

Modularer Wohnungsbau im Vergleich zum konventionellen Wohnbau: Eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsanalyse

Masterthese zur Erlangung des akademischen Grades
“Master of Engineering”

eingereicht bei
Ass. Prof. DI Dr. techn. Stieldorf Karin

Dipl. Ing. Alexander Mayer

12128871

Wien, 22.09.2023

Eidesstattliche Erklärung

Ich, **DIPL. ING. ALEXANDER MAYER**, versichere hiermit

1. dass ich die vorliegende Masterthese, "MODULARER WOHNUNGSBAU IM VERGLEICH ZUM KONVENTIONELLEN WOHNBAU: EINE GANZHEITLICHE NACHHALTIGKEITSANALYSE", 109 Seiten, gebunden, selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfen bedient habe, und
2. dass ich das Thema dieser Arbeit oder Teile davon bisher weder im In- noch Ausland zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Wien, 22.09.2023

Unterschrift

Danksagung

Zunächst möchte ich mich an dieser Stelle bei all denjenigen bedanken, die mich während der zwei Jahre dieses Masterstudiums und der Anfertigung der vorliegenden Masterthesis unterstützt haben.

Als erstes gebührt mein aufrichtiger Dank Frau Prof. Dr. Karin Stieldorf, die meine Masterarbeit betreut und begutachtet hat. Für die hilfreichen Anregungen und die Offenheit gegenüber diesem speziellen Thema sowie die Unterstützung und konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich herzlichst bedanken.

Des Weiteren möchte ich mich bei der Geschäftsführung der HEBERGER Holding und der HEBERGER GmbH bedanken, die mir durch die Finanzierung des Studiengangs „Nachhaltiges Bauen“ überhaupt erst die Anfertigung dieser Masterarbeit ermöglicht haben.

Ein besonderer Dank gilt auch der Geschäftsleitung der HEBERGER Hoch-, Tief- und Ingenieurbau GmbH, die mit ihrer Unterstützung sowie dem notwendigen Freiraum sehr dazu beigetragen haben, die Arbeit in dieser Form abzuschließen.

Ebenfalls möchte ich mich bei dem Team Modulbau um Mirko Seidel sowie den übrigen Mitarbeiter*innen der HEBERGER Gruppe bedanken, die mir mit viel Geduld, Interesse und Hilfsbereitschaft zur Seite standen. Bedanken möchte ich mich für die zahlreichen interessanten Debatten, Ideen und Informationsbeschaffungen, die maßgeblich dazu beigetragen haben, dass diese Masterarbeit in dieser Form vorliegt.

Außerdem gebührt ein herzlicher Dank Franziska Rohde für die moralische Unterstützung sowie das Korrekturlesen meiner Masterarbeit.

Schließlich möchte ich mich bei meiner Familie, meinen Kommilitonen des Studiengangs sowie Wegbereitern bedanken, die mich im Zeitraum des Studiums und der Masterarbeit unterstützt haben und diese Zeit zu einem unvergesslichen Abschnitt meines Lebens gemacht haben.

Kurzfassung

Schlagwörter: Beton-Modulbau; konventioneller Wohnbau; quantitativer Vergleich; Nutzwertanalyse, Baustellenemission, Transportemission, Arbeitsschutz

Der serielle Modulbau ist ein alternativer Ansatz aus der Baubranche. Er beruht darauf, in der Fabrik vorgefertigte Module auf die Baustelle zu transportieren und, im Vergleich zum konventionellen Bau, schnell als Gebäude zu errichten. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Aspekten der Nachhaltigkeit des vollständigen Bauprozesses eines Modul-Gebäudes. Dieser wird zur besseren Einordnung einem konventionellen Bau gegenübergestellt. Die Motivation der Arbeit ist es, aufzuzeigen, dass der Modulbau in der Gesamtansicht der Nachhaltigkeit keine Nachteile gegenüber dem konventionellen Bau besitzt.

Als Grundlage für die ganzheitliche Betrachtung der Nachhaltigkeit dient das „3-Säulen-Modell“ mit den drei Bereichen Ökologie, Ökonomie und Sozialität. Anhand dieser werden die Kriterien für den Vergleich entwickelt und später auch zugeordnet. Im Hauptteil dieser Arbeit wird jedes dieser Kriterien für den Modulbau und ein konventionelles Gebäude untersucht. Als Quellen hierfür dienen Werte aus der Literatur, Werte und Erfahrungen aus dem Bauunternehmen sowie Herleitungen und Annahmen. Durch eine Quantifizierung der Ergebnisse können somit am Ende jedes Kriteriums die beiden Bauarten verglichen werden.

Für die finale Bewertung wurde eine Gewichtung der Kriterien in Zusammenhang mit einer Nutzwertanalyse durchgeführt. Das Ergebnis der Nutzwertanalyse weist in Summe zwei Werte als Verhältnis auf. Aus diesem Verhältnis kann geschlossen werden, welche der beiden Varianten in Hinsicht auf die ganzheitliche Betrachtung die nachhaltigere ist.

abstract

Serial modular construction is an alternative approach in the construction industry. It is based on transporting modules prefabricated in the factory to the construction site and building them quickly compared to conventional construction. This thesis focuses on the sustainability aspects of the complete construction process of a modular building from concrete. For better classification, this is compared to a conventional building. The motivation of the thesis is to show that modular buildings have no disadvantages in comparison to conventional buildings from an interdisciplinary sustainable point of view.

The basis for the total view of sustainability is the "3-Pillar-Model" with the three sections of ecology, economy, and sociality. Based on these, the criteria for comparison are developed and later allocated. In the main part of this thesis, each of these criteria is examined for a modular building and a conventional building. Literature values, values, and experiences from the construction company, as well as derivations and assumptions, serve as sources for this. By quantifying the results, it is possible to compare the two types of construction at the end of each criterion.

For the final evaluation, a weighting of the criteria was carried out in relation to a utility value analysis. The result of the utility value analysis shows a total of two values in a relationship. From the comparison, it can be concluded which of the two variants is more sustainable from a general point of view.

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeiner Teil.....	1
1.1	Einleitung.....	1
1.2	Motivation	2
1.3	Hypothese.....	2
1.4	Aufbau der Arbeit.....	3
1.5	Angewandte Methoden.....	3
1.5.1	Experteninterviews	3
1.5.2	Literaturrecherche	4
1.5.3	Quantitative Analyse.....	4
1.5.4	Nutzwertanalyse	5
2	Allgemeine Grundlagen.....	6
2.1	Die Entwicklung vom Fertighaus zum Modulbau.....	6
2.2	Grundlagen	7
2.3	Der ökologische Fußabdruck.....	7
2.3.1	Grundlagen der Ermittlung	7
2.3.2	Eigenschaften der verschiedenen Phasen	9
2.4	Weiter Betrachtungsmöglichkeiten der Nachhaltigkeit.....	11
2.4.1	Zeitmanagement.....	11
2.4.2	Energieverbrauch.....	12
2.4.3	Ökonomische Betrachtung	14
2.4.4	Flächenausnutzung	15
2.4.5	Arbeitssicherheit.....	16
2.5	Vergleich und Einstufung der Wertigkeit	18
3	Ermittlung der Kriterien anhand eines Beispiels	20
3.1	Der ökologische Fußabdruck.....	20
3.1.1	Investitionsemissionen der Phasen A1- A3.....	20
3.1.2	Transportwege	27
3.1.3	Wiederverwendung und Recycling	33
3.2	Zeitliche Betrachtung.....	37
3.3	Energetische Betrachtung	40
3.4	Ökonomische Einflüsse	46

3.4.1	Baukosten im Roh- und Innenausbau	46
3.4.2	Ausnutzung der Fläche.....	51
3.5	Soziale Einflüsse	53
3.5.1	Arbeitsschutz.....	53
3.5.2	Gesundheitliche Langzeitwirkungen.....	55
3.5.3	Bewertung der Qualität	57
4	Auswertung der Ergebnisse	60
4.1	Gewichtung der einzelnen Werte	60
4.2	Nutzwertanalyse	61
4.3	Bewertung der Nutzwertanalyse.....	62
5	Conclusio.....	64
5.1	Zusammenfassung.....	64
5.2	Kritische Diskussion	65
5.3	Ausblick	67
6	Literaturverzeichnis	69
7	Abkürzungsverzeichnis	75
8	Abbildungsverzeichnis.....	76
9	Tabellenverzeichnis	77
10	Anhangsverzeichnis	78

1 Allgemeiner Teil

1.1 Einleitung

„Wohnungsmangel in Deutschland, so hoch wie seit 30 Jahren nicht mehr - Der Deutsche Mieterbund warnt, die Lage auf dem deutschen Wohnungsmarkt werde "immer dramatischer". Einer Studie zufolge fehlen bundesweit 700.000 Wohnungen.“ Dies war die Titelschlagzeile der Onlineausgabe der Wochenzeitung „Die Zeit“ im Januar 2023 (Boddenberg, 2023). Eine Problematik, die durch die weltweiten Krisen und durch stetige Zuwanderung nochmals verschlimmert wird. Doch wie kann das Problem gelöst werden und wer kann sich überhaupt noch eine Wohnung oder ein Haus leisten?

Eine Lösung bietet der Modulbau, bei dem es sich um vorgefertigte Häuser handelt, welche schnell auf der Baustelle montiert werden können. Dies war auch der Grundgedanke von Prof. Werner Sobek, der ein „individualisiertes, bezahlbares Wohnhaus“ in Stuttgart entworfen hat. Er gab dieser Idee den Namen „Volkshaus“ abgeleitet vom Volkswagen. (Bayerischer Rundfunk, 2019)

Der Grundgedanke wirkt auf den ersten Blick wie die fundamentale Lösung aller Probleme. Jedoch gibt es auch genug Gegenstimmen, die den Modulbau mit dem „Plattenbau“ der DDR vergleichen. Auch wird immer wieder angezweifelt, ob die Montage und die Produktion in der Art und Weise wirklich besser sind. Hinzu kommt, dass der Modulbau oft nur als Lösung für Notunterkünfte gesehen wird und wenn der Modulbau als normales Gebäude gebaut wird, sehr viel Fläche und somit auch Mieteinnahmen und Lebensqualität verloren gehen.

Um eine tatsächliche Lösung für die oben genannte Problematik zu bieten, müssen in der Modulbauindustrie noch einige Aufgaben gelöst und Vorurteile abgearbeitet werden. Um dies zu erreichen, müssen zum einen Akzeptanz und Anerkennung in der Bevölkerung für diese Bauweise gewonnen werden. Zum anderen müssen die Techniken so optimiert werden, dass ein Modulgebäude eine gleichwertige Alternative zum konventionellen Bau darstellen kann. Eine Option, dies zu meistern, ist das Thema der Nachhaltigkeit. Denn die Nachhaltigkeit wird immer wichtiger und mit einem nachhaltigen Produkt kann zugleich für mehr Sympathie und Akzeptanz geworben werden.

1.2 Motivation

Die HEBERGER Gruppe spielt mit dem Gedanken, in den Modulbau zu investieren und eine eigene Produktion aufzubauen. Da die Gruppe Beton-Fertigteilwerke besitzt, sieht sie die größte Stärke der Firma im Stahlbetonbau. Aus diesem Grund ist es auch die erste Option, ein Stahlbeton-Modul zu entwickeln. Dies birgt aufgrund des Klimawandels und der Auflagen von EU und Bundesregierung Risiken.

Daher beschäftigt sich diese Arbeit mit der Nachhaltigkeit von Betonmodulen. Ziel ist es, alle drei Bereiche der Nachhaltigkeit (siehe *Abbildung 1*) zu bewerten, um eine ganzheitliche Aussage über die Produktion von Betonmodulen zu erstellen. Dabei soll vor allem der Bereich der sozialen Nachhaltigkeit mit einbezogen werden, da dieser oft in der Wirtschaft nur oberflächlich behandelt wird.

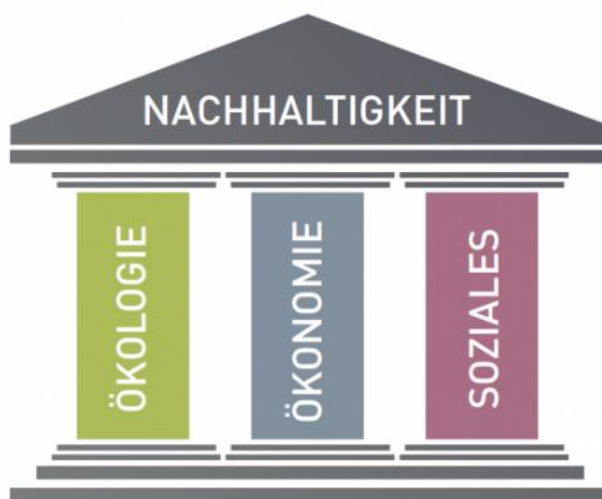


Abbildung 1 Die drei Säulen der Nachhaltigkeit (Ibu, 2023)

Anhand der Ergebnisse können erste Rückschlüsse gezogen werden und einigen Vorurteilen entgegengewirkt werden.

1.3 Hypothese

Da die Nachhaltigkeit sehr viele Ansätze besitzt, welche in die verschiedenen Bereiche einfließen, ist es schwierig, die Nachhaltigkeit nur für ein Objekt oder ein Kriterium zu definieren. Daher ist es wichtig, eine Benchmark zu definieren, welche die Nachhaltigkeit einordnet. Hierfür dient am besten ein von der Bauart her gängiges Gebäude, welches sowohl den Baustandards in Deutschland genügt als auch bei der Bevölkerung ein Ansehen besitzt. Um eine allgemeingültige Aussage zu treffen, ist es

wichtig, dass der Vergleich in allen Bereichen objektiv und ganzheitlich durchgeführt wird.

Demnach wird die These aufgestellt, dass sich der Modulbau in der Summe der einzelnen verglichenen Kriterien der Nachhaltigkeit auf gleichem oder gar nachhaltigerem Niveau befindet als ein konventionelles Wohngebäude nach deutschen Standards.

1.4 Aufbau der Arbeit

Im ersten Teil der Arbeit werden die historischen Wurzeln sowie die Grundlagen der Arbeit erläutert. Weiterhin werden die allgemeinen Grundlagen für die Bewertungskriterien analysiert und erste allgemeinen Daten aus der Literatur übernommen und definiert.

Der Hauptteil der Arbeit besteht aus einem Variantenvergleich. Hierbei werden die beiden Varianten auf verschiedene Kriterien hin untersucht und quantifiziert. Die Ergebnisse werden im Anschluss in Relation miteinander gesetzt.

Zur Ergebnisfindung werden die Kriterien für eine objektive Vergleichbarkeit nach den drei Kriterien und ihrer Wertigkeit eingeordnet, um eine finale Aussage zu ermitteln.

Zum Abschluss wird die Ergebnisfindung nochmals kritisch beleuchtet und weitere Möglichkeiten für die Zukunft dargestellt.

1.5 Angewandte Methoden

In diesem Abschnitt werden die in dieser Arbeit angewandten Methoden und deren Anwendung allgemein erklärt und beschrieben. Der Autor fokussiert sich hierbei auf die wesentlichen Methoden. Weitere Methoden können in der vorliegenden Arbeit jedoch angewandt werden, um zu dem gewünschten Ergebnis zu gelangen.

1.5.1 Experteninterviews

Das Experteninterview ist eine Methode, welche sich Anfang der 1990er Jahre entwickelt hat. Sie ist eine empirische qualitative Forschungsmethode, um Expertenwissen besser zu erforschen und hinterlegen. Besonders häufig wird diese

Methode in den sozialwissenschaftlichen Disziplinen angewandt, findet allerdings auch immer mehr in anderen Bereichen hohen Anklang. (Bogner et al., 2009)

Für diese Art der Datenerhebung werden Experten/-innen zu den Themen der wissenschaftlichen Arbeit definiert. In der vorliegenden Thesis handelt es sich dabei um die Themen Nachhaltigkeit und modulares Bauen. Im Anschluss daran werden Fragen entwickelt, um Thesen und Ergebnisse zu stützen und offene Lücken in der Ergebnisbetrachtung zu füllen. Die Interviews können in jeglicher Form der Kommunikation durchgeführt werden. Wichtig ist, dass diese am Ende dokumentiert und als Quelle in die Thesis eingearbeitet werden.

1.5.2 Literaturrecherche

Die Literaturrecherche ist die fundamentalste Forschungsmethode und wird im Allgemeinen bei allen akademischen Arbeiten angewandt. Ihre Hauptaufgabe besteht darin, die eigene Forschung anhand vorhandenen Wissens aufzubauen und dieses zu relativieren. (Snyder, 2019, S. 334)

Allgemein definiert nach Baumeister und Leavy dient diese Methode dazu, in einer systematischen Art und Weise frühere Forschungsergebnisse zu sammeln, zusammenzufassen und mit der aktuellen Thematik zu verbinden (Baumeister & Leary, 1997, S. 311) Aus diesem Grund findet eine Literaturrecherche auch in den meisten akademischen Arbeiten am Anfang statt. Somit erhält der Leser auch ohne vorherige Kenntnis eine Basis an Wissen.

Neben den Grundlagen ist die Literaturrecherche ebenfalls charakteristisch, um Vergleiche zu eigenen Ergebnissen zu ziehen. Somit können bestimmte Resultate und deren Genauigkeit in den diversesten Bereichen bewertet und bestätigt oder Verbindungen zu konkurrierenden Theorien geknüpft werden (Tranfield et al., 2003). Da die Thematik des modularen Bauens noch relativ jung ist, sind beide Anwendungen der Methode ein fundamentales Mittel dieser Arbeit.

1.5.3 Quantitative Analyse

In der Literatur gibt es verschiedene Definitionen der quantitativen Analyse. Eine für diese Arbeit zutreffende Definition stammt von Creswell und beschreibt die Analyse als das Sammeln von numerischen Daten, um diese mit mathematischen Methoden zu analysieren und zu bewerten (Creswell, 1994).

Dass eine Definition nicht eindeutig möglich ist, zeigt sich ebenfalls in dieser Arbeit, da bei der Erarbeitung von Ergebnissen induktive und deduktive Forschung notwendig sind. Diese Forschungsansätze unterstützen mit ihren Aussagen eine weitere Methode: Die Fallstudie. Aus ihr können dann die empirischen Daten gewonnen werden, welche zu allgemein gültigen Aussagen weiterentwickelt werden können und eine Einordnung im Rahmen der Arbeit möglich machen.

1.5.4 Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse ist eine Methode, welche aufgrund ihrer Simplizität und Transparenz zur Entscheidungsvorbereitung angewandt wird (Witte, 1978, S. 490). Am besten lässt sich diese anhand einer Tabelle darstellen, in der die verschiedenen Kriterien aufgelistet und nach ihrer relativen Bedeutung gewichtet werden (Thormählen, 1977, S. 638).

Der Vorteil dieser Methode ist, dass in ihr sowohl quantitative als auch qualitative Ergebnisse zusammengefasst werden können und somit eine finale Aussage getätigt werden kann. Je nach Fall der Analyse können durch Iterationen die Resultate verbessert werden. Dabei können sowohl die Gewichtung als auch die Kriterien verändert werden. Da die individuelle Gewichtung allerdings eine sehr subjektive Einordnung ist, sollte dies auch immer in der finalen Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

2 Allgemeine Grundlagen

2.1 Die Entwicklung vom Fertighaus zum Modulbau

In der Geschichte der Menschheit waren Nomadenvölker schon 400.000 v. Chr. ständig unterwegs auf der Suche nach neuen Lebensräumen mit besseren Nahrungsquellen und Lebensbedingungen. Vor Ort eigneten sie sich, im Bewusstsein bald weiterzuziehen, an, aus Hölzern, Laubwerken und Tierfellen Behausungen zu bauen. Im Laufe der Zeit entwickelten sich sowohl die Anforderungen an das Wohnen selbst als auch die Materialien, die resistenter und langlebiger wurden. Ende des späten Mittelalters bzw. zu Beginn der Renaissance entwickelten findige Baumeister Systeme aus Holz, welche in Teilen vorgefertigt und an verschiedenen Orten aufgebaut werden konnten. Einer dieser Baumeister war Leonardo da Vinci, der um 1490 ein vorgefertigtes Haus, die „Casa Mutabile“, entwickelte und dieses am Ufer des Tigris zusammensetzte (Bundesverband Deutscher Fertighaus e. V., 2007). Durch die industrielle Revolution wurden Stahl und Stahlskelettbau durch seine Stabilität immer attraktiver. Mitte des 19. Jahrhunderts entwickelte Joseph Monier erste patentierte Konstruktionen aus Eisen und Beton und gilt somit als einer der Urväter der Stahlbetonbauweise (Seim, 2018, S. 8). François Hennebique nutzte diese Kenntnis und entwarf 1896 für die französische Eisenbahn ein Bahnwärterhäuschen aus Beton (siehe Abbildung 2), welches als die erste feuerfeste Raumzelle aus Stahlbeton angesehen werden kann (Maurer, 2007). Bis heute haben sich sowohl die Nachfrage als auch die Wohnanforderungen stetig weiterentwickelt und perfektioniert. Die häufigsten Materialien sind immer noch Holz, Stahl und Stahlbeton. Diese werden sowohl im Fertigteile- bzw. Systembau als auch im Zellen- bzw. Modulbau angewandt und auch mit anderen Materialien kombiniert.

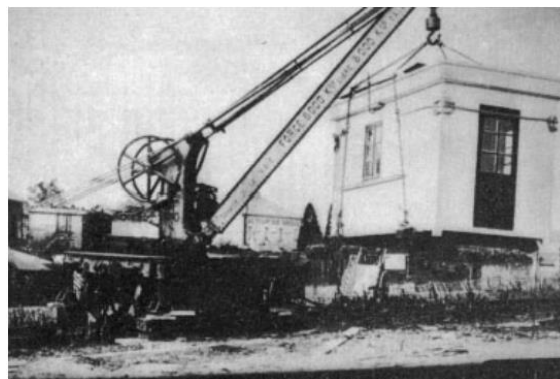


Abbildung 2 Vorgefertigtes Bahnwärterhaus (um 1900) (Bergmeister & Fingerloos, 2009, S. 157)

2.2 Grundlagen

Als Grundlage dieser Arbeit ist ein geplanter Prototyp der Firma Heberger gewählt worden. Dieser ist in der Abbildung 3 mit zwei dieser Module zu einem Wohnraum zusammengefügt worden. Dies soll die Grundidee für die Erstellung von Wohnmodulen bilden. Als weitere Randbedingung ist die Dimensionierung durch den Transport gegeben. In Abbildung 4 sind die möglichen Einschränkungen des Verkehrs aufgezeigt. Hierbei ist das Ziel, zusätzlichen Kosten durch vermehrte Sondertransporte zu vermeiden sowie eine wirtschaftliche und statisch realisierbare Lösung zu finden. Daher besitzen die Module eine maximale Bemaßung von 3,50 m Breite, 2,90 m Höhe und 8,50 m Länge. Laut Expertenangaben „können die Module in Rasterschritten von 0,25 m produziert werden, um die Beispielbarkeit der Flächen im Vergleich zu einem konventionellen Bau zu verbessern.“ (siehe Experteninterview Anhang A Frage 1&2).



Abbildung 3 3D-Darstellung des Prototyps in Autodesk Revit

	B 2,55 m H 2,90 m L 13,60 m	B 3,00 m H 2,90 m L 30,00 m	B 3,50 m H 2,90 m L 12,50 m	B 4,00 m H 3,10 m L 12,50 m	B 4,20 m H 4,20 m L 12,50 m	B 4,50 m H 4,20 m L 12,50 m	B 5,50 m H 4,20 m L 12,50 m
Genehmigung	keine		Ausnahmegenehmigungen erforderlich Meistens sind Dauergenehmigungen vorhanden.				
Begleitfahrzeug			Begleitfahrzeug auf Bundesstraßen erforderlich				
Polizeibegleitung			Auf Autobahnen: in A immer, in D, CH teilweise Polizeibegleitung in D, CH immer mit Polizeibegleitung				
Sonstiges			Tiefaderkombination				

Steckerprüfung im Vorhinein

Abbildung 4 Transportvorgaben von Raummodulen (Kaufmann et al., 2022)

2.3 Der ökologische Fußabdruck

2.3.1 Grundlagen der Ermittlung

Um die Auswirkung auf die Umwelt zu bewerten, wird die Methodik der Ökobilanzierung bzw. Lebenszyklusanalyse (englisch life cycle assessment) angewendet. Für eine Bilanzierung wird dabei der gesamte Lebensweg eines Produktes berücksichtigt und verschiedene Umweltauswirkungen ermittelt (Knabe et al., 2023, S. 94). Da die Regeln für eine Ökobilanzierung je nach gesetzlichen oder normgerechten Prüfungen verschiedene Grundlagen und Rahmenbedingungen haben, werden diese in der vorliegenden Thesis für eine objektive Arbeit im Voraus definiert.

Eine Ökobilanzierung besteht aus verschiedenen Phasen des Lebensweges. Die Phase A beinhaltet die Herstellung sowie den Transport. Phase B umfasst alle Auswirkungen der Nutzung und Phase C und D die Entsorgung bzw. die Wiederverwertung. Alle Phasen sind in *Abbildung 5* dargestellt.

Für einen Vergleich zwischen einem Gebäude aus Modulen und einem konventionellen Gebäude wird die Annahme getroffen, dass der Bedarf und der Verbrauch der Bewohner in dem Gebäude, sowie die Wartung und Instandhaltung in der Nutzungsphase gleichwertig ist. Aus diesem Grund besitzt die Analyse der Nutzungsphase keine Relevanz und wird im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

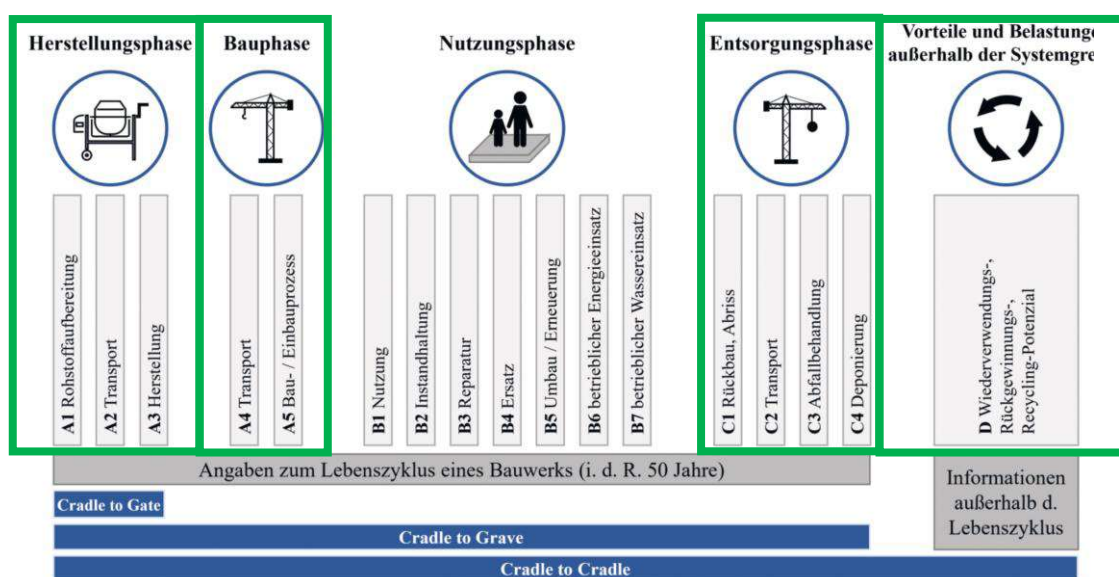


Abbildung 5 Darstellung der Lebenszyklusphasen angelehnt an die DIN EN 15804 (Heckmann & Glock, 2023, S. 111) und Markierung der relevanten Phasen

Bei der Betrachtung der Phasen wird der quantitative Wert des Umweltfußabdrucks, der CO₂-Wert (Global Warming Potential, kurz GWP) in kg/CO₂equ. als relevanter Indikator definiert. Als Hilfe für die Berechnungen wird das Online-Tool *eco2soft* von *baubook.at* verwendet. Hierbei können mithilfe vereinfachter Eingaben und durch einen vordefinierten Bauteilkatalog gängige Ökokennzahlen ermittelt werden (Figl & Florit 1, 2023). Die Daten für einen Bauteilkatalog sind geprüft und stammen aus den Hintergrunddatenbanken *GaBi*, nach Richtlinien der *ÖkobaDat* sowie *ecoinvent*-Datenbank ((Figl & Florit 2, 2023). Durch die Vorgaben des Programms werden ebenso die funktionalen Einheiten definiert. Diese beschreiben und skalieren den quantitativen Nutzen des untersuchenden Produktes (Frischknecht, 2020, S. 30).

2.3.2 Eigenschaften der verschiedenen Phasen

Da es sich beim Rohbau hauptsächlich um Stahlbeton handelt, liegt der Fokus in der Herstellungsphase A1 bis A3 auf den Produkten Stahl und Beton und es können Vorteile zwischen den Varianten ausgewertet werden. Ziel ist es in dieser Arbeit, Unterschiede zwischen den Herstellungsprozessen aufzuzeigen, da auch die Produktion und der Transport der Rohstoffe Teil der „grauen Energie“ sind. Bei der „grauen Energie“ handelt es sich gemäß der SIA 2032 um die Summe der nicht erneuerbaren Primärenergie aus den entsprechenden Werten aller Bauteile (Gugerli et al., 2013).

Wie die Grafik in *Abbildung 6* aufzeigt, ist der Transport als Emissionsverursacher mit 26 % ein erheblicher Faktor bei der Errichtung von Gebäuden. Eine Begründung beruht darauf, dass an den Baustandorten wenig Lagerflächen vorhanden sind (Schach & Schubert, 2009, S. 62) und somit die Transporte Just-in-Time angeliefert werden. Zudem ist ein sehr energieintensiver Anteil der Abtransport von Aushub und Abfällen. Beides sind schwer zu

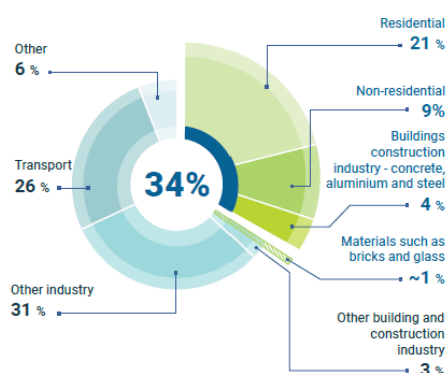


Abbildung 6 Anteil des Endenergieverbrauchs für ein Gebäude am gesamten Bauzyklus (Cdb, 2022, S. 42)

vermeidende Faktoren. Dennoch fallen viele Emissionen für Anlieferungen ins Gewicht, welche Hinblick auf die Nachhaltigkeit für beide Varianten analysiert werden. Dabei muss differenziert werden zwischen dem Transport der Einzelteile und der fertigen Produkte. Aus diesem Grund wird bei der Betrachtung in Kapitel 3.1.2 sowohl der Rohbau als auch die Gewerke des Innenausbaus betrachtet. Hierzu zählt der Transport folgender Gruppen:

- Zimmerer und Holz
- Fenster
- Schlosser und Spengler
- Estrich, Fußboden und Fliesen
- Installateur, Heizung und Elektro
- Maler und Innenausbau
- Kleinmaterial und Bauabfälle

Diese Gewerke fallen im Einzelnen nicht ins Gewicht, können aber bei einem Vorfertigungsgrad von bis zu 90 % bei Modulen ((Lechner GmbH, 2023) ein weiteres Einsparpotenzial bilden.

Im Allgemeinen gehören die Transporte (Phase A4) und die Einbauprozesse (Phase A5) zu einer vollständigen Betrachtung der Lebenszyklen dazu. Jedoch werden diese Bewertungen im Zertifizierungsverfahren wie DGNB nur bei Baustellenzertifikate verwendet berücksichtigt, um die Gleichberechtigung auf dem freien Markt nicht zu beeinflussen (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., 2023).

Aufgrund der Ressourcenschonung und Ressourcenknappheit hat inzwischen der Abbruch und die Wiederverwendung, als wichtiges Thema der Nachhaltigkeit, an Bedeutung gewonnen. Beton zählt dabei immer noch zu den weltweit meist verwendeten Baustoffen (Hilgers et al., 2020, S. 1). Dieser ist jedoch immer noch von einem konstanten Rohstoffverbrauch sowie einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft weit entfernt (Krausmann et al., 2017, S. 1880). Aus diesem Grund besitzt Thema für eine ganzheitliche Betrachtung einen hohen Stellenwert, da es vor allem zukünftige Generationen betreffen wird. Die Betrachtung der Entsorgungsphase C1 bis C4 werden auch in den Zertifizierungsprogrammen wie die des DGNB bzw. ÖGNI betrachtet (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., 2023, S. 498–539). Berücksichtigt man zudem die Phasen der Herstellung und des Transports mit, wird dies als Cradle to Gate-Betrachtung definiert (Hoffmann et al., 2021, S. 277–279). Wird zudem die Phase D1 der Wiederverwendung oder ugs. auch „Gutschrift“ berücksichtigt, wird dies als Cradle to Cradle-Betrachtung bezeichnet (Hoffmann et al., 2021, S. 277–280). Die Phase D1 wird wiederum nicht im DGNB berücksichtigt (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., 2023, S. 43), da diese in Zukunft nicht gewährleistet werden kann. Bei dem Begriff Wiederverwendung muss ebenfalls differenziert werden, da er in der Literatur oft nur als hohe Werterhaltung verwendet wird (Helbig et al., 2018). In dieser Arbeit wird der Begriff mit der Bedeutung verwendet, dass die Module teilweise oder vollständig ein zweites oder weitere Male verwendet werden können.

Die Schwierigkeit bei der Analyse für diese Arbeit liegt darin, dass die Betonmodul-Hersteller zu diesem Thema bisher keine Erfahrungen gesammelt haben und auch von der Fachliteratur keine Untersuchungen und Forschungsarbeiten erarbeitet wurde. Deshalb wird in Kapitel Abschnitt 3.1.3 ein fiktives Szenario mit diversen Annahmen

erarbeitet, welches anhand der Einsparung des CO₂-Wertes bewertet und mit dem konventionellen Bau verglichen wird. Der konventionelle Bau kann dabei wie bei einer klassischen Ökobilanzierung bewertet werden. Die Vorgabe ist dabei automatisch bei der Materialwahl in die Software eco2soft verfügbar. Vom Nutzer müssen nur die einzelnen Materialien in bestimmte Entsorgungs-Kategorien eingeordnet werden. Diese sind in der folgenden *Tabelle 1* dargestellt

	1	2	3	4	5
RECYCLING	Wiederverwendung bzw. -verwertung zu technisch gleichwertigem Sekundärprodukt oder -rohstoff	Recyclingmaterial wird mit geringem Aufwand sortenrein gewonnen und kann hochwertig verwertet werden.	Recyclingmaterial ist verunreinigt, kann mit höherem Aufwand rückgebaut und nach Aufbereitung verwertet werden	Downcycling	Kein Recycling möglich
VERBRENNUNG	Hoher Heizwert (> 2000 MJ / m ³); natürliche Metall- und Halogengehalte im ppm-Bereich, sortenreines Material	Wie 1, jedoch nicht sortenrein Anteil an nicht-organischen Fremdstoffen beträgt < 3 Massen-%	Wie 1 oder 2, jedoch mittlerer Heizwert (500 - 2000 MJ/m ³) oder geringfügige Metall- oder Halogengehalte (< 3 Massen-%)	Hoher Stickstoffgehalt, hoher Anteil mineralischer Bestandteile oder erhöhter Metall- oder Halogengehalt (3-10 Massen-%)	Hoher Metall- oder Halogengehalt
DEPONIERUNG	Zur Ablagerung auf Inertabfalldeponie geeignete Abfälle	Zur Ablagerung auf Baurestmassen geeignete Abfälle ohne Verunreinigungen	Materialien mit geringem Anteil nicht-mineralischer Bestandteile, z.B. mineralische Baurestmassen mit organischen Verunreinigungen durch Bitumen oder WDVS-Resten	Gipshaltige, faserförmige oder mineralisierte organische Materialien sowie Materialien mit erhöhtem Anteil nicht-mineralischer Verunreinigungen.	Organisch-mineralischer Verbund, Metalle als Verunreinigungen von Baurestmassen

Tabelle 1 Einordnung zur Bewertung von Baustoffen (IBO - Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, 2020, S. 5)

Somit werden die einzelnen Bauteile bewertet und von der Software ebenfalls ein GWP-Wert für die Entsorgung ermittelt. Ziel dieses Vergleiches ist es ein realitätsnahes Szenario zu definieren, um einen objektiven Vergleich zu ermöglichen. Zudem sollen anhand des Vergleiches Potenziale und Chancen für den Modulbau aufgezeigt werden.

2.4 Weiter Betrachtungsmöglichkeiten der Nachhaltigkeit

2.4.1 Zeitmanagement

In der Baubranche wie auch in der Produktion ist der zeitliche Faktor ein erheblicher Faktor. Das umgangssprachliche Sprichwort „Zeit ist Geld“ kommt hier besonders zum Tragen und deshalb sollte es das Ziel bei jeder Produktion sein, so schnell wie möglich das Produkt zu finalisieren. Ein Ansatz hierbei ist, die Prozesse so „schlank“ beziehungsweise „verschwendungsarm“ wie möglich zu halten. Dieser Ansatz nennt sich auch Lean-Management, welches seinen Ursprung um 1990 am MIT in Boston

findet und aus dem Toyota-Produktions-System hergeleitet wurde (Teizer, 2020). Dadurch, dass die Philosophie stetige Verbesserungs-Zyklen beinhaltet, findet sie unter dem Namen Lean-Construction seit Anfang der 2000er immer mehr Akzeptanz und Anwendung in der Baubranche (Prötsch, 2019, S. 4–24). Somit wird in dieser Arbeit eine klassische Baustelle mit dem Ansatz der Lean-Construction einer Produktion gegenübergestellt.

Der Mehrwert eines geordneten Zeitmanagements ist vielfältig. So können durch Zeitersparnis, wie in Kapitel 2.3.2 angedeutet, mehr Projekte angenommen werden. Zudem haben die geregelten zeitlichen Abläufe Einfluss auf die Sicherheit (siehe Abschnitt 2.4.5). Alle Einflüsse haben demnach Auswirkungen auf die Qualität und Kosten. *Abbildung 7* zeigt anhand der Verläufe die Entwicklung zwischen Bauzeit und Kosten.

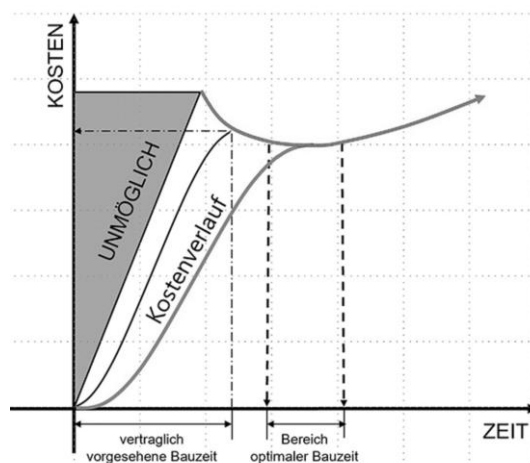


Abbildung 7 Bauzeit und Baukosten (Duschel et al., 2020)

2.4.2 Energieverbrauch

Beim Energieverbrauch spielen ebenfalls mehrere Aspekte eine Rolle. Neben dem Transport hat der Energieverbrauch auf der Baustelle einen großen Einfluss. Die Vermeidung von fossilen Brennstoffen ist für eine nachhaltige Produkterstellung ein bewährtes Mittel. Allerdings ist der Einsatz von fossilen Baustoffen unabdingbar und einfach, um die benötigte Energie schnell für den Bau vor Ort zu nutzen. Deshalb sollen die Verbräuche von verschiedenen Verbrauchern auf dem Bau analysiert werden. Mögliche Verbraucher wurden aus der Arbeit von Weigert (Weigert, Maximilian et al., 2021, S. 426–434) und der grafischen Darstellung von Hong (Hong

et al., 2019, S. 5093) zusammengefasst und durch eigene Annahmen in der Liste ergänzt:

- Baustrom
- Baustellencontainer
- Trocknung und Heizung im Innenausbau
- Verschiedene Arten von Baumaschinen
- Eventuelle Wasser Fernhaltung

Bei den Verbrauchern besitzt oft ebenfalls die zeitliche Komponente einen indirekten Einfluss. Nach Angaben des statistischen Bundesamtes von Baden-Württemberg dauert ein konventioneller Bau mehrere Jahre. 57 % der Mehrfamilienhäuser werden mit mehr als drei Wohnungen nach 24 Monaten fertiggestellt. 12 % der Wohnungen dauerten sogar drei Jahre oder mehr (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2017). Dadurch sind das Haus und die Baustelle in den verschiedenen Bauphasen den klimatischen Bedingungen ausgesetzt und werden aufgrund der unvollendeten dynamischen Prozesse ineffizient geheizt bzw. gekühlt. Folgend sind diese verlustreichen Verbräuche umso länger eine Baustelle dauert.

Der Vorteil einer Produktionsstätte liegt dahingehend, dass man sowohl die Produktionsstätte als auch die technischen Anlagen auf die Produktionsprozesse abstimmen und verbessern kann (Munzert zeigt in seiner Arbeit ein Beispiel dafür (Munzert, 2022, S. 69)). So erzeugt z.B. eine Photovoltaikanlage am Standort die fossilfreie Energie für die Herstellung und das Produkt kann somit klimafreundlicher produziert werden.

Bei beiden Varianten spielen folglich die Energieträger Strom und auf der Baustelle Diesel eine Rolle. Dabei ist es relevant, welche Art des Stroms verwendet wird. Wird z.B. auf Baustellen der nationale Strommix von Österreich verwendet, hat dieser einen Emissionsfaktor von $0,202 \frac{kg CO_2 equ.}{kWH}$. Verwendet man den „grünen“ Strom, besitzt dieser einen Emissionsfaktor von $0,014 \frac{kg CO_2 equ.}{kWH}$. (Umweltbundesamt Österreich, 2022). In Deutschland ist der Strommix hierbei bei $0,434 \frac{kg CO_2 equ.}{kWH}$ nach Umweltbundesamt (Örtl, 2023) und der Ökostrommix bei $0,040 \frac{kg CO_2 equ.}{kWH}$ (Naturfunde e.V., 2023). Die Unterschiede resultieren durch die unterschiedliche Art der Stromerzeugung in den beiden Ländern. Im Gegensatz dazu kann beim Treibstoff

Diesel der Emissionsfaktor mit $2,65 \frac{kg CO_2 equ.}{l}$ aus seiner chemischen Zusammensetzung bestimmt werden (August, 2020).

Sowohl auf der Baustelle als auch in der Produktion gehören Transporte zu den Energieverbrauchern, welche ein bestimmtes Einsparpotenzial besitzen. Allerdings werden diese bereits bei der Betrachtung der verschiedenen Lebenszyklusphasen beachtet und werden deshalb in diesem Abschnitt vernachlässigt.

2.4.3 Ökonomische Betrachtung

Die finanzielle Betrachtung ist ein sehr diffiziles Thema, da viele verschiedene Entscheidungen Einfluss auf die Kosten haben. In den meisten Fällen ist ein Bauprojekt durch eine Kostenobergrenze definiert. Diese beschränkt sich allerdings in der Regel auf die Investitionskosten und vernachlässigt die Lebenszykluskosten.

(Siemon, 2016, S. 58) . Zu einer ganzheitlichen und nachhaltigen Kostenoptimierung sollten die Betriebskosten und Instandhaltungskosten ebenfalls dazugezählt werden. Denn diese können in Summe eines Lebenszyklus 58 % der Gesamtkosten eines Gebäudes ausmachen (Litau, 2015, S. 26). Die Wirkung von Einflüssen vom Konzept über Planung und Bau bis hin zur Nutzung sind in *Abbildung 8* grafisch dargestellt.

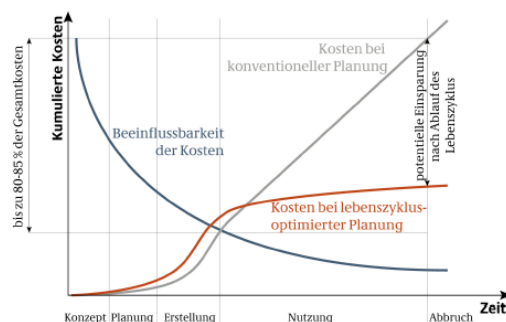


Abbildung 8 Einfluss des Kostenverlaufs (Litau, 2015, S. 24)

Die folgenden aufgelisteten Punkte können schon in der Konzepterstellung und in der Planung essenzielle Hebel sein, da Sie sowohl Auswirkungen auf die Investitionskosten als auch die Betriebskosten besitzen:

- Art der Planung
- Kubatur und Volumenverhältnisse des Gebäudes
- Qualität der Gebäudehülle
- Qualität des Materials
- Bau und Transportwege
- Personal

Die Liste entspricht keineswegs der Vollständigkeit und soll nur den Ansatzpunkt aufzeigen.

Da die Grundlagenentscheidungen für den Rohbau bei dieser Arbeit durch das bereits geplanten Grundrisse in sehr viele Faktoren, wie Außenwände und Fenster vordefiniert sind, liegen die möglichen Kostenpotentiale des Modulbaus beim Innenausbau. Personal und den Transportwegen. Die Auswirkungen von Personal und Transport auf die Investitionskosten kann dahingehend das Gebäude beeinflussen. Eingesparte Kosten können wiederum in die Qualität der Materialien investiert werden und besitzen somit indirekt eine Wirkung auf das Gebäude selbst und je nach Wahl der Materialien für mehr Nachhaltigkeit sorgen.

2.4.4 Flächenausnutzung

Die Bewertung der Flächenausnutzung hat verschiedene Ebenen und dementsprechend auch verschiedene Einflüsse und Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit. Deshalb sollte bei jeder Bauprojektentwicklung eine quantitative und qualitative Analyse der Flächen durchgeführt werden, um mit einer optimierten Ausnutzung eine höhere Effizienz und somit eine höhere Wertschöpfung zu erreichen (Zeitner, 2019, S. 31). Um eine Flächenbewertung durchzuführen, müssen im ersten Schritt die jeweiligen Flächen ermittelt werden. Die Hauptflächen sind nach der DIN 277 in Deutschland definiert. In der folgenden Aufzählung (nach (DIN 277, 2021)) sind diese von der obersten Ebene in die kleinste Ebene aufgelistet:

- Grundstücksfläche gegliedert in
 - Bebaute Fläche
 - Unbebaute Fläche
- Außenanlagefläche
- Konstruktions-Grundfläche
- Brutto-Grundfläche
- Netto-Raumfläche gegliedert in
 - Nutzungsfläche
 - Technikfläche
 - Verkehrsfläche

Je nach Bedarf können weitere Flächen hinzukommen, welche zum Beispiel für das Facilitymanagement notwendig sind. Aus diesem Grund ist es sinnvoll ein geordnetes Flächenmanagementsystem zu erstellen und zu pflegen, da in diesem auch

Kostenträger und Maßnahmen identifiziert werden können (Preuß & Schöne, 2016, S. 609–610).

Wie bereits erläutert, haben die Flächen einen unterschiedlichen Einfluss auf die drei Säulen der Nachhaltigkeit. Die ökologischen Aspekte für die Gebäude werden dahingehend bereits in anderen Abschnitt separat betrachtet und die sozialen Aspekte sind durch eine vorgegebene Planung des Beispielobjektes ebenso definiert und können nicht weiter beeinflusst werden. Deshalb liegt der Fokus auf die ökonomische Nachhaltigkeit. Daher ist es wichtig, die Kosten nicht nur zum Zeitpunkt des Baus, sondern auch über die ganze Lebensdauer zu betrachten. Zu diesem Zweck wird die Barwertmethode, bzw. auch Kapitalwertmethode genannt, angewendet. Diese zählt zu den Verfahren der dynamischen Investitionsrechnungen (Noosten, 2018, S. 17). Die Formel, um den Kapitalwert zu errechnen, ist:

$$K_o = -I_0 \sum_{t=0}^n \frac{(E_t - A_t)}{(1 + i)^t}$$

Dabei steht K_o für die Kapitalkosten, welche sich anhand der Investitionskosten (I_0) und die Einnahmen E_t und Ausgaben A_t über die Zeitspanne (n) aufsummieren. Die Besonderheit dieser Methode ist, dass für die jährlichen Einnahmen und Ausgaben eine Verzinsung mit einem kontinuierlichen Zinssatz (i) berücksichtigt wird. Dies beruht auf der Annahme der Methode, dass der Wert des gleichen Geldbetrages in Zukunft weniger wert sein wird. Dementsprechend können anhand der Einnahmen und Ausgaben bei den Flächen, die Mehrwerte über einen bestimmten Zeitraum berechnet und somit die effektivere Variante ausgewertet werden.

2.4.5 Arbeitssicherheit

Wie die Bauwerke selbst, sind auch die Baustellen verschieden. Zudem sind die Arbeitenden dort auch immer den äußeren Bedingungen ausgesetzt. Daher verwundert es nicht, dass die Baubranche sowohl in Österreich mit ca. 17.000 Unfällen pro Jahr (AUVA, 2022) als auch in Deutschland mit ca. 110.000 Unfälle (DGUV 1, 2022) der Wirtschaftszweig mit dem größten Risiko ist. Betrachtet man die Art der Unfälle, wie in Abbildung 9 dargestellt, wird schnell ersichtlich, dass diese genauso mannigfaltig sind, wie die Baustellen selbst.

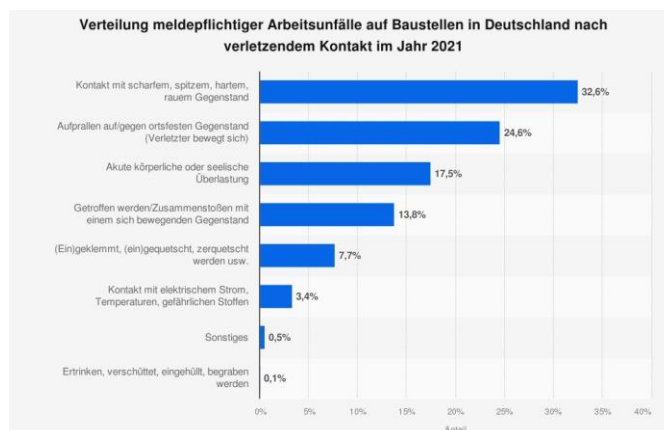


Abbildung 9 Verteilung meldepflichtiger Arbeitsunfälle auf Baustellen in Deutschland 2021(DGUV 2, 2022)

Aus diesem Grund zeigt sich, dass die arbeitssicherheitstechnischen Maßnahmen stetig eingehalten oder neue Wege gefunden werden müssen, um das Risiko zu minimieren. Denn schon in der Bibel wurde Arbeitsschutz mit den mahnenden Worten zitiert: „Baust du ein neues Haus, so bringe an deinem Dach eine Brüstung an. Du würdest Blutschuld auf dein Haus laden, wenn jemand hinunterfällt.“ (Luther, 1998). Neben der Vermeidung von Unfällen ist auch die Vermeidung von Langzeitschäden ein wichtiges Ziel des Arbeitsschutzes. Die Arbeitenden sind auf den Baustellen jeden Tag anderen Bedingungen ausgesetzt. Dadurch können auch Auswirkungen auf den Körper prallen, welche erst nach längerer Zeit eine Auswirkung auf die Gesundheit haben. Die häufigsten Berufskrankheiten sind nach der BG Bau in Deutschland (BG BAU, 2022):

- Lärmschwerhörigkeit
- Hautkrebs durch Sonnenstrahlung
- Erkrankung der Lendenwirbelsäule
- Lungenkrebs durch Asbest

Zudem gibt es noch weitere Einflüsse wie Staub, Holzstaub und weitere Schadstoffe, die den Körper ebenfalls schädigen können. Da viele dieser Krankheiten durch die Umgebung beeinflusst sind, können diese in einer Produktion vermieden werden. Eine Prävention des Risikos fördert somit sozialere und angenehmere Arbeitsbedingungen, welches durch das Sicherheitsgefühl bei den Arbeitenden auch zu einer Senkung des Stresslevels führt.

Die sozialen und physischen Effekte für die Arbeitnehmer sowie die äußeren Einflüsse haben ebenfalls indirekte Auswirkungen auf die Bauqualität. Wie in *Abbildung 10* zuerkennen ist, werden die meisten Mängel im Bau mit 38 % in der Bauausführung beanstandet.

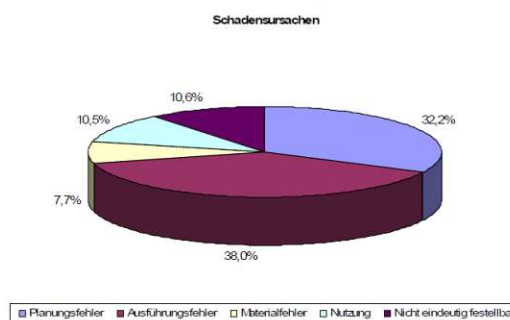


Abbildung 10 Schadensursachen von Baumängeln/-schäden (Balak et al., 2008, S. 38)

Dem gegenüber stehen die gesicherten und geprüften Arbeitsabläufe in einer Fabrik.

Zudem gibt es weniger äußerliche Störeffekte, welche zu einem ruhigeren Arbeiten und dadurch eine höhere resultierenden Qualität der Arbeit führen. Demzufolge steigt durch die Routine sowohl die Schnelligkeit bei der Ausführung der Arbeit (siehe Abschnitt 2.4.1) sowie durch die Erfahrung am selben Arbeitsprozesses die Qualität der Arbeit und des Produkts

2.5 Vergleich und Einstufung der Wertigkeit

Für eine objektive und unabhängige Bewertung müssen Skalierung auf zwei verschiedenen Ebenen vorgenommen werden. Die erste Ebene ist hierbei die Skalierung der drei Faktoren aus dem Säulenmodell aus dem Abschnitt 1.2. Hierfür gibt es zwei verschiedene Ansätze aus der Literatur.

Der erste Ansatz ist der Ansatz der „schwachen Nachhaltigkeit“. Dieser beruht auf dem Drei-Säulen-Modell mit einer gleichmäßigen Aufteilung der drei Faktoren. Dadurch werden die drei Kategorien Umwelt, Wirtschaft und Sozialität mit jeweils 33,3 % bewertet. Diese Ansicht ist in der Gesellschaft sehr verbreitet und die Basis von Zertifizierungssystemen wie die des DGNB, ÖGNI und BNB.

Beim zweiten Ansatz, der „starken Nachhaltigkeit“, ist die Gewichtung der einzelnen Kategorien nicht gleichmäßig verteilt. Aus diesem Grund wird sie von manchen Kreisen auch als „ein-Säulen-Modell“ angesehen (Ott, 2009, S. 27). Das Konzept der „starken Nachhaltigkeit“ beruht auf der Annahme, dass die ökologischen Ressourcen, auch Naturkapital genannt, durch den Eingriff des Menschen ihr geringes Entropieniveau verlieren (Rat von Sachverständigen für Umweltfragen, 2002, S. 64). Diese Auswirkungen der Eingriffe sind für zukünftige Generationen noch nicht

abzusehen und daher priorisiert schützenswert. Auf Basis dieser Sichtweise gibt es Vertreter, welche die Sicherung des Naturkapitals auch als Sicherung des Wirtschaftskapitals betrachten (Hermann, 2010, S. 27) und aus diesem Grund wird die Ökologie höher bewertet als die Ökonomie und das soziale Kapital.

Das Schaubild *Abbildung 11* zeigt eine exemplarische Aufteilung der beiden Ansätze. Hierbei wird sowohl durch die Überschneidung in der „schwachen Nachhaltigkeit“, als auch durch die Pfeile in der „starken Nachhaltigkeit“ deutlich sichtbar, dass die drei Faktoren interagieren und voneinander abhängig sind.

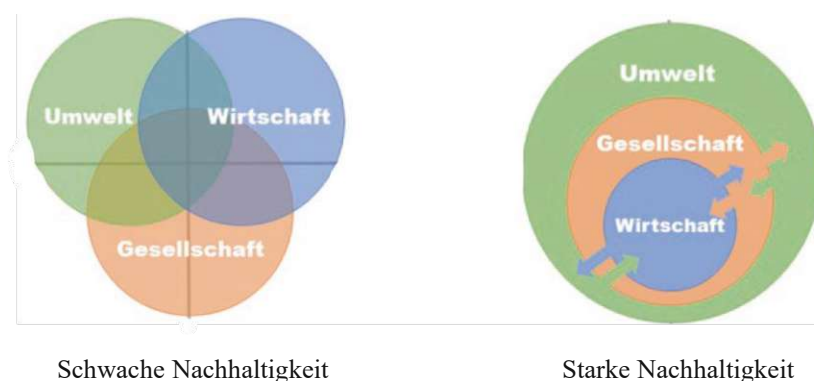


Abbildung 11 Schaubild Schwache und Starke Nachhaltigkeit (Weselek et al., 2022, S. 11)

Die Gewichtung dieser drei Faktoren ist stark von der Ausrichtung der Entscheidungsträger und davon, welche Zielstellung diese verfolgen, abhängig (Günther, 2008). Eine gleichmäßige Gewichtung, wie diese der „schwachen Nachhaltigkeit“, findet in der reinen Betrachtung des Gebäudes durchaus seine Berechtigung. Gleiches ist gültig für den Ansatz der „starken Nachhaltigkeit“ dessen Argumentation sowohl bei der Betrachtung von Prozessen als auch in der globalen Sichtweise, seine Sinnhaftigkeit widerspiegelt. Aus diesem Grund muss für die Einordnung der Arbeit die Betrachtung des Modulbaus in Kontext gesetzt und eine objektive Gewichtung eingeordnet werden.

Auf der zweiten Ebene müssen die einzelnen ausgewerteten Kriterien den drei Säulen der Nachhaltigkeit zugeordnet werden. Nach dieser Einordnung muss ebenfalls eine Gewichtung vorgenommen werden. Dabei ist abzuschätzen, wie groß der Hebel für eine ganzheitliche Betrachtung der Nachhaltigkeit ist. Diese Bewertungsform findet sich ebenfalls bei Zertifizierungssystemen wie denen des DGNB wieder (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., 2023, S. 16, 17).

Durch diese Einordnungen kann somit eine quantitative Aussage zur Nachhaltigkeit im Vergleich zweier Varianten erarbeitet werden.

3 Ermittlung der Kriterien anhand eines Beispiels

Im folgenden Kapitel wird anhand eines Beispiels der Vergleich zwischen eines konventionellen Bauprojektes und dem gleichen Projekt, fiktiv mit Modulen gebaut, durchgeführt. Hierbei werden die Kriterien für beide Varianten ermittelt. Am Ende jedes Abschnittes werden die Ergebnisse in das Verhältnis gesetzt. Dabei bedeutet die Wertigkeit eins immer, dass diese Bauart bei diesem Kriterium nachhaltiger abschneidet. Der kleine Wert ist somit die weniger nachhaltige Variante und schneidet um die Differenz zu eins schlechter ab. Bei der Erläuterung des Verhältnisses wird immer nach der Verhältnisangabe (1 zu XX) definiert, welche Bauart bei diesem Kriterium nachhaltiger ist.

3.1 Der ökologische Fußabdruck

Wie bereits in Kapitel 2.3 erklärt, besteht der ökologische Fußabdruck aus mehreren Phasen. Da für die Ermittlung die Software eco2soft gewählt wurde, wird zur Vereinfachung dieselbe Gliederung verwendet. Im ersten Abschnitt wird somit die „graue Energie“ des Rohbaus ermittelt. Im Nächsten Abschnitt werden die Transportwege berücksichtigt und im letzten Teil die Wiederverwendung.

3.1.1 Investitionsemissionen der Phasen A1- A3

Die Basis der Berechnung sind zwei 3-stöckige Reihenhäuser. Diese Objekte wurden im Zuge eines ganzen Quartiers gebaut. Der Grund für die Wahl von zwei Gebäuden beruht darauf, dass diese zusammen in einem Bauabschnitt errichtet wurden und dadurch keine zeitliche Unterscheidung gemacht werden kann, welche für die Ermittlung der Werte in den späteren Kapiteln zu Transportwegen (Kapitel 3.1.2) und Zeitmanagement (Kapitel 3.2) notwendig wäre. Darüber hinaus sind diese Reihenhäuser gewählt worden, weil sie eine Kubatur besitzen, aus dieser man mit Modulen ein ähnliches Gebäude errichten kann. Zur besseren Verständigung sind im Anhang B Grundrisse und ein Schnitt beigefügt. Die Darstellungen sind keine Formate nach den Regeln der Technik, da diese vorrangig zum besseren Verständnis dienen sollen. Dennoch sind sie maßstabsgetreu nach dem zeichnerischen Maßstab.

Die Pläne bilden die Basis für die Ermittlung der Mengen, weil die ursprüngliche Massenermittlung ebenfalls die Fundamente, den Keller und weitere Bauabschnitte beinhaltet. Deshalb können die benötigten Massen aus der Massenermittlung nicht

exakt differenziert werden. Zudem sind bei der Errichtung eines Modulhauses Fundamente und Keller ebenfalls in konventioneller Bauweise notwendig. Aus diesem Grund können diese Massen zur Vereinfachung vernachlässigt werden. Folglich werden aus den Grundrissen und Schnitten der Rohbau mit den Mengen an Beton- und Trockenbauwänden ausgelesen. Alle weiteren Elemente, wie Fenster, Türen sowie Decke und Boden, sind Bauteile, welche ebenfalls bei Modulen verwendet werden. Sie werden, wie auch die Fassadendämmung, zur Vereinfachung der Berechnung ebenfalls vernachlässigt. Da im Vergleich in dieser Arbeit das Haus aus fertigen Modulen ebenfalls keine detaillierte und architektonisch finalisierte Planung ist, kann diese Methode der Massenermittlung für den konventionellen Bau als ausreichend genau angesehen werden.

In der folgenden *Tabelle 2* sind die Maße des Rohbaus zusammengefasst. Hierbei wurden die Längen aus den Grundrissen und die Höhen und Dicken aus dem Schnitt ermittelt und die Rohbauöffnungen von Fenstern und Türen subtrahiert, damit die reinen Betonmengen und Rigips-Wände ermittelt werden können.

Flächen und Dicken des Rohbaus

	EG		1.OG		DG		Dach		Gesamt	
	Fläche [m ²]	Dicke [m]	Fläche [m ²]	Dicke [m]	Fläche [m ²]	Dicke [m]	Fläche [m ²]	Dicke [m]	Fläche [m ²]	Volumen [m ³]
	Fassade									
Süd-West	81,744	0,175	97,857	0,175	110,895	0,175			290,50	50,837
Nord-West	62,630	0,175	40,962	0,175	31,586	0,175			135,18	23,656
Süd-Ost	72,533	0,175	38,984	0,175	31,586	0,175			143,10	25,043
Nord-Ost	124,324	0,175	103,786	0,175	107,624	0,175			335,73	58,753
	Innenwände Beton + Treppen									
In Wohnung	116,586	0,150							116,59	17,488
Zwischen Wohnungen	379,392	0,175	367,4112	0,175	207,39525	0,175			954,20	166,985
Ersatz für Treppe	11,9	1	11,9	1					23,80	23,800
	Boden/Decke									
Decken/ Bodenplatte	438,200	0,200	438,200	0,200	403,500	0,240	288,000	0,180	1.567,90	323,960
	andere Materialien									
Trockenbauwände	95,359		291,900		207,395					594,654

Tabelle 2 Flächen und Bauteildicke des Rohbaus (konventioneller Bau)

Diese Mengen werden im Anschluss in die Software eco2soft von Baubook eingegeben. Dabei werden die Bauteile nach der Dicke und nach der Lage zusammengefasst, um nicht zu viele einzelne Posten in der Rechnung zu besitzen. Bei der Berechnung der Dicken für die Werte der Ökobilanzierung wird für die Bodenplatte jedoch nur die Hälfte der Dicke angenommen. Diese Annahme beruht darauf, dass bei der Modulbauweise auch der Keller mit Decke erstellt werden muss und zudem die Module eine eigene Bodenplatte besitzen. Als Betonwandmaterial wird aus der Datenbank ein Stahlbeton mit einer Armierung von 1,75 % Volumenanteil

gewählt. Die Wahl des 2 % Volumenanteils entspricht in der Regel mehr einem tatsächlich gebauten Gebäude. In der Datenbank ist jedoch kein Stahlbeton-Bauteil mit einem höheren Volumenanteil zur Auswahl definiert. Zudem kann aufgrund der zusätzlichen dynamischen Belastung beim Transport sowie der größeren Flexibilität die Annahme getroffen werden, dass der Armierungsanteil beim Modul größer ist als bei konventionellen Gebäuden. Deshalb wird der Armierungsanteil bei dem konventionellen Bau auf 1,75 % festgelegt. Da der Fokus dieser Arbeit auf dem Vergleich zwischen den beiden Bauweisen liegt, kann diese Annahme deshalb auch als ausreichend angesehen werden, da damit das Verhältnis des höheren Stahlanteils berücksichtigt wird. Die einzelnen Daten der Stahlbetonbauteile beim konventionellen Bau sind in *Abbildung 12* dargestellt.

Unter dem Punkt „andere Materialien“ in der *Tabelle 2* sind nur die nicht tragenden Innenwände berücksichtigt. Hier wurde eine Metallständerwand mit doppelter Beplankung gewählt. Die Eigenschaften dieser Wände sind im Anhang C hinterlegt.

Stahlbeton 140 kg/m³ Armierungsstahl (1,75 Vol.%)

Zuletzt geändert:
 baubook-Richtwert: 26. 6. 2014
 Bauphysikalische Kennwerte: 1. 8. 2014
 Bauökologische Kennwerte, IBO-Richtwerte 2012: 19. 2. 2020
 Bauökologische Kennwerte, IBO-Richtwerte 2020: 24. 1. 2022

Bauprodukte
 ▢ Ortbetone
 • Stahlbetone / Normalbetone mit Bewehrung

★ Zu den Favoriten

Kennwerte

Bauphysikalische Kennwerte
 Bauökologische Kennwerte: Hintergrunddatenbank Ecoinvent A1

Indikator	IBO 2012	Einheit
Kernindikatoren für die Umweltwirkung		
GWP-fossil Globales Erwärmungspotenzial - fossil	0,155	kg CO ₂ Äq./kg
GWP-biogenic Globales Erwärmungspotenzial - biogen	-0,000249	kg CO ₂ Äq./kg
GWP-total Globales Erwärmungspotenzial - total	0,155	kg CO ₂ Äq./kg
ODP Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht	0,0000000055	kg CFC-11 Äq./kg
AP Versauerungspotenzial von Boden und Wasser	0,000409	kg SO ₂ Äq./kg
EP Eutrophierungspotenzial	0,000257	kg PO ₄ ³⁻ Äq./kg
POCP Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon	0,0000534	kg C ₂ H ₄ Äq./kg
Indikatoren zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes		
PERE Erneuerbare Primärenergie - als Energieträger	0,0507	MJ/kg
PERM Erneuerbare Primärenergie - als Rohstoff	0	MJ/kg
PERT Erneuerbare Primärenergie - total	0,0507	MJ/kg
PENRE Nicht-erneuerbare Primärenergie - als Energieträger	1,58	MJ/kg
PENRM Nicht-erneuerbare Primärenergie - als Rohstoff	0	MJ/kg
PENRT Nicht-erneuerbare Primärenergie - total	1,58	MJ/kg

Abbildung 12 Umweltindikatoren Stahlbeton mit 1,75 Vol. % Armierungsstahl (baubook GmbH, 2014)

**Ökobilanzierung der Phasen A1-A3
Konventioneller Bau**

	GWP-total	PENRT
	[kg CO ₂ equ.]	[MJ]
Fassade		
Süd-West	18.679,15	190.858,50
Nord-West	8.692,07	88.813,26
Süd-Ost	9.201,33	94.016,70
Nord-Ost	21.588,08	220.581,18
Innenwände Beton + Treppe		
In Wohnungen	6.423,56	65.634,54
Zwischen Wohnungen	61.355,06	626.909,40
Treppen	9.210,60	94.676,40
Boden/Decke		
Decken/ Bodenplatte	102.987,76	1.052.092,90
andere Materialien		
Innenwände Gips	7.314,32	130.230,54
Gesamt	245.451,93	2.563.813,42

Tabelle 3 LCC der Phasen A1-A3 (konventioneller Bau)

Anhand dieser Daten wurden die Berechnungen für die Phasen A1 bis A3 an beiden Gebäuden durchgeführt. In *Tabelle 3* sind die Ergebnisse der wichtigsten Indikatoren GWP-total (der CO₂-Wert) sowie der PENRT (der nicht erneuerbare Primärenergiefaktor) aufgelistet. Somit ergibt sich für den Rohbau vom Erdgeschoss bis zum Dach ein GWP-Wert von 245.451,93kgCO₂ equ. . Um das Verhältnis pro

m² BGF zu erhalten, dividiert man den GWP-Wert durch die BGF von 1.340 m² und erhält somit einen Wert von $183,17 \frac{(kgCO_2 equ.)}{m^2_{BGF}}$. Hierbei wird jedoch nur die BGF der drei Stockwerke berücksichtigt, da nur diese ausschlaggebend für die Betrachtung sind.

Um den Wert auf seine Plausibilität zu prüfen, wird der CO₂-Wert auf die 50 Jahre verteilt. Dies ist auch der klassische Betrachtungszeitraum im Zertifizierungssystem BNB (Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB), 2015, S. 2) und auch im DGNB und ÖGNI System wird eine Lebensdauer von 50 oder mehr Jahren positiv bewertet (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., 2023, S. 88).

Durch die Division der 50 Jahre erhält man somit einen GWP-Wert von $3,66 \frac{kg CO_2 equ.}{m^2_{BGF*a}}$. Eine Vergleichsstudie des DGNB hat bei der Untersuchung verschiedener Gebäude einen Mittelwert $7,3 \frac{kg CO_2 equ.}{m^2_{BGF*a}}$ und einen Median von $7,37 \frac{kg CO_2 equ.}{m^2_{BGF*a}}$ für den GWP-Wert in den Phasen A1 bis A3 auf (Braune et al., 2021, S. 12). Eine Liste der Ergebnisse der Studie befindet sich im Anhang D. Da in diesem Beispiel sowohl die Dämmung als auch die Fenster, Türen und der Boden fehlen, kann der errechnete Wert folglich durchaus als realistische Benchmark eingestuft werden. Im nächsten Schritt werden anhand der Grundrisse (siehe Anhang B) Module geplant, welche eine ähnliche Kubatur der Wohnungen und des Gebäudes bilden. Hierbei werden die genannten Rahmenbedingungen aus Kapitel 2.2 berücksichtigt. Somit ergeben sich insgesamt drei Wohnmodule sowie ein Erschließungsmodul. Diese Modultypen sind mit ihren Maßen in *Abbildung 13* abgebildet.

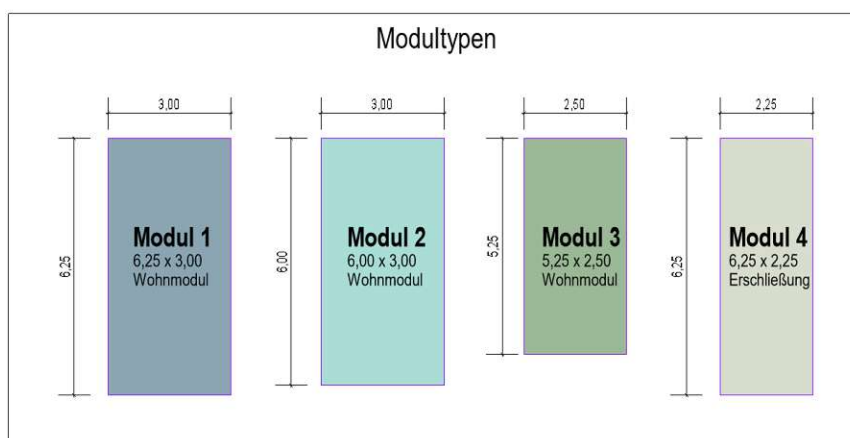


Abbildung 13 Außenmaße der verwendeten Modultypen

Im nächsten Schritt werden die verschiedenen Module so in den Grundrissen angeordnet, dass sowohl die Eigenschaften der Wohnungen wie zum Beispiel Erschließungen, erhalten bleiben, als auch die Bruttogrundfläche bestmöglich ausgenutzt wird. Die Anordnung der Module ist in den Grundrissen in Anhang E dargestellt. Zusammengefasst errechnet sich daraus die folgende Anzahl an verwendeten Modulen:

- 30 Module vom Modultyp 1
- 2 Module vom Modultyp 2
- 20 Module vom Modultyp 3
- 30 Erschließungsmodule vom Modultyp 4 (10 ohne Treppe)

Basis der Module sind der 12 cm dicke Boden und die 12 cm dicke Decke. Die Decke wird durch 15 cm dicke und 50 cm breite vertikale Wandstreben und einen 40 cm breiten und ebenfalls 40 cm dicken horizontalen Unterzug getragen. Diese Maße bleiben für alle vier Modultypen gleich. Bei den ausgefüllten Wänden wird ebenfalls eine Stahlbetonwand verwendet. Diese besitzt allerdings nur eine Wanddicke von 8 cm, um etwas Material und somit auch CO₂ einzusparen. Alle Module sind einheitlich 3,09 m hoch. Aufgrund des Schwerpunktes der Arbeit sind die Modultypen auch einheitlich geplant und die Wandanordnung der Module nicht spezifisch an die Grundrisse angepasst. Deshalb können die ausgefachten Wände sowie die Fenster und Türen als Abschätzung für die gesamte Wandstruktur ausgewertet werden.

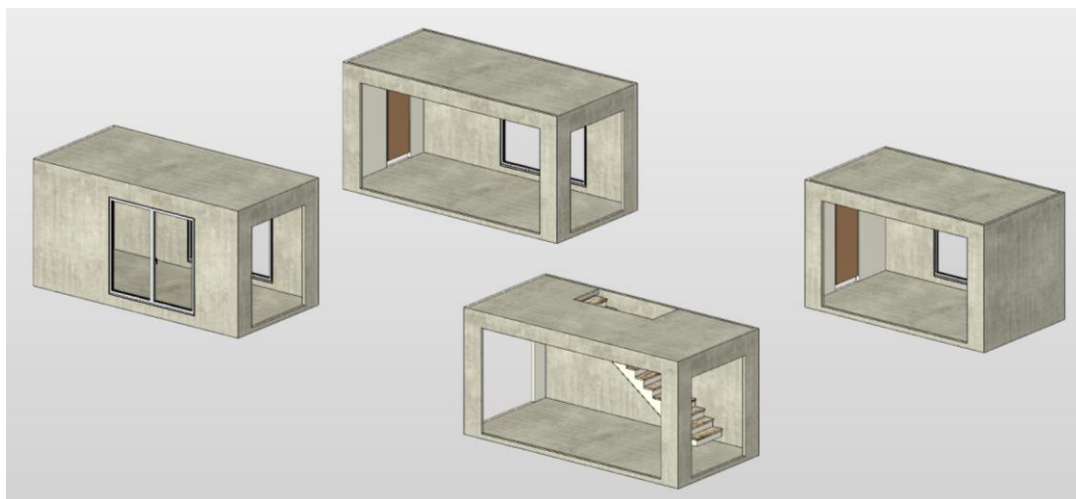


Abbildung 14 3D-Darstellung der Modultypen in Revit

Die einzelnen Modultypen werden mit den aufgeführten Abmessungen ebenfalls in eco2soft eingegeben. Dabei werden, wie beim konventionellen Bau, Fenster und Türen vernachlässigt. Als Material wird der Stahlbeton mit einer Armierung von 2 % Volumenanteil verwendet. Die Angaben zu den Umweltindikatoren dieses Stahlbetons befinden sich im Anhang C. Durch den Rahmen und die vorgegebenen Wände sind bereits Teile der Innenwände vorhanden. Da dieser Anteil allerdings im Vergleich zum konventionellen Bau zu niedrig ist, um eine gleichwertige Wohnkubatur zu erhalten, wird die Menge an Trockenbauwänden mit 50 % des Anteils der Trockenbauwände aus dem konventionellen Bau abgeschätzt und final hinzuaddiert.

Die Ergebnisse der einzelnen Modultypen sind anhand der oben erklärten Werte errechnet worden und in der *Tabelle 4* dargestellt.

GWP-Wert der einzelnen Modultypen

	Modultyp 1	Modultyp 2	Modultyp 3	Modultyp 4a	Modultyp 4b
	GWP	GWP	GWP	GWP	GWP
	[kg CO ₂ equ.]	[kg CO ₂ equ.]	[kg CO ₂ equ.]	[kg CO ₂ equ.]	[kg CO ₂ equ.]
Boden	804,26	787,52	672,20	804,26	804,26
Decke	804,26	787,52	672,20	702,89	702,89
Wand 1	566,06	521,70	456,17	749,73	749,73
Wand 2	323,79	521,70	293,58	323,79	323,79
Wand 3	321,08	394,54	381,12	239,55	239,55
Wand 4	239,55	250,29	310,75	239,55	239,55
Treppe	0,00	0,00	0,00	460,53	0,00
Gesamt	3.059,00	3.263,28	2.786,03	3.520,30	3.059,77

Tabelle 4 GWP- Werte der einzelnen Modultypen

Die Tabellen der originalen Werte aus der eco2soft Software sind im Anhang F dargestellt. Die errechneten Werte werden im nächsten Schritt anhand der oben berechneten Anzahl an Modultypen multipliziert. Auf das Produkt wird der Anteil der Trockenbauwand addiert und somit erhalten wir den gesamten GWP-Wert sowie den PENRT-Wert des vergleichbaren Gebäudes. Auch die Flächen der einzelnen Module werden addiert und somit erhalten wir eine Gesamt-BGF von 1.282,88 m². Hier ist zu erkennen, dass diese um die BGF von ca. 60 m² vom Ergebnis des konventionellen Gebäudes abweicht. Die Differenz beruht darauf, dass die Module nur in 0,25 m Rastern geplant und produziert werden und so individuelle Zwischenmaße nicht berücksichtigt werden können. Die BGF wird, wie beim konventionellen Bau, durch

den GWP-Wert geteilt. Somit erhalten wir einen Wert von $194,39 \frac{kg CO_2 equ.}{m^2 BGF}$. Teilt man diesen wiederum durch die 50 Jahre Nutzungsdauer, erhält man einen Wert von $3,89 \frac{kg CO_2 equ.}{m^2 BGF \cdot a}$. Alle Werte sind in *Tabelle 5* zusammengefasst.

Vergleicht man die beiden Ergebnisse nach ihren absoluten Werten, erhält man bei der Betrachtung des Rohbaus eine Einsparung von $3.926,21 kg CO_2 equ.$, wenn man diesen konventionell errichten würde. Der prozentuale Unterschied beträgt somit nur 1,5 % und ist daher nur eine kleine Menge im Vergleich zum gesamten Projekt. Eine erste pauschale Erklärung hierfür sind die unterschiedlichen Mengen aufgrund einer leicht veränderten Wandstruktur. Geht man allerdings einen Schritt weiter und betrachtet die einzelnen Module (*Tabelle 4*), ist auffällig, dass der größte Anteil an CO_2 in den Böden und Decken steckt. An dieser Stelle haben wir zudem durch die zwei Bauteile durchweg eine Dicke von $24 cm$, während die Decken des konventionellen Baus im Durchschnitt bei $20 cm$ liegen. Eine weitere Erklärung ist der Rahmen der Module, der durch seine bedingten Eigenschaften Wandflächen besitzt, die im klassischen Wohnungsbau nicht vorhanden sind, allerdings auch besser genutzt werden können. Ebenso sorgt der unterschiedliche Anteil an Armierung für eine Differenz. Dementgegen steht die Ausfachung, welche im Vergleich zur klassischen Bauweise nochmals CO_2 einspart.

	Module	BGF	GWP	PENRT
	Anzahl	[m ²]	[kg CO ₂ equ.]	[MJ]
Modultyp 1	30	562,50	91.769,95	941.967,54
Modultyp 2	2	36,00	6.526,56	66.987,74
Modultyp 3	20	262,50	46.420,68	476.540,40
Modultyp 4a	20	281,25	70.406,06	722.813,76
Modultyp 4b	10	140,63	30.597,73	314.068,68
Innenwände Gips			3.657,16	65.115,27
Modultyp Gesamt	82	1.282,88	249.378,14	2.587.493,39
GWP-total	[kg CO ₂ equ./ m ²]		194,39	
GWP_{GN}	[kg CO ₂ equ./ m ² *a]		3,89	
PENRT_{GN}	[MJ/ m ²]		2.016,95	

Tabelle 5 Anzahl und LCC der Phasen A1-A3 (Modulbau)

Demzufolge zeigt diese Auswertung, dass der Beton-Modulbau in seiner Erstellung dem herkömmlichen Bau ebenbürtig ist und das Verhältnis zwischen konventionellem Bau ist mit 1 zu 0,98 knapp auf der Seite des konventionellen Baus. Zudem besitzt der Modulbau, aber auch der klassische Wohnungsbau weitere Potentiale, wie das

Verwenden von nachwachsenden Rohstoffen oder auch das Einsparen von Material durch andere Methoden.

3.1.2 Transportwege

Beim Transport werden der Rohbau und der Innenausbau separiert betrachtet. Der Rohbau wird anhand der Software eco2soft bewertet und entsprechend angepasst. Hierfür werden in der Software für alle Bauteile eine Entfernung und ein Fahrzeugtyp angegeben. Bei der Entfernung wird abgeschätzt, wie weit der Weg zu einem ausgewählten Betonwerk ist. Da die Kapazitäten des Betonwerks nicht vorhanden sind und in vielen Fällen das preislich günstigste Angebot der Entfernung vom Betonwerk zur Baustelle vorgezogen wird, ist die Annahme von 40 km im Mittel getroffen worden. Als Transportmittel werden, für die Größe des Bauprojekts, 32t-LKWs verwendet. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in der folgenden *Abbildung 15* dargestellt. Für die Erstellung des Rohbaus wird beim Transport somit 11.545 kg CO₂ equ erzeugt.

	PENRT MJ	GWP-total kg CO ₂ equ.	AP kg SO ₂ equ.
Summe (100,0% aller Materialien mit bekannter Masse berücksichtigt)	176.674	11.545	55,7

Abbildung 15 Umweltindikatoren des konventionellen Rohbaus aus der eco2soft Software

Für den Modulbau werden ebenfalls die Transportwege der einzelnen Modultypen mit der Software eco2soft ermittelt. Dabei wird angenommen, dass das Werk der Produktion in der Nähe des Betonwerkes angesiedelt ist oder selbst ein Betonwerk besitzt. Daraus folgt, dass die mittlere Entfernung des Transports bei 5 km liegt und ebenfalls mit einem 32t-LKW durchgeführt wird. Die Kennzahlen der einzelnen Modultypen (siehe Anhang G) werden wie im Abschnitt 3.1.1 wiederum mit der Anzahl der geplanten Module multipliziert. Zusätzlich wird für die Anzahl an Transporten ein CO₂-Wert berechnet und auf das Produkt addiert. Hierfür wird das Gewicht eines Moduls mit Innenausbau auf 20 t pauschal abgeschätzt. Dies ist der Mittelwert des Bereiches von 16 bis 26 t, den der Hersteller Max Bögl angibt (Bögl et al., 2016). Für den Transport von der Produktionsstätte zum Baugrundstück werden 40 km wie beim konventionellen Bau definiert. Als Transportfahrzeug wird ein 40t-LKW verwendet. Das Gesamtgewicht des Transports definiert sich folglich aus dem Leergewicht des LKW und dem Gewicht der Ladung. Der leere LKW besitzt dabei

ein Gewicht von 13t (VFR Verlag, 2023). Der gesamte GWP-Wert errechnet sich, indem im ersten Schritt das Produkt aus dem Gesamtgewicht und einem mittleren GWP-Wert für LKWs von $69,3 \frac{g CO_2 equ.}{tkm}$ (Klimaschutzministerium Österreich, 2023) bildet. Da der Innenausbau im weiteren Verlauf dieses Kapitels separat betrachtet wird, muss dieser noch abgezogen werden. Dies wird durch eine pauschale Schätzung angenommen, indem für die Bewertung des Transportweges des Rohbaus der Anteil auf 60 % definiert wird und der Innenausbau mit 40 % herausgerechnet wird. Dieser Ansatz ist nur für eine bessere Differenzierung der einzelnen Bauphasen notwendig. Da am Ende die Summen aus beiden Teilen der Bauphasen gebildet und verglichen werden, findet sich somit der gesamte Transportweg der Module im Ergebnis wieder. Die Ergebnisse für die Berechnung des Rohbaus sind in der folgenden *Tabelle 6* zusammengefasst. Somit ergibt sich für den gesamten Anteil des Transportweges im Rohbau ein GWP-Wert von $7.312,97 kg CO_2 equ.$

Transportemissionen im Modulbau

	Module	BGF	GWP	GWP-Gesamt	Weg zur Baustelle	Geschätztes Gewicht ohne Innenausbau	Leergewicht LKW	Durschnitt GWP Wert LKW	Gesamt GWP Wert Transport
	Anzahl	[m ²]	[kg CO ₂ equ.]	[kg CO ₂ equ.]	[km]	[t]	[t]	[kg CO ₂ equ./tkm]	[kg CO ₂ equ./tkm]
	Transportweg zum Werk				Transport zur Baustelle (Anteil Rohbau)				
Modultyp 1	30	18,75	17,50	525,00	40	12,6	13	0,0693	2.128,90
Modultyp 2	2	18,00	18,70	37,40	40	13,2	13	0,0693	145,25
Modultyp 3	20	13,13	15,90	318,00	40	11,4	13	0,0693	1.352,74
Modultyp 4a	20	14,06	20,10	402,00	40	14,4	13	0,0693	1.519,06
Modultyp 4b	10	14,06	17,50	175,00	40	12,6	13	0,0693	709,63
Summe GWP				1.457,40					5.855,57
GWP Gesamt						7.312,97			

Tabelle 6 GWP-Transportwege Module (Anteil Rohbau)

Der Innenausbau wird aufgrund der Vereinfachung in der Berechnung der Investitionsemission der Phasen A1 bis A3 in Kapitel 3.1.1 nicht berücksichtigt. Dennoch fallen die Transportwege auf die Baustelle der vielen Subunternehmer weg, wenn 90 % des Moduls ebenfalls in der Fabrik gefertigt werden. Die Schwierigkeit bei der Ermittlung dieser Zahlen liegt darin, dass in der Dokumentation der Angebote der Subunternehmer diese meist als Pauschalangebote über mehrere Gewerke abgegeben wurden. Deshalb ist eine exakte Zahl an Transporten im Rahmen dieser Arbeit nicht exakt ermittelbar. Aus diesem Grund werden mithilfe der Literatur Annahmewerte ermittelt, welche ein guter Richtwert für die realen Werte sind. Geht man nach Dubois und Hulthén davon aus, dass auf einer Großbaustelle in 12-18 Monaten 100.000 Transporte stattfinden (Dubois et al., 2019, S. 620), ist hier noch

ein enormes Einsparpotenzial festzustellen. Für die Einschätzung hier muss berücksichtigt werden, dass dieser betrachtete Bauabschnitt eine sehr kleine Baustelle ist. Durch die verminderte Größe der Baustelle sinkt auch der gesamte Materialbedarf und somit wird geschätzt, dass sich die Anzahl an Fahrten um ein Drittel auf 33.000 reduziert. Eine weitere Annahme ist, dass die Baustelle durch den Wohnungsbau weniger komplex ist und sich die Fahrten somit nochmals um ein Viertel auf 8.250 Fahrten reduzieren. Dies passt auch zu den Ermittlungen von Straczek-Helios mit 5.610 Fahrten (Straczek-Helios, 2008, S. 90).

Folgende Anteile an Fahrten können ebenfalls subtrahiert werden, weil sie entweder schon berücksichtigt wurden (siehe Rohbau) oder für den Teil der Bauphase keine Relevanz besitzen:

- Erdaushub
- Hinterfüllung
- Beton, Bewehrung & Decken
- Schotter & Gehwege
- Mörtel
- Fassade
- Personentransporte

Wiederum muss berücksichtigt werden, dass die Punkte wie Aushub per se wichtig sind für eine Gesamtbewertung des Bauprojektes, allerdings für den Vergleich im Rahmen dieser Arbeit keine Aussage besitzen und deshalb nicht beachtet werden. Da Straczek-Helios die Aufteilung in die unterschiedlichen Materialgruppen prozentual vorgenommen hat (siehe *Abbildung 16*), können

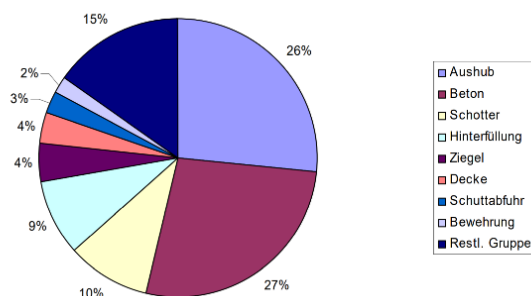


Abbildung 16 LKW-Fahrten nach Materialgruppen (Straczek-Helios, 2008, S. 91)

die sonstigen Transporte wie Personenfahrten ebenfalls definiert werden. Somit wird die absolute Anzahl der Fahrten nochmals um 15 % reduziert. Demzufolge ergibt sich für den gesamten Innenausbau in diesem Vergleichsprojekt eine Anzahl von ca. 1.240

Gesamtfahrten. Es wird weiterhin die Annahme getroffen, dass bei den Fahrten für den Innenausbau ein hoher Anteil der Anlieferungen mit Pritschenwagen und kleinen LKWs durchgeführt wird. Aus diesem Grund werden pauschal als Transportmittel zur Vereinfachung LKWs der Klasse leichte Nutzfahrzeuge bis 3,5 t gewählt. Durch die Angabe des Klimaschutzministeriums von Österreich von $309,3 \frac{g CO_2 equ.}{Fahrzeug km}$ (BMK Österreich, 2023), kann somit der GWP-Wert anhand der gefahrenen Kilometer berechnet werden.

Für die Definition der pauschalen Wegstrecke wird wiederum ein Mittelwert von 40 km angenommen. Zwar gibt es in den meisten Fällen viele potenzielle Subunternehmer in der Nähe der Baustelle und auch die Lagerplätze für Innenausbau-Materialien sind in einem kleineren Raster als die Betonwerke vorhanden. Dennoch werden sowohl für den Auftraggeber als auch für den Auftragnehmer die Dienstleistungen vor den Anfahrtsweg gestellt. Somit ist der angenommene Wert begründet. Mithilfe der Entfernung kann folglich der GWP-Wert von 15.310,35 kg CO₂ equ. für die Transporte aller Gewerke des Innenausbaus ermittelt werden.

Für spezifische Informationen der Transporte zu den Produktionsstätten des Modulbaus halten sich die hiesigen Hersteller bisher bedeckt und lassen die Fragen zum Experteninterview unbeantwortet. Deshalb werden zur Abschätzung der Transportmengen und Anzahl an Fahrten die Angaben aus Anhang H verwendet und hochgerechnet. Zu diesem Zweck werden die verwendeten Mengen im Verhältnis der Annahme von Straczek-Helios zu den angenommenen Fahrten von 8.250 Fahrten angepasst. Die Ergebnisse stellen somit den Bedarf an Material dar, welcher für den Innenausbau benötigt wird. Da die Verbindung in den Modulen erst nach der Montage auf der Baustelle gemacht werden kann, liegt der Vorfertigungsgrad des Innenausbaus bei 90% (Lechner GmbH, 2023). Deshalb werden die Massen aufgeteilt mit 90 % zum Werk und 10 % zur Baustelle. Da die Anlieferung ins Werk immer in einem vollbeladenen 42t-LKW durchgeführt werden soll, werden diese Mengen durch die potenzielle Lademenge von 29 t (Maximalgewicht mit 42 t abzüglich Leergewicht von 13 t (VFR Verlag, 2023)) dividiert. Durch den bereits bekannten Mittelwert des GWP-Werts pro Tonnenkilometer vom Umweltbundesamt mit $69,3 \frac{g CO_2 equ.}{tkm}$ (Klimaschutzministerium Österreich, 2023) kann somit mit der Annahme von 40 km

der CO₂-Wert berechnet werden. Bei den Transporten zur Baustelle wird wiederum der 3,5t-LKW bzw. Kleintransporter angenommen. Dieser hat nach Schmid ein mittleres potenzielles Ladegewicht von 2,07 t (Schmid, 2004). Das Gesamtgewicht wird ebenfalls mit dem durchschnittlichen GWP-Wert für Kleintransporter mit 3,5 t von $920,3 \frac{g CO_2 equ.}{tkm}$ (Klimaschutzministerium Österreich, 2023) multipliziert. Im Gegensatz zu den Transporten zum Werk wird bei den Transporten zur Baustelle angenommen, dass diese mit Leervolumen fahren. Deshalb ist neben dem erhöhten durchschnittlichen CO₂-Ausstoß auch der Gesamtwert etwas höher.

Zudem gibt es die Gruppen Kleinstmaterial und die Transporte zum Bauhof, welche gesondert angerechnet werden und aus diesem Grund in der Tabelle im Anhang H sowie in der *Tabelle 7* gelb hinterlegt sind. Für die Kategorie der Kleinstmaterialien wurden im Anhang H alle Gewerke und nicht nur der Innenausbau berücksichtigt. Deshalb wird der Anteil der Tonnen pro Fahrt anhand einer Annahme um 50 % reduziert. Bei der Gruppe Bauhof werden die Transporte zum Bauhof in der Regel in Bauschuttcontainern in 12t-LKWs ausgeführt. Deshalb wird anhand der Aufteilung des Fertigungsgrades angenommen, dass für die Abfälle im Werk ein ganzer Container abtransportiert wird. Auf der Baustelle wird nur ein Anteil von 10 % angenommen, da bei der Errichtung der Module andere Gewerke ein größeres Abfallaufkommen verursachen. Für beide Transporte wird der gleiche LKW-Typ mit einem mittleren CO₂-Wert von $380,5 \frac{g CO_2 equ.}{tkm}$ (Klimaschutzministerium Österreich, 2023) bei einem Leergewicht von 4,65 t angenommen.

Aufgrund der Komplexität und Vielzahl an Berechnungen wurden die Werte und Ergebnisse in der *Tabelle 7* zusammengefasst. Hierbei wird deutlich, dass vor allem die Anlieferungen auf die Baustellen und Einzelfahrten der Gewerke einen großen Einfluss auf den GWP-Wert haben. Bei den Transporten ins Werk wird dahingehend die Beladungsfläche effektiv genutzt und aufgrund der Lagerkapazität können auch größere Transportmittel verwendet werden. Der Unterschied wird noch deutlicher, wenn man die Aufteilung von Massen von 90 % zum Werk und 10 % hinzufügt. Somit zeigt diese Berechnung zudem einen Ansatz, wie in Zukunft bei Transporten im Bau CO₂ eingespart werden kann.

Transportwege Innenausbau beim Modularen Bauen										
km/Fahrt	[km]	40	Leergewicht	[t]	4,65	Leergewicht	[t]	1,43		
t 42t-LKW	[t]	13,00	t 2t-LKW	[t]	4,65	t 3,5t-	[t]	1,43		
Transporte zum Werk					Transporte zur Baustelle					
t/Fahrt	Tatsächliche Massen	Faktor Wege zur Fabrik	Anteil vollbeladener LKWs zum Werk	Durschnitt GWP Wert LKW 42t	GWP Wert	Faktor Wege zur Fabrik	Anteil vollbeladener LKWs zur Baustelle	Durschnitt GWP Wert LKW 3,5t	GWP Wert	
[t]	[t]	[%]	[%]	[kg CO ₂ equ./tkm]	[kg CO ₂ equ.]	[%]	[%]	[kg CO ₂ equ./tkm]	[kg CO ₂ equ.]	
Zimmerer	5	7,35	90	22,82	0,0693	26,57	10	35,52	0,9293	80,49
Fenster	5	7,35	90	22,82	0,0693	26,57	10	35,52	0,9293	80,49
Schlosser	5	7,35	90	22,82	0,0693	26,57	10	35,52	0,9293	80,49
Estrich	8	11,76	90	36,51	0,0693	42,51	10	56,83	0,9293	96,89
Spengler	5	7,35	90	22,82	0,0693	26,57	10	35,52	0,9293	80,49
Fließen	8	11,76	90	36,51	0,0693	42,51	10	56,83	0,9293	96,89
Heizung	5	7,35	90	22,82	0,0693	26,57	10	35,52	0,9293	80,49
Installateur	5	7,35	90	22,82	0,0693	26,57	10	35,52	0,9293	80,49
Holz	5	7,35	90	22,82	0,0693	26,57	10	35,52	0,9293	80,49
Maler	5	7,35	90	22,82	0,0693	26,57	10	35,52	0,9293	80,49
Fußboden	5	7,35	90	22,82	0,0693	26,57	10	35,52	0,9293	80,49
Elektro	5	7,35	90	22,82	0,0693	26,57	10	35,52	0,9293	80,49
Innenausbau	5	7,35	90	22,82	0,0693	26,57	10	35,52	0,9293	80,49
zusätzliche Transporte										
Kleinstmaterial	2,5	3,68	90	11,41	0,0693	13,28	10	17,76	0,9293	66,82
Bauhof	5	7,35	90	100,00	0,3805	85,95	10	0,74	0,3805	18,26
Gesamt						476,49				1.164,23

Tabelle 7 Transportwege für den Innenausbau (modulares Bauen)

Da alle relevanten Gewerke für den Vergleich berücksichtigt wurden, können diese in einer Tabelle zusammengefasst werden (siehe *Tabelle 8*). Dabei ist festzustellen, dass die Einsparungen je größer werden, je kleiner die Transporte werden. Dies liegt vor allem daran, dass diese nicht die Kapazität ihrer Ladungen ausschöpfen und somit viel Luft bei vielen Fahrten transportiert wird. Aus diesem Grund schneidet auch der Modulbau mit seiner Lagerhaltung an der Fabrik mit einem GWP-Wert von 8.953,69 kg CO₂ equ. besser ab als der konventionelle Bau mit 26.855,35 kg CO₂ equ. Dies ergibt ein Verhältnis von 1 zu 0,33 für den Modulbau, der in der Thematik Transportwege durch die optimierten Abläufe deutlich besser abschneidet.

Zusammenfassung der Transportwege von Roh- & Innenausbau			
	GWP-Wert	GWP-Wert	Einsparung
	konventionell Bau	Modulbau	
	[kg CO ₂ equ.]	[kg CO ₂ equ.]	[%]
Rohbau			
Weg zur Baustelle	11.545,00	5.855,57	36,66
Weg zum Produktionswerk	0	1.457,40	
Innenausbau			
Weg zum Produktionswerk	15.310,35	1.164,23	89,28
Weg zum Produktionswerk		476,49	
Gesamt	26.855,35	8.953,69	66,66

Tabelle 8 Zusammenfassung der GWP-Werte von Transportwege des Roh- und Innenausbaus

Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass dies nur eine theoretische Beispielerrechnung ist und eine optimistische Variante der Realität darstellt. Durch die Gesetzeslage und die Berichtspflicht der EU (Velte, 2023, S. 1–2) werden die

Firmen gezwungen, auch ihre Transporte besser zu dokumentieren und zu bewerten. Dadurch verbessert sich die Datenlage und bessere Bewertungen werden möglich. Allerdings muss bei diesem Abschnitt auch berücksichtigt werden, wie groß der Einfluss und das Einsparpotenzial dieser Schritte sind. Die Einordnung wird im Kapitel 4 anhand der Nutzwertanalyse durchgeführt.

3.1.3 Wiederverwendung und Recycling

Bei der Bewertung der Wiederverwendung und des Recyclings wird ebenfalls nur der Rohbau der oberen drei Stockwerke betrachtet. Dies begründet sich darauf, dass beide Gebäude des Vergleichs die gleiche Ausstattung besitzen und deshalb nur der Unterschied der beiden Bauweisen im Fokus steht. Des Weiteren können der Innenausbau, die Technische Gebäudeausrüstung sowie die Fassadengestaltung so differenzierte Materialien mit unterschiedlichen Lebensdauern und Recyclingpotentialen besitzen. Diese Vielzahl an Punkten und deren Bewertung sowie Optimierung sind ein potenzielles eigenes Forschungsthema und würden sowohl den zeitlichen Umfang als auch das Ziel dieser Arbeit verfehlen.

Wie bereits im theoretischen Teil beschrieben, wird mithilfe der Software eco2soft das Recyclingpotenzial ermittelt. Für die Vereinfachung werden wiederum nur der Rohbau mit den Stahlbetondecken und Wänden sowie die doppeltbeplankte Rigips-Trockenbauwände berechnet. Beide Baugruppen müssen in der Software einer Kategorie aus *Tabelle 1*, Kapitel 2.3.2 zugeordnet werden. Stahlbeton wird hierbei der Kategorie zwei zugeordnet, während die Innenbauwände durch den Gipsanteil der schlechteren Kategorie vier zugeordnet werden. Dadurch sind alle Informationen vorhanden und das Entsorgungspotenzial des konventionellen Baus berechnet sich im Zuge der Gesamtauswertung automatisch. Das Ergebnis des GWP-Wertes mit 26.012 kg CO₂ equ. wird als Auszug in der *Abbildung 17* dargestellt.

Entsorgung	PNRT	GWP-total	AP
	HJ	kg CO ₂ equ.	kg SO ₂ equ.
Summe (98,3% aller Materialien mit bekannter Masse berücksichtigt)	512.123	26.012	160

Abbildung 17 Anteil der Entsorgung aus eco2soft (konventioneller Bau)

Wie bereits im Abschnitt 2.3.1 erwähnt, muss für den Modulbau ein fiktives Szenario erarbeitet werden. Dies basiert darauf, dass die Module im ersten Schritt, wie bereits erläutert, wie geplant gebaut werden und einen ersten Lebenszyklus durchleben. Die

erste Unterscheidung erfahren die Module beim Abriss oder Rückbau des Gebäudes. Beim konventionellen Bau werden die einzelnen Bauteile recycelt oder deponiert. Im Modulbau werden die einzelnen Module ganz demontiert zurück in die Modulbaufabrik transportiert. Dort wird der Rahmen geprüft und instandgesetzt, während die Ausfachungen und der Trockenbau demontiert und recycelt werden. Die Rohlinge werden wiederum mit neuen Ausfachungen ausgestattet und wieder verbaut. Nach dem Ende der zweiten Betriebsdauer des zweiten Lebenszykluses werden diese dann wiederum fachgerecht entsorgt bzw. recycelt. Dieses Ablaufszenario ist zum besseren Verständnis in einem Schema in der folgenden *Abbildung 18* dargestellt.

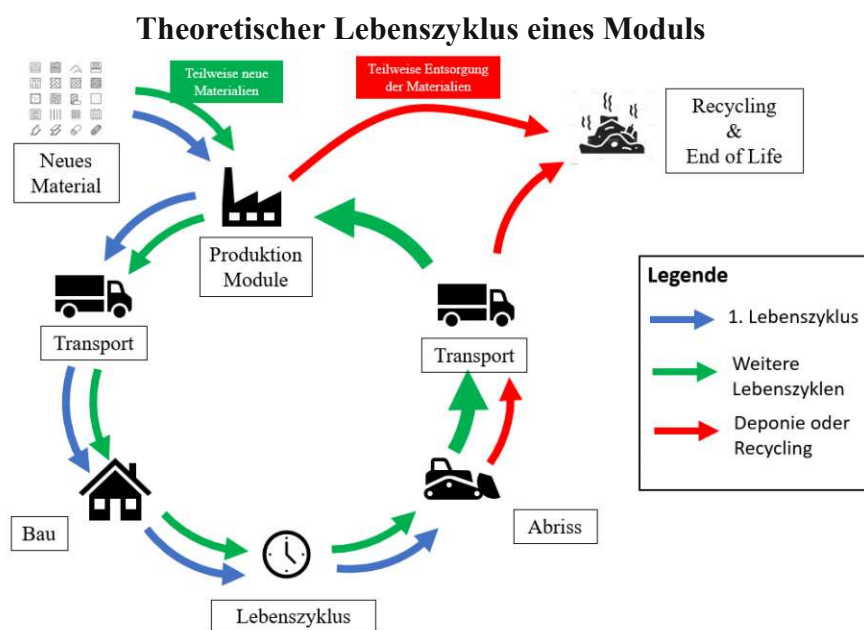


Abbildung 18 Schema eines theoretischen Lebensweges für ein Modul

Daraus ergeben sich zwei relevante Werte, welche zu bewerten sind. Der erste Wert ist die klassische Entsorgung des Moduls. Die zweite relevante Größe ist die Einsparung des Materials aus Phase A1 bis A3 bei einer Wiederverwendung der Modul-Rohlinge. Es wird zur Vereinfachung die Annahme getroffen, dass das Gebäude im zweiten Lebenszyklus baugleich errichtet wird. Somit kann ein besserer Vergleich hergestellt werden.

Für die Entsorgung selbst werden im ersten Schritt die Werte für die Entsorgung der einzelnen Module mit eco2soft ermittelt (siehe Anhang I). Diese werden, um das ganze Gebäude bewerten zu können, mit der Anzahl der notwendigen Module multipliziert. Somit erhalten wir für die Entsorgung des Modulbaus-Rohbaus am Ende des Lebensweges einen GWP-Wert von 26.204 kg CO₂ equ.. Im nächsten Schritt werden

die GWP-Werte der Entsorgung für die Module ohne Ausfachung ebenfalls mit eco2soft ermittelt (siehe Anhang J). Diese werden ebenfalls multipliziert, um den vollständigen GWP-Wert der Entsorgung der Module zu berechnen. Da nach dem ersten Lebenszyklus nur die Ausfachung ausgetauscht wird und die Modul-Rohlinge wiederverwendet werden, werden die GWP-Werte der vollständigen Module mit den GWP-Werten der Rohlinge subtrahiert. Die Differenz wird zudem mit einem Sicherheitszuschlag von 10 % multipliziert, welcher etwaige Ausbesserungen und Schäden berücksichtigen sollen. Daraus folgend ergibt sich nach dem ersten Lebenszyklus für die Entsorgung des Modulbaus ein GWP-Wert von 3.095,40 kg CO₂ equ. . Die Ergebnisse wurden in der folgenden *Tabelle 9* zusammengefasst.

GWP-Werte für die Entsorgung (Modulbau)

	Module	BGF	GWP-Entsorgung einzelne Module	GWP-Gesamt	GWP-Entsorgung einzelne Module Rohlinge	GWP-Gesamt Rohlinge	Faktor Zuschlag	GWP-Entsorgung nach 1. Lebenszyklus
	Anzahl	[m ²]	[kg CO ₂ equ.]	[kg CO ₂ equ.]	[kg CO ₂ equ.]	[kg CO ₂ equ.]	[%]	[kg CO ₂ equ]
	Modul mit Ausfachungen				Modul mit Ausfachungen			nach 1. Lebenszyklus
Modultyp 1	30	18,75	321,00	9.630,00	287,00	8.610,00	10	1.122,00
Modultyp 2	2	18,00	342,00	684,00	280,00	560,00	10	136,40
Modultyp 3	20	13,13	292,00	5.840,00	248,00	4.960,00	10	968,00
Modultyp 4a	20	14,06	342,00	6.840,00	325,00	6.500,00	10	374,00
Modultyp 4b	10	14,06	321,00	3.210,00	276,00	2.760,00	10	495,00
Summe GWP				26.204,00		23.390,00		3.095,40
GWP-Entsorgung nach zwei Lebenszyklen bei vollständiger Entsorgung					[kg CO ₂ equ.]	29.299,40		

Tabelle 9 GWP-Werte für die Entsorgung (Modulbau)

Um einen konstruktiven Vergleich bei der Entsorgung der Materialien herzustellen, müssen die Werte am Ende des ersten Lebenszyklus und am End-of-Life (Ende des zweiten Lebenszyklus) addiert werden. Das Ergebnis des GWP-Wertes für die Entsorgung ist 29.299,40 kg CO₂ equ. . Das Ergebnis für den konventionellen Bau muss aufgrund der Betrachtung eines zweiten Gebäudes verdoppelt werden. Demnach erhalten wir einen GWP-Wert für die Entsorgung von 52.024,0 kg CO₂ equ.. Das Verhältnis bei der reinen Entsorgung der Materialien liegt demzufolge bei 1 zu 0,56 für den Modulbau.

Für das vollständige Einsparungspotenzial werden nochmals die Phasen A1 bis A4 betrachtet, da der Emissionsaufwand für den zweiten Lebenszyklus ebenfalls berücksichtigt werden muss. Beim Modulbau werden aus diesem Grund von den einzelnen Modultypen die Investitionsemissionen der Rohlinge mit eco2soft berechnet (siehe Anhang J). Diese werden wiederum, für die vollständige Betrachtung des

Projektes, mit der Anzahl der verwendeten Module multipliziert. Die Berechnungen sind in der *Tabelle 10* zusammengefasst.

GWP-Wert Phase A1 - A3 (Modul-Rohlinge)

	Module	BGF	GWP-Wert	
			einzelne Module	GWP-Gesamt
	Anzahl	[m ²]	[kg CO ₂ equ.]	[kg CO ₂ equ.]
Rohlinge				
Modultyp 1	30	18,75	2.735,00	82.050,00
Modultyp 2	2	18,00	2.669,00	5.338,00
Modultyp 3	20	13,13	2.366,00	47.320,00
Modultyp 4a	20	14,06	3.095,00	61.900,00
Modultyp 4b	10	14,06	2.634,00	26.340,00
Summe GWP				222.948,00

Tabelle 10 GWP-Wert Phase A1 - A3 (Modul-Rohlinge)

Zusammenfassung der Einsparpotentiale

	GWP-Wert		Einsparung
	konventioneller Bau	Modulbau	
	[kg CO ₂ equ.]	[kg CO ₂ equ.]	[kg CO ₂ equ.]
1. Lebenszyklus			
1. Lebenszyklus	245.451,93	249.378,14	3.926,21
Transport	26.855	8.953,69	-17.901,66
2. Lebenszyklus			
2. Lebenszyklus	245.451,93	29.073,15	-216.378,78
Transport	26.855	9.849,06	-17.006,29
Gesamt	544.614,56	297.254,04	-247.360,52

Tabelle 11 Zusammenfassung der Einsparpotentiale

Für die Ermittlung der Emissionen im zweiten Lebenszyklus werden die Ergebnisse aus dem ersten Lebenszyklus für die Phasen A1 bis A3 aus Kapitel 3.1.1 übernommen. Die Transportwege (Phasen A4) können ebenfalls aus Abschnitt 3.1.2 verwendet werden. Weiterhin können die Werte für den konventionellen Bau ebenso im zweiten Lebensweg verwendet werden, da hier eine vollständige Errichtung eines neuen Gebäudes stattfindet. Beim Modulbau wird, wie schon bei der Entsorgung, davon ausgegangen, dass nochmals das gleiche Haus errichtet wird. Somit kann der Wert des ersten Lebenszyklus nochmals verwendet werden. Da die Rohlinge jedoch bereits vorhanden sind, müssen diese auch nicht nochmals erzeugt werden und besitzen keine Investitionsemission mehr. Durch die Differenz aus dem ursprünglichen GWP-Wert und dem GWP-Wert der Rohlinge kann somit der Wert für den Bau im zweiten Lebenszyklus ermittelt werden. Als Sicherheitszuschlag wird diesem Wert nochmals ein Faktor von 10 % aufaddiert, um etwaige Ungenauigkeiten und Ausbesserungen pauschal abzudecken. Demzufolge entsteht bei der Errichtung des Gebäudes im zweiten Lebenszyklus eine GWP-Wert-Emission von 29.073,15 kg CO₂ equ. . Da der Transport der Module in beiden Zyklen der gleiche ist, kann wiederum der Wert aus dem ersten Zyklus verwendet werden. Dieser wird ebenfalls mit einem Sicherheitsfaktor von 10 % bedacht, um die Mehrkosten für die Deponierung mit einzubeziehen. Alle errechneten Werte sind in der *Tabelle 11* berechnet und zusammengefasst.

Resultierend ist festzustellen, dass durch eine 100 %-tige Wiederverwendung der Rohlinge ein Einsparpotenzial von 247.360,52 kg CO₂ equ. erreicht wird. Diese Einsparung ist größer als der Anteil der Investitionsemissionen eines Zyklus im

konventionellen Bau. Berechnet man den Quotienten der Gesamtergebnisse aus dem konventionellen Bau mit $544.614,56 \text{ kg CO}_2 \text{ equ.}$ und aus dem Modulbau von $297.254,04 \text{ kg CO}_2 \text{ equ.}$, erhält man ein Verhältnis von 1 zu 0,55 für den Modulbau. Die Verhältnisse zeigen, dass sowohl die reine Entsorgung (siehe oben) als auch die vollständige Wiederverwendung der Module in einem zweiten Lebenszyklus große Potenziale besitzen. Das Szenario der Wiederverwendung ist allerdings fiktiv und wird nach einer großen Wahrscheinlichkeit keine Wiederverwendungsrate der Rohlinge von 100 % erreichen. Die Endergebnisse weisen jedoch genug Potenziale für weitere Forschung und die Entwicklung wirtschaftlicher Erfolgsmodelle auf.

3.2 Zeitliche Betrachtung

Bei der zeitlichen Komponente gibt es zwei mögliche Zeiträume, welche betrachtet werden können: Zum einen die reine Betrachtung des Rohbaus und des Innenausbaus der Geschosse und zum anderen den gesamten Zeitraum auf der Baustelle. Beide Optionen sind wichtig und haben teilweise eine Auswirkung auf nachfolgende Betrachtungen. Bei jeder Berechnung wurde ein zusätzlicher Faktor von zwei Stunden pro Woche mehr in den Arbeitsstunden gegeben, da häufig die Arbeit auf der Baustelle finalisiert wird und die Arbeitsstunden nicht pünktlich abgegolten werden. Dadurch, dass verschiedene Gewerke und Bautrupps die Tätigkeiten ausführen, kommt es auf den Baustellen nicht zum Ausgleich der Zeit.

Als Grundlage für die Ermittlung der Bauzeit im konventionellen Bau wird der Phasenplan verwendet. Dieser ist in Anhang K in zwei Teilen dargestellt. Der erste Teil zeigt eine grobe Gliederung des gesamten Zeitplans, während der zweite Plan die einzelnen Gewerke des Innenausbaus gliedert. Die Bauzeit des gesamten Objektes wurde auf 17 Monate, von Anfang März 2016 bis Ende September 2017 geplant. Um einen Vergleich darzustellen, wird für den konventionellen Bau die Bauzeit in Stunden ermittelt. Bei einer 5-Tagewoche auf der Baustelle sind die angegebenen Monate rund 397 Tage bzw. bei ca. 8h-Arbeitszeit pro Tag 3.176 Arbeitsstunden. Da der Modulbau nur die Phasen des Rohbaus und des Innenausbaus abdeckt, ist es im nächsten Schritt wichtig, diese beiden Phasen für den konventionellen Bau separat zu ermitteln. Nach Planung des Phasenplans dauert der Rohbau des konventionellen Baus demnach 18 KW. Dies sind nach einer Umrechnung mit Sicherheitsfaktor 765 h. Der

Innenausbau ist nach Auswertung des zweiten Teils des Phasenplans aus Anhang K 35 KW, was 1.470 h entspricht.

Für den Modulbau wird im ersten Schritt die Produktionsdauer ermittelt. Da je nach Werk und Anzahl der Schichten eine unterschiedliche Produktionskapazität möglich ist, wurde diese in *Abbildung 19* grafisch dargestellt. Am Schnittpunkt der Geraden mit der Abszisse können die notwendigen Produktionstage abgelesen werden. Am Schnittpunkt mit den Kurven der Montage (dunkelblau und dunkelorange) ist zudem die Anzahl an Modulen zu erkennen, welche zum Beginn der Montage auf der Baustelle bereits vorgefertigt sein müssen, um einen perfekten Baustellenablauf zu gewährleisten. Die Anzahl der möglichen Module, die auf einer Baustelle an einem Tag mit einem Kran montiert werden können, wird nach Angabe eines Herstellers auf zehn Module pro Tag definiert (Bayerischer Rundfunk, 2019). Je nach Art und Aufstellmöglichkeiten der Baustelle können mehrere Kräne verwendet werden und somit eine größere Anzahl an Modulen montiert werden. Dies hat wiederum die Auswirkung, dass zu dem Zeitpunkt des Beginns der Montage eine größere Anzahl an Modulen vorproduziert sein muss. Da das Vergleichsprojekt allerdings ein kleines Bauvolumen besitzt, wird die Annahme für den Vergleich getroffen, dass nur ein Kran die Module montiert. Demzufolge beträgt die Baustellenzeit für die Montage aufgerundet 9 Tage. Für die Produktionszeit wird durch die verwendeten, kleinen bis mittelgroße Module angenommen, dass 1,5 Module pro Tag produziert werden können. Somit werden die Module für unser Projekt in 55 Tagen bzw. etwas mehr als 9 Wochen produziert.

Produktions- und Errichtungstage

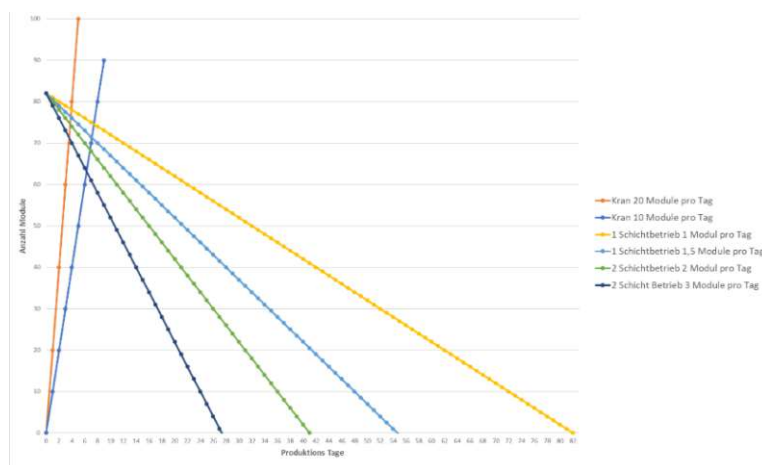


Abbildung 19 Diagramm zur Ermittlung der Produktions- und Errichtungstage

Um die Werte vom konventionellen Bau und Modulbau vergleichbar zu machen, müssen die Baustellenstunden des Rohbaus und die des Innenausbaus angepasst werden. Für den Rohbau bedeutet dies, dass Keller, Fundamente und weitere kleinere Arbeiten herausgerechnet werden müssen. Als Annahme für den zeitlichen Aufwand werden hierfür 35 % abgeschätzt und somit beträgt die reine Rohbauzeit der drei Geschosse aufgerundet 498 h. Beim Innenausbau ist der Grad der Vorfertigung der Module auf 90 % definiert (siehe Abschnitt 3.1.2). Ebenfalls muss der Ausbau des Kellers mit der Annahme von 10 % berücksichtigt werden. Zudem wird für Ausbesserungen nochmals ein Sicherheitszuschlag von 5 % angesetzt. Dadurch verringert sich die Bauzeit des Innenausbaus aufgerundet auf 1.104 h. Addiert sind dies 1.602 h, welche im konventionellen Bau für ein vergleichbares Ergebnis benötigt werden. Wird im Modulbau die zeitliche Abfolge der Montage hinter die vollständige Produktion angehängt, erhalten wir als Vergleichswert eine Bauzeit von 512 h für Produktion und Montage. Die reine Baustellenzeit von 72 h ist somit nur noch 6,5 % der konventionellen Bauzeit dieses Bauabschnittes.

Um eine Einschätzung der berechneten Werte zu erhalten, wird dieses in den Kontext von anderen Projekten eingestuft. Hierfür wird der Quotient aus Arbeitsstunden und der Wohnfläche für beide Varianten ermittelt. Somit erhalten wir beim konventionellen Bau mit einer WF von 1.072 m² einen Faktor von 1,5 h/m² auf der Baustelle. Beim Modulbau liegt dieser Wert bei einer WF von 1.026,4 m² und einer Produktionszeit im Werk von 440 h bei 0,43 h/m². Diese Werte sind zur optischen Einordnung in die Grafik von (Borosnyai, 2018, S. 105) in Abbildung 20 dargestellt.

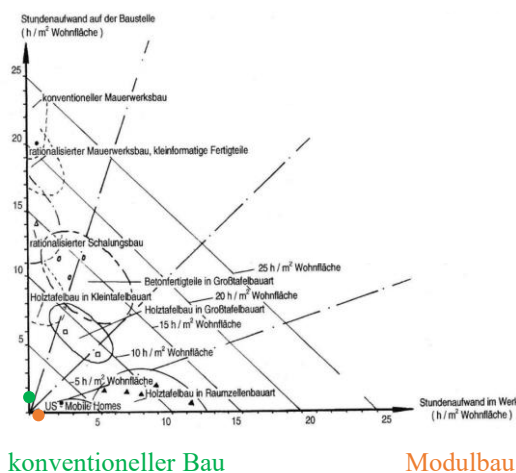


Abbildung 20 Stundenaufwand verschiedener Bauarten (Borosnyai, 2018, S. 105) mit Eintrag der Beispieltberechnungen

Bei der Einordnung der Grafik muss jedoch berücksichtigt werden, dass zu einem vollständigen Vergleich mit den übrigen Werten der Grafik in beiden Berechnungen noch weitere Bauabschnitte, wie der Fassadenbau und der Tiefbau, in den Kosten fehlen. Dennoch kann festgestellt werden, dass trotz der Art der Baumethode mit Beton, beide Bauweisen sehr schnell durchgeführt wurden.

Für die Berechnung der vollständigen Bauzeit ist die Ermittlung komplexer, da sich die verschiedenen Bauabschnitte zeitlich überschneiden. Man kann davon ausgehen, dass beim Rohbau, für die Bauabschnitte Verfüllung und Kanalarbeiten die gleiche Zeit in beiden Varianten benötigt wird. Aus diesem Grund wird die Montage der Module in KW 40 beginnen und bis Ende KW 41 andauern. Folglich verkürzt sich die Zeit des Rohbaus um 168 h. Diese Bauzeit können die Gewerke wie Fassadenausbau und Innenausbau früher beginnen. Durch die Annahme, dass beim Innenausbau 75 % der Bauzeit des Innenausbaus gespart werden können, verkürzt sich zudem die Zeit von 35 KW auf 9 KW bzw. 378 h. Die Annahme der 75 % beruht darauf, dass neben den 10 % zur Fertigstellung der Module 10% für Keller und Anschlüsse sowie 5% für Ausbesserungen durch Transportschäden benötigt werden. Ordnet man dies in den Kontext des Phasenplans von Anhang K ein, beginnt der Innenausbau in KW 43 und endet, den Jahreswechsel mit einberechnet, in der KW 2. Da die Bauzeit des Fassadenbaus bis KW 9 andauert und die Pufferzeit bis zur Abnahme ebenfalls beibehalten werden soll, verkürzt sich die Gesamtbauzeit des Projekts final um 16 Wochen. Dies sind 672 Arbeitsstunden und die Gesamtbauzeit beträgt somit 2.504 Arbeitsstunden auf der Baustelle. Das Verhältnis der Bauzeit auf der Baustelle ist somit 1 zu 0,79 für den Modulbau. Die Produktionszeit in der Firma wird nicht berücksichtigt, da diese für das Projekt im Zuge dieser Bauzeit durchführbar ist und somit parallel bzw. gleichzeitig stattfindet.

3.3 Energetische Betrachtung

Die Auswertung von Baustellendaten ist sehr mannigfaltig. Wie bereits in den Grundlagen in Abschnitt 2.4.2 erläutert, besitzt neben der Baustelle selbst, auch der Standortfaktor eine große Auswirkung auf den Energieverbrauch und den davon abhängigen CO₂-Wert. In dem Vergleichsprojekt besteht vor allem die Schwierigkeit darin, relevante Daten zu sammeln. Dies ist dahingehend begründet, dass die Gebäude

Teil eines größeren Bauabschnittes waren und somit entsprechende Werte nicht separiert für das Gebäude ausgelesen werden können. Zudem wurden für die Abrechnung der Baustelle nicht relevante Daten pauschal zusammengefasst und liegen daher ebenfalls nicht in dem benötigten Detailgrad vor.

Für den Vergleich werden im konventionellen Bau nur die Bauphasen des Roh- und Innenausbaus verwendet, da diese ebenso im Modulbau anfallen. Deshalb wird für diese Bauabschnitte der Energieaufwand berechnet. Dies macht die Evaluierung der Daten schwieriger, da sich verschiedene Bauabschnitte überschneiden. Aus diesen Gründen werden Daten aus Forschungsarbeiten verwendet, welche mit Erfahrungswerten als Annahme ergänzt werden. Die Basis der Datenwerte bildet die Arbeit von Piatek (Piatek, 2021, S. 41–90), der die Thematik der Energie auf der Baustelle an verschiedenen Arten von Baustellen in seiner Thesis untersucht hat. Die Problematik bei der Bewertung der Kennwerte ist, dass jede Baustelle hier ihre individuellen Werte besitzt, welche in direkter Verbindung zu deren Bauzeit stehen. Eine große Anzahl an Personal auf der Baustelle hat somit einen größeren Bedarf an Maschinen und Unterbringung und somit einen größeren Energieverbrauch, reduziert aber im Gegensatz dazu die Bauzeit erheblich.

Im ersten Schritt werden für die Ermittlung der Energieverbräuche auf der Baustelle die anfallenden Energieverbraucher definiert und nach Gruppe sowie Bauabschnitten eingeordnet. Für diese Energieverbraucher wird weiter eine Anzahl aus Erfahrungswerten abgeschätzt und der maximale Energieverbrauch der Geräte nach Piatek (Piatek, 2021, S. 53–61) definiert. Über die angenommene Betriebszeit nach Stunden pro Tag kann somit anhand der ermittelten Bauzeit der Bauabschnitte aus Kapitel 3.2 der Gesamtenergieverbrauch für Roh- und Innenausbau berechnet werden. Die Betriebszeit ist hierbei eine wichtige Einflussgröße. Sie definiert in erster Hinsicht die klassische Nutzung, die das Gerät am Tag läuft. Allerdings wird bei einem Container z.B. nie gleichzeitig geheizt und gekühlt. Somit wird diese maximale Leistung nie erreicht. Demgegenüber steht jedoch, dass auch öfter vergessen wird, das Klimagerät abzustellen, und somit die Laufzeit wesentlich länger als die acht Stunden in Betrieb ist. Demzufolge sind die Betriebszeiten rein geschätzte Faktoren, welche an den realen Baustellenbetrieb angelehnt sind. Die Werte inklusive der Berechnungsergebnisse sind in der folgenden *Tabelle 12* zusammengefasst.

Energieverbrauch auf der Baustelle

Gruppe	Betrachtungszeitraum	Art des Verbrauchers	Anzahl	Leistung	Bauzeit	Betriebszeit	Betriebszeit	Betriebszeit	Verbrauch	GWP Wert		
			[Stk.]	[W]	[d]	[h/d]	[h]	[Wochen]	[kWh]	[kg CO ₂ equ.]		
Baucontainer	gesamt	Mannschaftscontainer	3	5.200	200	3,0	600	15	9.360	4.062,2		
		Bürocontainer	2	6.200	200	3,0	600	15	7.440	3.229,0		
		Sanitärcontainer	2	3.200	200	3,0	600	15	3.840	1.666,6		
		Besprechungscontainer	1	5.200	200	3,0	600	15	3.120	1.354,1		
		Küchen- & Erste-Hilfecontainer	1	5.600	200	3,0	600	15	3.360	1.438,2		
		Magazincontainer	2	200	200	1,9	380	10	152	66,0		
Beleuchtung	individuell	Baustellenscheinwerfer	3	400	200	1,9	380	10	456	197,9		
		Kranstrahler	3	1.500	65	1,9	124	3	556	241,2		
		Baustrahler	10	100	200	3,8	760	19	760	329,8		
Kran	Rohbau	Turmdrehkran	1	49	65	4,0	260	7	13	5,5		
Kleingeräte	Rohbau	Schlagbohrmaschinen	3	2.500	65	1,2	78	2	585	253,9		
		Schlagschrauber	2	2.500	65	0,6	39	1	195	84,6		
		Winkelschleifer	4	1.500	65	2,0	130	3	780	338,5		
		Tischkreissäge	1	5.000	65	0,7	46	1	228	98,7		
		Handkreissäge	2	2.500	65	1,4	91	2	455	197,5		
		Flaschenrüttler	2	1.800	65	0,6	39	1	140	60,9		
	Innenausbau	Handkreissäge	2	2.300	138	0,3	41	1	190	82,7		
		Schlagbohrmaschine	2	2.500	138	0,8	110	3	552	239,6		
		Winkelschleifer	2	1.500	138	0,2	28	1	83	35,9		
		Mehrwecksauger	2	1.200	138	1,5	207	5	497	215,6		
		Schleifgiraffe	2	1.500	138	0,8	110	3	331	143,7		
		Sonstiges	10	1.800	138	2,5	345	9	6.210	2.695,1		
		Heizung und Trocknung	individuell	Estrichtrocknung	2	21.600	50	4,0	200	5	8.640	3.749,8
				Heizlüfter	20	2.000			800	20	32.000	13.888,0
Gesamt Strom									79.943	34.695,0		
				[l]								
Sonstiges		Dieselgeräte	pauschal	7.000							18.550,0	
Gesamt Diesel										18.550,0		

Tabelle 12 Energieverbrauch auf der Baustelle - eigene Berechnung ergänzt mit Werten von (Piatek, 2021)

Zur Überprüfung der Daten wird der Stromverbrauch von 79.943 kWh mit dem Stromverbrauch des Gebäudes von Piatek (Piatek, 2021, S. 64) verglichen. Hierbei ist auffällig, dass der Stromverbrauch eines ca. 8,5-fach größeren Gebäudes mit 243.601 kWh nur einen ca. 3-fach größeren Stromverbrauch besitzt. Die ermittelten Werte können dennoch als sinnvoll angenommen werden, weil auf der einen Seite in dieser Arbeit zwei Gebäude gleichzeitig errichtet und somit mehr Leute und mehr Maschinen simultan arbeiten. Zum anderen werden Faktoren wie die Heizung in diesem Projekt in Einzelgeräten berechnet. Diese Annahme hat dementsprechend eine höhere Gesamtleistung zur Folge. Ebenso kommt durch die höhere Anzahl an Baucontainern zusätzlich noch ein hoher Anteil an Energie hinzu, der verhältnismäßig auf die Dimension der beiden wissenschaftlichen Arbeiten gesehen, einen größeren Einfluss auf die Berechnung in dieser Arbeit besitzt. Da eine Beurteilung zwei verschiedener Baustellen jeweils andere Verhältnisse aufweist, weicht ebenfalls der Bericht von Obernosterer et al. (Obernosterer et al., 2021), welcher Transporte und den Gesamtenergieverbrauch verschiedener Baustellen verglichen hat, ab. Somit kann

das Ergebnis als energetisch schlechte Baustelle eingestuft werden, aber dennoch als hinreichend für diese Arbeit, da alle Ergebnisse ins Verhältnis gesetzt werden.

Um für den Vergleich die verschiedenen Energieverbräuche denen des Modulbaus gegenüberzustellen, werden diese Werte in einen GWP-Wert umgerechnet. Als Annahme gilt, dass der Baustrom den Umrechnungsfaktor des deutschen Strommix besitzt. Der Faktor ist, wie bereits in Kapitel 2.4.2 erwähnt, $0,434 \frac{g CO_2 equ.}{kWh}$. Der Umrechnungsfaktor für Diesel ist $2,65 \frac{kg CO_2 equ.}{l}$. Die Summe aus den Werten für Strom und Diesel ergeben folglich einen gesamten GWP-Wert von $53.245 kg CO_2 equ.$.

Für die Betrachtung des Energiebedarfes bei der Erzeugung von Betonmodulen wurden Anfragen für ein Interview an verschiedene Betonmodul-Hersteller gemacht. Die Antworten auf diese Fragen wurden als Firmengeheimnisse deklariert, auf die öffentlichen Produktberichte hingewiesen und blieben somit unbeantwortet. Die Ergebnisse der Fachliteratur ergeben zu diesem Thema ebenso unzureichende Werte und sind dadurch als Quellen nicht verwendbar. Aus diesem Grund wurden auf Basis einer Abschätzung und von Erfahrungswerten die energetischen Verbrauchswerte eines fiktiven Werks ermittelt. Die Erfahrungen stammen aus verschiedenen Projekten der Firma HEBERGER. Allerdings dürfen die Daten aufgrund rechtlicher Vorgaben nicht als offizielle Quellen verwendet werden. Auf Basis dieser Daten wurde eine Halle entworfen, welche eine BGF im Hallenbereich von $2.494 m^2$ besitzt und am Kopfende zusätzlich noch einen kleinen Bürobereich mit $179 m^2$ BGF aufweist. Die Anzahl der Angestellten wird mit 30 bis 40 Arbeitenden angenommen, wovon zehn Angestellte im Bürobereich arbeiten. Der Grundriss dieser Halle ist als Skizze in Anhang L dargestellt. Hierfür werden im nächsten Schritt energetische Anlagen ausgelegt, um den Energieverbrauch über das Jahr zu bestimmen. Für den Bereich der Installationen werden Erfahrungswerte ähnlicher Produktionshallen verwendet. Die spezielle Anlagentechnik für den Modulbau ist von einem Fachhersteller ausgelegt worden und liegt aufgrund des Datenschutzes nur intern vor. Bei den Werten der HLKS wird eine allgemeingültige Auslegung von $80 W/m^2$ für eine Luft/Wasser-Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von 3,5 gemacht. Im Allgemeinen wird bei der Heilastberechnung ein Wert von 1.500 bis 2.500 h Vollbenutzungsstunden für Produktionsgebäude angenommen (Blesl et al., 2009, S. 84). Durch die

Wärmegewinne der Härtekammer und die Arbeitsgrundlagen mit stetiger Bewegung wird die Höhe der Volllaststunden um 40 % reduziert. Die übrigen Werte werden nach der Anzahl des Personals angepasst. Auf eine Kühlung wird in dem Projekt verzichtet und ist gesetzlich nicht zwingend notwendig. Für alle elektrischen Verbraucher wird ebenfalls eine Anzahl an Betriebsstunden festgelegt. Somit errechnet sich anhand der Leistung ein Gesamtjahresverbrauch von 421.538 kWh. Die Annahmen und Ergebnisse sind in der folgenden *Tabelle 13* zusammengefasst.

Anlagentechnik eines Produktionswerks

Stromversorgung	Anzahl	Einzelleistung	Gesamtleistung	Betriebsstunden	Arbeitstage	Volllaststunden	Energiebedarf
	[Stk.]	[W]	[W]	[h/d]	[d/a]	[h/a]	[kWh/a]
Installationen			468.840				178.892
Beleuchtung Halle	52	270	14.040	10,00	280		39.312
Beleuchtung Sozialräume	1	1.000	1.000	10,00	280		2.800
Beleuchtung Lager und Technik der Anlage	81	150	12.150	10,00	280		34.020
Schweißgerät	2	7.000	14.000	3,00	280		11.760
Kleingeräte wie Akku-Ladestationen	10	500	5.000	5,00	280		7.000
Ladestation Stapler	1	20.000	20.000	5,00	280		28.000
Portalkrane 20t (oder 1x 40t)	2	100.000	200.000	1,00	280		56.000
Anlagen			55.400				52.472
Palettenumlaufanlage	6	1.500	9.000	2,00	280		5.040
Querhubwagen	2	3.700	7.400	1,00	280		2.072
Unwuchtantriebe (Schüttelstation)	6	2.800	16.800	3,00	280		14.112
Außenrüttler (Rüttelstation)	6	1.200	7.200	3,00	280		6.048
Heizsystem (Härtekammer)	2	7.500	15.000	6,00	280		25.200
HLSK			233.000				112.049
Wärmepumpe	2	28.500	57.000			1.000	57.000
Durchlauferhitzer Ausgußbecken/ Küche	7	11.000	77.000	0,10	280		2.156
Durchlauferhitzer Waschtische	6	3.500	21.000	1,00	280		5.880
Durchlauferhitzer Duschen	3	21.000	63.000	0,75	280		13.230
Hebeanlage	1	5.000	5.000	0,10	365		183
Lüftungsanlage	1	10.000	10.000	12,00	280		33.600
Sonstiges			28.250				78.125
Büroarbeitsplätze	10	325	3.250	10,00	250		8.125
Sonstiges	1	25.000	25.000	10,00	280		70.000
Gesamt			785.490				421.538

Tabelle 13 Anlage eines Produktionswerks (Modulbau)

Neben den Verbräuchen besitzt eine zeitgemäße Produktionsstätte zur Gewinnung von erneuerbarer Energie eine Photovoltaik-Anlage auf dem Dach. Bei der Belegungsfläche wird angenommen, dass aufgrund von technischen Anlagen und Lichtkuppeln ein Flächenanteil von 70 % belegt wird. Somit ergibt sich bei einer Annahme von $6 \frac{m^2}{kWp}$ eine Gesamtanlage mit 290 kWp. Anhand dieser Information kann mit Hilfe des Tools der EU-Kommission (European Commission, 2023) für den Standort Neulußheim in Baden-Württemberg (Standort der Firma HEBERGER System-Bau GmbH) der Energiegewinn ermittelt werden. Das Resultat der Berechnung ist in Anhang M dargestellt. Die jährlichen Gewinne von $292.047 \frac{kWh}{a}$

werden bilanztechnisch vom Verbrauch des Werks abgezogen. Somit liegt der Gesamtjahresverbrauch des Werkes bei $129.491 \frac{kWh}{a}$. Um den Verbrauch für das fiktive Gebäude zu ermitteln, muss dementsprechend der Verbrauch pro Tag ermittelt werden. Dieser beträgt $462,5 \frac{kWh}{d}$. Bei der Annahme, dass 1,5 Module pro Tag erstellt werden (siehe Kapitel 3.2), liegt die Produktionsdauer von dem betrachteten Projekt bei 55 Tagen. Somit ergibt sich ein Gesamtenergieverbrauch des Modulbauprojekts von $25.435,7 kWh$. Dieser Verbrauch wird wiederum mit dem Umrechnungsfaktor von $0,434 \frac{kg CO_2 equ.}{kWh}$ umgerechnet. Damit errechnet sich ein GWP-Wert von $11.039,1 kg CO_2 equ.$ für den Verbrauch im Werk. Mit der hypothetischen Annahme, dass das Werk Ökostrom mit einem Umrechnungsfaktor von $0,040 \frac{kg CO_2 equ.}{kWh}$ beziehen würde, reduziert sich der GWP-Wert auf $1.017,4 kg CO_2 equ.$.

Neben der Produktion muss ebenso die Montage der Module berücksichtigt werden. Hierfür wird ein Schwerlast-Autokran mit mindestens 300 t benötigt. Für dessen An- und Abfahrt werden pauschal 100 l Diesel-Treibstoff veranschlagt. Als Beispiel wird der Kran LTM 1350-6.1 mit 6 Achsen der Firma Liebherr verwendet. Dieser besitzt als Kranoberwagen einen Motor mit 180 kW Leistung (Liebherr, 2023, S. 5). Somit ergeben sich bei abgeschätzten $3 \frac{h}{d}$ Volllast und neun Montagetag eine Gesamtleistung von $4.860 kWh$. Durch den Umrechnungsfaktor von $9,91 \frac{kWh}{l}$ (Schwertner, 2017) ergeben sich $490,4 l$ und insgesamt $590,4 l$ Diesel Gesamtverbrauch. Folglich wird für die Montage mit einem Schwerlastkran ein GWP-Wert von $1.564,6 kg CO_2 equ.$ emittiert. Die Anlieferung der Module mit LKWs wird nicht berücksichtigt, da diese bereits in Kapitel 3.1.2 ermittelt wurden.

Zusätzlich müssen die Verbräuche für das Herstellen der Verbindungen zwischen den Modulen und dem restlichen Innenausbau ermittelt werden. Diese können nicht exakt bestimmt werden, da noch keine Erfahrungswerte gesammelt wurden. Als pauschale Annahme werden deshalb 3 % der Berechnung des konventionellen Baus ermittelt. Diese Annahme beruht darauf, dass der Vorfertigungsgrad bei 90 % liegt. Des Weiteren werden auf der Baustelle keine Container und auch kein Baustellenkran benötigt. Zudem sind die Anzahl und die Art der Verwendung der Geräte stark reduziert. Aus diesem Grund sind die $1.597,4 kg CO_2 equ.$ eine konservative Abschätzung.

In Summe ergibt sich beim Modulbau ein GWP-Wert von $14.202,1 \text{ kg CO}_2 \text{ equ.}$ für die Produktion und Montage. Bezieht das Werk Ökostrom sinkt der GWP-Wert sogar noch um $10.021,7 \text{ kg CO}_2 \text{ equ.}$ auf $4.179,4 \text{ kg CO}_2 \text{ equ.}$. Somit ist das Verhältnis vom konventionellen Bau zum Modulbau 1 zu 0,27 für den Modulbau. Da die Baustelleneinrichtung und die Bauzeit sehr individuell sind, kann dies vom Projekt zu Projekt abweichen. Das Potenzial, Ökostrom zu beziehen, ist bei beiden Varianten ein sehr großer Hebel und allerdings einfacher, an Werksstandorten besser umzusetzen. Aus Gründen der Objektivität der Berechnung werden jedoch beide mit der gleichen Stromart betrachtet.

3.4 Ökonomische Einflüsse

3.4.1 Baukosten im Roh- und Innenausbau

Die Baukosten können in verschiedenen Genauigkeitsstufen betrachtet werden. Da in dieser Arbeit vor allem der Vergleich im Fokus steht, werden hauptsächlich die Materialkosten und deren Montage berücksichtigt. Hier wird wiederum unterschieden zwischen den Kosten im Rohbau und den Kosten für den Innenausbau. Dies wird durch die Aussage des Experteninterviews (Frage 3) in Anhang A bestätigt. Die Problematik bei den Preisangaben liegt darin, dass diese von sehr vielen Faktoren beeinflusst werden können und deshalb sehr volatil sind. Aus diesem Grund sind die folgenden Preise nur angenommene Mittelwerte, die eine Tendenz aufzeigen sollen. Da diese Maßnahme bei beiden Varianten gleichermaßen angewendet wird, kann diese als hinreichend betrachtet werden.

Für die Ermittlung der Anteile des Rohbaus müssen im ersten Schritt die Massen und Flächen definiert werden. Die Massen können anhand der Eingaben in die Software eco2soft ermittelt werden (siehe *Abbildung 21*). Anhand dieses Ergebnisses ergibt sich mithilfe eines mittleren Umrechnungsfaktors von $2.400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ (DIN 1045-2, 2022) ein Gesamtvolumen von $640,2 \text{ m}^3$ Stahlbeton. Anhand der Umrechnung in m^3 und dem vordefinierten Vol.-%-Anteil, kann mittels der allgemeinen Dichte von Stahl (mit $7.850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$) das verbaute Gesamtgewicht von $88.432,75 \text{ kg}$ Baustahl errechnet werden. Der Volumenanteil von Beton reduziert sich dementsprechend auf 629 m^3 . Geht man von der Materialpreisstaffel nach Huisen (Huisen, 2023) aus, kostet der Baustahl somit 168.022 € . Zusätzlich müssen die Bewehrungsarbeiten berücksichtigt

werden. Diese betragen nach den Angaben von (Berner et al., 2022) $808,50 \frac{\text{€}}{\text{t}}$ und somit errechnet sich ein Gesamtbetrag von 71.498 €. Bei den Kosten des Transportbetons ist die Güteklasse für den Preis bestimmend. Deshalb wird ein mittlerer Nettopreis von $145 \frac{\text{€}}{\text{m}^3}$ ((TB Transportbeton GmbH, 2023) angenommen. Demzufolge ergeben sich mit einer pauschalen Steuer von 19 % Gesamtkosten von 108.534 €. Als letzter Punkt werden die Schalungsarbeiten berücksichtigt. Mit einem Wert von $35,05 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}$ (Berner et al., 2022, S. 275) und nach der Wandfläche aus der *Tabelle 2* (Kapitel 3.1.1) von 1.568 m^2 fallen dementsprechend 54.955 € an. Insgesamt fallen somit bei dem konventionellen Rohbau dieses Vergleichsobjektes 403.009 € an.

Material	Masse kg	Masse- anteil	Kumulierter Anteil	Baustoff-ID	Dichte kg/m ³	A-Wert W/m ² K	PENRT MJ/FE	GWP-total kg CO ₂ equ./FE	AP kg SO ₂ equ./FE	FP
Stahlbeton 140 kg/m ³ Armierungsstahl (1,75 Vol.%)	1.479.395	94,7%	94,7%	2142717549	2.375	2,500	1,58	0,155	0,000409	kg
Stahlbeton 160 kg/m ³ Armierungsstahl (2 Vol.%)	57.120	3,7%	98,3%	2142717550	2.400	2,500	1,66	0,161	0,000429	kg
MW12RF-100-50 Metall-Einfachständerwand/RF 12,5/(100mm)	26.120	1,7%	100,0%	2142721130	439		219	12,3	0,0473	m ²

Abbildung 21 Materialliste vom Rohbau (konventioneller Bau)

Für den Modulbau wird ebenfalls im ersten Schritt die Masse des Modulbau-Gebäudes ermittelt. Dahingehend wird die Anzahl der jeweiligen Module aus Abschnitt 3.1.1 mit den Massen aus Anhang N multipliziert. Dadurch ergibt sich eine Gesamtmasse von $1.579.794 \text{ kg}$ und nach der gleichen Umrechnung ein Volumen von 659 m^3 Stahlbeton. Für diese Menge an Stahlbeton werden bei zwei Vol.-%-Anteil Armierung somit 103.345 kg Baustahl benötigt. Daraus ergeben sich mit dem gleichen Preis, wie beim konventionellen Bau, Gesamtkosten des Stahls von 196.355 €. Für die Berechnung der Betonkosten wird zur Vereinfachung ebenfalls der Preis des Transportbetons aus dem konventionellen Bau verwendet. Der Preis wird aufgrund der besseren Lage zum Betonwerk oder durch eine optionale Eigenmischung im Werk selbst, um einen angenommenen Faktor von 10 % reduziert. Demzufolge ergeben sich aus 645 m^3 Beton und einem Bruttopreis von $155 \frac{\text{€}}{\text{m}^3}$ Gesamtkosten für den Beton von 99.975 €.

Bei den Bewehrungsarbeiten wird ebenfalls die Annahme getroffen, dass diese um den Faktor 20 % niedriger ist. Die Annahme begründet sich darin, dass die Arbeitsbedingungen besser sind und durch die gleichen Eigenschaften der Module eine Routine in der Arbeitsdurchführung aufkommt. Somit gehen die Arbeitsabläufe einfacher und schneller. Demnach ergibt sich ein Preis von $646,80 \frac{\text{€}}{\text{t}}$ und eine

Gesamtsumme von 127.003 €. Die Arbeit mit Schalungen reduziert sich bei der Verwendung im Werk noch wesentlicher, da durch die vorgegebene Rasterplanung keine individuellen Anpassungen gemacht werden müssen. Als Abschätzung wird deshalb ein Wert von 50 % definiert. Wie bereits in Abschnitt 3.1.1 angenommen, ist der Anteil an Trockenbauwänden um ca. die Hälfte reduziert, da die Module diesen größeren Anteil an Wänden besitzen. Aus diesem Grund werden auf die Wandfläche noch 400 m² dazugerechnet. Dadurch ergibt sich eine Gesamtfläche von 1.968 m². Bei einem Preis von 17,5 $\frac{\text{€}}{\text{m}^2}$ ergeben sich folglich für die Schalungsarbeiten Kosten von 34.440 €. Insgesamt fallen damit beim Modulbau 457.773 € für die Bauphase des Rohbaus an.

Im Vergleich zu dem Rohbau ist der Innenausbau wesentlich komplexer. Er besitzt mehrere Gewerke, welche in Summe ebenfalls kleinteiliger sind. Für den Vergleich zwischen konventionellen und Rohbau wurden folgende Gewerke betrachtet:

- Fenster und Türen
- HLS und Elektro
- Trockenbau
- Innenputz
- Estrich und Bodenbelag
- Fliesen und Malerarbeiten

Neben den Gewerken selbst haben die unterschiedlichen Qualitätsstandards und etwaige Wünsche in der individuellen Bauausführung für jedes Projekt einen großen Einfluss. Aus diesem Grund werden im klassischen Bauablauf anhand einer Baubeschreibung für jedes Gewerk von verschiedenen Subunternehmen Angebote eingeholt. Diese Angebote werden in Preisspiegeln gesammelt und anhand der Endsumme bewertet. Die Bewertung nach der Endsumme begründet sich dahingehend, dass die Angebote sich auf den einzelnen Positionen unterscheiden.

Um objektive Preise zu ermitteln, wurden für den konventionellen Bau Preisspiegel aus einem anderen Projekt verwendet. In diesen Preislisten sind für jede Position jeweils der schlechteste (rot) und der beste Preis (grün) markiert. Exemplarisch sind von drei Gewerken Auszüge aus dem Preisspiegel in Anhang O dargestellt. Da Bieter und Bauprojekt dem Datenschutz unterliegen, sind alle signifikanten Daten umbenannt worden. Zudem ist die Darstellung der Auszüge gewählt worden, da die vollständigen

Preisspiegel sechs bis acht Seiten pro Gewerk besitzen. Für die Auswertung werden aus den Preisspiegeln die relevanten Positionen ausgewählt und im Anhang O exemplarisch markiert. Von diesen Positionen wird der mittlere Preis für eine bessere Objektivität verwendet und in einem Gesamtangebot in der nachfolgenden *Tabelle 14* zusammengefasst. Zwischen Einkaufspreis (EP) und Gesamtpreis (GP) wird wiederum die Steuer von 19 % dazugerechnet. Insgesamt betragen die Baukosten für den konventionellen Innenausbau somit 959.370 €.

Baukosten und Preisvergleich - Innenausbau

Gewerk	Arbeitsschritt	Masse	Einheit	konventioneller Bau (nach Preisspiegel)		Modulbau		Quelle
				Material + Lohn		nur Material	Brutto	
				EP- Netto	GP-Brutto	EP-Brutto	GP-Brutto	
Fenster	Fenstereimbau 2,4 x 2,68	66,00	Stk	1.720,00 €	135.088,80 €	1.200,00 €	79.200,00 €	b
	Fenstereimbau 1,5 x 2,5	8,00	Stk	1.299,00 €	12.366,48 €	1.087,54 €	8.700,32 €	b
Innenputz	Eckschutzschienen	120,00	m	5,25 €	749,70 €	1,80 €	216,00 €	a
	Q2-Spachtelung Decke	1.072,00	m ²	9,60 €	12.246,53 €	6,44 €	6.903,68 €	b
	Q2-Spachtelung Wände	2.250,00	m ²			6,44 €	14.490,00 €	b
	Putz Wände	2.250,00	m ²	14,11 €	37.779,53 €	0,00 €	0,00 €	
	Montagewand Q2	600,00	m ²	49,82 €	35.571,48 €			c
Trockenbau	Montagewand Q2	200,00	m ²			32,00 €	6.400,00 €	c
	Schachtwand Q2	172,00	m ²	39,78 €	8.142,17 €	24,30 €	4.179,60 €	c
	Vorsatzschale Q2	50,00	m ²	40,90 €	2.433,55 €	27,60 €	1.380,00 €	c
	Zulage Q3	1.366,00	m ²	5,10 €	8.290,25 €	3,26 €	4.453,16 €	a
	Zulage GKBI	194,00	m ²	4,09 €	944,22 €	2,10 €	407,40 €	c
	Zulage Außenecke Montagewand	64,06	m	6,45 €	491,66 €	1,35 €	86,47 €	Annahme
	Zulage T-Verbindung	97,30	m	6,45 €	746,83 €	2,50 €	243,25 €	Annahme
	Zulage freies Wandende	13,90	m	20,25 €	334,96 €	3,40 €	47,26 €	Annahme
	Zulage Türöffnung	45,00	Stk	58,93 €	3.155,70 €	38,00 €	1.710,00 €	Annahme
	Zulage Einbindung Waschtisch	20,00	Stk	123,65 €	2.942,87 €	30,70 €	614,00 €	Annahme
	Einbindung WC	20,00	Stk	61,88 €	1.472,74 €	32,00 €	640,00 €	Annahme
HLS	Roh- und Endmontage	1,00	Psch.	224.050,00 €	266.619,50 €	134.597,49 €	134.597,49 €	d
Elektro	Roh- und Endmontage	1,00	Psch.	163.253,00 €	194.271,07 €	91.370,10 €	91.370,10 €	d
Estrich	Dämmung + Trockenestrich	1.072,00	m ²	0,00 €	0,00 €	34,16 €	36.614,16 €	a
	Dämmung + Calciumsulfatestrich	1.072,00	m ²	30,42 €	38.806,19 €	0,00 €	0,00 €	
Fliesen	Abdichtung	280,00	m ²	21,50 €	7.163,80 €	6,19 €	1.733,33 €	c
	Zulage Dichtband	125,00	m	8,50 €	1.264,38 €	6,37 €	796,31 €	c
	Bodenfliesen	145,00	m ²	56,94 €	9.825,00 €	24,80 €	3.596,00 €	a
	Wandfliesen	195,00	m ²	63,75 €	14.793,19 €	24,80 €	4.836,00 €	a
	Sockel	150,00	m	15,80 €	2.820,30 €	6,50 €	975,00 €	a
Bodenbelag	Parkettboden	927,00	m ²	60,90 €	67.180,62 €	39,95 €	37.033,65 €	a
	Sockel	260,00	m	8,26 €	2.555,64 €	12,50 €	3.250,00 €	a
Maler	Spachtelung Q3	1.072,00	m ²	12,00 €	15.308,16 €	0,00 €	0,00 €	
	Malervlies	1.366,00	m ²	7,30 €	11.866,44 €	1,35 €	1.844,10 €	a
	Anstrich Decke bzw. Wand	4.688,00	m ²	5,50 €	30.682,96 €	9,20 €	43.129,60 €	c
Türen	Hauseingangstür	10,00	Stk	1.820,00 €	21.658,00 €	1.129,00 €	11.290,00 €	c
	Innentür	35,00	Stk	283,26 €	11.797,78 €	119,00 €	4.165,00 €	e
Lohn	Lohnleistung Ansatz 350 +30 Zusatz TGA a 40€	1,00	Psch.	in EP Enthalten		191.698,82 €	191.698,82 €	
Gesamt Bruttopreis					959.370,48 €		696.600,72 €	

a (BAUHAUS E-Business GmbH, 2023) b (Fenstermaxx24 GmbH, 2023)
c (Fenstermaxx24 GmbH, 2023) d (MEGABAD GmbH, 2023)

Tabelle 14 Baukosten und Preisvergleich - Innenausbau

Der Einkauf und Einbau beim Modulbau unterscheiden sich durch die Lagerhaltung und das in Vollzeit eingestellte Personal sehr. Da keine Informationen seitens der aktuellen Hersteller vorliegen, muss ein fiktives Angebot aus aktuellen Preisen von diversen Anbietern erstellt werden. Hierfür werden verschiedene Online-Anbieter ausgewählt, um eine Objektivität zu wahren. Die ausgewählten Anbieter sind unter der *Tabelle 14* benannt. Bei der Auswahl für die einzelnen Preise wird bewusst ein Zufallsprinzip angewendet, um keinen Anbieter zu bevorzugen. Dementsprechend ist

die Auswahl nicht nach dem optimalen Preis orientiert. Bei der direkten Produktauswahl liegt der Fokus deshalb auf ähnlichen Produkten mit gleicher oder ähnlicher Qualität gegenüber dem Angebot des konventionellen Baus. Die Zusammenfassung der Preisauswahl ist ebenfalls in *Tabelle 14* dargestellt. Bei den Einkaufspreisen (EP) des Modulbaus ist zu beachten, dass diese Brutto-Preise sind. Ebenso enthalten diese keine pauschalen Kosten für den Aufwand an Personal. Auch eine Preisminderung durch einen Großeinkauf wird nicht berücksichtigt und ist somit ein weiteres Potenzial für die Optimierung im Modulbau. Die Personalkosten werden mit einer Pauschale von 191.700 € separat dazugerechnet. Diese Kosten sind in der Summe wesentlich geringer als die Personalkosten im konventionellen Bau. Die Gründe dafür sind eine verbesserte Vorbereitung des Einbauortes sowie ein einfacherer und schnellerer Transport der etwaigen Produkte zum Einsatzort. Zusätzlich sind in einem Produktionswerk die Arbeitsschritte durch die optimierten Geräte und das Umfeld wesentlich schneller und besser. Somit ergeben sich beim Innenausbau des Modulbaus Gesamtkosten von 696.601 €.

Zusammenfassung Baukosten

Bauabschnitt	Gruppe	konventioneller Bau	Modulbau
		[€]	[€]
Rohbau	Materialkosten	276.556	296.330
	Einbaukosten	126.453	161.443
	Gesamt Rohbau	403.009	457.773
Innenausbau	Fenster und Türen	180.911	103.355
	HLS und Elektro	460.891	225.968
	Trockenbau	64.526	20.161
	Oberflächenarbeiten	253.042	155.418
	Lohn		191.699
	Gesamt Innenausbau	959.370	696.601
Gesamt		1.362.379	1.154.374

Tabelle 15 Zusammenfassung der Kosten - Roh- und Innenausbau

Die anfallenden Kosten von Roh- und Innenausbau werden für beide Varianten zusammengerechnet. Zur besseren Übersicht wurde dies in der *Tabelle 15* in Gruppen zusammengefasst und dargestellt. In der Gesamtsumme schneidet der Modulbau mit 1.154.374 € im Vergleich zum konventionellen Bau mit 1.362.379 € um ca. 15 % wesentlich besser ab. Demzufolge ergibt sich ein Verhältnis von 1 zu 0,85 für den Modulbau. Diese Auswertung ist ein erster Ansatz und hat, wie bereits während der Ermittlung der Ergebnisse bemerkt, viele weitere potenzielle Optionen für weitere bzw. detailliertere Forschungsarbeiten.

3.4.2 Ausnutzung der Fläche

Wie in Abschnitt 2.4.4 bereits erläutert, gibt es mehrere Ebenen, für die Flächen ermittelt werden und welche in Zusammenhang mit nachhaltigen Auswirkungen stehen. Die erste Ebene ist die des Grundstücks in Zusammenhang mit dem Städtebau. Diese ist durch die fertige Planung bereits vordefiniert und wird deshalb für den Vergleich nicht berücksichtigt. Dementsprechend können Grundstücksfläche, Außenanlagefläche und Konstruktionsfläche vernachlässigt werden. Die Ebene der detaillierten Fassaden- und Fensterflächen sowie die exakte Bestimmung der Bodenflächen ist für den Vergleich in der Arbeit zu ausführlich, da zum einen der Planungsgrad zu rudimentär ist. Zum anderen müsste eine vollständige Lebenszyklusanalyse gemacht werden, welche ebenfalls für die Zielsetzung der Arbeit zu detailliert ist. Folglich sind die relevanten Flächen die BGF und NRF bzw. detaillierter sind noch die NUF, die bei dem Wohngebäude auch WF genannt werden können.

Die BGF des konventionellen Baus ohne Kellergeschoss wurde bereits im Abschnitt 3.1.1 mit 1.340 m^2 ermittelt. Ebenso wie die BGF des Modulgebäudes mit rund 1.283 m^2 . Sie dienen zur Ermittlung der Nutz- und Betriebskosten.

Im nächsten Schritt wird die Wohnfläche ermittelt, die für den Mietpreis und somit die Einnahmen relevant ist. Da keine exakten Werte aus dem Projekt vorliegen und diese für den Modulbau neu ermittelt werden müssen, werden diese anhand der BGF errechnet. Geyer und Müller haben hierfür einen Umrechnungsfaktor von BGF zu WF zwischen 0,65 und 0,8 angegeben (Geyer & Müller, 2018). Das Kellergeschoss wird, wie in den vorherigen Kapiteln auch, nicht berücksichtigt. Folglich kann auch ein maximaler Wert von 0,8 angesetzt werden. Demnach ergibt sich für den konventionellen Bau eine WF von 1.072 m^2 . Für die WF des gesamten Modulgebäudes eine Fläche von $1.026,4 \text{ m}^2$.

Um den ökonomischen Mehrwert für die beiden Varianten zu berechnen, werden die Nutzkosten als Ausgaben und Mieteinnahmen über 50 Jahre anhand der Kapitalwertmethode ermittelt. Bei den Ausgaben werden die infrastrukturellen Kosten, die technischen Kosten sowie die Ver- und Entsorgungskosten ohne Elektro- und Heizenergie berechnet. Diese werden nach den Kennzahlen des Berichts von Rotermund in Abhängigkeit der BGF berechnet. Somit ergeben sich in der Summe

20,04 $\frac{\text{€}}{(\text{m}^2 \cdot \text{a})}$ für den Gebäudebetrieb (Rotermund, 2023, S. 202–206). Für den Mietpreis wird die WF als Faktor verwendet. Da die Mietpreise durch Angebot und Nachfrage sehr abhängig von ihrem Standort sind, wird der mittlere nationale Mietpreis der Kaltmiete von Österreich und Deutschland verwendet. Dieser beträgt nach Angaben der Statistik Austria in Österreich 6,1 $\frac{\text{€}}{(\text{m}^2 \cdot \text{mth})}$ (Statistik Austria, 2022) und nach Angaben des Statistischen Bundesamtes in Deutschland 6,9 $\frac{\text{€}}{(\text{m}^2 \cdot \text{mth})}$ (Statistisches Bundesamt et al., 2021, S. 267).

Die Kapitalwerte der laufenden Kosten werden anhand der Abzinsung der Barwertmethode berechnet. Als Zinssatz wird ein Wert von 2,5 % angenommen. Die Berechnungen sind in der nachfolgenden *Tabelle 16* zusammengefasst.

Kapitalwert über 50 Jahre

Jahr	Betriebskosten konv. Bau	Betriebskosten Modulbau	Mieteinnahmen Österreich konv. Bau	Mieteinnahmen Deutschland konv. Bau	Mieteinnahmen Österreich Modulbau	Mieteinnahmen Deutschland Modulbau	Kapitalwert Österreich kon. Bau	Kapitalwert Deutschland konv. Bau	Kapitalwert Österreich Modulbau	Kapitalwert Deutschland Modulbau
[a]	[€/a]	[€/a]	[€/a]	[€/a]	[€/a]	[€/a]	[€]	[€]	[€]	[€]
Startkosten	26.853,60	25.711,33	78.470,40	86.596,68	75.132,48	84.983,92	51.616,80	59.743,08	49.421,16	59.274,60
Summe nach 10 Jahren	235.024,42	225.027,12	686.777,96	776.847,20	657.564,27	743.802,21	451.753,53	541.822,77	432.537,15	518.775,09
Summe nach 20 Jahren	183.600,70	175.790,82	536.509,84	606.871,79	513.688,16	581.057,09	352.909,14	423.271,08	337.897,33	405.266,27
Summe nach 30 Jahren	143.428,58	137.327,51	419.120,63	474.087,27	401.292,37	453.920,87	275.692,05	330.658,70	263.964,86	316.593,36
Summe nach 40 Jahren	112.046,17	107.280,03	327.416,37	370.356,22	313.488,95	354.602,26	215.370,19	258.310,04	206.208,92	247.322,23
Summe nach 50 Jahren	87.530,29	83.806,99	255.777,14	289.321,69	244.897,07	277.014,72	168.246,85	201.791,39	161.090,08	193.207,73
Gesamtsumme nach 50 Jahren							1.463.971,77	1.755.853,99	1.401.698,34	1.681.164,68
Flächen		Kosten				sonstige Werte				
BGF konv. Bau	[m ²]	1.340,00	Infrastrukturelle Kosten		[€/m ² *a]	3,49	Nutzungsdauer		[a]	50
WF konv. Bau	[m ²]	1.072,00	Technische Kosten		[€/m ² *a]	10,95	Zinssatz		[%]	2,50
BGF Modulbau	[m ²]	1.283,00	Ver- und Entsorgungskosten		[€/m ² *a]	5,60				
WF Modulbau	[m ²]	1.026,40	Netto Kaltmiete Österreich		[€/m ² *a]	73,20				
			Netto Kaltmiete Deutschland		[€/m ² *a]	82,80				

Tabelle 16 Berechnung der Kapitalwerte über 50 Jahre

Auffällig bei dem Vergleich ist, dass durch die Betrachtung der unterschiedlichen Preise pro Fläche eine Divergenz von 17 % durch die Lage zustande kommt. Dadurch wird deutlich, dass der Standort einen großen Einfluss auf die Absolutwerte besitzt. Beim Vergleich des konventionellen Baus mit dem Modulbau wird der Wert in Deutschland betrachtet, da das Vergleichsobjekt ebenfalls in Deutschland gebaut wurde. Der Gewinn beim konventionellen Bau der laufenden Kosten ist demnach nach den 50 Jahren um 74.689,31 € höher als der Gewinn des Modulbaus. Folglich ist das Verhältnis zwischen konventionellem Bau und Modulbau 1 zu 0,96 für den konventionellen Bau. Allerdings wurde der Mietpreis auf die Jahre nicht angepasst, um der Inflation entgegenzuwirken. Demzufolge nimmt die Preisentwicklung einen linearen Verlauf und steht damit vom Zeitpunkt null an im gleichen Verhältnis.

3.5 Soziale Einflüsse

3.5.1 Arbeitsschutz

Wie bereits in Abschnitt 2.4.5 erläutert, ist statistisch betrachtet die Arbeit am Bau eine der gefährlichsten in Deutschland. Dies wird ebenso in *Abbildung 22* sichtbar, da die Arbeitsunfälle pro 1.000 Mitarbeiter 1,3-mal höher sind als die Arbeitsunfälle der nächsten Berufsgruppe. Im Vergleich zum bundesweiten Durchschnitt auf alle Berufsgruppen gesehen, sind diese sogar 6,5-mal so hoch. Dadurch ergaben sich 2022 in Deutschland nach absoluten Zahlen 74 tödliche Unfälle sowie 99.380 gemeldete Unfälle auf Baustellen (Feiger, 2022). Jedoch muss berücksichtigt werden, dass alle Baustellen, wie Straßenbau, Tief- und Tunnelbau sowie Hoch- und Ingenieurbau, mit einfließen.

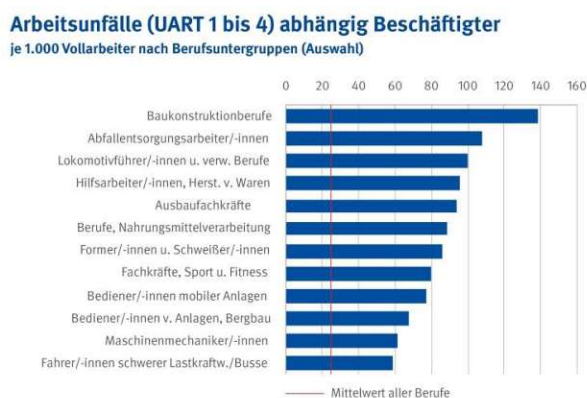


Abbildung 22 Arbeitsunfälle nach Berufsgruppen (DGUV 3, 2018)

Den Unfällen auf der Baustelle gegenüber stehen die Unfälle in den produktionstechnischen Prozessen. Hier sind nach Aussage von Proske die verschiedenen Forschungsergebnisse der Verteilungen bei der Schwere der Unfälle ähnlich (Proske, 2022, S. 269). Für diese Arbeit wird das Verhältnis 1:30:60:600, also 1 Unfall mit Todesfolge oder schweren Verletzungen, zu 30 leichten Unfällen, zu 60 Unfällen mit Beschädigung von Sachgut und 600 Unfällen ohne Verletzungen und Beschädigungen nach Hanayasu und Tang (Hanayasu & Tang, 2000) angewendet. In den Statistiken finden sich ebenfalls Unfälle mit Gasexplosionen, Chemieunfällen oder ähnlichem Unfallgeschehen. Aus diesem Grund wird die Annahme getroffen, dass diese Vorfälle annähernd die gleichen Auswirkungen auf die Statistiken besitzen, wie die Auswirkungen der verschiedenen Baustellenarten.

Um einen Vergleich zwischen den Arten der Unfälle zu berechnen, wird die Annahme getroffen, dass die Verhältnisse zwischen den Arten der Unfälle bei Produktion und

Baustellen gleich sind. Somit lassen sich über die Anzahl an tödlichen Unfällen nach DGUV die weiteren Unfälle in einem Dreisatz ermitteln. Im nächsten Schritt werden die statistischen Gesamtzahlen der beiden Varianten berücksichtigt. Das Verhältnis der beiden Gesamtfälle wird dann auf die Verteilung der Produktion hochgerechnet, um vergleichbare Werte zwischen Produktion und Baustelle zu halten. In absoluten Werten wird daher ermittelt, dass bei 74 schweren Unfällen auf der Baustelle 18 schweren Unfällen in der Produktion gegenüberstehen. Folglich ergibt sich ein Unfallverhältnis von 4,2 zu 1 bei den beiden Varianten. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in der folgenden *Tabelle 17* dargestellt.

Berechnung Verhältnis Art der Unfälle Baustelle vs Produktion

Unfallart	Verteilung nach Hanayasu	Verteilung auf Basis der schweren Unfälle	Berechnung Unfälle in der Produktion über das Verhältnis der Gesamtzahlen	
			Unfälle Gesamt Hanayasu	Unfälle Gesamt DGUV
			1.753.48	99.380
schwere Unfälle	1	74	18	4,2
leichte Unfälle mit Verletzungen	30	2.220	529	4,2
Unfälle mit Beschädigung von Sachgut	60	4.440	1.059	4,2
Unfälle ohne Verletzungen und ohne Beschädigungen	600	44.400	10.587	4,2

schwarz: Literatur grün: errechnet

Tabelle 17 Berechnung Verhältnis Art der Unfälle Baustelle vs Produktion

Bei der Berechnung der Werte wurden alle Zwischenergebnisse auf ganze Zahlen gerundet. Da die Ergebnisse von Hanayasu aus dem Jahr 1999 stammen, kann angenommen werden, dass sich die Unfallzahlen verbessert haben. Aus diesem Grund wird auch für die Bewertung das Verhältnis aus 1 zu 0,25 für den Modulbau aufgerundet.

Das Verhältnis wird für eine bessere Vergleichbarkeit noch an das Beispielprojekt angepasst. Um den zeitlichen Aspekt aus Kapitel 3.2., den die Arbeiter dem Unfallrisiko ausgesetzt sind, zu berücksichtigen, werden die jeweiligen Bauzeiten mit dem Verhältnis-Faktor multipliziert. Da in der konventionellen Ausführung die vollständige Bauzeit betrachtet wird, ist der errechnete Wert $13.339,2 \text{ h} * \text{Unfallfaktor}$. Bei der Variante des Modulbaus werden die klassischen Stunden für die Produktion in der Halle mit dem Risikofaktor einer Produktion angerechnet. Die Erdbauarbeiten, das Erstellen der Fundamente, die Aufstellung der Module, die

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Finalisierung von Fassadenarbeiten und Innenschließungen sowie die Fertigung der Außenanlage können als Baustellenzeit angerechnet werden. Demzufolge ergibt sich hier ein Gesamtfaktor von $10.956,8 h * Unfallfaktor$. Dadurch ergibt sich ein Verhältnis von 1 zu 0,82 für den Modulbau. Dies begründet sich dahingehend, dass die reine Bauzeit um ca. 600 h reduziert werden konnte und für die restlichen Arbeiten das gleiche hohe Unfallpotenzial vorhanden ist.

Unfallzahlen sind nicht nur für die Bewertung des menschlichen Wohlbefindens wichtig. Sie haben indirekt auch Auswirkungen auf Kosten des Unternehmens, da eine ausfallende Person aufgrund von Ersatz oder Verzögerungen den Arbeitgeber Geld kostet. Deshalb spiegeln sich hohen Unfallzahlen ebenfalls in der großen Anzahl an Krankheitstagen wider (siehe Anhang P). Die Auswirkungen auf die monetären Vor- und Nachteile überschreiten allerdings den Rahmen der Arbeit. Jedoch zeigt sich hier ein großes Optimierungspotenzial für die gesamte Baubranche.

3.5.2 Gesundheitliche Langzeitwirkungen

Um einen objektiven Vergleich zu erstellen, werden die statistischen Auswertungen von zwei großen Berufsgenossenschaften in Deutschland verwendet, welche den jeweiligen Produktionsprozessen des Vergleichs zugeordnet werden können. Hierbei wird das Verhältnis der Berufskrankheiten zu der Anzahl an Versicherten in diesem Jahr ermittelt. Das Ergebnis kann daraufhin als Vergleichswert dienen, da die Verhältnisse auf die gesamte Branche übertragen werden können. Als Vergleichsjahr wird das Jahr 2021 verwendet. Dies begründet sich darin, dass die Auswertungen für das Jahr 2022 zum Teil noch unvollständig sind.

Für den konventionellen Bau werden die Daten der BG Bau benutzt. Als Basis für die Berechnung dienen hierfür die gemeldeten Gesamtzahlen aus *Abbildung 23*. Dies sind 16.492 Verdachts- und 427 Todesfälle. Von diesen Verdachtsfällen fallen mit 8.116 Fällen (BG BAU, 2022) fast 50 % auf die vier häufigsten Berufskrankheiten, welche in Abschnitt 2.4.5 aufgezählt wurden. Die Gesamtzahl der Versicherten in diesem Berichtsjahr betrug 3.075.956 Personen (Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft, 2022). Folglich ergab sich 2021 in der Baubranche ein Anteil von 0,55 % an Berufskrankheiten. Dies bedeutet, dass jeder 181te Arbeitende eine Berufskrankheit im Bau erleidet.



Abbildung 23 Entwicklung der Berufskrankheiten im Baugewerbe (BG BAU, 2022)

Für den Vergleich der Produktionsstätte werden die Zahlen der BG Holz und Metall verwendet. Die Prozesse in diesem Bereich der Wirtschaft werden am häufigsten in Fabriken durchgeführt und kommen somit der Auswahl an Berufsgenossenschaften am nächsten zu einem Modulbau-Werk. Die folgenden Werte und Angaben zu BG Holz und Metalle wurden ebenfalls allesamt aus dem Jahresbericht von 2021 (BGHM, 2022) verwendet.

Für das Jahr 2021 waren bei der BG Holz und Metall 5.047.150 Personen versichert. Die Anzahl der gemeldeten Verdachtsfälle auf Berufskrankheiten betrug für das Jahr 2021 16.622 Fälle und zudem sind 876 Personen gestorben. Somit ergibt sich durch die Differenz ein Verhältnis von 0,35 % an Berufskrankheiten. Folglich ist bei der BG Holz und Metall jeder 281te eine Berufskrankheit. Die vier häufigsten Verdachtsfälle in diesem Bereich sind Lärmschwerhörigkeit, Hauterkrankungen, Asbestose mit Lungenkrebs oder Kehlkopfkrebs und allgemeine Asbestose. Zwei der vier Arten (Lärm und Lungenkrebs) sind wie im konventionellen Bau die Spitzenreiter. Sonnenauswirkung sowie Verletzungen an der Wirbelsäule können hier allerdings durch die Technik und die Begebenheiten einfacher vermieden werden. Dennoch bilden die Top-4-Fallarten 63 % der gesamten Berufskrankheiten. Dies bedeutet zum einen, dass Präventionsmaßnahmen in diesen vier Fällen vorgenommen werden, dies ein größerer Hebel ist. Zum anderen zeigt es die Mannigfaltigkeit der Baustelle, welche eine Prävention von Krankheiten wesentlich schwerer umsetzbar macht.

Für den ganzheitlichen Vergleich zwischen Modulbau und konventionellem Bau werden jedoch nur die prozentualen Verhältnisse gegenübergestellt. Folglich ergibt sich bei 0,35 % des Modulbaus und 0,55 % des konventionellen Baus ein Verhältnis von 1 zu 0,64 für den Modulbau bzw. die Produktion im Werk.

Eine zusätzliche Option ist, die zeitliche Verteilung auf der Baustelle mitzubedenken. Jedoch wurde die Zeit schon separat in Kapitel 3.2 bewertet und wird deshalb nicht nochmals berücksichtigt.

3.5.3 Bewertung der Qualität

Es gibt sehr viele Arten von Qualitäten und diese sind in den meisten Fällen subjektiv zu bewerten. Dadurch liegt eine Problematik dieser Thematik darin, einer qualitativen Wertigkeit einen quantitativen Wert zu hinterlegen. Aus diesem Grund ist eine Auswahl bewerteter Kriterien und deren Einordnung sehr diffizil. Da dieser Abschnitt als Teil der sozialen Nachhaltigkeit eingeordnet werden soll, werden nur die Auswirkungen und Ursachen auf das Produkt beachtet, welche durch menschliche Fehler und Ungenauigkeiten in der Ausführung verursacht wurden. Die Qualität der Baustoffe wird dahingehend nicht berücksichtigt. Eine wichtige Methode für das Detektieren von Fehlern sowie das Vorbeugen von Fehlern durch die Optimierung von Prozessen ist das Qualitätsmanagement. Dabei gibt es nach der ÖNORM verschiedene Grundmotive, wie Führung, Engagement von Personen, Verbesserungen usw.(ÖNORM EN ISO 9000, 2015), welche in einem Managementsystem mit verschiedenen Ansätzen bearbeitet werden sollten. Da diese Arbeit nicht das Umfeld der Baufirma, sondern nur zwei reine Bauprozesse miteinander vergleicht, liegt der Fokus auf der Thematik der Verbesserung der Arbeitsprozesse und somit der Qualität des Produkts selbst. Daher werden folgende Punkte, welche aus der Aufzählung von Brüggemann und Bremer (Brüggemann & Bremer, 2012, S. 187) stammen, bewertet:

- Verbesserung der eigenen Arbeit
- Verbesserung des Arbeitsumfeldes
- Verbesserung von Prozessen
- Verbesserung von Werkzeugen und Geräten
- Verbesserung von administrativer Arbeit

Da es weder in der Literatur noch in der Praxis einen fundierten Vergleich zu dieser Thematik gibt, ist ein eigenes Bewertungskriterium entwickelt worden. Hierbei wurden die meisten gemeldeten Schadensfälle der Versicherungsgruppe AIA (siehe Anhang Q) verwendet. Da dies die Schadensfälle einer Versicherung sind, gilt die Annahme, dass diese statistischen Auswertungen als allgemeingültig für die Baubranche angesehen werden können. Im nächsten Schritt werden aus den Schadensfällen die Fälle des Rohbaus und Innenausbaus ausgewählt. Hierbei gilt wiederum die Annahme, dass weitere Schadensfälle bei beiden Varianten auftreten können und diese somit keinen Mehrwert für die Ergebnisermittlung besitzen. Die

gefilterten Schadensfälle sind in der Ergebnismatrix in der linken Spalte der nachfolgenden *Tabelle 18* aufgeführt.

Um einen Analysewert zu definieren, werden für alle oben genannten Verbesserungen der Arbeiten eine Bewertung der Qualität abgegeben. Diese hat einen Wert zwischen eins und zehn. Somit hat ein geringer Wert ein größeres Potenzial, einen Schaden zu verursachen, während ein hoher Wert nach der Einschätzung wenig Verbesserungspotenzial besitzt.

Zum besseren Verständnis werden zwei Beispiele erklärt. Bei den Schadensfällen der Wände wird der Punkt „Arbeitsumfeld“ mit drei Punkten im konventionellen und acht Punkten im Modulbau bewertet. Dies begründet sich dahingehend, dass verschiedene Gewerke den Schaden durch Bohrungen, Unachtsamkeiten etc. verursachen. Dieses Risiko wird in der Produktionsstraße minimiert, da dort die Prozesse standardmäßig von Station zu Station laufen. Dieser Schadensfall ist somit auch von der Koordination und dessen Führung abhängig und besitzt aus diesem Grund auch bei der Administration ein Verhältnis von vier zu acht.

Das zweite Beispiel sind die Schadensfälle bei „Türen und Fenstern“. Bei diesem Beispiel wurden für die Werkzeuge und Geräte beim konventionellen Bau vier Punkte und beim Modulbau neun Punkte gegeben. Die Differenz kommt daher zustande, dass auf dem Bau Fenster und Türen in den oberen Stockwerken händisch eingebaut werden müssen, während in der Fabrik die Fenster auf einem Niveau mit einem Hebeapparat eingebaut werden können.

Matrix zur Bewertung der Qualität in Arbeitsprozessen

Schadensfälle	konventioneller Bau					Modulbau				
	individuelle Fehler	Arbeitsumfeld	Prozesse	Werkzeuge und Geräte	Administration	individuelle Fehler	Arbeitsumfeld	Prozesse	Werkzeuge und Geräte	Administration
mehrere Bauteile	5	3	6	7	6	7	7	8	8	8
Decke Fußboden	8	4	7	8	9	8	9	6	8	8
Wände	5	3	5	7	4	7	8	4	8	8
Fenster/Türen	3	4	8	4	9	8	8	8	9	8
Haustechnik	3	5	5	5	5	5	7	5	5	6
sonstiges	2	5	6	7	5	4	7	5	6	5
Summe	26	24	37	38	38	39	46	36	44	43
Gesamtauswertung	163					208				

Tabelle 18 Matrix zur Bewertung der Qualität in Arbeitsprozessen

Betrachtet man die Summen der einzelnen Arbeitsfaktoren, ist eindeutig sichtbar, dass die individuellen Fehler sowie das Arbeitsumfeld des konventionellen Baus die größte Differenz zum Modulbau besitzen. Dies begründet sich hauptsächlich durch die Arbeitsbedingungen. Die äußeren Auswirkungen auf die Arbeiter haben nicht nur Wirkung auf die Arbeiter selbst (siehe Kapitel 3.5.1), sondern auch auf die Qualität der Arbeit. Hinzu kommt, dass die Baustelle sehr individuelle Arbeitsabläufe besitzt, welche sich ebenfalls bei der Bewertung bemerkbar machen. Bei den Prozessen ist der konventionelle Bau sogar um einen Punkt besser. Dies ist dadurch begründet, dass beim Transport und der Montage zusätzlich Schäden entstehen können. Diese können neue Fehler im gesamten Bauprozess erzeugen. Im Gegensatz dazu sind die Prozesse auf der Baustelle inzwischen standardisierte Verfahren und bergen mehr ein individuelles Risiko als einen Fehler durch den Prozess selbst. Bei Geräten und Werkzeugen sowie der Administration hat der Modulbau wiederum leichte Vorteile. Wie bereits exemplarisch erklärt, liegt der Vorteil der Geräte und Werkzeuge durch die Hebeanlagen und perfektionierten und standardisierten Arbeitsplätze in der Fabrik begründet. Bei der Administration hat der Modulbau wiederum einen Vorteil, weil die Abläufe im Werk immer die gleichen sind und somit auch die Planung sowie Koordination für diese ähnlich ablaufen. Bei Fehlern sind diese demzufolge schneller zu lokalisieren und fallen dadurch in geringerer Häufigkeit an.

Für die Gesamtbewertung werden die Summen der einzelnen Arbeitsfaktoren für beide Varianten des Vergleichs addiert. Somit ergibt sich beim konventionellen Bau ein Wert von 163 Punkten und beim Modulbau ein Wert von 208 Punkten. Daraus ermittelt sich ein Verhältnis von 1 zu 0,78 für den Modulbau. Trotz der erläuterten Plausibilität der Ermittlung ist diese Bewertung eine reine Abschätzung. Aus diesem Grund sollte diese im weiteren Verlauf nicht zu hoch eingestuft werden. Das Einbeziehen der Qualität ist dennoch wichtig, da es stark von den sozialen Bedingungen beeinflusst wird und selbst starke Auswirkungen auf die ökonomischen und ökologischen Faktoren besitzt. Somit bietet dieser Ansatz viele Potenziale für eine höhere Einstufung in der Bewertung als auch weitere Forschungsmöglichkeiten. Dadurch kann sowohl der konventionelle als auch der Modulbau vorangebracht werden.

4 Auswertung der Ergebnisse

4.1 Gewichtung der einzelnen Werte

Wie bereits im theoretischen Abschnitt 2.5 erläutert, besteht die Einordnung der Bewertungskriterien aus zwei Ebenen. Die erste Ebene ist die der Zuordnung der Kriterien auf die drei Faktoren Ökologie, Ökonomie und Sozialität. Die Aufteilung der drei Faktoren ist dabei mehr der „starken Nachhaltigkeit“ zuzuordnen. Dies begründet sich darin, dass der Bauprozess, bzw. die Bauart, selbst verglichen wird. Die nachfolgenden Auswirkungen, wie der Effekt von günstigem Wohnraum oder soziale und wirtschaftliche Eigenschaften auf das Umfeld, werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Somit ist dies eine branchenspezifische Betrachtung, die zeigen soll, ob der Modulbau seine Berechtigung in der Baubranche findet und diesen sogar verbessern kann. Da die Bauwirtschaft allgemein eine sehr Ressourcenverbrauchende Branche ist, wird die ökologische Nachhaltigkeit mit 50 % am stärksten gewichtet. Die weitere Aufteilung der sozialen und ökonomischen Nachhaltigkeit ist sehr von den Bedingungen des Einsatzes abhängig. In Deutschland, Österreich oder weiteren Ländern der EU wird durch die Gesetzeslage das soziale Wohl und die Sicherheit streng kontrolliert. Demzufolge ist die soziale Komponente eine Grundvoraussetzung und hat wenig Spielraum. Aus diesem Grund wird die soziale Nachhaltigkeit mit 20 % und die ökonomische Nachhaltigkeit mit 30 % eingeordnet. In anderen Ländern, in denen die Gesetzeslage nicht nach so sozialen Bedingungen ausgerichtet ist, sollte deshalb die Gewichtung mit mehr Fokus auf der Sozialität angepasst werden. Im nächsten Schritt werden die Kriterien in die drei Kategorien eingeordnet. Dies ist in der nachfolgenden *Tabelle 19* dargestellt.

Ökologie	Ökonomie	Sozialität
<ul style="list-style-type: none"> ▶ Investitionsemissionen ▶ Transportwege ▶ Recycling ▶ Potenzial der Wiederverwendung ▶ Energie für die Errichtung 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Flächenausnutzung ▶ Baukosten ▶ Zeitlicher Aufwand 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Arbeitsschutz ▶ Langzeitauswirkungen ▶ Qualität in der Ausführung

Tabelle 19 Einordnung der Kriterien

Die Gewichtung der Werte wird wie folgt eingeteilt. In der Ökologie erhalten die Investitionsemissionen den größten Anteil mit 25 %. Ein Grund ist, dass diese Emissionen den größten Faktor an CO₂ verursachen. Zudem haben diese eine andauernde Auswirkung auf das Gebäude als Ressource und sollen daher auch bewusst behandelt werden. Das Wiederverwendungspotenzial wird mit 4 % eingestuft, da es ein fiktives Szenario ist. Ebenso die Transportwege, da diese im Vergleich zur grauen Energie marginal sind. Die Entsorgung wird mit 7 % gewichtet und die Errichtungsemissionen mit 10 % durch ihr hohes Potenzial. Somit bilden diese 50 % der gesamten Betrachtung.

Bei der Ökonomie sind alle drei Kriterien mit 10 % bewertet worden. Dies ist dahingehend begründet, dass diese je nach Sichtweise mehr oder weniger wichtig eingestuft werden und somit ebenso Auswirkungen auf andere Bereiche der Nachhaltigkeit haben. Deshalb wurden diese aus Gründen der Objektivität als gleichwertig eingestuft.

Bei der sozialen Nachhaltigkeit wird der Arbeitsschutz ebenfalls mit 10 % gewichtet, weil dieser einen großen Einfluss auf die Langzeitauswirkungen hat. Durch diese Abhängigkeit wird der Wert der gesundheitlichen Langzeitauswirkungen auch auf 7,5 reduziert. Wie bereits im Abschnitt 3.5.3 begründet, ist die Qualität mit 2,5 % niedrig eingestuft, da sie zum aktuellen Stand keine fundierten Aussagen in der Praxis und Literatur aufweist. Jedoch besitzt sie sowohl von ihrer Thematik als auch von der Gewichtung ein hohes Potenzial, höher eingestuft zu werden, da sie ein sehr rudimentäres Thema ist.

Somit sind alle Kriterien eingeordnet und gewichtet und können.

4.2 Nutzwertanalyse

Um den Vergleich der beiden Varianten quantitativ zu bewerten, wird diesen ein Nutzwert gegeben. Dieser Wert errechnet sich, indem die ermittelnden Verhältnisse der einzelnen Kriterien im Kapitel 3 mit der prozentualen Gewichtung aus dem vorherigen Abschnitt 4.1 multipliziert werden. Die Summe aus den Ergebnissen entspricht somit einem Gesamtnutzwert. Die Berechnungen und Ergebnisse für die Nutzwertanalyse wurden in der folgenden *Tabelle 20* dargestellt.

Die Ergebnisse stellen eine Verhältnisbewertung dar und sind keine Absolutwerte. Die Bewertung der Ergebnisse wird im nachfolgenden Kapitel 4.3 erläutert.

Nutzwertanalyse

Bereich	Kriterium	Gewichtung	konventioneller Bau			Modulbau		
			Verhältnis-Wert	Nutzwert	Gesamtnutzwert nach Bereich	Verhältnis-Wert	Nutzwert	Gesamtnutzwert nach Bereich
		[%]						
Ökologie	Investitions-emissionen	25	1	25	35,1	0,98	24,5	49,5
	Transportwege	4	0,33	1,32		1	4	
	Entsorgung	7	0,56	3,92		1	7	
	Potenzial der Wiederverwendung	4	0,55	2,2		1	4	
	Energie für die Errichtung	10	0,27	2,7		1	10	
Ökonomie	Flächenausnutzung	10	1	10	26,4	0,96	9,6	29,6
	Baukosten	10	0,85	8,5		1	10	
	Zeitlicher Aufwand	10	0,79	7,9		1	10	
Sozialität	Arbeitsschutz	10	0,82	8,2	15,0	1	10	20,0
	Langzeitauswirkungen	7,5	0,64	4,8		1	7,5	
	Qualitätsmanagement	2,5	0,78	2,0		1	2,5	
Gesamtergebnis			76,5			99,1		

Tabelle 20 Nutzwertanalyse der beiden Varianten

4.3 Bewertung der Nutzwertanalyse

Nach der Berechnung in Abschnitt 4.2 besitzt der Modulbau mit 99,1 Punkten einen wesentlich höheren Gesamtnutzwert als der konventionelle Bau mit 76,5 Punkten. Daraus ergibt sich, dass der Modulbau um ca. 23 % nachhaltiger ist als der konventionelle Bau. Der prozentuale Zahlenwert muss allerdings mit äußerster Vorsicht behandelt werden. Dies wird durch eine detaillierte Betrachtung der Bewertung deutlich und im Folgenden erläutert.

Die große Differenz zeigt sich deutlich in Bereichen der ökologischen und sozialen Nachhaltigkeit. In der ökologischen Bilanz ist zu bemerken, dass die Ergebnisse in ihrer Deutlichkeit vor allem daraus resultieren, dass nur Roh- und Innenausbau bewertet worden sind. Einen sehr großen Unterschied weist die Differenz bei der Energie für die Errichtung auf. In diesem Kriterium zeigt sich daher, dass die Individualität der Baustelle ein großer Hebel für ein nachhaltiges Bauprojekt sein kann. Außerdem muss angemerkt werden, dass die reine Betrachtung der Bauphasen Roh- und Innenausbau nochmals deutlichere Auswirkungen besitzt als z.B. bei den Investitionsemissionen. Somit würde sich in diesem Fall das Verhältnis in der Betrachtung auf das gesamte Projekt deutlich verbessern. Die gleiche Auswirkung tritt

ebenso bei den Transportwegen auf. Bei der Entsorgung zeigt sich ein allgemeines hohes Potenzial. Vor allem die Möglichkeit der Wiederverwendung spart sehr viel an Energie und Emissionen ein. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass für beide Varianten der optimale Fall angenommen wird und erst die Zukunft zeigen kann, ob diese fiktiven Szenarien umgesetzt werden können.

In der sozialen Nachhaltigkeit hat vor allem die bessere Kontrollierbarkeit über die Sicherheit eine große Auswirkung. Hinzu kommen Vorteile einer Überdachung und der immer gleichbleibenden Umgebung, welche ebenfalls vor Fehlern und äußeren Einflüssen schützen. Die Kriterien der Krankheitsprävention zeigen mit einem Vorteil von 4,5 Punkten deutlich, dass eine Investition in den Arbeitsschutz sich im Zuge der nachhaltigen Entwicklung lohnen kann, da jeder Unfall und jeder Ausfall eines Mitarbeitenden die Qualität und Ökonomie beeinflusst. Bei der Qualität weisen die 0,5 Punkte Differenz nur durch die Abschätzung bereits einen deutlichen Unterschied auf. Sollte sich der Modulbau weiterentwickeln, besteht hier ein großes Potenzial in der Ausführungsqualität durch bessere Bedingung für den Mitarbeiter. Aber auch die Qualität der Produkte selbst kann durch den hohen Vorfertigungsgrad optimiert werden.

Bei der ökonomischen Qualität kommt die Differenz vor allem durch den Faktor Zeit und die damit verbundenen Energie und Personalkosten zu Stande. Dies sind Auswirkung der optimierten Montageabläufe. Da diese auch mit den verbesserten Bedingungen des Arbeitsschutzes zusammenhängen, sind diese als realistisch einzustufen. Bei der Flächenausnutzung weist der konventionelle Bau klar seine Stärke auf, da er individuell auf die Anforderungen reagieren kann. Die Differenz bei der Bewertung dieses Kriteriums ist jedoch recht klein. Dies begründet sich in der fast idealen Kubatur für den Modulbau, welche sich sehr gut auf ein rechteckiges Raster anpassen lässt. Bei einer weniger anpassungsfähigen Kubatur ist auch die Differenz zwischen den Varianten größer und der Modulbau würde wesentlich schlechter abschneiden.

Bei der Gesamtbewertung sollte nochmals darauf hingewiesen werden, dass dies ein Verhältnisvergleich von einem Beispiel ist. Dabei zeigen sich klare Tendenzen, dass der Modulbau nachhaltiger ist als der konventionelle Bau. Um die Aussage zu untermauern, bedarf es allerdings noch weiteren Beispielen. Dennoch verdeutlicht die Nutzwertanalyse die klaren Stärken und Schwächen beider Varianten.

5 Conclusio

5.1 Zusammenfassung

Für den Beweis der Hypothese, dass der Modulbau nachhaltiger ist als ein konventionelles Gebäude, ist im Zuge dieser Arbeit ein Vergleich zwischen beiden Varianten aufgestellt worden. Die Ausgangslage war beim Modulbau ein Prototyp der Firma HEBERGER, welcher in verschiedenen Rastern erweiterbar ist, um verschiedene Gebäude abzubilden. Als Vergleichsobjekt wurde ein Projekt mit zwei Reihenhäusern und zehn Wohnungen in klassischer Stahlbetonbauweise gewählt, welches 2016 gebaut wurde. Beide Bauarten sind auf verschiedene Kriterien der Nachhaltigkeit geprüft worden. Für die Ermittlung der Kriteriums-Kennwerte sind Ergebnisse aus der Literatur und statistische Werte sowie Erfahrungen von Experten verwendet worden. Falls Annahmen getroffen wurden, wurde versucht, diese anhand ähnlicher Beispiele zu belegen, um eine objektive Bewertung zu gewährleisten. Im nächsten Schritt wurden den Bewertungen eine Quantität gegeben, um diese vergleichbar zu machen. Somit konnte bei jedem Kriterium ein Verhältnis gebildet werden, welches ein erstes Indiz auf die jeweils nachhaltigere Variante in dem jeweiligen Kriterium aufweist.

Nach der Ermittlung und Gegenüberstellung der Werte in den einzelnen Kriterien wurden die Kriterien den Bereichen der Nachhaltigkeit Ökologie, Ökonomie und Sozialität zugeordnet. Somit wurde eine erste Rahmengewichtung gegeben. Diese beruht auf dem Ansatz der „starken Nachhaltigkeit“, da dies ein Vergleich der Bauarten und dessen Bauprozesse und keine Analyse deren Auswirkung auf die Lokalität und Gesellschaft ist. Somit wurde, wie bei der „starken Nachhaltigkeit“ üblich, die ökologische Nachhaltigkeit mit 50 % am stärksten gewichtet. Die ökonomische Nachhaltigkeit wurde mit 30 % und die soziale Nachhaltigkeit mit 20 % eingestuft. Somit konnten den zugeordneten elf Kriterien eine Gewichtung in diesem Rahmen gegeben werden.

Durch die Gewichtung der einzelnen Kriterien konnte mithilfe der quantitativen Verhältnisse eine Nutzwertanalyse durchgeführt werden. Die Ergebnisse in Kapitel 4 dürfen nicht als absolute Werte angesehen werden. Dennoch ist eindeutig festzustellen, dass in allen drei Bereichen der Nachhaltigkeit der Modulbau besser abgeschnitten hat. Dies wird auch bei den einzelnen Kriterien sichtbar, da in neun von elf Kriterien der Modulbau besser abgeschnitten hat. Demzufolge konnte die

Hypothese bestätigt werden, dass der Modulbau nachhaltiger ist als ein standardisiertes konventionelles Gebäude in Deutschland.

5.2 Kritische Diskussion

Anmerkungen in den Abschnitten der Kriterien sowie die Bewertung der Nutzwertanalyse geben einen wichtigen Anstoß, die Ergebnisse auch kritisch zu hinterfragen. Gemäß des Sprichworts „einmal ist keinmal“ wurde in dieser Arbeit nur ein Vergleich zweier Varianten durchgeführt. Um eine wissenschaftlich fundierte Aussage zu bilden, sollten weitere Gebäude untersucht werden. Als Beispiel wurde in den Kriterien die Abhängigkeit vom Standort erläutert. Bei anderen Standorten gibt es folglich auch andere Rahmenbedingungen. Faktoren, wie zum Beispiel der GWP-Wert des Stroms sowie die Gesetze des Arbeitsschutzes, haben einen wesentlichen Einfluss. Somit können Standorte außerhalb Deutschlands und Österreichs durch die vorherrschenden Bedingungen die Bewertung von einzelnen Kriterien und somit auch das Gesamtergebnis der Nachhaltigkeit stark beeinflussen.

Die Kubatur besitzt ebenso einen großen Einfluss auf die Nachhaltigkeit eines Gebäudes. Somit wird ein nicht dem Raster entsprechendes, konventionelles Gebäude bei Bewertung eine wesentlich größere Differenz zum Modulbau besitzen. Hier muss allerdings die Modulbaubranche auch eine eindeutig definierte Grenze ziehen, da es sonst für alle Parteien im Bauprozess eine schlechte und nicht nachhaltige Lösung gibt. Bei der Auswahl der Kriterien wurde eine klare Bilanzgrenze gezogen, indem der Betrieb des Gebäudes nicht mit berücksichtigt wurde. Die Definition dieser Bilanzgrenze sowie die Untersuchung des Modulbaus im Betrieb sind Optionen für weitere Forschungen. Auch die Anzahl an Kriterien für die Bewertung der Nachhaltigkeit ist keinesfalls als vollständig anzusehen und kann um weitere Argumente ergänzt werden. Dies gilt ebenso für die Einordnung in die drei Kategorien der Nachhaltigkeit sowie die Gewichtung dieser Bereiche. Jedoch sollte das Bewusstsein vorhanden sein, dass bei einer definierten Gewichtung immer eine Subjektivität vorherrscht. Dennoch unterstützen auch weitere Vergleiche durch ihre verschiedenen Rahmenbedingungen die Einordnung der Gewichtung und helfen somit den Bewertungsprozess zu optimieren.

Bei der Bearbeitung der Kriterien selbst mussten sehr viele Annahmen getroffen werden. Dies liegt zum einen an der fehlenden Literatur, da der Modulbau in dieser Form noch eine kleine und junge Sparte in der Historie des Bauens ist. Zum anderen muss erwähnt werden, dass aus der Branche selbst keine Unterstützung in Form von Experteninterviews entgegengebracht wurde, um die Beweisführung voranzutreiben. Eine weitere Schwierigkeit bei der Ausarbeitung der Kriterien war die Definition des Detailgrades. Auf der einen Seite gibt es für manche Kriterien oder eine der beiden Varianten tiefere und weitreichendere Analysen. Auf der anderen Seite fehlt bei der anderen Variante ein Großteil dieser Informationen für einen objektiven Vergleich. Dies hat dazu geführt, dass Quellen mit geringerer wissenschaftlicher Qualität verwendet werden mussten. Jedoch können in diesen Bereichen die vorhandenen Lücken zukünftig durch weitere Forschungen und wachsende Erfahrungen gefüllt werden. Außerdem bietet eine verbesserte Datengrundlage die Möglichkeit, die Beurteilungen nicht nur als Verhältnismäßigkeit zu bewerten, sondern diese anhand einer genauen prozentualen Aussage akkurater zu definieren. Wenn diese Grundlagen geschaffen werden, ist auch die Basis vorhanden, um weitere Analyseverfahren anzuwenden. Diese können dann ein fundierteres Ergebnis als die Nutzwertanalyse darstellen. Die vielen kritischen Punkte sind allerdings keine Widerlegung der generellen Ergebnisaussage dieser Arbeit. Die Gesamtdifferenz des Vergleichs kann daher wesentlich niedriger ausfallen, wenn die Bedingungen für den Modulbau weniger optimal sind. Zudem soll die Kritik aufzeigen, dass auch im konventionellen Bau nicht alles schlecht ist und der Modulbau nicht die allumfassende Lösung darstellt. Zum Abschluss der Diskussion sollte deshalb die allgemeine Frage in den Raum gestellt werden, wie die Nachhaltigkeit im Vergleich bewertet werden muss, wenn der konventionelle Bau ebenfalls die richtigen Maßnahmen wie eine CO₂-neutrale Baustelle angeht. Demzufolge kann diese Thesis zumindest als Beleg für die Berechtigung des Beton-Modulbaus in der aktuellen Zeit angesehen werden, soll aber ebenso ein Ansporn für den konventionellen Bau und den Modulbau sein, die richtigen Maßnahmen für eine nachhaltige Zukunft zu treffen.

5.3 Ausblick

Um eine wirkliche Alternative für die Bekämpfung des Wohnraummangels zu sein, muss der Modulbau sich noch wesentlich weiterentwickeln. Denn auch die konventionelle Baubranche ist groß und hat sich über Jahrhunderte stetig verbessert und optimiert. Wie diese Arbeit zeigt, kann die Nachhaltigkeit einen großen Hebel für den Modulbau bieten. Da die Nachhaltigkeit sowohl politisch als auch gesellschaftlich noch weiter in den Mittelpunkt rücken wird, hat der Modulbau die Chance, seine Vorteile der besseren Montagebedingungen zu zeigen. Dennoch muss sich die Branche, um die Vorurteile zu widerlegen, öffnen und ihr Potenzial ausspielen.

Die Thesis deutet in vielen ihrer Abschnitte, sowohl für den Modulbau als auch für den konventionellen Bau, große Entwicklungs- und Forschungsmöglichkeiten an. In der Regel sind dies Themen wie die Transportwege und der Energiebedarf auf Baustellen. Diese wurden über Jahrzehnte als gegeben oder nicht relevant eingeordnet und bergen sowohl ökonomische als auch ökologische Potenziale, die es in Zukunft auszuschöpfen gilt. Die Thematik des Qualitätsmanagements bietet ebenfalls viele Optionen. Vor allem in der Fabrikproduktion können Automatismen und Prüfungen auf Qualität in Serie durchgeführt werden, die Fehler im Arbeitsablauf minimieren und die Qualität des Produkts steigern. Jedoch müssen diese ebenso zunächst erforscht und entwickelt werden.

Auch in Zukunft werden die Themen Material und Ressourcen für beide Baumethoden eine bedeutende Rolle spielen. Die Wahl der Materialität hat hierbei einen großen Einfluss auf die Investitionsemissionen. Dabei gibt es schon jetzt Ansätze wie Holz und Holzhybrid, in denen der Modulbau in der Verarbeitung Vorteile haben kann. Ebenso ist das Thema Recycling und Wiederverwendung bisher mehr Theorie als gängige Praxis. Hier wird in Zukunft das Urban-Mining stark in den Vordergrund rücken, um die Ressourcen zu schonen. Dementsprechend muss die Verwendung der Materialien für jede Bauart explizit evaluiert und entwickelt werden. Dabei rückt vor allem auch die Planung in den Fokus, die durch die BIM-Methode auch erste Wege in diese Richtung geht.

Es zeigt sich, dass die Baubranche, trotz ihrer Jahrhunderte alten Tradition, immer noch viele offene Forschungsfragen hat. Der Modulbau ist hier nur ein weiterer Ansatz mit anderer Denkweise. Wie die Geschichte uns an Beispielen wie der Entwicklung der Fließbandarbeit von Henry Ford gezeigt hat, können solche innovativen Ideen auch

Quantensprünge für eine ganze Branche sein. Jedoch ist solch eine innovative Idee immer stark von der gesellschaftlichen Entwicklung abhängig. Diese Arbeit zeigt, dass der Modulbau durch seine Vorteile in der Nachhaltigkeit zumindest das Potenzial für eine solche Entwicklung besitzt. Jedoch wird sich auch das konventionelle Bauen weiterentwickeln und seine nachhaltigen Ressourcen effizienter ausschöpfen. In der Zukunft wird es jedoch keine Rolle spielen, ob der Modulbau oder der konventionelle Bau sein nachhaltiges Entwicklungspotenzial besser ausgenutzt haben. Denn für die zukünftigen Generationen und für unsere Erde ist es wichtiger, dass beide Bauweisen ihre nachhaltigen Potenziale ausschöpfen und somit die Nachhaltigkeit als übergeordneter Gewinner aus diesem Vergleich hervorgeht.

6 Literaturverzeichnis

- August, Kristine. (2020). „*Wie viel CO₂ steckt in einem Liter Benzin?*“ Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren. <https://www.helmholtz.de/newsroom/artikel/wie-viel-co2-steckt-in-einem-liter-benzin/> - abgerufen am 2023-08-30 23:02:23
- AUVA. (2022). 04.04.2022: *AUVA-Arbeitsunfallstatistik 2021—Weniger Arbeitsunfälle als vor der Pandemie.* <https://www.auva.at/cdscontent/?contentid=10007.885211&portal=auvaportal> - abgerufen am 2023-08-04 23:54:52
- baubook GmbH. (2014). *Bauökologische Kennwerte.* Stahlbeton 140 kg/m³ Armierungsstahl (1,75 Vol.%). <https://www.baubook.at/m/PHP/LoginWrong.php?SW=27&win=y> <https://www.bauhaus.info/> - abgerufen am 2023-08-21 14:48:35
- BAUHAUS E-Business GmbH. (2023). *BAUHAUS - Mehr als ein Baumarkt* [Bauprodukte]. <https://www.bauhaus.info/> - abgerufen am 2023-09-09 11:41:09
- Baumeister, Roy F., & Leary, Mark R. (1997). Writing Narrative Literature Reviews. *Review of General Psychology, 1*(3), 311–320. <https://doi.org/10.1037/1089-2680.1.3.311>
- Bayerischer Rundfunk (Regisseur). (2019). *Modulares Bauen: Wie gut sind Wohnungen vom Fließband?* Bayerischer Rundfunk. <https://www.youtube.com/watch?v=ZHLKGfWli7U> - abgerufen am 2023-08-31 22:00:58
- Bergmeister, Konrad, & Fingerloos, Frank. (2009). *Beton-Kalender 2009, Konstruktiver Hochbau, Aktuelle Massivbaunormen.* Ernst & Sohn.
- Berner, Fritz, Kochendörfer, Bernd, Schach, Rainer, Jünger, Hans Christian, Otto, Jens, & Sundermeier, Matthias. (2022). *Grundlagen der Baubetriebslehre 2: Baubetriebsplanung.* Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-35547-0>
- Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft. (2022). *Mitgliedschaft und Versicherung.* Mitgliedschaft und Versicherung. <https://www.bgbau.de/die-bg-bau/ueber-uns/zahlen-daten-fakten/jahresbericht-2021/mitgliedschaft-und-versicherung> - abgerufen am 2023-09-02 23:37:49
- Bessel, Sven. (2023). *Gesundheitsreport 2023 Arbeitsunfähigkeiten.* 45.
- Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). (2015). *Bilanzierungsregeln für die Erstellung von Ökobilanzen.*
- BG BAU. (2022). *Arbeitsunfälle und Berufskrankheiten.* <https://www.bgbau.de/die-bg-bau/ueber-uns/zahlen-daten-fakten/jahresbericht-2021/arbeitsunfaelle-und-berufskrankheiten> - abgerufen am 2023-09-01 17:39:38
- BGHM. (2022). *Arbeitsschutz: Der Mensch im Fokus* (S. 43) [Jahresbericht].
- Blesl, M., Kempe, S., Ohl, M., Fahl, U., König, A., Jenssen, T., & Eltrop, L. (2009). *Wärmeatlas Baden-Württemberg – Erstellung eines Leitfadens und Umsetzung für Modellregionen.* 84.
- BMK Österreich. (2023). *Emissionskennzahlen 2023 nach Fahrzeugkilometern.* Umweltbundesamt.

- Boddenberg, Sophia. (2023). Wohnungsmangel in Deutschland so hoch wie seit 30 Jahren nicht mehr. *ZEIT ONLINE, AFP*. https://www.zeit.de/wirtschaft/2023-01/wohnungsmangel-mieterbund-lage-immer-dramatischer?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F - abgerufen am 2023-09-10 15:24:24
- Bögl, Johann, Kotzbauer, Jürgen, Forchheimer, Rebekka, & Kraus, Jürgen. (2016). Industrialisierter Wohnungsbau mit Mmaxmodul. *mbquadrat, Herbst 2016*.
- Bogner, Alexander, Littig, Beate, & Menz, W. (Hrsg.). (2009). *Interviewing experts*. Palgrave Macmillan.
- Borosnyai, Anna Judit. (2018). „Vorfertigung in 2d und 3d“—Entwicklung im Massivholzbau Vorteile und Nachteile der Tafel- und Raumzellenbauweise mit Brettsper Holz [Diplomarbeit]. Technische Universität Wien.
- Braune, Anna, Ekhaivaia, Levan, & Quante, Kathrin. (2021). *Benchmarks für die Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion*. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V.
- Brüggemann, Holger, & Bremer, Peik. (2012). *Grundlagen Qualitätsmanagement: Von den Werkzeugen über Methoden zum TQM*. Vieweg+Teubner Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8301-8>
- Bundesverband Deutscher Fertigung e. V. (2007). *80 Jahre moderner Fertigung*.
- Creswell, John W. (1994). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (3rd ed). Sage Publications.
- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V.,. (2023). *DGNB System – Kriterienkatalog Gebäude Neubau* (1. Auflage).
- DGUV 1. (2022). *Jahrespressekonferenz zu Unfallzahlen und Berufskrankheiten 2021*. <https://bauportal.bgbau.de/bauportal-32022/thema/meldungen/rund-um-die-bg-bau/jahrespressekonferenz-zu-unfallzahlen-und-berufskrankheiten-2021> - abgerufen am 2023-08-05 00:12:42
- DGUV 2. (2022). *Statistik – Arbeitsunfallgeschehen 2021*. 91.
- DGUV 3. (2018). *Wer arbeitet mit dem höchsten Unfallrisiko?* https://www.dguv.de/de/mediocenter/pm/pressearchiv/2019/quartal_4/details_4_374112.jsp - abgerufen am 2023-08-05 00:06:50
- DIN 277. (2021). *DIN 277:2021-08, Grundflächen und Rauminhalte im Hochbau*. Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/3278234>
- DIN 1045-2. (2022). *DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton* [Norm].
- Dubois, Anna, Hulthén, Kajsa, & Sundquist, Viktoria. (2019). Organising logistics and transport activities in construction. *The International Journal of Logistics Management, 30*(2), 620–640. <https://doi.org/10.1108/IJLM-12-2017-0325>
- Duschel, Michael, Plettenbacher, Wolf, & Stopfer, Martin. (2020). *Handbuch Arbeitsvorbereitung und Lean Construction im Baubetrieb: Praktische Methoden und Lösungen für die optimale Vorbereitung und Steuerung von Bauvorhaben* (2. Auflage). Linde.
- European Commission. (2023). *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en - abgerufen am 2023-09-06 15:19:42
- Feiger, Robert. (2022). *Alle dreieinhalb Arbeitstage stirbt ein Bauarbeiter im Job* [Pressemitteilung]. IG-Bau.

- Fenstermaxx24 GmbH. (2023). *Fenstermaxx24 Online-Shop* [Angebote für Fenster]. <https://www.fenstermaxx24.com/> - abgerufen am 2023-09-09 11:40:51
- Figl, Hildegund, & Florit 1, Cristina. (2023). *eco2soft—Ökobilanz für Gebäude*. <https://www.baubook.info/de/werkzeuge/eco2soft> - abgerufen am 2023-07-23 18:40:09
- Figl, Hildegund, & Florit 2, Cristina. (2023). *Umweltproduktdeklarationen (EPD)—Deutsch*. <https://www.baubook.info/de/kennwerte/umweltproduktdeklarationen> - abgerufen am 2023-07-23 18:30:09
- Frischknecht, Rolf. (2020). *Lehrbuch der Ökobilanzierung*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54763-2>
- Geyer, Helmut, & Müller, Johannes. (2018). *Crashkurs Immobilienwirtschaft—Inkl. Arbeitshilfen online*. Haufe Lexware. <https://doi.org/10.34157/9783648121986>
- Gugerli, Heinrich, Frischknecht, Rolf, Kasser, Ueli, & Lenzlinger, Martin. (2013). *Merkblatt SIA 2032: Graue Energie im Fokus*.
- Günther, Edeltraud. (2008). *Ökologieorientiertes Management: Um-(weltorientiert) Denken in der BWL*. Lucius & Lucius.
- Hanayasu, S., & Tang, WH (Hrsg.). (2000). *Probabilistic assessment for structural changes in industrial accident damage.. Applications of statistics and probability ICASP-8 Conference, Sydney*. Balkema.
- Heckmann, Michael, & Glock, Christian. (2023). Ökobilanz im Bauwesen – Treibhausgasemissionen praxisüblicher Deckensysteme. *Beton- und Stahlbetonbau*, 118(2), 110–123. <https://doi.org/10.1002/best.202200102>
- Helbig, M. Raphaela, Kahnt, Alexander, & Grunewald, John. (2018). Chancen der Wiederverwendung von Fassadenelementen aus Carbonbeton. In *Smart Cities/Smart Regions – Technische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Innovationen: Konferenzband zu den 10. BUIS-Tagen* (S. 737–754). Springer Vieweg.
- Hermann, Clemens. (2010). *Nachhaltigkeit im Innovationsprozess* [Diplomarbeit]. Technische Universität Wien.
- Hilgers, C., Becker, I., & Dehn, F. (2020). *Geologische und STEEPLE-Aspekte zur überregionalen Verfügbarkeit von Rohstoffen zur Herstellung von Beton*.
- Hoffmann, Lars, Heiden, Björn, & Holschemacher, Klaus. (2021). Zum ökobilanziellen Vergleich auf Bauteilebene. *Bautechnik*, 98(4), 277–284. <https://doi.org/10.1002/bate.202000087>
- Hong, Juwon, Hong, Taehoon, Kang, Hyuna, & Lee, Minhyun. (2019). A Framework for Reducing Dust Emissions and Energy Consumption on Construction Sites. *Energy Procedia*, 158, 5092–5096. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.637>
- Huisen, Franz. (2023). *Betonstahl Rund 8*. stahlshop.de. <https://stahlshop.de/betonstahl-rund-8-654-detail>
- IBO - Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH. (2020). *Leitfaden zur Berechnung des Entsorgungsindikators EI Kon von Bauteilen und des Entsorgungsindikators EI10 auf Gebäudeebene* (Leitfaden 2.1).
- Ibu. (2023). *Nachhaltiges Bauen*. IBU - Institut Bauen und Umwelt e.V. <https://ibu-epd.com/nachhaltiges-bauen/> - abgerufen am 2023-09-10 16:13:48

- Kaufmann, Hermann, Krötsch, Stefan, & Winter, Stefan. (2022). *Atlas mehrgeschossiger Holzbau: Grundlagen - Konstruktionen - Beispiele* (4. Auflage). Edition Detail.
- Klimaschutzministerium Österreich (Hrsg.). (2023). Emissionskennzahlen 2023 nach Tonnenkilometern. *Umweltbundesamt*.
- Knabe, Birthe, Tinat, Christopher, & Rosenberg, Matthias. (2023). Klimabezogene Optimierung von Baugrundverbesserungen – Multidisziplinärer Ansatz zur Verknüpfung von Ökobilanz und technischen Aspekten. *geotechnik*, 46(2), 89–99. <https://doi.org/10.1002/gete.202200019>
- Krausmann, Fridolin, Wiedenhofer, Dominik, Lauk, Christian, Haas, Willi, Tanikawa, Hiroki, Fishman, Tomer, Miatto, Alessio, Schandl, Heinz, & Haberl, Helmut. (2017). Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(8), 1880–1885. <https://doi.org/10.1073/pnas.1613773114>
- Lechner GmbH. (2023). *Lechner Cube*. Lechner Cube. <https://lechner-cube.de/> - abgerufen am 2023-08-26 14:07:04
- Liebherr. (2023). *Technische Daten LTM 1350-6.1* [dataset].
- Litau, Oksana. (2015). Lebenszykluskosten (LzK) einer Immobilie. In Oksana Litau, *Nachhaltiges Facility Management im Wohnungsbau* (S. 23–27). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-11352-0_5
- Luther, Martin (Hrsg.). (1998). *Die Bibel: Nach der Übersetzung Martin Luthers ; [Bibeltext in der revidierten Fassung von 1984]: Bd. 5. Buch Moses, 22,8* ([3. Dr.] Taschenausg. mit Wortkonkordanz). Dt. Bibelges.
- Maurer, Reinhard. (2007). *Begrenzung der Rissbreiten bei dicken Bauteilen infolge Zwang*. *DBV*(14).
- MEGABAD GmbH. (2023). *MEGABAD - Badshop & Sanitärbedarf—Große Auswahl* [Produkthersteller]. https://www.megabad.com/?gclid=CjwKCAjwr_CnBhA0EiwAci5sivQNp8tKrcLtH1dqKLV3soI2KbuECkrAgs80i1ezP0rG-L_wSNlXwxoCJhsQAvD_BwE - abgerufen am 2023-09-09 11:46:21
- Munzert, Paul. (2022). *Variantenuntersuchungen zur Beheizung, Kühlung und Lüftung einer Produktionshalle* [Diplomarbeit].
- Naturfunde e.V. (2023). *Daten für die Berechnung im CO2-Rechner | Naturefund*. https://www.naturefund.de/wissen/co2_rechner/daten - abgerufen am 2023-08-30 17:03:35
- Noosten, Dirk. (2018). Barwertmethode. In Dirk Noosten, *Investitionsrechnung* (S. 17–23). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-18996-9_4
- Obernosterer, Richard, Lepuschitz, Barbara, Daxbeck, Hans, Kisliakova, Nathalia, Hörzinger, Nadine, Goger, Gerald, Winkler, Leopold, & Weigert, Maximilian. (2021). *Die CO2 neutrale Baustelle—Ein Beitrag zum Klimaschutz der österreichischen Bauwirtschaft*.
- ÖNORM EN ISO 9000. (2015). *ÖNORM EN ISO 9000* [Norm]. Austrian Standards.
- Örtl, Elke. (2023). *CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde Strom stiegen in 2022* [Text]. Umweltbundesamt; Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-stiegen-in> - abgerufen am 2023-08-30 17:10:26

- Ott, Konrad. (2009). Guidelines for a Strong Sustainability – A Proposal for Embedding the Three-Pillar Concept Leitlinien einer starken Nachhaltigkeit – Ein Vorschlag zur Einbettung des Drei-Säulen-Modells. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 18(1), 25–28. <https://doi.org/10.14512/gaia.18.1.9>
- Piatek, Maximilian. (2021). Die CO2 neutrale Baustelle – Chancen und Herausforderungen. *Diploma-Thesis*.
- Preuß, Norbert, & Schöne, Lars Bernhard. (2016). *Real Estate und Facility Management*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48291-9>
- Proske, Dirk. (2022). *Katalog der Risiken: Risiken und ihre Darstellung*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-37083-1>
- Prötsch, Markus. (2019). *Lean Construction* [Masterthesis].
- Rat von Sachverständigen für Umweltfragen. (2002). Umweltgutachten des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen. *TATuP - Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis*, 3(2), 45–47. <https://doi.org/10.14512/tatup.3.2.45>
- Rotermund, Prof. Uwe. (2023). *FM.Benchmarking Bericht* (2023; S. 199–212).
- Schach, Rainer, & Schubert, Nadine. (2009). Logistik im Bauwesen. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden*, 58, 59–63.
- Schmid, Manfred. (2004). *Unfallbeteiligung von Kleintransportern* [Schlussbericht].
- Schwertner, Michael. (2017). *Energetischer Systemvergleich von Diesel-, Hybrid- und Elektrobussen* [Doktorarbeit]. ETH Zürich.
- Seim, Werner. (2018). *Bewertung und Verstärkung von Stahlbetontragwerken* (2., aktualisierte und erweiterte Auflage). Ernst & Sohn, a Wiley brand.
- Siemon, Klaus D. (2016). *Baukostenplanung und -steuerung*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-03057-5>
- Snyder, Hannah. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Statistik Austria. (2022). *Mikrozensus 2021*. (S. 4) [Pressemitteilung].
- Statistisches Bundesamt, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung, & Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung. (2021). *Datenreport 2021- Ein Sozialbericht für die Bundesrepublik Deutschland* (S. 259–270) [Datenreport]. Statistisches Bundesamt (Destatis).
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg. (2017). *Baufertigstellungen im Wohnbau 2017*.
- Straczek-Helios, Straczek-Helios. (2008). *Transportlogistik im Bauwesen* [Diplomarbeit]. Technische Universität Wien.
- TB Transportbeton GmbH. (2023). *Transportbeton PREISLISTE I / 2023*. www.tb-transportbeton.de
- Tebben, Hilke Cornelia, Brinkmann-Wicke, Tania, & Böhmer, Heike. (2022). *Analyse der Entwicklung der Bauschäden und der Bauschadenkosten – Update 2022* [Analysebericht]. Institut für Bauforschung e. V.
- Teizer, Klaus (Hrsg.). (2020). *BIM und Lean Management in der Praxis*. bSD Verlag.
- Thormählen, Thies. (1977). Der Nutzwert der Nutzwertanalyse. *Wirtschaftsdienst*, 57, 638–644.

- Tranfield, David, Denyer, David, & Smart, Palminder. (2003). Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management*, 14(3), 207–222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>
- Umweltbundesamt Österreich. (2022). *Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger* [Berechnungstool]. <https://secure.umweltbundesamt.at/co2mon/co2mon.html> - abgerufen am 2023-08-30 16:13:55
- Velte, Patrick. (2023). *Prüfung von Nachhaltigkeitsberichten nach der Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) durch den Wirtschaftsprüfer – Fluch oder Segen?* (S. 1–13). Leuphana Universität Lüneburg. <https://schmalenbach-impulse.de/app/uploads/2023/02/Schmalenbach-IMPULSE-2023-Velte.pdf>
- VFR Verlag. (2023). *Zuladung beim LKW berechnen: Was ist erlaubt? - LKW 2023*. Bußgeldkatalog. <https://www.bussgeldkatalog.org/zuladung-lkw/> - abgerufen am 2023-08-23 14:21:24
- Weigert, Maximilian, Winkler, Leopold, & Melnyk, Oleksandr. (2021). Co2-neutrale Baustelle. *Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift*, 166, 423–442.
- Weselek, Johanna, Kohler, Florian, & Siegmund, Alexander (Hrsg.). (2022). *Digitale Bildung für nachhaltige Entwicklung: Herausforderungen und Perspektiven für die Hochschulbildung*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-65122-3>
- Witte, Hermann. (1978). Aspekte einer dynamischen Nutzwertanalyse unter Fehlerbetrachtung. *Zeitschrift für die gesamte Staatswissenschaft / Journal of Institutional and Theoretical Economics*, 134, 490–502.
- Zeitner, Regina. (2019). Flächenmanagement. In Stefan Scholz, Kristin Wellner, Regina Zeitner, Clemens Schramm, Marcus Hackel, & Anne Hackel, *Architekturpraxis Bauökonomie* (S. 29–48). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-26850-3_3

7 Abkürzungsverzeichnis

BGF	Brutto-Grundfläche
BIM	Building Information Modeling
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
bzw.	beziehungsweise
CO ₂	chemische Formel für Kohlenstoffdioxid
DDR	Deutsche Demokratische Republik
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
DIN	Deutschen Instituts für Normung
EN	Europäische Norm
equ.	Englisch Abkürzung für Äquivalent
GaBi	Name einer Ökobilanzsoftware
GP	Gesamtpreis
GWP	Global Warming Potential
EU	Europäische Union
EP	Einkaufspreis
ISO	Internationale Organisation für Normung
ÖGNI	Österreichische Gesellschaft für Nachhaltige Immobilienwirtschaft
ÖNORM	nationale österreichische Norm
PENRT	primary energy non-renewable – total (nicht erneuerbare Primärenergie)
NRF	Nettoraumfläche
NUF	Nutzungsfläche
SIA	societe des ingenieurs de l'automobile
usw.	und so weiter
WF	Wohnfläche
z.B.	zum Beispiel

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Die drei Säulen der Nachhaltigkeit (Ibu, 2023)	2
Abbildung 2 Vorgefertigtes Bahnwärterhaus (um 1900) (Bergmeister & Fingerloos, 2009, S. 157).....	6
Abbildung 3 3D-Darstellung des Prototyps in Autodesk Revit	7
Abbildung 4 Transportvorgaben von Raummodulen (Kaufmann et al., 2022)	7
Abbildung 5 Darstellung der Lebenszyklusphasen angelehnt an die DIN EN 15804 (Heckmann & Glock, 2023, S. 111) und Markierung der relevanten Phasen.....	8
Abbildung 6 Anteil des Endenergieverbrauchs für ein Gebäude am gesamten Bauzyklus (Cdb, 2022, S. 42)	9
Abbildung 7 Bauzeit und Baukosten(Duschel et al., 2020)	12
Abbildung 8 Einfluss des Kostenverlaufs (Litau, 2015, S. 24)	14
Abbildung 9 Verteilung meldepflichtiger Arbeitsunfälle auf Baustellen in Deutschland 2021(DGUV 2, 2022)	17
Abbildung 10 Schadensursachen von Baumängel/-schäden (Balak et al., 2008, S. 38).....	18
Abbildung 11 Schaubild Schwache und Starke Nachhaltigkeit (Weselek et al., 2022, S. 11)	19
Abbildung 12 Umweltindikatoren Stahlbeton mit 1,75 Vol. % Armierungsstahl (baubook GmbH, 2014).....	22
Abbildung 13 Außenmaße der verwendeten Modultypen	23
Abbildung 14 3D-Darstellung der Modultypen in Revit	24
Abbildung 15 Umweltindikatoren des konventionellen Rohbaus aus der eco2soft Software	27
Abbildung 16 LKW-Fahrten nach Materialgruppen (Straczek-Helios, 2008, S. 91).....	29
Abbildung 17 Anteil der Entsorgung aus eco2soft (konventioneller Bau)	33
Abbildung 18 Schema eines theoretischen Lebensweges für ein Modul.....	34
Abbildung 19 Diagramm zur Ermittlung der Produktions- und Errichtungstage.....	38
Abbildung 20 Stundenaufwand verschiedener Bauarten (Borosnyai, 2018, S. 105) mit Eintrag der Beispielberechnungen	39
Abbildung 21 Materialliste vom Rohbau (konventioneller Bau)	47
Abbildung 22 Arbeitsunfälle nach Berufsgruppen (DGUV 3, 2018).....	53
Abbildung 23 Entwicklung der Berufskrankheiten im Baugewerbe (BG BAU, 2022)	56

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Einordnung zur Bewertung von Baustoffen (IBO - Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, 2020, S. 5).....	11
Tabelle 2 Flächen und Bauteildicke des Rohbaus (konventioneller Bau)	21
Tabelle 3 LCC der Phasen A1-A3 (konventioneller Bau).....	22
Tabelle 4 GWP- Werte der einzelnen Modultypen	25
Tabelle 5 Anzahl und LCC der Phasen A1-A3 (Modulbau).....	26
Tabelle 6 GWP-Transportwege Module (Anteil Rohbau).....	28
Tabelle 7 Transportwege für den Innenausbau (modulares Bauen)	32
Tabelle 8 Zusammenfassung der GWP-Werte von Transportwege des Roh- und Innenausbau	32
Tabelle 9 GWP-Werte für die Entsorgung (Modulbau)	35
Tabelle 10 GWP-Wert Phase A1 - A3	36
Tabelle 11 Zusammenfassung der Einsparpotentiale	36
Tabelle 12 Energieverbrauch auf der Baustelle - eigene Berechnung ergänzt mit Werten von (Piatek, 2021)	42
Tabelle 13 Anlage eines Produktionswerks (Modulbau).....	44
Tabelle 14 Baukosten und Preisvergleich - Innenausbau.....	49
Tabelle 15 Zusammenfassung der Kosten - Roh- und Innenausbau.....	50
Tabelle 16 Berechnung der Kapitalwerte über 50 Jahre.....	52
Tabelle 17 Berechnung Verhältnis Art der Unfälle Baustelle vs Produktion.....	54
Tabelle 18 Matrix zur Bewertung der Qualität in Arbeitsprozessen	58
Tabelle 19 Einordnung der Kriterien.....	60
Tabelle 20 Nutzwertanalyse der beiden Varianten.....	62
Tabelle 21 LKW-Fahrten und Transportleistungen nach Materialgruppen (Straczek-Helios, 2008).....	91

10 Anhangsverzeichnis

Anhang A	Experteninterview Heberger.....	79
Anhang B	Grundrisse und Schnitt des konventionellen Gebäudeprojekt.....	81
Anhang C	Umweltindikatoren verwendeter Materialien	85
Anhang D	Ergebnisse für Treibhausemissionen	85
Anhang E	Grundrisse der Modulaufteilung.....	86
Anhang F	Investitionsemissionen der Bauteile (Modulbau).....	89
Anhang G	Transport-Umweltindikatoren.....	90
Anhang H	LKW-Fahrten und Transportleistungen nach Materialgruppen..	91
Anhang I	Entsorgungs-Umweltindikatoren	92
Anhang J	Umweltindikatoren der Modultyp-Rohlinge.....	93
Anhang K	Phasenpläne des konventionellen Baus	95
Anhang L	Grundriss eines potenziellen Modulbauwerkes	97
Anhang M	Kennwerte einer PV-Anlage für die Modulbauhalle	98
Anhang N	Materialliste Modulbau	98
Anhang O	Preisspiegel – Musterbeispiele aus einem anderen Projekt.....	99
Anhang P	Ausfalltage wegen Arbeitsunfällen je 100 Versicherungsjahre nach Berufsfeldern im Jahr 2022	101
Anhang Q	Erfasste Bauschadenstellen der AIA - 2002 – 2021.....	102

Anhang A Experteninterview Heberger

Interview wurde durchgeführt mit dem Abteilungsleiter Modulbau Mirko Seidel.

1. Wie dimensionieren Sie die Module?

Die maximale Abmessung wurde von uns anfänglich auf 12 m Länge und 3,5 m Breite definiert. Dies liegt an der verkehrstechnischen Situation, da wir Sondertransporte vermeiden möchten. In der weiteren Entwicklung haben wir festgestellt, dass auch der wirtschaftliche Aspekt sowie die Machbarkeit eine Rolle spielen. Somit haben wir die maximale Länge nochmals auf maximal 8,5 Meter reduziert. Dies begründet sich auch darauf, dass unser Primärziel immer noch die schnelle Schaffung von günstigem Wohnraum ist. Weiterhin haben wir uns darauf festgelegt, die Außenmaße dann in 0,25 m Rasterschritten anzupassen. Je nach Länge müssen dann statische Sondermaßnahmen eingebaut werden, aber in diesen Rasterschritten sind alle Modulgrößen statisch durchgerechnet und funktionieren.

2. Warum ist eine unterschiedliche Dimensionierung überhaupt notwendig?

Durch eine unterschiedliche Dimensionierung lässt sich mit dem Modulbau eine bessere Flächeneffizienz erreichen. Wir dürfen nämlich nicht außer Acht lassen, dass wir gegen den herkömmlichen Bau antreten. Dies bedeutet, der Modulbau muss die Flächen so effizient wie möglich gestalten. Der Vorteil ist, dass sich die Basisauslegung bei dem Modul nicht verändert. So kann die Flächenausnutzung in dem Modul selbst perfektioniert werden. Dennoch bedeutet dies auch, wenn wir die Module nur in einer einheitlichen Größe bauen würden, haben wir keine Chance, auf dem Markt zu bestehen, weil durch seine Flexibilität der klassische Wohnungsbau seine Vorteile der Flächenausnutzung deutlich ausspielen kann.

3. Welche Bauweise ist nach Ihrer Einschätzung günstiger und welches sind die Einsparpunkte?

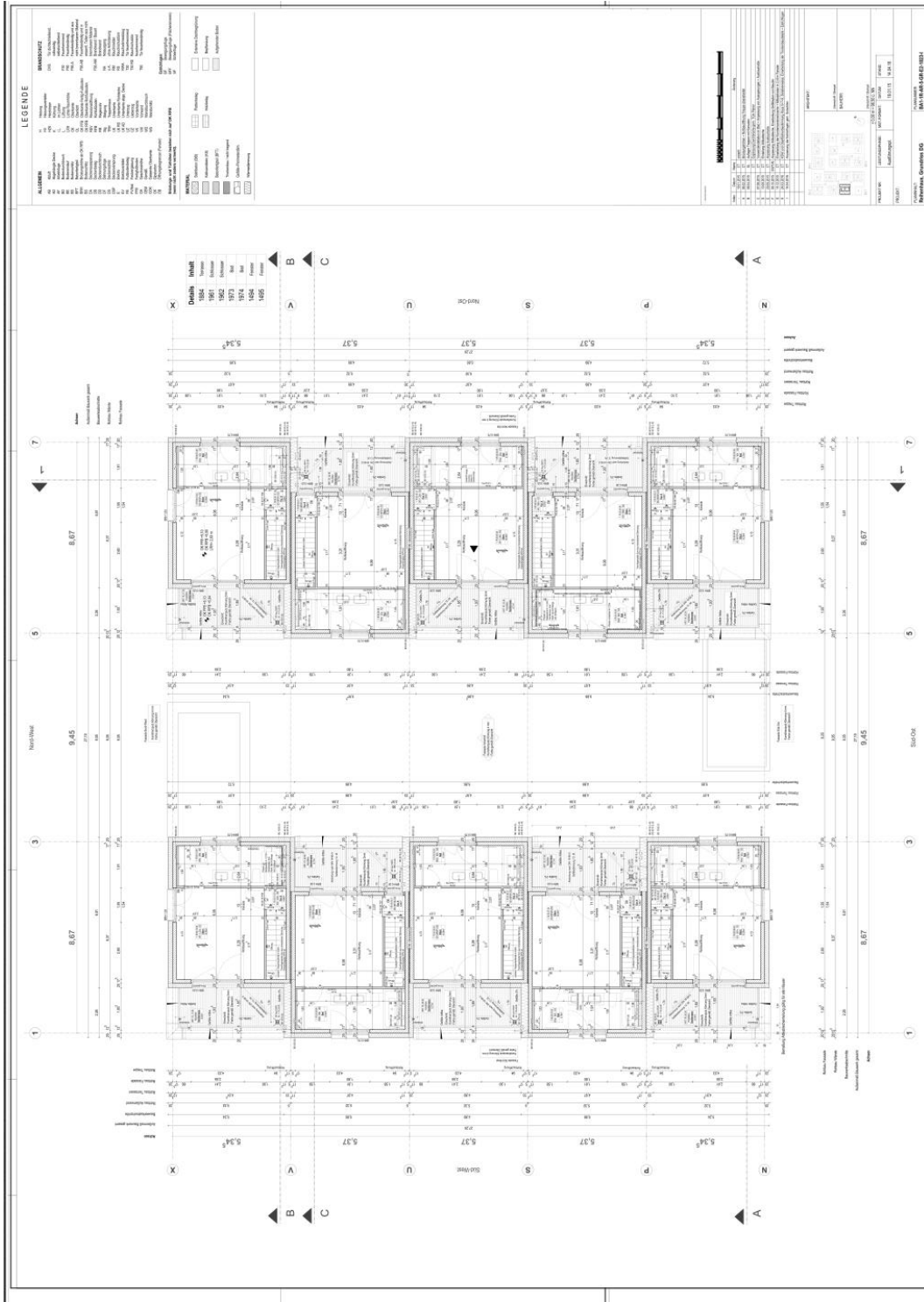
Meine Antworten beruhen auf den Aussagen aus der Branche sowie den Erfahrungen im Baugewerbe. Dahingehend sehe ich den Modulbau um 20 bis 30 % günstiger als den konventionellen Bau. Einsparung von Bauzeit, bessere Bedingungen und draus folgend schnellere Arbeitsabläufe senken die Betriebskosten im Vergleich zu der Baustelle wesentlich. Hinzu kommt, dass die Produkte unabhängig vom Wetter das ganze Jahr ohne klimatische Einschränkungen produziert werden können.

Ein riesiges Potential sehe ich zudem im Innenausbau, da aufgrund der Lagehaltung und der besseren Transportinfrastruktur sowohl in den Montageprozessen selbst als auch im Einkauf große Einsparmöglichkeiten herrschen. Dahingehend ordne ich die 20 bis 30 % als realistischen Wert ein.

4. Ab welcher Anzahl macht es Sinn dieses Produzieren und wann ist der konventionelle Bereich noch stärker?

Unsere Erfahrungen sind dahingehend noch nicht vorhanden, weil wir in der aktuellen Phase beim Aufbau einer Produktion sind. Berufen wir uns allerdings auf die Aussagen unserer Fertigbadhersteller aus Prag, benötigt man 4 bis 5 Module, um die Modulgröße wirtschaftlich zu produzieren. Energetisch und ökobilanztechnisch werden es ebenfalls die eigene Erfahrung oder wissenschaftliche Arbeiten zeigen, wo die Kippunkte sein werden.

Dachgeschoss



Anhang C Umweltindikatoren verwendeter Materialien

Stahlbeton mit 2 Vol.% Armierungsstahl

Stahlbeton 160 kg/m³ Armierungsstahl (2 Vol.%)

Zuletzt geändert:
baubook-Richtwert: 26. 6. 2014
Bauphysikalische Kennwerte: 21. 3. 2013
Bauökologische Kennwerte, IBO-Richtwerte 2012: 19. 2. 2020
Bauökologische Kennwerte, IBO-Richtwerte 2020: 24. 1. 2022

Bauprodukte
Ortbetone
Stahlbetone / Normalbetone mit Bewehrung

Einsatzbereich des Richtwertes
Standardwert laut Ergänzungen zum OI3 Berechnungslaufplan V 3.0 (IBO März 2014) für **Fundamentplatten und Streifenfundamente**.

Kennwerte

Bauphysikalische Kennwerte
Bauökologische Kennwerte: Hintergrunddatenbank Ecoinvent A1

Indikator	IBO 2012	Einheit
Kernindikatoren für die Umweltwirkung		
GWP-fossil Globales Erwärmungspotenzial - fossil	0,162	kg CO ₂ Äq./kg
GWP-biogenic Globales Erwärmungspotenzial - biogen	-0,000281	kg CO ₂ Äq./kg
GWP-total Globales Erwärmungspotenzial - total	0,161	kg CO ₂ Äq./kg
ODP Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht	0,000000006	kg CFC-11 Äq./kg
AP Versauerungspotenzial von Boden und Wasser	0,000429	kg SO ₂ Äq./kg
EP Eutrophierungspotenzial	0,000277	kg PO ₄ ³⁻ Äq./kg
POCP Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon	0,0000580	kg C ₂ H ₄ Äq./kg
Indikatoren zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes		
PERE Erneuerbare Primärenergie - als Energieträger	0,0549	MJ/kg
PERM Erneuerbare Primärenergie - als Rohstoff	0	MJ/kg
PERT Erneuerbare Primärenergie - total	0,0549	MJ/kg
PENRE Nicht erneuerbare Primärenergie - als Energieträger	1,66	MJ/kg
PENRM Nicht erneuerbare Primärenergie - als Rohstoff	0	MJ/kg
PENRT Nicht erneuerbare Primärenergie - total	1,66	MJ/kg

Trockenbauwandsystem Rigips

MW12RF-100-50 Metall-Einfachständerwand/RF 12,5/(100mm)

Link zu dieser Seite:
<https://www.baubook.at/m/PHP/Info.php?SI=2142721130&SW=5>

★ Zu den Favoriten

- Der Entsorgungsindikator kann nicht ermittelt werden: Die entsprechenden Entsorgungs-Kennzahlen fehlen hier!
- Die Wärmeleitfähigkeit (A) fehlt! Keine U-Wert Berechnung möglich!
- Tip: Sie können diese Schicht auch als weiteren Bestandteil (nicht U-Wert relevant) eingeben.

Hersteller
Beschreibung
Technische Eigenschaften
Ökologische Kennwerte

Hintergrunddatenbank Ecoinvent A1

A1-A3 Herstellungsphase

Indikator	Wert	Einheit
Kernindikatoren für die Umweltwirkung		
GWP-fossil Globales Erwärmungspotenzial - fossil	13,9	kg CO ₂ Äq./m ²
GWP-biogenic Globales Erwärmungspotenzial - biogen	-1,60	kg CO ₂ Äq./m ²
GWP-total Globales Erwärmungspotenzial - total	12,3	kg CO ₂ Äq./m ²
ODP Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht	1,37·10 ⁻⁶	kg CFC-11 Äq./m ²
AP Versauerungspotenzial von Boden und Wasser	0,0473	kg SO ₂ Äq./m ²
EP Eutrophierungspotenzial	0,0237	kg PO ₄ ³⁻ Äq./m ²
POCP Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon	0,00407	kg C ₂ H ₄ Äq./m ²
Indikatoren zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes		
PERE Erneuerbare Primärenergie - als Energieträger	14,6	MJ/m ²
PERM Erneuerbare Primärenergie - als Rohstoff	13,2	MJ/m ²
PERT Erneuerbare Primärenergie - total	27,7	MJ/m ²
PENRE Nicht erneuerbare Primärenergie - als Energieträger	217	MJ/m ²
PENRM Nicht erneuerbare Primärenergie - als Rohstoff	2,19	MJ/m ²
PENRT Nicht erneuerbare Primärenergie - total	219	MJ/m ²

Aus der Software eco2soft (Figl & Florit 1, 2023)

Anhang D Ergebnisse für Treibhausemissionen

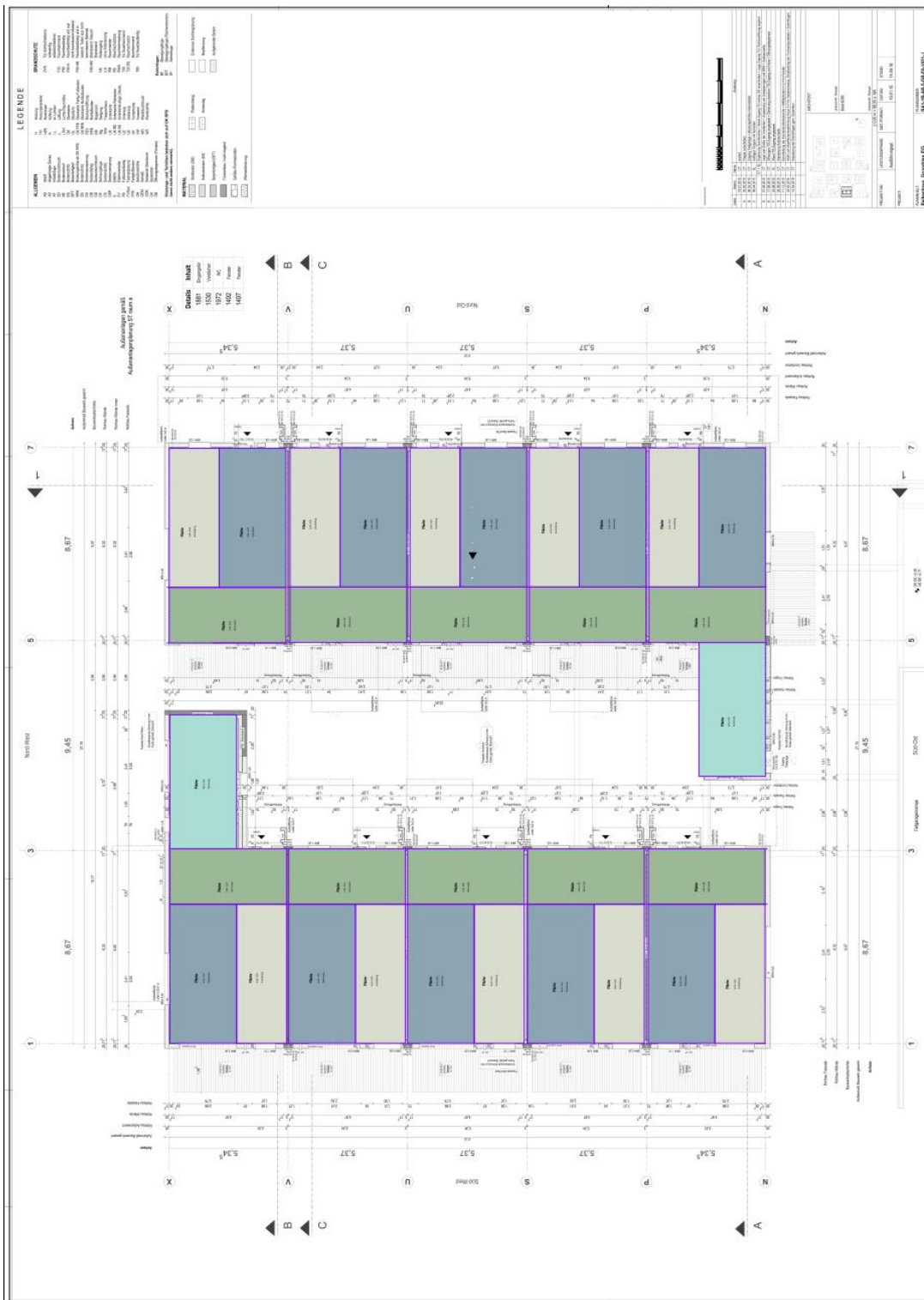
Tabelle aus der Benchmark Studie des DGNB

	15% Perzentil	Mittelwert	Median	90% Perzentil	Anzahl
Gebäude - gesamt	6,5	8,7	8,8	11,9	50
Herstellung der Gebäude (Module A1 bis A3) - „Investitionsemissionen“		7,3	7,37		44
Gebäude nach beeinflussenden Faktoren:					
Nutzungsart - Büro	6,6	9,1	9,0	12,7	46
Bauweise - Massivbauweise	6,6	8,6	8,2	11,1	25
Bauweise - Skelettbauweise	7,4	9,7	9,4	13,8	22
Energieeffizienz (EnEV-Unterschreitung), Angaben in %	38%	24%	22%	7%	50

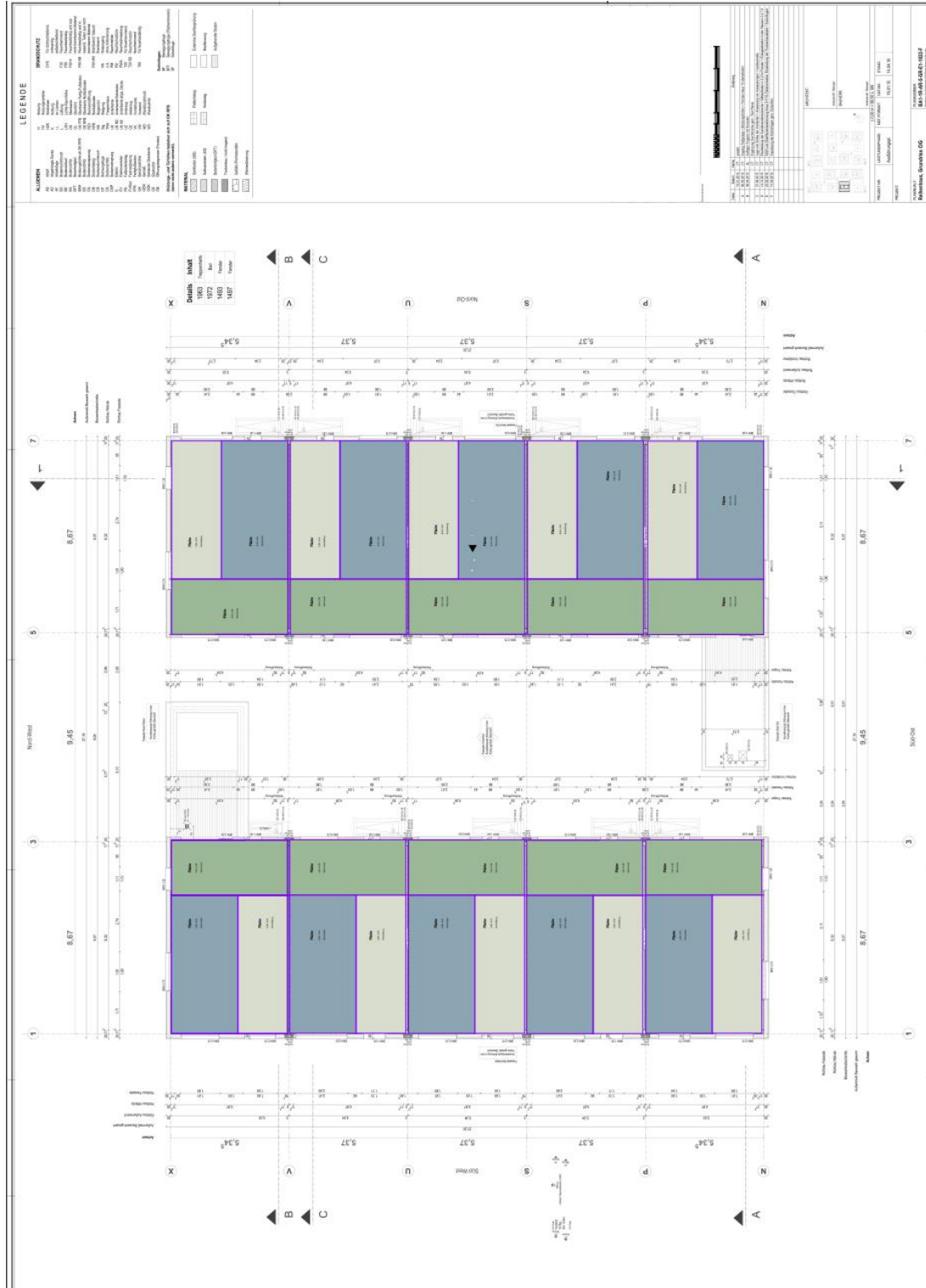
Ergebnisse für Treibhausemissionen GWPK $\left[\frac{kg_{CO_2eq}}{m^2 \cdot a}\right]$ gesamt und in Abhängigkeit von beeinflussenden Faktoren (Braune et al., 2021)

Anhang E Grundrisse der Modulaufteilung

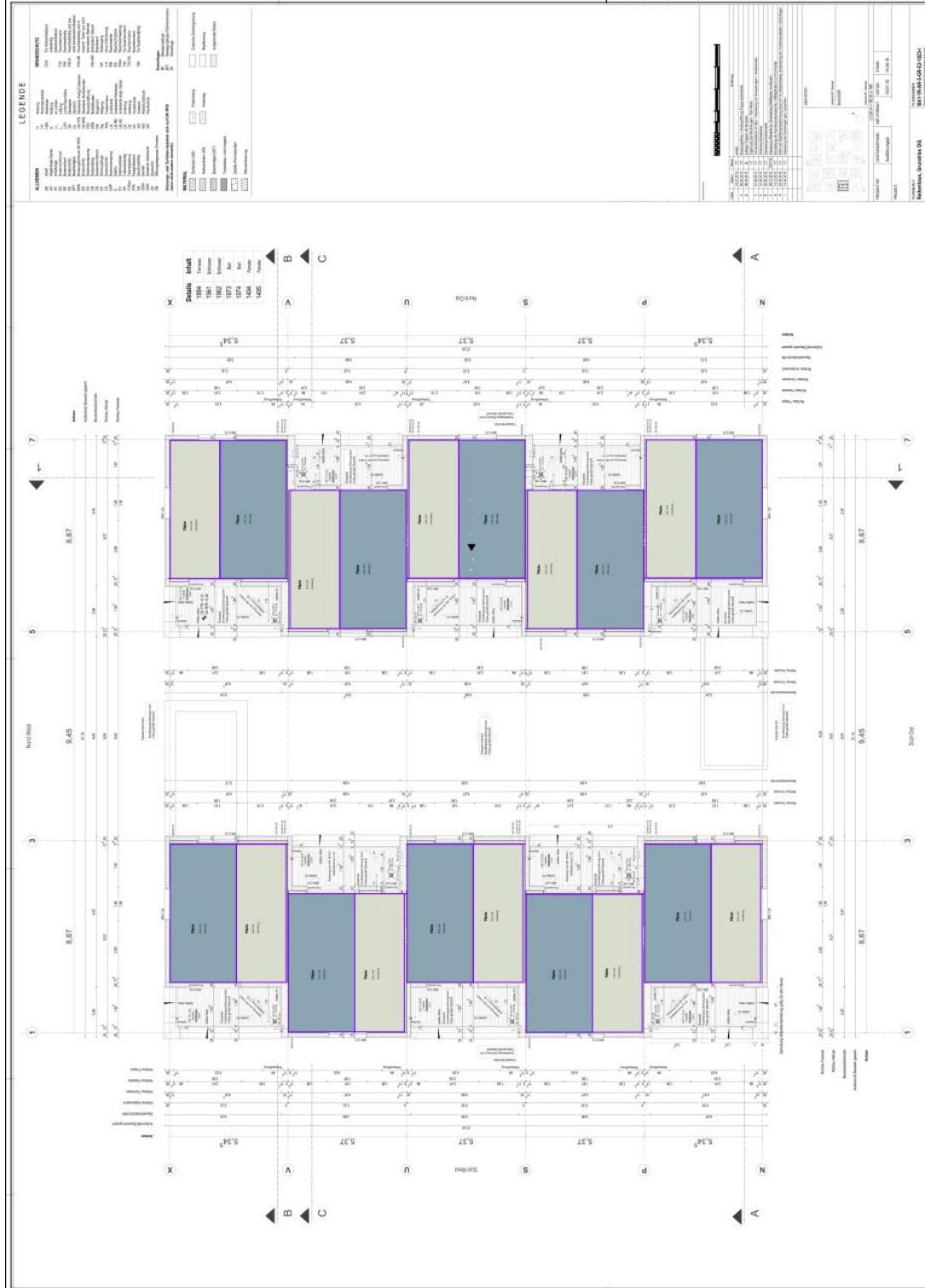
Erdgeschoss



1. Obergeschoss



Dachgeschoss



Anhang F Investitionsemissionen der Bauteile (Modulbau)

Modultyp 1

Bauteile		$\Delta OI3$		PENRT	GWP-total	AP
Menge	Bauteil	BG6, BZF	pro m ² Bt	MJ	kg CO ₂ equ.	kg SO ₂ equ.
				pro m ² BZF		
0,00 m ²	Wand 4 Ausfachung	0	27	0	0	0,00
0,00 m ²	Wand 2 Ausfachung	0	27	0	0	0,00
0,00 m ²	Ersatz für Treppe	0	334	0	0	0,00
2,63 m ²	Wand 3 Ausfachung	70	27	837	82	0,22
4,12 m ²	Wand 3 Rahmen	207	50	2.458	239	0,64
4,12 m ²	Wand 4 Rahmen	207	50	2.458	239	0,64
7,82 m ²	Wand 1 Ausfachung	209	27	2.489	242	0,64
5,57 m ²	Wand 1 Rahmen	279	50	3.324	324	0,86
5,57 m ²	Wand 2 Rahmen	279	50	3.324	324	0,86
17,30 m ²	Boden_Rohbau	694	40	8.258	804	2,14
17,30 m ²	Decke Rohbau	694	40	8.258	804	2,14
64,43 m²	Summe			31.406	3.059	8,13

Modultyp 2

Bauteile		$\Delta OI3$		PENRT	GWP-total	AP
Menge	Bauteil	BG6, BZF	pro m ² Bt	MJ	kg CO ₂ equ.	kg SO ₂ equ.
				pro m ² BZF		
0,00 m ²	Wand 4 Ausfachung	0	27	0	0	0,00
0,00 m ²	Ersatz für Treppe	0	334	0	0	0,00
4,65 m ²	Wand 3 Ausfachung	124	27	1.480	144	0,38
7,27 m ²	Wand 1 Ausfachung	195	27	2.314	225	0,60
7,27 m ²	Wand 2 Ausfachung	195	27	2.314	225	0,60
4,31 m ²	Wand 3 Rahmen	216	50	2.572	250	0,67
4,31 m ²	Wand 4 Rahmen	216	50	2.572	250	0,67
5,10 m ²	Wand 1 Rahmen	256	50	3.043	296	0,79
5,10 m ²	Wand 2 Rahmen	256	50	3.043	296	0,79
16,94 m ²	Boden_Rohbau	680	40	8.086	788	2,09
16,94 m ²	Decke Rohbau	680	40	8.086	788	2,09
71,89 m²	Summe			33.509	3.264	8,67

Modultyp 3

Bauteile		$\Delta OI3$		PENRT	GWP-total	AP
Menge	Bauteil	BG6, BZF	pro m ² Bt	MJ	kg CO ₂ equ.	kg SO ₂ equ.
				pro m ² BZF		
0,00 m ²	Wand 2 Ausfachung	0	27	0	0	0,00
0,00 m ²	Ersatz für Treppe	0	334	0	0	0,00
3,01 m ²	Wand 4 Ausfachung	81	27	958	93	0,25
5,25 m ²	Wand 1 Ausfachung	140	27	1.671	163	0,43
5,28 m ²	Wand 3 Ausfachung	141	27	1.680	164	0,43
3,74 m ²	Wand 3 Rahmen	188	50	2.232	217	0,58
3,74 m ²	Wand 4 Rahmen	188	50	2.232	217	0,58
5,05 m ²	Wand 1 Rahmen	253	50	3.013	293	0,78
5,05 m ²	Wand 2 Rahmen	253	50	3.013	293	0,78
14,46 m ²	Boden_Rohbau	580	40	6.902	672	1,79
14,46 m ²	Decke Rohbau	580	40	6.902	672	1,79
60,04 m²	Summe			28.604	2.786	7,40

Modultyp 4a

Bauteile		ΔOI3		PENRT	GWP-total	AP
Menge	Bauteil	BG6, BZF	pro m² Bt	MJ	kg CO ₂ equ.	kg SO ₂ equ.
0,00 m²	Wand 4 Ausfachung	0	27	0	0	0,00
0,00 m²	Wand 2 Ausfachung	0	27	0	0	0,00
0,00 m²	Wand 3 Ausfachung	0	27	0	0	0,00
4,12 m²	Wand 3 Rahmen	207	50	2.458	239	0,64
4,12 m²	Wand 4 Rahmen	207	50	2.458	239	0,64
5,57 m²	Wand 1 Rahmen	279	50	3.324	324	0,86
5,57 m²	Wand 2 Rahmen	279	50	3.324	324	0,86
13,74 m²	Wand 1 Ausfachung	368	27	4.373	426	1,13
1,19 m²	Ersatz für Treppe	398	334	4.734	461	1,23
15,12 m²	Decke Rohbau	607	40	7.218	703	1,87
17,30 m²	Boden_Rohbau	694	40	8.258	804	2,14
66,73 m²	Summe			36.146	3.521	9,36

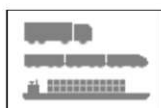
Modultyp 4b

Bauteile		ΔOI3		PENRT	GWP-total	AP
Menge	Bauteil	BG6, BZF	pro m² Bt	MJ	kg CO ₂ equ.	kg SO ₂ equ.
0,00 m²	Wand 4 Ausfachung	0	27	0	0	0,00
0,00 m²	Wand 2 Ausfachung	0	27	0	0	0,00
0,00 m²	Ersatz für Treppe	0	334	0	0	0,00
0,00 m²	Wand 3 Ausfachung	0	27	0	0	0,00
4,12 m²	Wand 3 Rahmen	207	50	2.458	239	0,64
4,12 m²	Wand 4 Rahmen	207	50	2.458	239	0,64
5,57 m²	Wand 1 Rahmen	279	50	3.324	324	0,86
5,57 m²	Wand 2 Rahmen	279	50	3.324	324	0,86
13,74 m²	Wand 1 Ausfachung	368	27	4.373	426	1,13
15,12 m²	Decke Rohbau	607	40	7.218	703	1,87
17,30 m²	Boden_Rohbau	694	40	8.258	804	2,14
65,54 m²	Summe			31.412	3.060	8,13

Anhang G Transport-Umweltindikatoren

Daten der einzelnen Modultypen aus der Software eco2soft

Transportwege Modultyp 1



Transportwege

Summe (100,0% aller Materialien mit bekannter Masse berücksichtigt)

PENRT	GWP-total	AP
MJ	kg CO ₂ equ.	kg SO ₂ equ.
268	17,5	0,0844

Transportwege Modultyp 2



Transportwege

Summe (100,0% aller Materialien mit bekannter Masse berücksichtigt)

PENRT	GWP-total	AP
MJ	kg CO ₂ equ.	kg SO ₂ equ.
286	18,7	0,0901

Transportwege Modultyp 3

	PENRT MJ	GWP-total kg CO ₂ equ.	AP kg SO ₂ equ.
Summe (100,0% aller Materialien mit bekannter Masse berücksichtigt)	244	15,9	0,0769

Transportwege Modultyp 4a

	PENRT MJ	GWP-total kg CO ₂ equ.	AP kg SO ₂ equ.
Summe (100,0% aller Materialien mit bekannter Masse berücksichtigt)	308	20,1	0,0972

Transportwege Modultyp 4b

	PENRT MJ	GWP-total kg CO ₂ equ.	AP kg SO ₂ equ.
Summe (100,0% aller Materialien mit bekannter Masse berücksichtigt)	268	17,5	0,0844

Anhang H LKW-Fahrten und Transportleistungen nach Materialgruppen

MATERIALGRUPPEN	LKW-Fahrten	t/Fahrt	km/Fahrt	LKW-km	Tkm
Aushub	1.500	16	54	81.000	1.296.000
Hinterfüllung	500	8	104	52.000	416.000
Decke	200	12	130	26.000	312.000
Schotter	550	8	54	29.700	237.600
Beton	1.500	8	14	21.000	168.000
Schuttabfuhr	150	8	64	9.562	76.496
Ziegel	250	12	24	6.000	72.000
Zwischenwände	50	12	110	5.500	66.000
Dachdecker	25	5	440	11.000	55.000
Fassade	25	12	178	4.440	53.280
Kleinmaterial	250	5	40	10.000	50.000
Zimmerer	50	5	140	7.000	35.000
Fenster	20	5	240	4.800	24.000
Mörtel	25	8	106	2.650	21.200
Gehwege	50	8	52	2.598	20.784
Maschinenputz	15	8	146	2.190	17.520
Bewehrung	100	8	15	1.489	11.912
Schlosser	25	5	81	2.020	10.100
Estrich	90	8	13	1.170	9.360
Spengler	50	5	30	1.500	7.500
Bauhof	50	5	28	1.400	7.000
Fliesen	20	8	29	576	4.608
Heizung	20	5	46	920	4.600
Installateur	25	5	34	850	4.250
Holz	30	5	24	720	3.600
Maler	10	5	70	700	3.500
Fußboden	10	5	50	500	2.500
Elektro	10	5	38	380	1.900
Innenausbau	10	5	19	190	950
GESAMT	5.610	10	51	287.855	2.992.660

Vollständig anrechenbar

Teilweise anrechenbar

Tabelle 21 LKW-Fahrten und Transportleistungen nach Materialgruppen (Straczek-Helios, 2008)

Anhang I Entsorgungs-Umweltindikatoren

Daten für die vollständigen Modultypen aus eco2soft

Entsorgung vollständiger Modultyp 1



Entsorgung

Summe (100,0% aller Materialien mit bekannter Masse berücksichtigt)

PENRT MJ	GWP-total kg CO ₂ equ.	AP kg SO ₂ equ.
6.317	321	1,97

Entsorgung vollständiger Modultyp 2



Entsorgung

Summe (100,0% aller Materialien mit bekannter Masse berücksichtigt)

PENRT MJ	GWP-total kg CO ₂ equ.	AP kg SO ₂ equ.
6.738	342	2,10

Entsorgung vollständiger Modultyp 3



Entsorgung

Summe (100,0% aller Materialien mit bekannter Masse berücksichtigt)

PENRT MJ	GWP-total kg CO ₂ equ.	AP kg SO ₂ equ.
5.752	292	1,79

Entsorgung vollständiger Modultyp 4a



Entsorgung

Summe (100,0% aller Materialien mit bekannter Masse berücksichtigt)

PENRT MJ	GWP-total kg CO ₂ equ.	AP kg SO ₂ equ.
6.738	342	2,10

Entsorgung vollständiger Modultyp 4b



Entsorgung

Summe (100,0% aller Materialien mit bekannter Masse berücksichtigt)

PENRT MJ	GWP-total kg CO ₂ equ. pro m ² BZF	AP kg SO ₂ equ.
6.315	321	1,97

Anhang J Umweltindikatoren der Modultyp-Rohlinge

Daten aus der Software eco2soft

Rohlinge Modultyp 1

Bauteile			ΔOIG		PENRT	GWP-total	AP	E _{loc}
Menge	Bauteil	BG6, BZF	pro m² Bt		MJ	kg CO ₂ equ.	kg SO ₂ equ.	pro m² Bt
0,00 m²	Wand 1 Ausfachung	0	27		0	0	0,00	-0,02
0,00 m²	Wand 4 Ausfachung	0	27		0	0	0,00	-0,02
0,00 m²	Wand 2 Ausfachung	0	27		0	0	0,00	-0,02
0,00 m²	Ersatz für Treppe	0	334		0	0	0,00	0,90
0,00 m²	Wand 3 Ausfachung	0	27		0	0	0,00	-0,02
4,12 m²	Wand 3 Rahmen	207	50		2.458	239	0,64	0,05
4,12 m²	Wand 4 Rahmen	207	50		2.458	239	0,64	0,05
5,57 m²	Wand 1 Rahmen	279	50		3.324	324	0,86	0,05
5,57 m²	Wand 2 Rahmen	279	50		3.324	324	0,86	0,05
17,30 m²	Boden_Rohbau	694	40		8.258	804	2,14	0,02
17,30 m²	Decke Rohbau	694	40		8.258	804	2,14	0,02
53,98 m²	Summe				28.080	2.735	7,27	



Transportwege

Summe (100,0% aller Materialien mit bekannter Masse berücksichtigt)

PENRT	GWP-total	AP
MJ	kg CO ₂ equ.	kg SO ₂ equ.
239	15,6	0,0755



Entsorgung

Summe (100,0% aller Materialien mit bekannter Masse berücksichtigt)

PENRT	GWP-total	AP
MJ	kg CO ₂ equ.	kg SO ₂ equ.
5.647	287	1,76

Rohlinge Modultyp 2

Bauteile			ΔOIG		PENRT	GWP-total	AP	E _{loc}
Menge	Bauteil	BG6, BZF	pro m² Bt		MJ	kg CO ₂ equ.	kg SO ₂ equ.	pro m² Bt
0,00 m²	Wand 1 Ausfachung	0	27		0	0	0,00	-0,02
0,00 m²	Wand 4 Ausfachung	0	27		0	0	0,00	-0,02
0,00 m²	Wand 2 Ausfachung	0	27		0	0	0,00	-0,02
0,00 m²	Ersatz für Treppe	0	334		0	0	0,00	0,90
0,00 m²	Wand 3 Ausfachung	0	27		0	0	0,00	-0,02
4,31 m²	Wand 3 Rahmen	216	50		2.572	250	0,67	0,05
4,31 m²	Wand 4 Rahmen	216	50		2.572	250	0,67	0,05
5,10 m²	Wand 1 Rahmen	256	50		3.043	296	0,79	0,05
5,10 m²	Wand 2 Rahmen	256	50		3.043	296	0,79	0,05
16,94 m²	Boden_Rohbau	680	40		8.086	788	2,09	0,02
16,94 m²	Decke Rohbau	680	40		8.086	788	2,09	0,02
52,70 m²	Summe				27.402	2.669	7,09	



Transportwege

Summe (100,0% aller Materialien mit bekannter Masse berücksichtigt)

PENRT	GWP-total	AP
MJ	kg CO ₂ equ.	kg SO ₂ equ.
234	15,3	0,0737



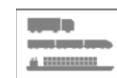
Entsorgung

Summe (100,0% aller Materialien mit bekannter Masse berücksichtigt)

PENRT	GWP-total	AP
MJ	kg CO ₂ equ.	kg SO ₂ equ.
5.510	280	1,72

Rohlinge Modultyp 3

Bauteile			ΔOIG		PENRT	GWP-total	AP	E _{loc}
Menge	Bauteil	BG6, BZF	pro m² Bt		MJ	kg CO ₂ equ.	kg SO ₂ equ.	pro m² Bt
0,00 m²	Wand 1 Ausfachung	0	27		0	0	0,00	-0,02
0,00 m²	Wand 4 Ausfachung	0	27		0	0	0,00	-0,02
0,00 m²	Wand 2 Ausfachung	0	27		0	0	0,00	-0,02
0,00 m²	Ersatz für Treppe	0	334		0	0	0,00	0,90
0,00 m²	Wand 3 Ausfachung	0	27		0	0	0,00	-0,02
3,74 m²	Wand 3 Rahmen	188	50		2.232	217	0,58	0,05
3,74 m²	Wand 4 Rahmen	188	50		2.232	217	0,58	0,05
5,05 m²	Wand 1 Rahmen	253	50		3.013	293	0,78	0,05
5,05 m²	Wand 2 Rahmen	253	50		3.013	293	0,78	0,05
14,46 m²	Boden_Rohbau	580	40		6.902	672	1,79	0,02
14,46 m²	Decke Rohbau	580	40		6.902	672	1,79	0,02
46,50 m²	Summe				24.295	2.366	6,29	



Transportwege

Summe (100,0% aller Materialien mit bekannter Masse berücksichtigt)

PENRT	GWP-total	AP
MJ	kg CO ₂ equ.	kg SO ₂ equ.
207	13,5	0,0653



Entsorgung

Summe (100,0% aller Materialien mit bekannter Masse berücksichtigt)

PENRT	GWP-total	AP
MJ	kg CO ₂ equ.	kg SO ₂ equ.
4.885	248	1,52

Rohlinge Modultyp 4a

Bauteile		ΔO ₃		PENRT	GWP-total	AP	E _{LCO₂}
Menge	Bauteil	BG6, BZF	pro m ² Bt	MJ	kg CO ₂ equ.	kg SO ₂ equ.	pro m ² Bt
0,00 m ²	Wand 1 Ausfachung	0	27	0	0	0,00	-0,02
0,00 m ²	Wand 4 Ausfachung	0	27	0	0	0,00	-0,02
0,00 m ²	Wand 2 Ausfachung	0	27	0	0	0,00	-0,02
0,00 m ²	Wand 3 Ausfachung	0	27	0	0	0,00	-0,02
4,12 m ²	Wand 3 Rahmen	207	50	2.458	239	0,64	0,05
4,12 m ²	Wand 4 Rahmen	207	50	2.458	239	0,64	0,05
5,57 m ²	Wand 1 Rahmen	279	50	3.324	324	0,86	0,05
5,57 m ²	Wand 2 Rahmen	279	50	3.324	324	0,86	0,05
1,19 m ²	Ersatz für Treppe	398	334	4.734	461	1,23	0,90
15,12 m ²	Decke Rohbau	607	40	7.218	703	1,87	0,02
17,30 m ²	Boden_Rohbau	694	40	8.258	804	2,14	0,02
52,99 m²	Summe			31.773	3.095	8,22	



Trasportwege

Summe (100,0% aller Materialien mit bekannter Masse berücksichtigt)

PENRT	GWP-total	AP
MJ	kg CO ₂ equ.	kg SO ₂ equ.
271	17,7	0,0854



Entsorgung

Summe (100,0% aller Materialien mit bekannter Masse berücksichtigt)

PENRT	GWP-total	AP
MJ	kg CO ₂ equ.	kg SO ₂ equ.
6.389	325	1,99

Rohlinge Modultyp 4b

Bauteile		ΔO ₃		PENRT	GWP-total	AP	E _{LCO₂}
Menge	Bauteil	BG6, BZF	pro m ² Bt	MJ	kg CO ₂ equ.	kg SO ₂ equ.	pro m ² Bt
0,00 m ²	Wand 1 Ausfachung	0	27	0	0	0,00	-0,02
0,00 m ²	Wand 4 Ausfachung	0	27	0	0	0,00	-0,02
0,00 m ²	Wand 2 Ausfachung	0	27	0	0	0,00	-0,02
0,00 m ²	Ersatz für Treppe	0	334	0	0	0,00	0,90
0,00 m ²	Wand 3 Ausfachung	0	27	0	0	0,00	-0,02
4,12 m ²	Wand 3 Rahmen	207	50	2.458	239	0,64	0,05
4,12 m ²	Wand 4 Rahmen	207	50	2.458	239	0,64	0,05
5,57 m ²	Wand 1 Rahmen	279	50	3.324	324	0,86	0,05
5,57 m ²	Wand 2 Rahmen	279	50	3.324	324	0,86	0,05
15,12 m ²	Decke Rohbau	607	40	7.218	703	1,87	0,02
17,30 m ²	Boden_Rohbau	694	40	8.258	804	2,14	0,02
51,80 m²	Summe			27.039	2.634	7,00	



Trasportwege

Summe (100,0% aller Materialien mit bekannter Masse berücksichtigt)

PENRT	GWP-total	AP
MJ	kg CO ₂ equ.	kg SO ₂ equ.
231	15,1	0,0727



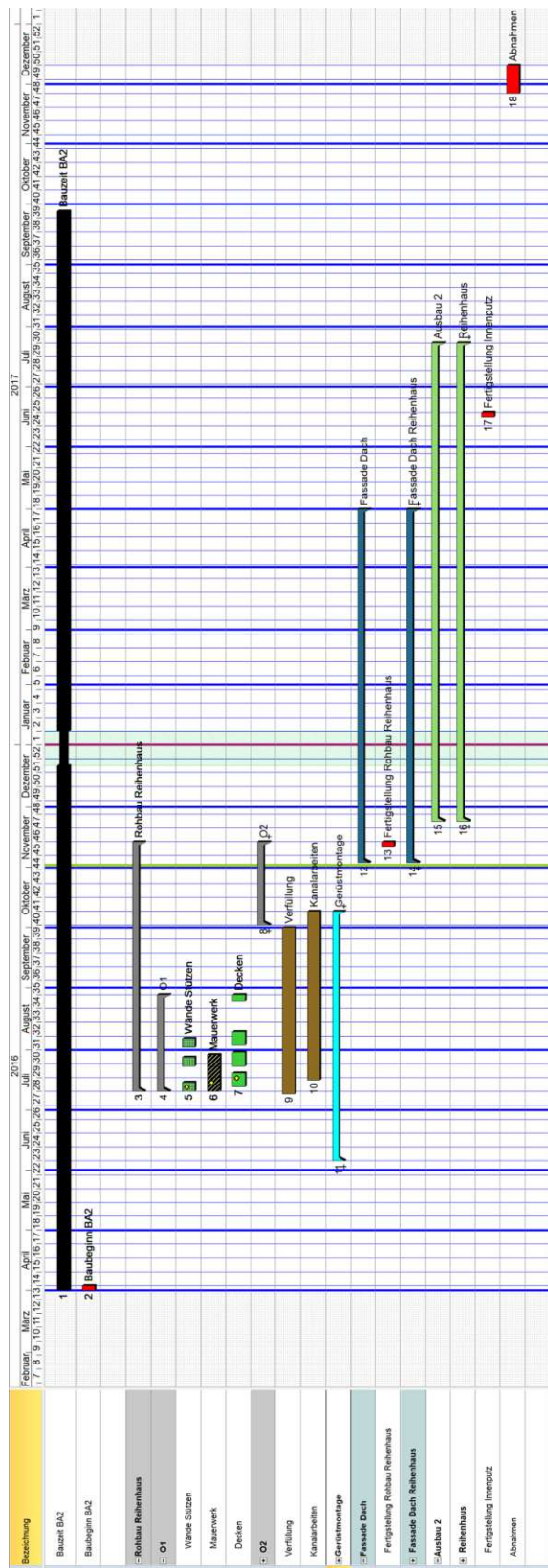
Entsorgung

Summe (100,0% aller Materialien mit bekannter Masse berücksichtigt)

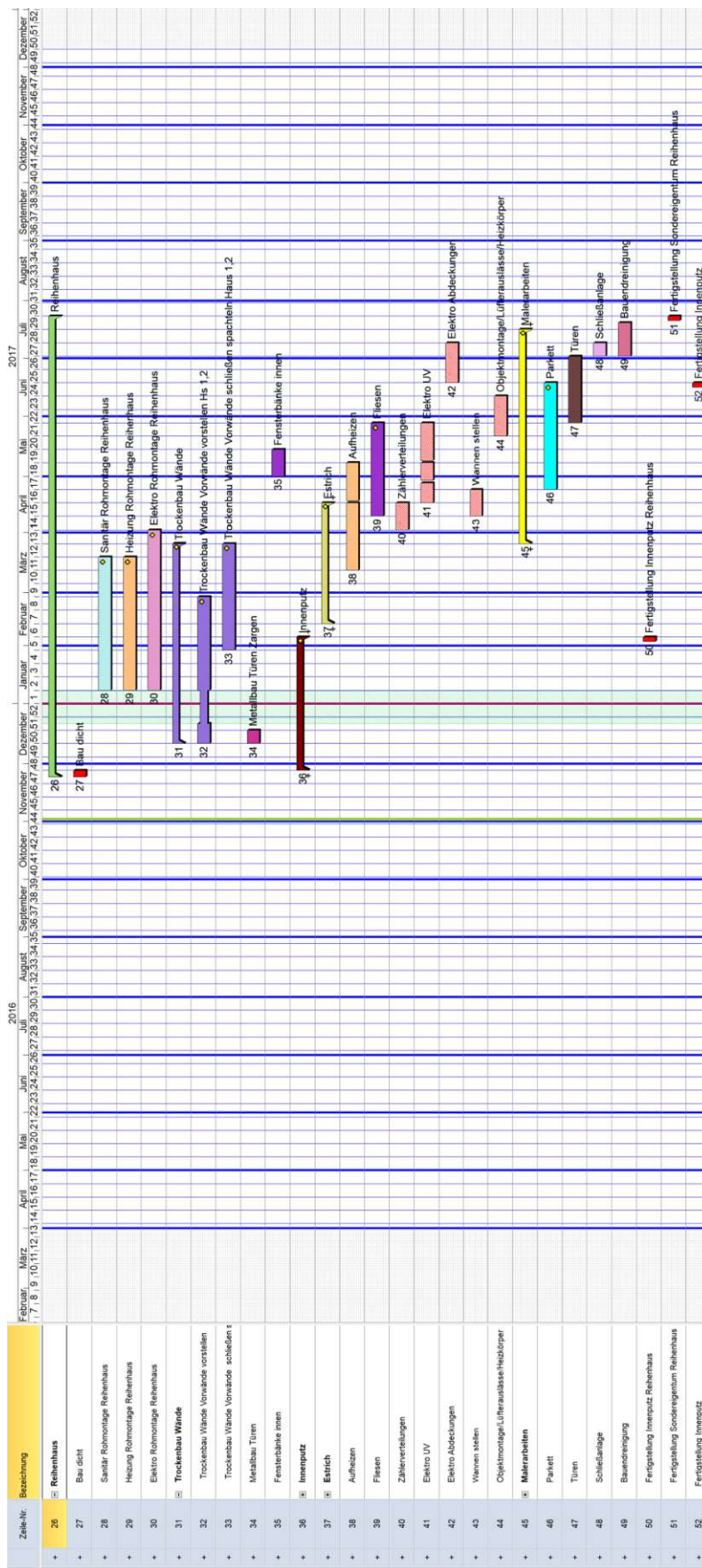
PENRT	GWP-total	AP
MJ	kg CO ₂ equ.	kg SO ₂ equ.
5.437	276	1,70

Anhang K Phasenpläne des konventionellen Baus

Phasenplan Gesamtübersicht



Phasenplan Innenausbau



Anhang M Kennwerte einer PV-Anlage für die Modulbauhalle

PVGIS-5 estimates of solar electricity generation:

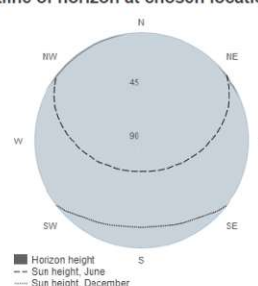
Provided inputs:

Latitude/Longitude: 49.284,8.515
Horizon: Calculated
Database used: PVGIS-SARAH2
PV technology: Crystalline silicon
PV installed: 290 kWp
System loss: 14 %

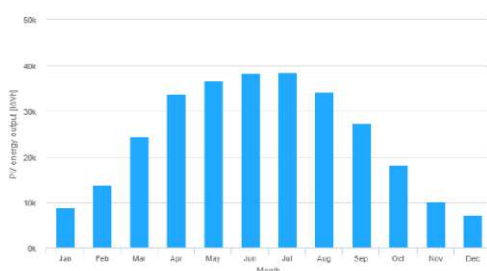
Simulation outputs

Slope angle: 15 °
Azimuth angle: 0 °
Yearly PV energy production: 292046,94 kWh
Yearly in-plane irradiation: 1331,38 kWh/m²
Year-to-year variability: 14068,18 kWh
Changes in output due to:
Angle of incidence: -3,48 %
Spectral effects: 1,53 %
Temperature and low irradiance: -10,25 %
Total loss: -24,36 %

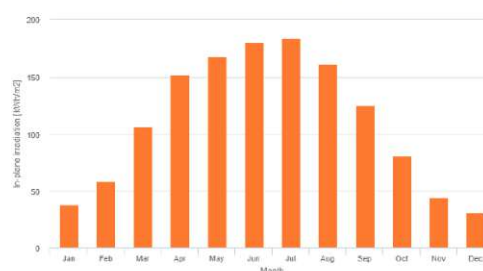
Outline of horizon at chosen location:



Monthly energy output from fix-angle PV system:



Monthly in-plane irradiation for fixed-angle:



(European Commission, 2023)

Anhang N Materialliste Modulbau

Modultyp 1

Material	Masse kg	Masse- anteil	Kumulierter Anteil	Baustoff-ID	Dichte kg/m ³	λ-Wert W/m ² K	PENRT MJ/FE	GWP-total kg CO ₂ equ./FE	AP kg SO ₂ equ./FE	FE
Normalbeton mit Bewehrung 2 % (2400 kg/m ³)	18.948	100,0%	100,0%	2142714828	2.400	2,500	1,66	0,161	0,000429	kg

Modultyp 2

Material	Masse kg	Masse- anteil	Kumulierter Anteil	Baustoff-ID	Dichte kg/m ³	λ-Wert W/m ² K	PENRT MJ/FE	GWP-total kg CO ₂ equ./FE	AP kg SO ₂ equ./FE	FE
Normalbeton mit Bewehrung 2 % (2400 kg/m ³)	20.217	100,0%	100,0%	2142714828	2.400	2,500	1,66	0,161	0,000429	kg

Modultyp 3

Material	Masse kg	Masse- anteil	Kumulierter Anteil	Baustoff-ID	Dichte kg/m ³	λ-Wert W/m ² K	PENRT MJ/FE	GWP-total kg CO ₂ equ./FE	AP kg SO ₂ equ./FE	FE
Normalbeton mit Bewehrung 2 % (2400 kg/m ³)	17.257	100,0%	100,0%	2142714828	2.400	2,500	1,66	0,161	0,000429	kg

Modultyp 4a

Material	Masse kg	Masse- anteil	Kumulierter Anteil	Baustoff-ID	Dichte kg/m ³	λ-Wert W/m ² K	PENRT MJ/FE	GWP-total kg CO ₂ equ./FE	AP kg SO ₂ equ./FE	FE
Normalbeton mit Bewehrung 2 % (2400 kg/m ³)	21.808	100,0%	100,0%	2142714828	2.400	2,500	1,66	0,161	0,000429	kg

Modultyp 4b

Material	Masse kg	Masse- anteil	Kumulierter Anteil	Baustoff-ID	Dichte kg/m ³	λ-Wert W/m ² K	PENRT MJ/FE	GWP-total kg CO ₂ equ./FE	AP kg SO ₂ equ./FE	FE
Normalbeton mit Bewehrung 2 % (2400 kg/m ³)	18.952	100,0%	100,0%	2142714828	2.400	2,500	1,66	0,161	0,000429	kg

Anhang O Preisspiegel – Musterbeispiele aus einem anderen Projekt

Trockenbau



Projekt: 7-403-7050 Masterarbeit
 LV: 463900 Trockenbauarbeiten
 *** Preisspiegel: Alle Positionsarten ***
 Währung: EUR

Berechnungsgrundlage: VA-Mengen

	Idealpreis	B-Nr.: 1	B-Nr.: 2	B-Nr.: 4	B-Nr.: 3	Mittelpreis			
463900	Trockenbauarbeiten								
39.	Trockenbauarbeiten								
39.1.	Trockenbau Wände								
39.1.10.	Metallständerwand-Einfachständerwerk W112, d=100 mm, MW 40 mm, Q2							5.135,00	m ²
Einheitspreis	47,30	51,69	47,30	48,00	52,30	49,82			
Gesamtbetrag	242.885,50	265.428,15	242.885,50	246.480,00	268.560,50	255.838,54			
Prozent/Rang	100,0	109,3/3	100,0/1	101,5/2	110,6/4	105,3			
39.1.20.	Metallständerwand-Einfachständerwerk W112, d=125 mm, MW 60 mm, Q2							200,00	m ²
*** Bedarfsposition ohne GB									
Einheitspreis	48,70	53,27	49,30	48,70	53,80	51,27			
Gesamtbetrag	(9.740,00)	(10.654,00)	(9.860,00)	(9.740,00)	(10.760,00)	(10.253,50)			
Prozent/Rang	100,0	109,4/3	101,2/2	100,0/1	110,5/4	105,3			
39.1.30.	Vorsatzschale gerade od. L-U-förmig W626, raumhoch, MW 40 mm, Q2							1.760,00	m ²
Einheitspreis	38,30	40,50	38,30	42,50	42,30	40,90			
Gesamtbetrag	67.408,00	71.280,00	67.408,00	74.800,00	74.448,00	71.984,00			
Prozent/Rang	100,0	105,7/2	100,0/1	111,0/4	110,4/3	106,8			
39.1.40.	Zulage an Schachtwänden Schallschutz zweilagig beplankt mit Silentboard-Platte							10,00	m ²
Einheitspreis	32,60	33,60	45,90	47,00	32,60	39,78			
Gesamtbetrag	326,00	336,00	459,00	470,00	326,00	397,75			
Prozent/Rang	100,0	103,1/2	140,8/3	144,2/4	100,0/1	122,0			
39.1.50.	Installationswand W116, d=250-350 mm, MW 40 mm, Q265,000								m ²
Einheitspreis	58,00	63,24	58,00	62,00	67,50	62,69			
Gesamtbetrag	3.770,00	4.110,60	3.770,00	4.030,00	4.387,50	4.074,53			
Prozent/Rang	100,0	109,0/3	100,0/1	106,9/2	116,4/4	108,1			

05.09.2023

Seite: 1 von 14

Innenputz



Projekt: 7-403-7050 Masterarbeit
 LV: 462310 Innenputzarbeiten
 *** Preisspiegel: Alle Positionsarten ***
 Währung: EUR

Berechnungsgrundlage: VA-Mengen

	Idealpreis	B-Nr.: 1	B-Nr.: 3	B-Nr.: 2	B-Nr.: 4	Mittelpreis			
23.2.80.	TRH - Putz auf Treppenlaufuntersichten							245,00	m ²
*** Bedarfsposition ohne GB									
Einheitspreis	7,28	7,28	16,50	19,00	-20,00	15,70			
Gesamtbetrag	(1.783,60)	(1.783,60)	(4.042,50)	(4.655,00)	(4.900,00)	(3.845,28)			
Prozent/Rang	100,0	100,0/1	226,7/2	261,0/3	274,7/4	215,6			
			Ausreißer	Ausreißer	Ausreißer				
23.2.90.	TRH - Putz auf Treppenlaufwangen							205,00	m
*** Bedarfsposition ohne GB									
Einheitspreis	4,85	4,85	-13,20	8,00	-24,00	12,51			
Gesamtbetrag	(994,25)	(994,25)	(2.706,00)	(1.640,00)	(4.920,00)	(2.565,08)			
Prozent/Rang	100,0	100,0/1	272,2/3	165,0/2	494,9/4	258,0			
			Ausreißer	Ausreißer	Ausreißer				
23.2.100.	Putzabschlußprofile als Begrenzung geputzter Flächen							730,000	m
Einheitspreis	3,78	3,78	5,50	5,90	8,00	5,80			
Gesamtbetrag	2.759,40	2.759,40	4.015,00	4.307,00	5.840,00	4.230,35			
Prozent/Rang	100,0	100,0/1	145,5/2	156,1/3	211,6/4	153,3			
				Ausreißer	Ausreißer				
23.2.110.	Whg. Vollflächenspachtelung von Betondecken							6.555,000	m ²
Einheitspreis	6,60	6,60	8,80	10,00	13,00	9,60			
Gesamtbetrag	43.263,00	43.263,00	57.684,00	65.550,00	85.215,00	62.928,00			
Prozent/Rang	100,0	100,0/1	133,3/2	151,5/3	197,0/4	145,5			
				Ausreißer	Ausreißer				
23.2.120.	Whg. Fugen spachteln (Fingernbetondecke)							2.500,000	m
*** Bedarfsposition ohne GB									
Einheitspreis	6,00	6,16	6,60	6,00	8,00	6,69			
Gesamtbetrag	(15.000,00)	(15.400,00)	(16.500,00)	(15.000,00)	(20.000,00)	(16.725,00)			
Prozent/Rang	100,0	102,7/2	110,0/3	100,0/1	133,3/4	111,5			

05.09.2023

Seite: 6 von 9

Malerarbeiten



Projekt: 7-403-7050 Masterarbeit
 .V: 463400 Malerarbeiten

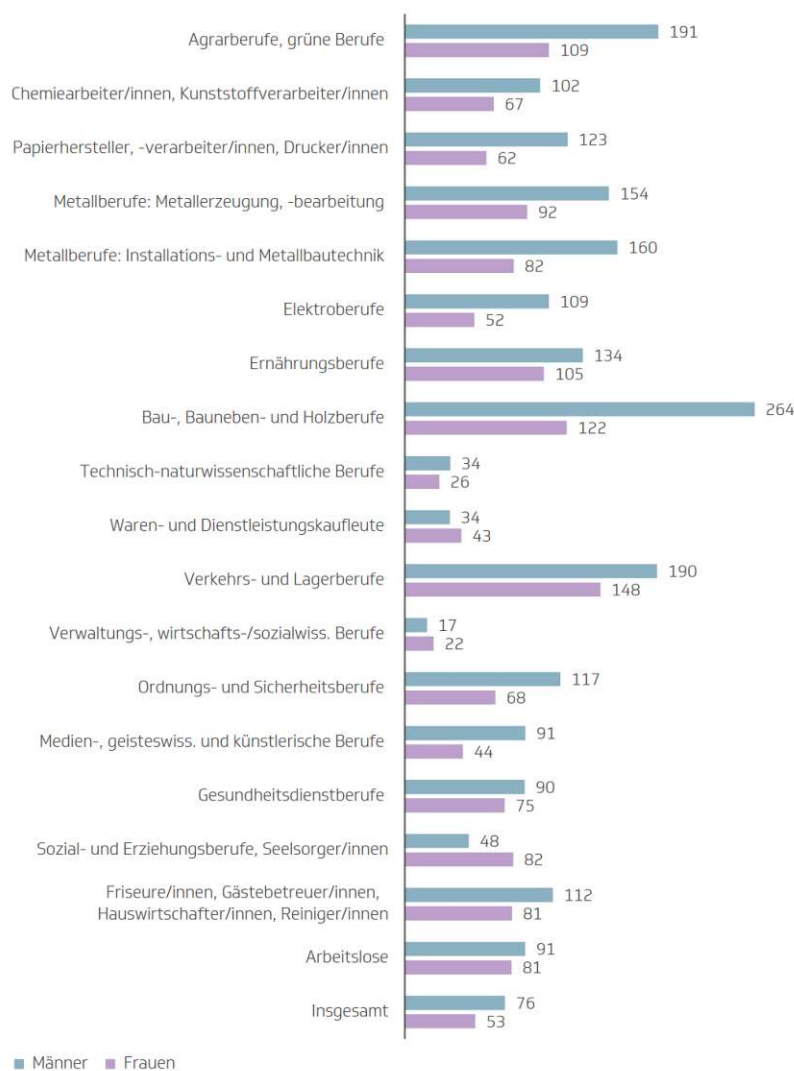
Währung: EUR

*** Preisspiegel: Alle Positionsarten ***

Berechnungsgrundlage: VA-Mengen

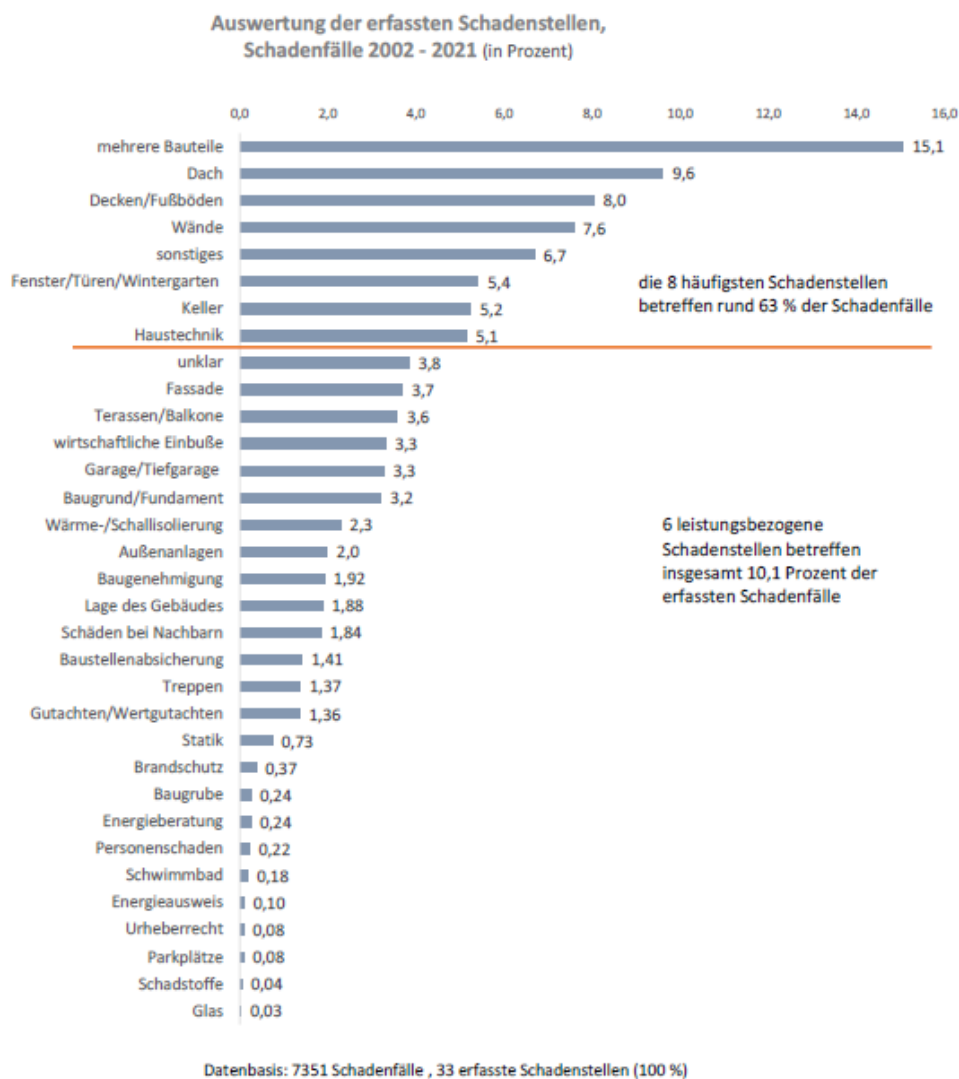
	Idealpreis	B-Nr.: 5	B-Nr.: 8	B-Nr.: 2	B-Nr.: 13	B-Nr.: 3	B-Nr.: 4	B-Nr.: 1	Mittelpreis
34.3.40. Spachtelung Halbfertigteildecken Wohnungen 6.900,000 m²									
Einheitspreis	8,00	8,80	9,95	11,00	8,00	10,80	9,80	14,00	12,00
Gesamtbetrag	55.200,00	60.720,00	61.755,00	75.900,00	55.200,00	74.520,00	67.620,00	96.600,00	82.771,25
Prozent/Rang	100,0	110,0/ 2	111,9/ 3	137,5/ 7	100,0/ 1	135,0/ 6	122,5/ 4	175,0/ 10 Ausreißer	150,0
34.3.50. Wng Zulage für Kalkzementputz Oberflächenqualität Q3465,000 m²									
Einheitspreis	2,00	12,00	9,15	16,50	2,00	12,80	13,00	13,00	13,27
Gesamtbetrag	930,00	5.580,00	4.254,75	7.672,50	930,00	5.952,00	6.045,00	6.045,00	6.170,94
Prozent/Rang	100,0	600,0/ 4 Ausreißer	457,5/ 2 Ausreißer	825,0/ 10 Ausreißer	100,0/ 1	640,0/ 5 Ausreißer	650,0/ 6 Ausreißer	650,0/ 6 Ausreißer	663,5
34.3.60. Zulage für Trockenbauwandern Bädern Oberflächenqualität Q3 2.035,380m²									
Einheitspreis	5,00	5,50	6,85	6,25	5,00	5,80	7,80	8,60	8,43
Gesamtbetrag	10.176,90	11.194,59	13.942,35	12.721,13	10.176,90	11.805,20	15.875,96	17.504,27	17.148,08
Prozent/Rang	100,0	110,0/ 2	137,0/ 5	125,0/ 4	100,0/ 1	116,0/ 3	156,0/ 7 Ausreißer	172,0/ 6 Ausreißer	168,5
34.3.70. Zulage für Trockenbauwand Oberflächenqualität Q37.965,000 m² *** Bedarfsposition ohne GB									
Einheitspreis	4,50	4,50	6,85	6,80	5,00	5,80	7,80	8,60	8,10
Gesamtbetrag	(35.842,50)	(35.842,50)	(54.560,25)	(54.162,00)	(39.825,00)	(46.197,00)	(62.127,00)	(68.499,00)	(64.483,31)
Prozent/Rang	100,0	100,0/ 1	152,2/ 6 Ausreißer	151,1/ 5 Ausreißer	111,1/ 2	128,9/ 3	173,3/ 8 Ausreißer	191,1/ 9 Ausreißer	179,9
34.3. TRH und OGs Spachtelarbeiten Q3									
Summe	119.056,90	130.457,59	158.036,60	174.513,63	134.533,90	156.334,20	177.082,96	215.439,27	206.995,22
Prozent/Rang	91,3	100,0/ 1	121,1/ 4	133,8/ 5	103,1/ 2	119,8/ 3	135,7/ 6	165,1/ 9 Ausreißer	158,7
34.4. Wand- und Deckenanstrich Treppenhaus									

Anhang P Ausfalltage wegen Arbeitsunfällen je 100 Versicherungsjahre nach Berufsfeldern im Jahr 2022



Quelle: (Bessel, 2023)

Anhang Q Erfasste Bauschadenstellen der AIA - 2002 – 2021



(Tebben et al., 2022)