

**BUILDING  
LAB**

# INNOVATION

Bayerischer Bauindustrieverband e.V.

**BUILDING LAB**

Ökologische Optimierung und  
Kreislauffähigkeit

## DER BAYERISCHE BAUINDUSTRIEVERBAND E.V.

- Wirtschaftsverband
- Tarifpartner
- Bildungsträger
- Informationen für den Bau

---

Der Bayerische Bauindustrieverband ist mit all seinen Leistungen seinen Mitgliedern verpflichtet. Dazu gehören eine umfassende Information und Beratung der Mitgliedsfirmen in politischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Fragen, die Sicherung branchenspezifischer Aus- und Weiterbildung, die Verhandlung von Tarifverträgen, die Schaffung einer Plattform zum Erfahrungsaustausch zwischen den Unternehmen der Bauindustrie und die Förderung von Innovationen in Forschung und Entwicklung.

---

# **INNOVATION**

Bayerischer Bauindustrieverband e.V.

## **BUILDING LAB**

#### Abkürzungsverzeichnis und verwendete Einheiten

|                      |  |
|----------------------|--|
| a                    | Jahr   |
| BauKo                | Baukonstruktion  |
| BBIV                 | Bayerischer Bauindustrieverband e.V.                               |
| BIM                  | Building Information Modelling                                     |
| CEM III              | Hochofenzement   |
| CO <sub>2</sub> -eq. | Kohlendioxid Äquivalente   |
| DGNB                 | Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen                       |
| €                    | Euro   |
| ENPB                 | Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen |
| IRE-BS-Institut      | International Real Estate Business School                          |
| GWP                  | Global Warming Potential   |
| kg                   | Kilogramm  |
| km                   | Kilometer  |
| kWh                  | Kilowattstunde   |
| LCA                  | Life Cycle Assessment/ Lebenszyklusanalyse/ Ökobilanz              |
| m <sup>2</sup> NRF   | Quadratmeter Nettoraumfläche                                       |
| OTH                  | Ostbayerische Technische Hochschule                                |
| PV-Module            | Photovoltaikmodule   |
| t                    | Tonne  |
| THG                  | Treibhausgas   |
| TUM/TU München       | Technische Universität München                                     |
| UMI                  | Urban Mining Index   |

# Inhalt

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Inhalt</b> .....   | <b>5</b>  |
| <b>Einführung</b> .....   | <b>6</b>  |
| <b>Projekt und Gebäudevorstellung</b> .....                           | <b>7</b>  |
| 2.1. Entstehung und Nutzung des BUILDING LAB .....                    | 7         |
| 2.2. Ziele und Vorgehen im Forschungsprojekt .....                    | 7         |
| 2.3. Beschreibung des Gebäudes .....                                  | 8         |
| <b>Berechnungsmethoden</b> .....                                      | <b>9</b>  |
| 3.1. Lebenszyklusanalyse .....  | 9         |
| 3.2. Thermische Gebäudesimulation .....                               | 11        |
| 3.3. Parametrische Gebäudesimulation .....                            | 11        |
| 3.4. Bewertung der Kreislauffähigkeit mit dem Urban Mining Index..... | 11        |
| <b>Ökologische Optimierung des Gebäudes</b> .....                     | <b>13</b> |
| 4.1. Untersuchungsrahmen .....  | 13        |
| 4.2. Lebenszyklusanalyse des bestehenden BUILDING LAB .....           | 13        |
| 4.3. Untersuchungsvarianten .....                                     | 14        |
| 4.3.1. Optimierung der oberirdischen Baukonstruktion .....            | 14        |
| 4.3.2. Optimierung der unterirdischen Baukonstruktion .....           | 19        |
| 4.3.3. Erneuerbare Energien im Betrieb .....                          | 20        |
| 4.3.4. Treibhausgasemissionen der Varianten im Vergleich .....        | 22        |
| <b>Kreislauffähigkeit des Gebäudes</b> .....                          | <b>24</b> |
| <b>Empfehlungen und Handlungshinweise</b> .....                       | <b>25</b> |
| <b>Zusammenfassung und Fazit</b> .....                                | <b>27</b> |
| <b>Tabellenverzeichnis</b> .....                                      | <b>29</b> |
| <b>Abbildungsverzeichnis</b> .....                                    | <b>29</b> |

# I. Einführung

In einer Zeit, in der die Welt mit den drängenden Herausforderungen des Klimawandels und des Ressourcenverbrauchs konfrontiert ist, gewinnt die Rolle des Bauwesens als Akteur im Streben nach einer nachhaltigen Zukunft zunehmend an Bedeutung. Die Notwendigkeit, effektive Lösungen für Umweltprobleme zu finden, hat dazu geführt, dass das Bauwesen als eine entscheidende Branche betrachtet wird, die nicht nur die Art und Weise, wie wir bauen, sondern auch die Auswirkungen unserer gebauten Umwelt auf unsere Biosphäre grundlegend verändern kann. Insbesondere zeigt sich, dass die Integration von Nachhaltigkeitsaspekten bereits in der Planungsphase von Bauprojekten nicht nur ökologische, sondern auch ökonomische Vorteile bietet. Die Umsetzung von Nachhaltigkeitsstrategien verspricht nicht nur eine Senkung klimaschädlicher Gase sowie eine Reduktion des Energiebedarfs, sondern auch eine effizientere Ressourcennutzung. Dies führt zu einer langfristig positiven Entwicklung für Mensch und Umwelt. In diesem Kontext wird die Schlüsselrolle des Bauwesens bei der Gestaltung einer nachhaltigen Zukunft deutlich, indem es nicht nur als Verursacher von Umweltauswirkungen betrachtet wird, sondern vielmehr als Lösungsanbieter für die globalen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts.

Auf dem TechCampus Regensburg entstand im Jahr 2022 mit dem BUILDING LAB ein wegweisendes Bildungs- und Innovationszentrum der Bayerischen Bauindustrie. Dieses Projekt verbindet Tradition und Moderne, indem es als Brücke zwischen Wissenschaft und Bauwirtschaft dient. Das BUILDING LAB ist nicht nur eine architektonische Bereicherung, sondern auch eine Demonstrations- und Entwicklungsumgebung für moderne Bautechnologien. Es fungiert als Bildungsstätte für die Fachleute von morgen und übermorgen, während es gleichzeitig als zentrale Anlaufstelle für alle Fragen rund um die Digitalisierung der Wertschöpfungskette im Bauwesen fungiert. Das Innovationszentrum schafft damit nicht nur bauliche Strukturen, sondern unterstützt auch die digitale Zukunft des Bauens in Bayern.

Trotz der innovativen Umsetzung des Gebäudes stellt sich die Frage: Inwieweit erfüllt das Gebäude die Anforderungen an die Nachhaltigkeit? Diese und weitere Fragen wurden im Rahmen des hier vorgestellten Forschungsprojekts BUILDING LAB beantwortet. Durchgeführt wurde die Forschungsarbeit vom Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen (ENPB) der Technischen Universität München (TUM). Das Hauptziel des Projekts war die umfassende Bewertung der Emissionen des bestehenden BUILDING LAB Gebäudes und die Entwicklung einer ökologisch verbesserten Variante. Zudem wurde das Thema der Kreislauffähigkeit adressiert.

Die erzielten Ergebnisse wurden durch regelmäßige Workshops mit den Akteuren aus der Praxis, darunter Architekturschaffenden, Bauverantwortlichen und Bauausführenden, erarbeitet. Diese Zusammenarbeit ermöglichte die Generierung anwendungsfreundlicher Ergebnisse, die wegweisende Impulse für zukünftige Bauprojekte liefern und so einen bedeutenden Beitrag zur Entwicklung nachhaltiger Bauweisen in Bayern leisten.

# II. Projekt und Gebäudevorstellung

## 2.1. Entstehung und Nutzung des BUILDING LAB

Im Jahr 2019 wurde der Architekturentwurf für das BUILDING LAB auf dem TechCampus in Regensburg im Rahmen eines studentischen Wettbewerbs realisiert, der durch den Bayerischen Bauindustrieverband e.V. (BBIV) unterstützt wurde. An dem Wettbewerb waren sowohl Studierende als auch Lehrbeauftragte der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg (OTH), des Lehrstuhls für Immobilienmanagement der International Real Estate Business School (IREBS) der Universität Regensburg sowie des Lehrstuhls für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen (ENPB) der Technischen Universität München (TUM) beteiligt. Nach Abschluss des studentischen Wettbewerbs wurde der Entwurf vom Architekturbüro Lang Hugger Rampp weiterentwickelt und von dem Bauunternehmen Gebr. Donhauser umgesetzt.

Das BUILDING LAB, dessen Fertigstellung im November 2022 erfolgt ist, schafft Raum für Begegnungen zwischen Vertretenden aus Handwerk, Industrie, Wirtschaft, Wissenschaft und Verwaltung. Als Hauptmieter fungiert die Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) und nutzt Labore sowie Seminarräume für den Fachbereich Digitales Bauen mit einem Schwerpunkt auf Building Information Modelling (BIM) und Robotik. Zusätzlich bietet, gemäß den Vorgaben der Stadt Regensburg, ein Drittel der Fläche erschwinglichen Wohnraum für Studierende und Forschende.

## 2.2. Ziele und Vorgehen im Forschungsprojekt

Das Ziel des Forschungsprojekts bestand darin, anhand der Bauzustandsdaten des BUILDING LAB zu prüfen, ob und wie ein Gebäude mit positiven Umweltauswirkungen entwickelt werden kann. Hierzu zählte ein minimaler CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Gebäudekonstruktion während der Grauen Lebenszyklusphasen Herstellung (A1-A3), Austausch (B4) als Teil der Nutzungsphase und End of Life (C3-C4), die Reduktion des Betriebsenergiebedarfs sowie der umfassende Einsatz erneuerbarer Energien zur Deckung des Betriebsenergiebedarfs.

Im ersten Schritt erfolgte ein Vergleich zwischen dem Neubau im Ist-Zustand und alternativen baukonstruktiven Ausführungsvarianten. Hierbei wurde die umweltbezogene Qualität des Gebäudes bewertet. Dies diente der Identifizierung und Optimierung der Emissionen in der Baukonstruktion sowie im Betrieb des Gebäudes über seinen Lebenszyklus. Der Fokus der alternativen Konstruktionsvarianten lag auf der Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen und dem Einsatz regenerativer Energiesysteme. Die Bewertung wurde anhand anerkannter Berechnungsmethoden durchgeführt.

Weiterhin wurde die Thematik der Kreislaufwirtschaft adressiert. Hierbei wurde die Struktur des Gebäudes hinsichtlich seiner Kreislauffähigkeit untersucht.

Die Erkenntnisse der Untersuchungen wurden in verwertbaren Handlungshinweisen für zukünftige Projekte zusammengefasst.

### 2.3. Beschreibung des Gebäudes

Das Gebäude erstreckt sich über fünf Etagen (Untergeschoss, Erdgeschoss und drei Obergeschosse) und verfügt über eine Nettoraumfläche von 2.663 m<sup>2</sup>. Ein zentrales Atrium in der Mitte des Gebäudes teilt es in einen Süd- und einen Nordabschnitt.

Hinsichtlich der Bauweise handelt es sich größtenteils um eine Stahlbeton-Massivbauweise. Die Gründung des Gebäudes besteht aus Punkt- und Streifenfundamenten, die aus Stahlbeton gefertigt sind. Diese Fundamente werden durch ein Raster aus gusseisernen Pfählen mit Betonverfüllung stabilisiert. Die Elemente Außenwände, Stützen, Decken und Dach bestehen überwiegend aus Stahlbeton. Eine Ausnahme bildet die tragende Innenwand aus Ziegelmauerwerk, die an das Atrium angrenzt. Die übrigen Innenwände sind nicht tragend und bestehen aus Gipskarton. Die Gebäudehülle setzt sich auf der Ost-, West- und Südseite aus Stahlbeton-Fertigteilmwänden mit innenliegender Dämmung (Sandwichwände) zusammen. Die Nordseite ist als Pfosten-Riegel-Fassade aus Aluminium ausgeführt, welche einen außenliegenden Sonnenschutz in Form von Aluminiumlamellen aufweist. Die Decken (Hohlraum- und Klimadecken) sind als Spannbetondecken ausgeführt. Das Flachdach ist extensiv begrünt ausgeführt.

Das Energiekonzept sieht die Nutzung eines Gasbrennwertkessels sowie einer Luft-Wasser-Wärmepumpe zur thermischen Konditionierung des Gebäudes vor. Die Übergabe der Wärme erfolgt durch Fußbodenheizungen (in der Hohlraumdecke), Betonkernaktivierung (in der Klimadecke), Flachheizkörper und Badheizkörper. Zur Kühlung des Gebäudes werden Klimaanlage eingesetzt. Die Luftzufuhr wird durch drei Lüftungsanlagen unterstützt. Im gesamten Gebäude sind Elektrokabel mit einer Länge von etwa 27 km und Datenkabel mit einer Länge von etwa 12 km verbaut.

Die Energieversorgung erfolgt demnach mit Gas und Strom.



Abbildung 1: Das BUILDING LAB in Regensburg

# III. Berechnungsmethoden

Im Fokus der Berechnungen zur Bewertung der ökologischen Qualität des Gebäudes standen die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen). Diese wurden mit Hilfe der Lebenszyklusanalyse bestimmt. Die Emissionen im Betrieb wurden über den Energiebedarf mittels thermischer Gebäudesimulation ermittelt. Zur ökologischen Optimierung des Gebäudes über seinen gesamten Lebenszyklus wurden parametrische Simulationen durchgeführt. Die Bewertung der Kreislauffähigkeit des Gebäudes erfolgte mit dem Urban Mining Index.

## 3.1. Lebenszyklusanalyse

Eine Lebenszyklusanalyse, auch Ökobilanz oder LCA (Life Cycle Assessment), ist ein etabliertes Verfahren, das die Auswirkungen eines Produktes auf die Umwelt ermittelt. Das Verfahren quantifiziert die Input- und Outputflüsse eines Produktsystems im Verlauf seines gesamten Lebensweges. Daraus lassen sich die ökologische Qualität eines Produkts sowie dessen Optimierungsmaßnahmen ableiten. Bei einem Gebäude handelt es sich um das Zusammenfügen verschiedener Bauprodukte. Damit errechnet sich die Ökobilanz eines Gebäudes durch das Zusammenfügen der jeweiligen Bauproduktökobilanzen.

Das Berechnungsverfahren für Gebäude wird unter anderem durch folgende Normen geregelt:

- DIN EN ISO 14040: 2021-02 Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020
- DIN EN ISO 14044: 2014-04 Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020
- DIN EN 15978: 2012-10 Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode; Deutsche Fassung EN 15978:2011
- DIN EN 15804: 2022-03 Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021

Der Lebenszyklus eines Gebäudes wird durch die Phasen Herstellung, (Errichtung), Nutzung und Entsorgung charakterisiert (s. Abbildung 2). Darüber hinaus kann das Potential für Wiederverwertung, Rückgewinnung und Recycling berücksichtigt werden.

Die Umweltwirkung Treibhauspotenzial oder Global Warming Potential (GWP) beschreibt die Menge an emittierten Treibhausgasen und wird in CO<sub>2</sub>-eq. ausgedrückt. Dies kommt durch die Vereinfachung und die Zusammenführung verschiedener, für das Klima schädlicher Gase auf eine Einheit zustande.

Die Treibhausgase, die in den Phasen Herstellung, Errichtung, Entsorgung entstehen, werden als grauen Emissionen bezeichnet. Zur Bestimmung der grauen Emissionen wird eine Sachbilanz aller verwendeter Materialien erstellt und mit den jeweiligen Kennwerten des Treibhauspotenzials verknüpft. Die Kennwerte können der öffentlich zugänglichen Datenbank ÖKOBAUDAT entnommen werden. Die Quantifizierung der Treibhausgase im Betrieb (LCA-Phase Nutzung) erfolgt durch thermische Gebäudesimulationen.

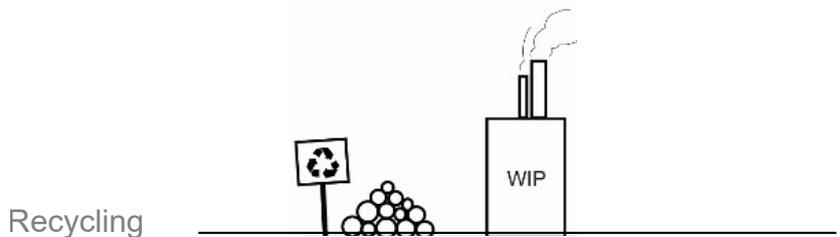
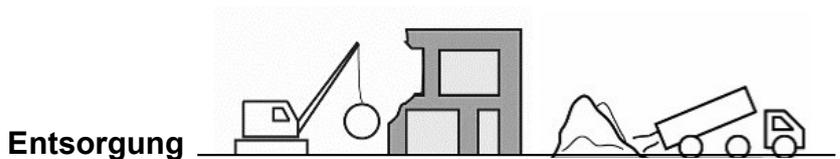
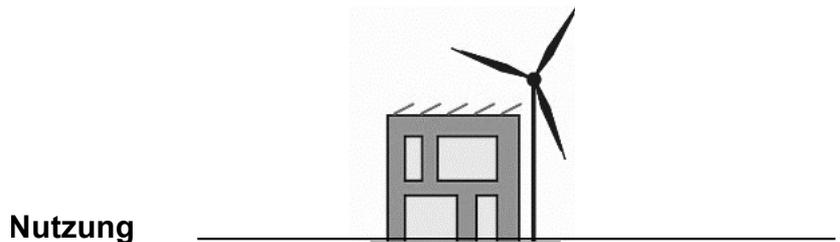
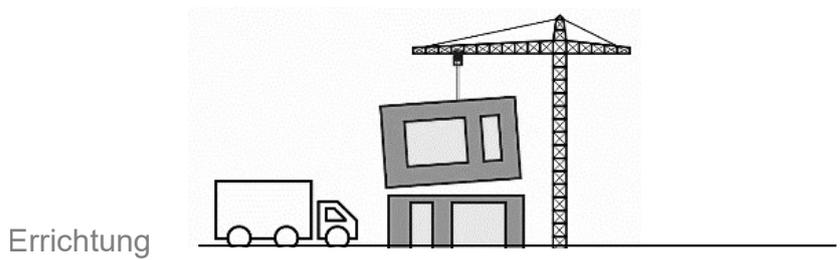


Abbildung 2: Lebenszyklus eines Gebäudes

### 3.2. Thermische Gebäudesimulation

Die dynamische Gebäudesimulation ist eine datenintensive, elektronische, thermodynamisch-mathematische Berechnung des Energieverhaltens von Gebäuden. Die Gebäudesimulation wird zur Berechnung des Energiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung und Warmwasser verwendet. Der Heizbedarf und der Kühlbedarf ergeben sich aus der Notwendigkeit einer annähernd konstanten Innentemperatur. Durch die Gebäudehülle und die Gebäudetechnik können die Schwankungen der Außentemperatur nur bedingt auf die Innentemperatur übertragen werden.

Die Methode der dynamischen Gebäudesimulation besteht aus vier Schritten: (1.) geometrische Modellierung des Gebäudes in Form einer vereinfachten Kubatur und Einteilung in Simulationszonen; (2.) Dateneingabe von nicht-geometrischen Randbedingungen und Gebäudeparametern; (3.) Simulation; (4.) Auswertung der Ergebnisse.

Im Vergleich zur statischen Gebäudesimulation liefert die dynamische Gebäudesimulation genauere Ergebnisse.

Die betriebsbedingten Treibhausgase leiten sich vom Energiebedarf eines Gebäudes und seiner Energiequellen ab.

### 3.3. Parametrische Gebäudesimulation

Üblicherweise werden die grauen und die betriebsbedingten Emissionen separat berechnet. Dies hat jedoch den Nachteil, dass damit lediglich einzelne Phasen des Lebenszyklus eines Gebäudes abgebildet werden. Zudem hat die Baukonstruktion einen Einfluss sowohl auf die grauen Emissionen als auch auf den Energiebedarf des Gebäudes und damit auf die Emissionen in dessen Betrieb. Daher wurde im Rahmen des Forschungsprojekts ein Simulationsmodell aufgebaut, welches gleichzeitig alle Phasen des Lebenszyklus des BUILDING LAB abbildet. Zudem wurde das Modell so entwickelt, dass eine parametrische Simulation möglich ist. Dies bedeutet, dass in einem automatisierten Prozess vordefinierte Parameter variiert werden, um die Auswirkungen auf den Lebenszyklus des Gebäudes zu quantifizieren. Eine jede Variation eines Parameters wird in einer Variante dargestellt.

### 3.4. Bewertung der Kreislauffähigkeit mit dem Urban Mining Index

Der Urban Mining Index (UMI) von Anja Rosen wurde im Jahr 2021 veröffentlicht. Der UMI ist für die Bewertung in der Neubauplanung und der damit einhergehenden Möglichkeit der Optimierung der Baukonstruktion hinsichtlich ihrer Zirkularität ausgerichtet. Eine Bewertung bereits realisierter Gebäude ist möglich, wobei das Optimierungspotenzial in der Entwurfsphase liegt.

Die Bewertung der Kreislauffähigkeit erfolgt vom Material über die Bauteile bis hin zum Gebäude. Für die Betrachtung der Materialien im UMI gilt die Schadstofffreiheit als Kriterium. Hierbei werden die Grenzwerte des Gebäudezertifizierungssystems der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) genutzt.

Das Kreislaufpotenzial der Materialien wird anhand ihrer Herkunft und ihrer potenziellen Nachnutzung gebildet (s. Abbildung 3). Die Herkunft (s. g. Pre-Use Phase) unterscheidet zwischen Wiederverwendung, Recycling und Downcycling. Nachwachsende Rohstoffe werden nach zertifizierten und nicht zertifizierten Rohstoffen differenziert. Auf Gebäudeebene werden Materialien, die in geschlossenen Kreisläufen geführt werden, in der Bewertung doppelt gewichtet.

Die Prognose der Nachnutzung (s. g. Post-Use Phase) beruht auf der Wahrscheinlichkeit des selektiven Rückbaus. Die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus wird durch den Rückbau- bzw. den Demontageaufwand des Gebäudes sowie die Entsorgungskosten bzw. die Verwertungserlöse (Restwert) der Materialien bestimmt.

Die Bewertung auf der Gebäudeebene erfolgt im Urban Mining Indicator. Der Urban Mining Indicator kann einen Höchstwert von 100 % erzielen.

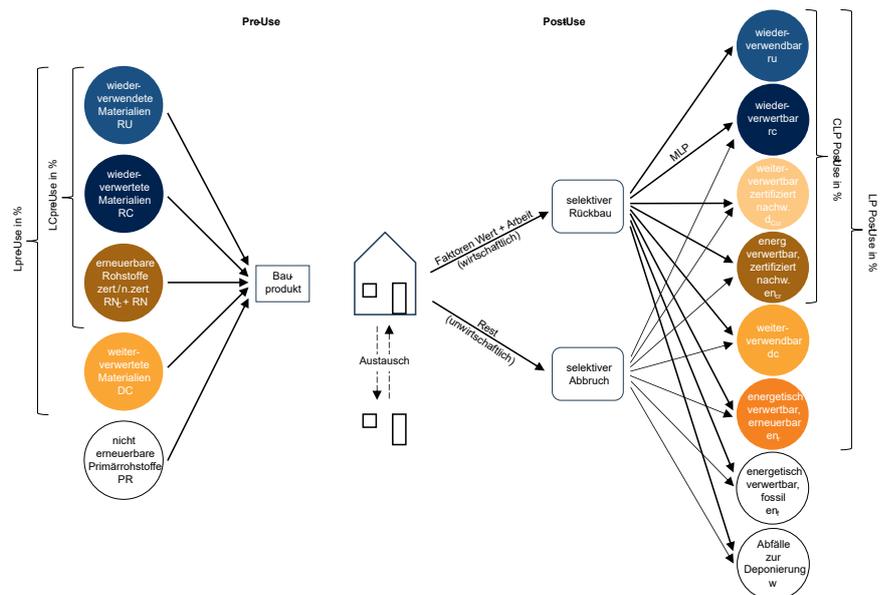


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Urban Mining Index (UMI) von Anja Rosen

# IV. Ökologische Optimierung des Gebäudes

## 4.1. Untersuchungsrahmen

Untersuchungsgegenstand des Forschungsprojekts war das BUILDING LAB in Regensburg. Das Hybridgebäude beherbergt auf einer Nettoraumfläche von 2.663 m<sup>2</sup> die Nutzungen Büro, Labor und Wohnen. Die Lebenszyklusanalyse des Gebäudes wurde mit einer Nutzungsdauer von 50 Jahren bilanziert. Im Fokus der Untersuchungen lag das Treibhauspotenzial. Die Berechnung erfolgte nach der DIN EN ISO 14040/14044 und die ökologischen Kennwerte (generische Daten der Bauprodukte) wurden der ÖKOBAUDAT (Version 15804+A1) entnommen. Es wurden sowohl die grauen Emissionen aus den Phasen Herstellung (A1-A3), Austausch (B4), Abfallbehandlung und Entsorgung (C3-C4) als auch die Emissionen aus dem Energieeinsatz des Gebäudebetriebs (B6) untersucht. Die Phase Errichtung (A4-A5) wurde auf Grund von Datenmangel nicht betrachtet. Die Vorteile und Belastungen durch ein mögliches Recycling (D) wurden nicht untersucht, da sie außerhalb der Systemgrenze (Gebäude) liegen. Die Berechnung der grauen Emissionen schließt die Baukonstruktion und die technische Gebäudeausrüstung ein. Der Energieeinsatz des Gebäudes bildet sich durch die Energieverbraucher Heizung, Warmwasser, Lüftung, Kühlung und Beleuchtung ab.

## 4.2. Lebenszyklusanalyse des bestehenden BUILDING LAB

Das Gebäude verursacht über seine Lebensphasen Herstellung, Nutzung und Entsorgung insgesamt 4.136 t CO<sub>2</sub>-eq. Ein Anteil von 69 % der Gesamtemissionen entfällt auf den Betrieb des Gebäudes. Der Stromverbrauch im Gebäude ist für 83 % der Betriebsemissionen zuständig und basiert auf der Annahme des Verbrauchs des deutschen Strommixes aus dem Jahr 2020. Die Baukonstruktion und die technische Gebäudeausrüstungen tragen mit einem Anteil von 27 % und 4 % der Gesamtemissionen bei. Die Verteilung der grauen Emissionen innerhalb der Baukonstruktion kann Abbildung 4 entnommen werden. Hieraus wird deutlich, dass insbesondere die Außenwände sowie die Decken großen Einfluss auf die grauen Emissionen haben. Dies lässt sich durch den hohen Anteil an Stahlbeton in den beiden Bauteilgruppen sowie die große Menge an Aluminium in den Außenwandaufbauten (Sonnenschutzlamellen und Pfosten-Riegel-Fassade) begründen. Die Emissionen in der Gründung werden zum großen Teil durch den Stahlbeton in den Fundamenten und der Bodenplatte sowie durch das Gusseisen in den Pfählen verursacht. Die Treibhauspotenziale des Daches werden stark von den hier verbauten Bautenschutzmatte aus PUR-gebundenem Gummigranulat und der EPS-Dämmung bestimmt. Daher weisen die Außenwände, die Decken, die Gründung und das Dach ein hohes Optimierungspotenzial auf.

Bei der technischen Gebäudeausrüstung sind elektrische Anlagen für 40 % der Treibhausgase dieser Kostengruppe verantwortlich. Dies lässt sich durch die Elektro- und Datenkabel mit einer verbauten Gesamtlänge von knapp 40 km begründen.

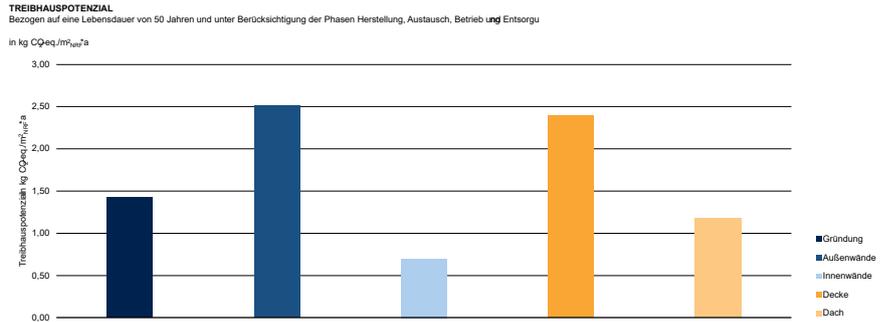


Abbildung 4: Spezifisches Treibhauspotenzial der Baukonstruktion des BUILDING LAB bezogen auf die Lebensdauer des Gebäudes von 50 Jahren und die Nettoraumfläche von 2.663 m<sup>2</sup>

### 4.3. Untersuchungsvarianten

Zur ökologischen Optimierung des Gebäudes wurden in enger Abstimmung mit den Praxispartnern verschiedene Varianten des Gebäudes erarbeitet. Die Entwicklung der Untersuchungsvarianten umfasste drei Strategien:

1. Einsatz nachwachsender Rohstoffe in der oberirdischen Baukonstruktion,
2. Einsatz von alternativen Zementzuschlägen in der unterirdischen Baukonstruktion,
3. Einsatz von erneuerbaren Energien im Betrieb.

Basierend auf diesen Strategien wurden 4 Gebäudevarianten erarbeitet, wobei die Varianten aufeinander aufbauen. In den folgenden Abschnitten werden die Untersuchungsvarianten genauer erläutert.

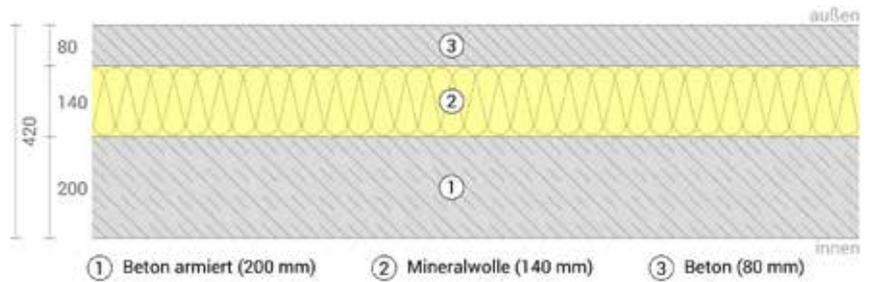
#### 4.3.1. Optimierung der oberirdischen Baukonstruktion

Die oberirdische Baukonstruktion umfasste die Bauteile Außenwände, Decken und Dach. Bei der Erarbeitung alternativer Bauteile wurden die Anforderungen an die Tragfähigkeit, Brandschutz und Bauphysik mitberücksichtigt und erfüllt. Alternativ zur bestehenden Stahlbetonbauweise des BUILDING LAB wurden die Komponenten in verschiedenen Holzbauweisen erarbeitet. Die Außenwände wurden in Holzmassiv- und Holzrahmenbauweise (s. Abbildung 5), das Dach in Holzmassivbauweise (s. Abbildung 6) und die Decken in Holzmassiv-, Holzrahmen- und Holz-Beton Hybridbauweise (s. Abbildung 7) ausgebildet. Die Pfosten-Riegel-Fassade aus Aluminium wurde bei einigen Berechnungen durch eine Lochfassade ersetzt. In diesem Fall entsprach die Fassade dem restlichen Aufbau der Außenwände.

Die verschiedenen Bauteilvarianten wurden in einer parametrischen Simulation abgebildet. Es bedeutet, dass ein Geometriemodell erstellt wurde, dem verschiedene Bauteilaufbauten zugewiesen wurden. Die Zuweisung erfolgte automatisiert durch das Simulationsprogramm. Aus der Kombination aller Bauteilvarianten ergaben sich 48 Konstruktionsvarianten. Zusätzlich wurde der Parameter „Nachtlüftung“ (ein/ aus) integriert, wodurch sich in Summe 96 Simulationsvarianten ableiten.

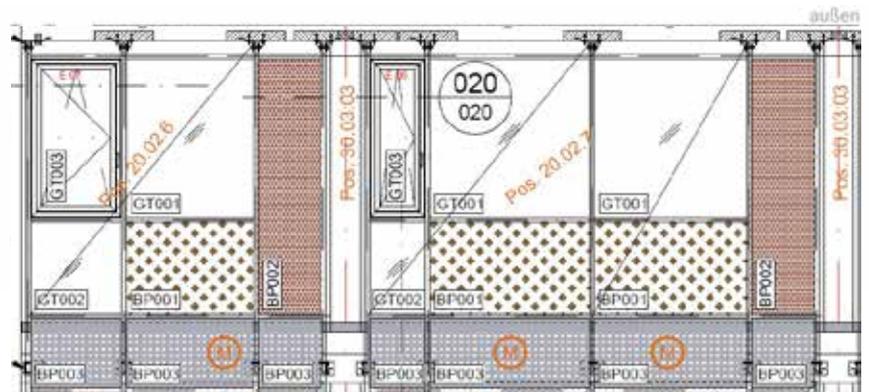
### Außenwand Stahlbeton

U-Wert: 0,264 W/(m²K) Dicke: 42,00 cm



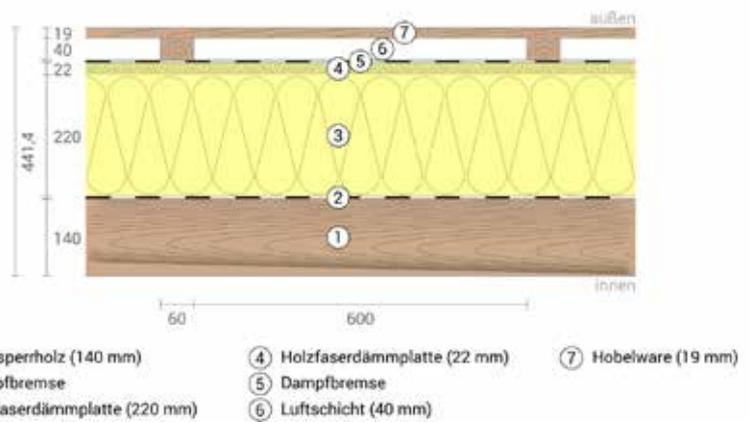
### Pfosten-Riegel Fassade (Aluminium)

U-Wert: 0,84 W/(m²K)



### Außenwand Holzmassiv

U-Wert: 0,142 W/(m²K) Dicke: 44,14 cm



### Außenwand Holzrahmen

U-Wert: 0,160 W/(m²K) Dicke: 41,33 cm

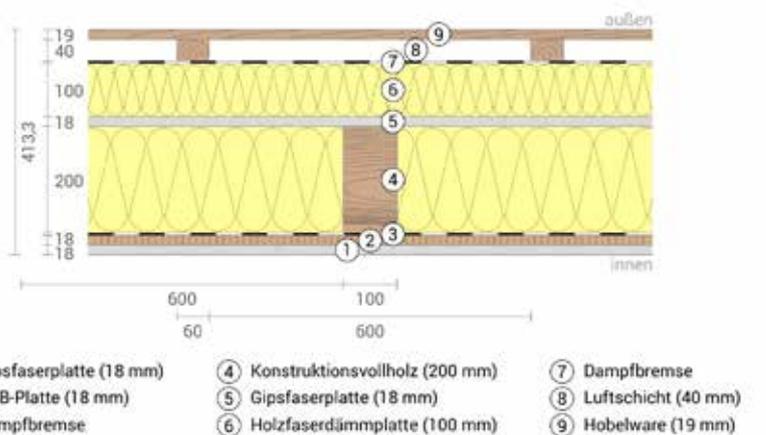
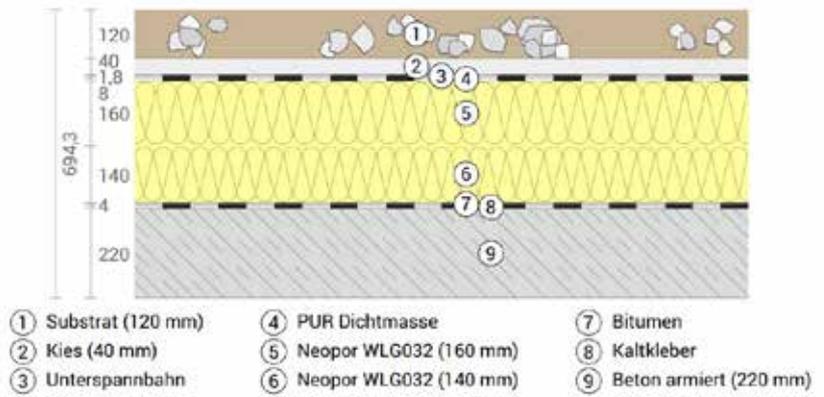


Abbildung 5: Varianten des Außenwandaufbaus

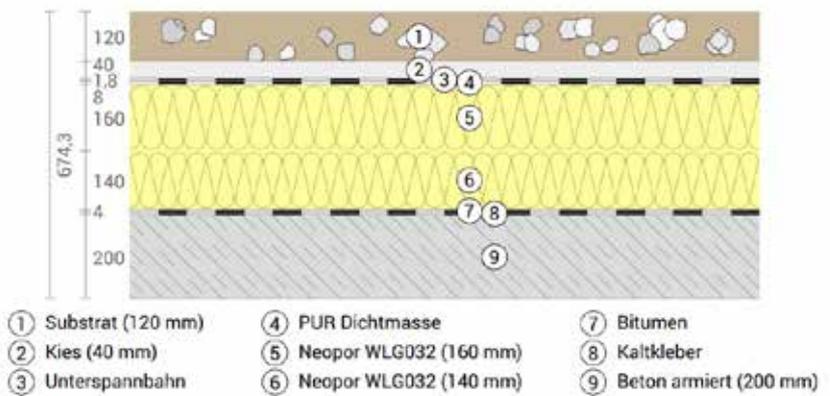
### Klimadach

U-Wert: 0,1 W/(m<sup>2</sup>K) Dicke: 69,43 cm



### Hohlraumdach

U-Wert: 0,1 W/(m<sup>2</sup>K) Dicke: 67,43 cm



### Dach Holzmassiv

U-Wert: 0,137 W/(m<sup>2</sup>K) Dicke: 50,08 cm

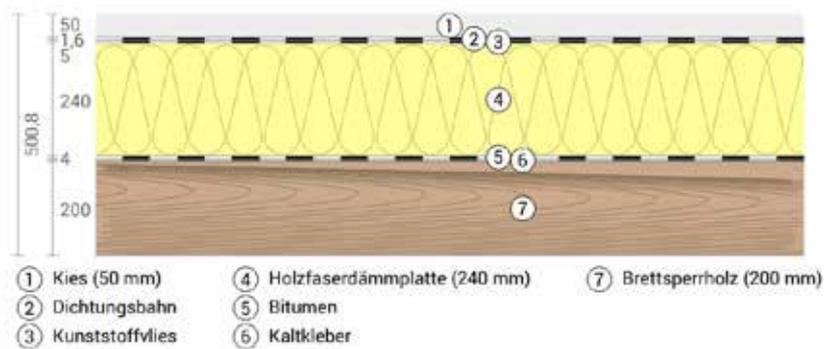
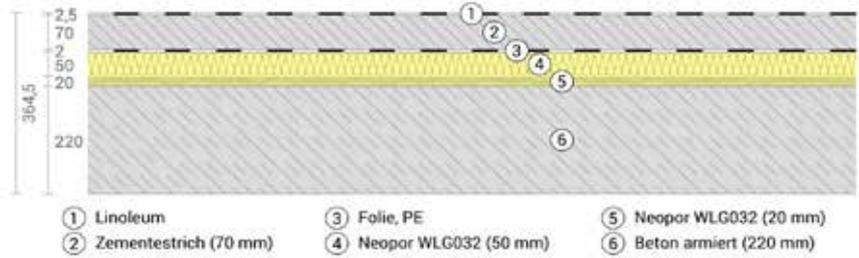


Abbildung 6: Varianten des Dachaufbaus

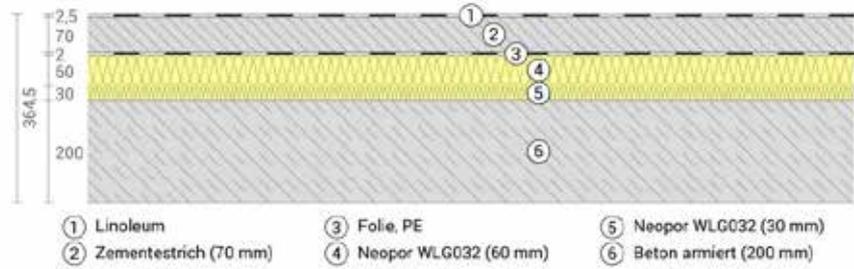
### Klimadecke

U-Wert: 0,391 W/(m²K) Dicke: 36,45 cm



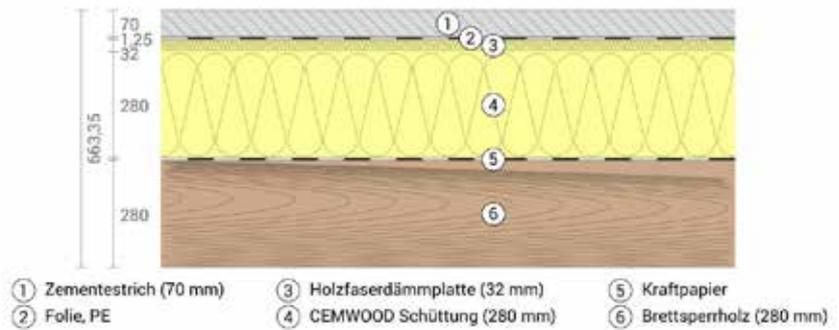
### Hohlraumdecke

U-Wert: 0,315 W/(m²K) Dicke: 36,45 cm



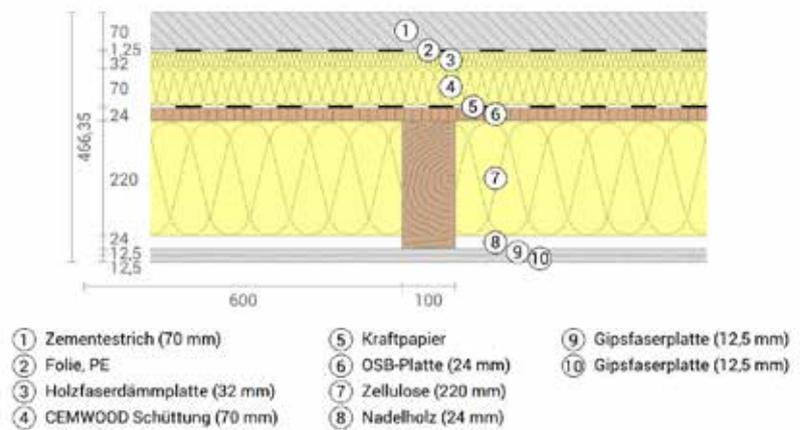
### Decke Holzmassiv

U-Wert: 0,176 W/(m²K) Dicke: 66,34 cm



### Decke Holzrahmen

U-Wert: 0,156 W/(m²K) Dicke: 46,64 cm



### Hybriddecke

U-Wert: 0,426 W/(m²K) Dicke: 36,87 cm

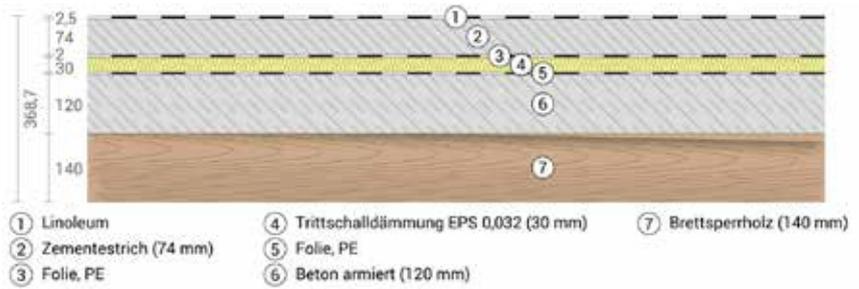


Abbildung 7: Varianten des Deckenaufbaus

Die Ergebnisse der parametrischen Simulation lassen sich der Abbildung 8 entnehmen. Ein jeder Punkt in der Grafik ist repräsentativ für jeweils eine baukonstruktive Variante. Das orangene Viereck, oben rechts, stellt den bestehenden Zustand des BUILDING LAB dar. Die dunkelblauen Punkte zeigen die Ergebnisse ohne eine Nachtlüftung. Die hellblauen Punkte verdeutlichen die Auswirkungen mit integrierter Nachtlüftung. Es ist eine deutliche Wolkenbildung der Ergebnisse zu erkennen. Diese resultiert daraus, dass der Nutzenergiebedarf mit einer integrierter Nachtlüftung absinkt.

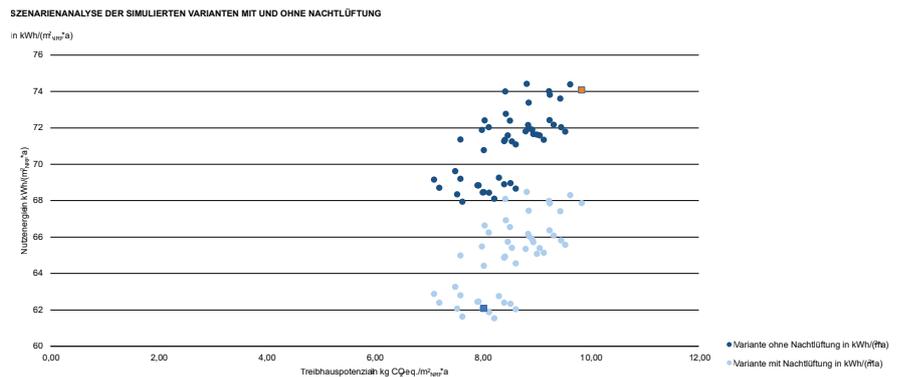


Abbildung 8: Szenarienanalyse der simulierten Varianten mit und ohne Nachtlüftung.

Die Treibhauspotenziale der untersuchten Baukonstruktionen liegen in einer Spanne zwischen 7,09 und 9,83 kg CO<sub>2</sub>-eq./m²NRF\*a). Den höchsten Wert weist die bestehende Stahlbetonbauweise des BUILDING LAB auf. Der kleinste Wert berechnet sich in der Variante mit den Decken und den sämtlichen Außenwänden in der Holzrahmenbauweise (Ersatz der Pfosten-Riegel Fassade durch eine Lochfassade) sowie dem Dach in der Holzmassivbauweise. Die einzelnen Werte der 96 Varianten können <https://nextimb.org/BuildingLab> entnommen werden.

Für weitere Analysen wurde gemeinsam mit den Praxispartnern die Variante mit sämtlichen Außenwänden und dem Dach in Holzmassivbauweise und den Decken in Holz-Beton Hybridbauweise gewählt – **im Weiteren Variante 1** genannt (s. dunkelblaues Viereck in Abbildung 8). Die Wahl begründet sich durch baukonstruktive und schallschutztechnische Aspekte. Die Variante 1 weist ein Treibhauspotenzial von 8 kg CO<sub>2</sub>-eq./m²NRF\*a) und den Nutzenergiebedarf von 62,07 kWh/(m²NRF\*a) bei integrierter Nachtlüftung auf. Damit liegt in dieser Variante eine Ersparnis von etwa 19% an grauen Emissionen und etwa 9% am Nutzenergiebedarf gegenüber dem bestehenden BUILDING LAB.

Die Verteilung der Nutzenergie nach Abnehmern ist in Abbildung 9 dargestellt. Im Vergleich zum existenten Gebäude kann durch die ausgewählte Baukonstruktion sowie die integrierte Nachtlüftung der Variante 1 der Heiz- und Kühlenergiebedarf gesenkt werden. Die Reduktion der Heizenergie in Variante 1 lässt sich durch die niedrigeren Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) der Außenwände begründen. Insbesondere der Ersatz der Pfosten-Riegel Fassade mit einem U-Wert von  $0,84 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  durch eine Lochfassade in der Holzmassivbauweise mit einem U-Wert von  $0,142 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  bietet ein großes energetisches Einsparpotenzial.

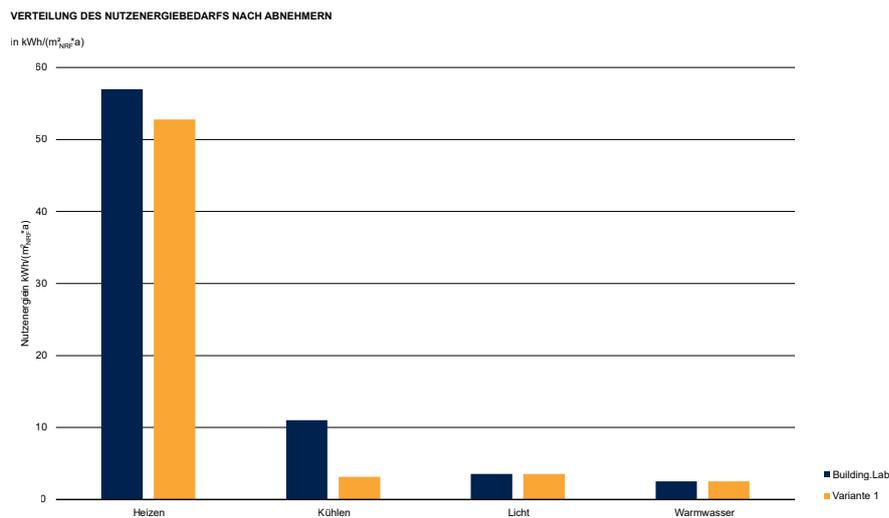


Abbildung 9: Verteilung des Nutzenergiebedarfs nach Abnehmern im BUILDING LAB und in der Variante 1

Durch den Einbau von Holzmassivaußenwänden reduziert sich die Netto- raumfläche des Gebäudes um  $14 \text{ m}^2$ , was einem Anteil von  $0,5\%$  der bestehenden Netto- raumfläche entspricht. Die durch den Bebauungsplan vorgegebene maximale Höhe des Gebäudes wird mit der Variante 1 eingehalten.

Zudem stellte sich die Frage nach den wirtschaftlichen Unterschieden der Variante 1 im Vergleich zum BUILDING LAB. Daher wurden die Herstellungskosten der optimierten Bauteile Außenwände (inkl. Pfosten-Riegel-Fassade), Decken und Dach beider Bauausführungen nach den Kennwerten des Baukostenindex (Stand 2022) berechnet. Demnach belaufen sich die Herstellungskosten der betrachteten Baukomponenten des BUILDING LAB auf etwa  $813.000 \text{ €}$ . Die Herstellungskosten der entsprechenden Komponenten der Variante 1 sind um  $277.000 \text{ €}$  höher. Allerdings weist die Variante 1 eine thermisch verbesserte Gebäudehülle sowie eine Nachtlüftung auf, sodass hier ein geringer Energiebedarf zu verzeichnen ist. Bei der Berücksichtigung dieses Aspekts können im Betrieb des Gebäudes über 50 Jahre etwa  $518.000 \text{ €}$  gegenüber dem bestehenden Gebäude eingespart werden. Bezogen auf die Lebenszyklusphasen Herstellung und Betrieb weist die Variante 1 somit  $241.000 \text{ €}$  günstigere Kosten als das BUILDING LAB auf.

#### 4.3.2. Optimierung der unterirdischen Baukonstruktion

Beim Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen in unterirdischen Baukomponenten bestehen große Herausforderungen. Daher wurde bei diesen Bauteilen die Strategie verfolgt, die ökologische Optimierung durch den Einsatz von alternativen Zuschlagstoffen im Zement zu erzielen.

Zement ist ein wesentlicher Bestandteil des Betons. Bei einem Beton mit der Festigkeitsklasse C30/37 macht Zement einen Massenanteil von etwa lediglich 13,3 M-% aus. Gleichzeitig hat Zement einen enormen Einfluss auf den ökologischen Fußabdruck von Beton: 80 – 84,5 % der Treibhausgase von Beton entstehen bei der Herstellung von Zement. Die Emissionsintensität beruht auf dem energieintensiven Brennen von Zementklinker sowie auf der rohstoffbedingten Prozessreaktion der Kalksteinentsäuerung. Zur Reduktion der Zementemissionen kann der Klinker durch andere Zuschlagstoffe ersetzt werden. Wird bei der Substitution von Klinker Hüttensand genutzt, wird der Zement als Hochofenzement (auch CEM III) bezeichnet.

Zu der unterirdischen Baukonstruktion zählen die Gründung, die Außenwände sowie die Innenwände im Untergeschoss und die Decke zwischen Unter- und Erdgeschoss. Zudem wurden aus brandschutztechnischen Gründen die Treppenhäuser ebenfalls durch den Einsatz von Hochofenzement optimiert. Die genannten Baukomponenten des BUILDING LAB weisen eine Zementmenge von 413 t auf. Mit dem Einsatz eines Hochofenzements statt eines Durchschnittszements könnten etwa 86 t CO<sub>2</sub>-eq. in der Herstellung eingespart werden. Dies entspricht etwa 8 % der grauen Emissionen der vorhandenen Baukonstruktion.

Für nachfolgende Analysen wird die Variante 1 (oberirdische Baukonstruktion aus nachwachsenden Baustoffen) mit den Maßnahmen der Zementoptimierung kombiniert – **im Weiteren Variante 2** genannt.

#### 4.3.3. Erneuerbare Energien im Betrieb

Zur Senkung der betriebsbedingten Emissionen des Gebäudes wurde aufbauend auf den Simulationsergebnissen der Variante 2 (Nutzenergiebedarf der Variante 2 entspricht dem der Variante 1) ein alternatives Energiekonzept erarbeitet (s. Abbildung 10). Dieses sieht insbesondere die Nutzung erneuerbarer Energien vor. Die Wärmeenergie für das Warmwasser und die Raumwärme wird durch eine Sole-Wasser-Wärmepumpe zur Verfügung gestellt. Ebenfalls kann die Wärmepumpe zum Kühlen genutzt werden. Die Wärme bzw. die Kälte werden über flächige Verteilungssysteme in die Räume abgegeben. Die Sole der Wasserwärmepumpe zirkuliert in den thermisch aktivierten Energiepfählen. Für die Energiepfähle könnten die am BUILDING LAB bereits verbauten Gusspfähle genutzt werden. Zur Erreichung der benötigten Wärmeleistung der Variante 2 ist eine Sondenlänge von insgesamt 1.165 m notwendig. Die Gusspfähle im BUILDING LAB weisen eine Länge von 1.095 m auf. Damit wären zur Realisierung des vorgeschlagenen Energiekonzepts zusätzliche Sonden mit einer Länge von 70 m notwendig.

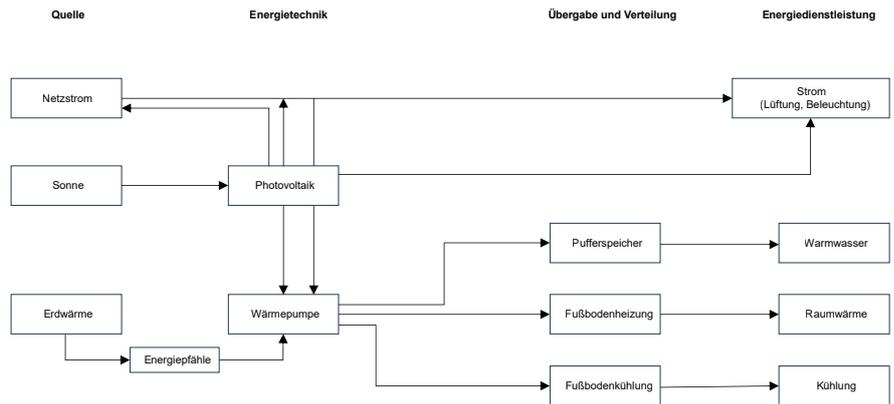


Abbildung 10: Alternatives Energiekonzept unter Einbezug erneuerbarer Energien

Die Integration des vorgestellten Energiekonzepts in die Variante 2 liefert die Variante 3. Die Annahmen zur Berechnung des Endenergiebedarfs der **Variante 3** sind in Tabelle 1 vorgestellt. Der Gesamtbedarf der Endenergie sinkt von etwa 87 kWh/(m<sup>2</sup>NRF\*a) beim BUILDING LAB auf 24 kWh/(m<sup>2</sup>NRF\*a) bei der Variante 3 (s. Abbildung 11). Dies entspricht einer Einsparung des Endenergiebedarfs von etwa 72% gegenüber dem bestehenden Gebäude. Insbesondere der Wärmebedarf weist ein hohes Einsparpotenzial auf.

Dies lässt sich durch die thermisch optimierte Gebäudehülle und durch den Einsatz der Sole-Wasser-Wärmepumpe begründen.

**VERTEILUNG DES ENDENERGIEBEDARFS NACH ABNEHMERN**

in kWh/(m<sup>2</sup>NRF\*a)

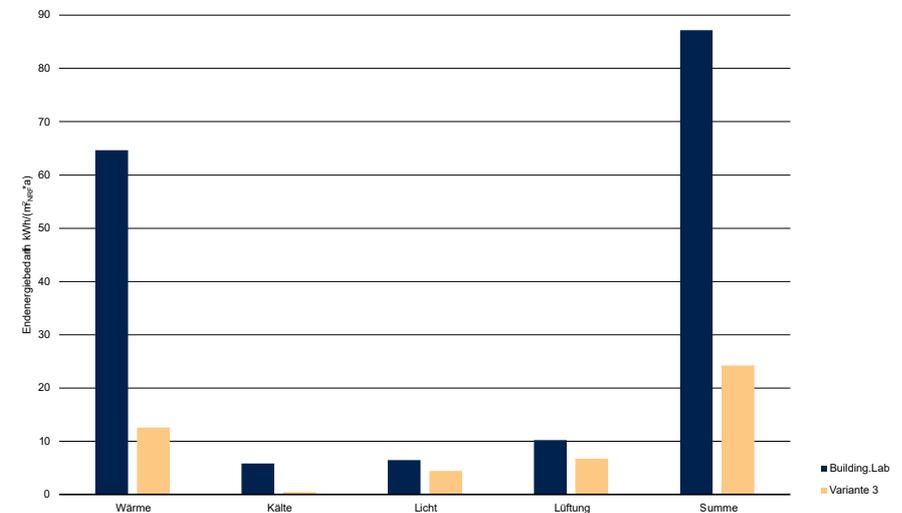


Abbildung 11: Verteilung des Endenergiebedarfs nach Abnehmern im BUILDING LAB und in der Variante 3

Zur Abdeckung des Strombedarfs wird auf dem Dach zusätzlich eine Photovoltaikanlage (PV-Anlage) installiert. Diese versorgt die Wärmepumpe sowie sonstige Stromabnehmer, wie Beleuchtung und Kühlung. Bei einem Stromüberschuss bzw. einem Strommangel wird der Netzstrom bedient. Eine Batterie zur Stromspeicherung ist nicht vorgesehen. Die PV-Module weisen eine Fläche von 333 m<sup>2</sup> auf. Die projizierte Fläche von 421 m<sup>2</sup> entspricht 75% der gesamten Dachfläche des BUILDING LAB. Die beschriebene PV-Anlage liefert eine Energiemenge von 38.675 kWh/a. Damit lassen sich 60% des jährlichen Endenergiebedarfs durch die PV-Module abdecken.

**Tabelle 1: Annahmen zur Berechnung der Endenergie**

| Technologie            | Annahmen   |
|------------------------|--|
| Sole-Wasser-Wärmepumpe | Gesamtleistung: 70 kW; COP-Heizen = 4,4; COP-Kühlen = 6  |
| Energiepfähle          | 60 W/m Sonde; Bedarf Sondenlänge = 1.165 m;  |
| PV-Module              | Fläche der PV-Module = 333 m <sup>2</sup> ; Winkel = 40°; Modulhöhe = 2 m; Abstand zwischen den Modulen = 2 m; projizierte Fläche = 421 m <sup>2</sup> |

In Variante 3 wird der verbleibende Bedarf an Endenergie von etwa 25.890 kWh/a mit konventionellem Netzstrom abgedeckt. Wird zur Abdeckung hingegen Ökostrom eingesetzt, können weitere Treibhausgasemissionen eingespart werden. Diese Option wird in **Variante 4** betrachtet.

Der Vergleich der Treibhausgasemissionen aller Varianten (BUILDING LAB und Varianten 1 – 4) wird in Kapitel 4.3.4 betrachtet.

#### 4.3.4. Treibhausgasemissionen der Varianten im Vergleich

Zusammenfassend werden die zuvor beschriebenen Varianten in der Tabelle 2 dargestellt.

**Tabelle 2: Übersicht der untersuchten Varianten**

|  | Baukonstruktion   | Energiekonzept  |
|--|---|---|
| BUILDING LAB   | Stahlbeton, Sandwich-wände<br>Pfosten-Riegel Fassade aus Alu  | Keine Nachtlüftung<br>Luft-Wasser-Wärmepumpen<br>Gasbrennwertkessel<br>Betonkernaktivierung   |
| Variante 1<br>(Holz)   | Außenwände + Dach: Holzmassiv<br>Decken: Holz-Beton-Hybrid  | Nachtlüftung<br>Luft-Wasser-Wärmepumpen<br>Gasbrennwertkessel<br>Betonkernaktivierung   |
| Variante 2<br>(Holz + CEM III)                                   | Außenwände + Dach: Holzmassiv<br>Decken: Holz-Beton-Hybrid<br>Unterirdische BauKo mit CEM III<br>Zement | Nachtlüftung<br>Luft-Wasser-Wärmepumpen<br>Gasbrennwertkessel<br>Betonkernaktivierung   |
| Variante 3<br>(Holz + CEM III +<br>Energiekonzept)               | Außenwände + Dach: Holzmassiv<br>Decken: Holz-Beton-Hybrid<br>Unterirdische BauKo mit CEM III<br>Zement | Nachtlüftung<br>Sole-Wasser-Wärmepumpe<br>Thermische Pfahlaktivierung<br>PV-Module (decken 60% des<br>jährlichen Energiebedarfs ab)             |
| Variante 4<br>(Holz + CEM III +<br>Energiekonzept<br>+ Ökostrom) | Außenwände + Dach: Holzmassiv<br>Decken: Holz-Beton-Hybrid<br>Unterirdische BauKo mit CEM III<br>Zement | Nachtlüftung<br>Sole-Wasser-Wärmepumpe<br>Thermische Pfahlaktivierung<br>PV-Module (decken 60% des<br>jährlichen Energiebedarfs ab)<br>Ökostrom |

Abbildung 12 veranschaulicht das Treibhauspotenzial der untersuchten Varianten im Vergleich. Das bestehende BUILDING LAB weist Emissionen in einer Höhe von 4.136 t CO<sub>2</sub>-eq. auf. Die Maßnahmen der Variante 4 führen zu einer Reduktion der Emissionen auf 1.241 t CO<sub>2</sub>-eq. Damit entspricht die

Einsparung von 2.895 t CO<sub>2</sub>-eq. einem Anteil von etwa 70% der Emissionen des bestehenden BUILDING LAB Gebäudes. Zwar sind in Variante 3 und 4 eine höhere Menge an Emissionen für die technische Gebäudeausrüstung zu verzeichnen. Die TGA des alternativen Energiekonzepts führt jedoch dazu, dass das Treibhauspotenzial in der Betriebsphase deutlich reduziert werden kann: von 2.862 t CO<sub>2</sub>-eq. im bestehenden BUILDING LAB auf 13 t CO<sub>2</sub>-eq. in der Variante 4. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass bei der Berechnung die dynamische Entwicklung der Treibhausgase im Energiemix keine Berücksichtigung fand.

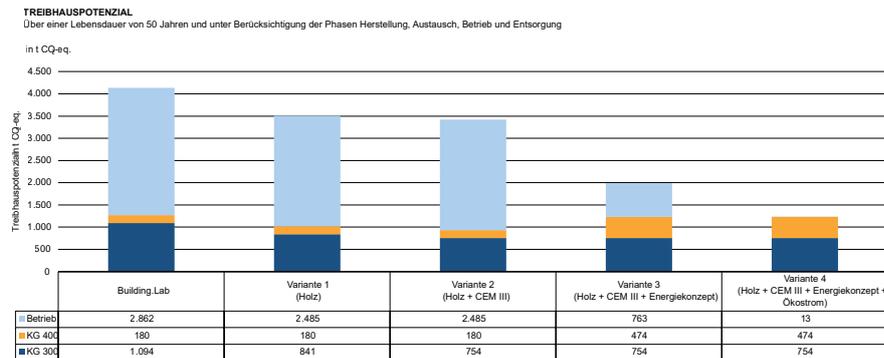


Abbildung 12: Treibhauspotenzial der untersuchten Varianten in t CO<sub>2</sub>-eq. im Vergleich

Umweltbelastungen führen zu hohen Kosten für die Gesellschaft, z.B. durch umweltbedingte Gesundheits- und Materialschäden, Ernteausfälle oder Schäden an Ökosystemen. Die Treibhausgase als Teil dieser Umweltbelastungen verschärfen den Klimawandel und verursachen die so genannten Klimakosten. Das Umweltbundesamt gibt für das Jahr 2022 Klimakosten mit einem Wert von 809 €/t CO<sub>2</sub> an. Die in Variante 4 insgesamt eingesparten Emissionen von 2.895 t an CO<sub>2</sub>-eq. würden somit Klimakosten in einer Höhe von etwa 2,3 Millionen € vermeiden.

# V. Kreislauffähigkeit des Gebäudes

Die Kreislauffähigkeit des BUILDING LAB Gebäudes wurde mit dem Urban Mining Index (UMI) von Anja Rosen bewertet. Hierbei wurden folgende repräsentative Bauteile betrachtet:

- Gründung
- Außenwände in Sandwichbauweise
- Innenwände aus Ortbeton
- Hohlraumdecken
- Flachdach (ausgebildet als Hohlraumdecke).

Die hier vorgestellten Bauteile weisen einen Massenanteil von 51 % des Gebäudes auf. Der Baustoff Beton ist mit 91 % der Masse der betrachteten Bauteile besonders dominierend. Diesem folgen Stahl mit 4,41 % und das Vegetationssubstrat mit 2,26 % der Bauteilmasse.

Die Pre-Use Phase des Gebäudes kann, wie folgt, beschrieben werden: etwa 93 % der Materialien der untersuchten Bauteile stammen aus Primärrohstoffen. Sekundärrohstoffe weisen einen Massenanteil von 6,4 % auf und lassen sich anteilig auf die Materialien Stahl, Steinwolle und Ziegelsplitt zurückführen. Lediglich 0,3 % der Materialien sind aus nachwachsenden Rohstoffen (die Linoleumböden und der Hummusanteil der Substratschicht).

Im Post-Use können zukünftig der Methode des UMI nach 25,1% hochwertig zurückgewonnen werden, 35,9% werden dem Downcycling zugeführt und 0,2% werden dem End of Life-Szenario energetische Verbrennung von nachwachsenden Wertstoffen zugeordnet. Die restlichen Anteile setzen sich aus 38,7% Deponierung und 0,1% energetischer Verbrennung fossiler Rohstoffe zusammen.

Die Bewertung der Kreislauffähigkeit auf der Gebäudeebene basiert auf den Kreislaufpotenzialen aller zuvor berechneter Bauteile nach ihrem Massenanteil. Hieraus ergibt sich für das BUILDING LAB Gebäude ein Kreislaufpotenzial von 24,4 % (das theoretische Maximum beträgt 100 %). Bei diesem Wert spiegelt sich der bereits erwähnte, hohe Anteil an Beton (91 %) in der Bauteilmasse wider. Denn dieser besteht zu 100 % aus Primärrohstoffen und hat im besten Fall, bei der Annahme einer sortenreinen Rückgewinnung, ein Recyclingpotenzial von 40 %.

# VI. Empfehlungen und Handlungshinweise

Auf Basis der Ergebnisse des durchgeführten Forschungsprojekts BUILDING LAB können folgende Empfehlungen und Handlungshinweise für zukünftige Projekte, die ein möglichst großes Maß an Nachhaltigkeit aufweisen sollen, getroffen werden:

- die Durchführung der Lebenszyklusanalyse muss bereits in den frühen Planungsphasen eines Gebäudes stattfinden. Somit kann die Gebäudekonzeption technisch und wirtschaftlich rechtzeitig angepasst werden.
- Es sollten mehrere Varianten der Gebäudekonzeption (Baukonstruktion und technische Gebäudeausrüstung/ Energiekonzept) hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen berechnet werden. Hieraus kann die optimale Variante abgeleitet werden.
- Die Berechnungen der grauen Emissionen (Herstellung, Nutzung, Abriss und Entsorgung) sollten parallel zu den Berechnungen der betriebsbedingten Emissionen stattfinden. Damit lassen sich ganzheitliche Ergebnisse generieren, die den gesamten Lebenszyklus der Gebäude abbilden.
- Bei der Auslegung der Baukonstruktion empfiehlt sich der Einsatz nachwachsender Materialien, die wiederverwendbar bzw. wiederverwertbar sind. Damit reduzieren sich die Emissionen eines Gebäudes.
- Der Einsatz der Materialien sollte kritisch geprüft werden. Sowohl die Wahl der Materialienart als auch ihrer Mengen haben einen großen Einfluss auf die Treibhausgase eines Gebäudes. So können Verschattungselemente aus Aluminium auf der Nordseite eines Gebäudes durch innenliegende Raffstoren ersetzt werden; die mechanisch schützende Funktion der Bautenschutzmatte (aus gebundenem Gummigranulat) auf einem Dach durch Vliesmatten erfolgen; die Menge an verbauten Elektro- und Datenkabeln bedarfsgerecht reduziert werden. Diese Maßnahmen bringen eine deutliche Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen mit sich.
- Der Einsatz von Recyclingbeton bringt aktuell keine signifikanten Emissionsvorteile mit sich, denn für die schlechte Klimabilanz des Betons ist insbesondere der Zement verantwortlich. Daher ist beim Einsatz von Beton auf Rezepturen mit einem klimafreundlicheren Zement zu achten. Dies könnte beispielweise ein Hochofenzement (CEM III) sein. Dennoch schützt ein Recyclingbeton die Ressourcen, wobei hier auf kurze Transportwege zu achten ist.
- Um Ressourcen zu sparen, sollte die Kreislauffähigkeit eines Gebäudes bereits in der Planung mitgedacht werden. Dabei sind kreislauffähige Materialien zu wählen, lösbare Verbindungen umzusetzen und Verschmutzungen zwischen den Bauteilschichten zu vermeiden. Dies schont nicht nur die Umwelt, sondern erhöht auch den (Rest)Wert der verbauten Materialien.

- Der Energiebedarf während des Betriebs eines Gebäudes sollte, so weit wie möglich, reduziert werden. Die Verwendung von erneuerbaren Energiequellen senkt die betriebsbedingten Emissionen weiterhin signifikant.

Die aufgeführten Handlungsempfehlungen sollen künftige Projekte der Hochbauwirtschaft bei der Erreichung der forcierten Nachhaltigkeitsziele unterstützen.

## VII. Zusammenfassung und Fazit

Der Bayerische Bauindustrieverband errichtete mit dem BUILDING LAB in Regensburg ein Innovationszentrum zur Digitalisierung des Bauens. Ziel des hier vorgestellten Forschungsprojekts war es, anhand dieses Bauprojekts Handlungsempfehlungen für zukünftige Bauten hinsichtlich der Emissionen sowie der Kreislauffähigkeit zu erarbeiten. Hierzu wurde das bestehende BUILDING LAB über seinen Lebenszyklus ökologisch bewertet und optimiert.

Die Berechnungen der Emissionen des Gebäudes über seine Lebenszyklusphasen Herstellung, Betrieb und Abriss/ Entsorgung erfolgten mittels der Lebenszyklusanalyse. Zur ökologischen Optimierung der oberirdischen Baukonstruktion wurde der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen im Rahmen einer parametrischen Simulation untersucht. Bei der Simulation wurden gleichzeitig die grauen Emissionen konstruktiver Alternativen als auch der dazugehörige Nutzenergiebedarf berechnet. Damit wurde der gesamte Lebenszyklus des Gebäudes untersucht. Der automatisierte Prozess bildete insgesamt 96 baukonstruktive Varianten ab. Gemeinsam mit den Projektpartnern aus der Bauindustrie wurde eine Variante (Variante 1) als Basis für weiterführende Analysen ausgewählt. Auf Grundlage der Variante 1 wurden die unterirdische Konstruktion sowie das Energiekonzept weiterentwickelt. Hierbei lag der Fokus auf dem Einsatz von alternativen Zuschlagstoffen im Zement sowie auf dem Einsatz regenerativer Energieformen. Schließlich wurde das BUILDING LAB mittels des Urban Mining Index (nach Anja Rosen) bezüglich seiner Kreislauffähigkeit bewertet.

Die Lebenszyklusanalyse des BUILDING LAB zeigte, dass das Gebäude über sein gesamtes Leben mit einer angenommenen Dauer von 50 Jahren (Herstellung, Nutzung und Betrieb, Abriss und Entsorgung) 4.136 t an CO<sub>2</sub>-eq. verursacht. Der größte Anteil von 69 % lässt sich auf den Betrieb des Gebäudes durch Strom und Gas zurückführen. Weitere 27 % der Treibhausgase entfallen auf die Baukonstruktion und 4 % auf die technische Gebäudeausrüstung. Bei der Baukonstruktion nehmen insbesondere die Außenwände und Decken bedingt durch die verbauten Materialien Aluminium, Beton, Stahl und Estrich einen großen Einfluss auf den ökologischen Fußabdruck. Elektro- und Datenkabel haben mit einer gesamten Länge von etwa 40 km einen Anteil von 40 % der Treibhausgase der gesamten technischen Gebäudeausrüstung.

Die ökologische Optimierung des BUILDING LAB führte zu einer Variante (Variante 4), welche über den angenommenen Zeitraum von 50 Jahren 1.240 t an CO<sub>2</sub>-eq. emittiert. Dies entspricht einer Reduktion der Treibhausgase von 70 % gegenüber dem bestehenden Gebäude. Damit können Klimakosten in einer Höhe von 2,3 Millionen € eingespart werden. Zudem weist die Variante 4 in der Herstellung und dem Betrieb um 241.000 € geringere Kosten gegenüber dem BUILDING LAB auf. Diese Ergebnisse ließen sich durch drei Strategien erzielen:

1. Mittels der parametrischen Simulation wurde die baukonstruktive Ausführung mit Außenwänden als Lochfassade und dem Dach jeweils in der

Holzmassivbauweise sowie den Decken in der Holz-Beton-Hybridbauweise als ökologisches Optimum ermittelt.

2. Bei der unterirdischen Baukonstruktion zeigte der Einsatz von Hochofenzement (CEM III) im Beton eine Senkung der Emissionen um etwa 86 t an CO<sub>2</sub>-eq. gegenüber dem Durchschnittszement.
3. Die größte Wirkung zeigte die Anpassung des Energiekonzepts. Durch die Implementierung einer Sole-Wasser-Wärmepumpe, Energiepfählen, einer Nachtlüftung und PV-Modulen sowie durch die Nutzung von Ökostrom ließen sich über den Zeitraum von 50 Jahren 2.849 t an CO<sub>2</sub>-eq. vermeiden.

Die Kreislauffähigkeit des BUILDING LAB konnte mit einem Wert von 24,4 % bemessen werden. Der Wert wird insbesondere durch den hohen Massenanteil des Betons in der Baukonstruktion begründet.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Betrieb eines Gebäudes weiterhin eine große Wirkung auf seinen ökologischen Fußabdruck hat. Daher muss bei der Konzeption von Gebäuden der Energiebedarf zunächst möglichst weit reduziert und anschließend mit erneuerbaren Energien abgedeckt werden. Doch mit einem Zuwachs an erneuerbaren Energien im deutschen Energiemix verlagert sich die Gewichtung der Emissionen weg vom Betrieb hin zu den grauen Emissionen in der Baukonstruktion sowie der technischen Gebäudeausrüstung. Daher ist die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes – von seiner Herstellung über die Nutzung und den Betrieb bis einschließlich dem Abbruch und Entsorgung – unabdingbar. Dabei ist zu beachten, dass die Berechnungen für mehrere Varianten und möglichst früh im Planungsprozess durchzuführen sind. Auf diese Weise kann, nach Bedarf, technisch und wirtschaftlich rechtzeitig in den Entwurf eines Gebäudes eingegriffen werden.

Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse, dass Gebäude eine entscheidende Rolle bei der Minimierung von Treibhausgasemissionen und dem Energieverbrauch einnehmen. Um dem Klimawandel entgegenzuwirken, ist es also von großer Bedeutung diese Potenziale in der Zukunft verstärkt zu nutzen und weiter auszubauen.

## VIII. Tabellenverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 1: Annahmen zur Berechnung der Endenergie | 21 |
| Tabelle 2: Übersicht der untersuchten Varianten   | 22 |

## IX. Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Das BUILDING LAB in Regensburg  | 8  |
| Abbildung 2: Lebenszyklus eines Gebäudes   | 10 |
| Abbildung 3: Schematische Darstellung des Urban Mining Index (UMI) von Anja Rosen  | 12 |
| Abbildung 4: Spezifisches Treibhauspotenzial der Baukonstruktion des Building.Lab bezogen auf die Lebensdauer des Gebäudes von 50 Jahren und die Nettonraumfläche von 2.663 m <sup>2</sup> | 14 |
| Abbildung 5: Varianten des Außenwandaufbaus  | 15 |
| Abbildung 6: Varianten des Dachaufbaus   | 16 |
| Abbildung 7: Varianten des Deckenaufbaus   | 17 |
| Abbildung 8: Szenarienanalyse der simulierten Varianten mit und ohne Nachtlüftung  | 18 |
| Abbildung 9: Verteilung des Nutzenergiebedarfs nach Abnehmern im Building.Lab und in der Variante 1  | 19 |
| Abbildung 10: Alternatives Energiekonzept unter Einbezug erneuerbarer Energien   | 20 |
| Abbildung 11: Verteilung des Endenergiebedarfs nach Abnehmern im Building.Lab und in der Variante 3  | 21 |
| Abbildung 12: Treibhauspotenzial der untersuchten Varianten in t CO <sub>2</sub> -eq. im Vergleich   | 23 |



## Impressum



Ansprechpartner bei der Technischen Universität München  
und dem Bayerischen Bauindustrieverband:

Technische Universität München  
School of Engineering and Design  
Department of Architecture  
Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen

### Autor/innen

Iryna Takser M.Sc.  
iryna.takser@tum.de  
Tel.: +49 89 289-23955

Prof. Dr.-Ing. Werner Lang  
sekretariat.enpb.bgu@tum.de  
Tel.: +49 89 289-23990

### Industriepartner

Gebr. Donhauser Bau GmbH & Co. KG  
Ettmannsdorfer Str. 47  
92421 Schwandorf  
www.donhauser.de

### Abteilung Projektplattform Energie + Innovation

Dipl.-Ing. Sandro Haseloff, CREA®  
s.haseloff@ppe.tum.de  
+49 89 289-28153

### Abteilung Hochbau und Energie

Dipl.-Ing. (FH)/MBA & Eng. Werner Goller  
w.goller@bauindustrie-bayern.de  
+49 89 235003-41



### Dank

Das Projekt wurde von der Bayerischen Bauwirtschaft gefördert.

Wir danken den Projektpartnern Bayerischer Bauindustrieverband e.V. (München), Gebr. Donhauser Bau GmbH & Co. KG (Schwandorf) und Lang Hugger Rampp Architekten GmbH (München) für die Unterstützung bei der Durchführung des Projekts und für das Einbringen Ihres Praxiswissens.

### Gestaltung

Dipl.-Des. (FH) Daniel Schwaiger

### Herausgeber

Bayerischer Bauindustrieverband e.V. (BBIV)  
Oberanger 32 | 80331 München  
www.bauindustrie-bayern.de

### Verlag

Technische Universität München  
TUM School of Engineering and Design  
Arcisstr. 21  
80333 München  
www.ed.tum.de, kommunikation@ed.tum.de

ISBN 978-3-948278-44-1  
© BBIV, 1. Auflage, Juni 2024

