprojekts war es die Treibhausgasemissionen einer spezifischen Baustelle zu ermitteln und eine Ökobilanz der Errichtungsphase dieser Baustelle durchzuführen. Anhand der Ergebnisse sollten bauweisenspezifische Stellschrauben identifiziert werden, um dann Hinweise für die Ausschreibung und Vergabe gegeben und Handlungsempfehlungen zur Dekarbonisierung für Projektplanung und -steuerung sowie das Baugewerbe geben zu können.

Zur Aufnahme der Sachbilanzdaten wurden unternehmenseigene Daten und Informationen der beteiligten Firmen zur Verfügung gestellt. Außerdem wurden für das Ermitteln der Sachbilanzdaten die in Tabelle 2 – Anhang 2 aufgenommenen Daten verwendet. Zwei Kameras unterstützten hier die Datenaufnahme vor Ort. Für die Wirkungsabschätzung wurden fertige Datensätze einer Ökobilanzsoftware entnommen (siehe Tabelle 1 – Anhang 1).

Tabelle 2 – Anhang 2 Information zum Datenmanagement für das Projekt DecarbBaustelle

Daten	Datenmanagement
Baustellendaten	<p>Die für die Ermittlung der Treibhausgasemissionen der Errichtungsphase erhobenen Daten sind in Kapitel 4.4 genauer beschrieben. Eine Auswertung der erhobenen Daten ist dann in Kapitel 5 anhand der Sachbilanz der durchgeführten Ökobilanz dargestellt. Aufgrund der Verwendung firmenspezifischer Daten können hier keine weiteren Informationen zur Verfügung gestellt werden.</p> <p>Folgende Datenquellen wurden verwendet:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Datenaufnahme und Dokumentation vor Ort - Stromdaten (Stromzähler, 15-Minütig gemittelte Wirkleistungsdaten) - Kameradaten (2 Videokameras auf der Baustelle mit online-Speicherfunktion) - Daten von herstellenden und zuliefernden Unternehmen - Von bei der Planung beteiligten Unternehmen unterschiedlicher Disziplinen wie Architektur und Statik zur Verfügung gestellte Unterlagen und Informationen - Unterlagen beteiligter Bauunternehmen (Produktdatenblätter, Plan- und Ausführungsunterlagen, etc.) - baustellenspezifische Daten und Erfahrungswerte durch Datenaustausch (Bautagebücher, Rechnungen, Lieferscheine, etc.) und Interviews mit der Bauleitung und Projektsteuerung der untersuchten Baustelle und weiterer am Bau beteiligter Personen - Erfahrungswerte von Expertinnen und Experten - Literaturdaten - ...
Kameradaten	<p>Die erhobenen Kameradaten für die beiden Kameras auf der Baustelle sind auf Servern des Lehrstuhls für Holzbau und Baukonstruktion gespeichert und können auf Anfrage am Lehrstuhl und in Abstimmung mit der Münchner Wohnen GmbH für weitere wissenschaftliche Untersuchungen, deren Ergebnisse und Daten <i>open source</i> veröffentlicht werden, zur Verfügung gestellt werden. Es stehen täglich aufgenommene Zeitrafferaufnahmen im <i>mp4</i>-Format zur Verfügung. Die einzelnen Dateien sind wie folgt benannt:</p> <p><i>gwg_001_CameraX_JJJJ-MM-DD.mp4</i></p> <p><i>X...Kameranummer</i> <i>JJJ...Jahr</i> <i>MM...Monat</i> <i>DD...Tag</i></p>
Datensätze für die Wirkungsabschätzung	<p>Die bei der Ökobilanz für die Wirkungsabschätzung verwendeten Datensätzen wurden der Software und Datenbank <i>LCA for Experts</i> von <i>Sphera Solutions Inc.</i> entnommen. Bei dieser Software handelt es sich um eine Bezahlversion. Die Namen der verwendeten Datensätze können Anhang 1 entnommen werden. Weitere datensatzspezifische Informationen sowie die zugehörigen Umweltwirkungen je Referenzeinheit können dann eigenständig mittels einer gültigen Lizenz eingesehen werden.</p>